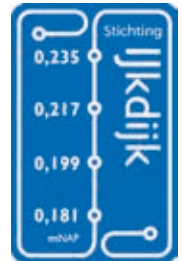
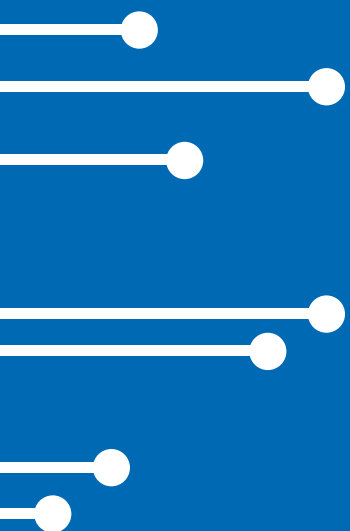


Eindrapport validatie-experiment zettingsvloeiing

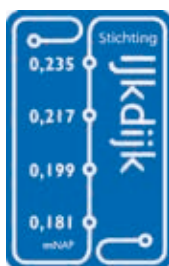
Metten aan zettingsvloeiing





Eindrapport validatie-experiment zettingsvloeiing

Metten aan zettingsvloeiing



Een project van Stichting FloodControl IJkdijk in samenwerking met het Nederlands bedrijfsleven.
Mede gefinancierd door het Ministerie van Economische Zaken, STOWA en het Hoogwaterbeschermingsprogramma en Rijkswaterstaat.

Auteurs: dr. G.A. van den Ham, Deltares
ir. D.R. Mastbergen, Deltares
dr. ir. A.R. Koelewijn, Deltares
drs. ing. C.K.E. ter Brake, STOWA/Deltares
ing. W.S. Zomer MSc., FloodControl IJkdijk

Vormgeving: mariëtte jongen vormgeving

Uitgave: Amersfoort: STOWA/Stichting FloodControl IJkdijk.

Rapportnummer 2015-08

ISBN 978.90.5773.672.8

Referentie: Ham, van den, G.A., Mastbergen, D.R., Koelewijn, A.R., Brake, ter, C.K.E. & Zomer, W.S. (2015). Eindrapport Validatie-experiment zettingsvloeiing, Meten aan zettingsvloeiing. Amersfoort: STOWA/FloodControl IJkdijk.

© 2015 FloodControl IJkdijk/STOWA

Trefwoorden:
zettingsvloeiing, monitoring, IJkdijk, FloodControl IJkdijk, Westerschelde, plaatval, bresvloeiing,
Plaat van Walsoorden.

Met tekstuele bijdragen van: Fugro Geoservices BV, Miramap BV, Nelen en Schuurmans BV, AGT International BV, Target Holding BV, Stichting Deltares, National Oceanography Centre.
Externe referenten: ir. J.T.M. van der Sande (Waterschap Scheldestromen), H. Waals (Waterschap Hollandse Delta), prof.dr.ir. A. Bezuijen (Universiteit van Gent).

Eindrapport validatie-experiment zettingsvloeiing

Metten aan zettingsvloeiing

Auteurs

dr. G.A. van den Ham *Deltares*

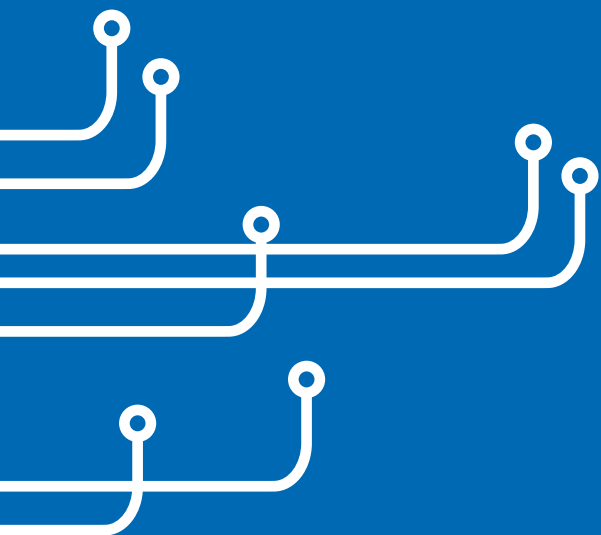
ir. D.R. Mastbergen *Deltares*

dr. ir. A.R. Koelewijn *Deltares*

drs. ing. C.K.E. ter Brake *STOWA/Deltares*

ing. W.S. Zomer *MSc. FloodControl IJkdijk*

maart 2015



Voorwoord

Stichting IJkdijk, thans FloodControl IJkdijk, heeft in 2012 de voorbereidingen gestart voor de realisatie van een grootschalig zettingsvloeiingsexperiment. Het werd een project in de Westerschelde waar op werkelijke schaal zettingsvloeiingen zijn geïnitieerd en vervolgens door een keur aan systemen zijn gemonitord. Dit project maakt onderdeel uit van het IJkdijk-ontwikkelprogramma dat de ontwikkeling van algemeen toepasbare monitoringssystemen voor waterkeringen nastreeft.

Met het einde van het zettingsvloeiingsexperiment is het laatste grootschalige validatie-experiment van het IJkdijk-ontwikkelprogramma uitgevoerd.

Het project had door de locatie in de Westerschelde een totaal andere dynamiek en omvang dan de voorgaande experimenten. De complexiteit van de natuurlijke omstandigheden ter plaatse gecombineerd met de professionaliteit van het projectteam en betrokken participanten hebben wederom tot een succesvol project geleid met unieke resultaten. Voor het eerst in de wereld zijn zettingsvloeiingen met *state of the art* meettechnieken tot in detail waargenomen en bemeten. Het project heeft aangetoond dat er met frequente monitoring inzicht is verkregen in het optreden van zettingsvloeiing. De ontwikkelde kennis ondersteunt beheerders in hun praktijk en meetbedrijven in het kunnen voorzien van relevante data en informatie aan beheerders.

Het zettingsvloeiingsexperiment laat zien dat het meten aan faalmechanismen voor waterkeringen iedere keer anders kan zijn. De dagelijkse dynamiek in de vooroever maakt dat de meetstrategie voor dit mechanisme anders is dan die voor mechanismen zoals piping en macrostabiliteit. De combinatie van de gevalideerde kennis en systemen in validatie-experimenten en LiveDijk projecten, stelt beheerders in staat om life cycle management van dijken nader vorm te geven en kwalitatief te verbeteren.

De grootste uitdaging lijkt nu te liggen in de stap van gevalideerde innovaties naar toepassing in de praktijk. Voor het kunnen valoriseren hiervan is en blijft intensieve samenwerking tussen de partners van de gouden driehoek nodig. Beheerders en bedrijven kunnen tot elkaar komen in het streven naar reguliere toepassing als kan worden voldaan aan elkaars doelstellingen. Kennisinstellingen spelen een belangrijke onafhankelijke rol in kwaliteitsbewaking. De gouden driehoek van FloodControl IJkdijk blijft hieraan werken in de komende jaren.

Ik daag u uit om samen met FloodControl IJkdijk de bewezen innovaties in uw praktijk toe te passen zodat ook u hiervan profiteert.

