



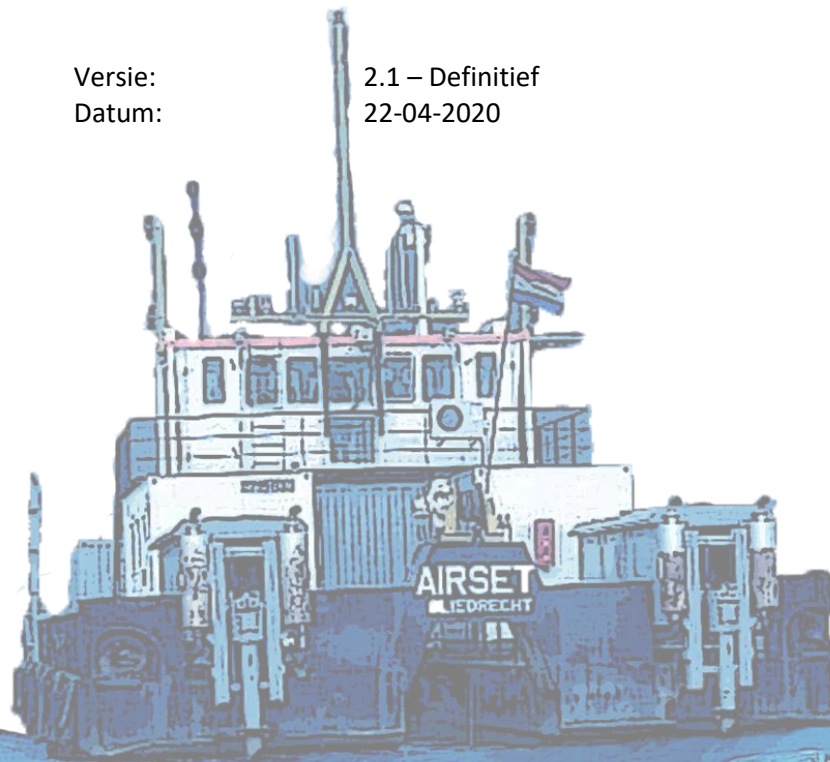
GRONINGEN SEAPORTS

Effectiviteit verlaging zanddrempel

Onderzoeksrapport ter ondersteuning van
het adviesrapport voor het havenmondingsontwerp

Opgesteld door:	S. Steenhuis
Opleiding:	Built Environment (major: Civiele Techniek)
Schoolinstituut:	Hanzehogeschool Groningen
Studentnummer:	355584
E-mailadres:	s.steenhuis@st.hanze.nl
Praktijkbegeleider:	J. van Dijken
Afstudeerbegeleider:	D. Ernsten
Locatie:	Handelskade oost 1, Delfzijl

Versie:	2.1 – Definitief
Datum:	22-04-2020



Voorwoord

Dit onderzoeksrapport bevat het onderzoek: 'Effectiviteit verlaging zanddrempel'. Dit onderzoek is uitgevoerd tijdens de afstudeerperiode op de opleiding 'Built Environment' (major: Civiele Techniek). Het onderzoek heeft plaatsgevonden bij het havenbedrijf Groningen Seaports.

Op basis van interesses op het gebied van baggeren, waterbouw en grondmechanica ben ik destijds in gesprek gegaan met Groningen Seaports. In het gesprek kwam het vraagstuk van dit onderzoeksrapport naar voren en de motivatie hiervoor was meteen aanwezig. Door het uitdagende en complexe vraagstuk heeft deze periode ertoe geleid dat ik mijzelf heb ontwikkeld als professional. Door het uitvoeren van literatuuronderzoek, interviews met externe partijen, praktijkervaring (op baggerschepen, de peilboot en bodemonderzoek) en modelleringen heb ik veel geleerd over de eerdergenoemde vakgebieden.

Groningen Seaports is voor mij een ideaal platform geweest om mij breed te oriënteren, om de juiste connecties te leggen en om praktijkervaring op te doen. Graag zou ik Groningen Seaports, met name de collega's op de afdeling Port Technology, willen bedanken dat ik de kans heb gekregen om in dit bedrijf af te studeren. Vanuit deze organisatie wil ik met name mijn afstudeerbegeleider J. van Dijken bedanken wegens zijn begeleiding, ondersteuning en proactiviteit om mij ervaringen op te laten doen. Tevens heb ik voor dit onderzoek veel gehad aan de ervaringen en werk van/op de peilboot, hiervoor wil ik de surveyors bedanken.

Tijdens de afstudeerperiode was ik prettig verbaasd naar de bereidbaarheid van externe partijen om mij te helpen in dit onderzoek. Allereerst wil ik de werknemers R. Meinsma en R. Barth van Fugro bedanken voor de hulp tijdens dit onderzoek. Daarnaast wil ik de directeur van de onderzoeksinstantie Waterproof B.V. bedanken voor zijn hulp. Verder wil ik de baggeraars en projectleider in de haven van Delfzijl van Baggerbedrijf de Boer bedanken voor hun openheid en praktijkervaringen.

Stefan Steenhuis

Midwolda, 27 maart 2020

Samenvatting

Het Onderzoek de Zanddrempel bevat een onderzoek naar de verdieping van de zanddrempel Paapsand Süd in de haven van Delfzijl. Hierbij wordt gekeken naar de effecten op de bestaande sliblaag (die zich bevindt achter de drempel) en extra aanslibbing en aanzanding. Dit onderzoek is gebaseerd op hypothesen van onderzoekers, die stellen dat bij verlaging van de zanddrempel de sliblaag natuurlijk zal afstromen. Door deze hypothesen is de doelstelling van dit onderzoek om uit te zoeken wat de effecten zijn van de drempelverlaging op de baggerintensiteit, economische aspecten en de havendiepte. Het 'probleem' in de haven van Delfzijl is dat de baggerkosten relatief hoog zijn ten opzichte van de huidige havendiepte.

Om de effecten van de verlaging te onderzoeken is allereerst een literaire studie uitgevoerd. In dit literatuuronderzoek zijn wetenschappelijke artikelen onderzocht over bijvoorbeeld: de vloeibare sliblaag, sedimenttransportprocessen en het ontstaan van stroming in de vloeibare sliblaag. Met behulp van interviews met deskundige onderzoekers is vastgesteld welke modellen antwoord konden geven op de hoofdvraag. De modellen TCMUD, SEDTUBE en SILTHAR worden in dit onderzoek gebruikt om hoofdzakelijk de uitstroom van slib (TCMUD), extra aanzanding (SEDTUBE) en de extra aanslibbing (SILTHAR) te berekenen. Om de modellen op de werkelijke situatie te baseren zijn de modellen gekalibreerd door middel van praktijksituaties. Bij het TCMUD-model is er gebruik gemaakt van een analyse van een eerdere verlaging van de drempel, bij het SEDTUBE-model zijn de (normaal voortdurende) baggerwerkzaamheden stilgelegd om de aanzanding te bepalen en bij het SILTHAR-model is de aanslibbing vergeleken met de baggerintensiteit van de haven die jaarlijks wordt bijgehouden. De onderzoeksresultaten worden vervolgens vergeleken met een multi criteria analyse om op deze wijze een aanbeveling te doen van de beste keuze van het ontwerp van de havenmond.

Uit het onderzoek blijkt dat er natuurlijke afstroming (éénmalig) van het slibmateriaal plaatsvindt door middel van een dichtheidsstroom die opgewekt wordt door de normale werkzaamheden van het baggerschip de Airset. Het blijkt dat de inhoud van deze natuurlijke afstroming (éénmalig) van de sliblaag tussen de 110.000 m³ tot 440.000 m³ ligt. De afstroming zal plaatsvinden onder een hoek en bij een diepere drempeldiepte steeds van verder in de haven komen. Door middel van deze afstroming zal de top van de (op dit moment maatgevende) sliblaag dieper komen te liggen, waardoor de havendiepte wordt vergroot. Ook is de drempelverlaging positief op de balans van de havendiepte bij toepassing van het al eerder onderzochte 'door het slibvaren'. Een nadeel van de drempelverlaging is dat er meer aanslibbing zal plaatsvinden. Deze extra aanslibbing ligt tussen 1.000 m³/jaar tot 163.000 m³/jaar. Van extra aanzanding is minder sprake. Concluderend kan worden gesteld dat de drempelverlaging positief is, vooral wanneer de juiste balans van de drempelhoogte wordt toegepast.

Met dit onderzoek is er voor het eerst op een wetenschappelijke manier gekeken naar de verlaging van de zanddrempel. Het onderzoek benadert de effecten van deze verlaging en geeft een indicatie van de kwantiteit van deze effecten. Het onderzoek geeft de kans weer om door een slimme, duurzame baggerstrategie de havendiepte te vergroten en op deze wijze de haven economisch te stimuleren. In een vervolgonderzoek moeten de onderzoeksresultaten worden bevestigd. Dit kan door middel van een theoretisch onderzoek, waarin complexere modellen worden gebruikt en onderzoekers met meer kennis en ervaring naar deze mogelijkheid kijken. Of een praktijkonderzoek kan worden gehanteerd als vervolgonderzoek, middels het verlagen van de zanddrempel en vervolgens het vergelijken van het bodemprofiel en de onderzoeksresultaten uit dit onderzoek. Het advies van één van deze keuzes is nader uitgewerkt in het adviesrapport dat op basis van dit onderzoek is geschreven.

Inhoudsopgave

Hoofdstuk 1: Inleiding	7
1.1 Probleem- en doelstelling	7
1.2 Hoofd- en deelvragen	7
1.3 Afbakening	8
1.4 Onderzoeksopzet	8
1.5 Leeswijzer	8
Hoofdstuk 2: Analyse huidige situatie	9
2.1 Locatie haven Delfzijl	9
2.2 Baggermethodes	9
2.3 Huidig bodemprofiel	14
Hoofdstuk 3: Programma van eisen	16
3.1 Wensen, ambities en belangen	16
3.2 Plan van eisen	16
3.3 Uitgangspunten	18
Hoofdstuk 4: Onderzoeksopzet	19
4.1 Literatuuronderzoek	19
4.2 Interviews en gesprekken	19
4.3 Praktijkonderzoek	20
4.4 Modelstudies	20
4.5 Multicriteria-analyse	21
Hoofdstuk 5: Theoretisch kader	22
5.1 Aanslibbing	22
5.2 De vloeibare sliblaag	27
5.3 De zanddrempel	32
5.4 Keep the Sediment Navigable	35
5.5 Modelleren	38
Hoofdstuk 6: Interview en gesprekken	39
6.1: Interview met specialisten Fugro Land B.V.	39
6.2 Gesprek met Specialist Waterproof B.V.	39
6.3 Tweede gesprek met specialist Fugro Land B.V.	40
Hoofdstuk 7: Praktijkonderzoeken	41
7.1 Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone	41
7.2 Analyse aanzanding zanddrempel	47
Hoofdstuk 8: Modellen	54
8.1 TC-MUD (determinatie uitstroom van slib)	54
8.2 SILTHAR (determinatie aanvoer van extra slib)	68
8.3 SEDTUBE (determinatie aanvoer van extra zand)	70

Hoofdstuk 9: Alternatieven en berekeningen	78
9.1 Alternatieven	78
9.2 Berekeningen alternatieven	79
9.3 kosten	86
Hoofdstuk 10: Multi Criteria Analyse.....	89
10.1 Methode MCA	89
10.2 Opzet MCA.....	89
10.3 Uitvoering MCA.....	91
Hoofdstuk 11: Conclusie	97
Hoofdstuk 12: Discussie	99
Hoofdstuk 13: Aanbevelingen	101
Bibliografie	102
Bijlagen	104

Verklarende woordenlijst

Begrip	Definitie/verklaring
33 kHz	Frequentie waarmee de bodemdiepte wordt bepaald (meestal door singlebeam). Deze frequentie kan de 'harde bodem' onder de sliblaag aantonen.
210 kHz	Frequentie waarmee de bodemdiepte wordt bepaald en toont, ter plaatse van de vloeibare sliblaag, de top van deze laag aan.
Baggerinspanning	Is een benaming van de intensiteit van de baggerwerkzaamheden.
Dichtheidsstroom	Stroming die wordt opgewekt door het verschil in dichtheid tussen bepaalde lagen (drukverschil).
Froude getal	Een parameter die aangeeft of de stroming superkritisch of subkritisch stroomt. Bij een subkritische stroom is het froude getal kleiner dan één.
Gesuspendeerd	Materiaal, afkomstig vanaf de bodem, dat zich in de gehele waterkolom voortbeweegt.
'Harde bodem'	Dit is de bodem die wordt aangetoond door de singlebeam. Tussen de vloeibare sliblaag en de geconsolideerde (harde) bodemlaag is een overgang aanwezig, waardoor de echte harde bodem lastig te definiëren is.
Hoek van afstroming	Een hoek vanaf de drempel waarboven het vloeibare slib zal afstromen.
KSN-methodiek	Een methode om de havendiepte te vergroten door de schepen gedeeltelijk met hun kiel door het slib te laten varen.
Multibeam	Een echosounder die de bodemdiepte meet. (Vlakdekkende-data).
Multi criteria analyse	Analyse waarbij verschillende (soms tegenstrijdige) factoren worden afgewogen om hieruit een doelgerichte keuze te vormen.
SEDUBE-model	Model om de aanzanding in een kanaal (op zee) te berekenen.
Slibvang	Een ontgraving (grote bak/kuil) in het Zeehavenkanaal dat bedoeld is om het slib te concentreren en te laten bezinken op deze locatie.
SILTHAR-model	Model om de aanslibbing in de haven te berekenen.
Singlebeam	Een echosounder die de bodemdiepte meet. (Lijn-data).
TCMUD-model	Model om de éénmalige afstroming van de vloeibare sliblaag te berekenen, door middel van een dichtheidsstroom.
Vloeibare sliblaag	Bodemlaag dat slib bevat in een vloeibare omstandigheid.
Water injectie baggerschip	Baggerschip dat baggert door middel van injectie van water in de bodem.
Zanddrempel	De drempel aan het einde van het Zeehavenkanaal van de haven Delfzijl. Ook wel zanddrempel Paapsand Süd genoemd.

Hoofdstuk 1: Inleiding

Dit verslag betreft het onderzoeksrapport, behorend ter onderbouwing van het adviesrapport aan Groningen Seaports. Dit advies en onderzoek wordt uitgevoerd door Stefan Steenhuis, afstudeerstudent op de opleiding Built Environment aan de Hanzehogeschool Groningen en kent de naam 'Effectiviteit verlaging zanddrempel'. Het onderzoek wordt begeleid door Groningen Seaports. Groningen Seaports is een bedrijf dat onder andere verantwoordelijk is voor het havenbeheer. Eén van de werkzaamheden die hierbij horen is de haven op diepte houden. De grote aanslibbing in de haven van Delfzijl is een grote kostenpost. In dit rapport wordt onderzocht of de baggerkosten kunnen worden gereduceerd en of de havendiepte kan worden vergroot.

De aanleiding van dit onderzoek zijn aanbevelingen van voorgaande rapportages. In deze rapporten werden aanbevelingen gedaan naar onderzoek over het verlagen van de zanddrempel in de havenmonding. De onderzoekers verwachten een afname van het baggerbezwaar bij deze toepassing.

Het onderwerp van dit onderzoeksrapport is dan ook het volgende: "De gevolgen op gebied van baggerintensiteit en havendiepte bij het verlagen van de drempel in de havenmonding van Delfzijl." Het belang van dit onderzoek is het nader uitzoeken of de haven door de drempelverlaging duurzaam of economisch kan worden gestimuleerd.

In het verleden zijn eerdere studies gedaan over de mogelijke reductie van baggerkosten en het vergroten van de maximale diepte in het Zeehavenkanaal. Een recent onderzoek is 'Duurzaam havenbeheer' uitgevoerd door het bedrijf Wiertsema & Partners over het implementeren van door het slibvaren in het havenkanaal (KSN-methodiek). Dit onderzoek toonde aan dat deze methode toepasbaar is en mogelijk de baggerkosten vermindert. Echter wordt deze methode, door te weinig draagvlak, in de praktijk nog niet uitgevoerd.

1.1 Probleem- en doelstelling

Door verschillende factoren slibt de haven van Delfzijl relatief veel aan. Om te zorgen dat de haven op diepte blijft wordt er voortdurend gebaggerd en zijn de onderhoudskosten hoog.

De doelstelling van dit onderzoek kan omschreven worden als: "De afstudeerstudent zal tijdens de afstudeerperiode bij het bedrijf Groningen Seaports door middel van onderzoek beargumenteren of de haven op economische en duurzame wijze is te stimuleren door het verlagen van de zanddrempel in de havenmonding van Delfzijl, waardoor mogelijk het baggerbezwaar wordt verminderd of de maximale diepgang wordt vergroot."

1.2 Hoofd- en deelvragen

De volgende hoofdvraag is geformuleerd:

"Wat zijn de technische - en economische gevolgen van het veranderen van de afmeting van de zanddrempel op de slibafvoer in het havenkanaal van de haven van Delfzijl?"

De deelvragen die gestructureerd antwoord moeten geven op de hoofdvraag worden hieronder opgesomd:

1. Wat is de kwantiteit van de afvoer van het slib na verlaging van de drempel?
2. Hoe groot is de sedimentaanvoer naar de haven na het verlagen van de zanddrempel?
3. Zal de zanddrempel opnieuw ontstaan na verwijdering? En over welk tijdsbestek gaat dit?
4. Is er een combinatie mogelijk tussen het verlagen van de zanddrempel en de KSN-methodiek?

5. Veranderen de sedimenteigenschappen wanneer de drempel wordt verwijderd? Zo ja, is dit sediment makkelijker te baggeren dan voorheen?
6. Wat is het ideale ontwerp van de zanddrempel?
7. Wat doet het ideale ontwerp met de baggerintensiteit en de havendiepte?
8. Wat kost het verlagen van de zanddrempel?
9. Hebben de uitkomsten van het ontwerp invloed op de beoogde duurzame en economische ontwikkeling die in de haven visie staat?

1.3 Afbakening

In dit onderzoek wordt onderzocht of de huidige diepte kan worden vergroot en het baggerbezwaar kan worden gereduceerd door middel van het verlagen van de zanddrempel. Bij dit onderzoek wordt rekening gehouden met de volgende punten: de verandering van de sliblaag, sedimenttransporten, baggermethodes, stromingen, havendiepte, KSN-methodiek en invloed op nautisch gebied. Het onderzoek is afgerond wanneer er informatie is verkregen over de gevolgen van het verlagen van de drempel op het baggerbezwaar en de havendiepte.

In dit onderzoek worden de volgende aspecten niet onderzocht: de effecten op de vertroebeling in het Eems-Dollard estuarium, de verandering van de slibvang na verlaging van de drempel, wat er moet of gaat gebeuren met het vrijgekomen slib en zand en heeft verlaging van de drempel invloed op de stabiliteit van de scherm dijck. Wanneer blijkt dat deze onderzoeken relevant zijn voor verdere studies omtrent dit onderwerp dan worden deze aanbevolen in het adviesrapport.

1.4 Onderzoeksopzet

Allereerst wordt een literatuuronderzoek uitgevoerd. Het literatuuronderzoek kent de volgende doelen: het beantwoorden van deelvragen, het kennisniveau (in de materie van het onderzoek) verhogen van de student en zoeken naar eerdere wetenschappelijke onderzoeken die invloed (kunnen) hebben op dit onderzoek. Met behulp van interviews wordt kennis en ervaringen gedeeld en de onderzoeksstrategie bepaald. Vervolgens wordt met behulp van modelstudies antwoord gevonden op resterende deelvragen, die niet konden worden beantwoord door middel van het literatuuronderzoek. Om een ideaal ontwerp te krijgen van de zanddrempel wordt een multi criteria analyse uitgevoerd, waarin verschillende mogelijkheden met elkaar worden vergeleken. In hoofdstuk 4 wordt het onderzoeksopzet verder onderbouwt en beschreven.

1.5 Leeswijzer

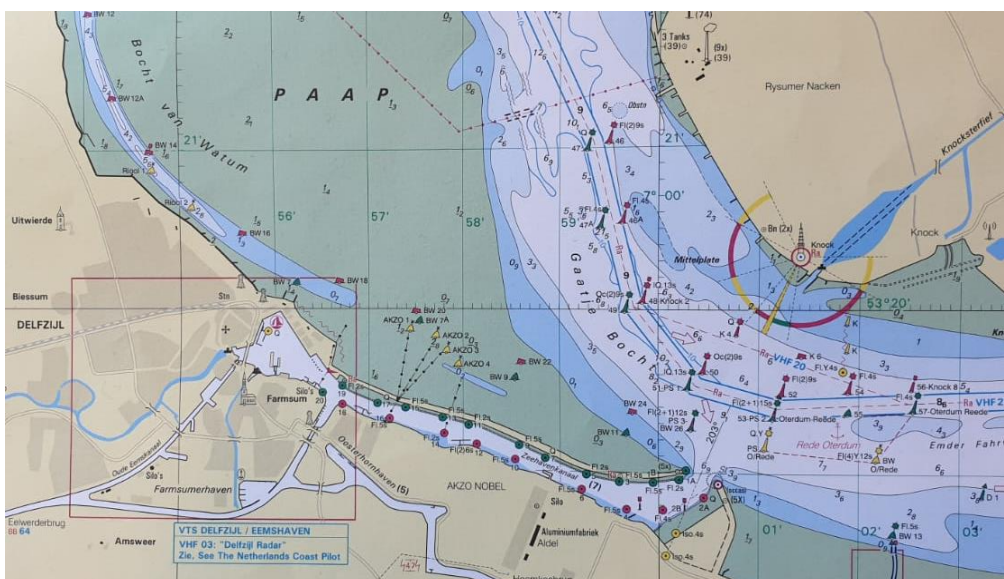
- Hoofdstuk 2 geeft een analyse weer van de huidige situatie in de haven van Delfzijl;
- Hoofdstuk 3 benoemt de eisen die gelden voor het onderzoek en het ontwerp;
- Hoofdstuk 4 beschrijft de onderzoeksopzet;
- Hoofdstuk 5 bevat het literatuuronderzoek waarin het theoretische kader is opgesteld;
- Hoofdstuk 6 beschrijft bevindingen en beslismomenten na interviews en gesprekken met externe partijen;
- Hoofdstuk 7 bevat analyses van praktijksituaties die van belang zijn voor dit onderzoek of modellen;
- Hoofdstuk 8 geeft uitleg over de modellen die zijn gebruikt;
- Hoofdstuk 9 benoemt de resultaten, alternatieven en vervolgberekening;
- Hoofdstuk 10 wordt een keuze van een havenmondingsontwerp gebaseerd op een multi criteria analyse;
- Hoofdstuk 11 bevat de conclusies van dit onderzoeksrapport;
- Hoofdstuk 12 bevat de discussie op de in hoofdstuk 11 genoemde conclusies;
- Hoofdstuk 13 verwijst naar het adviesrapport voor aanbevelingen.

Hoofdstuk 2: Analyse huidige situatie

In dit hoofdstuk wordt de huidige situatie geanalyseerd van de haven van Delfzijl met betrekking tot het baggerwerk. Het hoofdstuk bevat informatie over de locatie van de haven, de baggermethodes en het bodemprofiel. Deze analyse is uitgevoerd om twee redenen. Allereerst om te onderzoeken wat de huidige werkwijze en situatie zijn om hier vervolgens het onderzoek 'Effectiviteit verlaging zanddrempel' op te baseren. Ten tweede dient dit hoofdstuk als achtergrondinformatie.

2.1 Locatie haven Delfzijl

De haven van Delfzijl bevindt zich langs de westkant van het Eems-Dollard estuarium. (Zie figuur 2.1.1). Het estuarium is van de rivier de Eems die vanuit Duitsland komt. Deze rivier mondt uit op de Waddenzee. De Eems voert zoet water af naar de zee, waardoor in dit estuarium een overgang is van zoet naar zout water. De haven van Delfzijl is één van de havens in het Eems-Dollard estuarium. De havenmonding ligt aan de vaargeul Paapsand Süd. Deze vaargeul is verbonden met de hoofdvaargeul Gaatje Bocht. Deze havenmond ligt aan het einde van het Zeehavenkanaal dat zich langs de kust bevindt. De lengte van het Zeehavenkanaal is ongeveer vijf kilometer en wordt afgeschermd van stroming door een schermdijk. Het Zeehavenkanaal verbindt de binnenhaven en de Handelshaven met de zee en biedt tevens ruimte voor verschillende aanlegplaatsen. Door middel van een sluis worden de binnenhavens van Groningen Seaports (Farmsumerhaven en Oosterhornhaven) verbonden met de buitenhaven. In de Handelshaven wordt zoetwater geloosd door middel van een spuisluis. De locatie van de drempel wordt verderop in dit hoofdstuk beschreven.

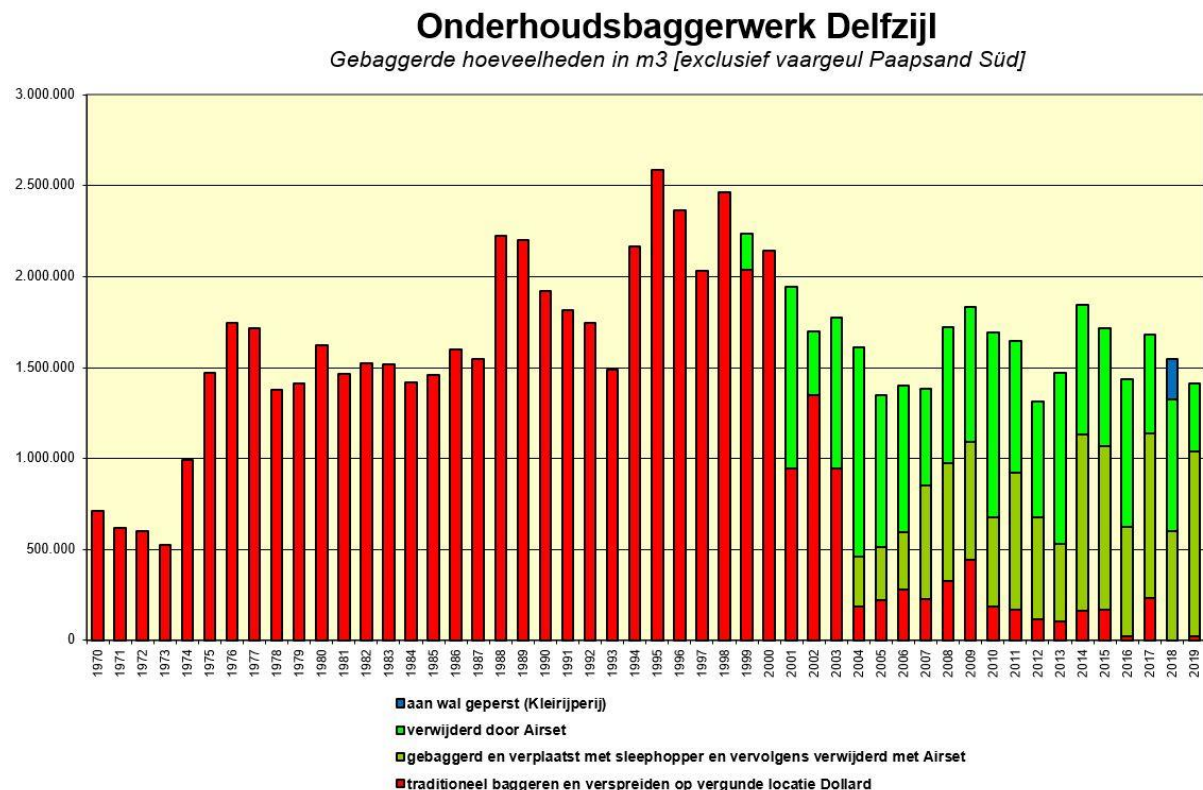


Figuur 2.1.1 Kaart 1812.6, haven van Delfzijl, Staat der Nederlanden uitgegeven in 2001. (Bron: Groningen Seaports archief).

2.2 Baggermethoden

Door afscherming van de haven door middel van de schermdijk (tegen stroming en golven) ontstaat er een lagere stroomsnelheid in de haven. Hierdoor bezinkt het sediment dat meekomt met het binnenkomende water en is het nodig om de haven voortdurend te baggeren. De haven wordt gebaggerd met behulp van een waterinjectie baggerschip, sleephopperzuigers en ploegboten. De baggerwerkzaamheden worden uitgevoerd door Baggerbedrijf de Boer. Dit doen ze middels een prestatiecontract, waarbij het bedrijf de diepte voortdurend moet garanderen. Groningen Seaports (opdrachtgever) controleert maandelijks de aannemer (Baggerbedrijf de Boer) aan de hand van peilingen. Tevens dienen de peilingen ter informatie voor het baggerwerk, denk hierbij aan de locatie en de hoeveelheid van het baggerwerk. De peilingen worden met behulp van een peilboot uitgevoerd.

Voor het baggerwerk is de haven opgedeeld in baggervakken. De aannemer dient ervoor te zorgen dat de baggervakken op de geldende onderhoudsdieptes worden gehandhaafd. De maatgevende dieptes (garantiedieptes), die voor de scheepvaart wordt gehanteerd, liggen gemiddeld 0,5 meter boven de onderhoudsdiepte. In de haven van Delfzijl is de onderhoudsdiepte over het algemeen rond de 10 meter. Bij de baggervakken bij het einde van het Zeehavenkanaal (richting de havenmond) is een vloeibare sliblaag aanwezig. Doordat de vloeibare sliblaag een overgang is van dikwater naar een vaste bodem is het lastig om op deze laag de diepte te bepalen. In de haven van Delfzijl wordt op de plekken met deze sliblaag de '2/3 diepte' gehanteerd als onderhoudsdiepte. De onderhoudsdiepte ligt bij deze diepte op 2/3 van de dikte van de sliblaag.



Figuur 2.2.1 Onderhoudsbaggerwerk van de haven van Delfzijl. Notitie: Na het jaar 1973 is de havenmond verplaatst en 2019 is tot aan week 45 en dus niet het volledige jaar. (Bron: Groningen Seaports).

2.2.1 Peilingen

De peilingen in de haven van Delfzijl worden uitgevoerd met echosounders. Een echosounder is een meetinstrument die door middel van de snelheid van het geluid en weerkaatsing hiervan op de bodem de diepte meet. In de haven van Delfzijl wordt gebruik gemaakt van zowel een singlebeam als een multibeam-echosounder. In tegenstelling tot bijvoorbeeld de Eemshaven waar alleen wordt gepeild met de multibeam. In de haven van Delfzijl wordt ook de singlebeam gebruikt, doordat de multibeam niet de 'harde bodem' kan peilen ter hoogte van de vloeibare sliblaag. De 'harde bodem' wordt tussen haakjes gezet omdat er bij de vloeibare sliblaag een overgang is van dik water tot een vaste harde sliblaag.

De data van de dieptemetingen worden gevalideerd en vervolgens verwerkt tot peilkaarten. Deze peilkaarten worden onder andere gebruikt voor de nautische dienst en voor de baggeractiviteiten. In onderstaande paragrafen wordt nader ingegaan op de singlebeam en multibeam-echosounders.

Singlebeam

Een singlebeam is een dieptemeter die met behulp van een echo op de bodem de diepte meet. Het meet de tijd om een geluidssignaal te verzenden en te ontvangen. Het geluidssignaal wordt naar de bodem gestuurd en op de bodem weerkaats. De diepte kan worden gemeten door de tijdsduur te vermenigvuldigen met de snelheid van het geluid en deze waarde te delen door twee. De snelheid van het geluid in water is afhankelijk van het zoutgehalte, de temperatuur en de diepte. Deze parameters worden vooraf gemeten middels een 'sound velocity' meting.

De singlebeam brengt een aantal nadelen met zich mee. Allereerst is de singlebeam niet vlakdekkend. Dit wil zeggen dat hij niet het volledige bodemprofiel meet, maar enkel lijnen. Tussen deze lijnen wordt data geïnterpoleerd om een vlakdekkende peilkaart te krijgen. Ten tweede komt het geluid van de singlebeam als een bundel op de bodem en raakt deze een oppervlakte. Het hoogste deel van het oppervlak wordt als eerste weerkaats en gemeten door de singlebeam. Het hele oppervlak krijgt dan deze diepte, wat zorgt voor onnauwkeurigheden. Het grootste voordeel van de singlebeam is dat dit meetinstrument een lage frequentie kan uitzenden, waardoor het door de zachte bodem (vloeibare sliblaag) heen gaat en weerkaats op de onderliggende 'harde bodem' en deze laatste gemeten wordt.

Multibeam

De multibeam echosounder maakt gebruik van hetzelfde principe als de singlebeam, alleen zendt de multibeam vele geluidsgolven uit. De multibeam stuurt zijn geluidsgolven steeds onder een iets andere hoek, waardoor een breed oppervlak wordt gemeten. Door deze toepassing wordt de meting vlakdekkend. Een nadeel is dat dit type echosounder geen lage frequentie kan uitzenden, waardoor de multibeam niet de 'harde bodem' kan meten.

Toepassing in de haven van Delfzijl

In de haven van Delfzijl wordt de singlebeam toegepast om de diepte te meten tot het vaste bodemmateriaal. Dit wordt gedaan met een meting van 33kHz. Deze penetreert door de vloeibare sliblaag heen en meet de vaste bodem. De multibeam wordt gebruikt om de bovenkant van de sliblaag te bepalen. Deze weerkaats op de sliblaag omdat deze uitgevoerd wordt met hoge frequentie (tussen de 200 en 400 kHz). Uit het verschil tussen de peilingen kan de dikte van de sliblaag en kan de '2/3 diepte' worden bepaald. De data van de multibeam en singlebeam worden apart van elkaar uitgewerkt in een peilkaart.



Figuur 2.2.2 De peilboot Havenschap 1 gefotografeerd vanaf de Airset in de havenmond.

2.2.2 Waterinjectie baggerschip en de Airset

De havenmondning en enkele andere delen van de haven worden gebaggerd door de Airset. Dit baggerschip is een WID (Water Injection Dredger) met een optie om naast water ook lucht te injecteren. Wanneer de Airset lucht blaast heeft het een ander effect op de bodem dan bij de werkzaamheden van een normale WID. Dit moet duidelijk zijn om verwarring in dit onderzoek te voorkomen.

Een WID (zonder luchtinjectie) injecteert water in de bodem wat zorgt dat er meer volume in de sliblaag komt. Hierdoor wordt de sliblaag opgewoeld en stroomt het onder gravitatie en verschil in dichtheid af. Een eventuele helling naar beneden zorgt voor een versterkend effect. Een WID (met luchtinjectie ofwel de Airset) zorgt ervoor dat, naast het waterinjectie effect, het materiaal door luchtinjectie in de bodem in suspensie komt tot hoger in de waterkolom. Dit materiaal wordt vervolgens afgevoerd door het afgaande getij. Op dit afgaand tij zijn overigens ook de werktijden van de Airset gebaseerd.

De hoeveelheid baggermateriaal dat de Airset verplaatst is lastig te meten door deze baggermethode. Deze hoeveelheid is echter door empirische berekeningen benaderd tot 5.000 m³ per sessie. In 2018 werd er 1.325.000 m³ aan baggermateriaal verplaatst met behulp van de Airset. In dit jaar was de Airset actief in 37 weken. De Airset is vooral actief bij de havenmondning.



Figuur 2.2.3 Het baggerschip de Airset vanaf de drijvende stijger met aan de rechterkant de Havenschap 1 (peilboot).

2.2.3 Sleephopperzuigers

De haven wordt tevens op diepte gehouden onder andere door het sporadisch baggeren met sleephopperzuigers. Deze baggeren een groot deel van het Zeehavenkanaal en de Handelshaven. Het opgebaggerde materiaal wordt meestal gestort ter hoogte van de havenmondning, waar het door middel van afgaand tij en door de Airset wordt verspreid naar het estuarium. In de winterperiode is er ook een mogelijkheid om baggerspecie richting een aangewezen locatie in de Dollard te verplaatsen.

De sleephopperzuigers werken door het opzuigen van het materiaal op de havenbodem door middel van het laten zakken van een zuigbuis. Deze zuigt, door middel van een zuigkop, het baggermateriaal gemixt met water naar de beun van het schip. In de beun wordt het gebaggerde materiaal opgevangen en kan het baggermateriaal bezinken. In de hopper is een overloop aanwezig. De overloop zorgt ervoor dat er meer baggermateriaal in de hopper kan door het water uit de hopper te laten stromen. Dit overloopsysteem wordt alleen gebruikt tijdens het baggeren van zand. Bij het baggeren van slib duurt dit bezinkingsproces te lang en gaat dit ten koste van de efficiëntie. Het baggermateriaal wordt geloosd op de verspreidlocatie door middel van schuifdeuren of kleppen.

In de haven van Delfzijl wordt meestal gebaggerd met de baggerschepen de Adelaar of de Amazone van Baggerbedrijf de Boer. De Adelaar is een schip van 60 bij 8 meter en heeft een beuninhoud van 604 m³. De Amazone is een schip van 71,8 bij 14 meter met een beuninhoud van 2771 m³.

De Amazone heeft in 2018 ongeveer 822.500m³b (kuub per beun) gebaggerd. De Amazone is in dit jaar zeven weken actief geweest en heeft in totaal 316 baggerreizen gemaakt in de haven van Delfzijl. Uit deze gegevens blijkt dat de productie ongeveer 2600m³b/reis is. Andere sleephopperzuigers hebben dit jaar niet gebaggerd in de haven van Delfzijl.



Figuur 2.2.4 Het baggerschip de Adelaar van baggerbedrijf de Boer. (Bron: vesseltracker.com).



Figuur 2.2.5 Het baggerschip de Amazone van Baggerbedrijf de Boer. (Bron: vesselfinder.com).

2.2.4 Ploegboten

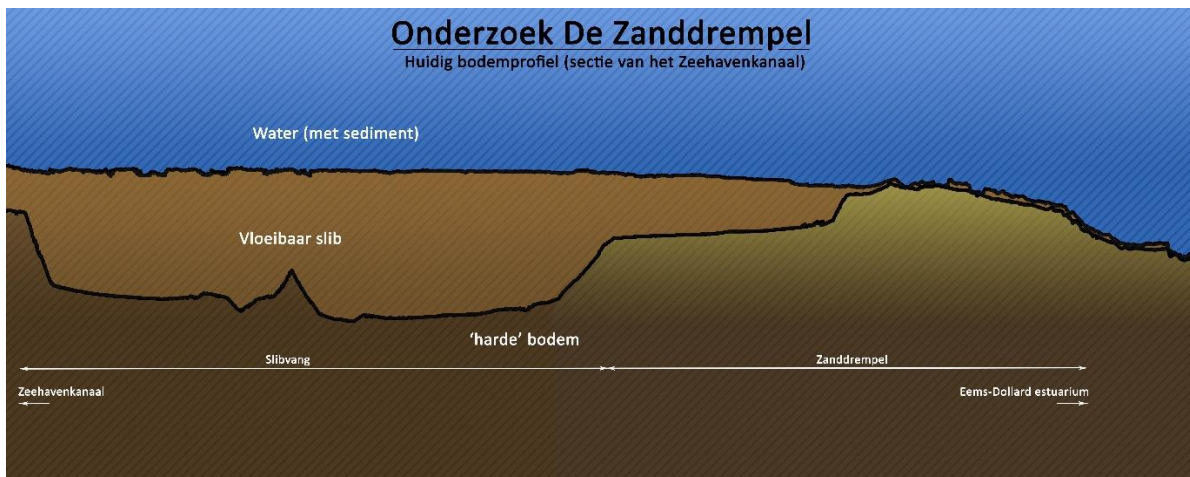
De ploegboot wordt ingezet op plekken die moeilijk zijn te bereiken voor de sleephopperzuiger. De ploeg sleept het materiaal naar een andere plek. Waarna het kan worden opgebaggerd met de sleephopperzuiger. De ploegboot Janneke wordt vaak gebruikt in de haven van Delfzijl. Ook wordt een ploegboot ingezet om baggersporen te vereffen en uit te vlakken.



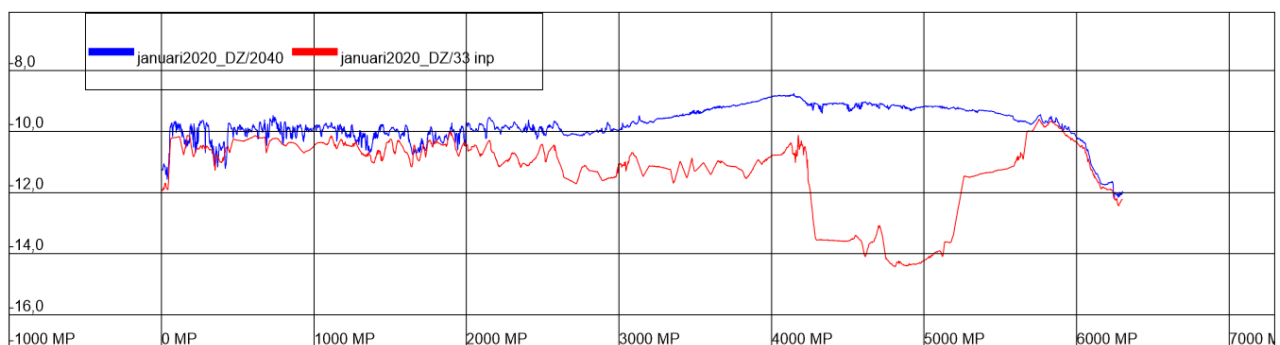
Figuur 2.2.6 Ploegboot Janneke van Baggerbedrijf de Boer. (Bron: varenderfgoed.nl)

2.3 Huidig bodemprofiel

In figuur 2.3.2 is een lengteprofiel van de gehele haven weergegeven vanaf de haven tot en met de havenmonding. De vloeibare sliblaag bevindt zich tussen de multibeam-meting en de singlebeam-meting. (Zie beschrijving in onderschrift). In figuur 2.3.1 is een sectie van het bodemprofiel schematisch weergegeven om makkelijker de situatie in het Zeehavenkanaal te begrijpen. Ter hoogte van de slibvang en ook verderop in de haven is een vloeibare sliblaag aanwezig. De slibvang werkt niet meer als een slibvang door dat deze volledig gevuld is. Bij de havenmonding is er sprake van een ophoging van de 33 kHz-meting, oftewel de zanddrempel.



Figuur 2.3.1 Bodemprofiel van een sectie van het Zeehavenkanaal ter hoogte van de zanddrempel en de slibvang (weergave gemaakt vanuit peilkaart uit januari 2020).



Figuur 2.3.2 Bodemprofiel van de gehele haven waarop de blauwe lijn de multibeam-meting (200-400 kHz) aangeeft en de rode lijn een weergave is van de singlebeam-meting (33 kHz). Het profiel is vanaf de kade in de Handelshaven tot verder dan de zanddrempel genomen.

De peilkaart in figuur 2.3.3 geeft de locatie van de drempel in een bovenaanzicht weer. De zanddrempel is duidelijk te zien op de singlebeammeting (licht groene gedeelte). De drempel is gesitueerd net buiten de havenmonding. Deze kaart geeft tevens de locatie aan van de slibput (donker blauwe gedeelte). Het verschil tussen de singlebeam en multibeam geeft de dikte van de sliblaag weer. Op de multibeampeilkaart is te zien dat er een sliblaag aanwezig is doordat deze kaart verschilt van de singlebeampeilkaart.

Hoofdstuk 3: Programma van eisen

In dit hoofdstuk worden de belangen, wensen en ambitie van de opdrachtgever en de student beschreven. Hierop worden eisen gebaseerd en gesteld in het programma van eisen. Het programma van eisen is in dit rapport opgesteld om eisen en randvoorwaarden te stellen aan het ontwerp (toepassing in de situatie) en de onderzoeksopzet.

3.1 Wensen, ambities en belangen

3.1.1 Opdrachtgever (Groningen Seaports)

Vanuit de opdrachtgever is het belang om te onderzoeken of er een positief effect plaatsvindt bij het verlagen van de drempel op ofwel de baggerintensiteit of de havendiepte. Het is de wens de technische- en economische gevolgen van de verlaging te kennen. Deze waarden zijn vooral van belang bij de Port Technology afdeling bij Groningen Seaports. De nautische afdeling is vooral geïnteresseerd in vergroting van de havendiepte. Voor het bedrijf is het van belang om de haven op een duurzame manier economisch te stimuleren, blijkt uit de visie van het bedrijf. (*Havenvisie 2030. 2019*).

3.1.2 Afstudeerstudent

De wens van de afstudeerstudent is om de hoofdvraag te beantwoorden en door te onderzoeken zijn kennis in het onderzoeksgebied te verbreden en te verdiepen. Het belang van de student is om zichzelf te ontwikkelen op onderzoekend vermogen en te voldoen aan de competenties die door de onderwijsinstelling worden voorgelegd. De ambitie is om een adviesrapport op te leveren aan Groningen Seaports met aanbevelingen over het verlagen van de zanddrempel. Waarin voor de opdrachtgever duidelijk wordt welke effecten er optreden en een goede vervolgstap kan worden aanbevolen.

3.2 Plan van eisen

In het onderstaande tabel zijn de eisen met betrekking tot het toekomstige ontwerp/onderzoek en ontwerp-/onderzoeksproces gesteld. Sommige eisen zijn wel van belang voor het ontwerp, maar worden niet meegenomen in dit onderzoeksrapport. (Zie de afbakening in hoofdstuk 1).

3.2.1 Hoofdzaken

Onderwerp	Eis	Randvoorwaarde
Onderzoek	– Benadering effect van drempelverlaging	<i>- Onderzoek naar processen die van invloed zijn bij verlaging van de drempel op gebied van baggeren, sedimentatie en stroomcondities.</i> <i>- Geeft niet alleen het proces weer na verlaging drempel, maar ook het beste alternatief.</i> <i>-De situatie dient ook over de lange termijn te worden onderzocht.</i>
	– Literatuuronderzoek en overige toegepaste en gebruikte kennis worden op de juiste manier toegepast	<i>- is gebaseerd op bestaande literatuur, methodes of is gebaseerd op praktijksituaties vanuit de haven van Delfzijl.</i> <i>-Gebruikte boeken, modellen, gegevens en overige literatuur worden gerefereerd naar hun bron.</i> <i>-Beoogde effecten bij drempelverlaging worden onderzocht in het literatuuronderzoek.</i> <i>-Literatuuronderzoek wordt uitgevoerd, zodat overbodig werk wordt voorkomen.</i>
	– Praktijkonderzoeken worden uitgevoerd wanneer benodigd	<i>-Praktijkonderzoeken worden uitgevoerd, wanneer deze gegevens verkrijgbaar zijn of wanneer deze gegevens relevant genoeg zijn om in te investeren. Overbodige kosten dienen vermeden te worden.</i>

	– Economische en technische effecten dienen te worden onderzocht	<i>-Economische en technische effecten dienen in baggerkosten te worden verrekend. -Kwantiteit moet worden geschat in hoeveelheden m³ en/of euro's.</i>
	– Het baggeren van de drempel wordt onderzocht	<i>-De kosten van het baggeren van de zanddrempel wordt onderzocht.</i>
Budget	– De uitgaven tijdens het onderzoek dienen niet te hoog te zijn	<i>- Het budget is op zekere hoogte vrij te bepalen door de student. De student stelt als doel het budget onder de 10.000 euro te houden.</i>
Ontwerp	– Het effect van de drempel is positief	<i>- Het effect van de drempel is positief op de havendiepte of de baggerintensiteit. -Er vindt uitstroming plaats van het slibmateriaal. -De tijdsduur waarop de effecten niet rendabel of teniet worden gedaan is over een langere periode (jaren).</i>
	– Alternatieven worden vergeleken op basis van haalbaarheid en risico's	<i>- Er wordt nagegaan welke risico's er zijn per alternatief. -Er wordt nagegaan of de werkzaamheden kunnen worden uitgevoerd per alternatief.</i>

3.2.2 Bijzaken

Onderwerp	Eis	Randvoorwaarde
Onderzoek	– KSN-methodiek	<i>-De KSN-methodiek dient te worden omschreven. -De KSN-methodiek dient te worden genoemd en over na te worden gedacht na de verandering van de drempelhoogte.</i>
Ontwerp	– De schermduik dient ook na verlaging stabiel te zijn.	<i>- Het talud van de schermduik wordt niet steiler dan de huidige situatie.</i>
	– De slibvang dient zijn 'werking' zoals in de huidige situatie te behouden	<i>-De 'harde bodem' rond de slibvang blijft nog steeds een bak en kan eventueel in de toekomst worden hergebruikt.</i>
	– Troebelheid dient niet toe te nemen in het estuarium	<i>-De troebelheid in het estuarium dient niet toe te nemen door het extra slib dat vrijkomt bij het ontwerp.</i>
	– Het ontwerp draagt bij aan de duurzame ontwikkeling van de haven	<i>- Het ontwerp zorgt ervoor dat de duurzaamheid wordt gestimuleerd, door op een slimme manier om te gaan met de baggerstrategie. -Het ontwerp zorgt voor een besparing in baggerwerk. Denk hierbij aan kosten die normaal zouden worden gemaakt om dezelfde hoeveelheid uit de haven te baggeren.</i>
De student	– Verbreed zich en verdiept zich in het onderzoeksgebied	<i>-Doet een wetenschappelijke studie (literatuuronderzoek) naar de effecten die plaatsvinden bij het verlagen van de drempel. -Toont verdieping door diepgaande materie en methoden uit te leggen en uit te voeren.</i>
	– Levert een adviesrapport op.	<i>-Waarin een keuze wordt gemaakt van het beste ontwerp/alternatief. -Dat is onderbouwd met een uitgebreid onderzoeksrapport, waarin alle effecten en omstandigheden worden toegelicht. -Waarin aanbeveling wordt gemaakt naar de te nemen vervolgstappen voor Groningen Seaports.</i>
	– Behaalt door dit onderzoek de competenties van de opleiding.	

3.3 Uitgangspunten

Aan de hand van bovenstaande eisen met betrekking tot het onderzoek, het toekomstige ontwerp en het op te leveren product (adviesrapport) worden de volgende uitgangspunten genoemd.

3.3.1 Onderzoekuitgangspunten

Op basis van de eisen met betrekking tot het onderzoek dienen de volgende uitgangspunten te worden gehanteerd:

- Wetenschappelijke literatuur wordt onderzocht die betrekking hebben op dit onderzoek;
- De effecten van de drempelverlaging op sedimentatieprocessen dient te worden onderzocht;
- De effecten van de drempel dienen te worden onderzocht op kwantiteit uitgedrukt in m³ en/of geld;
- Praktijkonderzoek wordt alleen uitgevoerd wanneer benodigd en relevant;
- De baggerkosten per drempelverlaging dienen te worden onderzocht;
- Het beste alternatief wordt onderzocht op verschillende factoren.

3.3.2 Ontwerputgangspunten

Aan de hand van het programma van eisen dient het ontwerp te voldoen aan de volgende uitgangspunten:

- De verlaging van de drempel verlaagd de baggerintensiteit ofwel de havendiepte van de haven;
- De balans van sediment aan- en afvoer is dusdanig positief dat het bovenstaande uitgangspunt wordt behaald;
- De kosten van het baggeren van de drempel zijn rendabel ten opzichte van de oplevering aan uitstroom van sediment;
- De wederkeer van de drempel is niet te snel en de baggerintensiteit zal niet aanzienlijk worden verhoogd;
- De combinatie van de drempel en de KSN-methodiek dient optimaal te zijn en meegenomen worden in het ontwerp;
- Er is voldoende kennis over de gevolgen van de verlaging van de zanddrempel;
- Het ontwerp draagt bij aan duurzaamheid van de haven en stimuleert de haven op economisch aspect.

3.3.3 Adviesrapport uitgangspunten

Het adviesrapport moet voldoen aan de volgende uitgangspunten:

- Het beste alternatief wordt toegelicht;
- Gebruik van onderzoeksrapport in conclusies en aanbevelingen;
- Geeft aanbeveling aan Groningen Seaports over de vervolgstappen met daarbij een risicoafweging.

Hoofdstuk 4: Onderzoeksopzet

In deze onderzoeksopzet worden de onderzoeksmethoden beschreven. De hoofdvraag waar de onderzoeken antwoord op moeten geven is: **“Wat zijn de technische - en economische gevolgen van het veranderen van de afmeting van de zanddrempel op de slibafvoer in het havenkanaal van de haven van Delfzijl?”**. De volgende onderzoeken worden uitgevoerd om antwoord te krijgen op de hoofdvraag:

- Literatuuronderzoek;
- Interviews en gesprekken;
- Praktijkonderzoek;
- Modelstudies;
- Multi criteria analyse.

Na het uitvoeren van deze onderzoeksmethoden wordt de conclusie getrokken op basis van de onderzoeksresultaten en wordt het onderzoeksrapport afgerond. Vervolgens wordt hierop een advies geschreven aan Groningen Seaports.

4.1 Literatuuronderzoek

Het archief van Groningen Seaports en de mediatheek van de Hanzehogeschool Groningen worden gebruikt als databanken voor het literatuuronderzoek. Het literatuuronderzoek dient om achtergrond- en verdiepende informatie te verkrijgen met betrekking tot het onderzoek. Ook helpt het praktijksituaties en rekenmodellen beter te begrijpen. Overigens wordt literatuuronderzoek ook gebruikt om bepaalde parameters te specificeren bijvoorbeeld in rekenmodellen. De volgende onderwerpen worden onder andere behandeld in het literatuuronderzoek:

- Aanslibbing van een haven;
- De vloeibare sliblaag;
- Zandtransport;
- Modelleringen;
- De morfologie en de bodem van zowel de haven van Delfzijl als het Eems-Dollard estuarium;
- KSN-methodiek;
- Waterinjectie (en luchtinjectie) baggeren.

4.2 Interviews en gesprekken

Interviews en gesprekken worden georganiseerd om informatie in te winnen over bepaalde vraagstukken van het onderzoek. Deze interviews hebben invloed op het onderzoek. De kennis van deskundigen leiden tot andere interpretaties en hierop worden de onderzoeksmethoden aangepast. Tijdens dit onderzoek vinden er gesprekken plaats met de volgende bedrijven:

- Fugro Land B.V.;
- Waterproof B.V.;
- Baggerbedrijf de Boer.

Met de consultancy bedrijven Fugro en Waterproof wordt vooral over de onderzoeksmethoden en theorieën gesproken. Bij het Baggerbedrijf de Boer wordt vooral de praktijksituatie besproken. De gesprekken met Baggerbedrijf de Boer vinden in tegenstelling tot de andere bedrijven vooral informeel plaats. Deze gesprekken vinden voornamelijk tijdens kennismaking met het baggermaterieel plaats.

4.3 Praktijkonderzoek

Het praktijkonderzoek vindt plaats om relevante fysische eigenschappen te bepalen.

Praktijkonderzoeken zijn in dit onderzoek vooral het analyseren van gegevens uit de praktijk. Hierbij wordt gedoeld op de volgende punten:

- Peilgegevens;
- Bodemonderzoeksrapporten;
- Een stroommetingsrapport.

4.3.1 Peilingen

De peilgegevens komen voort uit maandpeilingen of op verzoek gepeilde metingen. Voor meer informatie over de gebruikte peilmethode in de haven van Delfzijl, zie paragraaf 2.1.1. De peildata kan worden geanalyseerd met het programma Qinsy. Dit is een surveyprogramma met veel mogelijkheden, zoals bijvoorbeeld het uitvoeren van inhoudsberekeningen en het maken van dwars- en lengteprofielen.

Peilgegevens zijn onder andere nodig om de inhoud van de drempel te berekenen per meter verlaging. Tevens is het relevant om de bodem bij bepaalde ingrepen te analyseren, zoals het verdiepen van de drempel (zie paragraaf 7.1) of het bepalen van de aanzanding op de drempel (zie paragraaf 7.2). Op deze gegevens kunnen vervolgens verschillende rekenmodellen worden gekalibreerd op de praktijksituatie.

4.3.2 Bodemeigenschappen

De bodemeigenschappen worden bepaald uit bodemonderzoeksrapporten die zijn gemaakt door het externe bedrijf Anteagroup in de jaargangen 2018/2019 en 2020/2021. Om praktijkervaring op te doen is er op 21 november 2020 meegewerkt aan het bodemonderzoek. Dit ook met de reden om kennis op te doen over het vloeibare slib en onderzoeksmethoden. Door middel van het nemen van bodemonsters kan worden bepaald uit welk materiaal (en bijbehorende fysische eigenschappen) de drempel en de vloeibare sliblaag is opgebouwd.

4.3.3 Stromingsmetingen

Een stroommetingsrapport is in 2010 uitgevoerd door Baggerbedrijf de Boer. In de tussenliggende periode is er niet veel aan de havenmonding veranderd, daarom wordt er aangenomen dat dezelfde stromingscondities nog steeds toepasbaar zijn.

4.4 Modelstudies

Uit het vooronderzoek is gebleken dat modelstudies antwoord kunnen geven op bepaalde deelvragen door de situatie in Delfzijl te simuleren. De modelstudies worden gebruikt om antwoord te krijgen op de volgende drie punten:

- Extra aanslibbing door verlaging drempel;
- Afvloeiing van de bestaande sliblaag door verlaging drempel;
- Extra aanzanding door verlaging drempel.

Hieronder zijn de modellen kort toegelicht. Verderop in het verslag worden dezen nader beschreven en uitgevoerd. Onderstaande modellen zijn gekozen, omdat deze modellen de principes bevatten die een rol gaan spelen bij de drempelverlaging. Doordat de modellen niet te complex zijn, is het mogelijk om ze zelf uit te voeren. Door de mindere complexiteit wordt de nauwkeurigheid echter wel lager.