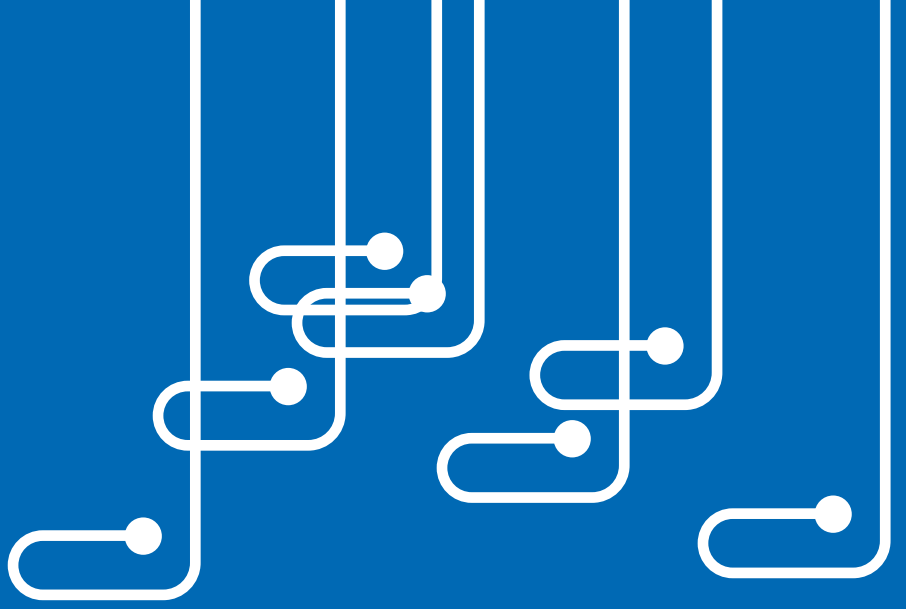
ir. H.C. Klavers

Voorzitter Stichting FloodControl IJkdijk

Inhoudsopgave

Samenvatting	9
Summary	11
Leeswijzer	13
1 Inleiding	15
1.1 Achtergrond	15
1.2 Mechanismebeschrijving	15
1.3 Omvang probleem	17
1.4 Kennisleemten	18
1.5 Validatie-experiment zettingsvloeiing	18
1.5.1 Doel- en vraagstelling	18
1.5.2 Opzet experiment	19
2 Beschrijving experiment	21
2.1 Locatie	21
2.1.1 Plaat van Walsoorden	21
2.1.2 Proefvak	21
2.1.3 Zettingsvloeiing juli 2014	23
2.2 Initiëren van een zettingsvloeiing	25
2.3 Definitie van een succesvolle proef	27
2.4 Meet- en monitoringsprogramma	27
2.4.1 Grondonderzoek	28
2.4.2 Meten aan faalmechanisme	28
2.5 Visualisatie, analyse en ontsluiting van de data	29
2.5.1 Visualisatie	29
2.5.2 Modellerings	29
2.5.3 Data-ontsluiting	29
3 Resultaten en evaluatie	31
3.1 Inleiding	31
3.2 Grond- en laboratoriumonderzoek	31
3.2.1 Inleiding	31
3.2.2 Overzicht meetpunten	31
3.2.3 Boringen en sonderingen	32
3.2.4 Hydraulic Profiling Tool (HPT)	36
3.2.5 Laboratoriumonderzoek	37
3.3 Meten aan het faalmechanisme	39
3.3.1 Multibeam	39
3.3.2 Subbottom profiler	42
3.3.3 M3 Sonar	43
3.3.4 ADCP	44
3.3.5 Waterspanningsmeters	45
3.3.6 Fugro Pressio Balg (FPB)	47
3.3.7 Laseraltimetrie	49
3.3.8 Airborne technieken	50

3.4	Visualisatie	57
3.4.1	ReadyMIND	57
3.4.2	Zettingsvloeiing App	59
3.4.3	Virtuele sensor Fugro	61
3.5	Modellering	62
3.5.1	Inleiding	62
3.5.2	HMBreach/HMTurb	63
3.5.3	Sliq2D	65
3.5.4	Retrobreach	66
3.5.5	Material Point Method	68
3.5.6	Delft3D-Flow	72
3.5.7	Target	75
3.6	Discussie	76
3.6.1	Meetmethoden	76
3.6.2	Visualisatietools	77
3.6.3	Modellen	77
4	Kennisopbouw faalmechanisme zettingsvloeiing	79
4.1	Welke bezwijkvorm treedt op?	79
4.2	Welke vragen blijven er nog over?	80
5	Conclusies en aanbevelingen	81
5.1	Conclusies	81
5.1.1	Algemeen	81
5.1.2	Relevante parameters	81
5.1.3	Inzetbaarheid meet- en data-analysesystemen	82
5.2	Aanbevelingen	84
5.2.1	Frequentie monitoring	84
5.2.2	Verbetering beoordelingsmethoden	85
6	Toekomstvisie	87
7	Literatuur	89



Samenvatting

Stichting IJkdijk¹ bereidde in het kader van het tweede IJkdijk-ontwikkelprogramma sinds 2012 een grootschalig experiment voor naar het faalmechanisme zettingsvloeiing en voerde dit uit in 2014, in de Westerschelde.

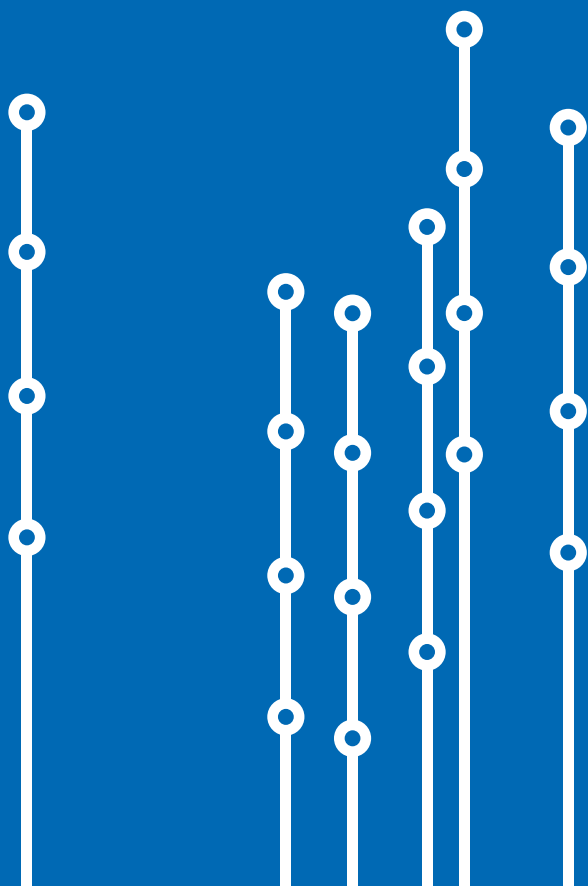
Zettingsvloeiing is een mechanisme waarbij zand in een onderwatertalud schijnbaar spontaan vervloeit, waardoor tot honderdduizenden kubieke meters zand over afstanden van wel honderden meters verplaatst kunnen worden. Wanneer een zettingsvloeiing plaatsvindt in of nabij een dijk, wordt dit ook wel oever- of dijkval genoemd. De waterkering kan hierdoor ernstig beschadigd raken en zijn waterkerende functie verliezen.

Stichting IJkdijk wenst met de uitvoering van het validatie-experiment meer inzicht te krijgen in de functionaliteit van dijkmonitoringsystemen voor het meten aan zettingsvloeiing. De hoofdvraag daarbij was in hoeverre waterbeheerders meettechnieken en data-analysesystemen kunnen inzetten in de huidige beoordeling van vooroevers die gevoelig zijn voor zettingsvloeiing. Daarnaast was er het doel om meer kennis over zettingsvloeiing te verkrijgen. Het experiment bood participerende bedrijven de mogelijkheid om relevante parameters te monitoren door middel van diverse meettechnieken en data-analysesystemen, die in het experiment op basis van werkelijke omstandigheden gevalideerd zijn. Gezien de zettingsvloeiingsproblematiek van waterbeheerders, het vigerende toetsingsbeleid en de aanwezige kennisleemten over het faalmechanisme, biedt dit bedrijven een marktperspectief.

Tijdens het validatie-experiment zijn meerdere kleinere zettingsvloeiingen geïnitieerd, waarbij de situatie succesvol gemonitord werd. Dit gebeurde in een vooraf gedefinieerd proefvak in de Westerschelde. Gedurende 8,5 dag werd in het proefvak gebaggerd om het talud instabiel te maken en zo een zettingsvloeiing te initiëren. Voor, tijdens en na het optreden van deze zettingsvloeiingen vonden monitoringsactiviteiten plaats.

Meettechnieken en data-analysesystemen bleken in staat om in gezamenlijk gedetailleerde informatie te verschaffen over de (veranderende) geometrie en grondeigenschappen van het proefvak in de Westerschelde. In het experiment zijn nuances en beperkingen over het functioneren van de afzonderlijke systemen geïnventariseerd. Beheerders kunnen deze informatie gebruiken voor een monitoringsprotocol waarmee zettingsvloeiing gevoelige oevers kunnen worden gemonitord. Bovendien is aan de hand van monitoring veel kennis over het faalmechanisme verzameld. Monitoring kan in de toekomst bijdragen aan kennis over het faalmechanisme, die wordt gebruikt voor de (door)ontwikkeling van het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI) en door het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), opdat het aandeel onterecht goed- of afkeuren in de toetsing teruggedrongen kan worden en maatregelen zoals bestorting geoptimaliseerd kunnen worden.

¹ Stichting IJkdijk is per januari 2015 formeel de stichting FloodControl IJkdijk geworden.



Summary

In 2012 the IJkdijk Foundation² prepared a validation experiment on a large scale with respect to flow slides in the context of the Second IJkdijk Development programme. The experiment was carried out in 2014 on a sand flat in the Western Scheldt estuary.