4.4.1 Extra aanslibbing door verlaging drempel (SILTHAR-model)

Het SILTHAR-model is ontwikkeld door W.D. Eysink en berekent de aanslibbing van de haven. Extra aanslibbing kan worden berekend door de aanslibbing te berekenen met verschillende drempeldieptes. De rekenmethode is in 1999 aangepast op de haven van Delfzijl toen hier een onderzoek naar de oorzaken van aanslibbing plaatsvonden. Het model was intern beschikbaar in het archief. De theorie van dit rekenmodel wordt verder uitgelegd in paragraaf 5.2.3.

4.4.2 Afvloeiing van bestaande slib door verlaging drempel (TCMUD-model)

Het TC-MUD-model berekent de afstroming van de sliblaag wanneer de drempel op een bepaalde diepte wordt gebaggerd. Hierbij gaat het model ervan uit dat er een stroom wordt opgewekt door voornamelijk het verschil in dichtheid. Dit rekenmodel is gemaakt door L. van Rijn en is aangeschaft voor dit onderzoek. Het model wordt uitgelegd in paragraaf 8.1.

4.4.3 Extra aanzanding door verlaging drempel (SED-TUBE-model)

Allereerst was het de bedoeling om een 3D-modellering uit te voeren om de aanzanding van de drempel te berekenen en de extra aanslibbing te bevestigen. Dit 3D-model zou Delft3D zijn (zie paragraaf 5.6.1 voor meer informatie). Echter bij het opvragen van meer informatie, bleek dit niet haalbaar (zie paragraaf 6.2) en is er voor het SED-TUBE-model gekozen.

Dit model is net als het TC-MUD-model gemaakt door L. van Rijn en aangeschaft in hetzelfde toolpakket. Het model kan de aanzanding in een vaargeul berekenen door het zandtransport en de stromingscondities te simuleren. Het model wordt uitgelegd in paragraaf 8.3.

4.5 Multi criteria analyse

Voor het vergelijken van de alternatieven worden de onderzoeksresultaten door middel van een multi criteria analyse (MCA) geanalyseerd. Een MCA kan worden gebruikt om moeilijk vergelijkbare factoren met elkaar te vergelijken. Tevens wordt het belang van verschillende factoren aangeduid en meegenomen in de vergelijking. Op deze manier wordt het duidelijk welk alternatief (diepte van de drempel) het beste is. De multi criteria analyse wordt nader uitgelegd in hoofdstuk 10.

Hoofdstuk 5: Theoretisch kader

Dit hoofdstuk bevat het theoretische kader van het onderzoek. Dit theoretisch kader is opgezet door middel van een literatuuronderzoek. De informatiebronnen die zijn gebruikt, zijn afkomstig van het archief van Groningen Seaports en de mediatheek van de Hanzehogeschool Groningen.

Het doel van deze literaire studie is om belangrijke informatie met betrekking tot de hoofdvraag en deelvragen te benoemen vanuit wetenschappelijke artikelen. Hiermee wordt voorkomen dat onderdelen opnieuw worden onderzocht en het geeft de student kennis in soms nog onbekende methoden en theorieën. Dit is ook voor de lezer handig om deze methoden en theorieën te begrijpen. In dit literatuuronderzoek wordt ingegaan op de volgende punten:

- Aanslibbing van havens en de haven van Delfzijl;
- De vloeibare sliblaag;
- De zanddrempel van de haven van Delfzijl;
- Verband met onderzoek met KSN-methode;
- Modelleren van sedimenttransport.

5.1 Aanslibbing

In deze paragraaf wordt er ingegaan op de aanslibbing van de haven en de algemene oorzaken van aanslibbing in havens. Over de oorzaken van aanslibbing in de haven van Delfzijl is al eerder onderzoek uitgevoerd voor Groningen Seaports. Deze paragraaf bevat informatie over de volgende punten:

- Oorzaken aanslibben van havens;
- Locatie van aanslibbing in de haven van Delfzijl;
- Hoeveelheid aanslibbing.

5.1.1 Oorzaak van het aanslibben

De definitie en het proces van het transport van slib wordt omschreven in het rapport van Dearnaley, Roberts, Spearman & Cooper. Het transport van slib ontstaat wanneer de, door stroming aangedreven, schuifspanning groot genoeg is om de band tussen de slibvlokken te breken. Daardoor ontstaat suspensie van de slibdeeltjes in de waterkolom en wordt het meegevoerd door de stroming. Door verlaging van de snelheid van de stroming en het gewicht van de slibvlokken treedt er sedimentatie op van het slib.

Het verschil met zandtransport is dat het slib langzamer consolideert en bij een langzamere stroom zal sedimenteren. Het slib komt echter wel sneller in suspensie dan zand. (Dearnaley, Roberts, Spearman, & Cooper, 1997).

R. van der Veen beschrijft in zijn rapport 'Onderzoek aanslibbingsgedrag haven Delfzijl' dat het aanslibbingsproces van een haven complex is en dat er vaak veel onduidelijkheden zijn over aanslibbingsprocessen. Van der Veen stelt dat de aanslibbing wordt veroorzaakt door stromingen. In het rapport maakt hij onderscheid tussen bodemstromingen en stromingen in de hele waterkolom. De stromingen over de hele waterkolom bevatten gesuspendeerde slibdeeltjes die bij een verminderde snelheid zullen consolideren. De bodemstromingen, ook wel dichtheidsstromingen genoemd, worden hieronder nader verklaard aan de hand van het rapport van R. van der Veen.

Dichtheidsstromingen

De bodemstromingen ontstaan door drukverschillen. Deze drukverschillen kunnen een verschil in hoogte of in dichtheid zijn. Dit is te verklaren aan de hand van de formule voor het berekenen van de druk in water:

$$P = h * \rho * g$$

Waarin:

- P = de druk in pascal
- h = de hoogte van het water
- ρ = de dichtheid van de het water
- g = de gravitatie snelheid (constante op deze schaal)

De gravitatie snelheid is een constante, waardoor de hoogte van het water en de dichtheid de twee factoren zijn die het verschil in druk bepalen. Tevens spelen de snelheid, luchtdruk, wind en draaiing van de aarde een rol in de drukverschillen alleen zijn deze niet van dergelijke grote dat ze relevant zijn. De bodemstroming is te verklaren aan de hand van de formule van de hydrostatische druk. Wanneer de hoogte van het water (h) constant is, is de dichtheid de enigste factor voor een stroming. Wanneer er bijvoorbeeld door saliniteit een dichtheidsverschil aanwezig is, ontstaat er een drukverschil die een stroming opwekt naar de bodemlaag met de lagere druk. Het verschil in druk neemt toe met de diepte (h wordt groter) waardoor deze stroming zich bij de bodem bevindt.

In hetzelfde rapport van R. van der Veen wordt de situatie van dichtheidsverschillen in de haven van Delfzijl beschreven. In deze haven is een dichtheidsstroom aanwezig door het spuien van zoet water in de Handelshaven. Hierdoor is er een verschil in saliniteit in de haven en buiten de haven. Het water kan daarom heterogeen worden genoemd. Door het spuien neemt de dichtheid van het water in de Handelshaven af. De druk in de Handelshaven wordt hierdoor lager dan de druk buiten de haven. Omdat de laag met hoge druk naar lage druk stroomt, ontstaat er een bodemstroom naar binnen toe. Dit resulteert in een toename op de aanslibbing in de haven van Delfzijl.

Een verschil in dichtheid ontstaat niet alleen door verschil in saliniteit, maar kan ook ontstaan door een storm of door een verschil in temperatuur. R. van der Veen stelt dat de temperatuur een verschil in dichtheid geeft doordat het zeewater kouder is dan het water in de haven. Wanneer de temperatuur van het water daalt wordt de dichtheid groter. Door het koude zeewater is er een grotere druk buiten de haven dan in de haven. (Van der Veen, 1989).

Wateruitwisseling

Ingenieur W.D Eysink deed onderzoek naar de toename van het baggerbezwaar van Delfzijl door naar de toename in wateruitwisseling te kijken. Oorzaken van het verhoogde baggerbezwaar zouden toename in wateruitwisseling, verhoging van het slibgehalte of een verhoging van het uitzakpercentage kunnen zijn.

Op basis van het rapport van W.D. Eysink wordt de wateruitwisseling beschreven. De wateruitwisseling hangt onder andere af van het bergend oppervlak en het oppervlak van de havenmonding. De sedimentatie neemt af volgens W.D. Eysink wanneer de havenmonding kleiner wordt gemaakt. Een andere factor die voor wateruitwisseling zorgt is neerwerking. Door een neer vindt er wateruitwisseling plaats bij de havenmonding. De neer ontstaat in de havenmonding door een stroom dwars op de ingang van de haven. Het slibrijke en energieke water buiten de haven stroomt naar binnen en komt in minder energieke water terecht. De stroomsnelheid is in het minder energieke water lager, waardoor de slibdeeltjes op deze plek bezinken. (Eysink, 1999).

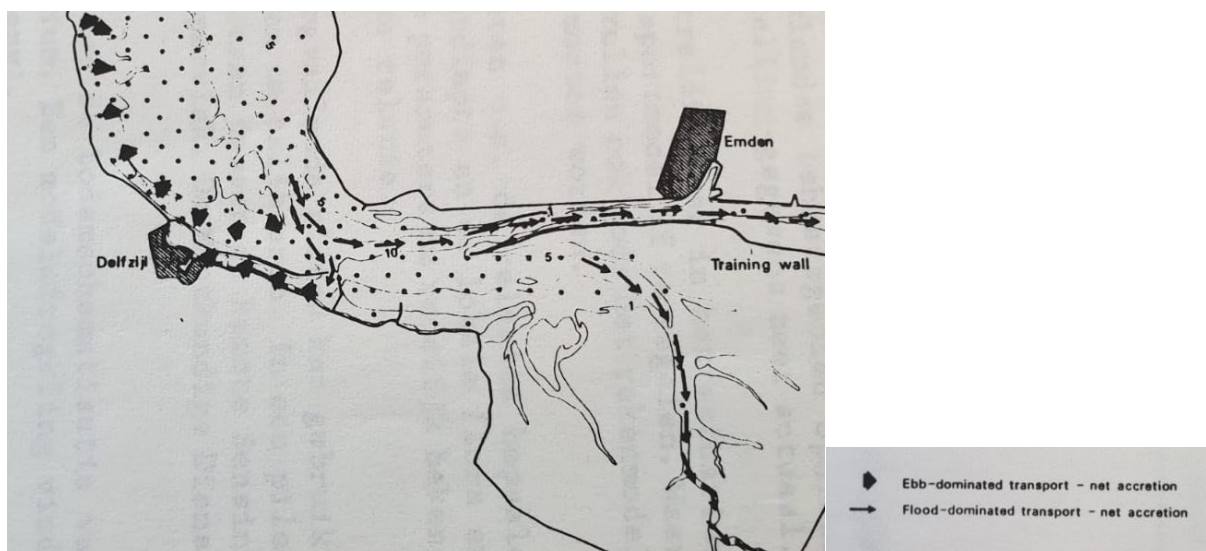
5.1.2 Locatie van aanslibbing

In hetzelfde rapport van W.D. Eysink stelt de wetenschapper dat in de havenmond de meeste aanslibbing plaatsvindt. Dit komt door de neerwerking op deze locatie. De dichtheidsstromen (bodestromingen) zorgen voor een slibtransport door de gehele haven.

In de haven van Delfzijl is een slibvang aanwezig die, indien hij leeg is, zorgt voor het concentreren van slib. Dit verhoogt de baggerefficiëntie doordat het slib zich meer concentreert op één locatie. (Eysink, 1999).

In het onderzoek 'Duurzaam Havenbeheer' van R. Meinsma wordt gesteld dat de slibdeeltjes na 1500 à 2000 m vanaf de havenmond bezinken. Deze locatie is vlak achter de voormalige slibvang. Hierna zou het slib door scheepvaart, baggerwerkzaamheden of zwaartekracht verder in de haven kunnen stromen. Deze processen zijn echter minder sterk dan de primaire transportprocessen. (Meinsma, 2013).

De locaties van slibtransport worden in het rapport 'Sediment transport in het Eems-Dollard estuarium, volgens de methode van McLaren' van Van Heuvel weergegeven in een figuur. (Zie figuur 5.1.1). Dit figuur geeft aan waar er slib wordt getransporteerd bij eb en vloed. Uit het figuur blijkt dat het slib bij vloed wordt getransporteerd door het Gaatje Bocht richting de havenmonding en bij eb verder in de haven verplaatst.



Figuur 5.1.1 Resttransportpaden van slib in het Eems-Dollard estuarium, haven van Delfzijl. (Van Heuvel, 1991).

5.1.3 Kwantiteit van het aanslibben

In het rapport 'Oorzaken aanslibbing haven van Delfzijl' wordt het SILTHAR-model beschreven. Met dit model is de kwantiteit van het sedimenttransport naar de haven te bepalen. Dit model bevat slechts een paar empirisch bepaalde constanten. In het vervolg van deze paragraaf wordt het SILTHAR-model verder uitgelegd aan de hand van het rapport van W.D. Eysink.

In het SILTHAR-model wordt allereerst de wateruitwisseling bepaald aan de hand van getijvolume, neerstromingen, dichtheidsstromingen en spuivolume. Met deze gegevens wordt de totale wateruitwisseling berekend. De totale wateruitwisseling kan worden gebruikt om de sedimentatie te bepalen. Andere factoren om de sedimentatie te berekenen zijn het bezinkgehalte en de gemiddelde concentratie in het aangevoerde water.

Wateruitwisseling door getijvolume

De wateruitwisselingen door middel van getijde wordt berekend door de volgende formule:

$$V_t = A_b \cdot \Delta h_t$$

Waarin:

- A_b = bergend oppervlak van de haven
- Δh_t = getijverschil in de haven

Wateruitwisseling in de havenmonding door horizontale circulatiestroom

De uitwisseling in de havenmond door een horizontale circulatiestroom is een neerstroom. De uitwisseling van water door een neerstroom hangt af van de stroomsnelheid voor de havenmond, de grote en de vorm van de havenmond en van het getijvolume. De volgende formule bepaald de uitwisseling in de havenmonding door horizontale circulatiestromen:

$$V_h = f_h \cdot h_0 \cdot b \cdot u_{0,max} / \pi \cdot T \cdot f_{th} \cdot V_t$$

Waarin:

- V_h = uitwisselingsvolume per getij door horizontale circulatie
- F_h/f_{ht} = coëfficiënten afhankelijk van de geometrie van de haven (is 0,02 en 0,2) (Zie B2.1.1)
- h_0 = diepte van de havenmond onder NAP
- b = breedte van havenmond
- $u_{0,max}$ = maximum stroomsnelheid langs havenmond tijdens vloed
- T = getijperiode
- V_t = getijvolume van de haven

Wateruitwisseling door dichtheidsstroming

De volgende formule bepaald de uitwisseling in het havenkanaal door dichtheidsstromen:

$$V_d = f_d \cdot h_0 \cdot \left(\frac{\Delta \rho_{0,max}}{\rho} g h_0 \right)^{\frac{1}{2}} \cdot T - f_{td} \cdot V_t = V_{d0} - f_{td} \cdot V_t$$

Waarin:

- V_d = uitwisselingsvolume dichtheidsstromen
- $\Delta \rho_{0,max}$ = karakteristiek dichtheidsverschil = $(\rho_{max} - \rho_{min})/2$ voor de havenmond
- ρ = dichtheid van water
- $(...)^{1/2}$ = karakteristiek parameter voor dichtheidsstromen
- g = gravitatieversnelheid
- f_d, f_{td} = coëfficiënten die afhankelijk zijn van respectievelijk V_{d0}/V_{ha} en V_{d0}/V_t , waarin V_{ha} = het volume van het havenbassin onder gemiddeld waterniveau. (Zie B2.2.2)

Effect op wateruitwisseling door spuien

Door het spuien vindt er een reductie van de instroom in de haven plaats doordat de uitstroom hoger wordt. Aan de andere kant wordt het zoutgehalte in de haven verlaagd, waardoor er een sterkere dichtheidsstroom ontstaat naar de haven toe. De volgende formule bepaald de totale uitwisseling met daarbij de wateruitwisseling door het spuien:

$$V_{uitw} = V_t + V_h + V_d + V_{es} \cdot n_s / n$$

Waarin:

- V_{es} = extra uitwisseling per getij door spuien
- n = aantal getijden per jaar
- n_s = aantal getijden per jaar waarin wordt gespuid

Sediment

De hoeveelheid sedimentatie wordt als volgt berekend:

$$\Delta T_s = p(c_{in} \cdot V_{uitw} + \frac{c_s \cdot V_s \cdot n_s}{n}) / \rho_d$$

Waarin:

- ΔT_s = sedimentatie in m³ per getijcyclus
- p = deel van het sediment dat bezinkt ($\Delta c / c_{in}$)
- C_{in} = gemiddelde concentratie in het van buiten de haven aangevoerde water in kg/m³
- V_{uitw} = totaal uitwisselingsvolume in m³ per getij
- ρ_d = dichtheid van de sedimentafzetting (droog) in kg/m³

De gemiddelde slibconcentratie van buiten de haven wordt geschat op 300 mg/l door W.D. Eysink voor de haven van Delfzijl. Het bezinkpercentage zou circa 27% zijn wat neerkomt op een slibconcentratie van ongeveer 81 mg/l wat in de haven blijft liggen. Het rapport van R. Meinsma verifieert dat 81 mg/l een aannemelijke waarde is.

Bezinkfactor

De bezinkfactor kan op de volgende wijze worden berekend:

$$p = 1 - \exp \left\{ -\frac{w}{h_0} \left(\frac{u^2}{u_c^2} \right) T_r \right\}$$

Waarin:

- p = deel van sediment dat bezinkt in de haven
- w = valsnelheid gesuspendeerd sediment
- u = gemiddelde stroomsnelheid in de haven
- u_c = kritische stroomsnelheid voor uitzakken van slib
- T_r = verblijftijd in de haven van het binnengelopen water

Omrekening naar m³ per jaar

De hoeveelheid sediment wordt in kg/jaar uitgedrukt en kan worden omgerekend in een jaarlijks te baggeren m³ aan sediment. De dichtheid zou kunnen worden geschat met de volgende formule:

$$\rho_d = 1250 \cdot p_z^2 + 350 \text{ kg/m}^3$$

Waarin:

- ρ_d = dichtheid van de sediment afzetting (droog)
- p_z = zandfractie van de afzetting

De zandfractie in Delfzijl is 0 tot 0,05 in de haven. De natte dichtheid, ρ_n , is al volgt te berekenen:

$$\rho_n = 1020 + 0,62 \cdot \rho_d$$

Met de natte dichtheid en het aantal kilo per jaar kan de hoeveelheid te baggeren materiaal per jaar worden berekend. (Eysink, 1999).

5.2 De vloeibare sliblaag

De ingenieurs Odd en Cooper beschrijven de vloeibare sliblaag als volgt: De vloeibare sliblaag is een dichte suspensie die een grote concentratie aan slibvlokken bevat. De concentratie is genoeg om de fysische eigenschappen te veranderen ten opzichte van het bovenliggende water met dezelfde temperatuur en zoutgehalte. (Odd & Cooper, 1889). In deze paragraaf worden de volgende punten over de vloeibare sliblaag beschreven:

- Eigenschappen en reologie;
- Ontstaan;
- Transport oorzaken;
- Meetmethoden;
- Management.

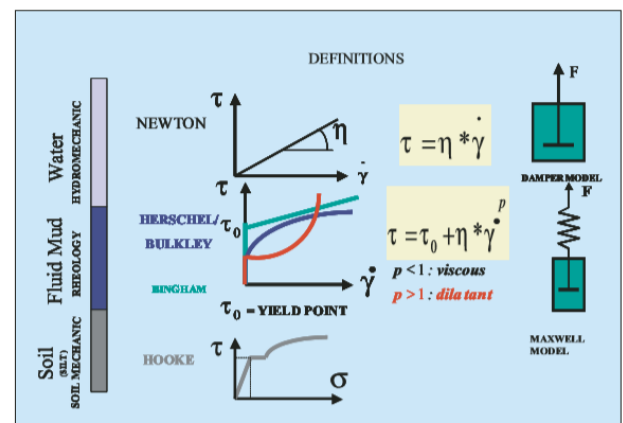
5.2.1 Eigenschappen vloeibare sliblaag

De eigenschappen van de vloeibare sliblaag worden in deze paragraaf beschreven aan de hand van het rapport van R. Wurpts. De vloeibare sliblaag is een laag met een hoge concentratie aan sediment met een lage dichtheid die langzaam consolideert. Daardoor blijft de vloeibare sliblaag over een lange periode in suspensie. Dit komt onder andere door micro-organismen die zorgen voor een bepaald slijm, waardoor de vloeibare sliblaag drijfkracht blijft behouden. Deze micro-organismen kunnen alleen leven als de sliblaag aerobisch is. De consolidatie van de vloeibare sliblaag zou kunnen worden omschreven als het veranderen van aerobisch materiaal naar anaerobisch materiaal. Door het injecteren van lucht met behulp van de Airset blijft het materiaal in de haven van Delfzijl aerobisch. Wurpts geeft aan dat de vloeibare sliblaag een voorfase is van slib.

Het slijm van de micro-organismen zorgt er tevens voor dat er een lage frictie is tussen de slibdeeltjes. Dit zorgt voor bevaarbaarheid van het slib. Het hoge gehalte aan connecties tussen de slibdeeltjes en de lage schuifsterkte door het slijm zorgen ervoor dat de sliblaag vloeibaar is. Hoe gek het ook klinkt zorgt de hoge sediment concentratie er juist voor dat de vloeibare sliblaag geen vaste laag wordt. Het is de hoge biogene factor die ervoor zorgt dat het slib niet consolideert tot een vaste laag.

Vloeibaarheid

De vloeibaarheid van de sliblaag wordt ook in het rapport van R. Wurpts beschreven. Hij stelt dat de vloeibare sliblaag niet als normale en niet als vaste stof kan worden beschouwd. Het zit ertussenin zoals te zien in figuur 5.2.1. De vloeibare sliblaag valt onder de Herschel/Buckley vloeistoffen. Deze vloeistoffen hebben de eigenschap dat ze eerst een bepaalde spanning moeten ondervinden om te gaan vloeien. Bij nog meer schuifspanning wordt de vloeistof steeds minder viscoos. Dit wordt een afschuifverdunde vloeistof genoemd. (Verderop in deze paragraaf nader verklaard).



Figuur 5.2.1 Definitie van de vloeibare sliblaag. (Wurpts, 2005).

De vloeibaarheid van de sliblaag werd in Emden waargenomen door een proef met een cutter suction dredger. Dit baggerschip had een voortdurend hoge productie doordat waarschijnlijk de vloeibare sliblaag naar de cutterhead stroomde met een aanzienlijke snelheid. Hierdoor kan worden aangenomen dat de sliblaag naar dieper gelegen gedeeltes stroomt. Het stromen van de vloeibare

sliblaag gebeurt volgens Wurpts onder laminaire omstandigheden met een constante gradiënt. Een gradiënt van 0,0001 graden is al genoeg om een stroom te veroorzaken.

Fysische eigenschappen van de vloeibare sliblaag

Wurpts beschrijft de vloeibare sliblaag als een visco-elastisch materiaal. Dit wil zeggen dat de vloeibare sliblaag eerst een zwichtspanning moet verbreken om vloeibaar te worden. De viscositeit van de vloeibare sliblaag verandert voortdurend onder verschillende schuifspanningen. Daarom is het volgens Wurpts niet verstandig om de viscositeit, evenals de dichtheid, te gebruiken als parameter voor de bevaarbaarheid door slib.

Een hoog organisch gehalte in de vloeibare sliblaag zorgt voor een lage zwichtspanning. Dit is voordelig bij baggerwerkzaamheden. De zwichtspanning van een anorganisch materiaal van 4% massa is ongeveer 1000 Pa, terwijl die van een organisch materiaal bij ongeveer 30 Pa ligt.

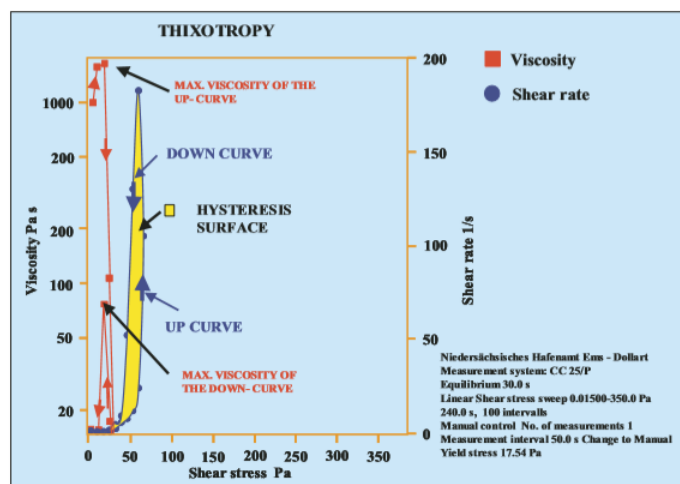
Afschuifverdünnend

De vloeibare sliblaag heeft als eigenschap dat het afschuifverdünnend is. Dit wil zeggen dat hoe meer schuifspanning er optreedt, hoe makkelijker de vloeistof stroomt. De viscositeit neemt dus af naarmate de schuifspanning vergroot. Wanneer de schuifspanning daarna afneemt wordt de vloeistof weer meer viscos. De afschuifverdünnende eigenschap van het vloeibare slib zorgt ervoor dat het bevaarbaar is voor schepen onder sommige omstandigheden.

Het tegenovergestelde van afschuifverdünnend is afschuifverdikkend. Bij een afschuifverdikkende vloeistof wordt de viscositeit verhoogd bij een toenemende schuifkracht waardoor het zich meer als een vast materiaal gaat gedragen.

Thixotropie

Een thixotropische vloeistof wordt niet alleen vloeibaar door een schuifspanning maar krijgt zijn stevigheid terug na een periode van rust. De vloeibare sliblaag is volgens Wurpts een thixotropische substantie. Als er na de curve van viscositeit wordt gekeken in figuur 5.2.2 valt op dat de viscositeit niet terugkeert naar zijn oorspronkelijke hoogte. In figuur 5.2.2 zakt de viscositeit onder een spanning van ongeveer 1600 Pa naar ongeveer 10 Pa. Wanneer de spanning afneemt, stijgt de viscositeit van 10 Pa naar ongeveer 80 Pa. (Wurpts, 2005).



Figuur 5.2.2 Typische thixotropische gedrag van een vloeibare sliblaag monster. (Wurpts, 2005).

5.2.2 Ontstaan vloeibare sliblaag

Een conceptvoorstel van Arcadis gericht aan Groningen Seaports omschrijft het ontstaan en het bestaan van de vloeibare sliblaag. In dit voorstel wordt omschreven dat de sliblaag ontstaat doordat het sediment in de waterkolom sneller bezinkt dan dat de sliblaag consolideert. Hierdoor blijft het in suspensie en wordt het geen vaste laag.

In het artikel 'Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays and lakes. 1' wordt het ontstaan van een vloeibare sliblaag onder het gevolg van golven beschreven. Golven kunnen een cohesieve bodem vloeibaar maken. Dit gebeurt wanneer de structuur van bodem is verbroken door gevolg van een toename in korrelspanning. (McAnally, Friedrichs et al., 2007)

5.2.3 Transport van vloeibare sliblaag

Het artikel van Odd en Cooper beschrijft dat de vloeibare sliblaag onder de invloed van zwaartekracht en hydrostatische krachten beweegt. (Odd & Cooper, 1889) Het artikel 'Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays and lakes. 1' van McAnally et al. beschrijft de transportprocessen van de vloeibare sliblaag. De transportprocessen meesleuren, zwaartekrachtstroming en stroming door golven worden beschreven op basis van dit rapport.

Meesleuren (trekkracht)

In het artikel wordt beschreven dat de bovenliggende waterlaag de sliblaag kan meesleuren. Wanneer de stroming in het waterkolom groot genoeg is om een trekkracht te genereren, komen de slibdeeltjes in de waterkolom. Vervolgens worden deze deeltjes meegenomen door de stroming.

Zwaartekrachtstromingen

Zwaartekrachtstromingen ontstaan door een beweging van bodemmateriaal ten gevolge van de zwaartekracht. Dit wordt tevens een dichtheidsstroom genoemd. Wanneer er geen sprake is van stroming of golven stroomt de vloeibare sliblaag door zwaartekracht. Bij een helling van meer dan één graden ontstaat een turbulente stroming.

De zwaartekrachtstroming van de vloeibare sliblaag kan conservatief, auto-suspenderend of dissiperend zijn. Bij een conservatieve zwaartekrachtstroom heeft de stroom geen interactie met de omgeving. Bij een auto-suspenderende stroom produceert de vloeibare sliblaag genoeg schuifkracht om de bodem te eroderen, waardoor de vloeibare sliblaag materiaal meeneemt. Door het extra gewicht en de grotere dichtheid (door het extra opgenomen sediment) neemt de stroming toe. Bij een dissiperende troebelheidsstroom verliest de vloeibare sliblaag zijn sediment via menging met het bovenliggende water en verliest het daarom materiaal. Hierdoor neemt de snelheid in deze stroom af. De meeste zwaartekrachtstromen zijn auto-suspenderend en dissiperend doordat de stromen aan de onderkant bodemmateriaal meenemen en aan de bovenkant verliezen aan de waterkolom. De mate waarin de stroom versnelt of afremt hangt af van welk mechanisme dominant is.

Als de helling onder de 1 graden ligt stroomt de vloeibare sliblaag laminair wanneer er geen sprake is van bovenliggende stroming of golven. Het sediment in de stroom zal langzaam sedimenteren waardoor de snelheid afneemt of zelfs stopt.

De stroming en golven spelen een rol in de zwaartekrachtstromingen. De stromingen bovenliggend aan de vloeibare sliblaag kan de zwaartekrachtstroom afremmen. De stroming houdt de vloeibare sliblaag echter wel in suspensie.

Stroming door golven

De stroming wordt veroorzaakt doordat de energie van de golf in de vloeibare sliblaag wordt overgebracht door schuifkrachten. (McAnally et al., 2007)

5.2.4 Meten van de vloeibare sliblaag

In het artikel 'Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays and lakes. 2' wordt beschreven dat het moeilijk te achterhalen is waar de sliblaag zich bevindt, omdat de top van de vloeibare sliblaag slechts een iets hogere dichtheid heeft dan water. Tevens is het lastig om de bodem te bepalen van een vloeibare sliblaag, doordat de dichtheid over de diepte verandert. Hydraulisch gezien is de bodem de plek waar geen stroming van het materiaal is. Bij een andere methode wordt er naar de bevaarbaarheid gekeken van het bodemmateriaal. Aan de hand van het tweede deel van het rapport van McAnally worden de meetmethodes beschreven.

Meetmethodes

Vroeger werd er gemeten met een loodlijn. Tegenwoordig wordt er gebruik gemaakt van echosounders. Het artikel geeft aan dat een echosounder in een gebied met een vloeibare sliblaag niet consequent dezelfde waarde meet. Doordat de sterkte van het reflecteren van het signaal (die de diepte meet) afhangt van de stijging in dichtheid en niet op een specifieke dichtheid. De vloeibaarheidsgrens ligt tussen de 1150 en 1200 kg/m³ en hangt af van de zwichtspanning en de viscositeit over de diepte van de sliblaag.

- **Concentratie**

De concentratie van de vloeibare sliblaag kan worden gemeten bij het maken van een watermonster. Deze wordt vervolgens geanalyseerd in het laboratorium.

- **Dichtheid**

De dichtheid kan gemeten worden met akoestische snelheid en verzwakking, elektrische weerstand, elektromagnetisch, optisch en nucleair.

- **Schuifsterkte of viscositeit**

Een meetinstrument aan een touw wordt gebruikt om karakteristieken te bestuderen van de vloeibare sliblaag zoals de schuifsterkte en de viscositeit. (McAnally, Teeter et al., 2007).

5.2.5 Management vloeibare sliblaag

In het artikel 'Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays and lakes. 2' wordt het management van de vloeibare sliblaag besproken. Het management van de vloeibare sliblaag bevat drie principes: 'Keep Sediment Out', 'Keep Sediment Moving' of het verwijderen van het sediment. In paragraaf 5.4 wordt nog een 4^{de} principe beschreven die is onderzocht door Wiertsema & Partners voor de haven van Delfzijl, namelijk 'Keep Sediment Navigable'.

Keep Sediment Out (KSO)

Hierbij wordt de bron (waar het slib wekomt) van het sediment gecontroleerd. Dit zorgt ervoor dat het sediment buiten de probleemgebieden blijft door middel van maatregelen. Maatregelen die kunnen worden toegepast zijn:

1. Troebelheidsmanagement;
2. Bank en bodem management;
3. Kiezen van een juiste locatie van nieuwe faciliteiten;
4. Sedimentatie vallen;
5. Blokkerende maatregelen.

In de haven van Delfzijl werd vroeger gebruik gemaakt van een sedimentatieval in de vorm van een slibvang. Deze maatregel zorgde dat het sediment zich concentreerde, waardoor de mobiliteit- en transportkosten van het baggeren afnam. Tevens zou dit volgens het artikel hebben gezorgd voor een grotere nautische diepte. Ook gaven ze aan dat door de sedimentatie vallen waarschijnlijk meer materiaal zal sedimenteren. De andere maatregelen zijn niet relevant om te beschrijven in dit onderzoek en worden daarom buiten beschouwing gelaten.

Keep Sediment Moving (KSM)

Bij deze methode van management wordt ervoor gezorgd dat de slibdeeltjes in beweging blijven, waardoor de deeltjes minder de neiging hebben om te consolideren. Maatregelen die hieronder vallen zijn:

1. Het voorkomen van stroming langs palen en pieren, die zorgen voor zones met een hoge schuifspanning;
2. Het reduceren van materialen die flocculatie versterken zoals zout en organisch materiaal;
3. Beter design van de vaargeul, waardoor rustig water en neren worden voorkomen;
4. Beter design van de vaargeul, waardoor stroming beter wordt begeleid;
5. Hydraulische controle, door het managen van de snelheid, afvoer en hoogte van het water.

In de haven van Delfzijl zijn deze onderwerpen niet van toepassing en worden daarom niet besproken.

Baggeren van de vloeibare sliblaag

In de meeste havens moet er meestal veel worden gebaggerd doordat er vaak geen KSM- of KSO-methoden wordt toegepast. Daardoor moet er frequent worden gebaggerd en gepeild. Er zijn drie methodes om de vloeibare sliblaag te baggeren:

1. Traditioneel baggeren en transporteren;
2. Baggeren met een vaste installaties;
3. Het vloeibaar maken van de sliblaag waardoor het getransporteerd wordt door stromingen.

Het baggeren van de vloeibare sliblaag is goed uit te voeren door een hopper, maar het transporteren van het materiaal is inefficiënt. Dit doordat het opgebaggerde materiaal veel water bevat. (McAnally et al., 2007). Het baggeren van de vloeibare sliblaag wordt toegepast in de haven van Delfzijl evenals de derde maatregel (maar dan vooral in suspensie brengen van de vloeibare sliblaag). Het baggeren met een vaste installatie is in de haven van Delfzijl niet volledig onderzocht.

5.3 De zanddrempel

In deze paragraaf van het theoretisch kader worden theorieën over de zanddrempel en zandtransportprocessen beschreven.

5.3.1 Zandtransport

In het boek *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas* van Leo van Rijn worden de principes van het zandtransport uitgelegd. Aan de hand van de informatie uit dit boek wordt het zandtransport beschreven. Er zijn drie soorten processen in water waarop zanddeeltjes in beweging komen.

- Rollende en afschuivende beweging;
- Hoppende of springende beweging;
- Gesuspendeerde beweging.

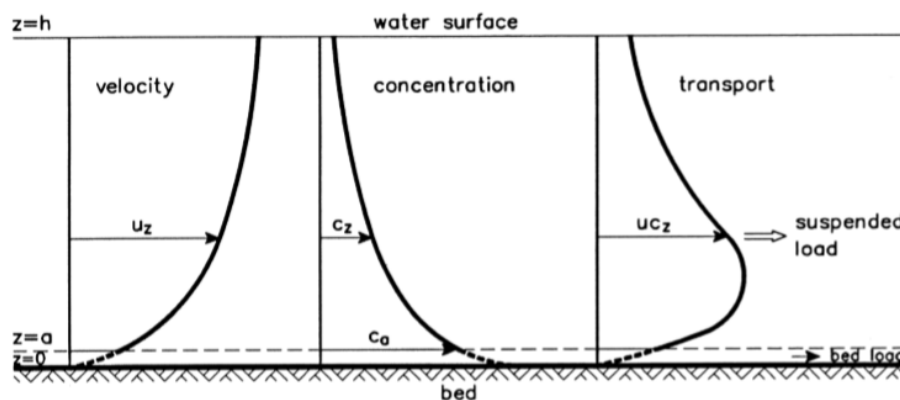
Het soort beweging valt samen met de snelheid van het water. Wanneer de snelheid van het water bij de bodem net aan groter wordt dan dat de bodem aankan, zal het sediment gaan rollen of schuiven. Met een groter wordende snelheid bij de bodem door het water zullen de deeltjes gaan hoppen en springen. Wanneer de snelheid van het water bij de bodem sneller wordt dan de valsnelheid van de deeltjes zal het materiaal worden gelift, waardoor het in suspensie gaat.

De rollende en afschuivende beweging en de hoppende en springende beweging vallen onder bodemtransport. De gesuspendeerde beweging valt onder gesuspendeerde transport. In het gesuspendeerde materiaal bevindt zich ook een zogenoemde 'Wash load' dit bevat deeltjes die kleiner zijn dan 63 micrometer (of te wel die kleiner zijn dan zand).

Gesuspendeerde zandtransport

Wanneer het zand gesuspendeerd is, zal het bijna even snel verplaatsen als de snelheid van de vloeistof. Meestal wordt het gesuspendeerde materiaal aangegeven in een volume per volume (m^3/m^3 , [-]) of in gewicht per volume (kg/m^3). De concentraties van het sediment wordt lager naarmate er verder van de bodem wordt gemeten. Dit hangt af van de valsnelheid en de stroming langs de bodem.

Het onderstaande figuur laat de samenwerking zien tussen de snelheid in het water en de concentratie in het water. De factor van deze twee geeft de op diepte geïntegreerde gesuspendeerde transport weer.

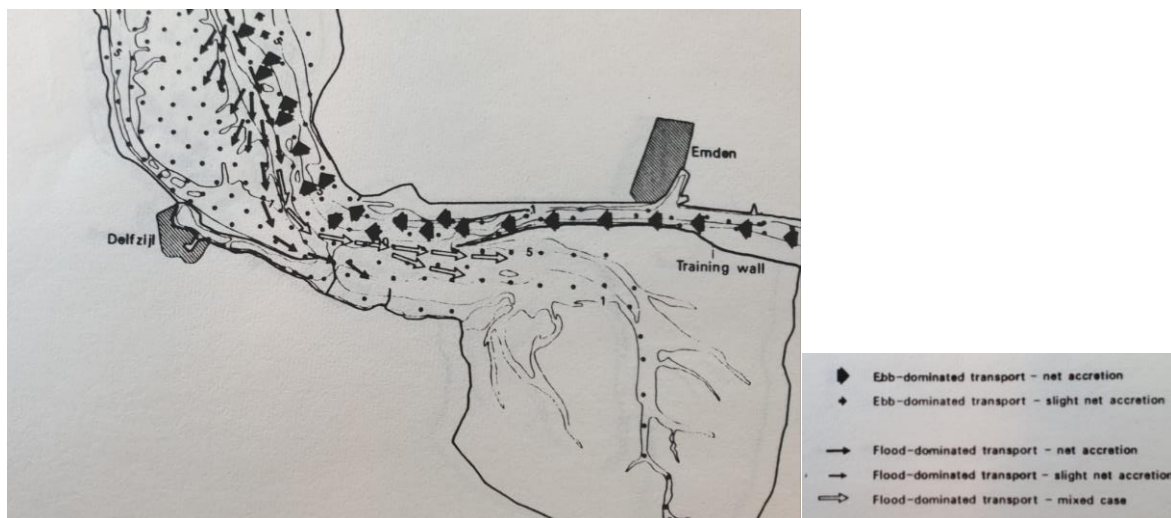


Figuur 5.3.1 Schets van het gesuspendeerde transport door middel van de factoren concentratie en snelheid van het water.

Wanneer er 'wash load' aanwezig is beïnvloed dit het transport van zand positief. De valsnelheid van de zanddeeltjes neemt af doordat de dichtheid van de vloeistof anders is met veel 'wash load'. Hierdoor blijven de zanddeeltjes makkelijker in suspensie. Hetzelfde geldt wanneer de temperatuur van het water zakt.

5.3.2 Zandtransportprocessen in Eems-Dollard

In het rapport van Tj. Van Heuvel zijn kaarten van de zandtransportprocessen in het Eems-Dollard estuarium weergegeven zoals te zien in figuur 5.3.2. In dit figuur is goed te zien dat er aanzanding is ter plaatse van de havenmond. In dit rapport is tevens een kaart (zie bijlage 5) te vinden met de slib- en zandpercentages. Op deze kaart is te zien dat de bodem aan de buitenkant van de havenmond een slibpercentage heeft van 25-50% en een zandpercentage van 50-75%.

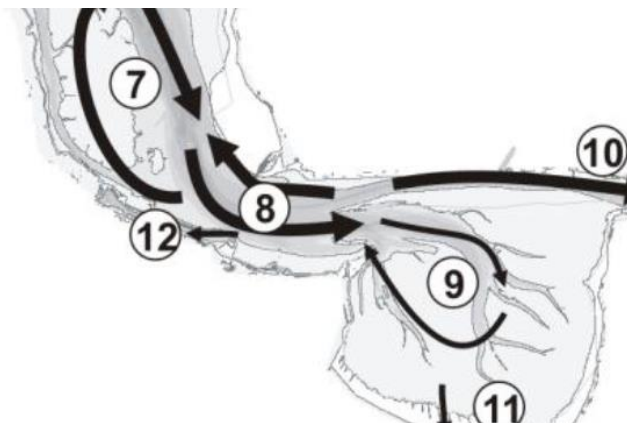


Figuur 5.3.2 Resttransportpaden van zand in het Eems-Dollard estuarium, haven van Delfzijl. (Van Heuvel, 1991).

Onderstaand figuur uit het rapport 'Hydromorfologie Eems-Dollard estuarium' geeft wederom weer dat er sprake is van transportprocessen voor de havenmond. Dit blijkt tevens uit de omschrijving van transportproces nr. 8 en nr.12:

"8. Een sedimentcirculatiecel in de Gaatjebocht, waarbij de zuidwestelijke geulhelpt vloedgedomineerd is en de noordoostelijk helft ebgedomineerd;

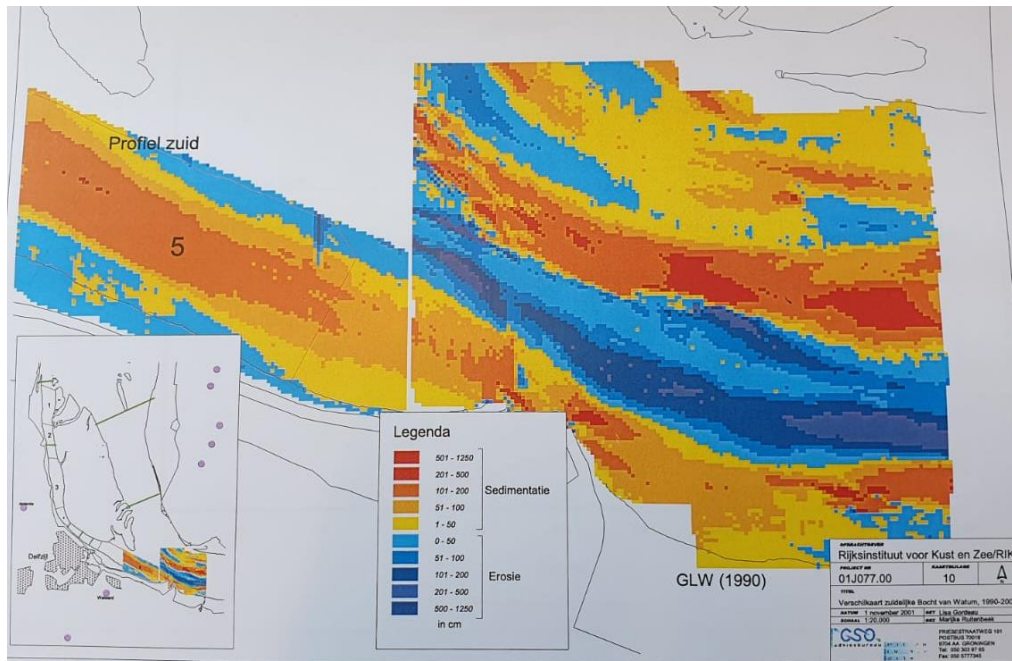
12. Sedimenttransport (hoofdzakelijk slib) naar de haven van Delfzijl en Eemshaven, door een combinatie van processen, waaronder estuariene circulatie;" (Grasmeijer, 2013b)



Figuur 5.3.3 Schematische weergave van de sedimenttransportpaden in het Eems-Dollard estuarium, haven van Delfzijl. (Grasmeijer, 2013b).

Sedimentatie

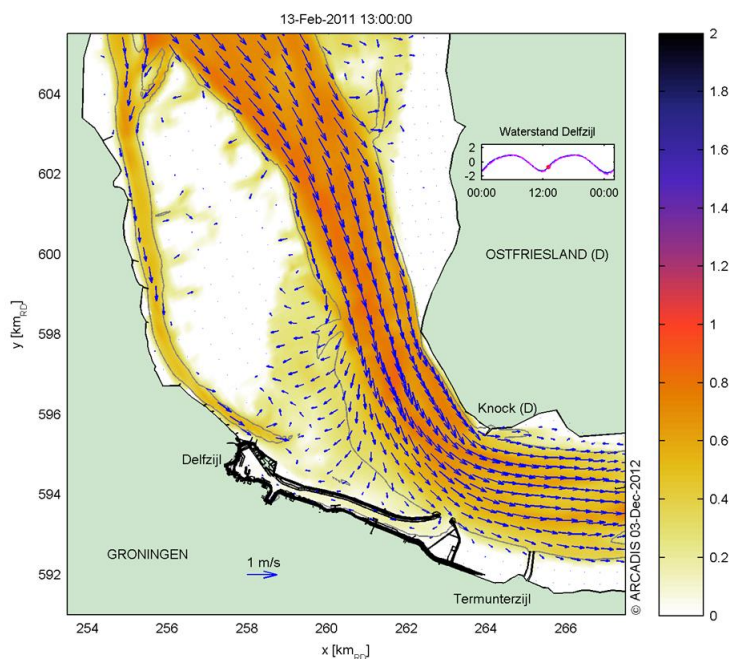
In figuur 5.3.4 uit het onderzoek 'Morfologisch onderzoek Bocht van Watum' is een kaart weergegeven van het verschil in hoogte van de havenmondning tussen 1990 en 2000. Uit deze kaart blijkt dat er veel sedimentatie is voor de havenmondning.



Figuur 5.3.4 Verschilkaart zuidelijke Bocht van Watum met daarin ook de havenmondning enigszins bedekt met de legenda. (Ruitenbeek, 2001)

Stroming

Figuur 5.3.5 uit het rapport 'Building with Nature: Voorstel pilotstudie beperking aanslibbing haven van Delfzijl' laat een modellering van de stroming zien. Hierop is te zien dat de havenmondning aan de buitenkant ligt van een bocht in de stroming. Tevens is goed te zien dat de stroming afneemt in de buitenbocht.



Figuur 5.3.5 Berekende snelheden opkomend tij rond en in de haven van Delfzijl op 13 februari 2011 13:00 uur. (Grasmeijer, 2013a).

5.4 Keep the Sediment Navigable

Door Groningen Seaports is een onderzoek gedaan of het mogelijk is om in de Haven van Delfzijl door het slib te varen (KSN-methode). De volgende punten over dit onderzoek worden beschreven:

- Relevantie;
- Theoretische achtergrond;
- Verband met drempelhoogte.

De rapporten die worden gebruikt om dit te beschrijven zijn fase 1 en fase 2 van de rapporten 'Duurzaam havenbeheer' van R. Meinsma.

5.4.1 Relevantie

Met de methode van het varen door slib wordt de nautische diepte anders gedefinieerd. KSN staat voor Keep the Sediment Navigable. Wanneer deze toepassing niet wordt gebruikt, gebruiken de meeste havens een kielspel van 10% van de maximale diepte van het schip. Met deze toepassing zou het mogelijk zijn om de kielspel van het schip te verlagen tot -7%.

Het door het slib varen is relevant op twee aspecten van de haven. Door het varen door slib kan de diepgang worden vergroot en/of de baggerkosten kunnen worden gereduceerd. Dit laatste doordat de haven op minder diepte hoeft te worden gehanteerd. Tevens kan het tijdvenster van opvaart en afvaart worden verbreed voor schepen met een grote diepgang.

Ook wordt er door R. Meinsma gesuggereerd dat door de combinatie van de KSN-methode en het verlagen van de drempel de bereikbaarheid kan worden geoptimaliseerd.

5.4.2 Theoretische achtergrond van het varen door slib

De KSN-methodiek zorgt ervoor dat de bodemdiepte anders wordt gedefinieerd. Om dit te begrijpen zijn de begrippen hydraulische- en nautische bodem van belang. W.D. Eysink legt deze begrippen op de volgende manier uit:

- **Hydraulische bodem** – De hydraulische bodem is de bodem waarbij de grond zodanig is geconsolideerd dat onder normale stroom omstandigheden de bodem niet beweegt.
- **Nautische bodem** – Hierin wordt gesteld dat de schuifspanning van de bodem niet het schip beperkt op manoeuvreerbaarheid. (Eysink, 1999).

Door dit verschil ligt de nautische bodem van Delfzijl lager dan de hydraulische diepte volgens ingenieur R. Meinsma. In de haven van Rotterdam wordt uitgegaan dat het varen door een sliblaag met de dichtheid van 1200 kg/m³ mogelijk is. Volgens R. Meinsma is tevens de zwichtspanning een maat om de nautische diepte te bepalen. Om te varen door slib dient de sliblaag aan bepaalde condities te voldoen. De volgende eisen om te varen door slib zijn genoemd in het onderzoek:

- De dikte van de sliblaag dient tenminste 22% van de diepgang van het maatgevende schip te zijn;
- De dichtheid van de sliblaag dient flauw op te lopen van 1,025 t/m³ tot 1,22 t/m³;
- Op de harde bodem (-15% van de diepgang van het maatgevende schip), dient het slib een dichtheid te hebben van 1,15 t/m³;
- Het slib moet voldoen aan de reologische haalbaarheid studie die Wiertsema en Partners eerder hebben uitgevoerd voor de haven van Delfzijl. (Meinsma, 2011).

De sliblaag in de haven van Delfzijl schijnt geschikt te zijn voor het varen door slib volgens het voorgaande onderzoek in 2011 (Meinsma, 2011). Er hoeft in de haven weinig te gebeuren om de sliblaag toepasbaar te maken voor het varen door slib. Ook wordt benoemd dat de WID en vaarbewegingen ervoor zorgen dat het slib wordt geconditioneerd.

5.4.3 Verband met drempel hoogte

In het rapport wordt het verband van het varen door slib vergeleken met de bevaarbaarheid van de haven. Tevens wordt in dit rapport gesteld dat wanneer de zanddrempel wordt verlaagd met 0,5 meter de aanslibbing toeneemt tot 50.000 à 60.000 m³/jaar. Deze toename zou vooral ontstaan door het toenemen van de neerstroming in de havenmond. Ook wordt gesteld dat volgens Eysink een reductie van het baggervolume kan ontstaan van 5% tot 10% wanneer het varen door het slib gepaard gaat met de verlaging van de drempel.

In het rapport van R. Meinsma blijkt dat wanneer de KSN-methode wordt toegepast de drempelhoogte maatgevend wordt. Om dit goed in beeld te krijgen heeft R. Meinsma een havenfactor samengesteld die aangeeft wanneer de zanddrempel maatgevend is en wanneer het havenkanaal beperkend is (factor F). Deze factor is berekend door het tijdsvenster van het havenkanaal te delen door het tijdsvenster van de havenmonding en is te zien in figuur 5.4.1.

Afvaart		Getijstroom geen beperking					
Havenfactor [F], Zeehavenkanaal versus drempel Havenmond							
	Kielspeling % van T t.o.v 210 kc [%]	T = 8.1 m		Schip T = 9 m		T = 9.5 m	
		tijd	F ¹⁰	tijd	F [1]	tijd	F [1]
		[h:mm]	[-]	[h:mm]	[-]	[h:mm]	[-]
Havenmond	<u>10%</u>	<u>8:30</u>	0.8	<u>5:40</u>	0.6	<u>3:10</u>	0.0
Zeehavenkanaal	<u>10%</u>	<u>7:10</u>		<u>3:20</u>		<u>0:00</u>	
Havenmond	10%	8:30	1.3	5:40	1.5	3:10	2.3
Zeehavenkanaal	-7%	10:50		8:30		7:10	
noot: cursief en onderstreept tijvensters betreft de huidige (indicatieve) situatie.							
F<1 Zeehaven kanaal maatgevend				Diepte t.o.v m NAP, Gemiddelde waarden			
F= 1 Zeehavenkanaal in balans met de drempel Havenmond				Zeehaven kanaal (210kc)		-9 m NAP	
F>1 drempel Havenmond maatgevend				Drempel (210 kc)		-9.5 m NAP	

Figuur 5.4.1 Tijdsvenster afvaart. (Meinsma, 2013).

In het bovenstaande figuur is te zien dat de zanddrempel maatgevend wordt, wanneer de kielspeling van -7% wordt toegepast in het havenkanaal. In figuur 5.4.2 wordt de zanddrempel verlaagd tot 10,5 meter en wordt de havenfactor opnieuw berekend. In dit figuur is goed te zien dat havenfactor in balans is wanneer de havenmonding wordt verlaagd naar -10,5 meter.

Afvaart								Getijstroom geen beperking							
Havenfactor [F], Zeehavenkanaal versus drempel Havenmond															
		Kielspeling % van T t.o.v 210 kc [%]	T = 8.1 m		Schip T = 9 m				T = 9.5 m						
			tijd [h:mm]	F ¹⁰ [-]	tijd [h:mm]	F [1] [-]	tijd [h:mm]	F [1] [-]							
Havenmond		<u>10%</u>	<u>11:40</u>	0.6	<u>8:30</u>		0.4	<u>7:00</u>		0.0					
Zeehavenkanaal		<u>10%</u>	<u>7:10</u>		<u>3:20</u>			<u>0:00</u>							
Havenmond		10%	11:40	0.9	8:30		1.0	7:00		1.0					
Zeehavenkanaal		-7%	10:50		8:30			7:10							
noot: cursief en onderstreept tijvensters betreft de huidige (indicatieve) situatie.															
F<1 Zeehaven kanaal maatgevend								Diepte t.o.v m NAP, Gemiddelde waarden							
F= 1 Zeehavenkanaal in balans met de drempel Havenmond								Zeehaven kanaal (210kc) -9 m NAP							
F>1 drempel Havenmond maatgevend								Drempel (210 kc) -10.5 m NAP							

Figuur 5.4.2 Optimalisatie havenfactor door verdieping van de drempel. (Meinsma, 2013).

5.5 Modelleren

Een model om het sedimenttransport te simuleren is gemaakt met de software van Deltares. Dit model heet het D3S-model en wordt ondersteund met de software Delft3D. Delft3D wordt niet gebruikt in dit onderzoek, echter is de informatie over het model relevant voor vervolgonderzoek en de aanbevelingen in het adviesrapport. De informatie over Delft3D is daarom toegevoegd in bijlage 8.

De modellen TCMUD en SEDTBUE worden in hoofdstuk 8 nader beschreven. Het SILTHAR-model is uitgelegd in paragraaf 5.1.3.

Hoofdstuk 6: Interview en gesprekken

Dit hoofdstuk bevat informatie over uitgevoerde interviews en gesprekken met externe partijen. Deze interviews en gesprekken werden meestal georganiseerd om meer informatie over bepaalde onderwerpen te krijgen. In dit hoofdstuk worden keuzes voor onderzoeksmethodes en rekenmodellen toegelicht die in dit onderzoek worden gebruikt. De interviews en gesprekken hebben geleid tot bepaalde beslismomenten in het onderzoek.

6.1: Interview met specialisten Fugro Land B.V.

Op 12 november is een interview gehouden met R. Barth en R. Meinsma. Het gesprek vond plaats bij Fugro waar beide personen werkzaam zijn als projectmanager. De volgende onderwerpen zijn behandeld in het interview:

- Delft3D;
- 'Fluid Mud Model';
- Vloeibare sliblaag;
- KSN-methodiek;
- Zanddrempel;
- Overige onderzoeken.

Het interview was een ongestructureerd interview. Ter voorbereiding is een topiclijst gemaakt om alle vooraf bedachte punten te behandelen. Tijdens het gesprek zijn aantekeningen gemaakt en later verwerkt tot volledige antwoorden. Uitkomsten van het interview zijn te vinden in bijlage 6. De belangrijkste conclusie is dat het TCMUD en SILTHAR-model worden gebruikt om de éénmalige uitstroming en extra aanslibbing te berekenen.