In case of a flow slide large amounts of sand seem to flow spontaneously along a relatively gentle slope. Hundreds of thousands cubic metres of sand can be displaced over hundreds of meters. Flow slides can cause significant damage when occurring in the vicinity of dikes and levees, which may be damaged and lose their flood defence function.

With the experiment the IJkdijk Foundation aims to gain more insight into monitoring of flow slides. The main research question was to find out how water managers could use measurement techniques and data analysis systems in the evaluation of coastlines and riverbanks for their safety against flow slides and furthermore to gain more knowledge about flow slides as a failure mechanism of dikes. The experiment gave the opportunity to participants to test measurement techniques and data analysis systems in practice. Considering the major threat due to flow slides, the high safety standards with respect to flooding as prescribed by the Dutch Water Act and the current lack of knowledge on this failure mechanism, participants are highly motivated to get their monitoring systems validated and thereby strengthen their market position.

The experiment took place at a sand flat situated in the Western Scheldt estuary. During the experiment multiple smaller flow slides occurred and were successfully monitored. Flow slides were initiated by means of steepening of the slope by dredging. Before, during and after the flow slides monitoring took place around the test site.

The experiment shows that measurement techniques and data analysis systems together are able to provide highly detailed information about the conditions under which a flow slide occurs and the process of a flow slide itself. Specifications and limitations of techniques and systems have been observed and documented. Water managers can use this information in designing a monitoring protocol as part of the evaluation of coastlines and riverbanks against flow sliding. Furthermore the experiment gained a lot of knowledge about the occurrence of and damage due to flow slides. It is expected that in the long term this will lead to improved and more accurate evaluation methods. It also shows that monitoring is a valuable method in developing knowledge.

2 From January 2015 the IJkdijk Foundation is named as Stichting FloodControl IJkdijk.

0,181
mNAP

0,235 0,199

35
0,235 0,217 0,181
17 mNAP

0,217 0,199

99 0,181
81 mNAP

NAP
0,181
mNAP

Leeswijzer

Het voorliggende rapport bevat de beschrijving van het validatie-experiment Zettingsvloeiing van Stichting Flood-Control IJkdijk. Het rapport is opgedeeld in 5 hoofdstukken. Het eerste hoofdstuk beschrijft het kader waarbinnen het experiment plaatsvindt: het tweede IJkdijk ontwikkelprogramma, en gaat in op de beschrijving van het faalmechanisme zettingsvloeiing en de kennisleemten hierin. Beide vormden de aanleiding voor het experiment. Ook bevat hoofdstuk 1 de doelstellingen en de vraagstelling van het experiment.

In hoofdstuk 2 volgt de beschrijving van het experiment, de locatie en de uitvoering ervan, evenals een overzicht van de deelnemende monitoringspartijen. De inzet van de monitoringspartijen wordt behandeld in hoofdstuk 3. Per meettechniek of data-analysesysteem is opgenomen: een beschrijving van de techniek of het systeem, de toepassing ervan en de resultaten. In de laatste paragraaf volgt de discussie over deze resultaten, waarin eventuele nuances rondom de uitkomsten worden aangebracht en waarin de beperkingen van meettechnieken of data-analysesystemen worden besproken.

Het rapport kent twee concluderende hoofdstukken. Hoofdstuk 4 behandelt de vraag wat er feitelijk tijdens het experiment in het proefvak gebeurde. Ook wordt antwoord gegeven op de in hoofdstuk 1 geformuleerde kennisvragen. Hoofdstuk 5 bevat de eigenlijke conclusie, waarin antwoord wordt gegeven op de hoofdvraag van het experiment en waarin aanbevelingen worden gedaan voor de monitoring van het faalmechanisme zettingsvloeiing.



1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Stichting IJkdijk en stichting FloodControl 2015 zijn in 2014 samengegaan in de stichting FloodControl IJkdijk. FloodControl IJkdijk werkt aan de ontwikkeling van kennis en technologieën om beter, sneller en kostenbesparend de veiligheidsnorm van de (Nederlandse) waterkeringen te behalen en te bewaken: 'Safety as a service'. In het verband van FloodControl IJkdijk worden projecten gerealiseerd en ontwikkelingen gestart die bijdragen aan betrouwbare, beschikbare, en complete waterveiligheidsinformatie. Onderdeel hiervan is de afronding van het Tweede IJkdijk Ontwikkelprogramma. Dit ontwikkelprogramma bestaat uit vier stappen:

1 Validatie-experimenten

Hierin wordt de toepasbaarheid op waterkeringen van monitoringssystemen onderzocht, inclusief integratie-, analyse- en visualisatiemethoden.

2 LiveDijk projecten

Gevalideerde systemen worden toegepast in en op in beheer zijnde dijken over enkele honderden meters, in de beheerpraktijk van dijkbeheerders.

3 LiveDijk XL

Enkele tientallen kilometers dijk wordt gemonitord met gelijke doelstellingen als in de LiveDijk projecten, aangevuld met de uitdagingen die deze opschaling met zich meebrengt.

4 Dijk Data Service Centrum

De ingewonnen gegevens worden opgeslagen en voor bewerking geschikt gemaakt in een nieuw databeheersysteem dat specifiek gericht wordt op dijkmonitoringssystemen.

Stichting IJkdijk heeft al in 2008, 2009 en 2012 validatie-experimenten uitgevoerd. Deze validatie-experimenten richtten zich op het toetsen van de toepasbaarheid van meet- en monitoringstechnieken in dijken die gevoelig waren voor de specifieke faalmechanismen macro-instabiliteit [Weijers, Elbersen, Koelewijn & Pals, 2009] en piping [Koelewijn, Pals, Sas & Zomer, 2010]. Geconcludeerd werd dat met behulp van monitoringstechnieken afschuivingen in de dijk (macro-instabiliteit) en ontwikkelingen in waterspanningen in en onder de dijk konden worden gemonitord. In 2012 werd aangetoond dat diverse dijkfaalmechanismen bovendien te voorspellen zijn aan de hand van monitoringssystemen [de Vries, ter Brake, Langius, van Lottum, Koelewijn & Zomer, 2013]. Beproefde monitoringssystemen worden in de praktijk toegepast in verschillende LiveDijken. Data van deze monitoringssystemen wordt op een uniforme manier opgeslagen in het Dijk Data Service Centrum. Deze ontwikkelingen leiden naar verwachting tot internationaal vermarktbare dijkmonitoringssystemen ("smart levees") en tot verbetering en vernieuwing van het Nederlandse dijkbeheer. Het ontwikkelprogramma wordt dan ook gesteund door zowel het Ministerie van Economische Zaken als het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

In de IJkdijk validatie-experimenten in 2008, 2009 en 2012 is aangetoond dat bij verschillende faalmechanismen het gedrag van de dijk real-time te volgen is met monitoringsinstrumenten [Weijers et al, 2009; Koelewijn et al, 2010; de Vries et al., 2012]. Een faalmechanisme dat kan leiden tot falen van de dijk en dat nog niet is beproefd, is zettingsvloeiing. Monitoringssystemen bieden kansen om het faalmechanisme te monitoren en de veranderende situatie voor, tijdens en na het fenomeen te bepalen. Dergelijke systemen zijn echter nog niet gevalideerd. Een validatie-experiment met zettingsvloeiing is opgenomen in het Tweede IJkdijk Ontwikkelprogramma en is de laatste in de serie van validatie-experimenten.

1.2 Mechanismebeschrijving

Zettingsvloeiing is een mechanisme waarbij zand in een onderwatertalud schijnbaar spontaan vervloeit en waarbij honderdduizenden kubieke meters zand over grote afstand verplaatst kunnen worden. Het eindresultaat is vaak een boven water zichtbare komvormige inscharing in de oever en is veelvuldig waargenomen, vaak met grote schade als gevolg. Door de specifieke opbouw van de ondergrond (getijdeafzettingen bestaande uit een afwisseling van snel afgezette zand- en siltlagen) kunnen zettingsvloeiingen op natuurlijke wijze plaatsvinden in de zeearmen van Zeeland en Zuid-Holland en in de Waddenzee. Aanleiding is vrijwel altijd het (geleidelijk) steiler of hoger worden van het onderwatertalud ten gevolge van erosie aan de teen of sedimentatie aan de top.

Wanneer een zettingsvloeiing plaatsvindt in een oever of nabij een dijk, wordt dit ook wel een oeverval of dijkval genoemd. De waterkering kan hierdoor ernstig beschadigd raken en zijn waterkerende functie verliezen. Vanaf eind negentiende eeuw is men in Zeeland begonnen de vloeiingsgevoelige oevers vast te leggen, waardoor dijkvallen daar thans nauwelijks meer voorkomen.

Zettingsvloeiingen kunnen ook ontstaan in ontgrondingskuilen bij stormvloedkeringen, uitwateringssluizen, brugpijlers en andere stroomvernuwingen. Vaak moet daar een bodembescherming worden aangelegd om te voorkomen dat de kuil zo diep en de kuilhelling zo steil wordt, dat een zettingsvloeiing ontstaat en de constructie of naburige constructies, zoals aangrenzende dijken, in de kuil wegzakken. Bij de Oosterscheldekering wordt zelfs de ruim 500 m brede bodembescherming onvoldoende geacht om het risico voldoende te reduceren en moeten ook in de beheerfase geregeld bestortingen worden aangebracht op taluds van de ontgrondingskuilen.

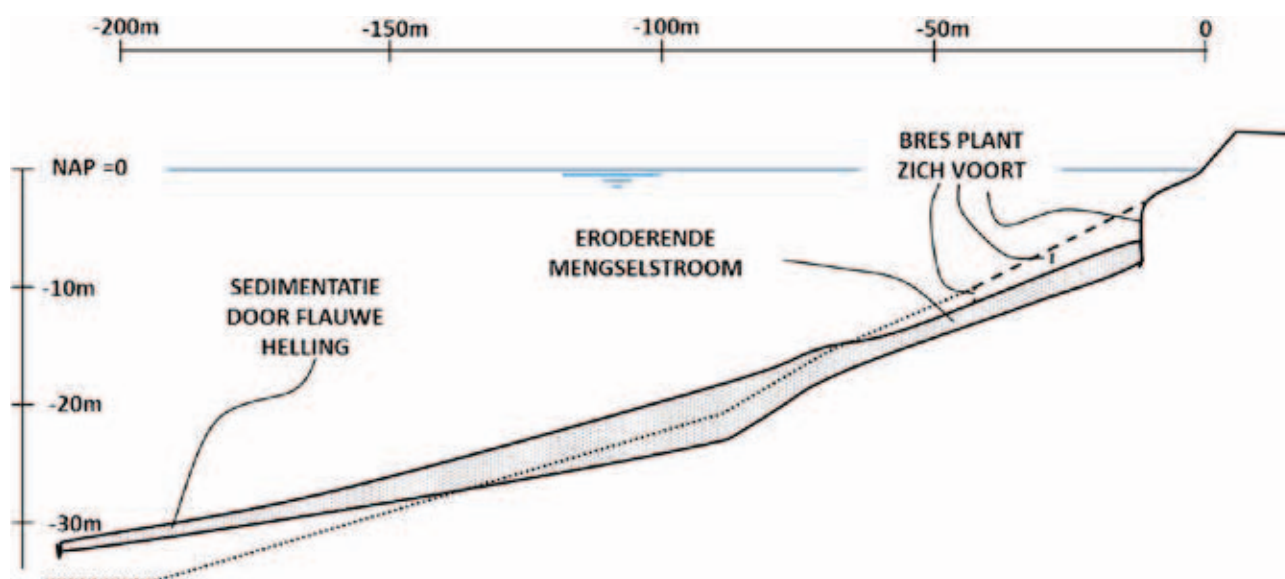
Bij een zettingsvloeiing kan het gaan om twee verschillende mechanismen die qua proces wezenlijk van elkaar verschillen: verwekingsvloeiing en bresvloeiing.

Een *verwekingsvloeiing* kan worden omschreven als een verschijnsel waarbij een pakket losgepakt zand onder water plotseling verweekt: er ontstaat een soort drijfzand. Verweking impliceert een dramatische vermindering van het onderlinge contact tussen de zandkorrels en van de schuifsterkte van het zandlichaam. Als het zandpakket oorspronkelijk in een helling aanwezig is, dan zal de verweekte massa naar beneden vloeien en pas weer onder een zeer flauwe helling tot rust komen.

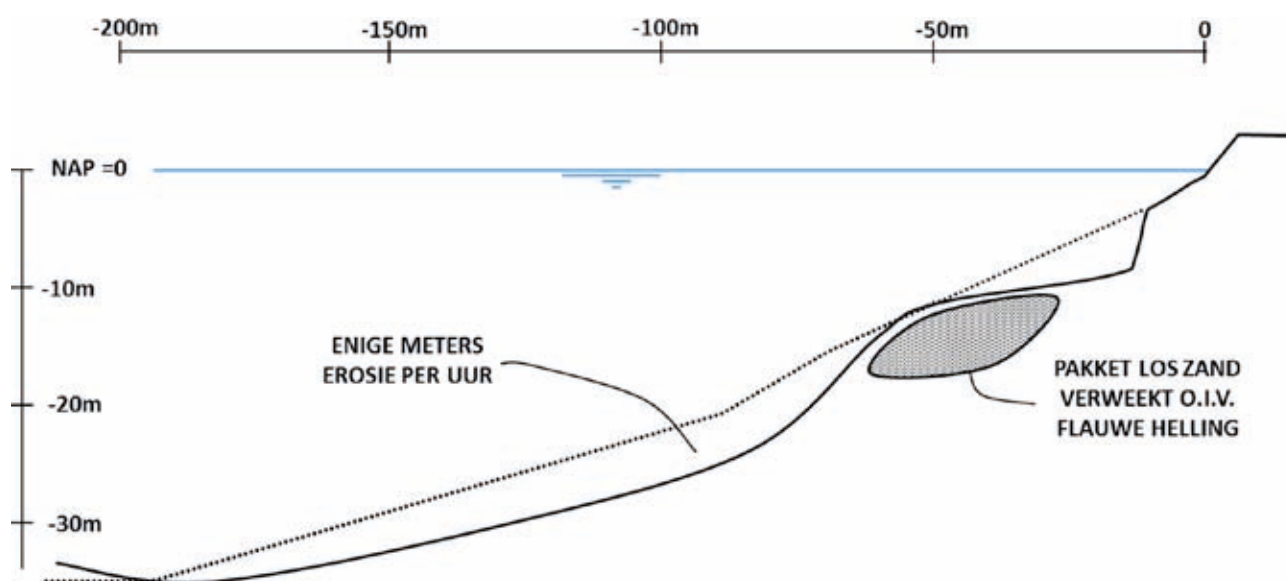
Een *bresvloeiing* in een onderwatertalud is een gestaag terugschrijdend erosieproces dat, net als een verwekingsvloeiing, kan resulteren in een oever- of taludaantasting met een grote inscharingslengte. Een bresvloeiing kan beschouwd worden als een onbeheerste vorm van het 'bresproces' dat bekend is als mechanisme om zand te winnen met een winzuiger.

Voorwaarde voor zowel verweking als bresvloeiing is de aanwezigheid van een voldoende hoog en steil onderwatertalud bestaande uit zand- en/of siltlagen van voldoende dikte (bij elkaar opgeteld over de hoogte van het talud minimaal enkele meters). Voor verweking is verder een voorwaarde de aanwezigheid van zeer losgepakt (contractant) zand, terwijl bresvloeiing in vaster gepakt (dilatant) zand optreedt.