6.2 Gesprek met Specialist Waterproof B.V.

Om meer informatie op te doen over het berekenen van de aanzanding en het 3D-modelleren is het bedrijf Waterproof B.V. benaderd. Dit bedrijf bleek uit het voorgaande interview met Fugro en op de site van L. Van Rijn vaardig te zijn in het uitvoeren van dit soort onderzoeken. Het bedrijf was bereidwillig om te helpen bij dit onderzoek en op 28 januari 2020 heeft een gesprek plaatsgevonden.

Het gesprek was geen interview en is daarom niet vastgelegd. In het gesprek kwam naar voren dat een 3D-modellering in het tijdsbestek van dit onderzoek niet mogelijk was en dat daarvoor meerdere praktijkonderzoeken zouden moeten plaatsvinden. Een andere optie om de aanzanding van de drempel te benaderen was een rekenmodel van L. van Rijn genaamd SEDTUBE. Voor dit model was de belangrijkste onbekende de korrelverdeling in het zand. Toevallig waren bodemonderzoekers, van Anteagroup, bezig geweest om dit te bepalen en kwam dit rapport eerdaags. Tevens kwam in het gesprek naar voren dat de aanzanding in de praktijk nuttig kon zijn om het model op te kalibreren.

Omdat er in het tijdsbestek van de afstudeerperiode en het beschikbare budget geen ruimte was om een 3D-modellering uit te voeren, is ervoor gekozen om een minder ingewikkeld model te gebruiken. Dit model geeft nog steeds een goede indicatie van de aanzanding weer met de bijbehorende processen die hierbij een rol spelen.

6.3 Tweede gesprek met specialist Fugro Land B.V.

Doordat gedurende het onderzoek werd vastgelopen op het TCMUD-model is een tweede gesprek georganiseerd. In dit gesprek was het doel om erachter te komen, wat de uitkomsten van het TCMUD-model vertelden in de situatie van de haven van Delfzijl.

In het gesprek werd geconcludeerd dat het TCMUD-model een dichtheidsstroom berekend door middel van het verschil in dichtheid in de haven en buiten de haven. Tevens werd er deze dag geconcludeerd, dat de methode in de haven van Delfzijl anders was dan L. van Rijn (maker van het model) aangeeft in zijn reader.

Hoofdstuk 7: Praktijkonderzoeken

In dit hoofdstuk zijn praktijkonderzoeken beschreven die zijn uitgevoerd voor het onderzoek. De praktijkonderzoeken zijn analyses van peildata om inzicht te krijgen in de praktijksituatie. Tevens worden de praktijksituaties gebruikt om rekenmodellen te kalibreren. De volgende praktijksituaties zijn onderzocht:

- Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone;
- Analyse aanzanding zanddrempel.

Met de analyse 'peilkaarten na baggerwerk Amazone' wordt de afvloeiing van de sliblaag onderzocht en met de analyse 'aanzanding drempel' wordt de aanzanding op de drempel onderzocht bij het stilleggen van de baggerwerkzaamheden op de drempel gedurende een week.

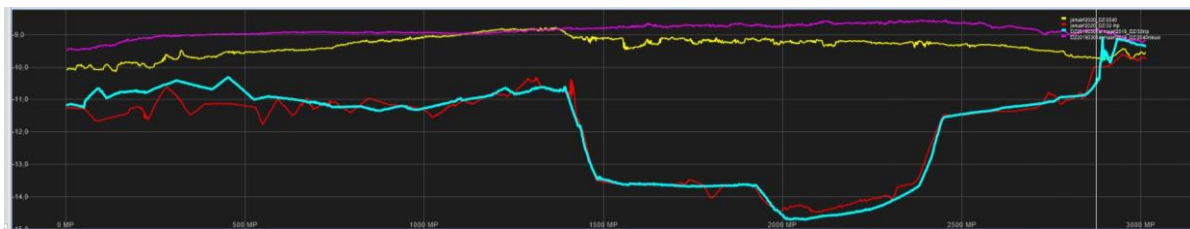
7.1 Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone

7.1.1 Aanleiding

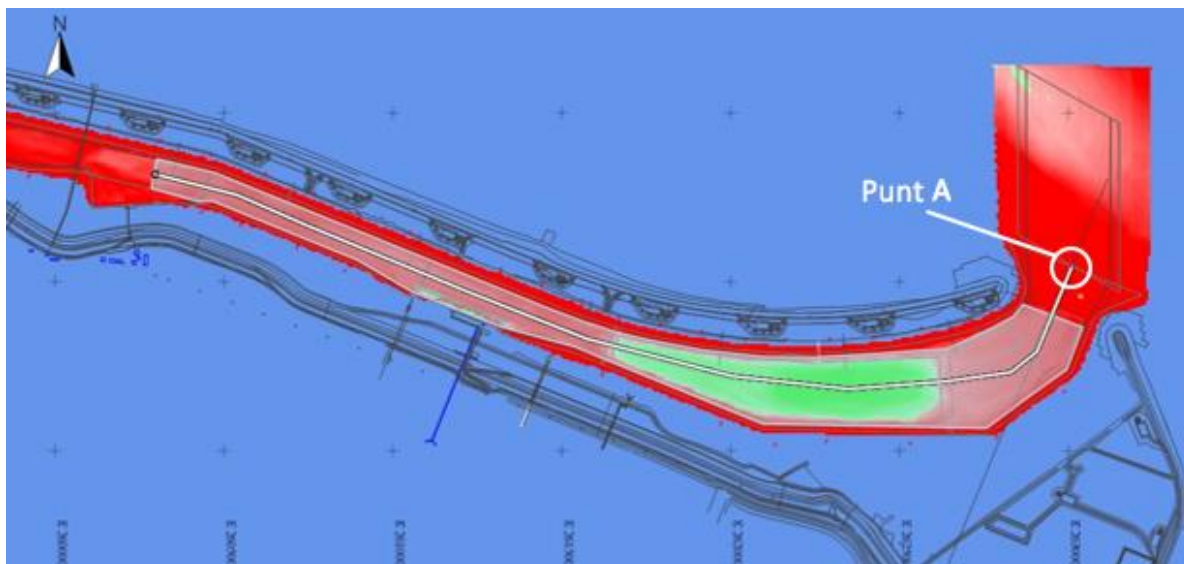
In april 2019 en in augustus 2019 is de zanddrempel gebaggerd met de hopper de Amazone van Baggerbedrijf de Boer. Het baggerschip heeft onder andere met behulp van agitatie de drempel met 0,6 meter verlaagd. Op de peilkaart van maart 2019 is de diepte van de zanddrempel ongeveer 9,1 meter en op de peilkaart van januari 2020 ongeveer 9,7 meter.

Uit gesprekken met de projectleider en schipper van de Airset van Baggerbedrijf de Boer kwam naar voren dat het de afgelopen maanden (na verdieping drempel) makkelijker was om de sliblaag op diepte te houden. Dit is de aanleiding geweest om dit onderzoek te starten. De vraag bij dit onderzoek is: "Wat is er met het slib gebeurd na het verdiepen van de drempel bij de havenmonding van Delfzijl? En zo ja, op welke manier is dit slib afgestroomd?"

Een dwarsdoorsnede van beide peilkaarten (maart 2019 en januari 2020) geeft een indicatie wat er met het slib is gebeurd. Deze dwarsdoorsnede is te zien in figuur 7.1.1a. In de regel onder het figuur is aangegeven wat welke lijn weergeeft. Zoals eerder aangegeven geeft de 210 kHz-meting de top van de sliblaag weer en geeft de 33kHz-meting de 'harde bodem' weer. Duidelijk is te zien dat de bovenkant van de sliblaag lager ligt in de peilkaart van januari 2020 (na het baggeren van de drempel). Om dit daadwerkelijk te bevestigen met cijfers, wordt de inhoud van de sliblaag berekent met het programma Qinsy. Dit programma kan in een aangegeven gebied (zoals getekend in figuur 7.1.1b) de inhoud van de sliblaag berekenen.



Figuur 7.1.1a Langsprofiel van peilkaart in maart 2019 (cyane (33kHz) en paarse (210kHz) lijn) en in januari 2020 (rode (33kHz) en gele (210 kHz) lijn). De verticale witte lijn geeft start van de meting aan (150 meter van punt A).

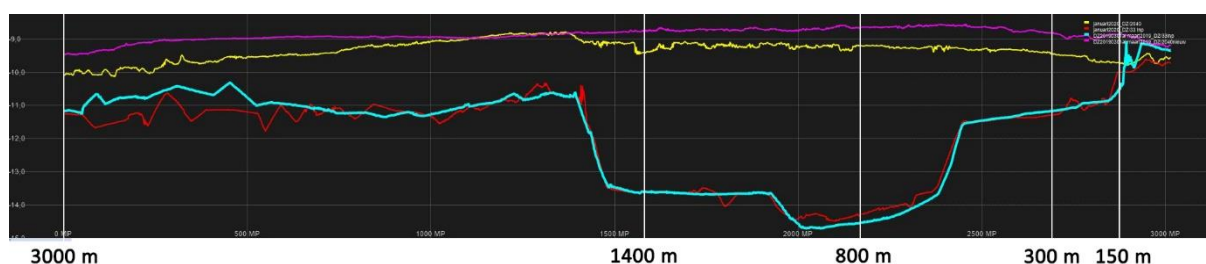


Figuur 7.1.1b Situatie van de inhoudsberekening van 150 meter tot 3000 meter, de locatie van het langsgeslacht en de locatie van punt A. (Einde van het langsgeslacht bij de havenmonding).

7.1.2 Alternatieven

Er zijn verschillende alternatieven bedacht om het verloop van de mogelijke afvloeiing weer te geven. Met dit verloop wordt bedoeld of het slib, relatief, meer is afgenomen dicht bij de drempel als verderop in het Zeehavenkanaal. Om dit goed te kunnen bepalen, worden de inhoudsberekeningen in vakken opgedeeld.

De vakken worden gerefereerd naar een vast punt. Dit is het punt A en ligt op de hartlijn van het Zeehavenkanaal op de noordelijke grens van baggervak 1a. (zie figuur 7.1.1b). Het eerste vak bestaat uit de sliblaag nog voor de slibvang en is tot 300 meter, het tweede vak is tot voor het midden van de slibvang (800 meter) en het derde vak tot iets voor het eind van de slibvang (1400 meter). Tevens wordt het verschil in inhoud van de sliblaag tot 3000 meter berekent. Deze 3000 meter is afgeleid uit het rapport 'Duurzaam Havenbeheer' waarop dit de locatie is tot waar de slibdeeltjes bezinken.



Figuur 7.1.1c Indelingen van gemeten vakken weergegeven in het langsgeslacht.

Er is voor gekozen om vanaf 150 meter vanaf punt A de inhoudsberekeningen uit te voeren. Vanaf 150 meter is de sliblaag voornamelijk aanwezig. Van 0 tot 150 meter is de sliblaag ook aanwezig, echter is deze laag hier nog klein en verschilt de inhoud van dit vak, op het oog, niet veel met beide peilingen.

7.1.3 Berekeningen

In onderstaand tabel is het verschil in inhoud van de sliblaag berekend. De inhoudsberekeningen zijn uitgevoerd in het programma Qinsy 9.1. Dit programma berekent het verschil tussen de 210 kHz en de 33 kHz meting, wat overeenkomt met de inhoud van de sliblaag. In de onderstaande tabel is elke keer de inhoud berekend vanaf 150 meter tot aan één van de alternatieven.

Tot totaal				
Afstand van het berekende vak	Inhoud maart 2019 (m3)	Inhoud januari 2020 (m3)	Vershil in m3	% in m3
150 m tot 300 m	136.118	81.052	55.066	40,45%
150 m tot 800 m	591.715	440.994	150.721	25,47%
150 m tot 1400 m	999.759	794.501	205.258	20,53%
150 m tot 3000 m	1.237.458	1.034.456	203.002	16,40%

Tabel 7.1.1 Berekeningen van afname van de sliblaag in m³ en % vanuit de peilgegevens van maart 2019 en januari 2020.

In de onderstaand tabel is per vak het verschil in inhoud van de sliblaag berekend. Op deze manier is goed na te gaan in welk vak het meeste slib is verwijderd. De vakken bestaan uit:

- 150 tot 300 meter;
- 300 tot 800 meter;
- 800 tot 1400 meter;
- 1400 tot 3000 meter.

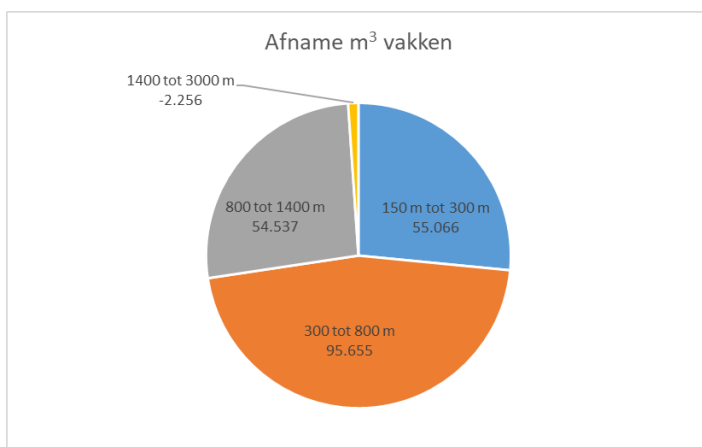
Per vak				
Afstand van het berekende vak	Inhoud maart 2019 (m3)	Inhoud januari 2020 (m3)	Vershil in m3	% in m3
150 m tot 300 m	136.118	81.052	55.066	40,45%
300 tot 800 m	455.597	359.942	95.655	21,00%
800 tot 1400 m	408.044	353.507	54.537	13,37%
1400 tot 3000 m	237.699	239.955	-2.256	-0,95%

Tabel 7.1.2 Berekeningen van afname van de sliblaag in m³ en % vanuit de peilgegevens van maart 2019 en januari 2020. Waarin alternatieven beginnen vanaf het punt waarin het vorige vak is geëindigd.

7.1.4 Analyse

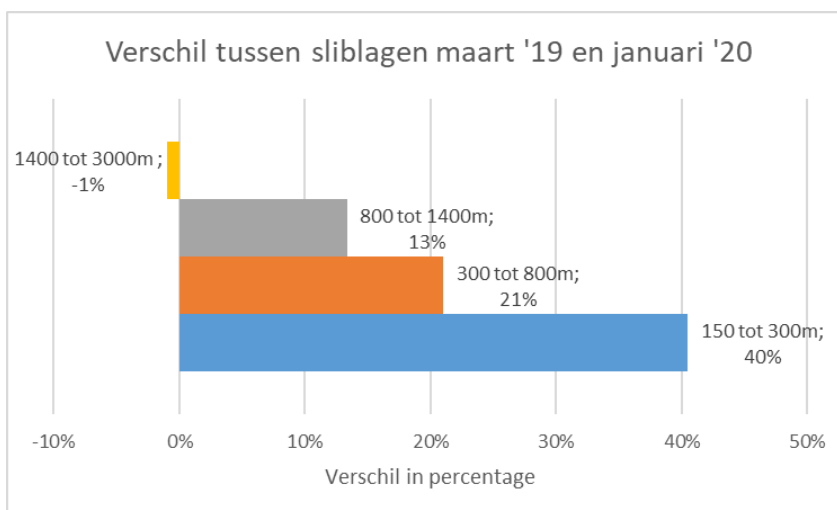
In tabel 7.1.1 is te zien dat er een grote afname van slibmateriaal heeft plaatsgevonden. 203.000 m³ van de totale 1.237.500 m³ aan vloeibaar slib is verwijderd met de verlaging van de zanddrempel van 0,6 meter. Dit bedraagt een afname van 16,4 % van de sliblaag.

In onderstaand figuur is te zien waar het meeste materiaal van deze 203.000 m³ is verwijderd. Vooral in vak 300 tot 800 meter (voorste deel van de slibvang) is het meeste materiaal verwijderd. In de vakken 150 tot 300 meter en 800 tot 1400 meter is ongeveer dezelfde hoeveelheid vloeibaar slib verwijderd. De totale inhoud van het vak 150 tot 300 meter is echter veel kleiner dan vak 800 tot 1400 meter. Opvallend is dat in vak 1400 tot 3000 meter geen slib is verwijderd (en zelfs een beetje is toegenomen). Ook is dit visueel zichtbaar in het langsprofiel (in figuur 7.1.1a), doordat de 33kHz en 210 kHz lijnen dezelfde afstand van elkaar lijken te hebben in dit deel op beide peilingen. Deze gegevens duiden erop dat hoe verder in de haven, hoe minder impact de verlaging van de zanddrempel heeft op de vloeibare sliblaag.



Figuur 7.1.2 Weergave hoeveel van het totaal verwijderde slib uit welk vak komt.

Dit laatste is ook terug te vinden in tabellen 7.1.1 en 7.1.2. Waarbij er een afname is aan verschil in %, naarmate de afstand van de drempel groter wordt. Visueel is dit zichtbaar gemaakt in het onderstaande figuur waarin per vak het verschil tussen totaal en afname (in %) is weergegeven. Het verschil in percentages is opmerkelijk. In het vak 150 tot 300 meter is dit 40% en in vak 300 tot 800 meter is dit ongeveer met een factor 0,5 afgenomen tot 21%. Vervolgens is dit wederom met een soort gelijke factor (ongeveer 0,6) afgenomen in het daaropvolgende vak van 800 tot 1400 meter.



Figuur 7.1.3 Weergave in % van het vloeibare slib dat in het vak is verwijderd.

In het langspand (figuur 7.1.1a) en de inhoudsberekeningen lijkt het erop dat het slib vanaf het begin van de slibvang onder een hoek afstroomt naar buiten toe. De top van de sliblaag in het geel bedraagt ongeveer 8,9 meter en de afstand naar de drempel is hier ongeveer 1600 meter. Het hoogteverschil met de drempel is hierdoor 0,8 meter (drempeldiepte is 9,7 meter in januari 2020). De hoek vanaf dit punt tot aan de drempel is hierdoor ongeveer 0,02864 graden.

Zoals te zien in figuur 7.1.4 heeft de Airset 67.050 m³ meer gebaggerd in 2019 dan in 2018. In 2019 is ook meer gestort op de plek van de slibvang door de baggerschepen, wat mogelijk deze toename in baggerintensiteit van de Airset kan verklaren. Deze toename is echter klein, doordat het overgrote gedeelte van het gestorte materiaal bij de havenmonding, direct na het storten de haven uitstroomt door getij stroming.

Delfzijl

Onderhoudsbaggerwerk - hoeveelheden / kosten (geen saneringsbaggerwerk)

Jaar	verspreid m3b	persen in depot m3b	verplaatst binnen haven m3b	Airset excl. sleehopper	Airset alles	prognose Alba / AirS	hoeveelheden totaal
2018	0	221.563	601.015	721.485	1.322.500		1.544.100
2019	24.590		1.012.784	376.766	1.389.550		1.414.100

Figuur 7.1.4 Knipsel uit het Excelsheet van het onderhoudsbaggerwerk waarin jaarlijks de baggerhoeveelheden worden bijgehouden.

Wanneer de vaartracks van de Airset worden vergeleken in de periode van maart 2019 tot aan januari 2020, valt op dat de Airset alleen baggert tot aan 550 meter van punt A. Duidelijk moet zijn dat de Airset hier baggert middels het injecteren van zowel water als lucht, waardoor meer een proces van agitatie optreedt. Het slib komt door het lucht hoog in de waterkolom en wordt voornamelijk verplaatst middels de stroming van het getij. Andere baggerschepen hebben in deze periode niet de sliblaag gebaggerd.

7.1.5 Conclusie

Uit de analyse van de verschillen in sliblagen voor en na het verlagen van de drempel met 0,6 meter kunnen meerdere dingen worden geconcludeerd:

- Het baggeren van de drempel met een diepte van 0,6 meter heeft ervoor gezorgd dat de sliblaag is afgenomen. In deze afname is te zien dat het materiaal dicht bij de drempel het meest afstroomt en dat er een verloop is aan verschil in percentages naarmate de afstand van de zanddrempel is toegenomen. Met andere woorden heeft het verlagen van de drempel minder effect op de sliblaag verderop in het Zeehavenkanaal.
- De inhoudsberekeningen verschillen niet na de slibvang richting de haven. De verlaging van de drempel van 0,6 meter heeft dus geen invloed gehad op de afstroom verder dan de slibvang. Dit punt op 1600 meter vanaf punt A is het einde van de afvloeiing van de sliblaag.
- Het lijkt erop dat de sliblaag onder een hoek is afgestroomd. Deze hoek naar de zanddrempel bedraagt 0,02864 graden.
- Tevens kan er worden geconcludeerd dat de Airset niet aanzienlijk meer heeft gebaggerd in 2019 dan in 2018. Daardoor kan gesteld worden dat de baggerinspanning van de Airset geen oorzaak is van de afgenomen sliblaag.
- Wanneer er wordt gekeken naar de vaartracks valt het op dat het slib wat niet is geïnjecteerd door de Airset wel afstroomt. Dit blijkt doordat de Airset tot 550 meter van punt A baggert en het slib afstroomt tot aan 1600 meter. Deze stroming komt vermoedelijk tot stand door een dichtheidsverschil tussen het opgewoelde materiaal (lage dichtheid) aan de ene kant en de niet gebaggerde sliblaag (hoge dichtheid) aan de andere kant. Door de flauwe helling kan worden bevestigd dat het slib onder gevolge van een dichtheidsstroom is afgevoerd en niet door afschuiving van het materiaal.

7.1.6 Discussie

Op basis van de bovenstaande conclusies is de verwachting dat het slib zal afstromen wanneer de zanddrempel wordt verlaagd. Echter is dit slechts een enkele waarneming van één drempelverlaging. De betrouwbaarheid van het onderzoek zou kunnen worden verhoogd, wanneer deze praktijkproef opnieuw wordt uitgevoerd met nog een verdere verdieping.

Een andere suggestie voor een vervolgonderzoek is om te onderzoeken of het slib onder de aangetoonde afstromingshoek blijft afstromen. Dit zou kunnen worden bepaald door langsprofielen te vergelijken van peilingen van de maanden na januari 2020. Wanneer de voortdurende afstroming kan worden bevestigd, zal het effect van de drempelverlaging positiever zijn. Hoogstwaarschijnlijk zal een deel van de binnenkomende aanslibbing dan direct afstromen onder de hoek van afstroming, waardoor de negatieve effecten van een drempelverlaging positiever worden. Wanneer het een negatief effect heeft en de hoek van afstroming flauwer wordt, dan is het effect of er voortdurende afstroming plaatsvindt bekend en kan dit mee worden genomen in de overweging.

Er moet bij dit onderzoek wel worden gecontroleerd of de baggerinspanning niet is toegenomen deze maanden. Ook moet er niet zijn gebaggerd op locaties waar het slib natuurlijk zou moeten afstromen. Wanneer dit wel het geval is, zullen de resultaten van het vervolgonderzoek ongeldig zijn.

7.2 Analyse aanzanding zanddrempel

7.2.1 Aanleiding

De aanleiding om dit onderzoek te starten is het kalibreren van het SEDTUBE-model. Het SEDTUBE-model berekent de aanzanding in een vaargeul (de vaargeul ter plaatse van de zanddrempel). Voor betrouwbare resultaten dient dit model te worden gekalibreerd op de werkelijke situatie. Het probleem is echter dat de werkelijke situatie van aanzanding niet bekend is en niet kan worden bepaald vanwege het voortdurende baggerwerk van de Airset. Omdat deze gegevens zeer relevant zijn voor het onderzoek worden de baggerwerkzaamheden een week lang stilgelegd in de haven van Delfzijl om de aanzanding te kunnen meten.

De aanzanding van de zanddrempel kan ook een indicatie geven van de werkzaamheden van de Airset op de zanddrempel, doordat de Airset normaal gesproken de drempel op een constante diepte weet te houden. De hoeveelheid m^3 aan aanzanding zal de Airset in normale omstandigheden hebben weggebaggerd.

De nauwkeurigheid van dit onderzoek is laag, doordat de aanzanding over een korte periode (1 week) wordt gemeten. Echter kwam het in deze periode niet uit om de baggerwerkzaamheden langer stil te leggen. De aanzanding is sterk afhankelijk van de stromingscondities in de testweek en zal daarom niet een goede indicatie geven van de aanzanding van een jaar. Het SEDTUBE-model is echter in staat om de stromingscondities aan te passen op deze gemeten week en hiermee het model te kalibreren naar de werkelijke situatie. Vervolgens kunnen de jaarlijkse stromingscondities worden toegepast en kan de jaarlijkse aanzanding worden berekend.

De methode geeft enige onnauwkeurigheid, echter is het doel om te benaderen of er extra aanzanding plaatsvindt wanneer de drempel dieper wordt gebaggerd. Daarom is het van belang een indicatie (gebaseerd op de praktijk) te berekenen van de aanzanding per jaar en deze berekening met steeds diepere zanddrempels toe te passen. Om uiteindelijk de extra aanzanding te bepalen per drempeldiepte.

De vraag die wordt beantwoord met dit onderzoek bedraagt: Hoe groot is de aanzanding van de zanddrempel in de haven van Delfzijl over een bepaalde tijd en met bepaalde stromingscondities?

7.2.2 Methode

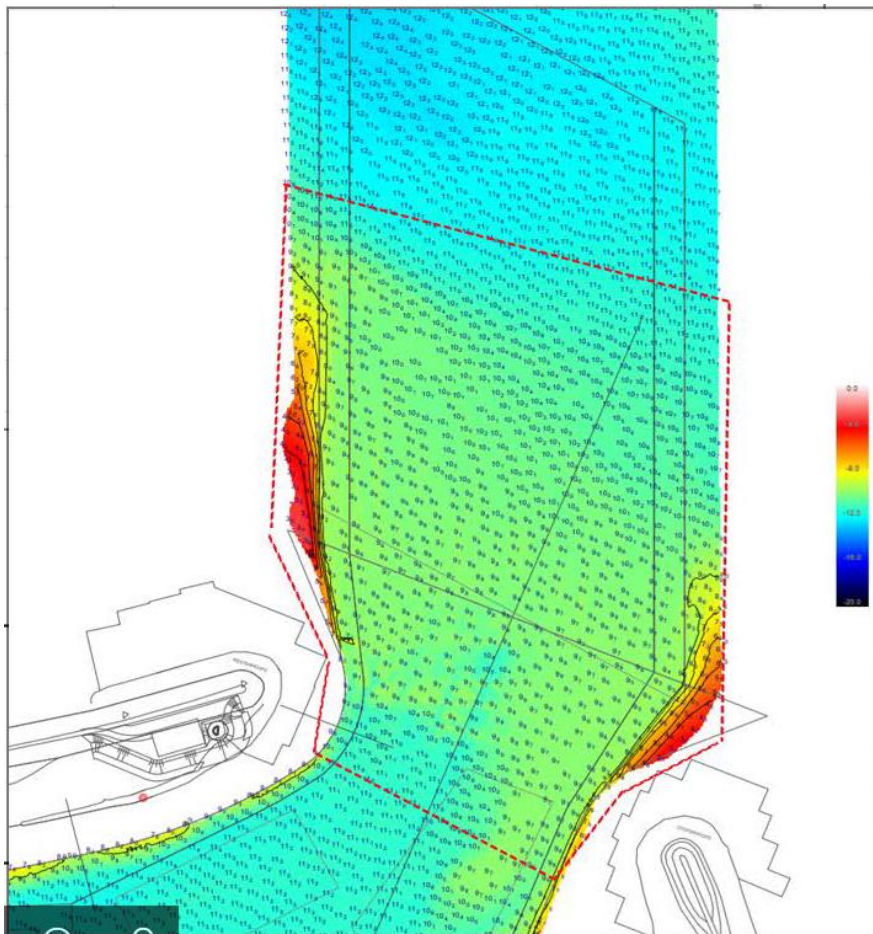
Om de aanzanding te bepalen wordt de drempel gepeild direct nadat de baggerwerkzaamheden stil zijn gelegd en voordat de baggerwerkzaamheden weer beginnen. De peilingen worden uitgevoerd met zowel een singlebeam als multibeam met de reden dat ook de eventuele sliblaag wordt aangetoond. Het vak dat moet worden gepeild voor dit onderzoek is weergegeven in figuur 7.2.1. Het peilvak bevat de gehele zanddrempel en het bijbehorende talud.

Na de 'voor en na' peiling van de drempel kan met behulp van het surveyprogramma Qinsy de toegenomen inhoud aan aanzanding worden bepaald door de 33kHz-data van elkaar af te trekken over een bepaald gebied (de drempel). Tevens kan een dwarsdoorsnede worden gemaakt die nodig is voor de kalibratie van het SEDTUBE-model.

De stijging op de dwarsdoorsnede van het bodemprofiel en de toegenomen inhoud worden met elkaar gekoppeld. Vervolgens wordt het toegenomen dwarsprofiel in SEDTUBE met dezelfde factor vermenigvuldigd. Dit met de reden dat het SEDTUBE-model de toename van het profiel berekent in een 2D-situatie (alleen van dwarsprofiel), echter om een vervolgberekening uit te voeren is het nodig om een inhoudstoename te weten. Om dit beter te begrijpen wordt er gebruik gemaakt van het volgende voorbeeld:

Wanneer in de praktijk de zanddrempel op het dwarsprofiel 1 meter is toegenomen en de inhoud van de aanzanding 50.000 m³ zou zijn. Dan wordt aangenomen dat per 1 meter stijging in de dwarsdoorsnede van het SEDTUBE-model de aanzanding ook 50.000 m³ is. In het SEDTUBE-model (dwarsprofiel) blijkt vervolgens de aanzanding bij een drempeldiepte van 12 meter 2 meter te zijn in dezelfde tijdsperiode, dan wordt aangenomen dat de aanzanding 100.000 m³ bedraagt.

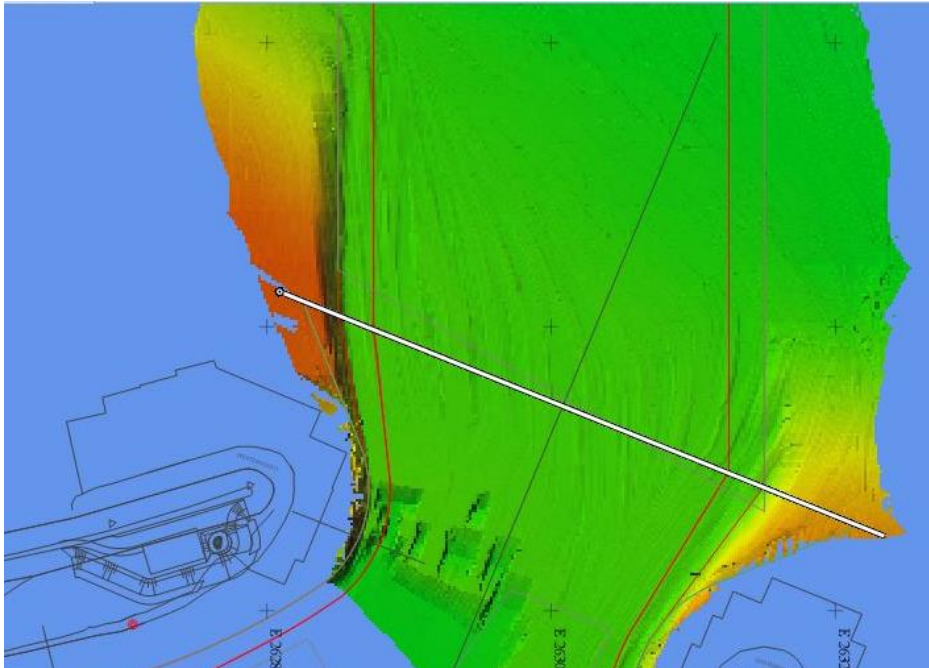
Voor de peilwerkzaamheden is een planning gemaakt die terug te vinden is in bijlage 7. De inpeiling van de drempel begint in de ochtend van vrijdag 6 maart en de uitpeiling zal plaatsvinden op vrijdag 13 maart. Op deze dagen wordt bijgehouden wanneer de peilingen gereed zijn om te bepalen wat de tijdsduur van de meting is. Ook worden de stromingscondities geanalyseerd van het meetpunt bij de Eemshaven in deze periode. (Dit meetpunt is het meest relevant aan de stromingscondities in de haven van Delfzijl).



Figuur 7.2.1 Situering van het peilvak voor het onderzoek: 'aanzanding Zanddrempel'.

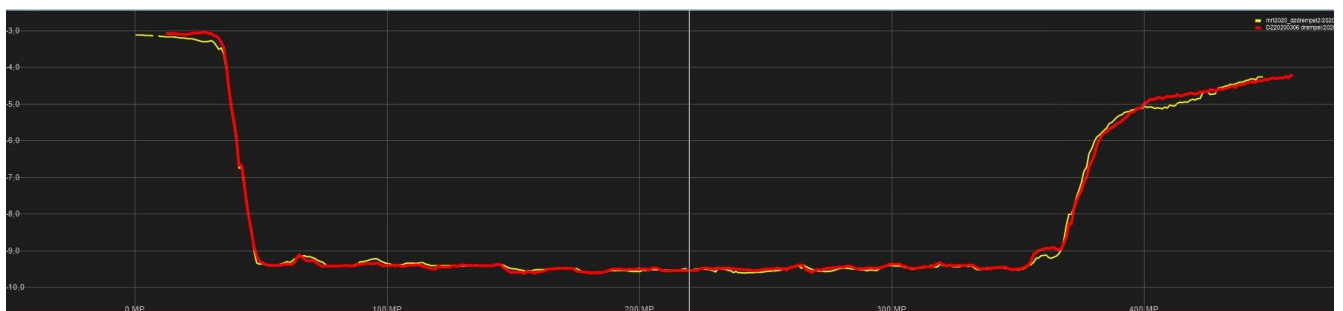
7.3.3 Resultaten

De twee verschillende peilingen worden ingeladen in het programma Qinsy. In dit programma wordt een dwarsprofiel van het Zeehavenkanaal gemaakt ter hoogte van de drempel. De exacte locatie is de Noordlijn van baggervak 1a. (Zie figuur 7.2.2).



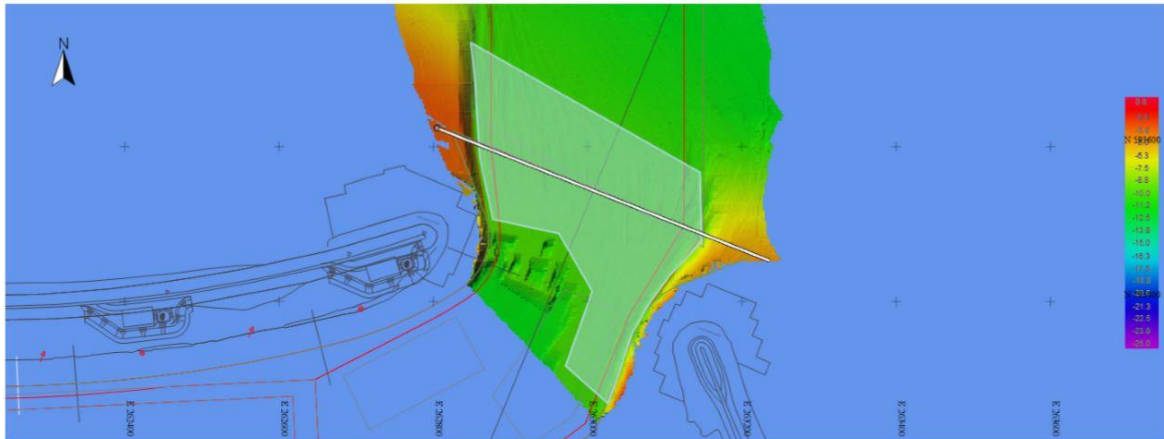
Figuur 7.2.2 Locatie van dwarsprofiel (witte streep) van het Zeehavenkanaal op de Noordlijn van baggervak 1a.

Het dwarsprofiel is weergegeven in figuur 7.2.3. In dit profiel is te zien dat er niet een overduidelijke verhoging van de 33 kHz lijn is ontstaan in een week tijd. Om hier een betere conclusie over te kunnen trekken is er om de 2 meter een dieptemeting (in Qinsy) uitgevoerd van beide peilingen. De metingen worden van elkaar afgetrokken en een gemiddelde stijging in het bodemprofiel wordt berekend. Deze gemiddelde stijging wordt alleen genomen over de waarden tussen de taluds. Het resultaat van de berekening laat zien dat de aanzanding in dit profiel -0,00576 meter bedraagt. Met andere woorden heeft het niet aangezand, maar er is erosie ontstaan. Hierdoor is het profiel gemiddeld met 5,76 millimeter naar beneden gegaan.



Figuur 7.2.3 Dwarsprofiel van de 33 kHz-meting van vrijdag 6 maart (rode lijn) en van vrijdag 13 maart (gele lijn) op de Noordlijn van baggervak 1a.

De inhoudsberekening geeft een negatieve waarde weer. In onderstaande afbeelding is het meetgebied weergegeven. In dit meetgebied is er 1356 m³ aangezand en 4150 m³ geërodeerd. Dit levert een netto erosie van 2739 m³ op. Het meetgebied in figuur 7.2.4 is op deze wijze aangenomen, doordat hier geen sliblaag aanwezig is. Ter hoogte van de sliblaag zijn namelijk kuilen aanwezig, die op de tweede meting niet aanwezig zijn. Wanneer dit gebied mee werd genomen, was de aanzanding positief. In het meetgebied ligt de tweede meting van vrijdag 13 maart gemiddeld 4 cm lager dan de inpeiling. Ook de multibeam-metingen gaven een negatief resultaat.



Figuur 7.2.4 Meetgebied van de inhoudsberekening, waarin de kuilen linksonder in de peiling niet worden meegenomen.

Tijdens de proef zijn de golfhoogtes bepaald vanuit het meetpunt vanaf de Eemshaven. In de haven van Delfzijl is geen meetpaal aanwezig, waardoor het niet mogelijk was om de golfhoogtes hier te bepalen. Over het algemeen zijn de golfhoogtes in Delfzijl iets lager, blijkt uit ervaringen van deskundigen en simulaties van weersites. Om een gemiddelde golfhoogte van één jaar te bepalen is ervoor gekozen om de data van de meetpaal in de Eemshaven van Rijkswaterstaat op te vragen. Deze meetpaal meet om de 10 minuten de golfhoogte. Van alle metingen wordt een gemiddelde genomen en het blijkt dat de golfhoogte 32,7 cm bedraagt. Tijdens deze praktijkonderzoek is het weer in de gaten gehouden en is de gemiddelde golfhoogte bepaald. De wind was sterk aanwezig tijdens de proeven. Door de wind (en daardoor hoge golven) is de uitpeiling zelfs met een dag uitgesteld. De uitpeiling zou eerst op donderdag 12 maart plaatsvinden. De gemiddelde golfhoogte tijdens de proef was 41,5 cm.

7.2.4 Analyse

Uit de resultaten van paragraaf 7.2.3 blijkt dat de aanzanding negatief is en dat er dus erosie heeft plaatsgevonden. Echter is dit niet op alle plaatsen het geval en is er op sommige plekken sedimentatie. Uit het dwarsprofiel van figuur 7.2.3 kan worden gezien dat de lijnen op elkaar lijken en dat er wisselend aanzanding en erosie plaatsvindt. In dit figuur is wel duidelijk te zien dat de overgang van talud naar het ondiepere gedeelte afvlakken, zoals ook blijkt uit de theorieën van het SEDTUBE-model. (Zie paragraaf 8.3). Dit kan mogelijk duiden dat het model wel kan worden toegepast op de haven van Delfzijl, alleen is er in de korte tijdsperiode nog geen sprake van ophoging van de bodem van het kanaal.

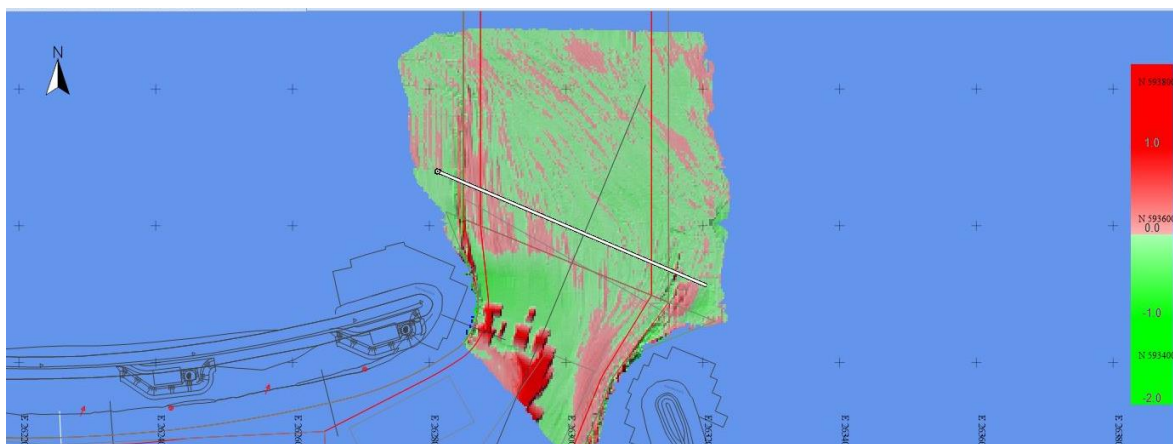
Dat de drempel niet aanzandt blijkt uit de resultaten. Een mogelijke oorzaak is dat deze periode onstuimig weer bevatte en er hogere golven waren dan de gemiddelde golfhoogtes. Hierdoor waren waarschijnlijk de stroomsnelheden in de havenmonding hoger wat zou kunnen leiden dat het zand in suspensie kwam in plaats van dat dit zand sedimenteerde op de bodem van het kanaal. Echter is dit een aanname en kan dit niet worden bevestigd uit de huidige onderzoeksresultaten.

In figuur 7.2.5 is een dwarsprofiel genomen over de kuilen die aanwezig zijn op de peilkaart. Ter hoogte van deze kuilen is de sliblaag aanwezig. Door de frequentie van de singlebeam meet deze de 'harde bodem' onder de sliblaag. In sommige gevallen, komt deze frequentie er niet door heen en geeft hij de top van de vloeibare sliblaag aan.



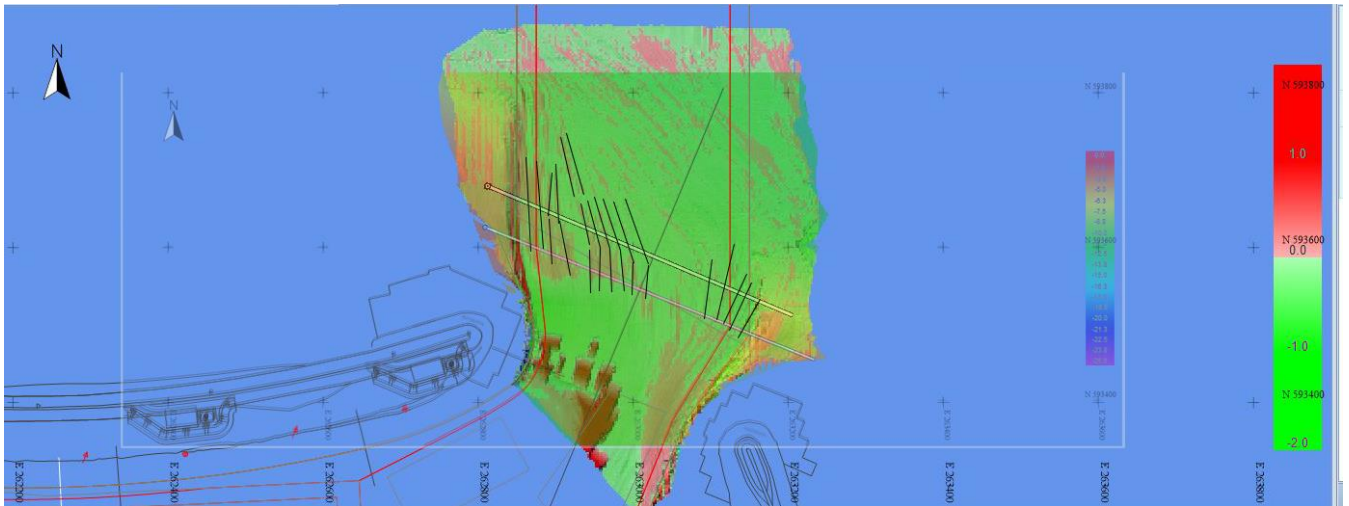
Figuur 7.2.5 Dwarsprofiel van het Zeehavenkanaal ter hoogte van de kuilen, waarbij de rode lijn de eerste peiling is van 6 maart en de gele lijn de tweede peiling van 13 maart.

Om beter te analyseren waarom de aanzanding negatief is en waar erosie en sedimentatie zich bevindt, is er een verschilkaart gemaakt. (Zie figuur 7.2.6). De verschilkaart geeft sedimentatie in het rood weer en erosie in het groen. In deze afbeelding is te zien dat op de locatie van de kuilen, linksonder op de peiling, de meeste sedimentatie plaats heeft gevonden. Voor de rest is goed te zien dat de sedimentatie en erosie op de meeste plekken klein is. In de monding is er vooral sprake van sedimentatie in de buitenbocht en in de binnenbocht is er erosie ontstaan.



Figuur 7.2.6 Verschilkaart tussen de peiling van 6 maart en 13 maart. Waarbij een rode kleur sedimentatie aangeeft en een groene kleur erosie.

In onderstaand figuur zijn de figuren 7.2.4 en 7.2.6 over elkaar heen gelegd om te analyseren of de baggersporen een connectie hebben met de locatie van de aanzanding. Op deze afbeelding zijn de baggersporen met strepen aangegeven. Aan de linkerkant van de afbeelding is te zien dat de aanzanding voornamelijk plaatsvindt op de plekken waar de baggersporen aanwezig zijn. Echter aan de rechterkant is dit niet het geval.



7.2.5 Conclusie

Uit de analyse kunnen de volgende punten worden geconcludeerd:

- Er heeft in de tijdsperiode van ongeveer een week geen aanzanding plaatsgevonden en er is erosie opgetreden. In deze periode was het weer onstuimig en dit kan een mogelijke factor zijn geweest waarom er geen aanzanding heeft plaatsgevonden. De korte tijdsduur leidde tot geen grote verschillen.
- Het is aannemelijk dat de kuilen die opgevuld zijn tussen de twee peilingen slechte data bevat. Waarschijnlijk zijn op beide peilingen gedeeltelijk de sliblaag gemeten en gedeeltelijk niet. Dit gebeurt vaker in dit gebied, soms schiet de singlebeam door de sliblaag heen en de andere keer weer niet. Deze data is daarom niet meegenomen in de berekeningen en de conclusie van een positieve aanzanding bij het meenemen van dit gebied kan worden verwaarloosd.
- Op de overgang van het talud naar de ondiepere gedeeltes is een afvlakking aanwezig.
- Uit de verschilkaart blijkt dat er op veel plekken lichte aanzanding is geweest en dat er op plekken lichte erosie heeft plaatsgevonden. Wel duidelijk is te zien dat in de havenmonding vooral zich aan de rechterkant sedimentatie bevindt (in de buitenbocht) en dat in de binnenbocht vooral erosie heeft plaatsgevonden.
- Uit de verschilkaart is te zien dat vooral de baggersporen aan de linkerkant zijn opgevuld. Echter doordat de baggersporen aan de rechterkant niet zijn opgevuld kan niet worden geconcludeerd dat het sediment in de baggersporen is gaan sedimenteren.
- Doordat de aanzanding niet positief is kan de verandering in het bodemprofiel niet gekoppeld worden aan de verandering in inhoud van de drempel. Dus kan het SEDTUBE-model niet worden gekalibreerd op de werkelijke situatie.

7.2.6 Discussie

Het onderzoek dat in deze paragraaf is uitgevoerd diende om het SEDTUBE-model te kalibreren op de werkelijkheid om zo een betrouwbaarder beeld te krijgen van de aanzanding. Het model wordt echter nog steeds toegepast om de mogelijkheid van extra aanzanding per drempeldiepte te bepalen. Dit komt door de volgende redenen:

- De tijdsperiode van deze proef is kort geweest, waardoor verschillen klein zijn en het weer een grotere invloed heeft gehad op de testresultaten. De tijdsduur van de meting was te kort om daadwerkelijk een aanzanding in het profiel te zien.
- Het weer was onstuimig, wat kan zorgen dat het zand in suspensie minder snel bezinkt. Tevens kan dit weer ervoor zorgen dat zand wat normaal niet erodeert, onder deze omstandigheden wel erodeert.
- De theorie achter het SEDTUBE-model geeft aan dat de overgang van ondiepere gedeelte naar het talud afvlakken en dit daadwerkelijk zo is.

Door deze praktijkproef is het onduidelijk of de resultaten van de extra aanzanding vanuit het SEDTUBE-model geldig zullen zijn in de praktijk. Ook zal er in de praktijk wel degelijk sprake zijn van aanzanding van de drempel, omdat de baggerwerkzaamheden van de Airset voornamelijk op de drempel plaatsvinden. Om deze redenen wordt er aanbevolen om deze proef in de toekomst overnieuw te doen over een langere periode. Wel kan het SEDTUBE-model het effect weergeven wanneer de zanddrempel wordt verlaagd en wat dit doet met de extra aanzanding.

Hoofdstuk 8: Modellen

In dit hoofdstuk zijn de gebruikte modellen voor dit onderzoek uitgelegd. Hierbij wordt gefocust op de theorie van de modellen, de inputparameters en worden de modellen uitgelegd aan de hand van voorbeeldberekeningen. De volgende modellen zijn toegepast om antwoord te krijgen op de hoofdvraag:

- TC-MUD-model;
- SILTHAR-model;
- SEDTUBE-model.

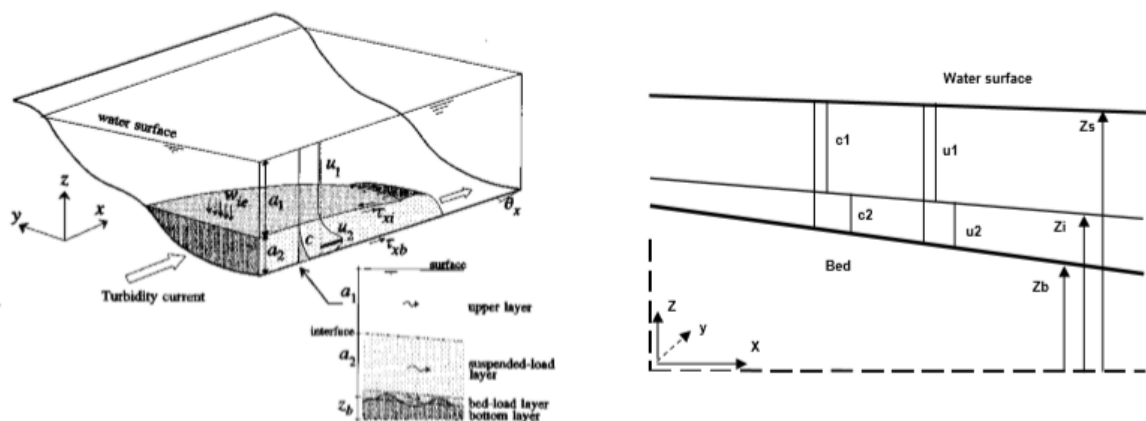
Het TC-MUD-model wordt gebruikt om de uitstroom van vloeibaar slib te berekenen, het SILTHAR-model wordt gebruikt om de extra aanslibbing te berekenen en het SEDTUBE-model wordt gebruikt om de aanzanding van de drempel te bepalen.

8.1 TC-MUD (determinatie éénmalige uitstroom van slib)

TC-Mud is een stromingssimulatie van de vloeibare sliblaag. TC-MUD staat voor Turbidity Current – Mud (dichtheidsstroom – sliblaag). Het model is ontwikkeld door Prof. L. van Rijn. Met TC-MUD kan de uitstroom van het slib worden bepaald ten gevolge van voornamelijk een dichtheidsverschil. Het model wordt aan de hand van de notitie ‘water injection dredging’ van L. van Rijn uitgelegd.

8.1.1 Theorie

Het model is gebaseerd op de stromingscondities van de vloeibare sliblaag. TC-MUD is geschematiseerd tot een 2D-model. (Zie figuur 8.1.1). De schematisering van het transport bestaat uit de vaste bodem, een vloeibare sliblaag met een hoge concentratie aan sediment en een waterkolom met een lage concentratie.



Figuur 8.1.1 Schematisering van de vloeibare sliblaag naar een twee lagen systeem. (Links de werkelijkheid en rechts het twee lagen systeem). (Van Rijn,).

Het model bepaalt met behulp van inputparameters (benoemd in paragraaf 8.1.2) de dikte (h_2), de snelheid (u_2) en de concentratie (c_2) van de sliblaag. Wanneer deze drie onbekenden zijn bepaald is het slibtransport (q_s) uit te rekenen. Dit door middel van de volgende formule:

$$q_s = h_2 u_2 c_2$$

Superkritische of subkritische slibstroom

Een indeling van de stroming van een vloeistof is schietend of stromend water. Schietend water vindt plaats bij een hoge snelheid met een lage diepte. Stromend water bij een lage snelheid en een grotere diepte. Een voorbeeld van schietend water is de stroming in bergbeekjes. Schietend water wordt ook wel superkritische stroom genoemd. Stromend water wordt subkritisch genoemd. Ditzelfde proces geldt voor de slibstroming.



Figuur 8.1.2 Superkritische stroom van water. (bron: <https://www.h2ometrics.com/what-is-flow-2/>)

Validatie parameters

Het TC-Mud model is alleen geldig bij een superkritische stroom. Daarom is het van belang om te bepalen wanneer de vloeibare sliblaag superkritisch is. De belangrijkste parameter om dit bepalen is het getal van Froude. Tevens zijn de grenswaarde van de dikte van de sliblaag en het Richardson-nummer van belang.

Getal van Froude

Het getal van Froude geeft aan wanneer een stroom subkritisch of superkritisch is. Bij een waarde van 1 of hoger is de stroming superkritisch, waarbij een getal van 1 of lager een subkritische stroom aangeeft. Het getal van Froude wordt op de volgende manier uitgerekend door de reader van Leo van Rijn:

$$Fr_2 = u_2 / \left[\left(\frac{\Delta \rho_2}{\rho_2} \right) g h_2 \right]^{0.5}$$

Waarin:

- u_2 = Snelheid van de slibstroom
- h_2 = Dikte van de vloeibare sliblaag
- g = Gravitatie snelheid
- $\Delta \rho_2 / \rho_2$:

$$\Delta \rho_2 = \rho_2 - \rho_w = (\rho_s - \rho_w) c_2$$

Waarin:

- c_2 = Concentratie van de vloeibare sliblaag
- $\Delta \rho_2$ = Verschil in dichtheid tussen vloeibare sliblaag en het water
- ρ_2 = Dichtheid van de vloeibare sliblaag
- ρ_w = Dichtheid van het water
- ρ_s = Droge dichtheid van de sliblaag

De grenshoogte

De grenshoogte is een andere parameter die weergeeft of een stroming subkritisch op superkritisch is. Wanneer de hoogte van de vloeibare sliblaag groter is dan de grenshoogte is het water subkritisch. Wanneer de hoogte van de vloeibare sliblaag kleiner is dan de grenshoogte is het water superkritisch. De formule om deze grenshoogte te bepalen is:

$$h_{2,cr} = \left[\frac{q^2}{\left\{ \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_2} \right) c_2 g \cos \beta \right\}} \right]^{1/3}$$

Waarin:

- $q = u_2 h_2$;
- β = Hellingshoek van de bodem.

Het Richardson-nummer

Het Ri-nummer geeft de balans weer tussen stabiliteitsfactoren en instabiliteitsfactoren van de vloeibare sliblaag. De stabiliteitsfactoren zijn de zwaartekracht en de dichtheidsgradiënt. De instabiliteitsfactor is de stroming bij de bodem wat zorgt voor turbulente neren en diffusie. Uit onderzoek blijkt dat de vloeibare sliblaag stabiel is bij een Ri-nummer hoger dan 0,25. Het Ri-nummer kan worden berekend met de volgende formule:

$$Ri = \frac{\left[g \left(\frac{\Delta \rho_2}{\rho_2} \right) h_2 \left(\frac{\delta}{h_2} \right) \right]}{(u_2)^2}$$

Waarin:

$$\left(\frac{\delta}{h_2} \right) = \text{Ongeveer } 1.$$

De berekening

Het TC-Mud model bepaald met drie formules drie onbekenden. De onbekenden die worden berekend zijn:

- u_2 = snelheid in de sliblaag;
- h_2 = dikte van de sliblaag;
- c_2 = concentratie van de sliblaag.