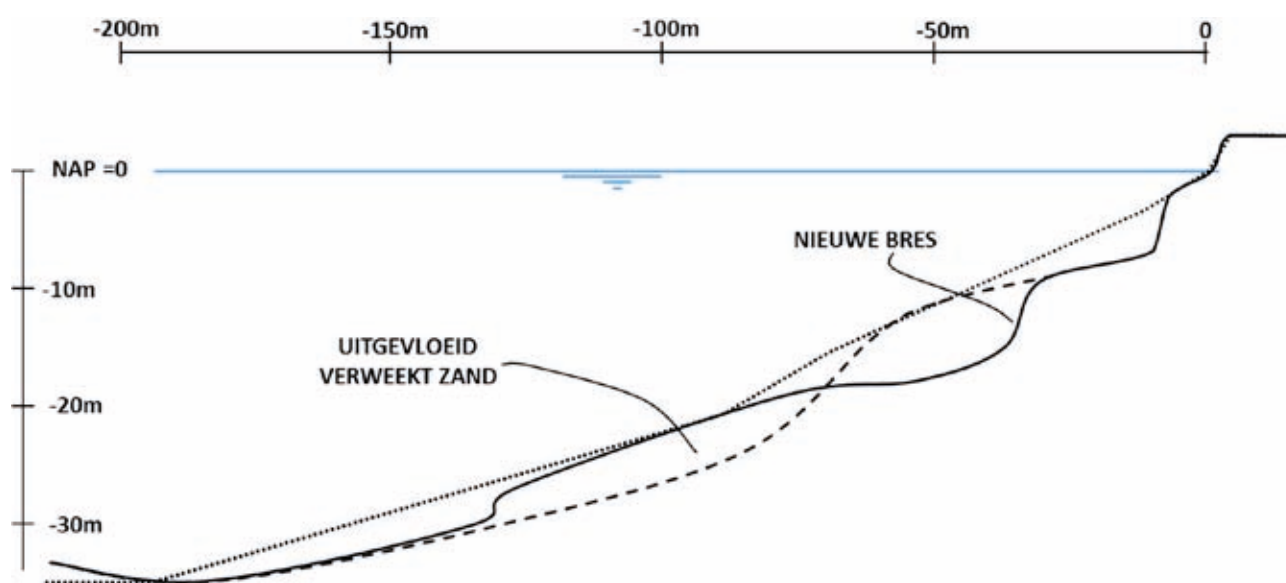
Bij opgetreden vloeiingen is achteraf vaak niet vast te stellen of sprake was van verwekingsvloeiing of bresvloeiing. Vaak zal er sprake zijn geweest van een combinatie van beide. Een mogelijk verloop van een vloeiing waarin zowel verweking als bresvloeiing een rol speelt is geïllustreerd in Figuur 1.1 t/m Figuur 1.3.



Figuur 1.1 Mogelijk verloop bresvloeiing



Figuur 1.2 Mogelijk verloop bresvloeiing die overgaat in een verwekingsvloeiing



Figuur 1.3 Mogelijk verloop verwekingsvloeiing die weer overgaat in bresvloeiing

Versterkingsmaatregelen bestaan over het algemeen uit grootschalige en daarmee kostbare steenbestortingen, zoals uitgevoerd bij de Deltawerken.

1.3 Omvang probleem

In de Derde Toets op Veiligheid kon circa 50 kilometer primaire kering in Nederland niet worden goedgekeurd op het faalmechanisme zettingsvloeiing. In vergelijking met andere faalmechanismen die over grotere lengten zijn afgekeurd lijkt het probleem beperkt, maar de versterkingskosten zijn relatief hoog en in de toekomst zal zeer waarschijnlijk ook op andere trajecten waar sprake is van doorgaande erosie en/of sedimentatie van de vooroever, zettingsvloeiing een probleem kunnen worden.

Ook bij niet-waterkeringen kunnen zettingsvloeiingen tot schade leiden zoals bij het baggeren van havenbekkens, slibdepots en bij zandwinning, waarbij voortdurend instabiliteiten in taluds teweeg worden gebracht en beheerste vloeiingen vaak gewenst zijn. In enkele gevallen worden die instabiliteiten echter onbeheersbaar en treden

ongewenste oeverinscharingen op. Gevaar voor verwekingsvloeiingen treedt ook op bij onder water aangelegde zandlichamen.

Ook het afkalven van zandplaten in de Westerschelde en Oosterschelde vindt gedeeltelijk plaats in de vorm van zettingsvloeiingen.

1.4 Kennisleemten

De huidige kennisbasis beperkt zich voornamelijk tot waarnemingsstatistiek van opgetreden zettingsvloeiingen in Zeeland en schaalproeven in laboratoria, op basis waarvan rekenmodellen zijn ontwikkeld en geijkt. Met gedetailleerde kennis over de verplaatsing van het zand tijdens een vloeiing op realistische schaal is het mogelijk deze bestaande rekenmodellen te valideren, waarmee deze modellen een nauwkeuriger schatting kunnen leveren van de omstandigheden waarbij een vloeiing te verwachten is en de inscharinglengte (of het schadeprofiel) die daar het gevolg van kan zijn. De belangrijkste omstandigheden zijn de vorm van het talud, de eigenschappen en toestand van het zand en de oeverdynamiek. Ook is het dan beter mogelijk om kwalitatief te beschrijven hoe een bestorting een vloeiing voorkomt. Deze kennis kan gebruikt worden voor de (door)ontwikkeling van het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI) en door het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), opdat het aandeel onterecht goed- of afkeuren in de toetsing teruggedrongen kan worden en maatregelen zoals bestorting geoptimaliseerd kunnen worden.

1.5 Validatie-experiment zettingsvloeiing

1.5.1 Doel- en vraagstelling

Om genoemde kennisleemten te verkleinen is een veldproef zettingsvloeiing uitgevoerd. Met dit validatie-experiment zijn traditionele (bewezen) en nieuwe (innovatieve) meet- en voorspelssystemen uitgetest in een grootschalig experiment onder zo natuurlijk mogelijke omstandigheden, waarbij tevens meer kennis is verkregen over het faalmechanisme.

Het IJkdijk validatie-experiment is uitgevoerd met een tweeledig doel. Enerzijds is getracht om het faalmechanisme te volgen door middel van monitoringssystemen waarmee relevante parameters gemeten kunnen worden, waarmee gemeten data kan worden gevisualiseerd en geanalyseerd, en waarmee deze systemen (verder) kunnen worden ontwikkeld en gevalideerd. Aan de hand van het experiment kunnen uitgangspunten voor een monitoringsprotocol voor waterbeheerders worden opgesteld. Deze kunnen in principe al *op korte termijn* door de beheerders worden ingezet. Anderzijds is het experiment uitgevoerd om kennis over het faalmechanisme zettingsvloeiing te genereren. Hiermee kunnen bestaande rekenmodellen verbeterd worden, hetgeen uiteindelijk, maar wel *op termijn van enkele jaren*, leidt tot betere methoden om waterkeringen op zettingsvloeiing te beoordelen/toetsen en om eventuele maatregelen te optimaliseren.

Bovenstaande leidt tot de volgende twee concrete doelstellingen:

1 Het beproeven van monitoringssystemen als onderdeel van de beoordeling van de veiligheid van waterkeringen tegen het faalmechanisme zettingsvloeiing

Dit is het hoofddoel van het experiment. Als onderdeel van monitoringssystemen onderscheiden we achtereenvolgens: meettechnieken, data-analysesystemen en dataopslagsystemen. Meettechnieken bestaan uit sensoren (geplaatst in de waterbodem, in de waterkolom, of op afstand) die relevante parameters meten. De meettechnieken genereren data en leveren input voor data-analysesystemen. Data-analysesystemen transformeren data tot interpreteerbare informatie door het toepassen van bewerkingsslagen, modellering en visualisatie. Data-opslagsystemen regelen het traject van dataverzameling, -transport, -opslag en het opnieuw beschikbaar stellen van bewerkte data. In dit experiment is het Dijk Data Servicecentrum (DDSC) ingezet als dataopslagsysteem. Dit opslagsysteem is niet meegenomen in de beproeving. Het experiment richt zich dus op de inzet van meettechnieken en data-analysesystemen.

2 Het verbeteren van beoordelingsmethoden voor zettingsvloeiing door vergroting van kennis omtrent het faalmechanisme

De belangrijkste vraag die de proef moet beantwoorden is welke van de in paragraaf 1.2 genoemde vormen optreedt bij een talud dat als karakteristiek voor de Zeeuwse taluds kan worden beschouwd: bresvloeiing, verwekingsvloeiing of een combinatie van beide?

Om hier iets over te kunnen zeggen is het van belang antwoord te krijgen op onderliggende kennisvragen als: hoe stroomt het zand, hoe lang duurt het proces, treden er onder- of overspanningen op in het poriewater, wat is de concentratie / snelheid van het afstromend zand-watmengsel, bij welke taludvorm begint het proces, wat bepaalt de uiteindelijke inscharingslengte?