De volgende formules worden gebruikt om deze drie onbekenden op te lossen:

• Moment balans van de vloeibare sliblaag

$$\frac{\rho_2 \partial (u_2^2 h_2)}{\partial s} + (\rho_s - \rho_w) h_2 c_2 \left[\frac{(g \sin \beta) \partial h_2}{\partial s - g \sin \beta} + \frac{(\rho_s - \rho_w) (0,5 g h_2^2 \cos \beta + u_2^2 h_2) \partial c_2}{\partial s} \right] + (\tau_i + \tau_b) = 0$$

• Massa balans van de vloeistof in de vloeibare sliblaag

$$\frac{\partial (u_2 h_2 (1 - c_2))}{\partial s} - W_i - W_b = 0$$

• Massa balans van het sediment in de vloeibare sliblaag

$$\frac{\partial (u_2 c_2 h_2)}{\partial s} - S_i - S_b = 0$$

Waarin:

- h_1, h_2 = Dikte van de onderste en bovenste laag;
- c_1, c_2 = Over de diepte gemiddelde concentratie van sediment in de onderste en bovenste laag;
- u_1, u_2 = Snelheid van de onderste en bovenste sliblaag met: $u_1 = q_1/h_1$ en $u_2 = q_2/h_2$;
- W_i = Uitwisseling van vloeistof tussen de vloeibare sliblaag en de waterkolom;
- W_b = Uitwisseling van vloeistof tussen de vloeibare sliblaag en de bodem;
- S_i = Uitwisseling van sediment tussen de vloeibare sliblaag en de waterkolom;
- S_b = Uitwisseling van sediment tussen de vloeibare sliblaag en de bodem;
- ρ_2 = Dichtheid van de vloeibare sliblaag;
- ρ_w = Dichtheid van het water;
- ρ_s = Dichtheid van het sediment in de vloeibare sliblaag;
- τ_i = Schuifsterkte tussen het waterkolom en de vloeibare sliblaag;

- τ_b = Schuifsterkte tussen de vloeibare sliblaag en de bodem;
 C_d = Bodem frictie coëfficiënt $C_d = g/C^2$, C= Chézy coefficient;
 C_{di} = Frictie coëfficiënt tussen de vloeibare sliblaag en de waterkolom;
 β = Hellingshoek van de bodem;
 s = Coördinaat van de hellingshoek van de bodem. (Van Rijn, 2016)

De bovenstaande formules worden gebruikt om de gradiënt van de dikte van de sliblaag ($\frac{\partial h_2}{\partial s}$) te bepalen. Met andere woorden, de dikte waarmee de sliblaag per lengte interval toe- of afneemt. De bovenstaande drie formules worden geherformuleerd tot:

$$\frac{\partial h_2}{\partial s} = \frac{\left(\frac{\sin \beta}{\cos \beta}\right) \left[1 - \left(\frac{h_{2,eq}}{h_2}\right)^3 - \frac{\alpha_1(W_i + W_b)}{u_2} - \alpha_2 h_2 \partial c_2 / \partial s\right]}{\left[1 - \left(\frac{h_{2,cr}}{h_2}\right)^3\right]}$$

Waarin:

$$\alpha_1 = \frac{2\rho_2(u_2)^2}{(\rho_s - \rho_w)(1 - c_2)h_2 c_2 g \sin \beta}$$

$$\alpha_2 = \frac{2\rho_2(u_2)^2 + (\rho_s - \rho_w)(1 - c_2)(u_2)^2 + 0,5(\rho_s - \rho_w)(1 - c_2)h_2 g \cos \beta}{(\rho_s - \rho_w)(1 - c_2)c_2 h_2 g \sin \beta}$$

$$h_{2,cr} = \left[\frac{q^2}{\left\{ \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_2} \right) c_2 g \cos \beta \right\}} \right]^{1/3}$$

$$h_{2,eq} = \left[\frac{(C_d + C_{di})q^2}{\left\{ \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_2} \right) c_2 g \cos \beta \right\}} \right]^{1/3} = \text{Evenwichtsdiepte bij turbulente stroming.}$$

$$h_{2,eq} = \left[\frac{(\tau_i + \tau_b)(h_2)^2}{\left\{ \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_2} \right) c_2 g \cos \beta \right\}} \right]^{1/3} = \text{Evenwichtsdiepte bij laminaire stroming.}$$

$$\tau_i + \tau_b = \rho_2(C_d + C_{di})q^2/h_2^2, C_{di} = 0,333C_d$$

Excelsheet

In Excel wordt deze berekening uitgevoerd. De sheet berekent per ingestelde interval van lengte alle parameters. Uit deze gegevens zijn relevante grafieken te plotten om de vloeibare slibstroom te analyseren.

Vloeibare sliblaag stromingen onder een helling

Na het baggeren met een WID wordt de stroming van de vloeibare sliblaag superkritisch. Dit betekent dat het getal van Froude groter is dan 1 vlak na de WID-baggerwerkzaamheden. Of deze stroming superkritisch blijft, hangt onder andere af van de hellingshoek van de bodem. Hieronder zijn twee situaties beschreven. Eén waarbij de superkritische stroming overgaat naar een subkritische stroming en één waarbij de superkritische stroming behouden blijft.

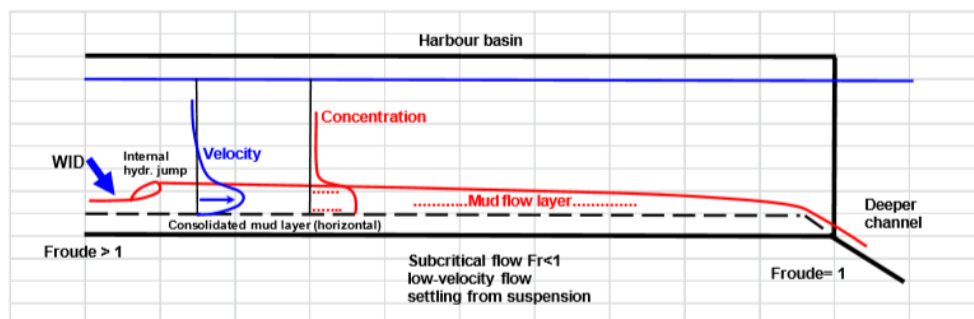
Subkritische vloeibare sliblaag stromingen

Bij een hele kleine hellingshoek is de bodem bijna horizontaal, waardoor de sliblaagstroming weinig wordt beïnvloed door zwaartekracht. Na het baggeren met een WID gaat de sliblaag superkritisch

stromen, maar door de hoge wrijving met de bodem neemt de dikte van de sliblaag erg snel toe. Dit resulteert in een getal van Froude dat lager is dan 1, waardoor de stroming subkritisch gaat stromen. De snelle stijging van de dikte van de sliblaag zorgt voor een hydraulische sprong. Een hydraulische sprong ontstaat bij de overgang van superkritisch naar stromend water. De hydraulische sprong zorgt voor ophoging van de stromende laag. Deze ophoging zorgt ervoor dat het materiaal over een bepaalde afstand kan worden verplaatst. Een schematisering van dit proces is te zien in figuur 8.1.3.

Wanneer er sprake is van een dieper gelegen kanaal bij de havenmonding, die niet te ver weg is van de WID-baggerwerkzaamheden, zal de stroming toenemen en het getal van Froude wordt 1 bij de overgang naar het dieper gelegen kanaal.

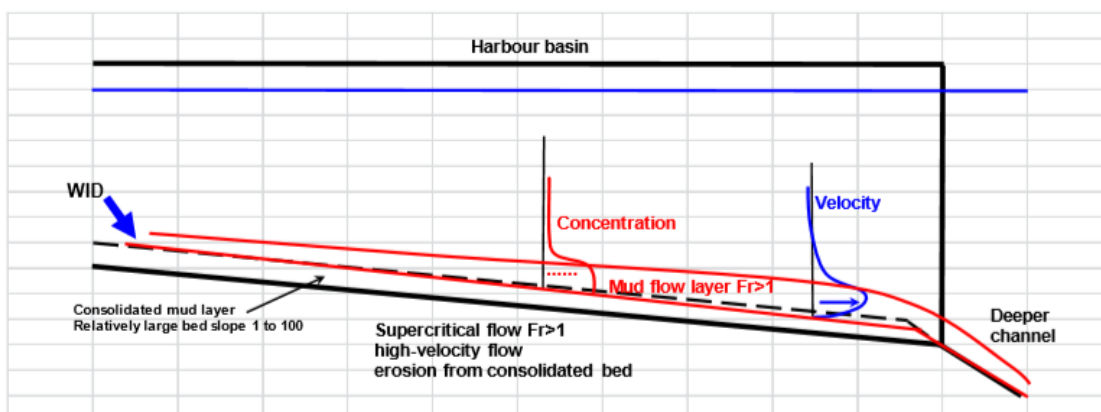
Wanneer er van een dieper gelegen kanaal geen sprake is, zal de stroming stagneren. Dit komt doordat de laag consolideert tijdens de stroming en zijn dikte verliest. Door deze omstandigheden stopt de stroming. Ditzelfde proces vindt plaats wanneer het dieper gelegen kanaal ver weg ligt van de baggerwerkzaamheden van de WID.



Figuur 8.1.3 Slibstroom bij een bijna horizontale bodem. (Van Rijn,).

Superkritische vloeibare sliblaag stromingen

Bij een groot verhang van de bodem zal de slibstroom meteen versnellen na de WID. Bij deze situatie ontstaat er geen hydraulische sprong en blijft de stroming superkritisch. De snelheid van de stroom neemt toe. Door de snelheid van de stroom erodeert de onderliggende bodem. Hierdoor ontstaat zelfacceleratie (doordat de sliblaag sediment opneemt en zwaarder wordt) en een veel groter getal van Froude dan 1. De concentratie van de vloeibare sliblaag kan zijn maximale waarde bereiken van 300 á 400 kg/m³. Deze stroming kan kilometers voortbewegen. Onderstaand figuur is een schematisering van het beschreven proces.



Figuur 8.1.4 Slibstroom bij een helling. (Van Rijn,).

8.1.2 Input in TC-Mud

In het onderstaande tabel staan de parameters die worden ingevoerd in de modelberekening van TC-Mud. De determinatie van alle onderstaande parameters zijn toegelicht in bijlage 1. Een gevoeligheidsanalyse van het TCMUD-model is bijgevoegd in Bijlage 4. Met deze analyse wordt de invloed van parameters bepaald op de eindresultaten.

Parameter	Symbool	Waarde	Eenheid
Valsnelheid bovenste laag	W_{s1}	1×10^{-4}	m/s
Valsnelheid onderste laag	W_{s2}	1×10^{-4}	m/s
Dichtheid van het sediment	ρ_s	2650	kg/m ³
Maximale concentratie	$C_{2,max}$	0,113	-
Dynamische afschuifhoek	ϕ	0,5	Radialen
Erosie coëfficiënt	E	0,0001	-
Dichtheid van water	ρ_w	1025	kg/m ³
Kinematische viscositeit	ν	$1,3065 \times 10^{-6}$	Ns/m ² of ms/kg
Chézy coëfficiënt	C	116	m/s ^{0.5}
Porositeitsfactor	P	0,6	-
Kritische schuifsterkte van de bodem voor depositie	$\tau_{d,crit}$	0,03	n/m ²
Kritische schuifsterkte van de bodem voor erosie	$\tau_{e,crit}$	0,13	N/m ²
Ontwatersnelheid naar de waterkolom	W_i	0,00001	m/s
Ontwatersnelheid naar de bodem	W_b	0,00001	m/s
Hellingshoek van de bodem	β	Variabel	Graden
Dikte van de sliblaag	$h_{2,0}$	1.3	m
Concentratie van de sliblaag	$C_{2,0}$	172	kg/m ³
Snelheid van de slibstroom	$u_{2,0}$	Variabel door Fr	m/s
Getal van Froude	$Fr_{2,0}$	1,5	-
Concentratie in het water	$C_{1,0}$	0,003	kg/m ³

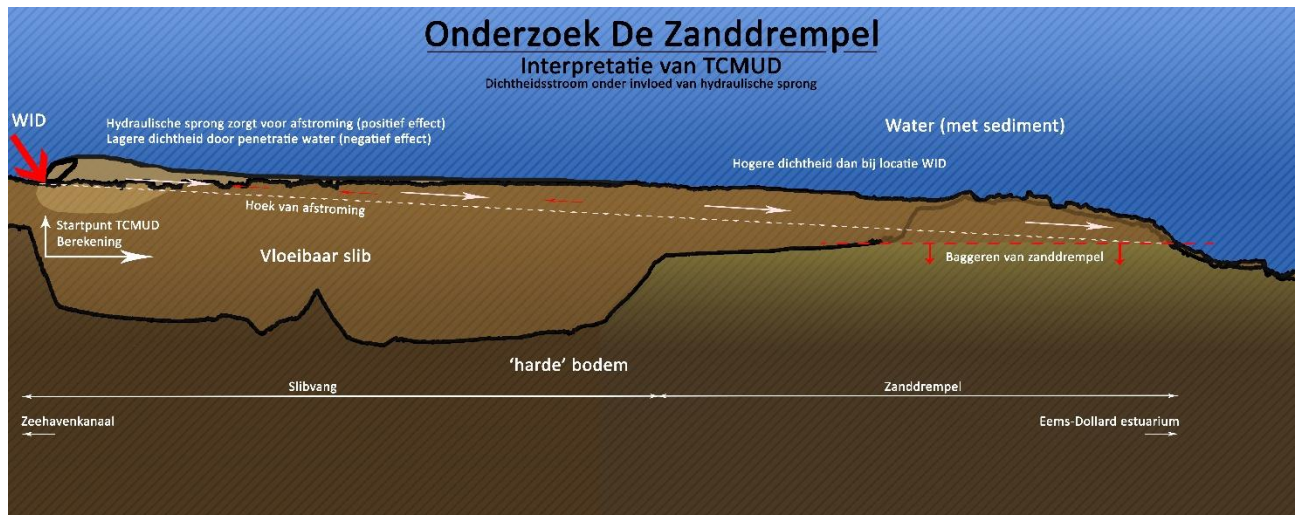
Tabel 8.1.1 Samenvatting/opsomming van resultaten uit parameterspecificatie. (Zie bijlage 1).

8.1.3 Interpretatie van het model

Het model gaat ervan uit, zie figuren 8.1.3 en 8.1.4, dat de WID wordt ingezet 'ver' in de haven. Echter gebeurt dit in de praktijk niet met de Airset. Uit praktijkervaring en uit de vaartracks van de Airset blijkt, dat wanneer het afgaand tij is de Airset van buiten naar binnen werkt. De reden voor deze uitvoering is de werking van de Airset. De Airset injecteert, naast water als een gewone WID, lucht in het bodemmateriaal dat ervoor zorgt dat het sediment suspendeert. Het gesuspendeerde materiaal wordt vervolgens met de afgaande getijstroom afgevoerd. Dit in tegenstelling tot een WID (alleen waterinjectie) die het materiaal niet over de gehele waterkolom verplaatst. Bij de WID wordt het baggermateriaal verplaatst door voornamelijk het verschil in dichtheid en gravitatie. Uit de praktijkproef: 'Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone' blijkt dat er ook een afstroming ontstaat op plaatsen waar niet wordt gebaggerd met de Airset. Waaruit kan worden geconcludeerd dat er ook een dichtheidsstroming ontstaat bij de baggerwerkzaamheden van de Airset.

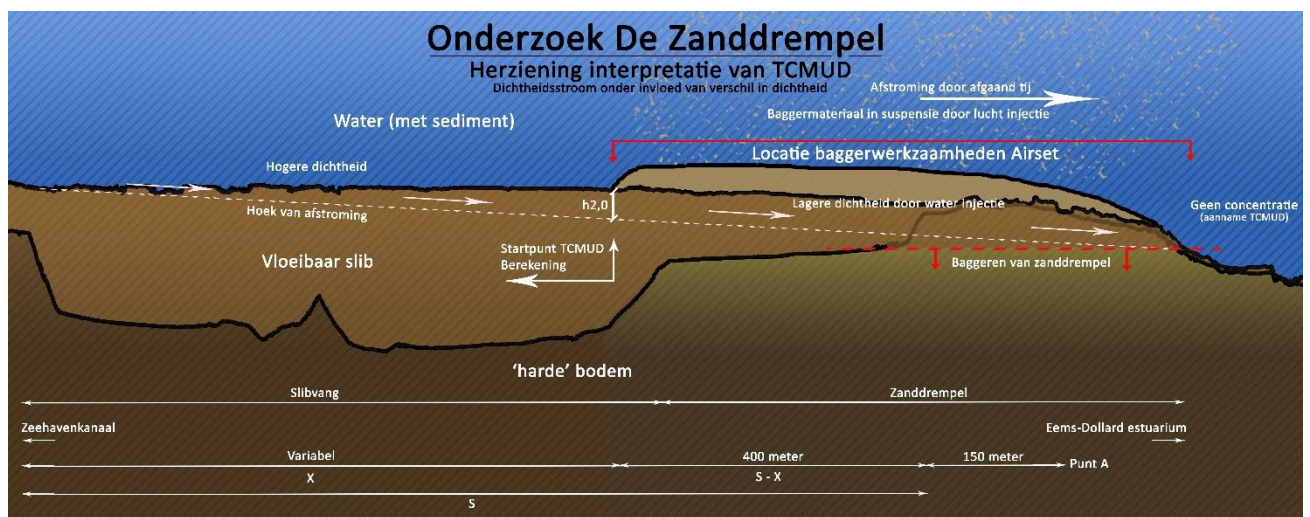
Deze stroming is te verklaren door het dichtheidsverschil. Dit wordt ook benoemd in het boek van L. van Rijn. Die stelt in zijn boek: 'Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas' dat een dichtheidsstroom voornamelijk wordt aangedreven door het dichtheidsverschil in de sediment bevattende laag en de relatief sediment-vrije laag buiten deze laag.

(Van Rijn, 2015). Bij de interpretatie van L. van Rijn (zoals te zien in figuren 8.1.3 en 8.1.4) wordt er uitgegaan dat een WID ervoor zorgt dat het slib, of door een helling superkritisch blijft stromen, of door de hydraulische sprong die ontstaat na het waterinjectie baggeren op een te flauwe helling. Op de plek waar de WID baggert wordt de dichtheid echter wel kleiner waardoor er verwacht zou kunnen worden dat dit een negatief effect op de dichtheidsstroom heeft. Deze interpretatie is geschematiseerd in figuur 8.1.5.



Figuur 8.1.5 Interpretatie van TCMUD, zoals het is bedoeld door L. van Rijn.

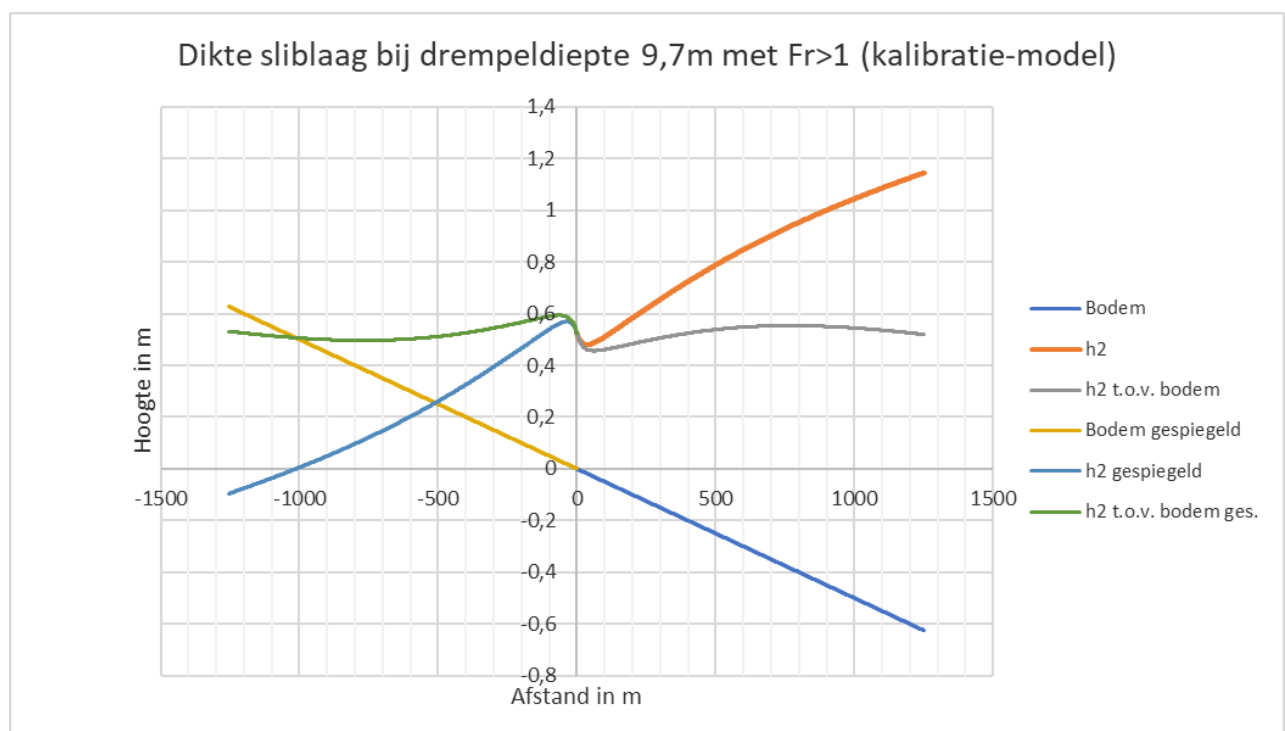
Bovenstaande situatie is in praktijk niet het geval in de haven van Delfzijl. De werkelijke situatie in Delfzijl wordt geschetst in figuur 8.1.6. De Airset baggert bij het einde van de sliblaag, waardoor hier de dichtheid afneemt en een superkritische stroom ontstaat. De dichtheid neemt af door zowel het injecteren van water als door lucht. Het geïnjecteerde water zorgt ervoor dat er meer volume in de laag is met dezelfde hoeveelheid sediment. Door de luchtinjectie suspendeert er sediment uit de gebaggerde laag en neemt het sediment per volume af. Een bijkomend effect van de luchtinjectie wordt aangegeven door R. Wurpts, waarin zuurstof ervoor zorgt dat micro-organismen in de sliblaag de lage dichtheid in stand houden. (Zie paragraaf 5.3.1).



Figuur 8.1.6 Interpretatie van TCMUD, gebaseerd op de werkelijke situatie en de praktijkproef: 'Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone'.

Door de huidige baggermethode en de dichtheidsstroom die is aangetoond bij de praktijkproef: 'Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone', wordt ervan uitgegaan dat de modellering begint tot waar de Airset baggert. (Zie startpunt in figuur 8.1.6). Vanaf dit punt is de stroming alleen nog maar onder invloed van het dichtheidsverschil en niet meer van luchtinjectie. Door het TC-MUD-model te spiegelen kan worden berekend in hoeverre de sliblaag gaat afstromen en onder welke hoek de sliblaag afstroomt.

De spiegeling is weergegeven in figuur 8.1.7. Waarbij de gradiënt van de dikte van de sliblaag niet wordt opgeteld maar wordt afgetrokken vanaf de initiële dikte van de sliblaag. In het onderstaande figuur zijn zowel de normale TC-MUD-berekening (rechts van de verticale as) en de gespiegelde berekening (links van de verticale as) weergegeven. De stroming zal in stand blijven totdat de sliblaag geen dikte meer kent. Tevens is in dit figuur de werkelijke situatie geschematiseerd, door de bodem en de dikte van de sliblaag t.o.v. de bodem weer te geven. De intersectie van deze lijnen is hetzelfde punt als waar de sliblaag geen dikte meer heeft.



Figuur 8.1.7 Berekening vanuit het TCMUD-model waarbij de werkelijke situatie is weergegeven door het bodemprofiel en de dikte van de sliblaag met elkaar te compenseren. Tevens is dit de berekening van het kalibratie model.

De reden waarom deze herinterpretatie van het model zou kunnen worden uitgevoerd, is dat het 'normale' model de afstand van de stroming bepaald aan de hand van het dichtheidsverschil. In feite is dit bij de nieuwe interpretatie nog steeds het geval. Echter is het startpunt en richting, waarvan deze afstand wordt bepaald, verplaatst. (Zie startpunten in figuren 8.1.5 en 8.1.6).

8.1.4 Kalibratie van het model

Voorbeeldberekening

Allereerst is getest of het model overeenkwam met een voorbeeldberekening uit het boek: 'Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas' van L. van Rijn. Deze voorbeeldberekening is gebruikt om gevoel te krijgen in de gevoeligheid van sommige parameters.

Zo geeft deze voorbeeldberekening het verschil weer tussen het wel of niet reduceren (reductiefactor) van het mixen van sediment tussen de sliblaag en de waterkolom. In het boek van L. van Rijn wordt aangegeven dat het mixen tussen de lagen niet realistisch is en dat dit wordt verhinderd doordat de laag stroomt en er laagvorming ontstaat waardoor het turbulentievel wordt verminderd. (Van Rijn, 2015). In het voorbeeld van L. van Rijn wordt een reductie met factor 5 aangenomen als realistisch. Daarom wordt dit in de berekening van de afstroming in de haven van Delfzijl ook gebruikt.

Kalibratie

Om de modellering betrouwbaarder te maken wordt het model gekalibreerd met de gegevens uit de praktijkproef: 'Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone'. Uit de onderzoeksresultaten en conclusies worden de volgende waarden gebruikt:

- De hoek en de afstand waarop het slib is afgestroomd. (Hoek is 0,028648 graden en afstand 1450 + 150 meter (start afschuiving tot aan punt A)).
- De afstand tot waar er wordt gebaggerd (550 meter) en de dikte van de sliblaag ten opzichte van de afschuifhoek op dit punt (0,525 meter).

De totale éénmalige afstroming vanaf het startpunt ($x=0$) geeft een x -waarde van 1050 meter in de praktijk. Het model wordt zo gekalibreerd dat de afstroming van de vloeibare sliblaag tot aan dit punt plaatsvindt.

In het boek van L. van Rijn wordt een gevoeligheidsanalyse weergegeven van het model. Hierbij varieert van Rijn de waarde van parameters. Deze analyse wordt gebruikt om te bepalen op welke parameter het TC-MUD-model wordt gekalibreerd. De gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd op het TC-SAND-model wat zeer vergelijkbaar is met TC-MUD-model. TC-SAND berekent de afstroming van zand ten gevolge van een dichtheidsstroom. In de gevoeligheidsanalyse wordt gevarieerd tussen de volgende parameters:

- Erosie coëfficiënt;
- Frictie coëfficiënt (afhankelijk van Chézy-coëfficiënt);
- Vloeistof dichtheid;
- Korrelgrootte (niet bruikbaar in TCMUD);
- Uitstroom van vloeistof uit sliblaag;
- Sediment uitwisseling tussen sliblaag en waterkolom;
- Valsnelheid van de slibvlokken;
- Niet erodeerbare rotsbodem (niet van toepassing in Delfzijl);
- Sand concentratie bij het eind (in TCMUD wordt dit aangenomen een waarde van 0 te zijn);
- Het getal van Froude.

De parameter uitstroom van vloeistof uit sliblaag wordt gebruikt om het model te kalibreren met de praktijksituatie. Dit met de reden dat overige parameters weinig effect hebben op de berekening of als standaardwaarden worden aangezien of alleen gelden voor TCSAND.

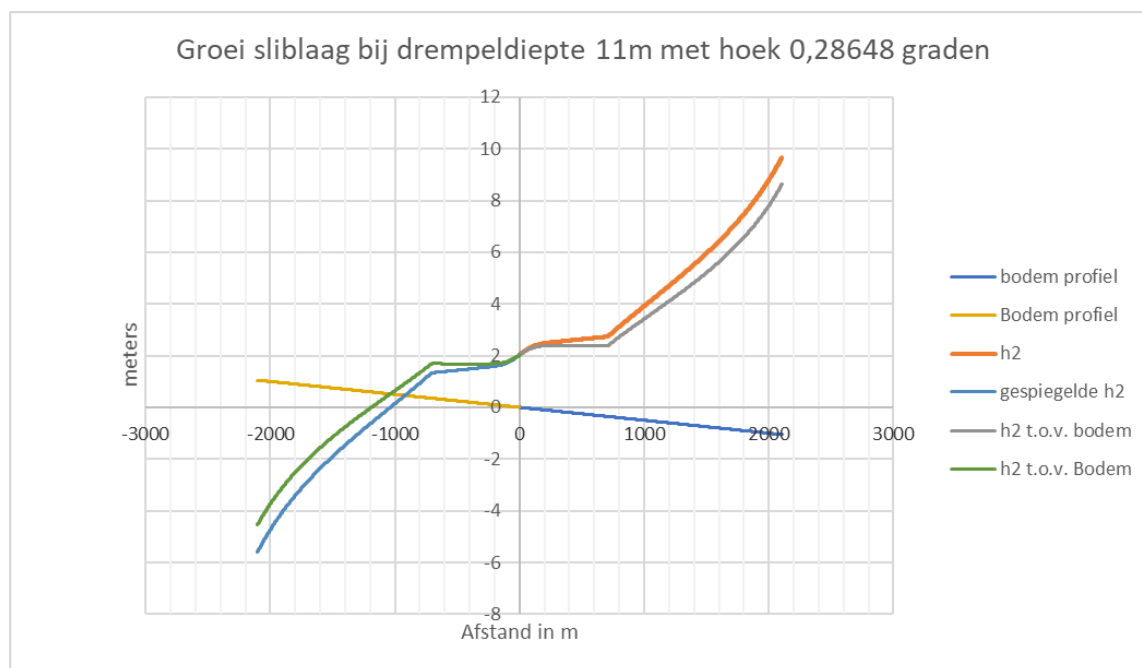
Om de praktijkproef na te bootsen in het model moet de sliblaag geen dikte hebben bij een x -waarde van 1050 meter. Tevens moet het froude getal boven de 1 blijven tot verder dan het intersectie punt, wegens het feit dat bij een froude getal onder de 1 de sliblaag stopt met stromen. De resultaten zijn terug te vinden in figuur 8.1.7. Met de parameters van deze kalibratie wordt vervolgens verder gerekend bij diepere drempeldieptes.

8.1.5 Methode

Met het gekalibreerde model worden verschillende alternatieve situaties (drempeldieptes) uitgewerkt waarop het slib kan afstromen. De dikte van de sliblaag ($h_{2,0}$) is de parameter die verandert wanneer de drempel dieper wordt gebaggerd. Deze alternatieven en diktes van de sliblagen zijn uitgewerkt in paragraaf 9.3.3. In deze paragraaf is dit nog niet relevant en wordt er voornamelijk gefocust op de methode waarop de berekening wordt uitgevoerd. Om de methode van de berekening uit te leggen wordt een drempeldiepte van 11 meter als voorbeeld genomen. De dikte van de sliblaag bij een drempeldiepte van 11 meter is 2,036 meter.

Berekening met dezelfde hoek

Allereerst werd de afstand x (zie figuur 8.1.6) berekend door dezelfde hoek toe te passen als werd gevonden bij de praktijkproef: 'Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone'. Dit resulteerde echter niet in realistische berekeningen. De x -waarden werden gereduceerd op basis van het getal van Froude, doordat deze eerder kleiner werd dan 1, voordat de sliblaag geen dikte meer had. (In figuur 8.1.8 is het getal van Froude onder de 1 na de knik in de lijnen). Bij lage dieptes van de drempel leek dit te werken. Echter voor grotere dieptes werden de waarden steeds minder realistisch. Zo is bij een drempeldiepte van 11,5 meter de x -waarde 100 meter en bij een drempeldiepte van 12 meter 80 meter. Realistisch zou zijn dat wanneer de drempel dieper wordt gebaggerd de x -waarde toeneemt. Uit deze berekening kan worden geconcludeerd dat de hoek van afstroming verandert, naarmate de drempel dieper wordt gebaggerd.



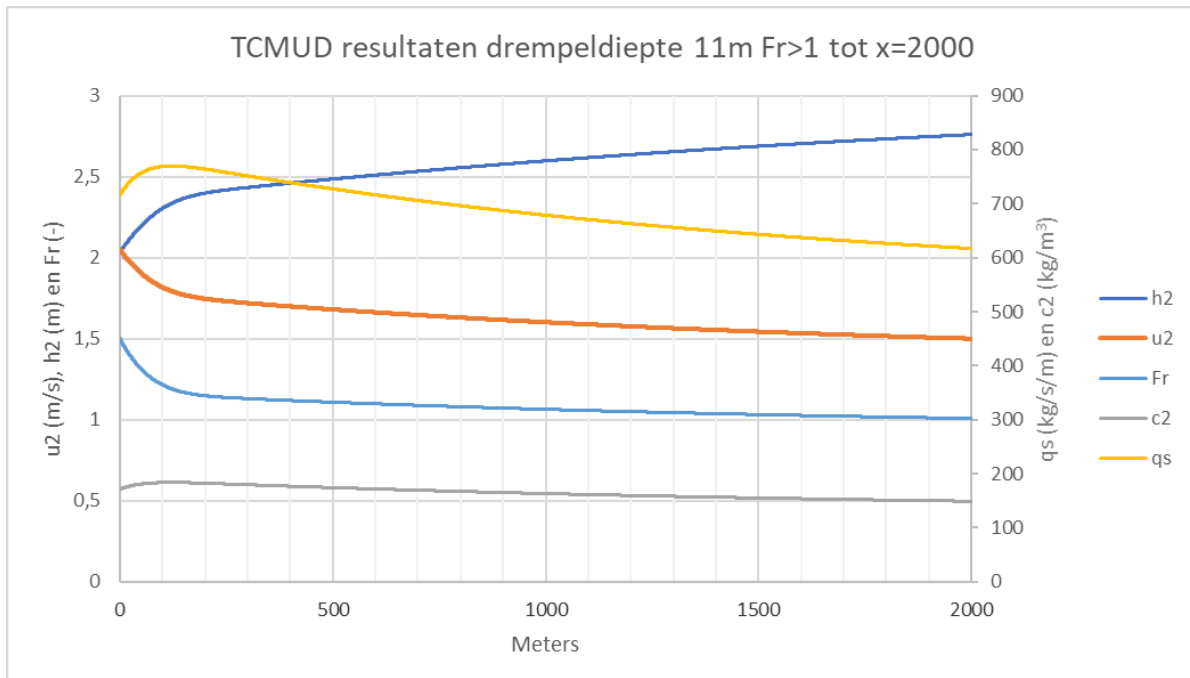
Figuur 8.1.8 Berekening vanuit het TCMUD-model bij een drempeldiepte van 11 meter met een hoek van 0,28648 graden.

Berekening met $Fr > 1$ tot aan tenminste 2000 meter

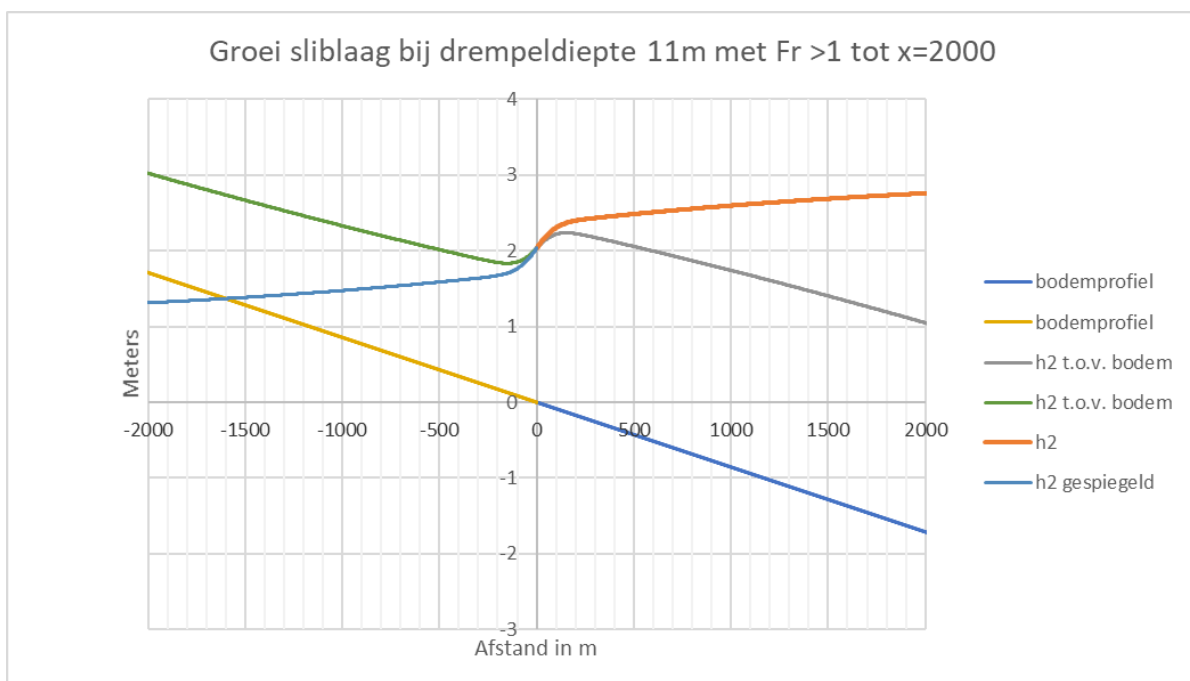
Bij de berekening, zie figuren 8.1.9, 8.1.10 en 8.1.11, is het Froude getal > 1 tot aan tenminste 2000 meter. Dit met de reden dat het slib onder deze conditie blijft stromen. Om het getal van Froude boven de 1 te krijgen wordt de hoek vergroot. In het voorbeeldmodel met de drempeldiepte van 11 meter is de hoek waarop het getal van Froude groter blijft dan één 0,049 graden.

Wanneer hierbij de dikte van de sliblaag wordt afgezet tegen het bodemprofiel (de hoek), blijkt dat de sliblaag geen intersectie punt heeft. Het slib blijft continu een dikte hebben. (Zie figuur 8.1.10).

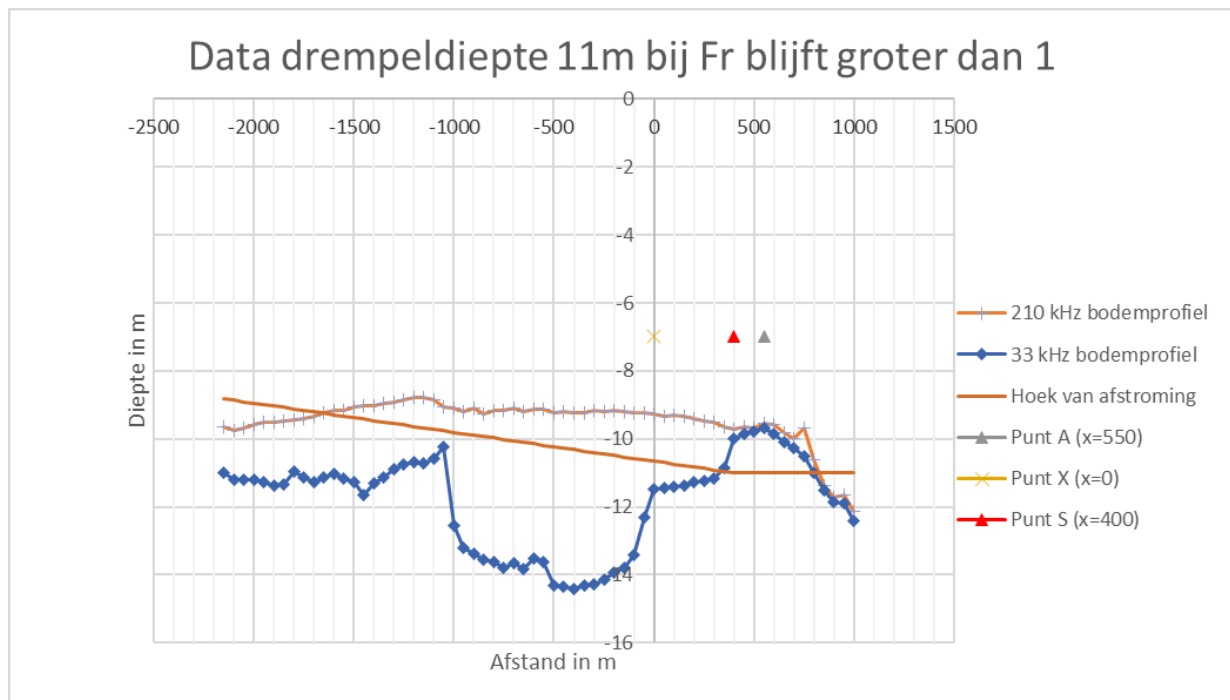
Doordat de sliblaag hierdoor geen duidelijk intersectie punt heeft, wordt de helling van de bodem geplot met de werkelijke situatie. (Zie figuur 8.1.11). De werkelijke situatie wordt overgenomen uit de peiling van januari 2020. Met een interval van 50 meter worden de 210 kHz en 33 kHz geschetst. Ondanks deze interval bevat deze schets een duidelijke schematisering van de werkelijkheid. De sliblaag stroomt totdat deze het intersectie punt met de top van de sliblaag heeft bereikt.



Figuur 8.1.9 Berekening vanuit het TCMUD-model bij een drempeldiepte van 11 meter waarbij het getal van Froude groter blijft dan 1 tot tenminste een x-waarde van 2000 meter. Weergegeven zijn de dikte (h_2), de snelheid (u_2), het Froude getal (Fr), de concentratie (c_2) en het slibtransport (q_s).



Figuur 8.1.10 Berekening vanuit het TCMUD-model bij een drempeldiepte van 11 meter waarbij het getal van Froude groter blijft dan 1 tot tenminste een x-waarde van 2000 meter.



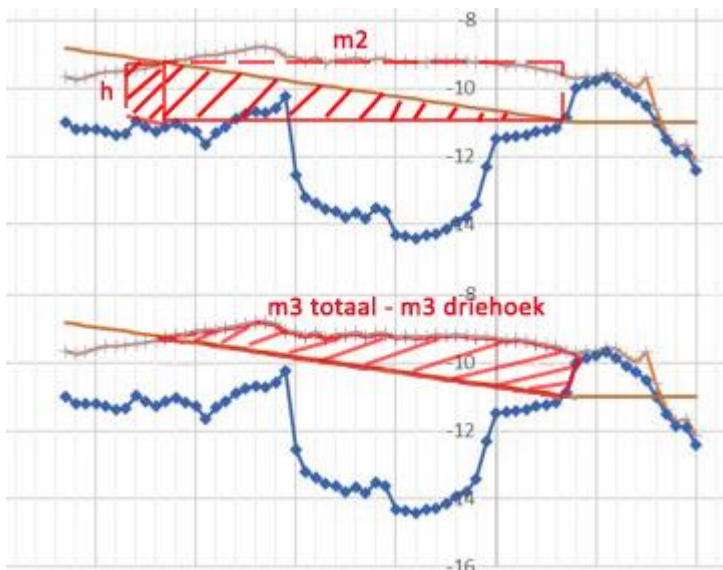
Figuur 8.1.11 bevat de berekende hoek van afstroming afgezet tegen de werkelijke situatie bij een drempeldiepte van 11 meter waarbij het getal van Froude groter blijft dan 1 tot tenminste een x-waarde van 2000 meter.

In het bovenstaand figuur is te zien dat de sliblaag met een hoek van afstroming van 0,049 graden een x-waarde bereikt van 1650 meter. Het slib boven deze hoek van stroming zal éénmalig afstromen wanneer de drempel wordt verlaagd.

Wanneer de onderzoeksresultaten met elkaar worden vergeleken blijkt dat de x-waarde en de hoek van afstroming groter worden naarmate de drempel lager wordt gebaggerd. Dit lijkt een realistisch proces.

De inhoud van de afvloeiende sliblaag wordt berekend met behulp van het programma Qinsy. Hierin wordt de peiling van januari 2020 ingeladen (huidige bodemprofiel). Omdat Qinsy geen inhoudsberekening kan uitvoeren op een diagonaalvlak, is het noodzakelijk om een horizontale referentie diepte aan te nemen (diepte van de zanddrempel). Door vanaf een horizontaal vlak de inhoud te berekenen, wordt ook de inhoud van een driehoek berekend onder de hoek van afstroming. (Zie figuur 8.1.12).

De inhoud van deze driehoek wordt aangenomen volledig gevuld te zijn. De driehoek wordt afgetrokken van de totaal berekende inhoud om alleen de inhoud van de afvloeiende sliblaag over te houden. Dit wordt berekend door de hoogte van de driehoek te vermenigvuldigen met het oppervlak waarop een inhoudsberekening wordt gedaan. Door deze rekensom wordt de inhoud van een vierkant berekend (2 x de hoeveelheid van de driehoek) die vervolgens wordt gedeeld door twee. De hoogte van de driehoek wordt bepaald door het meten van de top van de sliblaag en de gebaggerde drempeldiepte.

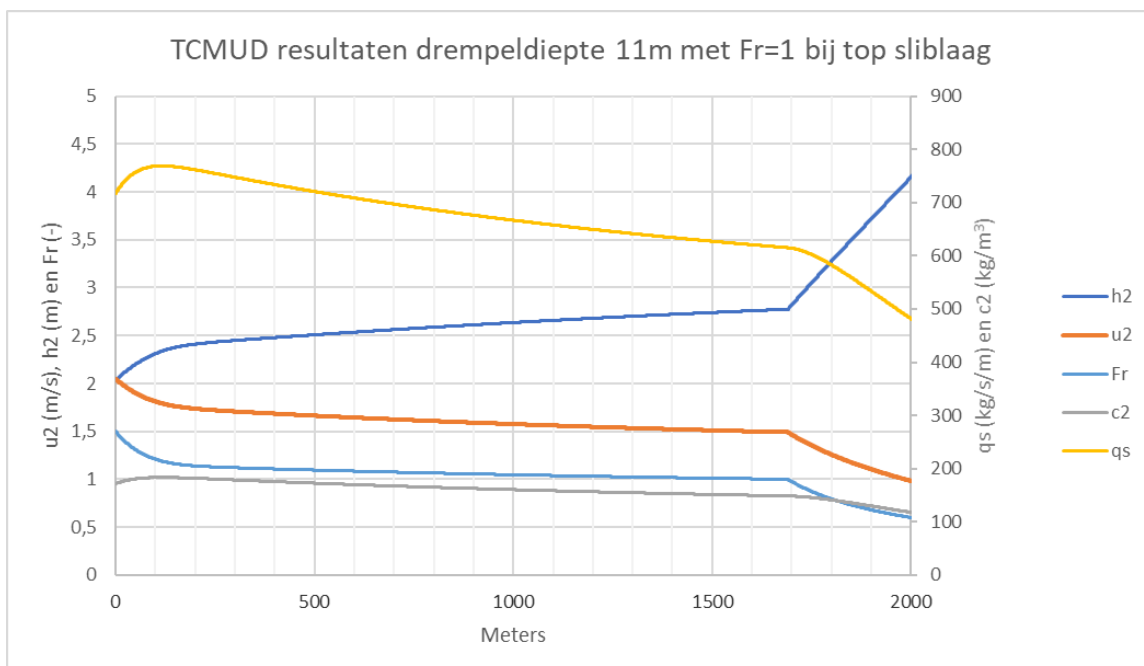


Figuur 8.1.12 Schematisatie van de berekening die nodig is om de berekening in Qinsy te compenseren en de afstromende sliblaag te berekenen.

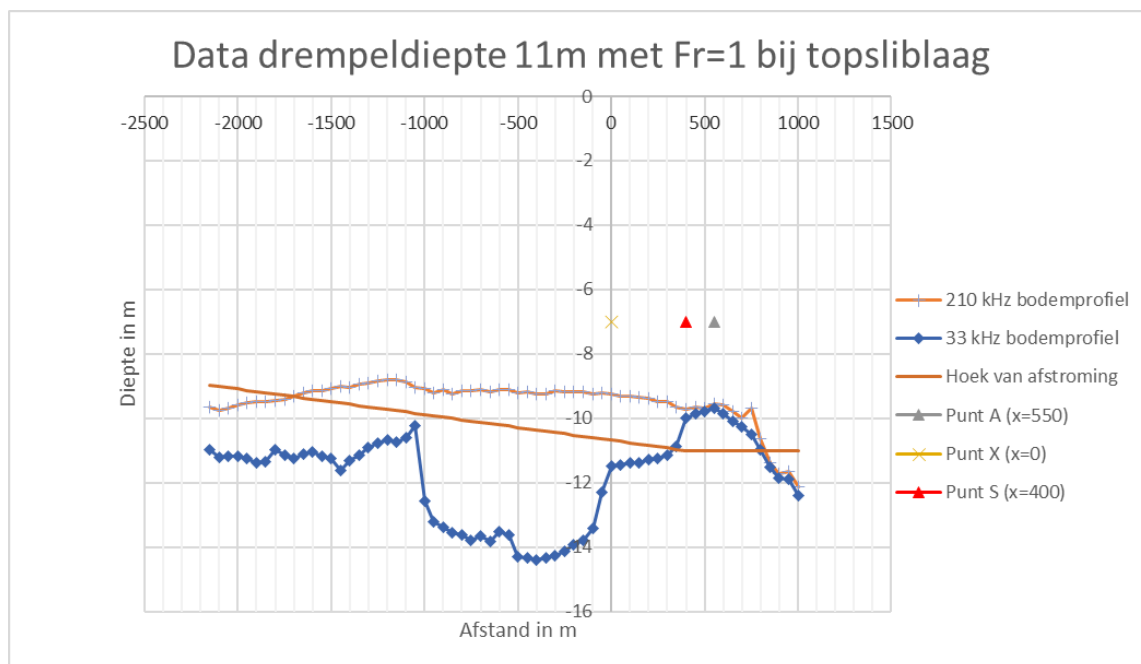
Optimalisatie door $Fr=1$ bij intersectie met top sliblaag

In figuren 8.1.9, 8.1.10 en 8.1.11 blijft $Fr > 1$, ook na het intersectiepunt met de top van de sliblaag. Echter door de hoek te verkleinen wordt het Froude getal bij een bepaalde x-waarde kleiner dan 1. Wanneer het getal kleiner wordt dan 1 houdt de stroming op. Om de berekening/inhoud te optimaliseren wordt de hoek verkleind, zodat de x-waarde waarbij $Fr=1$ net zo groot is als het intersectie punt tussen de hoek van afstroming en de top van de sliblaag. Dit is weergegeven in figuren 8.1.13 en 8.1.14.

Het intersectie punt komt verder in de haven op 1700 meter, met een flauwere helling. Dit resulteert in meer slib dat af gaat stromen. Deze gegevens worden opnieuw berekent in Qinsy op dezelfde manier als hierboven is beschreven.



Figuur 8.1.13 Berekening vanuit het TCMUD-model bij een drempeldiepte van 11 meter waarbij het getal van Froude gelijk is aan 1 bij de bovenkant van de sliblaag. Weergegeven zijn de dikte (h_2), de snelheid (u_2), het Froude getal (Fr), de concentratie (c_2) en het slibtransport (qs).



Figuur 8.1.14 bevat de berekende hoek van afstroming afgezet tegen de werkelijke situatie bij een drempeldiepte van 11 meter waarbij het getal van Froude kleiner is dan 1 bij de bovenkant van de sliblaag.

8.2 SILTHAR (determinatie aanvoer van extra slib)

Om de extra aanslibbing te berekenen bij verlaging van de zanddrempel wordt het SILTHAR-model gebruikt. Dit model is afgeleid uit het rapport 'Oorzaken aanslibbing haven Delfzijl' van W.D. Eysink. De calculatie bestaat uit het bepalen van de aanslibbing per getij door het berekenen van de volgende parameters: het uitwisselingsvolume per getij, het bezinkpercentage en de droge dichtheid van het sediment. Bij vergroting van de havenmonding zou het uitwisselingsvolume groter worden, waardoor de aanslibbing zal toenemen.

8.2.1 Theorie

De theorie is beschreven in paragraaf 5.2.3: Kwantiteit van het aanslibben.

8.2.2 Input in SILTHAR

In het onderstaand tabel staan de parameters gedefinieerd die nodig zijn voor de berekening van het SILTHAR-model. De determinatie van deze gegevens kan worden gevonden in bijlage 2.

Parameter	Symbool	Waarde	Eenheid
Coëfficiënt horizontale circulatie	F_h, F_{hr}	$F_h = 0,02$ en $f_{th}=0,2$	
Diepte van de havenmond	h_0	Variabel	m
Breedte van de havenmond	b_0	330	m
Maximale stroomsnelheid langs de havenmond tijdens vloed	$u_{0,max}$	0,9	m/s
Getijperiode	T	6	Uur
Getijvolume	V_t	5.914.276	m ³
Karakteristiek dichtheidsverschil voor de havenmond	$\Delta\rho_{max}$	50	kg/m ³
Coëfficiënten	f_d	Variabel door h_0	
	f_{td}	Variabel door h_0	
Aantal getijden per jaar	n	706	
Aantal getijden waarin wordt gespuid per jaar	n_s	438	
Deel van het sediment dat bezinkt	p	33	%
Gemiddelde concentratie in het aangevoerde water	C_{in}	0,3	kg/m ³
Gemiddelde concentratie in het spuiwater	C_s	0,005	kg/m ³
Zandfractie	p_z	10	% ds.

Tabel 8.2.1 Samenvatting/opsomming van resultaten uit parameterspecificatie. (Zie bijlage 2).

In deze paragraaf wordt één voorbeeldberekening beschreven van het SILTHAR-model met een drempel diepte van 9,7 meter. Voor de totale analyse is het nodig om de berekening steeds opnieuw uit te voeren met een lagere drempeldiepte.

Hozientale circulatiestroom		
Input		
f _h	0,02	
f _{th}	0,2	
h ₀	9,7	m
b	330	m
u _{0,max}	0,9	m/s
T	21600	s
V _t	5.914.276	m³
Output		
V _h	-786.703	m³

Uitwisseling door dichtheidstroom		
Input		
F _d	0,12	
h ₀	9,7	m
b	330	m
Δρ _{0,max}	2,5	kg/m³
p	1025	kg/m³
g	9,81	m/s²
T	21600	s
f _{td}	0,5	
V _t	5.914.276	m³
Output		
V _d	1.040.000	m³

Uitwisseling door spui volumes		
input		
Ves	484.500	m³
n	706	
ns	476	
ouput		
Vs	326.660	

Volume uitwisseling		
input		
V _t	5.914.276	m³
V _h	-	m³
V _d	1.040.000	m³
V _s	326.660	m³
Output		
Vuitw	7.280.936	m³

Sedimentatie in m³		
input		
P	0,33	
c _{in}	0,3	kg/m³
Vuitw	7.280.936	m³
p _d	374,5	kg/m³
V _s	484.500	m³
cs	0,005	
Output		
ΔT _s	1.926,17	m³

Omrekening naar m³ per jaar		
Input		
ΔT _s	1.926,17	m³
n	706	
Output		
m³/jaar	1.359.878	

De parameters $f_d(f_{4, \max})$ en $f_{dh}(f_5)$ worden ook berekend. De formules en de benodigde grafiek voor het bepalen van $f_{dh}(f_5)$ zijn weergegeven in bijlage 2. De berekening van deze parameters is hieronder weergegeven.

Figuur 8.2.2 Voorbeeldberekening van SILTHAR-model van parameters f en f_h met drempeldiepte 9,7 meter. ($f_4, \max = f$ en $f_5 = f_h$)

8.3 SEDTUBE (determinatie aanvoer van extra zand)

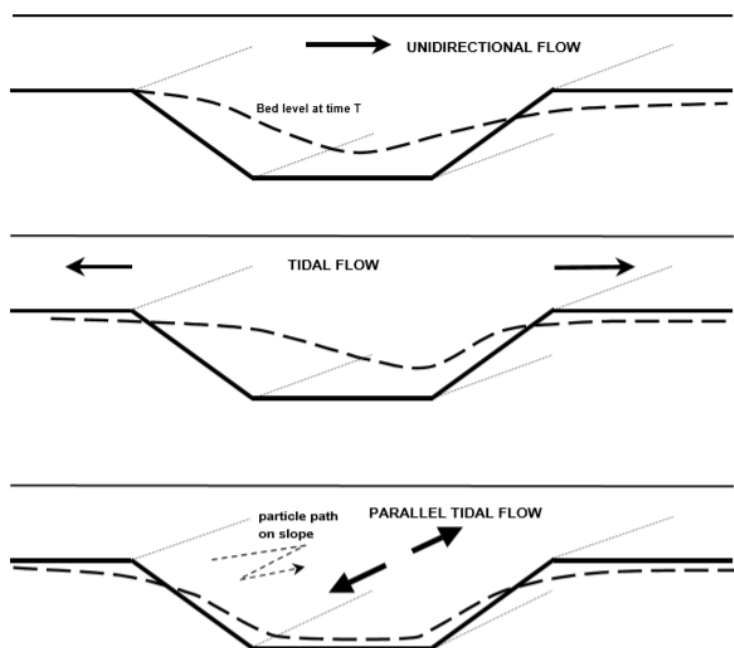
De determinatie van de extra aanzanding, wanneer de drempel wordt verlaagd, wordt geanalyseerd met het SEDTUBE-model van Prof. L. van Rijn. Het model is ontwikkeld om de aanzanding te simuleren in kanalen op de zeebodem. Het SEDTUBE-model wordt uitgelegd aan de hand van de readers bij het modellenpakket van L. van Rijn en deels door middel van het boek: 'Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, esuaries and coastal seas' van L. van Rijn.

8.3.1 Theorie

Het SEDTUBE-model is een één-dimensionaal model voor de simulatie van aanzanding in kanalen en zandplaten/zanddrempels onder de invloed van getijstroming en golven. Het SEDTUBE-model kan worden gebruikt bij de volgende soorten stromingen door en over een kanaal:

1. Arbitraire stromingskanaal (versmalling in het midden);
2. Schuine stroming over een kanaal;
3. Parallelle stroming door een kanaal.