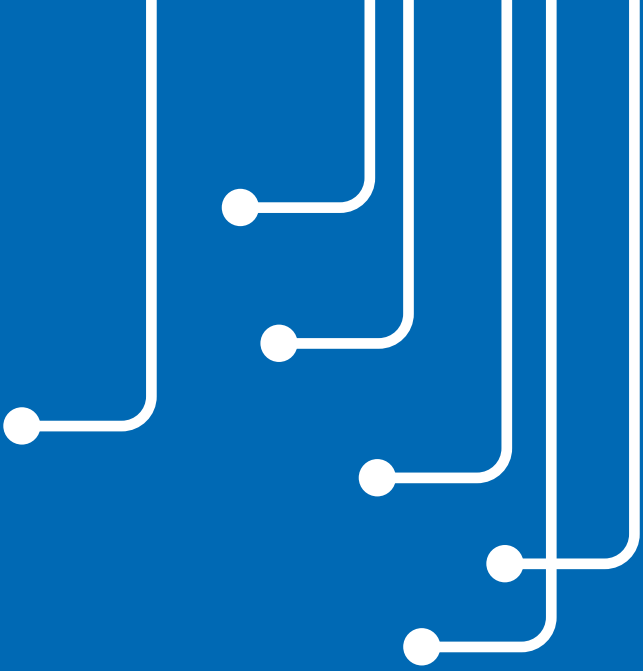
Met deze kennis is het mogelijk de bestaande rekenmodellen te valideren, waarmee deze modellen een nauwkeuriger schatting kunnen leveren van de omstandigheden (als combinatie van de eigenschappen en de toestand van de ondergrond en van de geometrie van het onderwatertalud) wanneer een vloeiing te verwachten is en de inscharingslengte die daar het gevolg van kan zijn, afhankelijk van de vorm van het talud en de eigenschappen van het zand.

Uiteindelijk zal dit *op termijn van enkele jaren* leiden tot een verbetering van de methoden waarmee de veiligheid van waterkeringen ten aanzien van het faalmechanisme zettingsvloeiing beoordeeld kan worden. Deze kennis is ook noodzakelijk om een beter begrip te krijgen van de werking van bestorting, thans de belangrijkste maatregel tegen zettingsvloeiing. Op termijn kunnen maatregelen daarmee geoptimaliseerd worden, bijvoorbeeld door minder te bestorten maar ook door alternatieve maatregelen.

Daarnaast kan deze kennis en de implementatie daarvan ook voor beantwoording van vraagstukken buiten de waterveiligheid gebruikt worden, zoals hoe zandplaten beter beschermd kunnen worden (het verlies van plaatareaal vindt waarschijnlijk vaak plaats via zettingsvloeiingen) en hoe zandwinningsmogelijkheden voor met name baggerbedrijven verder geoptimaliseerd kunnen worden. Daarbij kan uiteraard ook gedacht worden aan zandwinning op locaties op land en langs de rivieren. De scope van dit experiment is echter de waterveiligheid.

1.5.2 Opzet experiment

Een validatie-experiment is een veldproef, waarbij een faalmechanisme onder gecontroleerde omstandigheden optreedt. In het experiment is getracht om een zettingsvloeiing te doen optreden. Dit gebeurde in een vooraf gedefinieerd proefvak waarin gedurende 8,5 dag gebaggerd werd. Het talud werd instabiel gemaakt door het langzaam te versteilen. Gedurende deze periode vonden er meerdere zettingsvloeiingen plaats. In het project namen verschillende partijen deel die bijdroegen aan de monitoring van de zettingsvloeiingen. Meetpartijen verzamelden data van verscheidene parameters voor, tijdens en na de baggerperiode. Vervolgens richtten data-analysepartijen zich aan de hand van deze data op de visualisatie en interpretatie van de data. Deze meettechnieken en data-analysesystemen gezamenlijk verschaften informatie over het talud, het zandpakket en de zandstroming in het proefvak. Vervolgens is gekeken in hoeverre de meettechnieken en data-analysesystemen in staat waren de vooraf gestelde vragen over het mechanisme te beantwoorden.

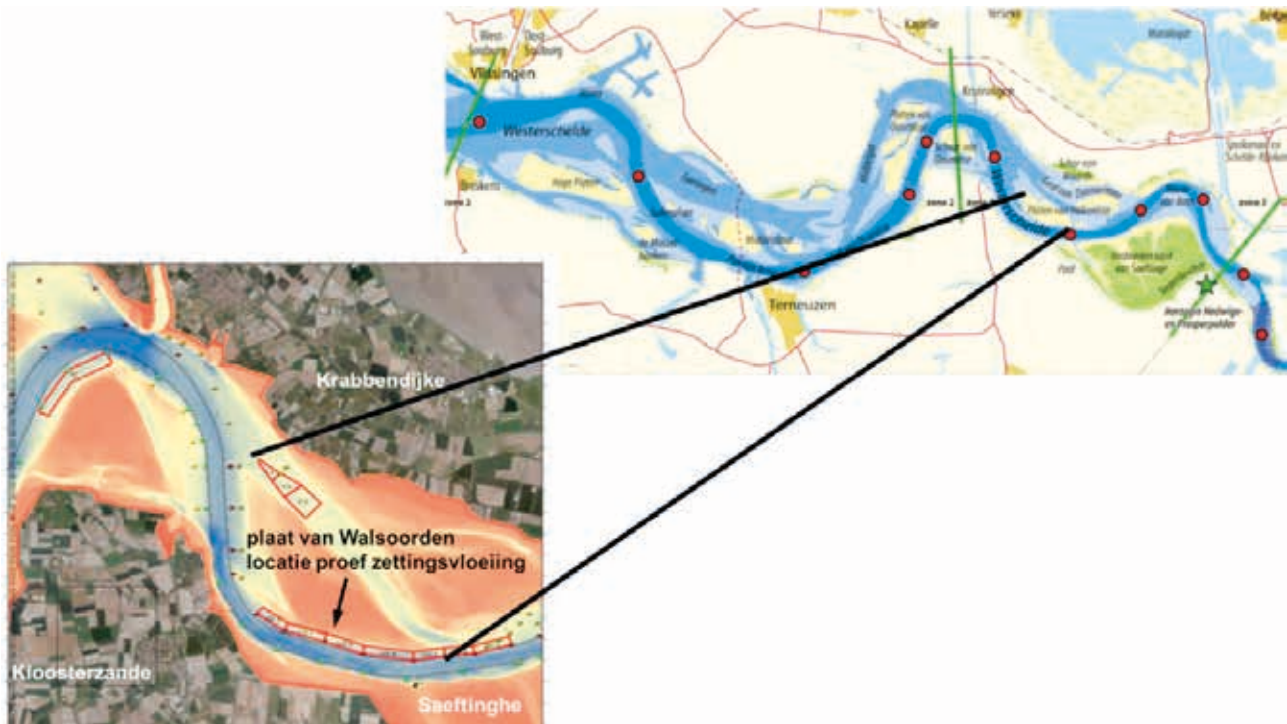


2 Beschrijving experiment

2.1 Locatie

2.1.1 Plaat van Walsoorden

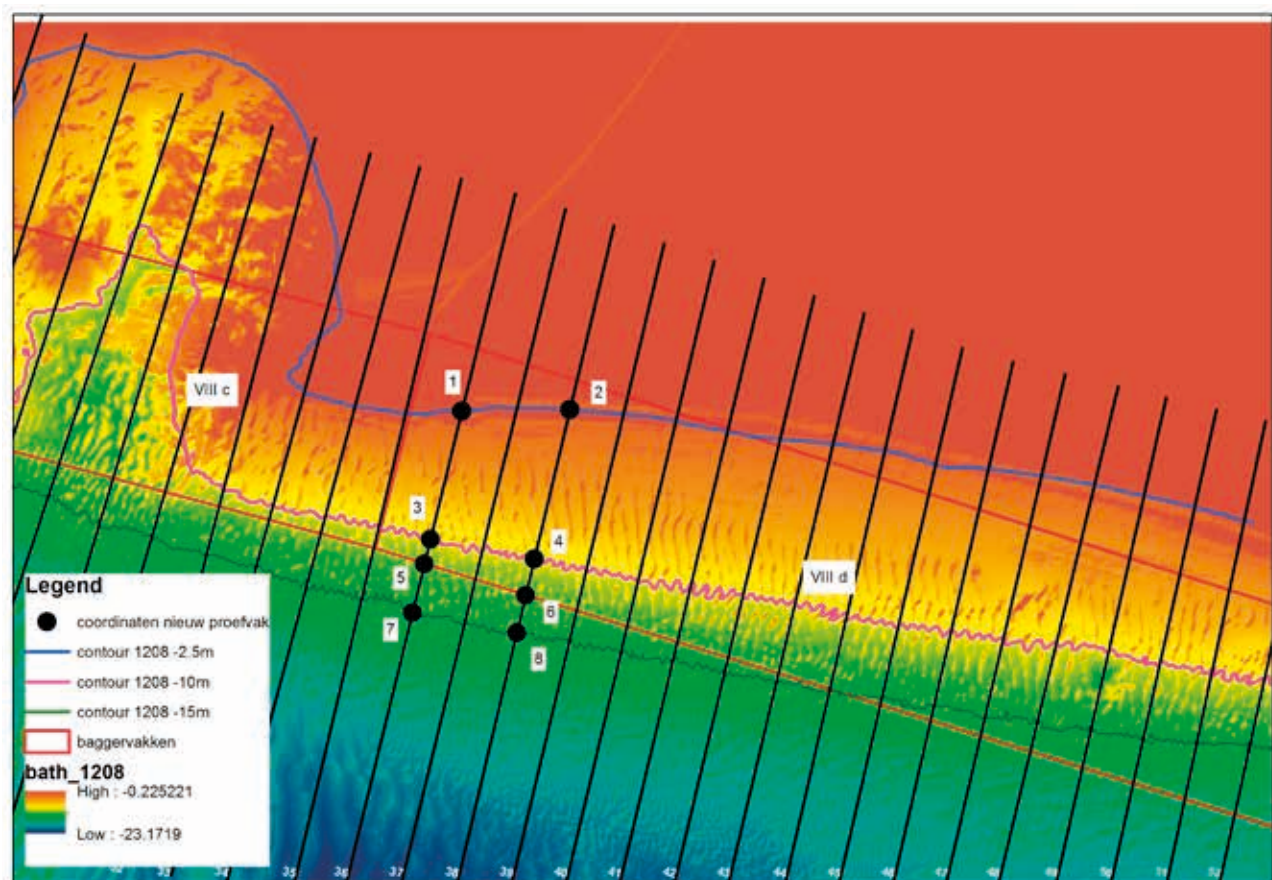
De locatie voor de zettingsvloeiingsproef is gelegen in de Westerschelde, aan de zuidzijde van de Plaat van Walsoorden, zie figuur 2.1. In de periode 2011-2014 heeft langs deze plaatrand een aantal grote zettingsvloeiingen (plaatvallen) plaatsgevonden, waaronder een in juli 2014, zie paragraaf 2.1.3.