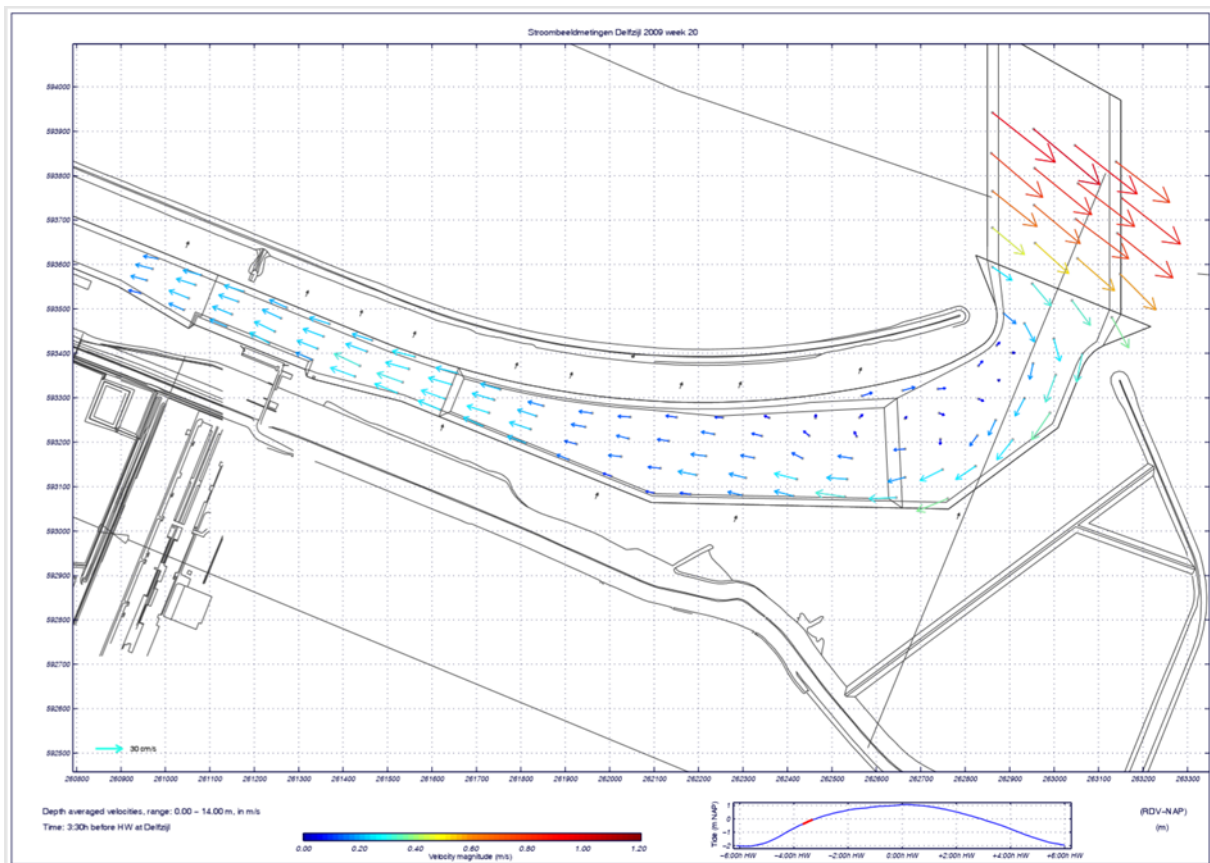
Hierbij kan het model ook onderscheid maken tussen getijstroming of éénzijdige stroming. Het model berekent de bodemtransport en het gesuspendeerde transport (zie paragraaf 5.4.1) en houdt rekening met roering op de bodem door golven. In het onderstaande figuur zijn mogelijkheden te zien van een schuine stroming over een kanaal en een parallelle stroming door het kanaal.



Figuur 8.3.1 Verschillende stromingen over een kanaal met daarbij de bijbehorende sedimentatie patronen.

Situatie in Delfzijl

In de haven van Delfzijl is een arbitrair stromingskanaal (met een versmalling in het midden) niet van toepassing bij de drempel. Een parallelle stroming bij de haven van Delfzijl is alleen van toepassing in het Zeehavenkanaal en niet op de drempel. Een zijdelingse stroom over de vaargeul met daarin de drempel is wel van toepassing bij de haven van Delfzijl. Zo blijkt uit de stromingsmetingen van Baggerbedrijf de Boer die in 2010 zijn gemeten. (Zie figuur 8.3.2 waarin de drempel op de noordzijde van baggervak 1a (baggervak bij de havenmonding) is gesitueerd). Doordat er in de haven sprake is van een schuine stroming over een kanaal wordt alleen deze optie besproken bij de uitleg van het SEDTUBE-model.



Figuur 8.3.2 Stroomsnelheidsmetingen gemeten door Baggerbedrijf de Boer in 2010 voor Groningen Seaports.

Sedimentatie en hydrodynamische processen

Het model houdt rekening met de processen die plaatsvinden bij een zijdelingse stroming over een kanaal op de zeebodem. Wanneer een stroming over een kanaal gaat zal de snelheid van het water afnemen. Dit kan worden verklaard aan de hand van de hydraulische formule voor de massabalans in water ($Q = v \cdot A$). Wanneer de oppervlakte (A) groter wordt zal de stroomsnelheid (v) minder worden, doordat het debiet (Q) hetzelfde blijft. Door deze vertraging in stroomsnelheid kan het water minder sediment transporteren boven het kanaal, waardoor het materiaal op deze plaats gaat bezinken. Deze sedimentatie geldt voor zowel het bodemtransport als voor het gesuspendeerde transport.

De golven zorgen voor roering die het sediment proces vertraagd. Waar de stroming het kanaal uitgaat wordt het sediment meegenomen door de versnellende stroming. Wat resulteert dat het bij een ongelijke stroming tussen eb en vloed aan één kant de helling vlakker wordt dan aan de andere kant. Dit proces van afvlakking van één kant is weergegeven in figuur 8.3.3. Ook houdt het model rekening met afschuiving van taluds door middel van gravitatie of verschuiving van het gehele kanaal.

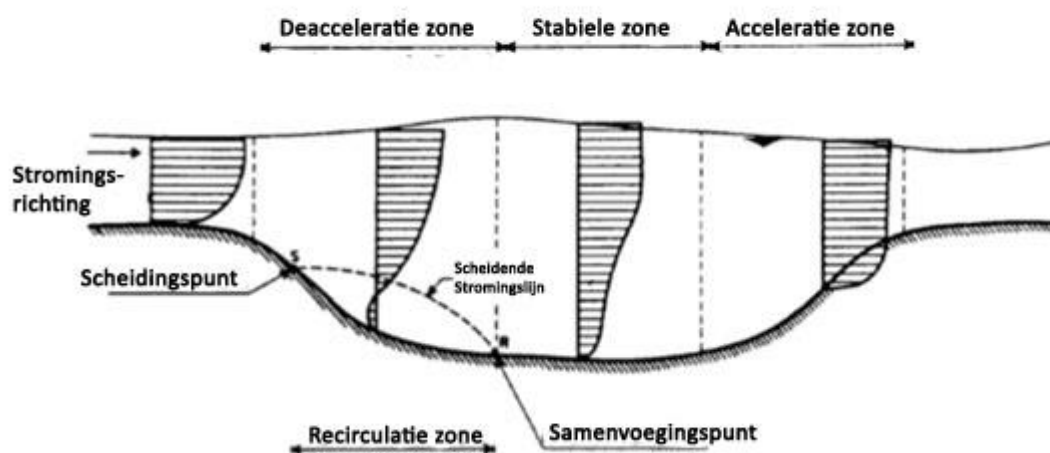
De processen die in het kanaal een rol spelen zijn het verplaatsen van het sediment door stroming, mixen van sediment deeltjes door turbulentie, sedimenteren van de sedimentdeeltjes door zwaartekracht en oppikken van sediment door golven en stroming.

Het bepalen van de sedimentatie bestaat uit het benaderen van het sediment transport dat wordt aangevoerd door stromingscondities, het sediment en door de eigenschappen van het havenkanaal zelf, zoals geometrie, oriëntatie en sediment karakteristieken.

De invloed van het kanaal op de stroming kan worden bepaald door:

1. Dimensies van het kanaal
2. Hoek tussen het kanaal en de aankomende stroming
3. Snelheid van de stroming
4. Dieptes van het omliggende gebied

Door de loodrechte stroming op het kanaal neemt de snelheid van het water af. Vooral in de onderste laag van de afremmende kant (linkerkant in figuur 8.3.3) neemt de stroomsnelheid af. Er kan zelfs een tegenstroom ontstaan bij steile hellingen (1:5 of steiler). Deze tegenstromen zijn wel erg zwak. Aan de bovenkant tegen het wateroppervlak heeft het effect van het kanaal minder invloed op de stroming.



Figuur 8.3.3 Weergave van de stroomsnelheid over de diepte van de waterkolom over een kanaal.

Formules

De formules die gebruikt worden in het SEDTUBE-model voor het modelleren van deze processen zijn:

- De snelheid van de stroming (hydrodynamische veranderingen)
- De verandering in bodemdieptes (sedimentatieprocessen)

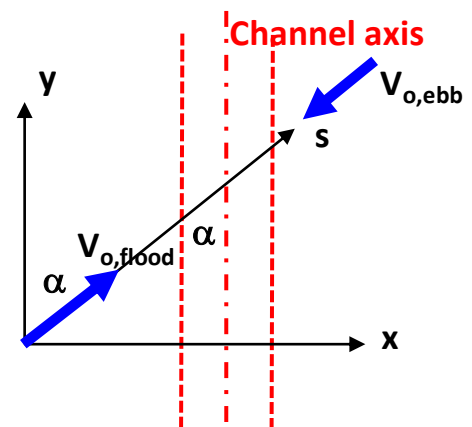
De snelheid van de stroming

De snelheid van de stroming wordt berekend door de onderstaande formules. Waarbij de snelheid in lengte richting en in dwarsrichting wordt vermenigvuldigd met de parameters van het kanaal en vervolgens worden samengevoegd tot één stroomsnelheid in een bepaalde richting (S) door het kanaal. (Zie figuur 8.3.4).

$$u_{long,x} = \left(\frac{C_x}{C_0}\right) \left(\frac{h_x}{h_0}\right)^n u_{long,x=0}$$

$$u_{cross,x} = \left(\frac{h_0}{h}\right) u_{cross,x=0}$$

$$V_s = \left[(u_{cross,x})^2 + (u_{long,x})^2 \right]^{0,5}$$



Figuur 8.3.4 Schematisatie van formules voor bepalen stroomsnelheid door/over het kanaal. (Van Rijn, 2015).

Waarin:

h_0 = Waterdiepte bij $x=0$
 h_x = Waterdiepte bij dwarsdoorsnede-locatie x
 C_x = Chézy waarde bij dwarsdoorsnede-locatie x door formule:
 $C_x = 5,75g^{0,5} \log \left(\frac{12h_x}{k_s} \right)$, waarin k_s = effectieve laminaire laag.
 C_0 = Chézy-value at location $x=0$,
 n = exponent gebaseerd op kalibratie ($n=0,25$ of $n=0,5$ wanneer $u=C(hS)^{0,5}$ waarin S de waterspiegel helling is.
 S = Wateroppervlak hoek
 $u_{cross,x=0}$ = $V_0 \sin \alpha$
 $u_{long,x=0}$ = $V_0 \cos \alpha$, waarin V_0 = snelheidsfactor bij $x=0$ ($s=0$),
 x = afstand op dwarsdoorsnede
 y = afstand in de lengte as
 s = afstand langs de stroming
 α = Hoek tussen stroming en normaal lijn van het kanaal (90 graden is loodrecht) en bij getijde hebben stromingen bij eb en vloed tegenovergestelde richtingen.

De verandering in bodemdieptes

Het model berekent over de dwarsdoorsnede per twee meter over één getij de gradiënt van de bodemdieptes. Vervolgens wordt het model gerund door een bepaalde macro, waardoor deze berekening wordt herhaald. Na een aantal getijden wordt een verandering in het bodemprofiel zichtbaar. De bodemdieptes door het kanaal veranderd door:

$$\frac{b\Delta z_b}{\Delta t} + [(1 - \varepsilon)\rho_s]^{-1} \left[\frac{\Delta(bq_{total})}{\Delta s} \right] = 0$$

$$\Delta z_{b,l,t+\Delta t} = -[2\Delta s(1 - \varepsilon)\rho_s]^{-1} \Delta t [b_{i+1}q_{total,i+1,t} - b_{i-1}q_{total,i-1,t}] + 0,5\gamma_s [z_{b,i+1,t} - 2z_{b,i,t} + z_{b,i-1,t}]$$

Waarin:

z_b = Bodemdiepte per tijdsduur
 b = breedte van de stroming
 s = coördinaat langs de stroming
 q_b = bodemtransport
 q_s = gesuspendeerd transport
 $q_{total} = q_b + q_s$ = totale sediment transport
 ε = porositeit van het gesedimenteerde bodemmateriaal
 ρ_s = dichtheid van het sediment
 γ_s = Coëfficiënt voor afvlakking (0.01-0.001).

8.3.2 Input parameters

Parameter	Symbol	Waarde	Eenheid
Diepte geïntegreerde snelheid op $x=0$ bij vloed	v	0,35	m/s
Diepte geïntegreerde snelheid op $x=0$ bij eb	v	0,25	m/s
Hoogte van het getij		+1,40 en -1,66	m
Golfhoogte	H_s	0,415/0,327	m
Golfperiode	T_p	7	s
D_{50} van zandfractie	D_{50}	0,00015	m
D_{90} van zandfractie	D_{90}	0,000225	m
Slibfractie in bodem	p_{mud}	0,11	(-)
Dichtheid van vloeistof	ρ_w	1025	(kg/m ³)
Dichtheid van sediment	ρ_s	2650	(kg/m ³)
Kinematische viscositeit	ν	$1,3065 \times 10^{-6}$	Ns/m ² of ms/kg
Valsnelheid van gesuspendeerd zand	W_s	0,0127	m/s
Bodemruwheid	k_s	0,000225	m
Porositeit van bodem materiaal	P	0,46	(-)
Kalibratie factor zandtransport	K	0,3	(-)
Kalibratie factor effectieve snelheid	N	4	(-)
Kalibratie coëfficiënt stroomaantrekking effect		1	(-)
Stromingsduur van 1 tijdsstap	D_t	6,166	(uren)
Coëfficiënt voor afvlakking	γ_s	0,01	(-)
Kalibratie coëfficiënt voor zijdelings bodemtransport	K	0,05	(-)
Nummer van tijdsduur voor een halve getijde	Δt	1	(-)
Totale getal aan tijden die worden gesimuleerd		Variabel	(-)
Dwarsdoorsnede profiel van havenmonding		Nader bepaald	(m)

Tabel 8.3.1 Samenvatting/opsomming van resultaten uit parameterspecificatie. (Zie bijlage 3).

8.3.3 Kalibratie van het model

Uit het praktijkonderzoek dat is beschreven in paragraaf 7.2 blijkt dat er over de week waarin de praktijkproef heeft plaats gevonden de aanzanding op de drempel negatief was. Het SEDTUBE-model wordt alsnog toegepast in dit onderzoek om de mogelijkheid tot extra aanzanding te analyseren bij verschillende drempeldieptes.

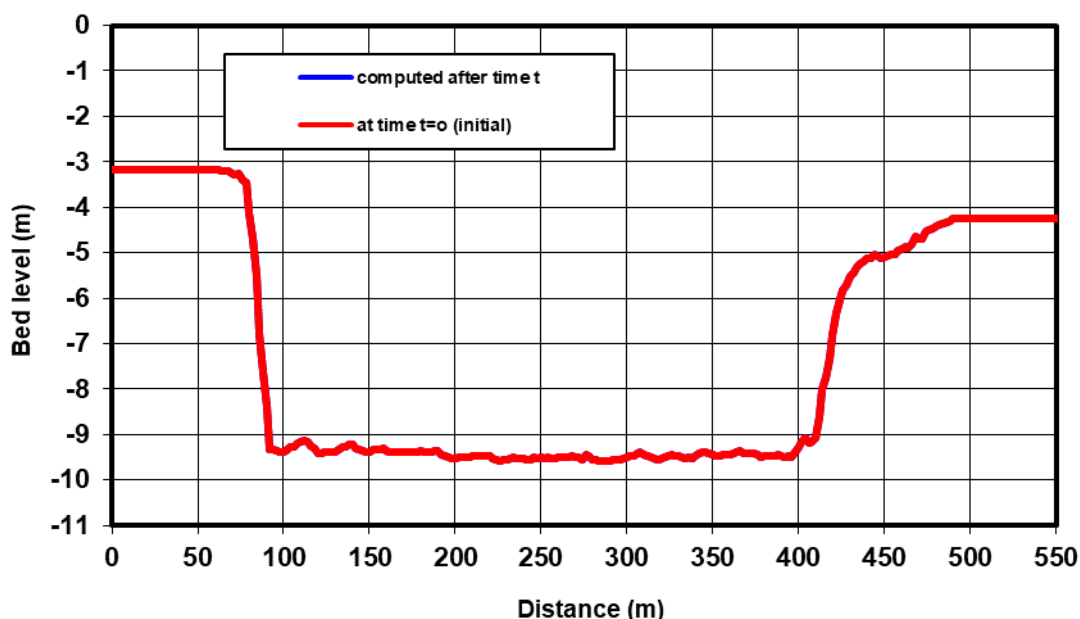
Het model kan nog steeds waardevolle en realistische informatie geven, omdat blijkt uit ervaringen van deskundigen dat er wel degelijk aanzanding is ter plaatse van de drempel. Ook baggert de Airset voortdurend op deze locatie om de zanddrempel op diepte te houden. De periode van meting in de praktijkproef is hoogstwaarschijnlijk tekort geweest of te hevig qua weersomstandigheden om een goede indicatie te krijgen van de normale jaarlijkse situatie. Om deze redenen kan de modellering nog steeds antwoord geven of er extra aanzanding plaatsvindt bij het verdiepen van de zanddrempel, echter zal het model geen antwoord kunnen geven hoeveel aanzanding er precies zal plaatsvinden.

Om het model toch op enige waarheid te kalibreren wordt het gemiddelde van alle positieve waarden van de dieptemeting van het dwarsprofiel uit de praktijkproef (zie figuur 7.2.3) genomen.

Deze gemiddelde wordt gekoppeld aan de aanzanding die heeft plaats gevonden, om een indicatie te krijgen van een mogelijke aanzanding.

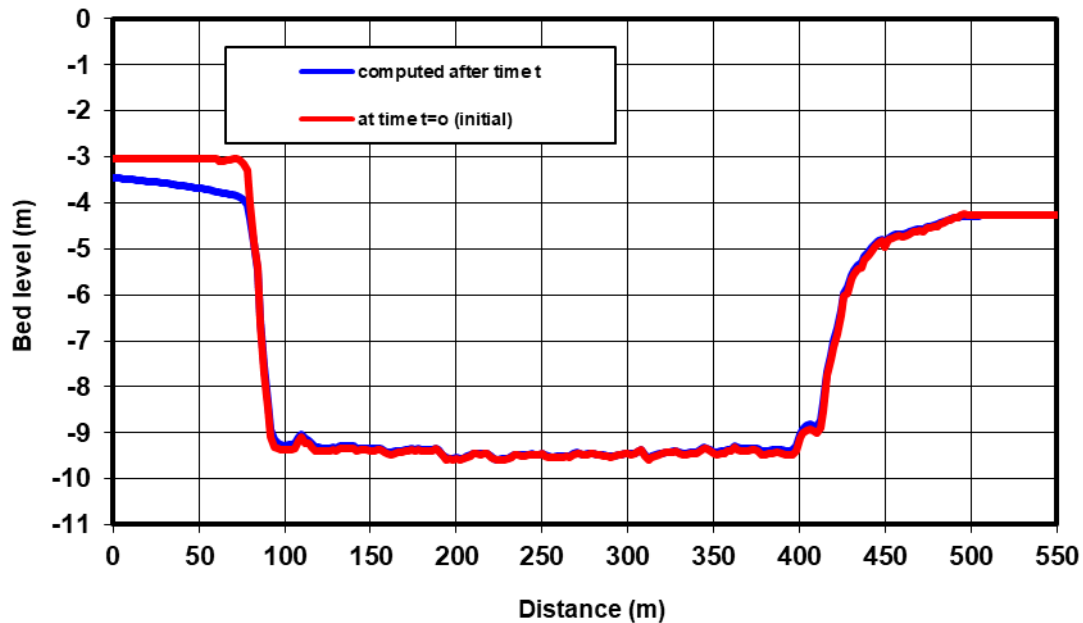
Het gemiddelde van alle positieve waarden uit de praktijkproef is 0,004125 meter dat overeenkomt met 4,125 mm. Op dit gemiddelde wordt het model gekalibreerd. De tijdsduur van de simulatie heeft 10320 minuten geduurd. Eén hele getijde duurt 12 uur en 20 minuten in Delfzijl (740 minuten). Waardoor de simulatie duur 13,95 bedraagt, wanneer de tijdsduur van de praktijkproef wordt gedeeld door het getij. Naast de kalibratie op de positieve waarden wordt het dwarsprofiel van het model gekalibreerd op het dwarsprofiel van de praktijkproef. (Zie figuur 7.2.3 en 8.3.6).

Om de kalibratie uit te voeren moet allereerst het dwarsprofiel worden gemaakt. Deze wordt gegenereerd door per 2 meter een waarde van de diepte in te vullen van het dwarsprofiel. Het dwarsprofiel is in het midden gezet van de x-as en aan beide kanten is het dwarsprofiel verlengd met de laatst gemeten waarde. Het profiel zit er dan als volgt uit:



Figuur 8.3.5 Dwarsdoorsnede van het Zeehavenkanaal ter hoogte van de Noordlijn van baggervak 1a, waarin deze is verwerkt in het SEDTUBE-model (blauwe lijn niet weergegeven, doordat het model nog niet heeft gerekend bij dit punt).

De SEDTUBE-kalibratie wordt gebaseerd op de resultaten van de praktijkproef (vooral op de dwarsdoorsnede) en uit ervaringen van de bemanning van de Airset. Uit gesprekken met de bemanning van de Airset kwam naar voren dat vooral de zijkanten van het kanaal aanzanden. Tevens gaat de kalibratie ervanuit dat er een minimale stijging plaatsvindt van de bodem. De afname van het talud wordt zo dicht mogelijk op de werkelijke situatie gemodelleerd. Om dit te doen wordt de kalibratie factor voor zandtransport verkleind van 1 naar 0,3 en de kalibratie factor voor effectieve snelheid wordt verhoogd van 1 naar 4. De coëfficiënt voor afvlakking wordt op het maximale gezet. De coëfficiënt van het zijdelings bodemtransport wordt zo minimaal mogelijk gezet om een flauwe helling te voorkomen. Deze kalibratie met de tijdsduur van de praktijkproef is weergegeven in figuur 8.3.6.

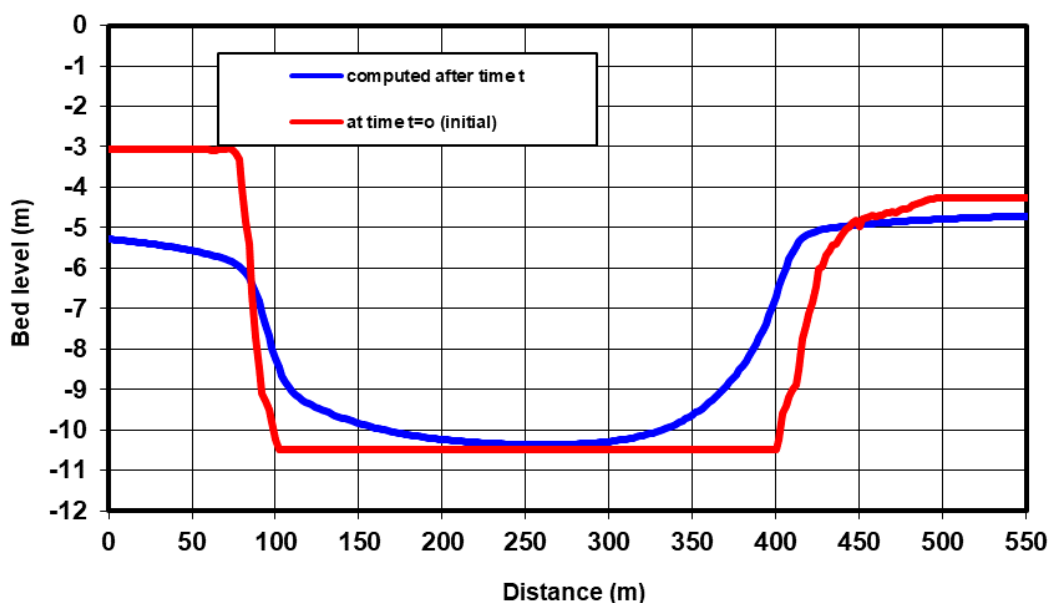


Figuur 8.3.6 Kalibratie modellering van het Zeehavenkanaal ter hoogte van de Noordlijn van baggervak 1a vanuit het SEDTUBE-model.

8.3.4 Methode

In deze paragraaf wordt de methode van de berekening van het SEDTUBE-model uitgelegd aan de hand van een voorbeeldopgave. De voorbeeldopgave die wordt gebruikt is de berekening van drempelhoogte 10,5 meter.

Na het kalibreren van het model worden de parameters golfhoogte en duur van de simulatie veranderd. De golfhoogtes worden gereduceerd van 0,415 m naar 0,327 m. De simulatieduur gaat van 13,95 hele getijden naar 710 hele getijden. Daarnaast wordt het dwarsprofiel aangepast op een de drempelhoogte van 10,5 meter. Dit wordt gedaan door alle waarden van de bodem van het kanaal op 10,5 meter te zetten. Vervolgens wordt de simulatie aangezet en levert dit het volgende resultaat op:

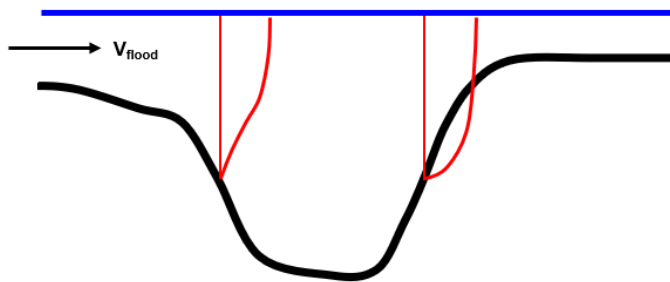


Figuur 8.3.7 Modellering van dwarsdoorsnede over het Zeehavenkanaal ter hoogte van de Noordlijn van baggervak 1a met een drempeldiepte van 10,5 meter vanuit het SEDTUBE-model.

Om een vergelijking te kunnen maken wordt de gemiddelde stijging ter hoogte van de bodem van het kanaal berekend. Vervolgens zijn ook andere drempelhoogtes uitgevoerd en zijn de resultaten vergeleken in hoofdstuk 9.

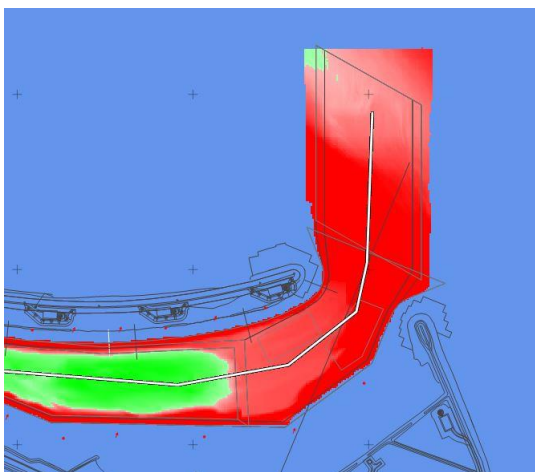
8.3.5 Analyse

De uitkomsten van de simulaties in het SEDTUBE-model lijken realistisch wanneer er wordt uitgegaan van de theorieën omtrent het aanzanden van een kanaal onder water en de ervaringen van de bemanning op de Airset. De hoeken van de bodem zanden het meest aan. Ook verplaatst het kanaal zich door de ongelijke snelheid van de eb en vloed stroom. Wat wel opvalt is dat aan de linkerkant van het plaatje na de simulatie de flauwere helling is ontstaan en aan de rechterkant de steile helling. De onderstaande afbeelding geeft dit principe. Mogelijk zijn de stromingscondities in het echt iets anders dan bij de simulatie is aangenomen.



Figuur 8.3.8 Weergave van een typisch Zeehavenkanaal naar een vloed stroming van links. (Bron: figuur komt uit het SEDTUBE-model).

In eerste instantie was er een simulatie uitgevoerd met een kalibratie waarbij de bodem niet zou stijgen. Dit leidde tot niet realistische waarden, doordat na een jaar de bodem in het havenkanaal niet was gestegen. De bodem steeg bij deze simulaties alleen aan de zijkanten van het kanaal. Op basis van ervaringen van deskundigen en de theorieën bij het SEDTUBE-model werd deze kalibratie als onrealistisch beschouwd.



Figuur 9.1.2 Screenshot vanuit Qinsy waarop is aangeven in het groen welke plekken dieper zijn dan 12 meter en in het rood welke plekken ondieper zijn dan 12 meter (33kHz-meting).

Ook zouden er alternatieven gemaakt kunnen worden ten aanzien van het versmallen van de havenmond met een verdieping van de drempel. Dit door bijvoorbeeld het gebruik van kribben. Voordelen van een verkleinde breedte zijn een reductie aan aanslibbing en het vergroten van de stroomsnelheid door de monding. Dit laatste hoeft niet persé een voordeel te zijn. Deze alternatieven worden in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten. Om de reden dat dit een groot onderzoek betreft wat ervoor zorgt dat de scope van dit onderzoek te groot wordt.

9.2 Berekeningen alternatieven

In deze paragraaf wordt per alternatief de inhoudsberekening uitgevoerd op de volgende punten:

- De verwijdering van de zanddrempel;
- De extra aanslibbing;
- De afvloeiende sliblaag berekend;
- De extra aanzanding (geen inhoudsberekening maar toename in percentage);

Bij de afvloeiing van de sliblaag wordt ook de nieuwe maatgevende hoogte in de haven bepaald per alternatief.

9.2.1 Inhoudsberekening verwijdering zanddrempel

De inhoudsberekeningen worden uitgevoerd met het programma Qinsy. Met deze peilgegevens en een ondergrond kunnen inhoudsberekeningen worden uitgevoerd. De peilkaart van januari 2020 is gebruikt tijdens dit onderzoek. Op de peilkaart van januari 2020 is te zien dat de drempel ongeveer op een diepte van 9,7 meter ligt. In de onderstaande tabel zijn de resultaten van de inhoudsberekening weergegeven:

Nieuwe diepte zanddrempel	Verlaging in meters	Inhoud in m ³
10 m	0,3 m	27.929
10,25 m	0,55 m	46.666
10,5 m	0,8 m	67.965
10,75 m	1,05 m	89.681
11 m	1,3 m	115.161
11.5 m	1,8 m	402.814
12,0 m	2,3 m	624.739

Tabel 9.2.1 Berekening van de inhoud van de zanddrempel op een bepaalde referentie diepte afgeleid uit de alternatieven.

9.2.2 Extra aanslibbing bij verlaging drempel

De extra aanslibbing is bepaald met het SILTHAR-model. De berekening die is toegepast is terug te vinden in paragraaf 8.2.3. In onderstaande tabel zijn de resultaten uit het SILTHAR-model weergegeven. In dit tabel is ook het verschil in % en in inhoud weergegeven ten opzichte van de aanslibbing bij een drempeldiepte van 9,7 meter.

Diepte drempel	Verlaging in meters	Aanslibbing	Aanslibbing t.o.v. 9,7m	t.o.v. 9.7m in %
9,7 m	0 m	1.356.383	-	-
10 m	0,3 m	1.357.665	1.283	0,09%
10,25 m	0,55 m	1.363.169	6.787	0,50%
10,5 m	0,8 m	1.380.389	24.006	1,77%
10,75 m	1,05 m	1.398.279	41.896	3,09%
11 m	1,3 m	1.416.830	60.447	4,46%
11,5 m	1,8 m	1.455.889	99.506	7,34%
12,0 m	2,3 m	1.519.584	163.201	12,03%

Tabel 9.2.2 Berekening van de extra aanslibbing per jaar wanneer de drempel wordt verlaagd met een bepaalde diepte.

9.2.3 Afvloeiing van vloeibaar slib

In deze paragraaf wordt de inhoud van de afvloeiende sliblaag berekend en de invloed hiervan op de maatgevende 33- en 210kHz-diepte.

Inhoud van de afvloeiende sliblaag

Met het TCMUD-model wordt de afvloeiing van de sliblaag berekend. Met deze berekening kan de afvloeiingshoek en de afstand van de afvloeiing (x-waarde) worden berekend. Op welke methode dit is gedaan en de achterliggende gedachte is uitgelegd in paragraaf 8.1. In deze paragraaf wordt er gefocust op de resultaten van deze modelleringen.

In tabel 9.2.3 zijn de x-waarde en de afvloeiingshoek bepaald van alle alternatieven met het uitgangspunt dat $Fr > 1$ tot aan tenminste 2000 meter. In tabel 9.2.4 zijn deze resultaten geoptimaliseerd door de hoek te verkleinen. Het froude getal is in deze situatie 1 bij de top van sliblaag.

Drempel diepte		Froude nummer blijft boven de 1 tot aan 2000 m					
Voor	Na	Hoek		h2,0	x-waarde	Geldig	Opmerking
(m)	(m)	Graden	Radialen	(m)	(m)		
9,1	9,7	0,028648	0,0005	0,525	1050	Ref.	-
9,7	10	0,042	0,000733	1,036	1225	TRUE	-
9,7	10,25	0,042	0,000733	1,286	1350	TRUE	-
9,7	10,5	0,045	0,000785	1,536	1500	TRUE	-
9,7	10,75	0,047	0,00082	1,786	1675	TRUE	-
9,7	11	0,049	0,000855	2,036	1650	TRUE	-
9,7	11,5	0,054	0,000942	2,536	1775	TRUE	-
9,7	12	0,091	0,001588	3,036	1450	TRUE	Zelfaccelleratie

Tabel 9.2.3 Resultaten uit TCMUD per verlaging van de zanddrempel, waarbij Fr groter blijft dan 1 tot aan 2000 meter.

Drempel diepte		Hoek verkleinen van bovenstaande tabel zodat fr=1 bij top sliblaag					
Voor	Na	Optimalisatie hoek		h2,0	x-waarde	Geldig	Opmerking
(m)	(m)	Graden	Radialen	(m)	(m)		
9,1	9,7	0,028648	0,0005	0,525		Ref.	-
9,7	10	0,029	0,000506	1,036	1450	TRUE	-
9,7	10,25	0,035	0,000611	1,286	1500	TRUE	-
9,7	10,5	0,039	0,000681	1,536	1575	TRUE	-
9,7	10,75	0,0432	0,000754	1,786	1725	TRUE	-
9,7	11	0,0456	0,000796	2,036	1700	TRUE	-
9,7	11,5	0,0534	0,000932	2,536	1800	TRUE	-
9,7	12	-	-	3,036	-	FALSE	Zelfaccelleratie Fr blijft boven de 1

Tabel 9.2.4 Resultaten uit TCMUD per verlaging van de zanddrempel, waarbij Fr groter kleiner wordt dan 1 bij intersectie hoek van afstroming en top sliblaag.

Met de waarden van tabellen 9.3.3 en 9.3.4 is er in Qinsy de inhoud van de afvloeiende sliblaag berekend. Dit betreft de onderstaande resultaten. Voor de methode van de Qinsy berekening zie paragraaf 8.1.5.

Qinsy resultaten			Geoptimaliseerde hoek (Fr = 1 bij intersectie top sliblaag en afvloeiingshoek)					Resultaten a (in pdf-bestanden)			
Invoer Qinsy			Resultaten Qinsy				Vervolg berekeningen				
Ref. diepte	Afstand	Hoek	Topsliblaag bij S	Opp. Inhoudsberekening	Inhoud boven ref.	Hoogte driehoek gemeten	Hoogte driehoek berekend	Inhoud driehoek	Inhoud afvoeren de sliblaag	Reductie wegens drempel	Inhoud afvoerende sliblaag
(m)	S (m)	graden	m	m2	m3	m	m	m3	m3	m3	m3
-10	1850	0,029	-9,07	313.898	258.049	0,93	0,94	145.963	112.086	-	112.086
-10,25	1900	0,035	-9,03	311.779	337.488	1,22	1,16	190.185	147.303	-	147.303
-10,5	1975	0,039	-9,12	319.617	426.568	1,38	1,34	220.536	206.033	-	206.033
-10,75	2125	0,0432	-9,16	336.020	535.052	1,59	1,60	267.136	267.916	-	267.916
-11	2100	0,0456	-9,08	333.819	614.285	1,92	1,67	320.466	293.818	-	293.818
-11,5	2200	0,0534	-9,31	346.848	823.809	2,19	2,05	379.799	444.010	3.435	440.575
-12	1850	0,0910	-9,07	313.880	885.810	2,93	2,94	459.834	425.976	23.461	402.515

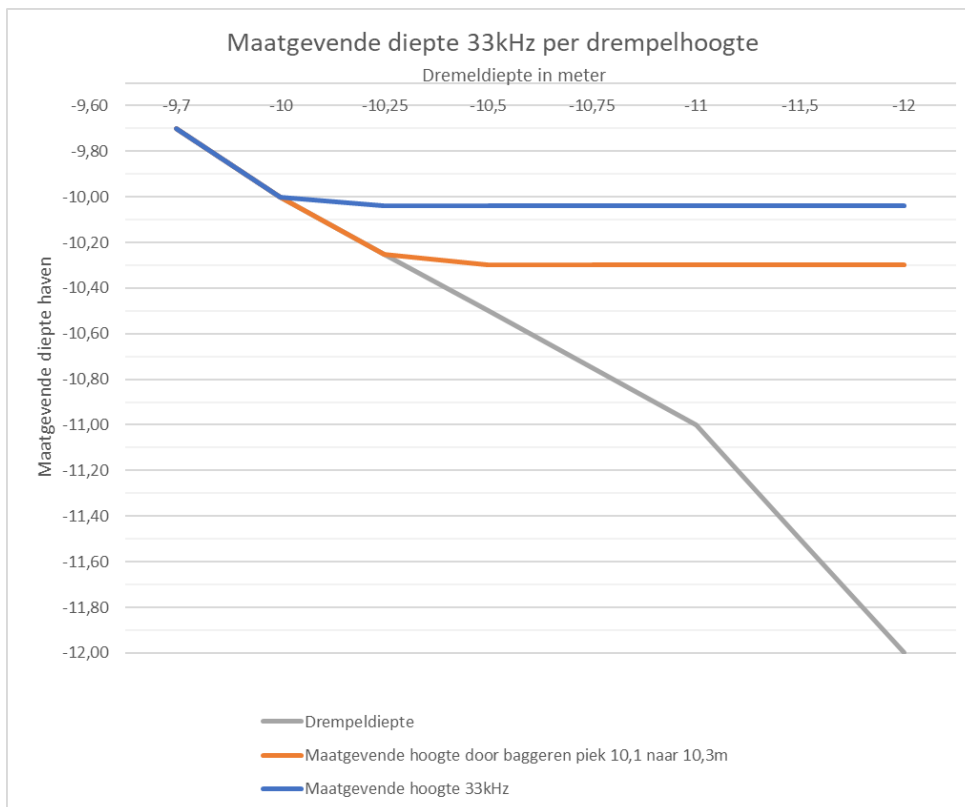
Tabel 9.2.5 Resultaten van inhoudsberekeningen uit Qinsy met de gegevens uit tabel 9.3.3, waarbij Fr groter blijft dan 1 tot aan 2000 meter.

Qinsy resultaten			Hoek bij Fr blijft groter dan 1 tot tenminste een x-waarde van 2000 meter					Resultaten b(in pdf-bestanden)			
Invoer Qinsy			Resultaten Qinsy			Vervolg berekeningen					
Ref. diepte	Afstand	Hoek	Topsliblaag bij S	Opp. Inhoudsberekening	Inhoud boven ref.	Hoogte driehoek gemeten	Hoogte driehoek	Inhoud driehoek	Inhoud afvoeren de sliblaag	Reductie wegens drempel	Inhoud afvoerende sliblaag
(m)	S (m)	graden	m	m2	m3	m	m	m3	m3	m3	m3
-10	1625	0,042	-8,8	285.416	226.774	1,2	1,19	171.250	55.525	-	55.525
-10,25	1750	0,042	-8,88	298.041	317.630	1,37	1,28	204.158	113.472	-	113.472
-10,5	1900	0,045	-9,03	311.779	415.433	1,47	1,49	229.158	186.275	-	186.275
-10,75	2075	0,047	-9,14	333.945	532.894	1,61	1,70	268.826	264.068	-	264.068
-11	2050	0,049	-9,09	331.995	611.700	1,91	1,75	317.055	294.645	-	294.645
-11,5	2175	0,054	-9,27	344.929	809.383	2,23	2,05	384.596	424.787	3.435	421.351
-12	1850	0,091	-9,07	313.880	885.810	2,93	2,94	459.834	425.976	23.461	402.515

Tabel 9.2.6 Resultaten van inhoudsberekening uit Qinsy met de gegevens uit tabel 9.3.4, waarbij Fr groter kleiner wordt dan 1 bij intersectie hoek van afstroming en top sliblaag.

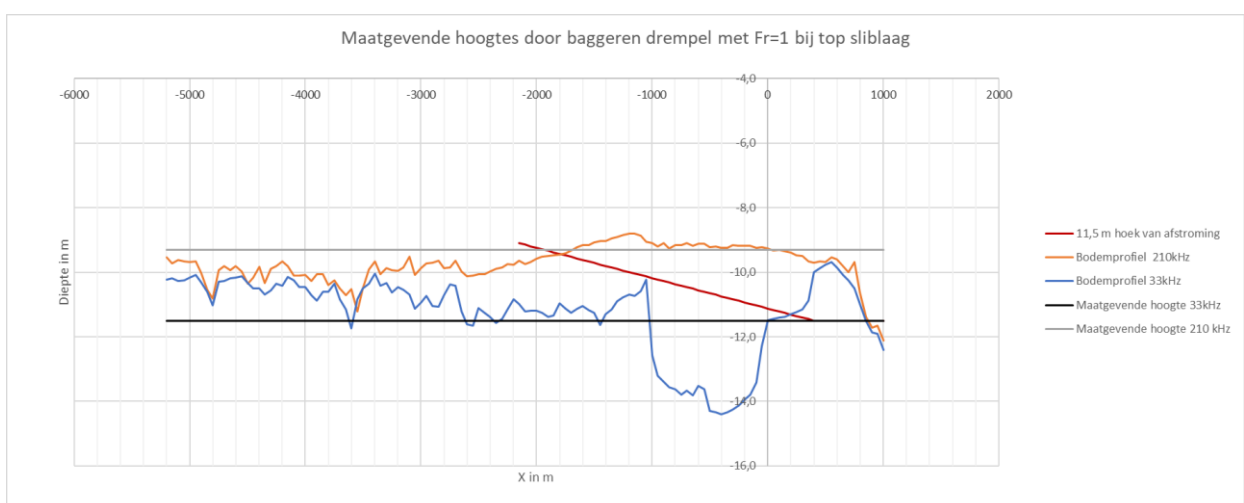
Maatgevende dieptes na verlaging drempel

Op het moment dat de KSN-methode (door het slib varen) wordt toegepast, zie paragraaf 5.5, wordt de drempeldiepte de maatgevende factor om de haven in te varen. Wanneer deze drempel wordt verlaagd heeft dit effect op de maximaal toelaatbare diepgang van schepen. Hieronder is een grafiek weergegeven van de maximaal toelaatbare diepte van de 33 kHz-meting per nieuwe drempeldiepte.

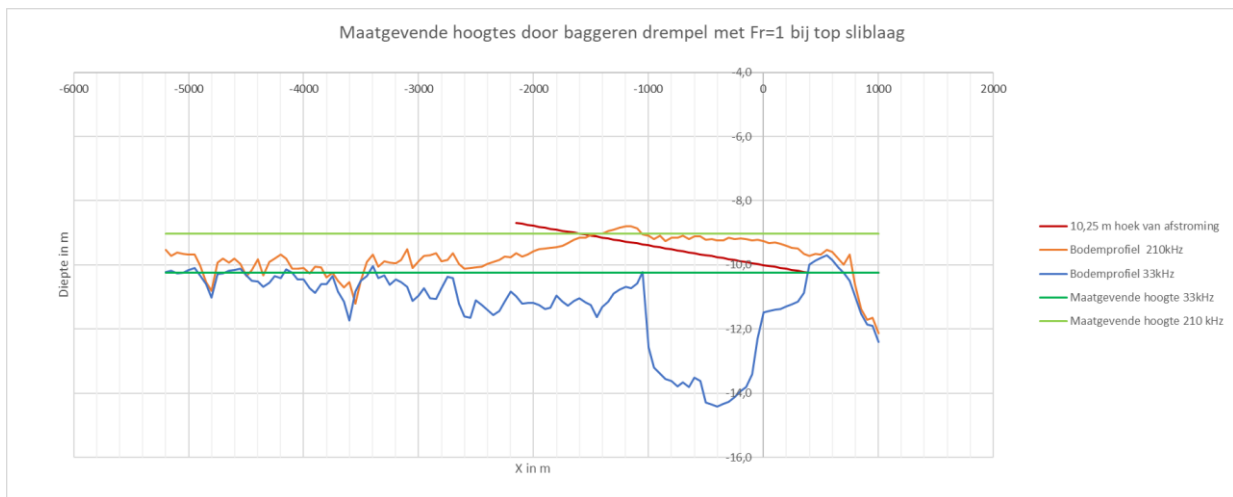


Figuur 9.2.1 Maatgevende 33 kHz dieptes van de haven van Delfzijl per drempeldieptes vanuit de alternatieven. De maatgevende 33kHz diepte wordt verlaagd wanneer de drempel (op dit moment maatgevend) wordt verlaagd, net zolang totdat het Zeehavenkanaal maatgevend wordt. (Zie ook schematisatie in figuren 9.2.2 en 9.3.3, waarin de onderste horizontale lijn aangeeft op welke diepte de drempel wordt gebaggerd en wat dit betekent ten opzichte van de rest van het Zeehavenkanaal).

De drempel bevindt zich in de huidige peilkaarten op een diepte van 9,7 meter onder NAP. Vervolgens neemt de diepte af door de slibvang. Na de slibvang is een gemiddelde maximale diepte van -10,3 met één piek van -10,1 meter. Dit zorgt ervoor dat als de drempel dieper wordt gebaggerd dan -10,3 dat niet de drempel maatgevend is maar de diepte in het Zeehavenkanaal zelf. Dit is geschematiseerd in figuren 9.2.2 en 9.2.3.

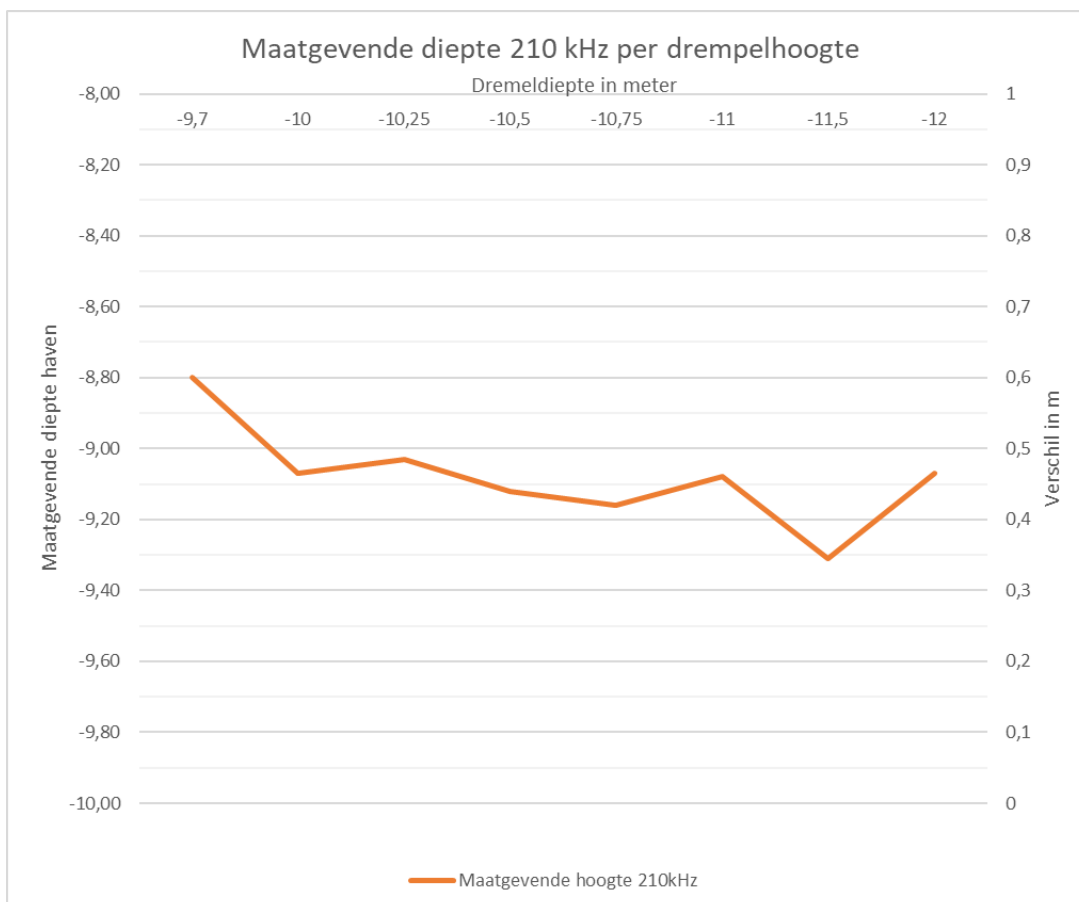


Figuur 9.2.2 Schematisering van op welke diepte de drempel (in dit geval 11,5 meter) wordt gebaggerd en de invloed daarvan op de rest van de 33 kHz meting van het Zeehavenkanaal. Tevens is hetzelfde principe weergegeven voor de verlaging in 210 kHz lijn en wat dit betekent voor de rest van de 210 kHz meting van het Zeehavenkanaal.



Figuur 9.2.3 Schematisering van op welke diepte de drempel (in dit geval 10,25 meter) wordt gebaggerd en de invloed daarvan op de rest van de 33 kHz meting van het Zeehavenkanaal. Tevens is hetzelfde principe weergegeven voor de verlaging in 210 kHz lijn en wat dit betekent voor de rest van de 210 kHz meting van het Zeehavenkanaal.

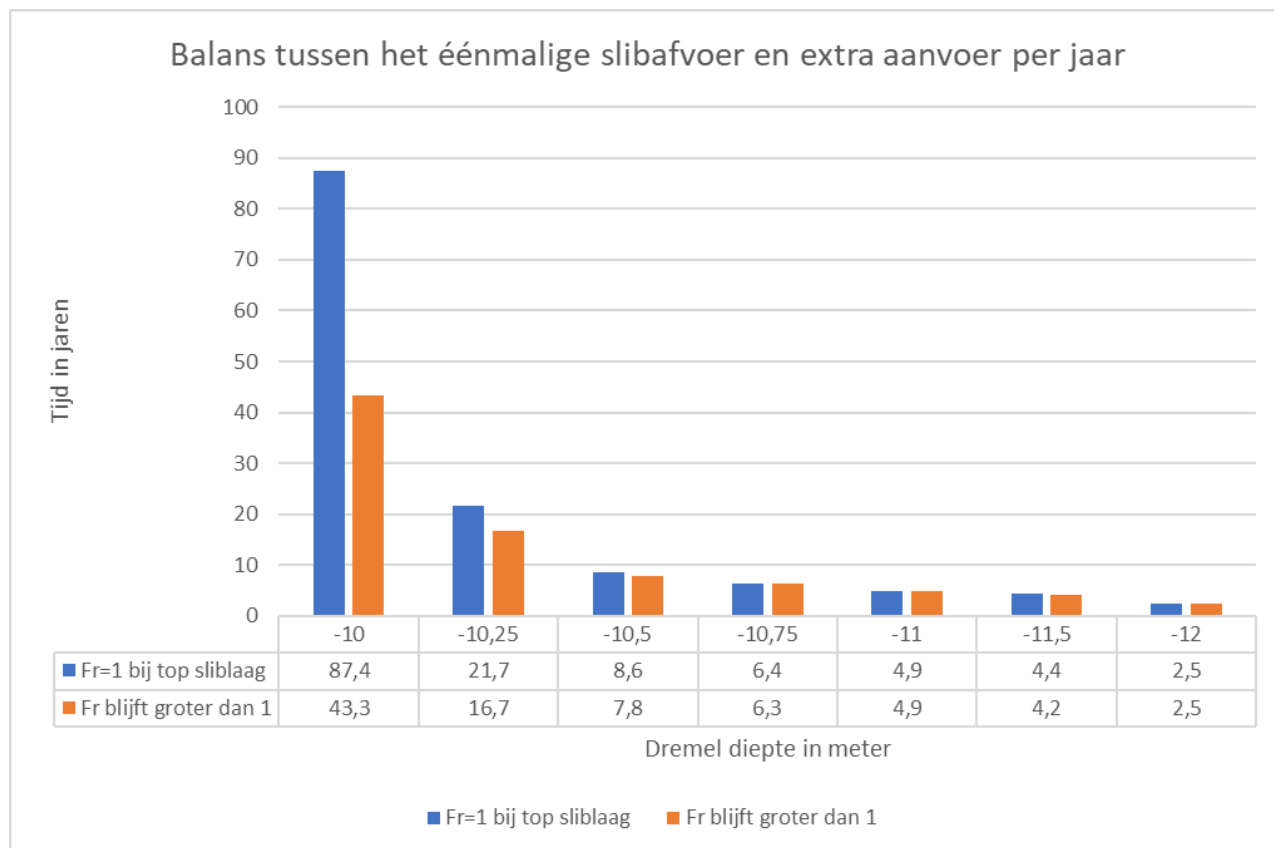
In de figuren 9.3.2 en 9.3.3 is te zien wat de verlaging van de drempel voor invloed heeft op de diepgang van het Zeehavenkanaal. In deze figuren is ook te zien dat de 210kHz-lijn (bovenkant sliblaag) gaat dalen wanneer de drempel wordt gebaggerd. De daling van de maatgevende 210 kHz ontstaat doordat de top van de 210 kHz gaat afvloeien. (Zie figuren 9.3.2 en 9.3.3 (het slib boven de rode lijn stroomt af)). De verandering in maatgevende diepte per drempeldiepte zijn in het onderstaande figuur weergegeven.



Figuur 9.2.2 Maatgevende 210 kHz dieptes van de haven van Delfzijl per drempeldieptes. Waarbij de maatgevende diepte wordt verlaagd door afschuiving van de vloeibare sliblaag (Zie schematisatie in figuur 9.3.2). Het slib boven de hoek van afstroming (rode lijn) stroomt af, waardoor de 210 kHz-lijn dieper wordt.

Vergelijk jaarlijkse aanslibbing en éénmalige afstroming

In onderstaande tabel wordt de vergelijking gemaakt tussen de jaarlijkse aanslibbing en de éénmalige afstroming:



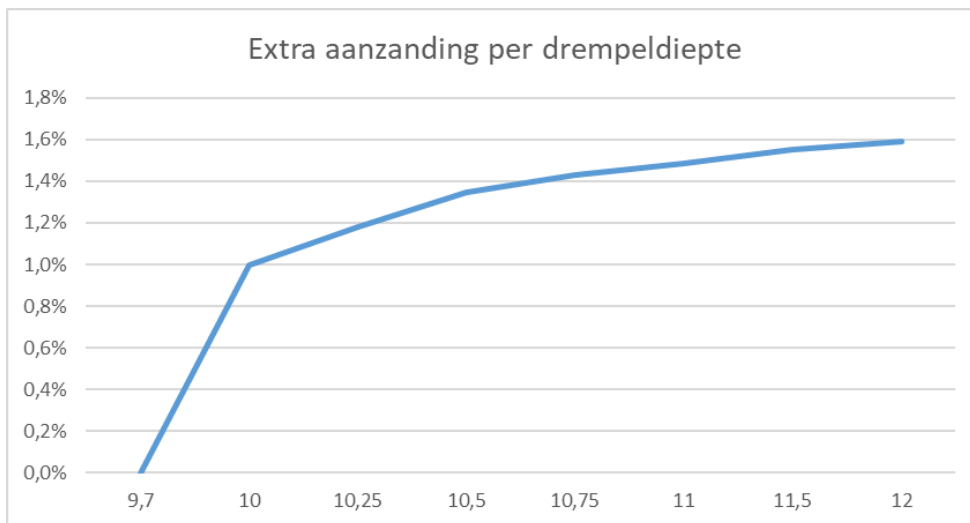
9.2.4 Extra aanzanding (door SEDTUBE-model)

De resultaten van het SEDTUBE-model zijn in onderstaande tabel weergegeven. De simulatie van de drempeldiepte van 9,7 meter wordt vergeleken met de gemiddelde stijging van de andere alternatieven. Het verschil in meter kan niet uitgedrukt worden in andere waarden. Om toch een goed vergelijk te krijgen is het verschil uitgedrukt in percentage ten opzichte van de drempeldiepte 9,7 meter.

Drempelhoogtes	Gemiddelde stijging	Vershil t.o.v. 9,7 m	Vershil t.o.v. 9,7 m
(m)	(m)	(m)	(%)
9,7	0,8399	-	0,000%
10	0,8483	0,0084	0,996%
10,25	0,8498	0,0099	1,179%
10,5	0,8513	0,0113	1,349%
10,75	0,8520	0,0120	1,432%
11	0,8524	0,0125	1,484%
11,5	0,8530	0,0130	1,554%
12	0,8533	0,0134	1,593%

Tabel 9.2.7 Resultaten vanuit het SEDTUBE-model met verschillende drempeldieptes.