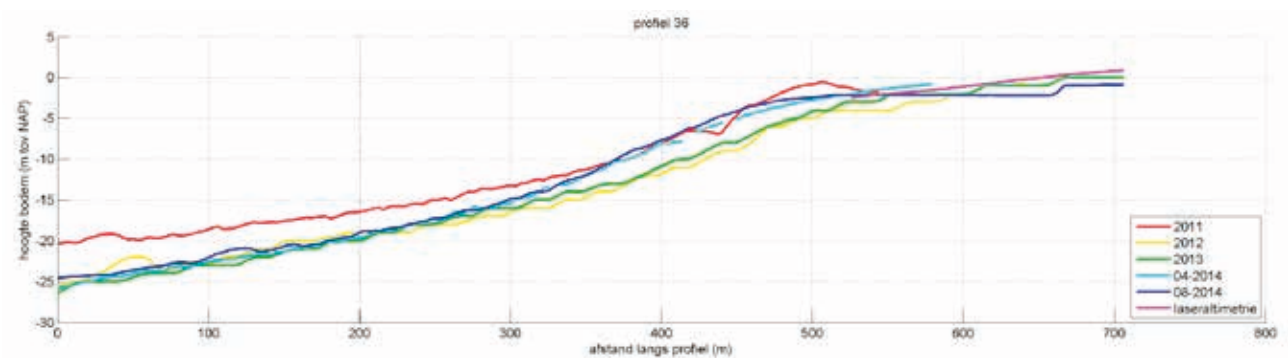
Figuur 2.1 Locatie van de proef bij de Plaat van Walsoorden

2.1.2 Proefvak

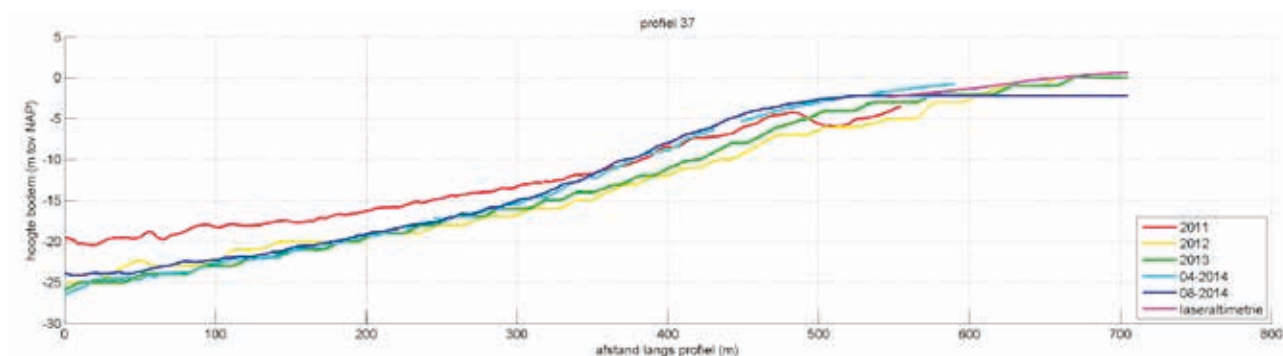
Het proefvak had een lengte van 100 meter parallel aan de plaat (zie figuur 2.2). De zwarte stippen 1, 2, 7 en 8 vertegenwoordigen daarin de hoekpunten van het proefvak. Het talud is over de gehele lengte van het proefvak gelijkvormig en loopt van NAP -2,5 tot NAP -15 m. In de figuren 2.3 tot en met 2.5 zijn de dwarsprofielen 36, 37 en 38 (respectievelijk: westgrens, centrale as en oostgrens van het proefvak) van de afgelopen jaren weergegeven. De verschillen zijn betrekkelijk klein. Wel blijkt uit de metingen dat het talud vanaf april tot september 2014 steiler is geworden.



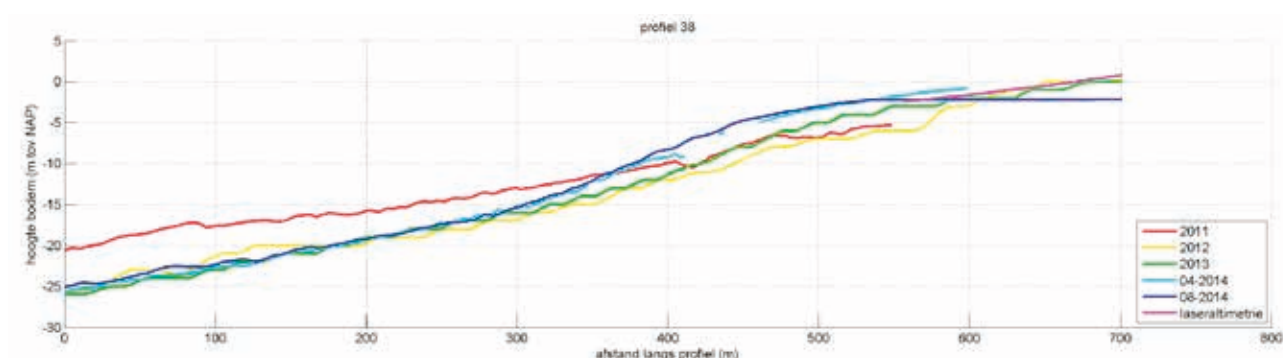
Figuur 2.2 Proeflocatie en profielnummers met een tussenafstand van 50 meter