In onderstaande grafiek is de toename van de aanzanding weergegeven:



Figuur 9.2.3 Resultaten uit het SEDTUBE-model waarbij de percentages t.o.v. van de aanzanding van de drempeldiepte 9,7 meter is vergeleken.

9.3 kosten

In deze paragraaf worden de kosten per toename/afname van sediment berekend. Dit wordt per alternatief gedaan en op basis van de berekeningen uit paragraaf 9.2.

9.3.1 Kosten verwijdering drempel

Om de kosten te berekenen per meter verlaging is het nodig om te weten hoeveel kuub er moet worden gebaggerd, de kosten van het baggerschip, de inhoud van de beun van het schip en de circulatietijd.

Aantal m³ in-situ en in beun

De te baggeren inhoud per drempeldiepte zijn bepaald in paragraaf 9.3.1. Dit dient te worden vermenigvuldigd met een factor 1,6 ter compensatie van de in-situ inhoud en de inhoud in de beun.

De kosten en beuninhoud van het baggerschip

De hoppers de Adelaar en de Amazone zijn de baggerschepen van Baggerbedrijf de Boer die het vaakst naar de haven van Delfzijl afreizen. De Adelaar is niet erg geschikt om de harde zandlaag weg te baggeren en daarom is gekozen om de specificaties en de prijs van de Amazone te gebruiken.

De Amazone is een hopper die per uur 1250 euro kost. Het schip heeft een totale beuninhoud van 2771 m³.

Cyclustijd

De cyclustijd wordt afgeleid van weekrapportages van de Amazone. In deze weekrapportage van week 14 (2019) is er een aantal keren gebaggerd op Paapsandsüd (de zanddrempel) en gestort in de slibvangtrog. In de cyclusrapportage is de beun ongeveer tot 1600 m³ gevuld wanneer het baggert op Paapsandsüd. De laadtijd om de beun te vullen is ongeveer 30 minuten en de reistijd van het storten is ongeveer 5 minuten en het duurt 5 min voordat het schip weer begint met baggeren. In totaal doet het schip er dus 40 minuten over om één cyclus te draaien.

Kostencalculatie

De kosten worden berekend door allereerst de inhoudsberekening per drempeldiepte te vermenigvuldigen met 1,6 om de m³ in de beun te berekenen. Deze waarde van het materiaal dat moet worden verscheept, moet worden gedeeld door de beuninhoud om het aantal cyclussen te berekenen. Vervolgens worden het aantal cyclussen vermenigvuldigd met de cyclustijd en met het aantal uur kunnen de kosten worden bepaald.

Diepte drempel	Verlaging in meters	Inhoud in m ³ -situ	Inhoud in m ³ -beun	Aantal cyclussen	Uren	Kosten in euro
10 m	0,3 m	27.929	44.686	28	19	23.375
10,25 m	0,55 m	46.666	74.666	47	31	39.000
10,5 m	0,8 m	67.965	108.744	68	45	56.750
10,75 m	1,05 m	89.681	143.490	90	60	74.750
11 m	1,3 m	115.161	184.258	115	77	96.000
11,5 m	1,8 m	402.814	644.502	403	269	335.750
12,0 m	2,3 m	624.739	999.582	625	417	520.750

Tabel 9.3.1 Berekening van het baggerbezwaar bij de verlagingen van de drempel. (Aantal cyclussen en uren zijn naar boven toe afgerond).

9.4.2 Extra kosten aanslibbing bij verlaging drempel

De aanslibbing wordt grotendeels verwijderd door de Airset. De Airset baggert 5.000 m³ per afgaand tij. Deze waarde is empirisch bepaald. De Airset kost per uur 500 euro. Het schip baggert alleen per afgaand tij en doet er een half uur over om naar de havenmonding te varen. Een getij duurt ongeveer 6 uur en 10 minuten. De Airset heeft een totale cyclustijd van 7 uur en 10 minuten.

Het aantal uur baggeren van de Airset wordt berekend door de extra aanslibbing te delen door 5.000 m³ (afvoerende materiaal per sessie) en deze vervolgens te vermenigvuldigen met de cyclustijd. Met deze uren en het uurtarief zijn de kosten te bepalen. Op de inhoud dat moet worden weggebaggerd met de Airset hoeft geen compensatie factor worden toegepast, omdat dit schip niet met een beun werkt.

Diepte drempel	Verlaging in meters	Aanslibbing	Aanslibbing t.o.v. 9,7m	t.o.v. 9.7m in %	Aantal sessies	Aantal uur	Extra kosten
9,7 m	0 m	1.356.383	-	-	-	-	-
10 m	0,3 m	1.357.665	1.283	0,09%	0,26	2	1.000
10,25 m	0,55 m	1.363.169	6.787	0,50%	1,40	11	5.500
10,5 m	0,8 m	1.380.389	24.006	1,77%	4,90	36	18.000
10,75 m	1,05 m	1.398.279	41.896	3,09%	8,40	61	30.500
11 m	1,3 m	1.416.830	60.447	4,46%	12,10	87	43.500
11,5 m	1,8 m	1.455.889	99.506	7,34%	20,00	144	72.000
12,0 m	2,3 m	1.519.584	163.201	12,03%	32,70	235	117.500

Tabel 9.3.2 Berekening van het baggerbezwaar door extra aanslibbing per verlaging van de drempel.

9.3.3 Reductie aan kosten door afvloeiing sliblaag

In het onderstaande tabel zijn de kosten berekend die nodig zou zijn geweest om net zoveel m³ slib uit de haven te verwijderen met de Airset als bij de afvloeiing van slib door het baggeren van de drempel. Doordat de sliblaag natuurlijk afstroomt na verdieping van de drempel hoeft de Airset dit slib 'niet' (zonder extra inspanning) te verwijderen. Om een waarde, in geld, uit te drukken wordt deze natuurlijke afstroming vergeleken met de kosten die het normaal zou kosten om dezelfde hoeveelheid slib uit de haven te verwijderen. Er wordt hierbij aangenomen dat de productie van de Airset hetzelfde blijft. Dit zou immers kunnen afnemen, doordat het materiaal steeds van dieper over de drempel moet worden verplaatst.

Drempel diepte	Inhoud afvoerende sliblaag	Aantal sessies	Aantal uur	Kosten	Reductie aan kosten
(m)	(m3)	-	-	(Euro)	(Euro)
-10	112.086	22,5	162	81.000	-81.000
-10,25	147.303	29,5	212	106.000	-106.000
-10,5	206.033	41,3	296	148.000	-148.000
-10,75	267.916	53,6	385	192.500	-192.500
-11	293.818	58,8	422	211.000	-211.000
-11,5	440.575	88,2	633	316.500	-316.500
-12	402.515	80,6	578	289.000	-289.000

Tabel 9.3.3 Berekening van de kosten die het bedraagt om onder normale omstandigheden (zonder het baggeren van de drempel) dezelfde hoeveelheid m³ te baggeren.

9.3.4 Kosten extra aanzanding

Het berekenen van kosten aan de extra aanzanding is niet mogelijk, omdat er geen inhoud kan worden gekoppeld aan de gemiddelde stijging op het dwarsprofiel. Wel blijkt dat de stijging in het dwarsprofiel niet nadrukkelijk toeneemt en zal afvlakken naarmate de zanddrempel dieper wordt gebaggerd. Hoogstwaarschijnlijk zal de Airset met alle drempeldieptes instaat zijn om de drempel op diepte te houden. Echter kan dit niet worden geconcludeerd, doordat de koppeling tussen inhoudstoename en verticale toename in het dwarsprofiel niet gemaakt kon worden tijdens de praktijkproef.

Hoofdstuk 10: Multi Criteria Analyse

In dit hoofdstuk wordt gebruik gemaakt van een Multi Criteria Analyse (MCA) om een keuze te maken welke drempeldiepte het best is aan te bevelen. De reden voor deze analyse is dat er verschillende aspecten van belang zijn die moeilijk met elkaar te vergelijken zijn. Denk hierbij bijvoorbeeld aan maatgevende havendiepte, afnemende baggerkosten of verwijdering van slib. Dit hoofdstuk bevat de volgende punten:

- Methode MCA;
- Opzet MCA;
- Uitvoering MCA.

10.1 Methode MCA

De multi criteria analyse is een tool om gestructureerd beslissingen te nemen en op deze manier tot het beste besluit (in dit geval advies) te komen. Allerlei factoren worden met elkaar vergeleken en beoordeeld. De MCA zorgt ervoor dat deze vergelijking en beoordeling overzichtelijk en duidelijk is. Een MCA is in staat om criteria die moeilijk of zelfs conflicterend zijn te vergelijken. Dit doet de MCA door alle gegevens te standaardiseren. Dit wil zeggen dat waarden op dezelfde manier/ in dezelfde eenheid worden weergegeven. Tevens wordt er per criteria gewicht toegekend, om het onderscheid in belang te belichten. De resultaten kunnen vervolgens worden geanalyseerd en een advies kan worden gegeven. Stapsgewijs bestaat de MCA uit de volgende stappen:

1. Formuleren van groepen criteria;
2. Determinatie van scores per alternatieven;
3. Standaardisatie van alle gegeven scores per criteria;
4. Gewichtstoekenning aan groepen criteria;
5. Vergelijk/ranking van alle resultaten.

10.2 Opzet MCA

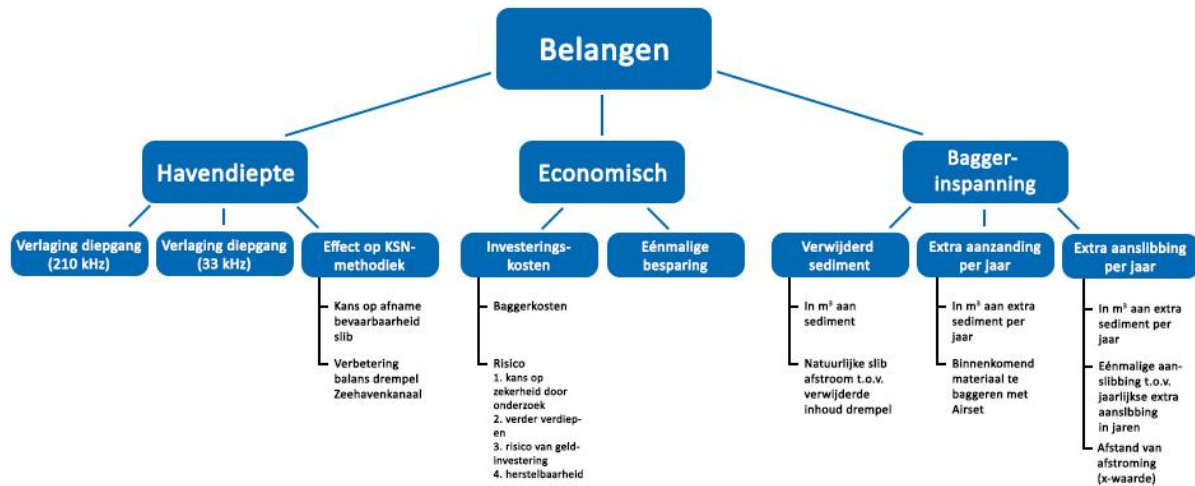
In dit hoofdstuk wordt de MCA stapsgewijs opgezet. Dit bevat het formuleren van groepen criteria en daarbij subcriteria die van belang zijn voor het uiteindelijke doel. Het doel van de MCA is om tot een keuze te komen van het beste alternatief. De resultaten en conclusies worden vervolgens meegenomen in het adviesrapport. De MCA geeft antwoord op de vragen: “Moet de zanddrempel dieper worden gebaggerd?” en zo ja, “Op welke drempeldiepte moet de zanddrempel worden gebaggerd?”.

Uit deze vragen kunnen we concluderen wat de alternatieven zijn, namelijk de bestaande situatie behouden of de drempelhoogtes uit paragraaf 9.2. De volgende alternatieven worden dus belicht in de MCA:

- 9.7 meter;
- 10 meter;
- 10,25 meter;
- 10,5 meter;
- 10,75 meter;
- 11 meter;
- 11,5 meter;
- 12 meter.

De belangen om de drempel te verlagen (of juist niet) zijn gedetermineerd in de onderstaande belangenboom. Hierbij zijn er drie grote factoren gekoppeld aan het belang: de havendiepte, de

baggerinspanning en de economische aspecten. Van elk van deze criteria zijn sub-factoren gespecificeerd. (Zie figuur 10.2.1). De belangenboom zorgt voor structuur in de factoren. Door het maken van de belangenboom werden eerder opgestelde factoren verwijderd, aangepast en samengevoegd.



Figuur 10.2.1 De belangenboom van de MCA. Waarbij alle factoren en sub-factoren zijn weergegeven die een rol spelen van de MCA voor de verlaging van de zanddrempel.

In de onderstaande paragrafen zijn de drie factoren: Havendiepte, baggerinspanning en economische aspecten nader toegelicht. Tevens zijn de subcriteria's en het belang daarvan beschreven.

10.2.1 Havendiepte

De criteria havendiepte wordt meegenomen in de analyse, omdat dit een belangrijk onderdeel is van de haven. Een diepere havendiepte kan ervoor zorgen dat de haven economisch wordt gestimuleerd, doordat schepen met een grotere diepgang en tij gebonden schepen beter de haven kunnen binnenvaren.

De invloed op de havendiepte bestaat uit het verlagen van de maatgevende diepte van de 210 kHz en 33 kHz. Waarbij 210 kHz de belangrijkste rol speelt met de huidige situatie en de 33 kHz een belangrijke rol speelt wanneer de KSN-methode (door het slib varen) wordt toegepast. Een verandering in drempelhoogte kan een positief en negatief effect hebben op de KSN-methode. Aan de ene kant is dit de havenfactor (positief, zie paragraaf 5.4.3) en aan de andere kant is dat de invloed van afstroming van de vloeibare (meestal doorvaarbare) sliblaag.

10.2.2 Economische aspecten

Economische aspecten zoals investeringskosten, risico's en oplevering zijn van belang om de alternatieven te onderscheiden. Hierdoor gaat het niet alleen om de investeringskosten die nodig zijn om het alternatief te realiseren, maar ook om de risico's die per alternatief worden genomen.

Het onderzoek kent enige onzekerheid en aannames, waardoor de risico's van belang zijn. Om deze reden is het risico per drempelverdieping onderverdeeld in de volgende punten:

- Kans op meer zekerheid na onderzoek;
- Verder verdiepen (zodat er eerst kan worden nagegaan wat de effecten van een drempelverlaging zijn);
- Risico in de grote van het investeringsbedrag;
- Kans op herstelbaarheid.

Verder is het ook van belang wat er wordt bereikt met de investering, daarom is het aantal m³ aan slib materiaal dat éénmalig afstroomt verrekend met de kosten die normaal gesproken nodig waren om hetzelfde materiaal te verwijderen. Deze reductie in kosten wordt vervolgens vergeleken met de investeringskosten.

10.2.3 Baggerinspanning

Baggerinspanning is van belang omdat dit de kosten van de haven kan beïnvloeden. Hierbij dient ook het lange termijneffect meegenomen te worden. Om deze redenen worden de criteria extra aanzanding en aanslibbing per jaar meegenomen in de analyse. Bij deze criteria wordt de extra verhoging in baggerintensiteit vergeleken met de inhoud die jaarlijks extra zal sedimenteren. Voor het zand geldt dat het belangrijk is om te weten of de zanddrempel met de Airset op een constante diepte te houden is. De aanslibbing wordt vergeleken met de jaren die het kost om in balans te komen met de éénmalige afstroming van slib en wordt de x-waarde vergeleken. De x-waarde (tot hoever het slib afstroomt) is van belang, wanneer de natuurlijke afstroming van slib behouden blijft. Tevens worden de éénmalige bagger afstroming in de MCA toegevoegd.

10.3 Uitvoering MCA

In deze paragraaf wordt de MCA verder uitgevoerd. Zo worden de scores bepaald van iedere subcriteria en worden deze gestandaardiseerd en gewogen.

10.3.1 Scores

In onderstaande tabel zijn de scores weergegeven:

Alternatieven	Havendiepte				Economische belang			Baggerinspanning						
Drempeldiepte	210 kHz verlaging	33 kHz verlaging	Effect op KSN-methodiek		Investeringskosten		Eenmalige besparing	Verwijderd sediment		Extra aanzanding per jaar		Extra aanslibbing per jaar		
			Bevaarbaarheids afname	Verbetering havenfactor	Baggerkosten	Risico		Aantal m3	Natuurlijke afstroming t.o.v. gebaggerde m3	Aantal %	Airset	Aantal m3	Jaren	X-waarde
9,7	0	0	10	2,5	0	5,45	0	0	9,00	0	Ja	0	100	1050
10	0,27	0,3	9	5	23375	8,36	57625	140015	10,00	0,996	Ja	1283	87,4	1450
10,25	0,23	0,55	9	7,5	39000	8,45	67000	193969	9,46	1,179	Ja	6787	21,7	1500
10,5	0,32	0,6	8	10	56750	8,36	91250	273998	9,38	1,349	Ja	24006	8,6	1575
10,75	0,36	0,6	8	10	74750	6,55	117750	357597	9,38	1,432	Ja	41896	6,4	1725
11	0,28	0,6	9	10	96000	4,73	115000	408979	8,92	1,484	Ja	60477	4,9	1700
11,5	0,51	0,6	7	10	335750	2,55	-19250	843389	4,92	1,554	Ja	99506	4,4	1800
12	0,27	0,6	9	10	520750	0,82	-231750	1027254	0,00	1,593	Ja	2E+05	2,5	1450

Tabel 10.3.1 Tabel van de MCA met alle scores per subcriteria.

10.3.2 Standaardisatie en wegingen

Standaardisatie

De standaardisatie van de groepen wordt uitgevoerd door de maximum score een waarde van 1 te geven en de minimum score een waarde van 0. De tussenresultaten worden vervolgens lineair op een schaal van 0 tot 1 bepaald. Dit lijkt onredelijk wanneer bijvoorbeeld de verlaging van de 210 kHz laag tussen de 8 cm en 20 cm ligt, maar er in werkelijkheid een verlaging van 1 meter wordt verlangd. Bij deze gevallen wordt dit meegenomen in de weging die wordt toegekend aan elke groep criteria en subcriteria's. Het gaat bij het geven van de weging dan ook om het verschil in de scores, naast de factor hoe belangrijk de criteria is voor het resultaat.

Alternatieven	Havendiepte				Economische belang			Baggerinspanning						
Drempeldiepte	210 kHz verlaging	33 kHz verlaging	Effect op KSN-methodiek		Investeringskosten		Eenmalige besparing	Verwijderd sediment		Extra aanzanding per jaar		Extra aanslibbing per jaar		
			Bevaarbaarheids afname	Verbetering havenfactor	Baggerkosten	Risico		Aantal m3	Natuurlijke afstroming t.o.v. gebaggerde m3	Aantal %	Airset	Aantal m3	Jaren	X-waarde
9,7	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,61	0,66	0,00	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
10	0,53	0,50	0,67	0,33	0,96	0,99	0,83	0,14	1,00	0,37	1,00	0,99	0,87	0,53
10,25	0,45	0,92	0,67	0,67	0,93	1,00	0,85	0,19	0,95	0,26	1,00	0,96	0,20	0,60
10,5	0,63	1,00	0,33	1,00	0,89	0,99	0,92	0,27	0,94	0,15	1,00	0,85	0,06	0,70
10,75	0,71	1,00	0,33	1,00	0,86	0,75	1,00	0,35	0,94	0,10	1,00	0,74	0,04	0,90
11	0,55	1,00	0,67	1,00	0,82	0,51	0,99	0,40	0,89	0,07	1,00	0,63	0,02	0,87
11,5	1,00	1,00	0,00	1,00	0,36	0,23	0,61	0,82	0,49	0,02	1,00	0,39	0,02	1,00
12	0,53	1,00	0,67	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,53

Tabel 10.3.1 Tabel van de MCA met daarin gestandaardiseerde scores per subcriteria.

Weging

De weging van het totale belang bestaat uit havendiepte (40%), economische aspecten (40%) en baggerinspanning (20%). Het economisch belang en het belang van het vergroten van de havendiepte hebben meer invloed dan de baggerinspanning. Dit omdat het meer van belang is om de haven economisch te stimuleren. Dit in tegenstelling tot het meer moeten baggeren tegen hoge baggerkosten.

Havendiepte		
40%		
Verlaging diepgang (210 kHz)	Verlaging diepgang (33 kHz)	Effect op KSN-methodiek
60%	35%	5%
		Kans op afname bevaarbaarheid
		Verbetering balans drempel en zeehavenkanaal
		75%
		25%

Tabel 10.3.2 Tabel waarin de wegingen van de subcriteria's van de havendiepte zijn weergegeven.

In het bovenstaande figuur zijn de subcriteria's van de factor havendiepte uitgewerkt. De verlaging van de 210 kHz wordt het zwaarst gewogen, omdat dit op het moment wordt gebruikt als de maatgevende diepte. Dit belang wordt iets afgevlakt doordat de range van de waarden bij elkaar liggen en in de praktijk een nog diepere verlaging mogelijk is.

Daarna komt de verlaging van de 33kHz-diepgang die niet geheel onbelangrijk is. Vooral wanneer er gebruik wordt gemaakt van de toepassing van de KSN-methodiek. Alleen wordt deze toepassing nog niet gebruikt waardoor deze niet zo zwaar weegt als de verlaging van de 210 kHz diepte.

Dat de KSN-methode nog niet toegepast wordt geldt ook voor de weging van het effect op de KSN-methodiek. Bovendien wordt dit effect afgevlakt doordat deze gegevens niet worden onderzocht en dat het bestaat uit een kans. Het effect op de KSN-methodiek wordt vervolgens onderverdeeld in de kans op afname bevaarbaarheid en de verbetering tussen balans drempel en zeehavenkanaal. Waarbij de kans op afname bevaarbaarheid, oftewel minder goede KSN-mogelijkheid, groter weegt.

Economische aspecten				
40%				
Investeringskosten				Eénmalige besparing
70%				30%
Baggerkosten	Risico			
50%	50%			
	Kans op zekerheid door onderzoek	Verder verdiepen	Risico van geld investering	Herstelbaarheid
	50%	10%	30%	20%

Tabel 10.3.3 Tabel waarin de wegingen van de subcriteria's van de economische aspecten zijn weergegeven.

De economische aspecten bestaan uit de investeringskosten en de éénmalige besparing, waarin de subcriteria investeringskosten zwaarder weegt. Dit is namelijk belangrijk voor het draagvlak om de drempelverlaging uiteindelijk uit te voeren. De eenmalige besparing is overigens relatief en het zal dus geen kosten opleveren, maar een besparing zijn. De investeringskosten bestaat uit de baggerkosten en het risico, die beide 50/50 wegen. Het risico wordt onderverdeeld in vier onderdelen die hieronder zijn opgesomd. (Zie ook tabel 10.3.3).

- Kans op zekerheid (zware weging wegens bevestiging van onderzoeksresultaten door mogelijkheid tot onderzoek);
- Risico van geld investering (bij een grotere drempeldiepte (hogere uitvoeringskosten) zal de impact wanneer het niet werkt groter zijn. Om deze reden wordt hiervoor ook een redelijke weging aangenomen);
- Verder verdiepen en herstelbaarheid tellen minder zwaar mee.

Baggerinspanning						
20%						
Verwijderd sediment		Extra aanzanding per jaar		Extra aanslibbing per jaar		
20%		15%		65%		
In m3 aan sediment	Natuurlijke slib afstroom	In % aan sediment per jaar	Binnenkomend materiaal te baggeren met Airset	In m3 aan sediment per jaar	Eénmalige afstroming t.o.v. jaarlijkse aanslibbing	Afstand van afstroming (x-waarde)
50%	50%	50%	50%	50%	35%	15%

Tabel 10.3.4 Tabel waarin de wegingen van de subcriteria's van de baggerinspanning zijn weergegeven.

De baggerinspanning bestaat uit verwijderd sediment, extra aanzanding en extra aanslibbing per jaar. Door een groot bereik bij de extra aanslibbing en het sterke belang op de baggerinspanning heeft deze criteria een zware weging. De extra aanslibbing per jaar geeft namelijk aan hoelang de voordelen van de drempelverlaging werken. In deze subcriteria is het aantal m3 per jaar aan extra sediment belangrijk en in iets mindere mate ook de toename per jaar t.o.v. de éénmalige afstroming. De afstand van afstroming is minder van belang, omdat het niet zeker is of de afstroming van slib zou blijven ontstaan.

De subcriteria verwijderd sediment heeft geen direct effect op het verlagen van de baggerkosten of havendiepte en kent daarom een minder belang. Deze subcriteria is onderverdeeld in twee criteria's die beide even zwaar wegen.

De extra aanzanding per jaar is minder van belang. Uit de praktijkproef is gebleken dat er geen aanzanding plaatsvindt. Echter wijzen theorieën en praktijkervaring erop dat er degelijk aanzanding plaatsvindt. Daarom wordt dit toch meegewogen. De range van de extra aanzanding is erg klein en het is belangrijk of de extra aanzanding kan worden verwijderd met enkel de Airset (om de baggerinspanning gelijk te houden). Daarom zijn deze twee aan elkaar gelijk in de weging.

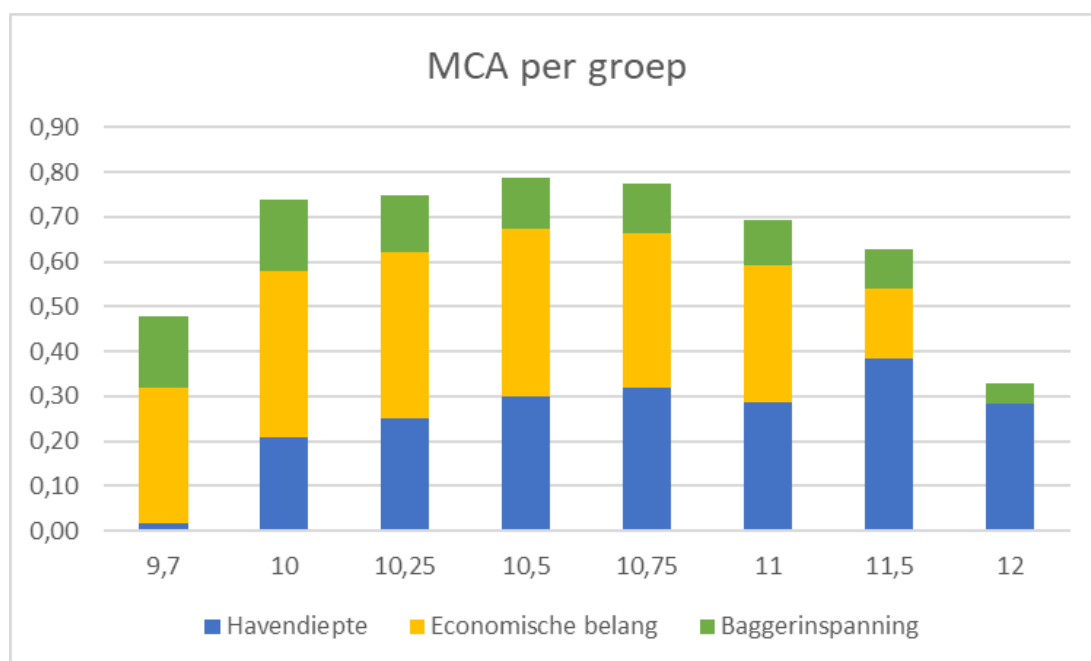
10.3.4 resultaten

Wanneer alle scores worden omgerekend met hun weging zijn de resultaten als volgt:

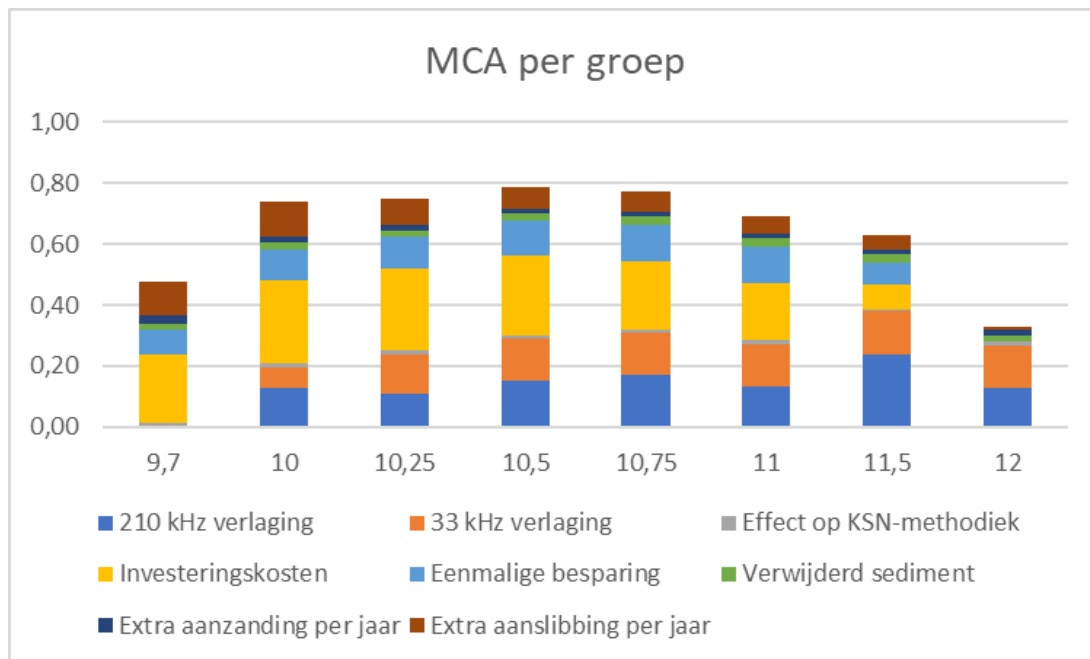
Alternatieven	Havendiepte			Economische belang		Baggerinspanning		
Drempeldiepte	210 kHz verlagings	33 kHz verlagings	Effect op KSN-methodiek	Investeringskosten	Eenmalige besparing	Verwijderd sediment	Extra aanzanding per jaar	Extra aanslibbing per jaar
9,7	0,00	0,00	0,02	0,23	0,08	0,02	0,03	0,11
10	0,13	0,07	0,01	0,27	0,10	0,02	0,02	0,11
10,25	0,11	0,13	0,01	0,27	0,10	0,02	0,02	0,08
10,5	0,15	0,14	0,01	0,26	0,11	0,02	0,02	0,07
10,75	0,17	0,14	0,01	0,22	0,12	0,03	0,02	0,07
11	0,13	0,14	0,02	0,19	0,12	0,03	0,02	0,06
11,5	0,24	0,14	0,01	0,08	0,07	0,03	0,02	0,05
12	0,13	0,14	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,01

Tabel 10.3.5 Tabel waarin bepaalde subcriteria's zijn gegroepeerd.

De uitkomsten uit tabel 10.3.5 levert de volgende grafieken (10.3.1 en 10.3.2) op:



Figuur 10.3.1 Figuur met de eindresultaten van de MCA waarin de criteria's havendiepte, economische aspecten en de baggerinspanning met elkaar worden vergeleken.



Figuur 10.3.2 Figuur met de eindresultaten van de MCA waarin alle subcriteria's met elkaar worden vergeleken.

10.3.5 Analyse

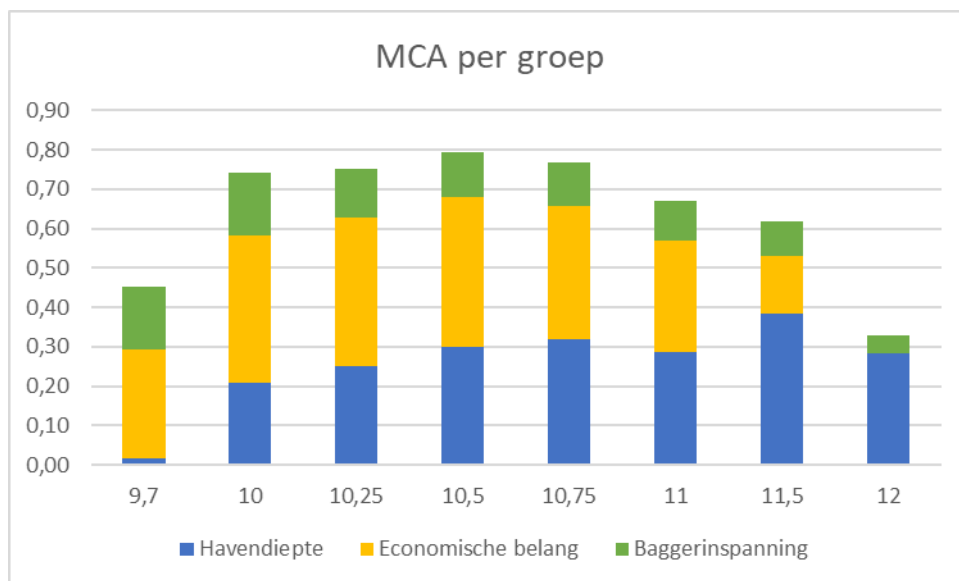
Uit de resultaten van de MCA blijkt dat een drempeldiepte van 10,5 meter de beste keuze is. Echter liggen de resultaten van de alternatieven tussen de 10 en 10,75 meter dicht bij elkaar. Wel is goed te zien dat het verlagen van de drempel wel degelijk van belang is, doordat de waarde van het behouden van de bestaande situatie lager is dan het verlagen van de drempeldieptes. Het alternatief van 12 meter valt in negatieve zin op en is dus niet aan te raden.

Het onderscheid dat de 10,5 meter drempeldiepte beter is dan de overige drempeldieptes die ook een hoge waarde hebben, zit hem voornamelijk in de balans. Zo scoort de 10,5 meter drempeldiepte hoog op de criteria havendiepte t.o.v. van de drempeldieptes 10m en 10,25m. Daarentegen scoort de 10,5 meter drempeldiepte goed met betrekking tot het economische belang t.o.v. de drempeldiepte 10,75 meter.

Wanneer meer zekerheid wordt vereist voor de effecten van de drempelverlaging is het misschien beter om allereerst de 10 m uit te voeren om vervolgens de effecten van de drempelverlaging te analyseren.

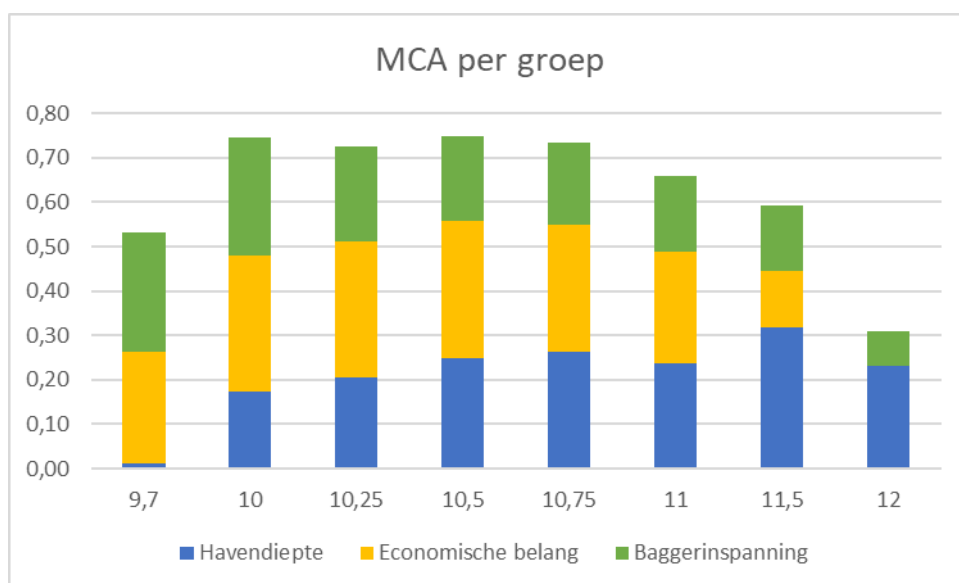
10.3.6 Gevoeligheidsanalyse

Wanneer de risico's van het onderzoek en betrouwbaarheid van het onderzoek een zwaardere rol wegen, dan volgt de onderstaande grafiek. In deze grafiek is de weging van risico en investeringskosten anders beoordeeld. Hierin is voor risico de waarde 75% genomen en voor investeringskosten 25%. In deze situatie is de 10,5 meter drempeldiepte nog steeds de beste optie.



Figuur 10.3.3 Resultaten van de gevoeligheidsanalyse van de MCA wanneer de subcriteria risico bij investeringskosten met 25% wordt verhoogd.

Figuur 10.3.4 geeft de analyse weer wanneer de drie criteria's een gelijke waarde kennen. Dit is bijvoorbeeld mogelijk wanneer duurzaamheid en co² uitstoot een grotere factor hebben. In deze resultaten komt naar voren dat de drempelhoogte van 10 meter de beste oplossing is.



Figuur 10.3.4 Resultaten van de gevoeligheidsanalyse van de MCA wanneer de drie criteria's havendiepte, economische aspecten en baggerinspanning gelijk aan elkaar worden gesteld.

Hoofdstuk 11: Conclusie

De onderzoeksvraag die gesteld is in dit onderzoek luidt: **“Wat zijn de technische - en economische gevolgen van het veranderen van de afmeting van de zanddrempel op de slibafvoer in het havenkanaal van de haven van Delfzijl?”**. Op basis van de onderzoeksresultaten is het antwoord geformuleerd en dat wordt nader beschreven in dit hoofdstuk. Allereerst worden de volgende conclusies getrokken.

- Eénmalige afstroming van het slibmateriaal vindt plaats wanneer de drempel wordt verlaagd. Deze afstroming vindt plaats door middel van een dichtheidsstroom die opgewekt wordt door de injectie van de Airset. Door injectie van de Airset krijgt het slib aan het einde van het Zeehavenkanaal een lagere dichtheid en stroomt het slib verderop in de haven (ongeveer ter hoogte van het begin van de slibvang), met een hogere dichtheid, naar het einde van het Zeehavenkanaal. Dit blijkt uit de resultaten van de praktijkproef: ‘Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone’. (Zie paragraaf 7.1)
- Voortbordurend op deze methode is met het TCMUD-model berekend dat er meer slib afstroomt naarmate de drempel dieper wordt gebaggerd. Tevens zal het slib van verderop in de haven afstromen dan dat bij de praktijkproef is ondervonden. De kwantiteit van de éénmalige afstroming is variabel, maar bevindt zich in een bereik van 110.000 m³ tot 440.000 m³. Overigens blijkt uit de modellering dat te diep baggeren van de drempel voor een reductie van het afvloeiende slib zorgt.
- Uit de modellering blijkt dat door de afstromingshoek de top van de sliblaag (gemeten met de 210kHz-peilingen) wordt gereduceerd, door middel van het baggeren van de drempel. Hierdoor zal de maatgevende diepte van de haven worden vergroot. Uit analyse van het bodemprofiel van de haven blijkt dat de havendiepte van de vaste bodem door middel van het baggeren van de drempel ook dieper wordt bij drempelverlagingen. Dit heeft een positieve invloed op de KSN-methode (door het slibvaren), want bij het toepassen van deze methode zal de drempeldiepte maatgevend worden. Bij verlaging van de drempel in combinatie met de KSN-methode wordt een optimale havendiepte bereikt.
- Met behulp van het SILTHAR-model is berekend hoeveel extra slib er binnenkomt wanneer de drempel wordt verlaagd. De hoeveelheid extra slib wordt snel hoger naarmate de drempel dieper wordt gebaggerd. Deze extra aanslibbing ligt in het bereik van 1.000 m³/jaar tot 163.000 m³/jaar. Uit het vergelijk van de jaarlijkse extra aanslibbing en de éénmalige uitstroming van slib blijkt dat de extra aanslibbing sneller evenveel wordt als de éénmalige uitstroming naarmate de drempel dieper wordt gebaggerd.
- Uit de resultaten van het SEDTUBE-model, het model die de extra aanzanding berekend, blijkt dat de extra aanzanding afvlakt naarmate de drempel dieper wordt gebaggerd. Met andere woorden zal de hoeveelheid extra aanslibbing ten opzichte van de voorgaande drempelhoogtes steeds minder zijn. De dwarsprofielen op verschillende drempelhoogtes na een jaar lang aanzanding veranderen niet veel.
- De verwijdering van de drempel kost tussen de 25.000 euro en 500.000 euro, waarbij er meer sediment moet worden weggehaald en dus de kosten hoger zijn naarmate er dieper wordt gebaggerd.
- Uit de multi criteria analyse blijkt dat de drempeldiepte van 10,5 meter het beste alternatief is, om de beste effecten te hebben op de factoren havendiepte, baggerinspanning en economische aspecten. Overigens blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat wanneer duurzaamheid (inherent aan baggerinspanning) een belangrijkere factor kent de drempeldiepte van 10 meter het beste alternatief is.

Bij een drempeldiepte van 10,5 meter is de éénmalige afstroming van de vloeibare sliblaag ongeveer 274.000 m³. De jaarlijkse extra aanslibbing bedraagt ongeveer 24.000 m³.

Concluderend, kan worden gesteld dat de verlaging van de zanddrempel een positief effect heeft, wanneer de juiste balans wordt toegepast. Het positieve effect is dat het slib éénmalig uit de haven stroomt onder invloed van dezelfde baggerinspanning. Echter neemt deze baggerinspanning toe doordat de drempel dieper wordt gebaggerd. De drempelverlaging heeft geen groot effect op de extra aanzanding.

Economisch zou de haven worden gestimuleerd, wanneer de drempel dieper wordt gebaggerd. Hierdoor neemt de diepgang van het Zeehavenkanaal toe. Daar komt bij dat het slib natuurlijk afstroomt bij verlaging van de drempel en daarbij geen toename van de baggerinspanning op de sliblaag nodig hoeft te zijn. Deze inspanning zal echter wel plaats vinden op de drempel.

Hoofdstuk 12: Discussie

De validiteit van het onderzoek wordt door sommige keuzes en beperkte mogelijkheden veranderd. Zo zijn sommige parameters die zijn gebruikt voor dit onderzoek niet in de praktijk gemeten en uit literatuuronderzoek gevonden. De parameterspecificatie bevat daarom niet altijd de exacte waarden uit de praktijksituatie. Echter door voornamelijk de korte duur van de afstudeerperiode, maar ook het budget, zat een uitgebreid praktijkonderzoek er niet in. Vaak zijn parameters in de waterbodem onderhevig aan sterke verschillen, waardoor er altijd een range is waarin de waarden zich bevinden.

De modelleringen die zijn gebruikt omschrijven voornamelijk een indicatie van de waarden en het proces. Er zijn andere modellen beschikbaar die nog specifieker dit probleem kunnen oplossen en analyseren. Alleen was hier geen tijd voor in de afstudeerperiode, geen budget en waren de skills te hoog om deze te kunnen leren in deze afstudeerperiode. De gebruikte modelleringen worden gebruikt door onderzoekers van verschillende instanties om tot de eerste principes te komen en bevatten de complexere modellen vaak ongeveer dezelfde berekeningen, maar dan in een 3D-situatie.

De betrouwbaarheid van dit onderzoek is hoog, omdat met dezelfde methodologie dezelfde uitkomsten worden bereikt. Echter met nieuwe inzichten en verbetering van parameters, door middel van praktijkonderzoek, zullen andere waarden worden gevonden. Naar verwachting zal dit geen dusdanig groot effect hebben op de uiteindelijke conclusies.

De resultaten van het onderzoek over de éénmalige afstroming van het slib en de extra aanslibbing zijn naar verwachting van het literatuuronderzoek en de hypothesen van professionals. Met het onderzoek is verdere inzicht gegeven in de effecten van het baggeren van de drempel. Het literatuuronderzoek diende hierbij om de basiskennis en principes te leren kennen.

De praktijkproef: 'Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone' zorgt voor betrouwbaarheid van het onderzoek. Het gaf aan dat het vloeibare slib in de werkelijke situatie bij verlaging van de drempel natuurlijk afstroomt. Deze proef leidde tot inzicht dat het TCMUD-model anders geïnterpreteerd moest worden. Ook kon hierop het model worden gekalibreerd. Dit was anders bij de proef die de aanzanding over een bepaalde tijd moest bepalen. De resultaten van deze proef lagen niet in de verwachting van de uitkomsten. Mogelijke oorzaken zijn het onstuimige weer en de korte tijdsperiode waarover de meting is uitgevoerd. Hierdoor kon de koppeling tussen gemiddelde stijging en een inhoud niet worden bepaald. Dit leidde ertoe dat het SEDTUBE-model niet de aanzanding in inhoud kon bepalen en op basis van de werkelijkheid kon worden gekalibreerd. Wel kon het principe en het effect van de verlaging worden nagebootst met het model, door middel van een kalibratie van de bevindingen van onderzoekers en ervaringsdeskundigen. De extra aanzanding die wordt berekend met het model blijkt niet veel te zijn en af te vlakken, waardoor deze tekortkoming minder zwaar weegt.

De combinatie tussen de KSN-methodiek en principe achter het verlagen van de drempel zou een positief effect op elkaar kunnen hebben. Hierdoor is er mogelijk meer draagvlak om de drempel te verlagen ofwel de KSN-methodiek uit te voeren.

De parameterspecificatie is in dit onderzoek niet geoptimaliseerd, omdat vooral het effect van de drempelverlaging is onderzocht. Ook zijn de gebruikte modellen vaak in 1D of 2D-situaties en bevatten ze vooral het principe in plaats van de werkelijke aantallen. Ook is het niet gelukt om een indicatie te krijgen van de aanzanding ter hoogte van de zanddrempel om hier vervolgens verder mee te rekenen. Deze omstandigheden kwamen voort uit de tijdsduur van de afstudeerstage en het

budget en vaardigheden die beschikbaar zijn. Om deze punten in een vervolgonderzoek wel te bereiken wordt het volgende aanbevolen:

- Het is relevant om een uitgebreider praktijkonderzoek te doen. Dit met de instelling om een betere parameterspecificatie te krijgen en daardoor betere onderzoeksresultaten. Ook zou dit praktijkonderzoek een meting moeten bevatten van de aanzanding. Dit in een periode (ongeveer 3 á 4 weken) wanneer de Airset niet aan het baggeren is. Aan wordt bevolen om dit te doen in de kerstvakantie, omdat de baggerwerkzaamheden in deze periode dan toch stilliggen.
- Het is relevant om met de conclusies uit dit onderzoek een 3D-modellering uit te voeren om de modellen die nu zijn gebruikt te toetsen in de 3D-situatie. Zo kan deze modellering de aanslibbing en aanzanding per jaar bevestigen.
- Deze afstudeerperiode viel gedeeltelijk samen met de Corona-crisis. Waardoor het niet mogelijk was (geen beschikking tot software) om te onderzoeken of de vloeibare sliblaag blijft afstromen onder de aangetoonde hoek. Daarom wordt er aanbevolen om dit alsnog te doen in een vervolgonderzoek. Dit kan door middel van het vergelijken van de afschuifhoek en veranderingen in de peildata van de maandpeilingen na de praktijkproef: 'Analyse peilkaarten na baggerwerk drempel door Amazone'. (De maanden na januari 2020).

Dit onderzoek heeft tot zijn gevolg dat er meer kennis is over het effect van het verdiepen van de zanddrempel. Hierbij is er voor het eerst wetenschappelijk naar deze situatie en mogelijkheid gekeken. Wanneer de drempel niet wordt verlaagd zal de baggerintensiteit en de vloeibare sliblaag blijven bestaan, waardoor mogelijk de kans wordt gemist om op een slimme wijze de haven te verdiepen en de haven economisch te stimuleren. De situatie in de haven van Delfzijl is uniek en niet veel andere havens bevatten een soort gelijke bodemprofiel. Hierdoor is het lastig om casestudies te verzamelen en ervaringen te delen. Deze informatie over het vloeibare slib en het gedrag hiervan zou echter wel interessant kunnen zijn in andere havens/situaties in de wereld.

Hoofdstuk 13: Aanbevelingen

Voor aanbevelingen over dit onderzoeksrapport wordt verwezen naar het adviesrapport die hiervoor is opgesteld. Tevens is dit adviesrapport bedoeld om aanbevelingen te doen over de mogelijke vervolgstappen.

Bibliografie

- Dearnaley, M. P., Roberts, W., Spearman, J. R., & Cooper, A. J. (1997). *Development of a unified approach for assessing sedimentation in harbours*. ().
- Eysink, W. D. (1989). Sedimentation in harbour basins. small density differences may cause serious effects.
- Eysink, W. D. (1999). Oorzaken aanslibbing haven van delfzijl. ().
- Grasmeijer, B. T. (2013a). Building with nature: Voorstel pilot beperking aanslibbing haven delfzijl. ().
- Grasmeijer, B. T. (2013b). *Hydromorfologie eems-dollard estuarium*. ().
- Havenvisie 2030. (2019). Geraadpleegd op <https://www.groningen-seaports.com/groningen-seaports/havenvisie-2030/>
- McAnally, W. H., Friedrichs, C., Hamilton, D., Hayter, E., Shrestha, P., Rodriguez, H., . . . Teeter, A. (2007). Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes. I: Present state of understanding on character and behavior. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), 9-22. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(9)
- McAnally, W. H., Teeter, A., Schoellhamer, D., Friedrichs, C., Hamilton, D., Hayter, E., . . . Kirby, R. (2007). Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes. II: Measurement, modeling, and management. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), 23-38. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(23)
- Meinsma, R. (2011). *Duurzaam havenbeheer fase 1 deel A, haalbaarheidsstudie voor het succesvol implementeren van de KSN-methode in de haven van delfzijl*.
- Meinsma, R. (2013). *Duurzaam havenbeheer fase 2 deel B, slibcondities haven delfzijl*.
- Odd, N., & Cooper, A. J. (1889). A two-dimensional model of the movement of fluid mud in a high energy turbid estuary.
- Ruitenbeek, M. (2001). *Morfologisch onderzoek bocht van watum* CSO adviesbureau.
- Timmermans, M. C. J. (2002). Hazira harbour siltation study.
- Van der Veen, R. (1989). *Onderzoek aanslibbingsgedrag haven delfzijl*. Havenschap Delfzijl.
- Van Heuvel, T. (1991). *Sedimenttransport in het eems-dollard estuarium, volgens de methode van McLaren*.
- Van Maren, B. et al. (2017). *Hydromorfologische verbetering, opzet D3S model*.
- Van Rijn, L. Water injection dredging.
- Van Rijn, L. (2012). Field survey for sediment parameters in muddy environments.
- Van Rijn, L. (2016). Fluid mud formation.
- Van Rijn, L. (1993). *Principels of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*
- Van Rijn, L. (2015). *Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas*.

Wurpts, R. (2005). *15 years experience of fluid mud: Definition of the nautical bottom with rheological parameters.*

Bijlage 1: Parameterspecificatie – TC Mud

Deze bijlage bevat de parameterspecificatie van het TCMUD-model die is gebruikt bij het Onderzoek de Zanddrempel. Voor deze specificatie is gebruik gemaakt van literatuur uit de mediatheek van de Hanzehogeschool en het archief van Groningen Seaports. Uit het archief zijn met name veel gegevens beschikbaar door het onderzoek 'Duurzaam havenbeheer' en de bodemkwaliteitsmetingen van Antea Group. De gevonden parameters worden vergeleken met het standaardmodel van het TCMUD-model. De parameter specificatie wordt onderverdeeld in vier onderwerpen:

- Sedimentparameters;
- Waterparameters;
- Bodempparameters;
- Beginwaarden in TC Mud.

B1.1 Sedimentparameters in TC Mud

De onderstaande parameters hebben betrekking op het sediment van de vloeibare sliblaag.

- De valsnelheid van de bovenste en onderste laag (W_{s1} , W_{s2});
- Dichtheid van het sediment (ρ_s);
- Maximale concentratie ($C_{2,max}$);
- Dynamische afschuifhoek (ϕ);
- Erosie coëfficiënt (E).

B1.1.1 De valsnelheid van de bovenste laag en onderste laag (W_{s1} , W_{s2})

De valsnelheid in het model van L. van Rijn is standaard 0,0001 m/s. Deze valsnelheid wordt ook aangenomen realistisch te zijn voor de haven van Delfzijl. Tevens wordt deze waarde gebruikt voor de valsnelheid in de sliblaag.

B1.1.2 Dichtheid van het sediment (ρ_s)

De dichtheid van het sediment is 2650 kg/m³. Dit is een standaardwaarde blijkt uit een rapport van Leo van Rijn. (Van Rijn, 2016).

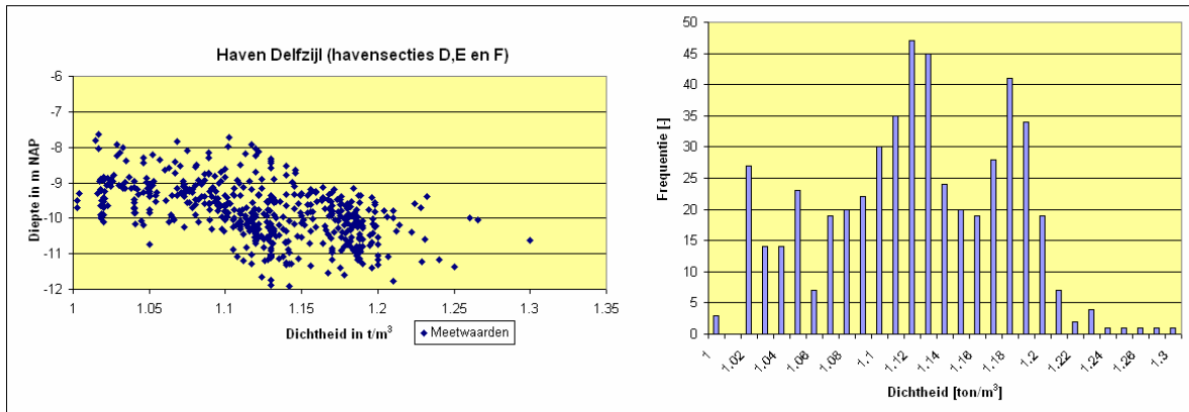
B1.1.3 Maximale concentratie ($C_{2,max}$)

De maximale concentratie in het standaardmodel wordt aangegeven zonder eenheid. De maximale concentratie wordt in de praktijk gemeten met de eenheid kg/m³. In het standaardmodel wordt een andere concentratie (C_2) omgerekend van een dichtheid in kg/m³ tot een dichtheid zonder eenheid.

Dit gebeurt met de volgende formule: $C[-] = \frac{C[\frac{kg}{m^3}]}{\rho_s[\frac{kg}{m^3}]}$. In het standaardmodel wordt de waarde 0,3 aan $C_{2,max}$ gegeven. Omgerekend geeft dit een maximale concentratie van 795 kg/m³.

Dit is een hoge waarde blijkt uit het rapport van Leo van Rijn over 'Water Injection Dredging'. Hierin wordt gezegd dat de maximale concentratie van de vloeibare sliblaag rond de 300 tot 400 kg/m³ is. (Van Rijn,). Als deze waardes worden omgerekend is de range van de maximale concentratie van de vloeibare sliblaag: $0,113 < C_{2,max} > 0,150$.

Het rapport van Wiertsema & Partners 'Duurzaam havenbeheer fase 2' geeft een beeld van de slibconcentraties in de haven van Delfzijl. (Zie figuur B1.1). Duidelijk is te zien dat de frequentie steeds minder wordt bij een dichtheid van 1300 kg/m³. Om deze reden bevindt zich de sliblaag na bij het minimum van de range die is aangegeven door L. van Rijn. Daarom is een waarde van 0,113 gebruikt voor $C_{2,max}$.



Figuur B1.1 Meetwaarden van het slib in havensectie D, E en F. (Meinsma, 2013).

B1.1.4 Dynamische afschuifhoek (ϕ)

In het standaardmodel is de waarde voor de afschuifhoek: $\sin(\phi) = 0,5$. Omgerekend is dit een afschuifhoek van 30 graden. Uit onderzoek blijkt dat de afschuifhoek van kleig materiaal afhangt van de zandfractie. Bij een monster met alleen klei is de afschuifhoek 0 graden. De afschuifhoek kan tot ongeveer 40 graden worden naarmate de zandfractie toeneemt.

Volgens een bodemonderzoek uit 2018 van Antea Group is de zandfractie ter hoogte van de slibvang 34% ds. Omdat dit een vrij hoge waarde is, zal de afschuifhoek richting een waarde van 40 graden gaan. Daarom wordt de afschuifhoek zoals benoemd in het standaardmodel aangenomen, dus is de afschuifhoek 30 graden.

B1.1.5 Erosie coëfficiënt

In het standaardmodel wordt de waarde van 0,0001 gebruikt zonder eenheid voor de erosie coëfficiënt. Tevens wordt bij de beschrijving van deze input aangegeven dat deze waarde een bereik heeft van 0,0001 tot 0,00005. Er wordt gekozen om de standaardwaarde te houden van het erosie coëfficiënt. Dus de Erosie coëfficiënt is 0,0001.

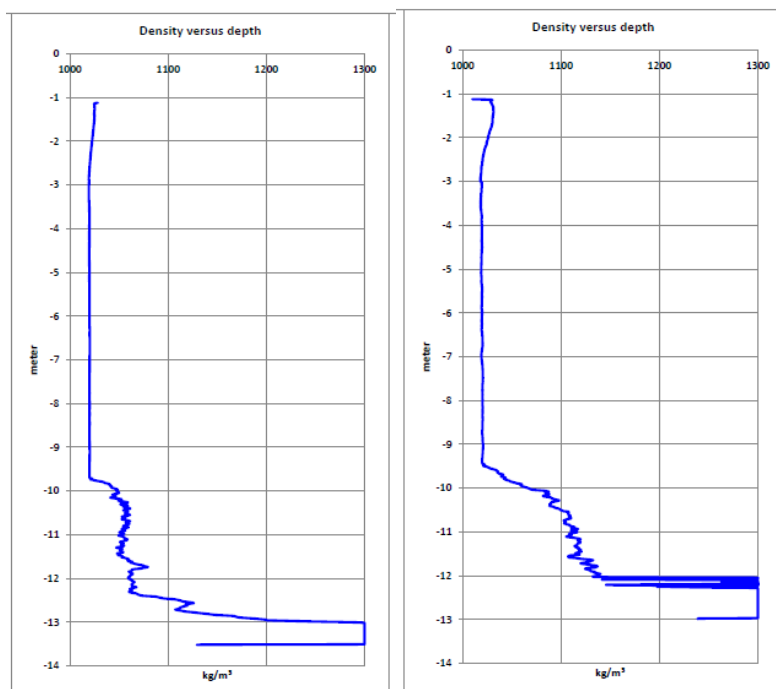
B1.2 Waterparameters in TC Mud

De onderstaande parameters hebben betrekking op het water.

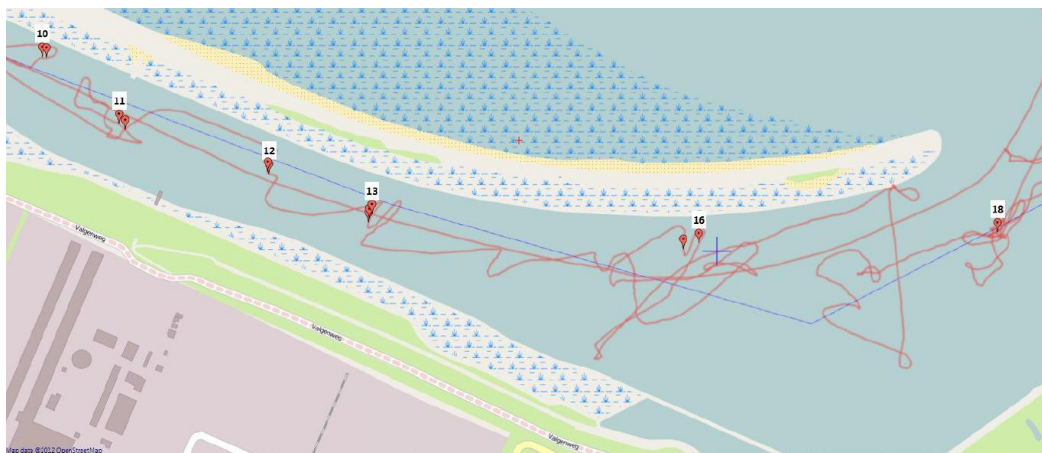
- Dichtheid van water (ρ_s);
- Kinematische viscositeit (ν).

B1.2.1 Dichtheid van water (ρ_s)

In het standaardmodel wordt een dichtheid van 1000 kg/m^3 aangenomen. Bij het interview met Fugro werd gezegd dat de dichtheid van het water ongeveer 1080 kg/m^3 is. In 2012 zijn metingen uitgevoerd door DotOcean waarbij dit bedrijf met een bepaalde Cone onder andere de dichtheid hebben gemeten over de diepte. Uit deze grafieken is te herleiden dat het water geen 1080 kg/m^3 is, maar ongeveer 1025 kg/m^3 . Dit is dan ook de waarde die wordt aangenomen.



Figuur B1.2 Dotcone metingen uitgevoerd in de haven van Delfzijl. Links is meting 16 (16_seg423.seg_4.xlsb) en rechts is meting 13. (13_seg723.seg_1.xlsb).



Figuur B1.3 Locaties van de metingen met de Dotcone.

B1.2.2 Kinematische viscositeit (ν)

In het standaardmodel wordt de kinematische viscositeit van $0,000001 \text{ Ns/m}^2$ gebruikt. De kinematische viscositeit van helder water bij een temperatuur van 10 graden is $1.3065 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Deze waarde wordt toegepast in de berekeningen.

B1.3 Bodemparameters in TC Mud

De onderstaande bodemparameters hebben betrekking op het TCMUD-model:

- Chézy coëfficiënt (C);
- Porositeitsfactor (P);
- Kritische schuifsterkte van de bodem voor depositie ($\tau_{d,crit}$);
- Kritische schuifsterkte van de bodem voor erosie ($\tau_{e,crit}$);
- Ontwatersnelheid naar de waterkolom (W_i);
- Ontwatersnelheid naar de bodem (W_b);
- Hellingshoek van de bodem (β).

B1.3.1 Chézy coëfficiënt (C)

In het standaardmodel heeft de chézy coëfficiënt een waarde van $100 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$. Om de chézy coëfficiënt te berekenen moet de dikte van de laminaire laag (δ) worden bepaald. Deze parameter kan met de volgende formule worden bepaald:

$$\delta = 12 \cdot v / \sqrt{g \cdot R \cdot I}$$

Waarin:

- v = Kinematische viscositeit;
g = Zwaartekrachtversnelling;
R = Hydraulische straal (A/O). A = oppervlakte van het water en O = de omtrek van de wand die het water aanraakt;
I = Het verhang van de bodem.

Vervolgens moet er aan de hand van de wandruwheid worden bepaald of de wand hydraulisch glad, technisch ruw of hydraulisch ruw is. Hieruit volgt een formule aangegeven in tabel B1.1 voor het berekenen van de chézy coëfficiënt. Omdat slibdeeltjes een kleine diameter hebben is het aannemelijk dat de wand hydraulisch glad is. Echter dient dit te worden bepaald aan de hand van onderstaande voorwaarden.

Stromingstoestand	Voorwaarde	Formule
Hydraulisch glad	$k_N < \frac{1}{4} \cdot \delta$	$C = 18 \log\left(\frac{48 \cdot R}{\delta}\right)$
Technisch ruw	$\frac{1}{4} \cdot \delta \leq k_N \leq 6 \cdot \delta$	$C = 18 \log\left(\frac{12 \cdot R}{k_N + \frac{1}{4} \delta}\right)$
Hydraulisch ruw	$k_N > 6 \cdot \delta$	$C = 18 \log\left(\frac{12 \cdot R}{k_N}\right)$

Tabel B1.1 Voor het berekenen van de chézy coëfficiënt. (Bron: lesstof Built Environment – Hydraulica jaar 2).

Wandruwheid

Voor zand geldt dat de k_n – waarde even groot is als de D_{90} – waarde. Dit is de waarde waarbij 90 % van de korrels door een zeef heen gaat. Dus 90% van de korrels kleiner zijn dan deze waarde.

Onderstaand tabel geeft de korrelverdeling weer van het gebied bij de slibvang. Deze waardes zijn onderzocht door Alcontrol die werkzaamheden uitvoerden voor Antea Group. Het blijkt dat D_{90} ongeveer een waarde heeft van 125 μm . Deze k_n -waarde wordt ook door L. van Rijn in een voorbeeld met een vloeibare sliblaag gebruikt als 0,0001 m. (Van Rijn, 2016). Omgerekend is dit een waarde van 100 μm , dus lijkt deze waarde erg realistisch voor het slib in de haven van Delfzijl.

	Korrelverdeling	
% delen <2 μm	2	22
% delen <16 μm	16	37
% delen <32 μm	32	44
% delen <50 μm	50	51
% delen <63 μm	63	58
% delen <125 μm	125	86
% delen <250 μm	250	96
% delen <500 μm	500	98
% delen <1000 μm	1000	98
% delen <2000 μm	2000	100

Tabel B1.2 Korrelverdeling vanuit het bodemonderzoeksrapport van Antea Group uit 2018.

Hydraulische straal (R) en verhang (I)

De hydraulische straal is berekend door de peildata te verwerken naar een Revit-model. Door de geplote peildata in een 3D-model kon er een doorsnede worden gemaakt. Deze doorsnede wordt geïmporteerd in Autocad waarin een automatische berekening van de oppervlakte en omtrek wordt gemeten. Van de omtrek wordt het watervlak afgetrokken om de omtrek van de wand die het water aanraakt te berekenen.

Op de locatie van de doorsnede wordt ook de gemiddelde diepte geschat door middel van de peilkaart. Tevens wordt de gemiddelde diepte op de zanddrempel bepaald. Vervolgens wordt de lengte tussen deze twee punten berekend. De hydraulische straal is als volgt berekend:

Hydraulische straal		
Input		
a in mm	1392265600	mm ²
a in m	1392	m ²
Lengte wateroppervlak	184653	mm
Totale omtrek	371800	mm
O in m	187	m
Output		
R=	7,439	m

Tabel B1.3. Berekening van de hydraulische straal.

Het verhang van de bodem is als volgt berekend:

Verhang		
Input		
Bij start	8,9	m
Bij drempel	9,5	m
Lengte	2300	m
Output		
I	0,000261	

Tabel B1.4 Berekening van het verhang van de bodem.

Berekening

Met deze parameters is de chézy-coëfficiënt berekend, zoals hieronder weergegeven. De waarde van de chézy-coëfficiënt is dus 116 m/s^{0,5}.

Lapda		
Input		
V	0,000001	Ns/m ²
g	9,81	m/s ²
R	7,439	m
I	0,00026087	m
Output		
Lapda	8,69692E-05	m
Input kn		
	0,0001	m
Output		
1/4 x Lapda	6 x lapda	
0,0000217	0,000521815	
Technisch Ruw		
Technisch Ruw		
C	116,41	m/s ^{1/2}

Tabel B1.5 Berekening van de chézy coëfficiënt.

B1.3.2 Porositeitsfactor (P)

In het standaardmodel wordt hier een waarde van 0,4 aangegeven. Op de site:

<http://www.simplecoast.com/toolstutorials/> is een Excel-bestand verkrijgbaar die verschillende sediment parameters kan berekenen. Ook kan dit model de porositeit bepalen met behulp van de volgende formules:

$$\rho_d = 415 \cdot \%_{klei} + 1550 \cdot \%_{zand}$$

$$P = (\rho_s - \rho_d) / \rho_s$$

Waarin:

$$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$$

ρ_d = Droge dichtheid

De zandfractie bij het bemonsteringsvak bij de monding is volgens het bodemonderzoek van Antea Group 58%. Er wordt vanuit gegaan dat het overige deel 42% klei bevat. Na berekening vormt hieruit een porositeit van 60%. Een waarde van 0,6 zal worden gebruikt in de berekeningen.

B1.3.3 Kritische schuifsterkte van de bodem voor depositie ($\tau_{d,crit}$)

In het standaardmodel wordt hier een waarde van 0,05 N/m² aangegeven. Depositie van het materiaal gebeurt wanneer de schuifsterkte van de bodem beneden de kritische schuifsterkte voor depositie valt. Het sediment zal consolideren als $\tau_b < \tau_{d,min}$ als dit andersom is ($\tau_b > \tau_{d,max}$) zal er geen sediment consolideren. (Van Rijn, 2012). Dus met andere woorden wanneer τ_b kleiner wordt dan $\tau_{d,max}$ begint er sediment te consolideren naar de bodem. Bij $\tau_{d,min}$ zal al het materiaal naar de bodem zakken.

In onderstaande afbeelding uit het boek van L. van Rijn wordt verteld wat de kritische schuifsterkte van de bodem is voor depositie. (Zie figuur B1.4). Deze waarde van 0,03 N/m² wordt ook gebruikt in het model.

Mud type	Sand (%)	Organics (%)	Critical deposition bed-shear stress (N/m ²)	
			$\tau_{d,full}$	$\tau_{d,part}$
kaolinite (saline)	-	-	0.05	-
kaolinite (distilled)	-	-	0.15	1.4
Hollands Diep 1 (lake)	9	10	0.10	-
Hollands Diep 2 (lake)	23	9	0.08	-
Ketelmeer (lake)	7	12	0.08	-
Biesbosch (lake)	8	8	0.04	-
Maas (river)	36	8	0.06	-
Breskens Harbour (estuary)	27	5	0.06	-
Delfzijl Harbour (estuary)	60	2	0.03	-
Loswal Noord (sea)	69	2	0.08	-
San Francisco Bay	-	-	0.10	1.7
Maracaibo estuary	-	-	0.08	1.6

Figuur B1.4 Kritische schuifsterktes van bodems voor depositie. (Van Rijn, 1993).

B1.3.4 Kritische schuifsterkte van de bodem voor erosie ($\tau_{e,crit}$)

In het standaardmodel wordt hier een waarde van $0,1 \text{ N/m}^2$ aangegeven. De bodem zal eroderen wanneer de schuifsterkte op de bodem groter wordt dan de kritische schuifsterkte ($\tau_b > \tau_{e,crit}$). Deze waarde kan het best worden gevonden uit in-situ testen of laboratorium testen. Echter is er ook een model van L. van Rijn die deze parameter kan berekenen. De kritische schuifsterkte is berekend met de volgende parameters: watertemperatuur, dichtheid boven de bodem, dichtheid van het sediment, D_{50} en het percentage slib in de bodem.

De kritische schuifsterkte wordt dan berekend door de volgende formule:

$$D_{50} > 0,000062 \rightarrow \tau_{b,c,mud} = \tau_{b,c,sand} \cdot \left(1 + \frac{\%_{mud}}{100}\right)$$
$$D_{50} < 0,000062 \rightarrow \tau_{b,c,mud} = \tau_{b,c,sand} \cdot \left(\frac{0,000062}{D_{50}}\right)$$

$\tau_{b,c,sand}$ wordt bepaald door de volgende formule:

$$\tau_{b,c,sand} = \theta_{cr}(\rho_s - \rho_f)D_{50}$$

Het kritische 'shield nummer', θ_{cr} , wordt bepaald door:

$$\theta_{cr} = \frac{0,3}{1 + 1,2 \cdot D^*} + 0,55 \cdot (1 - \exp(-0,02 \cdot D^*))$$

Waarin D^* wordt bepaald door:

$$D^* = D_{50} \cdot \left(\left((\rho_s - \rho_f) - 1 \right) * \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3}$$

Waarin:

- D_{50} = korrelgrote waarvan 50% groter is dan deze waarde;
- D^* = korrelgrote zonder dimensie;
- $\tau_{b,c,mud}$ = Kritische schuifsterkte van de bodem voor slib;
- $\tau_{b,c,sand}$ = Kritische schuifsterkte van de bodem voor zand;
- g = Zwaartekracht versnelling;
- ν = Kinematische viscositeit van water bij 10 graden;
- ρ_s = Dichtheid van het sediment (2650 kg/m^3);
- ρ_f = Dichtheid van de vloeistof;
- $\%_{mud}$ = Percentage slib in de bodem.

Specificatie parameters

D_{50} wordt afgeleid uit tabel B1.2 en bedraagt $0,00005 \text{ m}$. De dichtheid van de bovenliggende sliblaag is 1127 kg/m^3 . Voor deze specificatie zie bijlage 1 paragraaf B1.4.2. De viscositeit is in paragraaf B1.2.2 gespecificeerd en is $0,00000136 \text{ m}^2/\text{s}$. Het slibgehalte van de bodem is bepaald uit het rapport van Antea Group en bedraagt ter hoogte van de slibvang 66ds.% slib, doordat de zandfractie hier 34ds.% is.

Berekening

Uit de berekening, die weergegeven is in tabel B1.6, volgt dat de kritische schuifsterkte van de bodem $0,13 \text{ N/m}^2$ bedraagt. In het voorbeeldmodel bedraagt dit $0,10 \text{ N/m}^2$ en dus lijkt $0,13 \text{ N/m}^2$ een aannemelijk getal.

Water temperature		10	(degree celsius)		
Fluid density		1127	(kg/m ³)		
Sediment density		2650	(kg/m ³)		
Sediment size d ₅₀ (m)		0,00005	(m)		
Water depth		10	(m)		
Angle of repose j		35	(degrees)		
Lateral bed slope g		0	(degrees)		
Longitudinal bed slope		0	(degrees)	(+ downsloping; - upsloping)	
Percentage of mud in bed		66	(%)		
Lateral slope factor		1	(-)		
Longitudinal slope factor		1	(-)		
Dimensionless sediment size D*		0,966344443	(-)		
Kinematic viscosity		0,00000136	(m ² /s)		
Fall velocity w _s (m/s)		0,001354	(m/s)		
Critical shields number		0,139966529	(-)	Shields for noncohesive sediment	
Critical shear stress		0,104559406	(N/m ²)	Shields for noncohesive sediment	
Critical depth-averaged velocity		0,307528303	(m/s)		
Critical shear stress		0,129653664	(N/m ²)	Shields for cohesive sediment	
Critical depth-averaged velocity		0,342449026	(m/s)		

Tabel B1.6 Berekening van de kritische schuifsterkte middels het rekenmodel van L. Van Rijn.

B1.3.5 Ontwatersnelheid naar de waterkolom (W_i)

In het standaardmodel wordt hier een waarde van 0,00001 m/s aangegeven. Deze waarde komt overeen met de doorlatendheid van klei die een waarde heeft van 1×10^{-7} cm/s. Omgerekend is dit 0,00001 m/s.

B1.3.6 Ontwatersnelheid naar de bodem (W_b)

In het standaardmodel wordt hier een waarde van 0,00001 m/s aangegeven. Dit is dezelfde waarde als de doorlatendheid van klei. Doordat zich onder de vloeibare sliblaag een geconsolideerde sliblaag bevindt, is het aannemelijk dat deze doorlatendheid ook geldt voor de overgang van de waterkolom naar de bodem toe.

B1.3.7 Hellingshoek van de bodem (β)

De mogelijkheden voor de hellingshoek moeten nader worden bepaald. Deze is afhankelijk van de afstroming van het slib.

B1.4 Beginwaarden in TC Mud

De volgende beginwaarden dienen te worden gespecificeerd in TCMUD:

- Dikte van de sliblaag ($h_{2,0}$);
- Concentratie van de sliblaag ($c_{2,0}$);
- Snelheid van de slibstroom ($u_{2,0}$) en het getal van Froude ($Fr_{2,0}$);
- Concentratie van het water ($c_{1,0}$).

B1.4.1 Dikte van de sliblaag ($h_{2,0}$)

De dikte van de sliblaag is variabel met het dieper baggeren van de drempel. Voor verduidelijking van dit principe zie paragraaf 8.1.3.

B1.4.2 Concentratie van de sliblaag ($c_{2,0}$)

Toepassing

In figuur B1.5 is de data uit figuur B1.1 uitgewerkt. Met deze data is vervolgens de gemiddelde concentratie van de sliblaag bepaald. Door te achterhalen welke waarde van slib het meeste voorkomt. Deze waarde is 1127 kg/m^3 .

De volgende formule rekent de natte dichtheid om naar een droge dichtheid:

$$\rho_d = \frac{\rho_n - 1020}{0,62}$$

De droge dichtheid is 172 kg/m^3 wanneer de natte dichtheid van 1127 kg/m^3 wordt omgerekend.

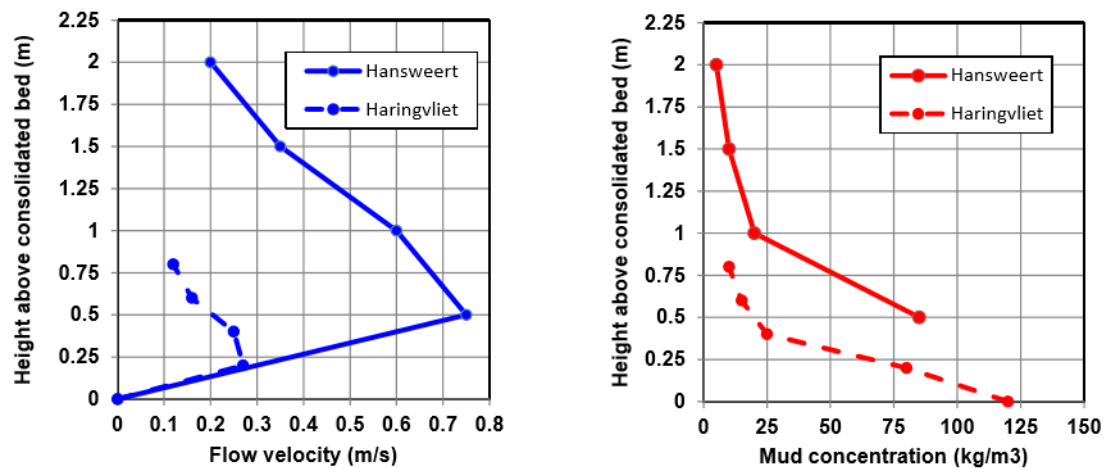
Gemiddelde dichtheid havensectie D,E en F			
Input:	Dichtheid	Frequentie	
	1000	0	
	1005	3	
	1015	0	
	1025	27	
	1035	14	
	1045	14	
	1055	23	
	1065	7	
	1075	19	
	1085	20	
	1095	22	
	1105	30	
	1115	35	
	1125	47	
	1135	35	
	1145	24	
	1155	20	
	1165	19	
	1175	27	
	1185	41	
	1195	34	
	1205	19	
	1215	7	
	1225	2	
	1235	4	
	1245	1	
	1255	1	
	1265	1	
	1275	1	
	1285	1	
	1295	1	
	Toaal	499	
Output:	Totale frequentie	499	
	Som van rho*fre.	562585	
	Gemiddelde c	1127	kg/m3

Figuur B1.5 Calculatie van de gemiddelde concentratie door middel van frequentie metingen uit figuur B1.1

B1.4.3 Snelheid van de slibstroom ($u_{2,0}$) en het getal van Froude ($Fr_{2,0}$)

Het model rekent een snelheid uit met behulp van de volgende parameters: $Fr_{2,0}$, $h_{2,0}$ en $c_{2,0}$. Omdat het getal van Froude en de snelheid van de slibstroom onbekend zijn dient één van deze parameters te worden bepaald. Daarom is het van belang om ofwel het Froude getal te specificeren ofwel de snelheid van de vloeibare sliblaag na het baggeren met de Airset.

In de reader van L. Van Rijn wordt de slibstroming van twee verschillende havens als indicatie weergegeven. Te zien in het onderstaande figuur. Het getal van Froude is bij het kalibratiemodel als 1,5 aangenomen. Dit is de waarde die als standaard wordt aangehouden.



Figuur B1.6 Snelheid van de vloeibare sliblaag en concentraties van de sliblaag gegenereerd bij de WID in Hansweert en Haringvliet.

B1.4.4 Concentratie van het water ($c_{1,0}$)

In het standaardmodel wordt hier een waarde van 0 kg/m^3 voor gebruikt. In het rapport van Eysink wordt aangegeven dat het concentratie van het binnenkomend buitenwater ongeveer $0,003 \text{ kg/m}^3$ is. (Eysink, 1999).

Bijlage 2: Parameter specificatie – SILTHAR

In deze bijlage worden de parameters gespecificeerd die worden gebruikt in het SILTHAR-model. De volgende groepen parameters worden gespecificeerd:

- Uitwisselingsvolume door horizontale circulatie;
- Uitwisselingsvolume door dichtheidsstroom;
- Uitwisselingsvolume door spuien;
- Sediment.

B2.1 Uitwisselingsvolume door horizontale circulatie

De volgende parameters zijn van belang bij het uitwisselingsvolume door horizontale circulatie:

- Coëfficiënt afhankelijk van de geometrie van de haven (f_h, f_{hr});
- Diepte van de havenmond (h_0);
- Breedte van de havenmond (b_0);
- Maximale stroomsnelheid langs de havenmond tijdens vloed ($u_{0, \max}$);
- Getijperiode (T);
- Getijvolume (V_t).

B2.1.1 Coëfficiënt afhankelijk van de geometrie van de haven (f_h, f_{hr})

Deze coëfficiënten worden gegeven in het rapport 'Oorzaken aanslibbing haven van Delfzijl'. $f_h = 0,02$ en $f_{hr}=0,2$. (Eysink, 1999).

B2.1.2 Diepte van de havenmond (h_0)

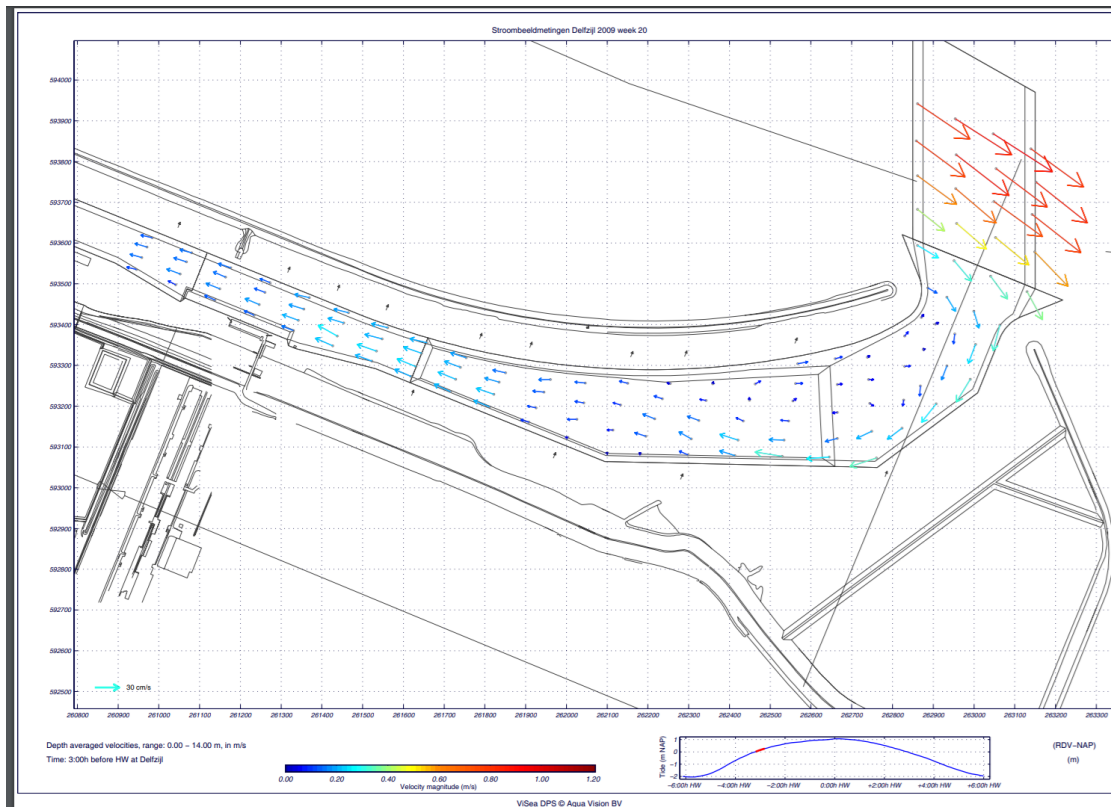
De huidige diepte van de havenmonding is ongeveer 9,7 meter. Dit is afgelezen van de peilkaart in januari 2020.

B2.1.3 Breedte van de havenmond (b_0)

De breedte van de havenmonding is 330 meter gemeten. Dit is via 'Google Maps' bepaald en later bevestigd in het programma Qinsy.

B2.1.4 Maximale stroomsnelheid langs de havenmond tijdens vloed ($u_{0, \max}$)

Zoals af te lezen is in onderstaand figuur is de maximale stroomsnelheid buiten de monding ongeveer 0,9 m/s.



Figuur B2.1 Stroomsnelheidsmetingen gemeten door Baggerbedrijf de Boer in 2009 voor Groningen Seaports.

B2.1.5 Getijperiode (T)

In figuur B2.1 is ook af te lezen dat de getijperiode 6 uur duurt. Doordat de overige eenheden in seconden zijn moet deze 6 uur omgerekend worden naar seconden. 6 uur bedraagt 21.600 seconden.

B2.1.6 Getijvolume (V_t)

Het getijvolume is te bepalen aan de hand van de formule: $A_b * \Delta h_t$.

Waarin:

- A_b = bergend oppervlak van de haven
- Δh_t = getijverschil in de haven

Het bergend oppervlak van de haven wordt bepaald via het programma Autocad. Het bergend oppervlak is $1.932.770 \text{ m}^2$. Dit is berekend met behulp van de ondergrond van de haven van Delfzijl en de oppervlakberekening in Autocad. Het gemiddelde getijverschil is 3,06 meter.

Volume haven		
Input		
A_b	1932770	m ²
Δh_t	3,06	m
Output		
V_t	5.914.276	m ³

Tabel B2.1 Calculatie van het getijvolume.

B2.2 Uitwisselingsvolume door dichtheidsstroom

De volgende parameters zijn van belang om te specificeren bij het uitwisselingsvolume door dichtheidsstroom:

- Karakteristiek dichtheidsverschil voor de havenmond ($\Delta\rho_{\max}$);
- Coëfficiënten f_d en f_{td} .

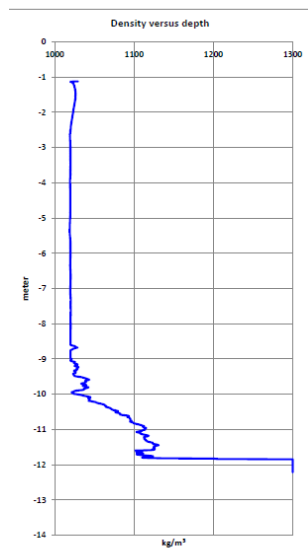
B2.2.1 Karakteristiek dichtheidsverschil voor de havenmond ($\Delta\rho_{\max}$)

Het karakteristieke dichtheidsverschil voor de havenmond is te berekenen met de formule: $\Delta\rho_{\max} = (\rho_{\max} - \rho_{\min})/2$.

In figuur B2.2 is een meting te zien van DotOcean ter plaatse van de zanddrempel.

Dichtheidsmetingen buiten de haven zijn niet genomen. De maximale dichtheid is 1120 kg/m^3 . De minimale dichtheid is verkregen uit het rapport 'Oorzaken aanslibbing haven van Delfzijl'.

Minimumwaarden bij de monding lagen tussen de 1005 en 1011 kg/m^3 . (Eysink, 1999). Tevens lagen de maximale waarden in dit rapport lager daarom wordt een minimumwaarde van 1015 kg/m^3 aangehouden. Dus $\Delta\rho_{\max}$ is $2,5 \text{ kg/m}^3$.



Figuur B2.2 Meting 18 van DotOcean zie voor exacte locatie figuur ... (18_seg_2223.seg_3)

B2.2.2 Coëfficiënten f_d en f_{td}

F_d (ook wel $f_{4, \max}$) wordt bepaald door de formule:

$$f_{4, \max} = V_{do}/h_0 \cdot b \cdot \left(\frac{\Delta\rho_{\max}}{\rho} \cdot g \cdot h_0 \right)^{1/2} \cdot T$$

Deze formule is omgerekend uit een formule van het rapport 'sedimentation in harbour basins. Small density differences may cause serious effects'. (Eysink, 1989).

In deze formule voor $f_{4, \max}$ is de V_{do} onbekend. Deze wordt bepaald uit het rapport 'Hazira harbour siltation study' die voor de haven Hazira ook een SILTHAR-studie heeft toegepast. (Timmermans, 2002). Hierbij werden de volgende drie formules gebruikt om V_{do} te berekenen:

$$u_{do} = f * \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gh}$$

$$Q_d = (u_{do} - u_t) \cdot \frac{1}{2} hb$$

$$V_{do} = Q_d \cdot T$$

Hierin is u_{do} de snelheid door de dichtheidsstroom en u_t is de getij snelheid. f is een coëfficiënt die ongeveer 0,45 is, $\Delta\rho$ is de karakteristieke dichtheidsverschil en Q_d is het debiet per seconde door de dichtheidsstroom. De volgende berekening is uitgevoerd om uiteindelijk $f_{4, \max}$ te bepalen:

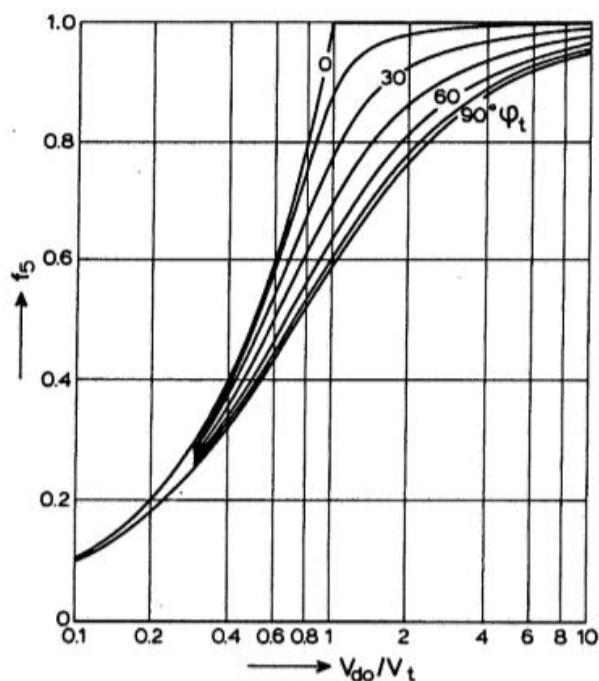
Stroomsnelheid dichtheidsstroom		
Input		
f	0,45	
$\Delta\rho$	2,5	kg/m3
ρ	1025	kg/m3
g	9,81	m/s2
h	9,5	m
Output		
udo	0,215	m/s

Debiet door dichtheidsstroom		
input		
udo	0,215	m/s
ut	0,1	m/s
h	9,5	m
b	330	m
Ouput		
Qd	179,55	m3/s
T	21600	s
Vd	3.878.239	m3/tij

f4, max		
Input		
Vd	3.878.239	m3/tij
h	9,5	m
b	330	m
$\Delta\rho$	2,5	kg/m3
ρ	1025	kg/m3
g	9,81	m/s2
T	21600	s
Output		
f4, max	0,12	

Tabel B2.2 Berekening van $f_{4, \max}$.

Doordat deze f_4 , max bekend is kan f_5 worden bepaald. f_5 kan worden bepaald door het volgende figuur:



Figuur B2.3 f_5 als een functie van V_{d0}/V_t en hoek t . (Eysink, 1989).

V_t is het totaal aan wateruitwisseling door het getijprisma. De berekening van V_d/V_t is hieronder weergegeven:

f5		
input		
Vd	3.878.239	m3/tij
Vt	5.914.276	m3/tij
Output		
Vd/Vt	0,66	
Aflezen tabel		
f5	0,5	

Tabel B2.3 Berekening van f_5 .

B2.3 Spuien

De volgende parameters zijn van belang bij het uitwisselingvolume door spuien:

- Aantal getijden per jaar (n);
- Aantal getijden per jaar waarin wordt gespuid (n_s);
- Gemiddelde concentratie van het aangevoerde spuiwater (c_s).

B2.3.1 Aantal getijden per jaar (n)

Het aantal getijden per jaar bedraagt in Delfzijl 708 getijden.

B2.3.2 Aantal getijden per jaar waarin wordt gespuid (n_s)

Vanuit de data van waterschap over de spuigegevens is het aantal getijden waarin meer dan 50.000 m³ is gespuid opgeteld. Dit bedraagt meer dan 476 van de totaal 708 getijden. Het gemiddelde spui volume per keer is bepaald door middel van het cumulatief van alle spui debieten op te tellen en te delen door het aantal keer dat is gespuid. Dit bedraagt 484.500 m³ per getijde.

B2.3.3 Gemiddelde concentratie van het aangevoerde spuiwater (c_s)

De gemiddelde concentratie is volgens het rapport van Eysink 5 mg/l omgerekend is dit 0,005 kg/m³. (Eysink, 1999).

B2.4 Sediment

De volgende parameters dienen te worden gespecificeerd van het sediment:

- Deel van het sediment dat bezinkt (p);
- Gemiddelde concentratie in het van buiten de haven aangevoerde water (C_{in});
- Zandfractie van de afzetting (p_z).

B2.4.1 Deel van het sediment dat bezinkt (p)

Het deel dat bezinkt van het sediment wordt aangegeven te worden geschat door berekening. Deze berekening is toen de tijd uitgekomen op 33% bezinkpercentage in het document van Eysink (Eysink, 1999).

B2.4.2 Gemiddelde concentratie in het van buiten de haven aangevoerde water (C_{in})

De gemiddelde concentratie is volgens het rapport van Eysink 300 mg/l omgerekend is dit 0,3 kg/m³. (Eysink, 1999).

B2.4.3 Zandfractie van de afzetting (p_z)

Zandgehalten variëren tussen de 4% en 14% in het droge materiaal. Bij de slibvangput bedraagt dit 34% ds. en ter plaatse van de drempel op Paapsand Süd 86% ds. De zandfractie wordt aangehouden als 10%. Met de zandfractie kan de dichtheid aan sediment worden bepaald volgens de volgende formule:

$$\rho_d = 1250 \cdot p_z^2 + 350 \text{ kg/m}^3$$

De dichtheid van het sediment is 374,5 kg/m³.

Bijlage 3: Parameter specificatie – SEDTUBE

In deze bijlage worden parameters gespecificeerd van de SEDTUBE-modellering. De groepen parameters die worden genoemd zijn:

- Stromingsparameters;
- Bodemparameters.

B3.1 Stromingsparameters

De volgende parameters zijn van belang bij de stromingsparameters:

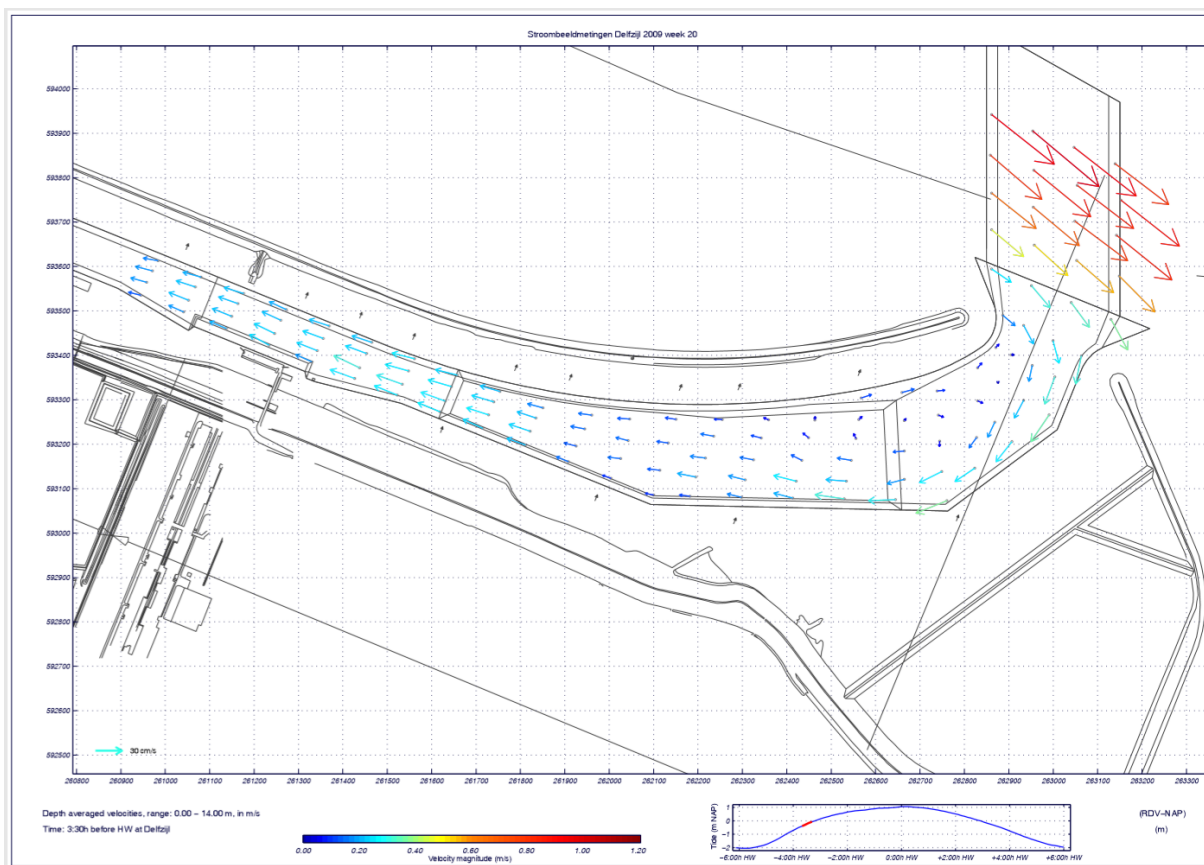
- De op diepte geïntegreerde (gemiddelde) snelheid op $x=0$ (v);
- Hoogte van het getij;
- Golfhoogte (H_s);
- Golfperiode (T_p);
- Dichtheid van de vloeistof (ρ);
- Kinematische viscositeit (ν);
- Stromingsduur van 1 tijdstap/getij (Δt);
- Nummer van tijdsduur voor halve getij;
- Totale tijdsduur van simulatie.

B3.1.1 Diepte geïntegreerde (gemiddelde) snelheid op $x=0$ (v)

De diepte geïntegreerde snelheid tijdens eb en tijdens vloed kunnen worden gevonden uit stromingsmetingen. Deze metingen zijn in 2010 uitgevoerd door Baggerbedrijf de Boer en deze situatie is nog altijd van toepassing in de haven van Delfzijl. Op deze stromingsmetingen is de op diepte geïntegreerde snelheid gemeten.

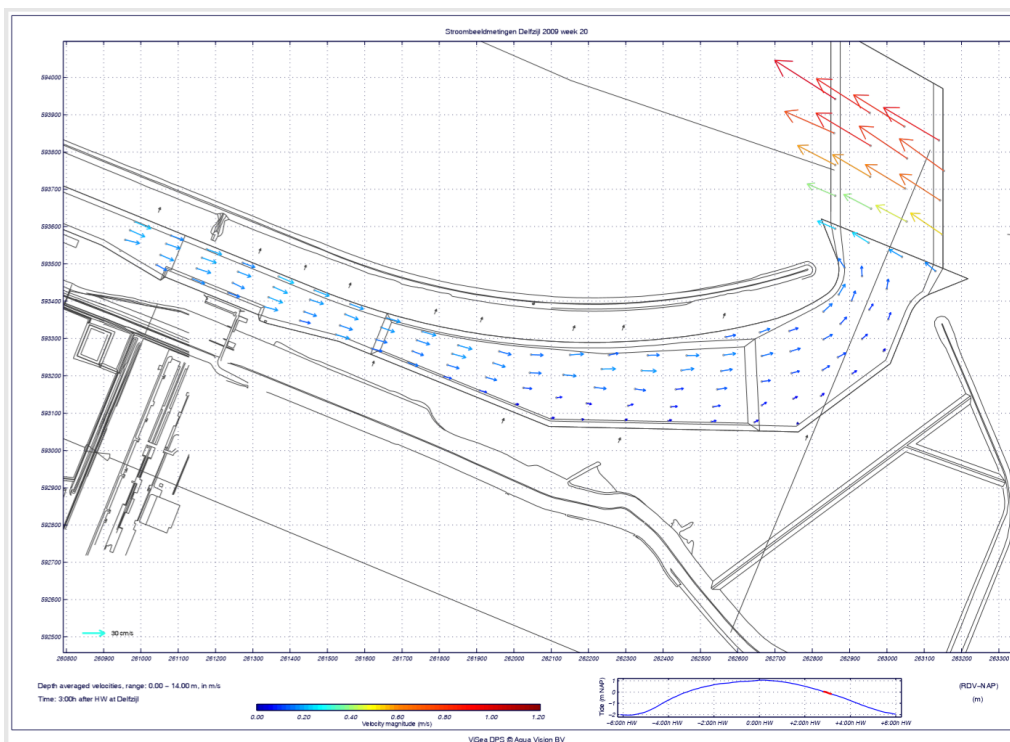
Om de stroomsnelheid te bepalen moet er een indicatie zijn waar deze gemeten moet zijn. Daarom is het nodig om $x=0$ te bepalen. $x=0$ wordt de locatie op de top van de drempel, die op de noordlijn van baggervak 1a ligt.

Op onderstaande kaart is de stroming weergegeven die plaatst vindt bij vloed. Uit deze kaart is te herleiden dat bij $x=0$ de snelheid ongeveer 0,35 m/s is.



Figuur B3.1 Gemiddelde stroomsnelheidsmetingen over de gehele diepte gemeten bij vloed door Baggerbedrijf de Boer in 2009 voor Groningen Seaports.

In figuur B3.2 is te zien dat de op diepte geïntegreerde gemiddelde stroomsnelheid bij eb 0,25 m/s bedraagt.



Figuur B3.2 Gemiddelde stroomsnelheidsmetingen over de gehele diepte gemeten bij eb door Baggerbedrijf de Boer in 2009 voor Groningen Seaports.

B3.1.2 Hoogte van het getij

De hoogte van het getij zijn te achterhalen op de internetsite van Groningen Seaports en zijn weergegeven in figuur B3.3 Er wordt vanuit gegaan van het gemiddelde tij. Het hoogwater is hierbij +1,40 meter en het laagwater is -1,66 meter.

Delfzijl getijde

	HW (meter)	LW (meter)	Vershil (meter)
Gemiddeld springtij	+ 1.53 m	- 1.86 m	3.39 m
Gemiddeld tij	+1.40 m	- 1.66 m	3.06 m
Gemiddeld doottij	+1.19 m	- 1.47 m	2.66 m

Figuur B3.3 Getijden in Delfzijl t.o.v. NAP. (Bron: Groningenseaports.com)

B3.1.3 Golfhoogte (H_s)

De golfhoogtes kunnen niet worden bepaald bij de haven van Delfzijl op korte termijn. Daarom is ervoor gekozen om de gegevens van de Eemshaven te gebruiken. De golfhoogtes zijn opgevraagd bij Rijkswaterstaat voor de periode 01-01-2019 tot 01-01-2020. De meetpaal meet om de 10 minuten de golfhoogte. De data werd verstuurd in een Excel-bestand. De golfhoogtes worden bij elkaar opgeteld en gedeeld door het aantal cellen met een waarde (veel cellen bevatten geen waarde). De gemiddelde golfhoogte in de Eemshaven is 32,74 cm. Dit getal wordt afgerond in dit onderzoek naar 33 cm.

B3.1.4 Golfperiode (T_p)

De golfperiode van het standaardmodel wordt aangenomen normaal te zijn in de haven van Delfzijl. Dit is een waarde van 6 seconden. Uit interne gesprekken bij Groningen Seaports wordt aangegeven dat de golfperiode 7 seconden is in de haven van Delfzijl. Deze waarde wordt dan ook gebruikt in de modellering.

B3.1.5 Dichtheid van de vloeistof (ρ)

Voor de dichtheid van de vloeistof (water) zie B1.2.1. De dichtheid is daarom 1025 kg/m³.

B3.1.6 Kinematische viscositeit (ν)

Voor de kinematische viscositeit zie B1.2.2. De kinematische viscositeit is daarom 1.3065 x 10⁻⁶ m²/s.

B3.1.7 Stromingsduur van 1 tijdstap/getij (Δt)

Eén getijde duurt 6 uur en 10 minuten in de haven van Delfzijl.

B3.1.8 Nummer van tijdsduur voor halve getij

Dit nummer dient 1 te zijn, doordat de haven van Delfzijl eb en vloed kent in één getij.

B3.1.9 Totale tijdsduur van simulatie

De totale simulatie is afhankelijk van de kalibratietest. Deze test wordt ongeveer over een week uitgevoerd. De totale hoeveelheid uur is de tijdsduur waarop de kalibratie moet worden ingesteld.

Deze praktijkproef (zie paragraaf 7.2) is begonnen op vrijdag 6 maart om 08:00 met de singlebeam meting. Deze peiling diende om de zanddrempel in te peilen om vervolgens met een uitpeiling de aanzanding van een week te bepalen. De singlebeam is geëindigd om 08:50 en vervolgens is van 09:00 tot 11:45 met de multibeam gemeten. De uitpeiling van de singlebeam is uitgevoerd op vrijdag 13 maart om 12:10 tot 12:55, vervolgens is ook hier met de multibeam gepeild. De multibeam peiling duurde van 13:00 tot 14:30.

Doordat bij de aanzanding vooral wordt gekeken naar de 33kHz-meting wordt deze als referentie gebruikt om de tijd te bepalen tussen de meting. Hierbij wordt bij de inpeiling de stoptijd gepakt en bij de uitpeiling de begintijd. De tijd tussen deze peilingen bedraagt 10320 minuten.

Eén getijde duurt 6 uur en 10 minuten in de haven van Delfzijl. De simulatie gaat uit van 2 getijden per keer dus (2 getijden) is 740 minuten. De tijd van de praktijkproef gedeeld door de getijden levert op dat de totale tijdsduur van de simulatie 13,95 moet bevatten. De tijdsduur van een jaar bedraagt 525.600 minuten. De simulatieduur is hierom 710 hele getijden.

B3.2 Bodemparameters

Met betrekking tot de bodemparameters in het SEDTUBE-model zijn de volgende parameters van belang:

- D_{50} van gesedimenteerde zandfractie;
- D_{90} van gesedimenteerde zandfractie;
- Dichtheid van het sediment (ρ_s);
- Slibfractie in de bodem (p_{mud});
- Valsnelheid van het gesuspendeerde zand (W_s);
- Bodemruwheid (k_s);
- Porositeit van de bodem (P);
- Dwarsdoorsnede van het bodemprofiel.

B3.2.1 D_{50} van gesedimenteerde zandfractie

De D_{50} van de zandfractie ligt tussen de 250 μm en 125 μm . Het percentage wat door 250 μm gaat is 94% en bij 125 μm gaat er 36% doorheen. Daarom wordt benaderd dat 50% van de zanddeeltjes kleiner is dan 150 μm . De korrelverdeling is verkregen uit het bodemonderzoek van Antea Group voor het jaar 2020/2021.

B3.2.2 D_{90} van gesedimenteerde zandfractie

De D_{90} van de zandfractie ligt tussen de 250 μm en 125 μm . Het percentage wat door 250 μm gaat is 94% en bij 125 μm gaat er 36% doorheen. Daarom wordt benaderd dat 90% van de zanddeeltjes kleiner is dan 225 μm . De korrelverdeling is verkregen uit het bodemonderzoek van Antea Group voor het jaar 2020/2021.

B3.2.3 Dichtheid van het sediment (ρ_s)

Voor de dichtheid van het sediment zie B1.1.2. De dichtheid van het sediment is daarom 2650 kg/m³.

B3.2.4 Slibfractie in de bodem (p_{mud})

In het bodemonderzoek van Antea Group die is opgeleverd in 2020 voor de haven van Delfzijl is de zandfractie gemeten op de zanddrempel. De zandfractie op de zanddrempel is 89% ds. Ervan uitgegaan wordt dat de slibfractie in dit gebied 11% ds. is.

B3.2.5 Valsnelheid van het gesuspendeerde zand (W_s)

De valsnelheid wordt berekend met een tool van L. van Rijn. Hierbij wordt de volgende formule toegepast om de valsnelheid te berekenen:

$$D_{50} > 0,0001 \rightarrow W_s = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \cdot g \cdot D_{50}^2 / (18 \cdot \nu)$$

$$D_{50} < 0,0001 \rightarrow W_s = (10 \cdot \nu / D_{50}) \cdot \left(\left(1 + 0,01 \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \cdot \frac{D_{50}^3}{\nu^2} \right)^{0,5} \right)^{-1}$$

Waarin:

ν = Kinematische viscositeit = $1.3065 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. (Zie B3.1.6).

ρ_s = Dichtheid van het sediment = 2650 kg/m^3 . (Zie B3.2.3).

ρ_w = Dichtheid van vloeistof/water = 1025 kg/m^3 . (Zie B3.1.5).

g = zwaartekrachtversnelling in m/s^2 .

D_{50} = D_{50} van het gesuspenderde zand = $0,00015 \text{ }\mu\text{m}$. (Zie B3.2.1).

In onderstaande tabel is te zien wat de uitkomst van deze berekening is. De valsnelheid van het gesuspenderde zand is $0,0127 \text{ m/s}$.

Water temperature	10	(degree celsius)		
Fluid density	1025	(kg/m3)		
Sediment density	2650	(kg/m3)		
Sediment size d50 (m)	0,00015	(m)		
Water depth	10	(m)		
Angle of repose j	40	(degrees)		
Lateral bed slope g	0	(degrees)		
Longitudinal bed slope	0	(degrees)	(+ downsloping; - upsloping)	
Percentage of mud in bed	11	(%)		
Lateral slope factor	1	(-)		
Longitudinal slope factor	1	(-)		
Dimensionless sediment size D*	3,186928377	(-)		
Kinematic viscosity	0,00000128	(m2/s)		
Fall velocity ws (m/s)	0,012738	(m/s)		
Critical shields number	0,065581242	(-)	Shields for noncohesive sediment	
Critical shear stress	0,156817047	(N/m2)	Shields for noncohesive sedimen	
Critical depth-averaged velocity	0,385700313	(m/s)		
Critical shear stress	0,214467854	(N/m2)	Shields for cohesive sediment	
Critical depth-averaged velocity	0,451060149	(m/s)		

Tabel B3.1 Berekening van de valsnelheid in het gesuspenderde zand door de tool van L. Van Rijn.

B3.2.6 Bodemruwheid (k_s)

De bodemruwheid bij zand is dezelfde waarde als de D_{90} van de zandfractie op de bodem. De D_{90} is berekend in B3.2.2.

B3.2.7 Porositeit van de bodem (P)

In B1.3.2 is een model gebruikt om de porositeit te berekenen. Voor de methode van de berekening zie B1.3.2. Voor de berekening is het nodig om de slib en zandfractie bepalen. De zandfractie is 89% en de slibfractie is 11%. Dit levert een porositeit op van 46%.

Percentage clay	11	(%)
Percentage silt	0	(%)
Percentage sand	89	(%)
Fluid density	1025	(kg/m ³)
Sediment density	2650	(kg/m ³)
Dry bulk density	1425,15	(kg/m ³)
Wet bulk density	1898,913	(kg/m ³)
Porosity value p	0,462208	(-)

Tabel B3.2 Berekening van de porositeit van de bodem door de tool van L. Van Rijn.

B3.2.8 Dwarsdoorsnede van bodemprofiel

De dwarsdoorsnede is bepaald uit de peiling van de praktijkproef: 'Aanzanding zanddrempel'. Het dwarsprofiel is genomen op de locatie van de noordlijn van baggervak 1a. Uit deze dwarsdoorsnede is per 2 meter een dieptemeting uitgemeten in het surveyprogramma Qinsy.

Bijlage 4: Gevoeligheidsanalyse TCMUD

TCMUD kent veel parameters en moeilijke 'in elkaar gevlochten' formules. Hierdoor is het lastig om te bepalen aan de hand van de formules welke parameters vooral van invloed zijn op het eindresultaat. Om deze reden is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op het TCMUD-model. Het doel van deze analyse is om te onderzoeken welke parameters sterke invloed hebben op het eindresultaat van de modellering.

B4.1 Methode

Het TCMUD-model kent 24 inputparameters, die onderverdeeld zijn in 5 groepen:

- Parameters van het sediment;
- Parameters van het water;
- Parameters van de bodem;
- Parameters van de initiële waarden;
- Parameters voor kalibratie.

Om de gevoeligheid van alle parameters te bepalen, wordt elke parameter individueel met 10% verhoogd en verlaagd. Vervolgens wordt er bekeken wat voor invloed de aanpassing heeft op het getal van Froude (op welke x-waarde het getal van Froude kleiner is dan één). De gevoeligheidsanalyse wordt gebaseerd op het getal van Froude, doordat de optimalisering op basis van dit getal is gebeurd en dit weergeeft tot op welke afstand de sliblaag gaat stromen. De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd met het TCMUD-berekening dat is uitgevoerd voor drempelhoogte 10,25 meter, waarbij het Froude getal gelijk is aan één bij de toplaag van het slib.

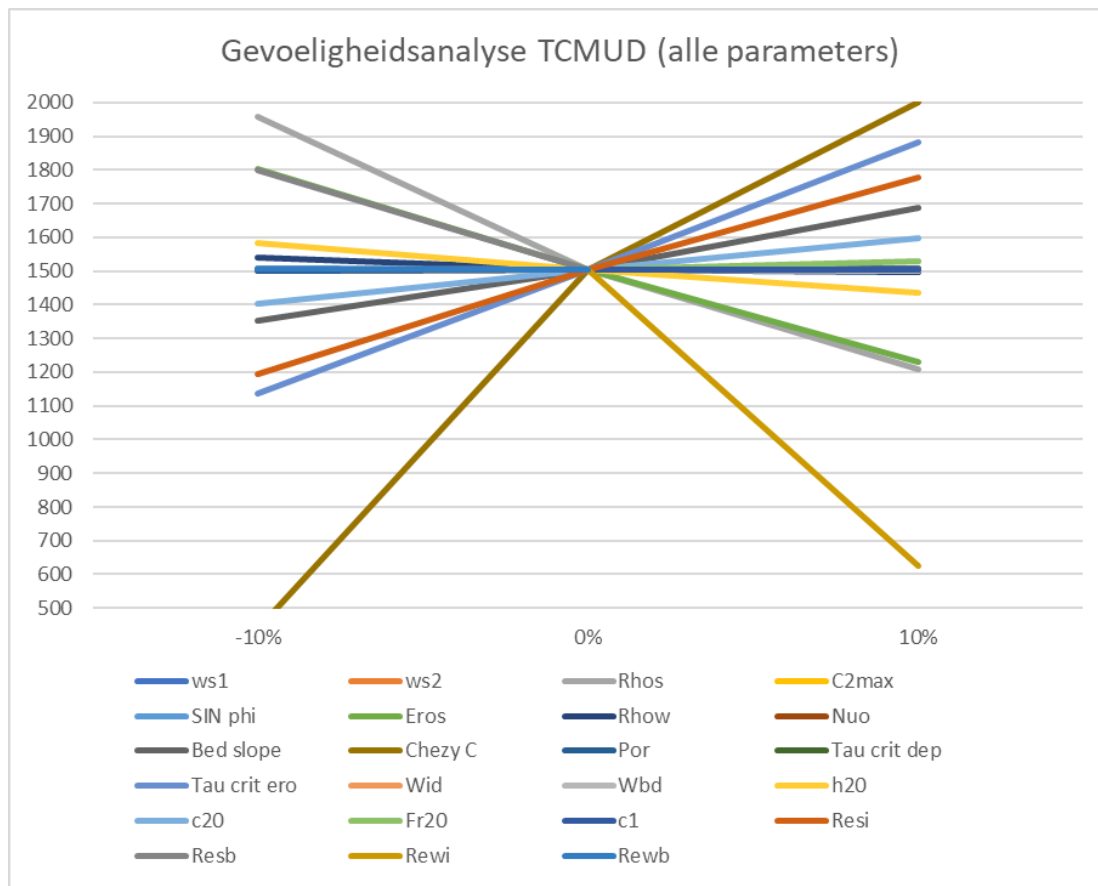
B4.2 Resultaten

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn in onderstaande tabel weergegeven.

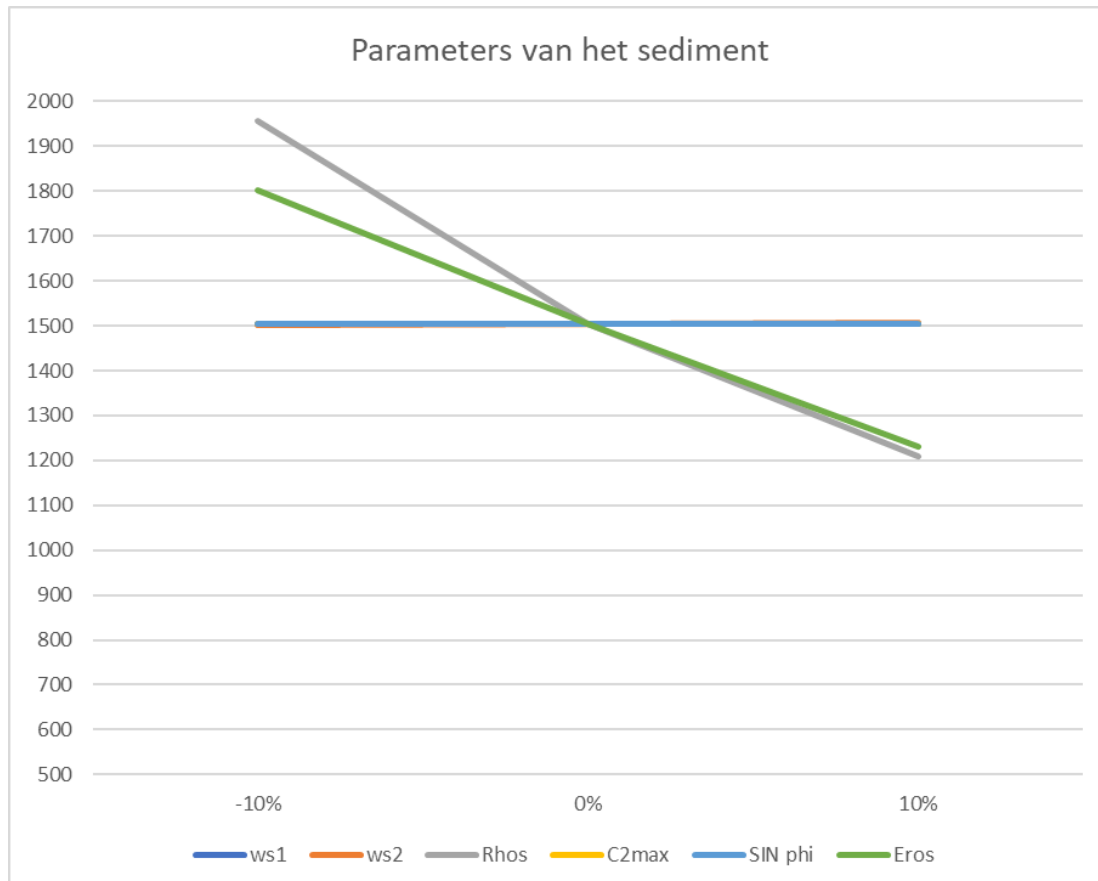
Gevoeligheidsanalyse		Inputparameters			x-waarde			
Groep	Parameters	-10%	0%	10%	-10%	0%	10%	opm.
Sediment	ws1	0,00009	0,0001	0,00011	1503,9	1503,9	1503,9	
	ws2	0,00009	0,0001	0,00011	1502,2	1503,9	1506,2	
	Rhos	2385	2650	2915	1957	1503,9	1208,8	
	C2max	0,1017	0,113	0,1243	1503,9	1503,9	1503,9	
	SIN phi	0,45	0,5	0,55	1503,9	1503,9	1503,9	
	Eros	0,00009	0,0001	0,00011	1802,5	1503,9	1229,9	
Water	Rhow	922,5	1025	1127,5	1538,8	1503,9	1498,4	
	Nuo	1,18E-06	1,31E-06	1,44E-06	1503,9	1503,9	1503,9	
Bed	Bed slope	0,0315	0,035	0,0385	1353,9	1503,9	1689,6	
	Chezy C	104,4	116	127,6	438,3	1503,9	2000	Meer dan
	Por	0,54	0,6	0,66	1499,7	1503,9	1508	
	Tau crit dep	0,027	0,03	0,033	1503,9	1503,9	1503,9	
	Tau crit ero	0,117	0,13	0,143	1137,6	1503,9	1883,4	
	Wid	0,000009	0,00001	0,000011	1503,9	1503,9	1503,9	
	Wbd	0,000009	0,00001	0,000011	1506,6	1503,9	1501,2	
Standaard	h20	1,1574	1,286	1,4146	1584,7	1503,9	1437,1	
	c20	154,8	172	189,2	1404,1	1503,9	1597,3	
	Fr20	1,35	1,5	1,65	1503,2	1503,9	1530,5	
	c1	0,0027	0,003	0,0033	1503,9	1503,9	1503,9	
Kalibratie	Resi	0,18	0,2	0,22	1194,9	1503,9	1777,5	
	Resb	0,9	1	1,1	1801,1	1503,9		
	Rewi	0	0	0,1		1503,9	624,9	
	Rewb	0,9	1	1,1	1506,6	1503,9		

Tabel B4.1 Resultaten van de gevoeligheidsanalyse op het TCMUD-model.

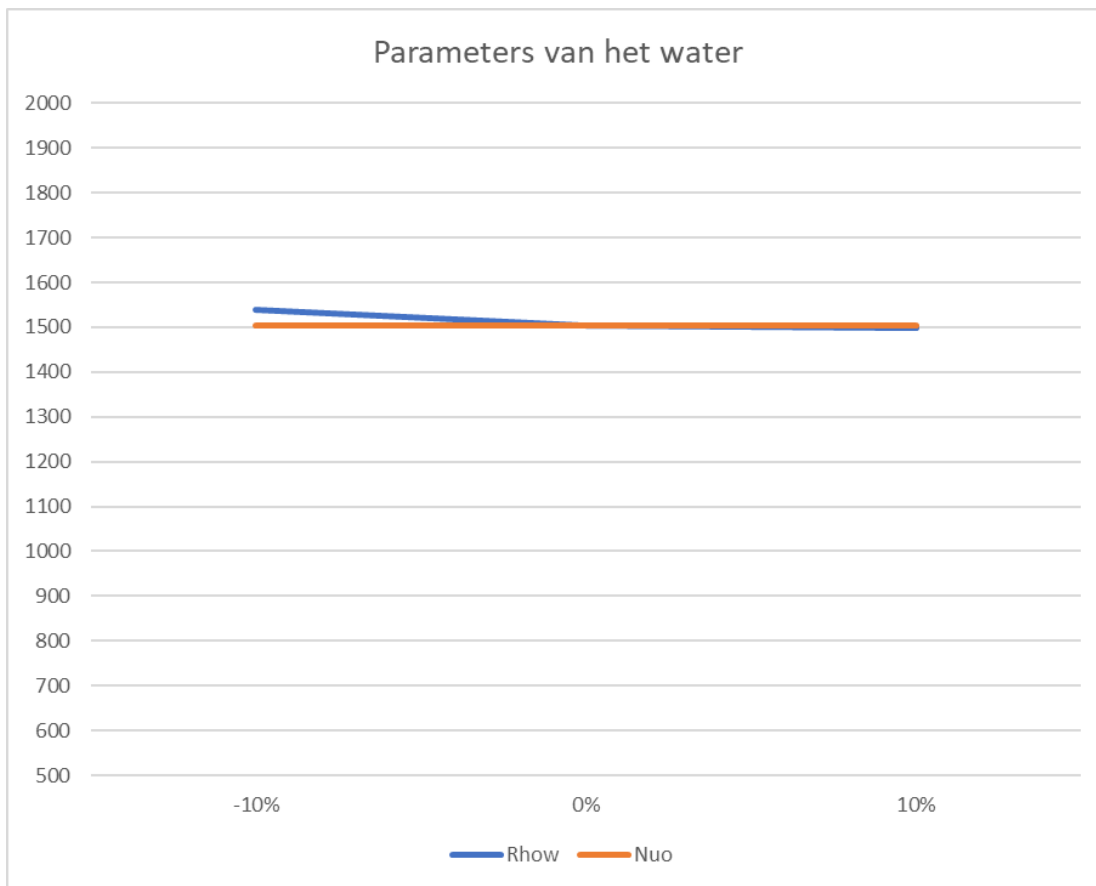
De resultaten zijn verwerkt in onderstaande figuren, zodat er goed kan worden geanalyseerd welke waarden de meeste impact hebben op de x-waarde. Allereerst zijn alle parameters in één figuur weergegeven. (Zie figuur B4.1). Doordat dit onoverzichtelijk wordt is ervoor gekozen om de parameters ook per groep in een figuur weer te geven. Dit zijn de figuren B4.2, B4.3, B4.4, B4.5 en B4.6.



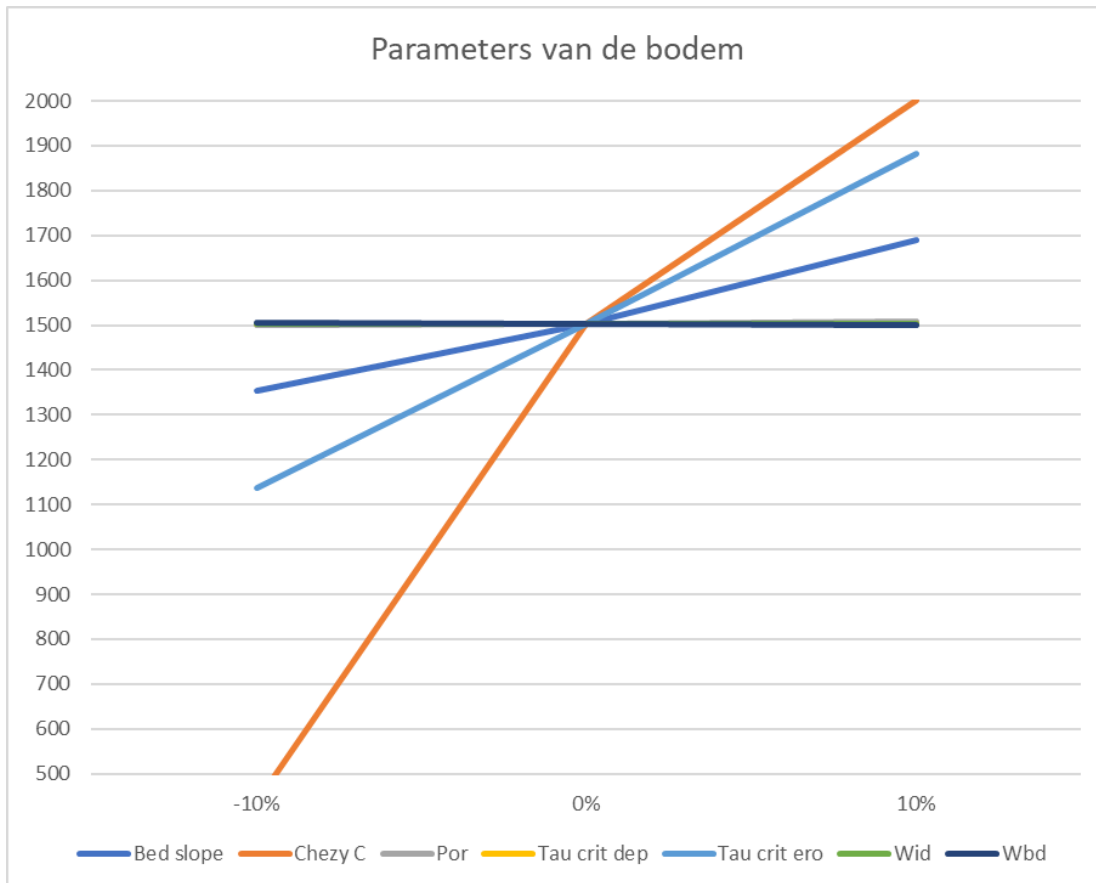
Figuur B4.1 Vergelijk van de gevoeligheid van alle parameters van het TCMUD-model.



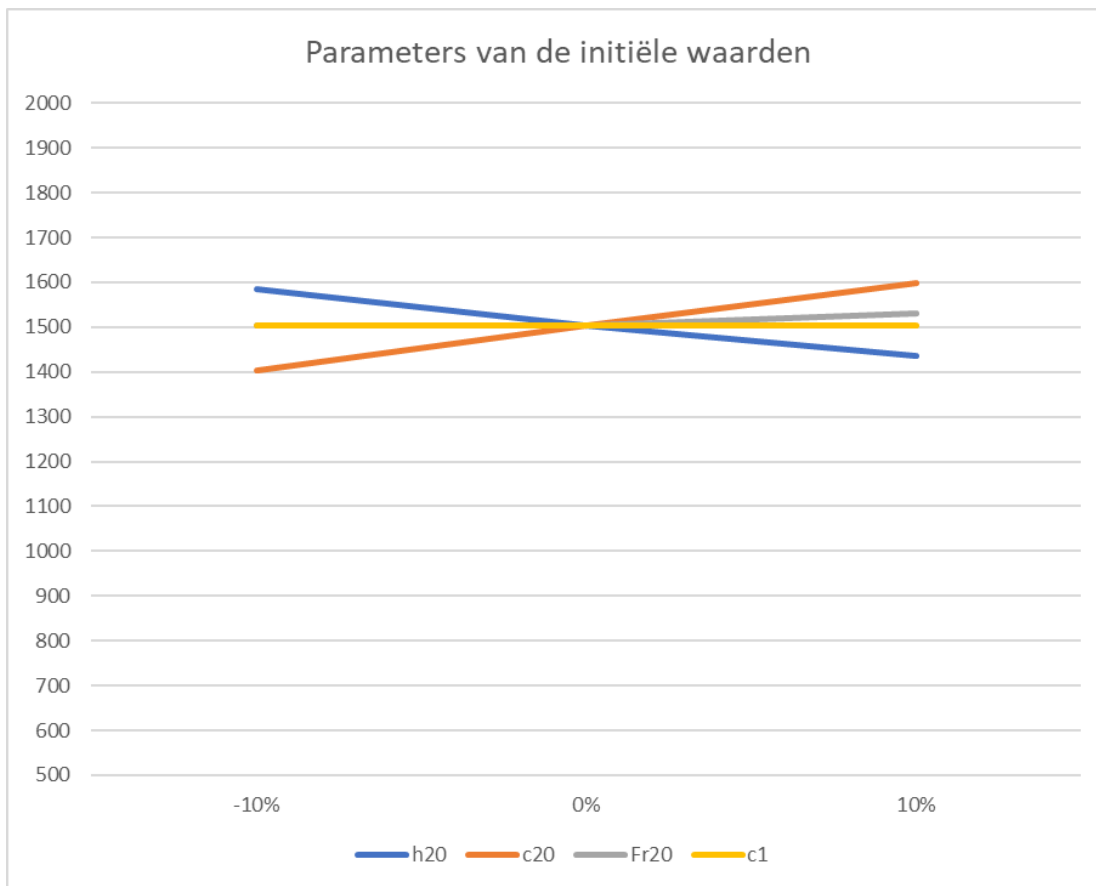
Figuur B4.2 Vergelijk van de gevoeligheid van parameters van het sediment van het TCMUD-model.



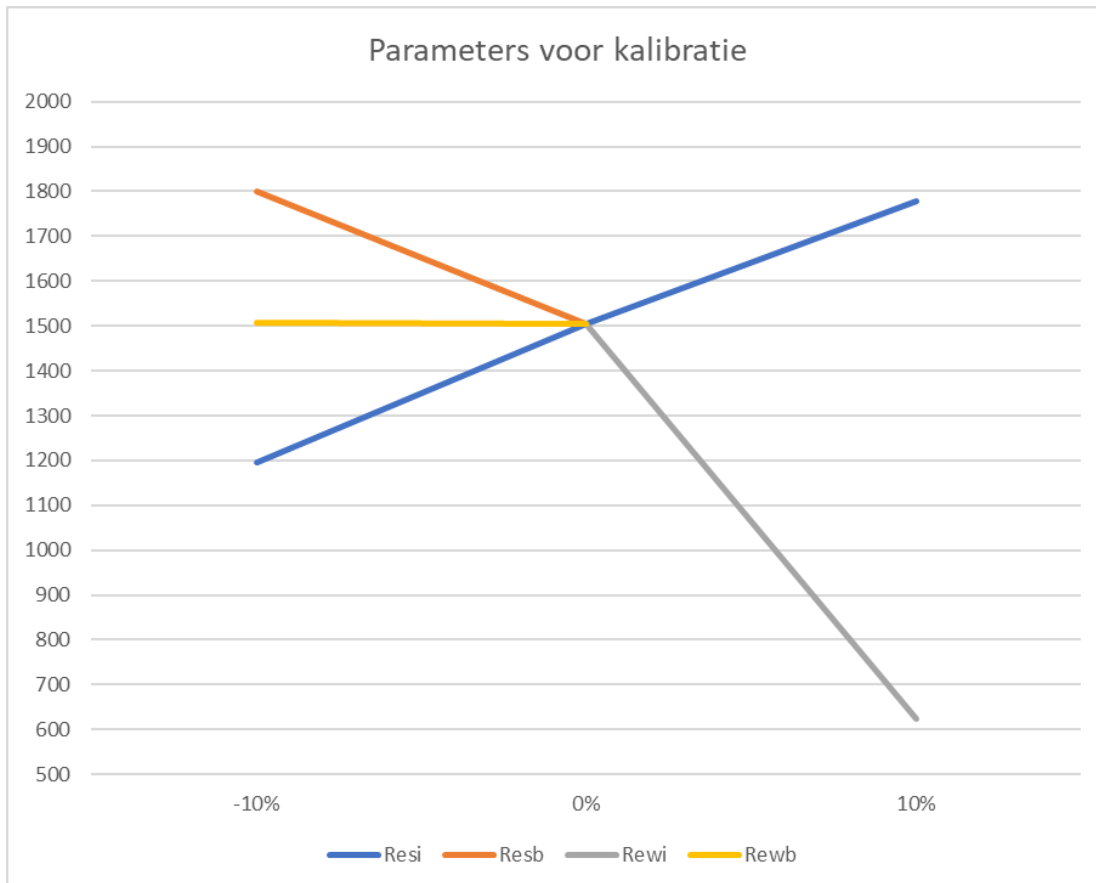
Figuur B4.3 Vergelijk van de gevoeligheid van parameters van het water van het TCMUD-model.



Figuur B4.4 Vergelijk van de gevoeligheid van parameters van de bodem van het TCMUD-model.



Figuur B4.5 Vergelijk van de gevoeligheid van parameters van de initiële waarden van het TCMUD-model.

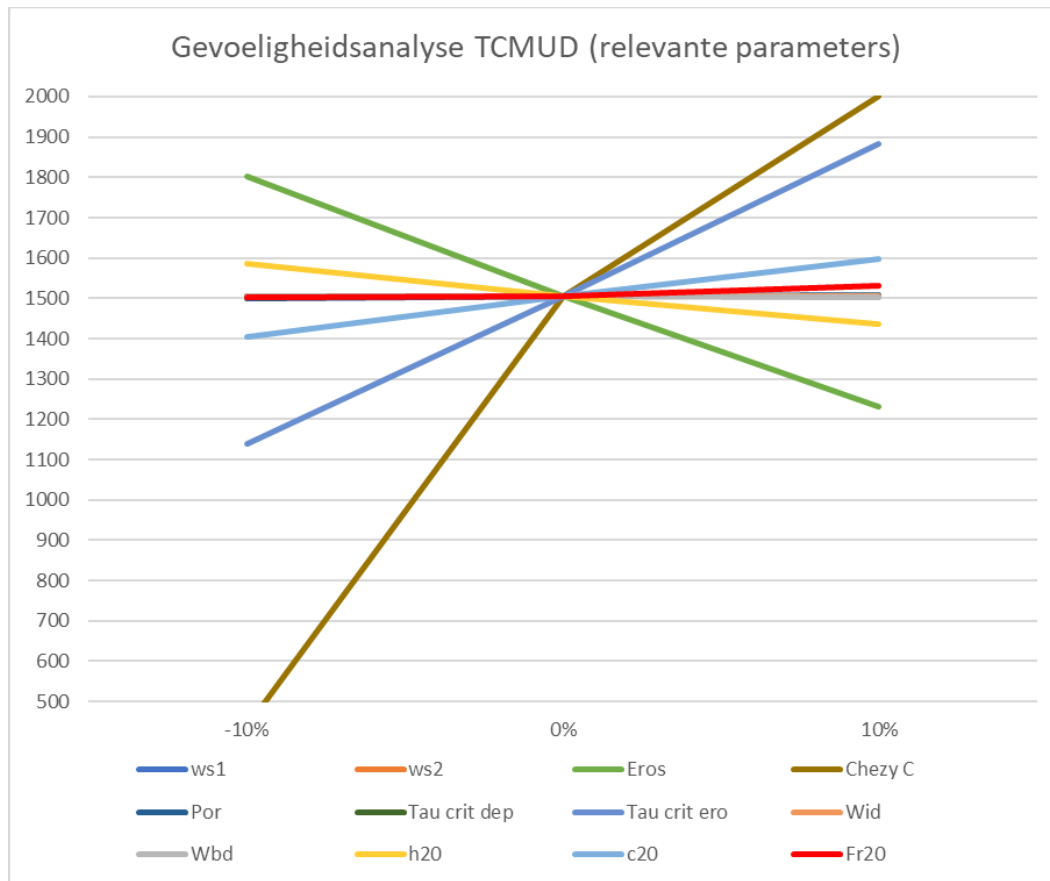


Figuur B4.6 Vergelijk van de gevoeligheid van parameters voor kalibratie van het TCMUD-model.

Om overzichtelijk te maken welke parameters van invloed zijn, worden parameters met de volgende eigenschappen uit figuur B4.1 verwijderd:

- Geen of nauwelijks effect op het Froude getal;
- Parameters die vrij zeker zijn;
- Kalibratieparameters.

Door het verwijderen van deze parameters uit figuur B4.1 blijven de relevante parameters over. Dit resultaat is te zien in onderstaand figuur.



Figuur B4.1 Vergelijk van de gevoeligheid van relevante parameters van het TCMUD-model.

B4.3 Analyse

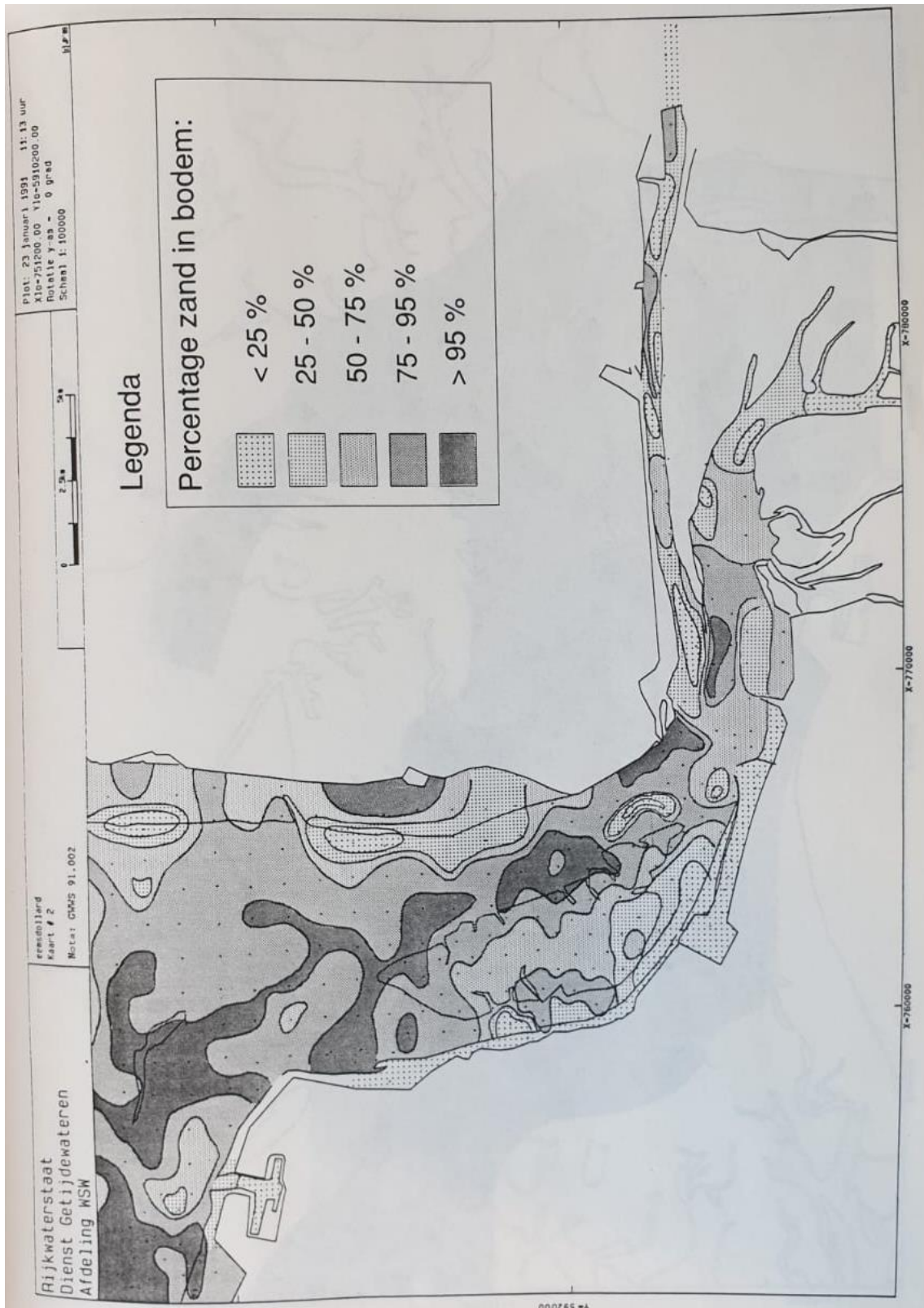
Concluderend, naar aanleiding van bovenstaande grafiek, kan gezegd worden dat het model het meest afhankelijk is van de Chézy coëfficiënt. Hierbij dient gezegd te worden dat de +10%-waarde van de Chézy coëfficiënt wordt onderschat doordat er tijdens deze analyse niet verder is gesimuleerd dan een x-waarde van 2000 meter.

Andere parameters die sterk van invloed zijn, zijn de erosie coëfficiënt en de kritische schuifsterkte van de bodem voor erosie. Parameters die ook redelijke invloed hebben op de resultaten zijn de inputparameters dikte en concentratie van de sliblaag.

Bijlage 5: Verdeling van het zand- en slibpercentage

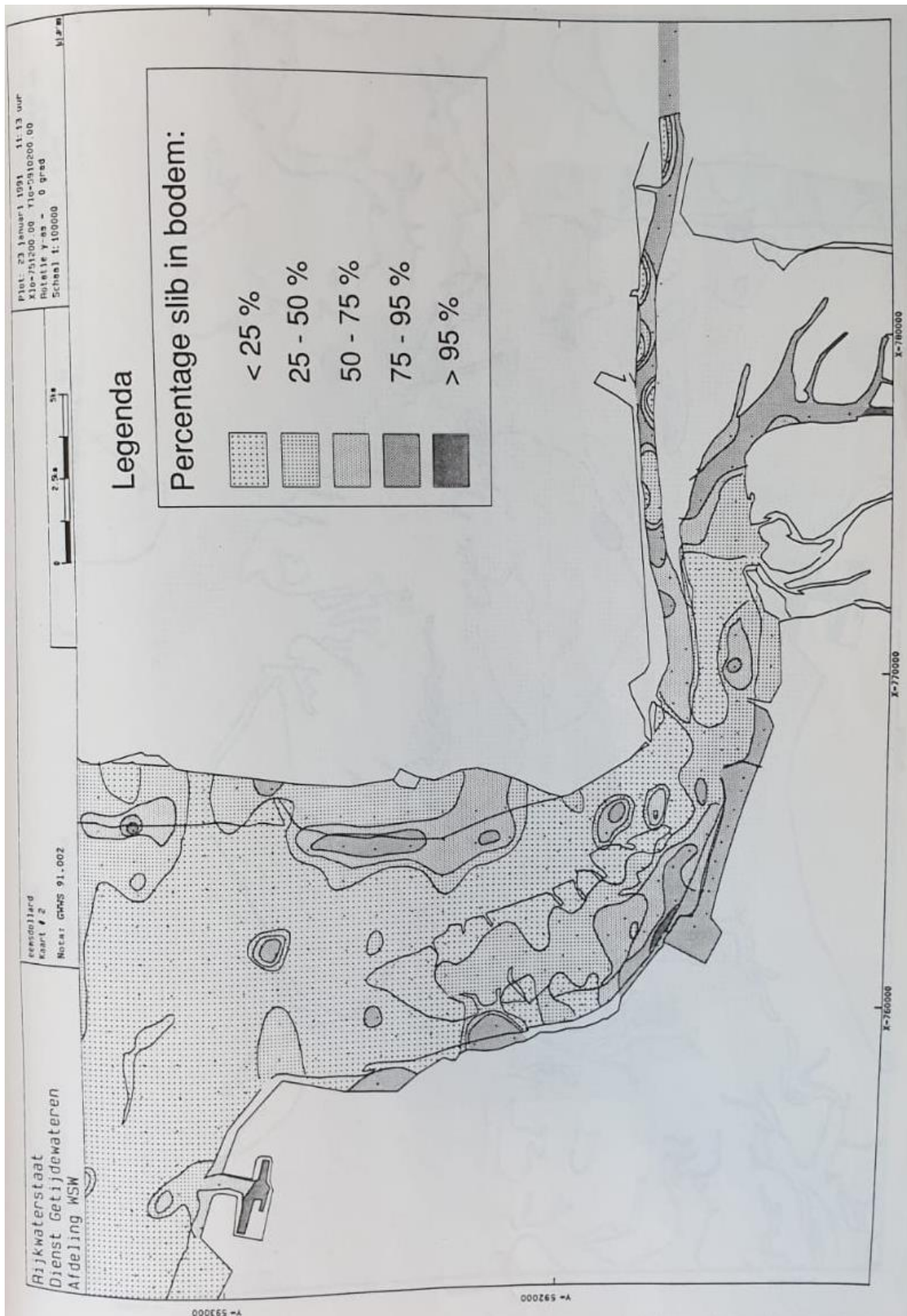
In deze bijlage zijn twee figuren weergegeven uit het rapport van Van Heuvel over de zandpercentage en slibpercentage in het Eems-Dollard Estuarium. (Van Heuvel, 1991).

B5.1 Zandpercentage in de bodem



Figuur B5.1 Verdeling van het zandpercentage in het zuidelijk deel van het Eems-Dollard estuarium. (Van Heuvel, 1991).

B5.2 Slibpercentage in de bodem



Figuur B5.2 Verdeling van het slibpercentage in het zuidelijk deel van het Ems-Dollard estuarium. (Van Heuvel, 1991).

Bijlage 6: Interview met Fugro NL BV

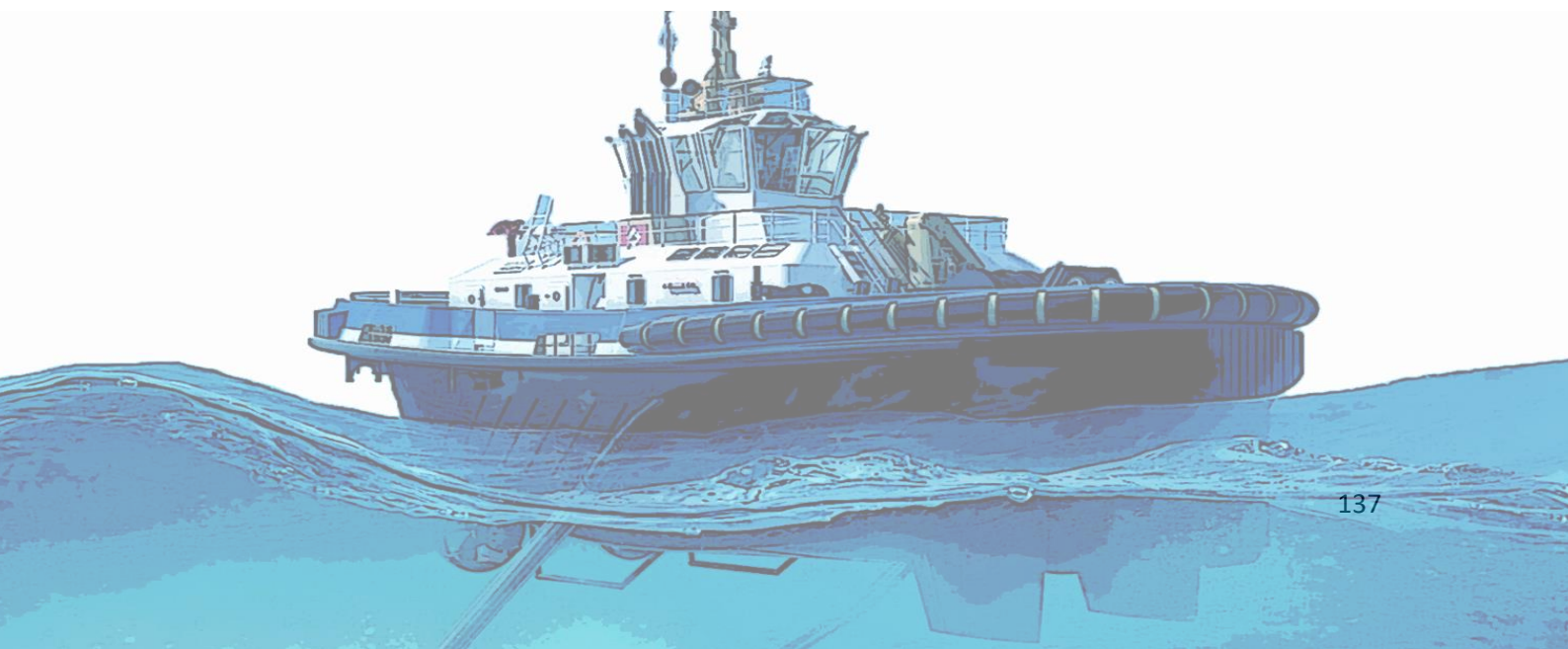


GRONINGEN SEAPORTS

Interview met Fugro NL BV

Afstudeerstage Groningen Seaports

Opgesteld door :	Stefan Steenhuis
Schoolinstituut:	Hanzehogeschool Groningen
E-mailadres:	s.steenhuis@st.hanze.nl
Gesprek met:	René Barth en Reinder Meinsma
Bedrijf:	Fugro NL BV
Locatie:	Pop Dijkemaweg 72A, Groningen
Onderwerp:	Onderzoek verlaging zanddrempel
Interview type:	Ongestructureerde interview
Versie:	1.1 – Definitief
Datum:	12-11-2019



Topiclijst

Topics	Subtopics	Voorbeeldvragen
Delft3D	-Toepasbaarheid	- Gaat dit model de werkelijkheid nabootsen? - Hoe ga je om met de uitkomsten van het model? - Op welke parameters kan het model worden gevalideerd? En in hoeverre moet dit overeenkomen met de werkelijkheid? - Moet dit worden uitbesteed? En zo ja, hoe kan ik of GSP de modelleers benaderen?
	-Tijdsduur	Hoelang duurt het modelleren?
	-Betrouwbaarheid	- Is dit model betrouwbaar? Hebben jullie dit model al eerder toegepast? - Is het nodig om meer rekenlagen toe te passen? (Voor een betere modellering)
	-Gegevens	Welke gegevens zijn nodig om de modelstudie uit te voeren?
'Fluid Mud Model'	-Theorie	- Hoe ziet dit model eruit? Is het een berekening via Excel? - Welke theorie hebben jullie toegepast? - Welke gegevens heb je nodig van de vloeibare sliblaag?
	-Excelsheet	Kan ik de berekening zelf uitvoeren in Excel? Of is dit te complex?
	-Betrouwbaarheid	Is dit model betrouwbaar? Hebben jullie dit model al eerder toegepast?
	-Tegenstroom	Houdt het model ook rekening met dichtheidsstroom door middel van verschil in saliniteit?
Vloeibare sliblaag	-Natuurlijke helling	Zal een natuurlijke helling ervoor zorgen dat de vloeibare sliblaag niet ontstaat?
KSN-methodiek	-Verband met zanddrempel	In dit rapport is een optimale situatie voor de KSN-methode bepaald door het verlagen van de drempel en de KSN-methodiek te combineren, is er bij de verlaging van de drempel ook vanuit gegaan dat een gedeelte van het slib mogelijk zou wegvloeien?
Zanddrempel	-Wederkeer	Verwachten jullie dat de zanddrempel zich weer opnieuw vormt na verwijdering? En hoe snel zou dit gaan?
	-Nieuwe havenmonding	Gaat de verlaging van de zanddrempel ervoor zorgen dat de haven meer aanslibt?
Overige onderzoeken		- Op welke wijze zou ik nog meer het gedrag van de vloeibare sliblaag kunnen testen? - Zou een kleine verlaging van de drempel al een indicatie kunnen geven? Of een schaalmodel?

Antwoordformulier

Topics	Sub topics	Antwoorden/opmerkingen
Delft3D	-Toepasbaarheid	Dit model gaat de werkelijkheid nabootsen mits er een goede validatie is met bestaande gegevens. Op deze validatie worden de berekening in het model voortdurend aangepast om zo de werkelijke situatie te verkrijgen. Het model zelf uitvoeren is te complex en kost te veel tijd om dit te begrijpen en toe te passen. Bedrijven als Waterproof BV en Svasek hebben ervaring met het modelleren van sedimenttransport via Delft3D. Wanneer dit model nodig blijkt te zijn, is het verstandig één van deze bedrijven te benaderen. Deze bedrijven kunnen de toepassing van de verlaagde drempel vrijwel zeker simuleren.
	-Tijdsduur	De tijdsduur van een modellering zou kunnen worden nagevraagd bij Waterproof BV of Svasek.
	-Betrouwbaarheid	Het model is betrouwbaar wanneer de validatie gegevens kunnen worden benaderd.
	-Gegevens	Een belangrijke parameter voor het model is de concentratie. Dit kan worden bepaald met een OBS meter van het bedrijf Nortek. In het verleden zijn al enkele ADCP-stromingsmetingen uitgevoerd door Baggerbedrijf de Boer.
'Fluid Mud Model'	-Theorie	Bij Fugro gebruiken ze een model gemaakt door Leo van Rijn. Deze meneer is inmiddels gepensioneerd, maar nog steeds actief in het vakgebied. Het model van Leo van Rijn is gedeeld na het gesprek. De theorie achter het model is zeer ingewikkeld en zeker niet van belang om te begrijpen. De formules in het model zijn van WO-niveau of hoger. Het gaat er voor dit onderzoek om dat de juiste input in het model wordt verwerkt tot een output. De output die wordt verkregen door het model zijn de concentratie, de lengte en de hoeveelheid. De lengte is met name interessant voor het gebruik van de WID. De lengte geeft aan wanneer de stroom stagneert. Op deze plek is het relevant om de stroom een boost te geven met bijvoorbeeld de WID. Hierdoor kan de stroom verder afstromen.

-Excelsheet	Het 'Fluid Mud Model' is inderdaad een Excelsheet. Leo van Rijn heeft deze Excelsheet ontwikkeld. Hij doet veel met Excelsheets, omdat hij vaak teruggaat naar basisprincipes om problemen op te lossen. Leo van Rijn heeft tevens ongeveer 50% van de formules van Delft3D ontwikkeld. Hij heeft ook een website (https://www.leovanrijn-sediment.com/) waar achtergrondinformatie is te vinden over het onderzoek. Tevens heeft hij een keer een notitie gemaakt over de WID. Dit document is gedeeld na dit interview.
-Betrouwbaarheid	Voor het onderzoek is het relevant om na te gaan welke dingen echt van belang zijn om te weten en in op welk niveau er een oplossing moet komen. Hetzelfde geldt voor de parameters voor de modellen. Een voorbeeld hiervan zijn de meer dan 50 parameters die het gedrag van de vloeibare sliblaag bepalen. Echter zijn er een paar parameters, zoals organisch gehalte, zandfractie, dikte en concentratie, bepalender dan de rest. Door deze scheiding te maken in het onderzoek wordt het makkelijker om een conclusie te maken. Het is van belang in het beginstadium om onderzoeken te kiezen die van belang zijn en vooral niet te complex zijn. Deze onderzoeken geven een uitkomst weer die vervolgens als aanbeveling kan worden gebruikt voor een vervolgonderzoek.
-Tegenstroom	In dit model is de dichtheidsstroom door een zoete binnenhaven niet meegenomen in het 'Fluid Mud Model'. De afstand die de zouttong in de haven komt is waarschijnlijk ook de afstand hoever aanslibbing door een dichtheidsstroom plaatsvindt. Het water van de zouttong (ongeveer 1080 kg/m³) en het zoetere water uit de havenmonding (ongeveer 1,020 kg/m³) stromen over elkaar heen. Waarbij de zouttong logischerwijs beneden stroomt doordat deze een grotere dichtheid heeft. De lagen vervloeien niet in elkaar en in de praktijk is dit ook te zien. Filmpjes van deze overgang zijn te vinden op de site van de universiteit van Antwerpen. De overgang tussen zoet en zout water lijkt als het ware een soort muur te zijn.
Vloeibare sliblaag	-Natuurlijke helling Een natuurlijke helling zorgt er niet voor dat de haven niet meer aanslibt. Tevens is er waarschijnlijk geen verband met het ontstaan van de vloeibare sliblaag en de drempel. Wel blijft de sliblaag liggen doordat het niet kan afstromen door de aanwezigheid van de drempel.

KSN-methodiek	-Verband met zanddrempel	In het rapport van R. Meinsma over het slibvaren is er geen rekening gehouden met de afstroom van de vloeibare sliblaag bij de berekening van de havenfactor.
Zanddrempel	-Wederkeer	De informatie over de wederkeer van de zanddrempel is te halen uit de morfologische 3D modellen. Delft3D zou door Waterproof BV of Svasek kunnen worden uitgevoerd om dit te bepalen.
	-Nieuwe havenmonding	De verwachting van René Barth en Reinder Meinsma is dat de sliblaag gaat afstromen wanneer de drempel wordt verlaagd. Dit lijkt vooral aannemelijk aan de hand van de dwarsprofielen.
Overige onderzoeken		Voorgesteld wordt om dwarsdoorsnedes te maken van peilingen van het verleden. Dit aan de hand van de x-, y- en z-data van de 33kHz en 210kHz metingen. René en Reinder verwachten dat de dwarsdoorsnedes gemaakt kunnen worden met de software van de peilkaarten. Eventueel zou er met Reinder Meinsma contact kunnen worden gelegd om andere software te krijgen die dit kan doen. De analyse is interessant omdat er in het verleden al een verlaging van enkele centimeters van de drempel is geweest. Een ander onderzoeksvoorstel was om de zuigkop van een hopper op een diepte te plaatsen voor de drempel. Die diepte moet relevant zijn aan de diepte waarop de drempel uiteindelijk moet komen. Door op deze locatie een tijd te baggeren kan het gedrag van de sliblaag worden geanalyseerd. Wordt het bijvoorbeeld alleen boven de zuigkop lager of gaat de gehele sliblaag omlaag? Een andere optie om de aanslibbing van de haven te berekenen is de methode van Eysink. Dit zou kunnen worden gebruikt als simpel alternatief in plaats van het modelleren met Delft3D. Deze methode hoeft niet te worden uitbesteed.
Overige opmerkingen		René Barth en Reinder Meinsma stellen voor om de concentratie te meten op de drempel om de uitstroom door gebruik van de WID te bepalen. Dit kan worden gedaan met een ADP-meter die over de breedte van de drempel kan worden geplaatst. Deze ADP kan een range aan concentraties meten die vooraf zijn ingesteld. Waardoor de afstroom van de vloeibare sliblaag kan worden gedetecteerd. Er zijn twee omstandigheden waarop deze test kan worden uitgevoerd. Dit zou kunnen door de stroming met en zonder WID te meten bij hetzelfde. Een andere optie is om vlak voordat de WID gaat baggeren te beginnen met meten. Met deze methode kan de afstroom worden benaderd van de WID.

Bij de eerste onderzoeken wordt er meestal eerst op een minder detail-niveau de oplossing onderzocht. Vervolgens wordt er steeds meer op detail-niveau gekeken.

In de haven van Rotterdam zijn ook proeven gedaan met een WID dit is verteld tijdens de CEDA dagen in Rotterdam. Contactpersoon was hier Ronald Pieters.

R. Meinsma en R. Barth vonden het een interessant onderzoeksonderwerp. Na het einde van de stageperiode zal het verslag worden opgestuurd. Wanneer er later meer informatie moet worden verkregen of om advies te vragen waren de heren benaderbaar.

Voorbereiding

Benodigde documenten:

- Uitprinten interview formulier
- Uitprinten Onderzoek: 'Duurzaam havenbeheer'
- Uitprinten dwarsprofiel van het havenkanaal en monding
- Uitprinten rapport van EcoShape
- Uitprinten onderzoeksvoorstel van Semaso

Conclusie

Het gesprek met René Barth en Reinder Meinsma was zeer interessant en verhelderend. Er is veel informatie verkregen. Ook zijn er wat lijnen gelegd die ik mogelijk zou kunnen benaderen voor meer informatie. Tevens is er door dit gesprek toegang tot het Fluid Mud Model. Uit het gesprek zijn een paar dingen naar voren gekomen die van belang zijn voor het onderzoek. Deze zijn hieronder puntsgewijs opgesteld:

- Een goede structuur van een onderzoek is om van grof naar fijn te werken;
- De methode van Eysink geeft ook een benadering weer van de extra aanslibbing in de haven en samen met het Fluid Mud Excelsheet zou er al een beeld kunnen worden gevormd van de consequenties van het verlagen van de drempel;
- Gebruik eerst deze methodes om aan Groningen Seaports een aanbeveling voor een modelstudie te doen;
- Probeer met Leo van Rijn een interview te regelen. Hij weet heel veel van dit onderwerp af en zou mogelijk betere antwoorden kunnen geven;
- Analyseer bestaande peilgegevens over de jaren door middel van dwarsdoorsneden en kijk naar de mogelijkheden om de baggerproef voor de drempel uit te voeren.

Door de besproken punten wordt hoogstwaarschijnlijk het plan van aanpak aangepast. De volgende handelingen worden uitgevoerd op basis van het interview:

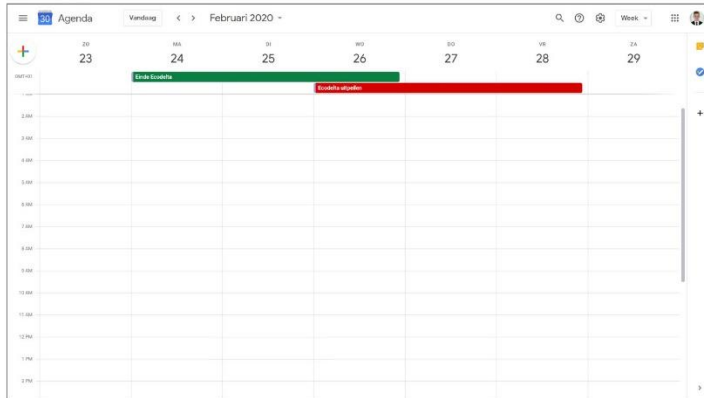
- Uitzoeken welke parameters er nodig zijn om de berekening van Eysink en het Fluid Mud Model te kunnen berekenen;
- Een meetprogramma opstellen om aan deze parameters te komen of deze parameters bepalen aan de hand van voorgaande onderzoeken;

- Alternatieven van het ontwerp van de drempel bedenken en de kosten worden berekend om de ontwerpen te realiseren;
- De berekeningen van de alternatieven met de methode van Eysink en het Fluid Mud Model. De resultaten worden vervolgens vergeleken.;
- Vervolgens wordt er met deze gegevens een multi-criteria analyse gemaakt. Bij een positief resultaat zou er een aanbeveling komen om een modelstudie uit te voeren. Hierdoor zal een betere benadering van het aanslibben worden berekend en is tevens te bepalen of en hoe snel de zanddrempel terugkeert. Bij een negatief resultaat komt er een adviesrapport dat aangeeft dat dit niet de juiste optie is.

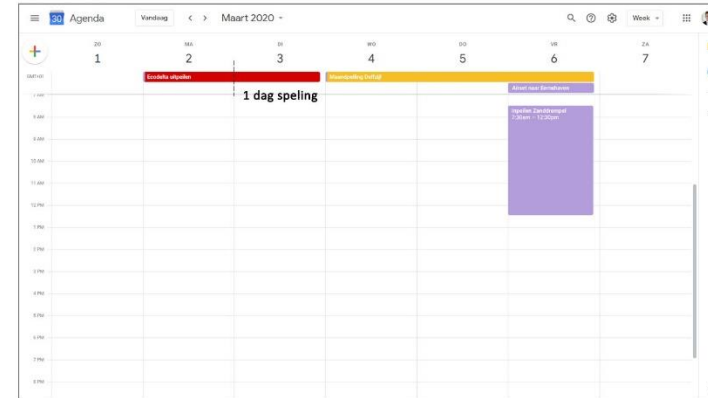
Bijlage 7: Planning Peilwerkzaamheden

Planning peilwerkzaamheden week 9-12

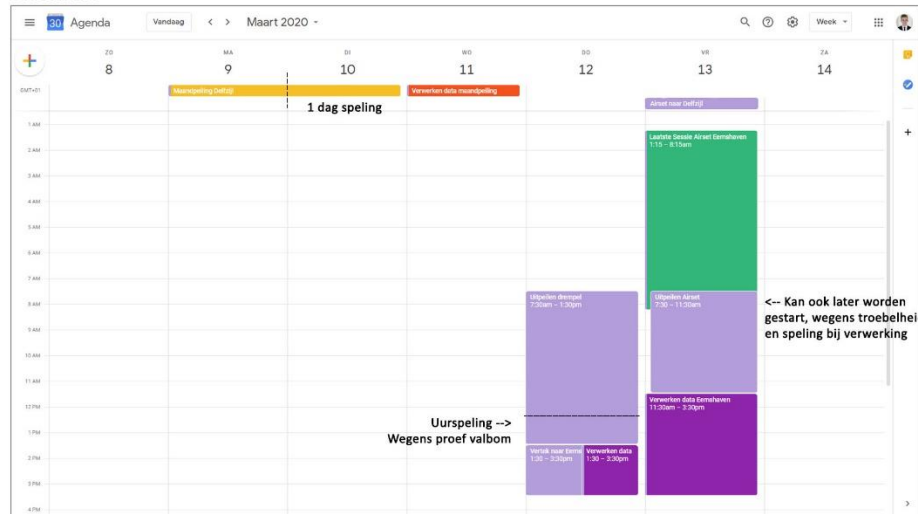
Week 9



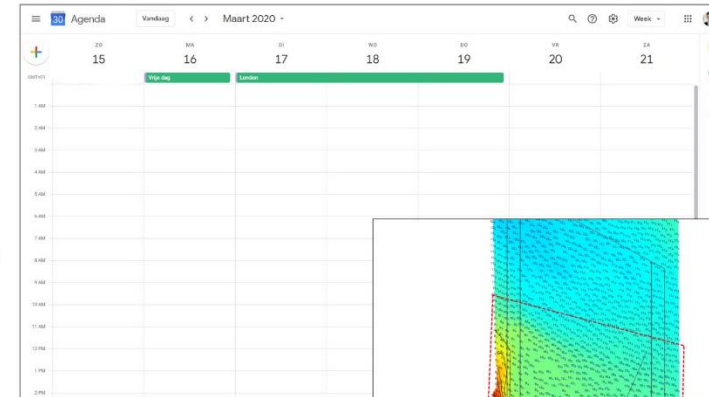
Week 10



Week 11



Week 12

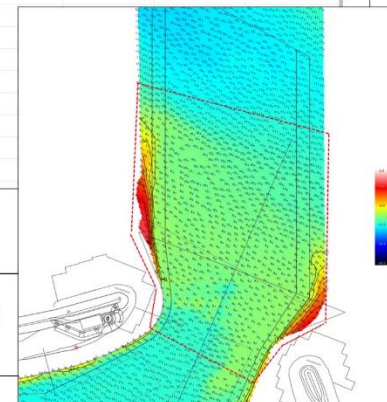


Uitgangspunten:

- Ecodelta eindigt halverwege week 9
- 3 dagen peilen + 1 dag verwerken Eemshaven
- 4 dagen peilen + 1 dag verwerken Delfzijl

- Airsiet stopt op vr 6 mrt om 2:00 uur.
- Airsiet begint op ma 16 mrt.
- Uitspeling Ecodelta = inpeiling Airsiet Eemshaven

Peilvak -->
De zanddrempel



Bijlage 8: Delft3D

Zoals genoemd op de site van Deltares is Delft3D een software die de stroming, sedimenttransport, morfologie, golven, waterkwaliteit, ecologie en de interactie tussen deze processen in 3D simuleert. Hiermee kan de bodemsamenstelling in de loop van de jaren worden bepaald. Het D3S-model wordt hieronder besproken. Het D3S-model is ontwikkeld om het slibtransport en het zandtransport te simuleren.

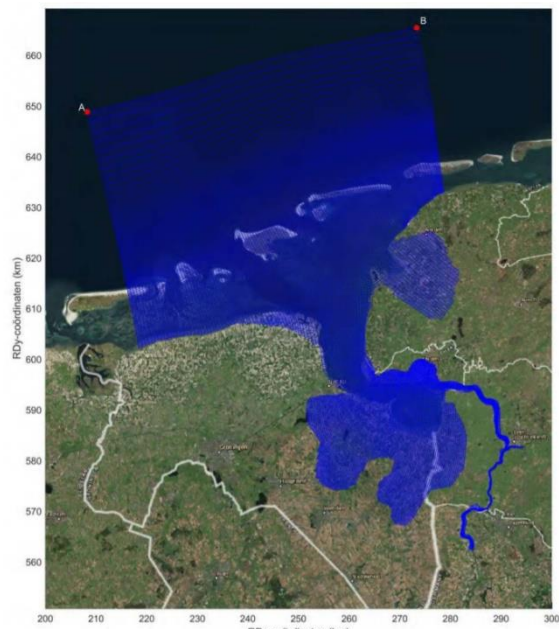
D3S-model

Het D3S-model wordt in het rapport van Van Maren beschreven als het model voor slibtransport. Het maakt gebruik van de waterbeweging en de bodemligging die gegenereerd is door het LZS-model (zandtransportmodel). Het volgende wordt gezegd over het gebruik van de D3S-model: “Het huidige model kan echter gebruikt worden om flexibel het effect van verschillende bodemliggingen (huidig, toekomstig, en onder invloed van maatregelenrichtingen) op slibconcentratie door te rekenen.” (Van Maren, B. et al, 2017)

Opzet van het model

Het model is gebaseerd op de morfologische veranderingen van het LZS-model (zandtransportmodel) waarin het oudere slibmodel (WED-model) wordt gebruikt voor toepassingen op slibtransport. Het model wordt berekend met de bodemconfiguraties zoals gemeten in 2005, de huidige bodem en de berekende toekomstige bodem. Dezelfde berekeningen als het WED-model worden toegepast om het slibtransport te berekenen. Deze worden daarna gevalideerd met onder andere aanslibbing in de havens. Hiermee kan een inschatting worden gemaakt van de betrouwbaarheid van het model.

Het model heeft een rekenrooster die de maximale historische omvang van het estuarium omvat. Dit is te zien in figuur 5.5.1.



Figuur 5.5.1 Rekenrooster van D3S model. (Van Maren, B. et al, 2017).

In het model wordt uitgegaan van twee soorten slib die in valsnelheid verschillen. Hierdoor is er één slibfractie representatief aan geflocculeerd materiaal en één aan matig geflocculeerd. Dit wil zeggen dat één laag meer in suspensie is dan de andere laag. Het model gaat uit dat de bovenste deel van de sliblagen in volledige suspensie is en het meest wordt meegevoerd met de stroming. Het onderste gedeelte zal minder snel door de stroming worden.