Figuur 2.3 Dwarsprofielen westelijke begrenzing proeflocatie in recente jaren



Figuur 2.4 Dwarsprofielen centrale as proeflocatie in recente jaren



Figuur 2.5 Dwarsprofielen oostelijke begrenzing proeflocatie in recente jaren

2.1.3 Zettingsvloeiing juli 2014

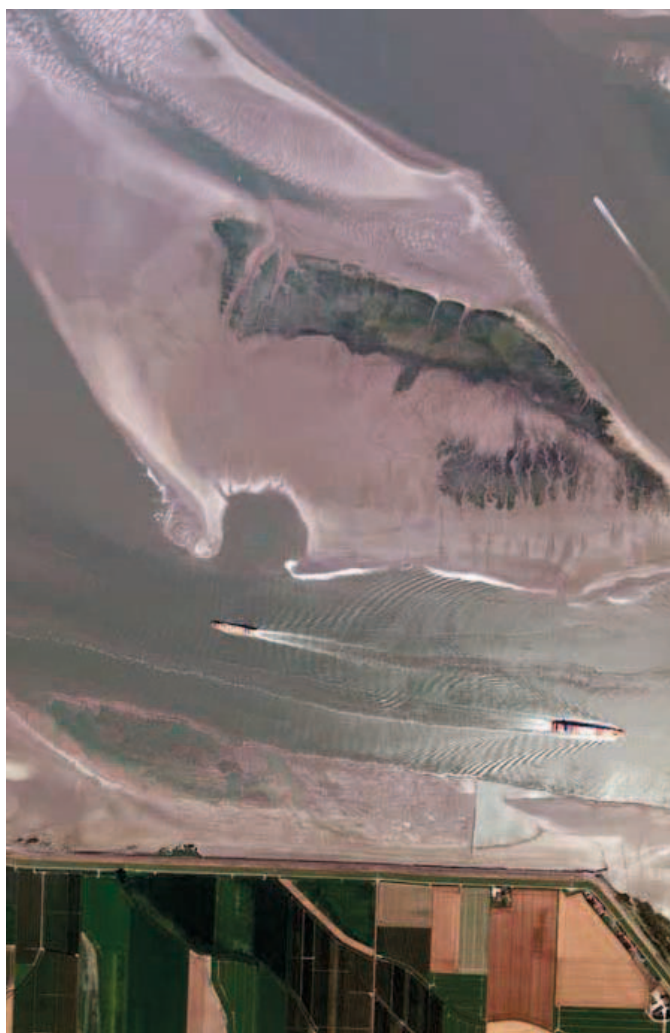
Op de oorspronkelijke voorkeurslocatie voor de proef (circa 300 m ten westen van de uiteindelijke locatie) en op een gedeelte van de oorspronkelijke alternatieve locatie (circa 200 meter ten oosten van de oorspronkelijke locatie, dus grenzend aan de uiteindelijke locatie) is op 22 juli 2014 een zettingsvloeiing geconstateerd [Dekker, 2014], die zich heeft voortgezet op 28 juli. Deze plaatval bleek uitzonderlijk groot te zijn. Enkele foto's tijdens het proces op 28 juli zijn weergegeven in Figuur 2.6 en figuur 2.7. Gezien de lange duur van het proces betrof dit vrijwel zeker een bresvloeiing, waarbij gedurende minimaal een aantal uren, maar mogelijk meer dan een etmaal, 600 000 tot 900 000 m³ aan materiaal is verplaatst. Doorgaans zijn plaatvallen langs deze plaatrand beduidend kleiner van omvang, zo tussen de 100 000 en 300 000 m³. In Figuur 2.8 is de uiteindelijk ontstane baai zichtbaar.



Figuur 2.6 Diep ingesneden geulen verraden de optredende vloeiing (Plaat van Walsoorden, 28 juli 2014)



Figuur 2.7 Gedeelte boven water van een omvangrijke bresvloeiing in volle gang (Plaat van Walsoorden, 28 juli 2014)



Figuur 2.8 Opname van de Plaat van Walsoorden op 31 juli 2014

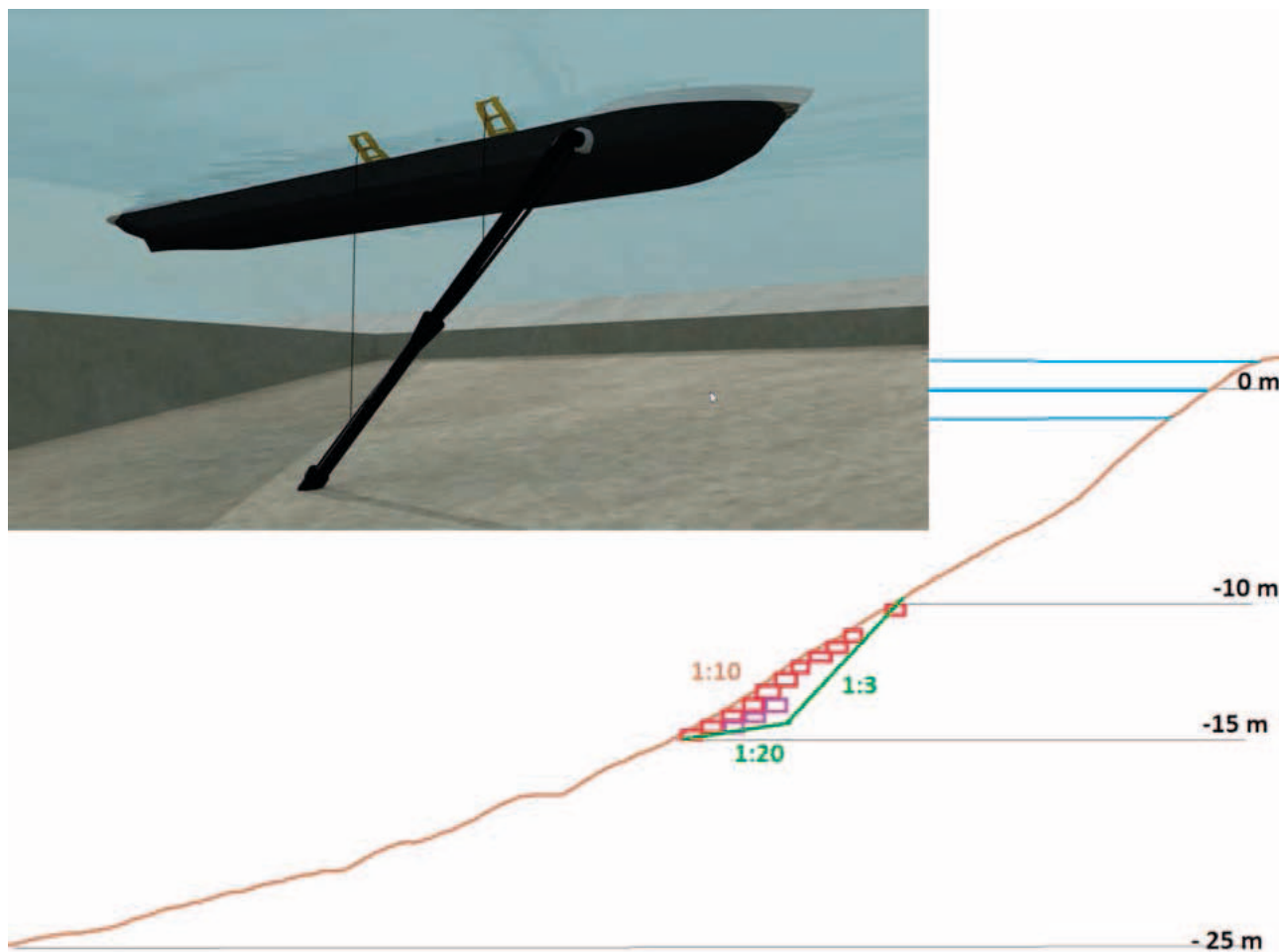
2.2 Initiëren van een zettingsvloeiing

Het oorspronkelijke talud had een helling van ongeveer 1:12. Om een zettingsvloeiing te initiëren is het talud in het proefvak langzaam versteild door met een baggerschip tegen de richting van de getijstroom in stroken te varen, parallel aan de plaatrand, waarbij zand werd gewonnen met een sleepkop voorzien van waterjets. Het baggerschip, de 'Zeeland' (zie figuur 2.9), is geleverd door De Vries & van de Wiel (onderdeel van DEME). Dit is een sleeppopperzuiger met een beuninhoud van circa 750 m³. Deze wordt regelmatig gebruikt voor zandwinning op de Westerschelde. Per strook werd een laag van ongeveer 10 tot 20 cm diepte en 150 cm breedte gezogen. Nadat het beun gevuld was, liet het schip zich met de getijstroom teruggedrijven naar een van de twee stortvakken. Het gebaggerde materiaal werd stroomafwaarts gelost om de invloed op de metingen te minimaliseren. Vandaar dat er twee stortlocaties zijn aangewezen, 300 meter ten oosten en 300 m ten westen van het proefvak (de laatste ter hoogte van de baai van de vloeiingen van 22 en 28 juli). Het storten vond plaats met behulp van onderlossers (bodemkleppen die ineens geopend kunnen worden), zodat de gehele lading in enkele minuten kon worden gelost. Na het storten en terugvaren naar het proefvak werd aan de volgende strook begonnen. Op basis van de continu uitgevoerde peilingen (paragraaf 2.3) werd de locatie van de volgende strook bepaald. Dit was meestal iets hoger op het talud, dus aan de bovenzijde van de vorige strook.



Figuur 2.9 Slephopperzuiger 'Zeeland' van De Vries & Van de Wiel

Het eindbeeld van het talud in het proefvak tussen -5 en -13 NAP bestond uit een versteiling naar 1:5 over een afstand van ongeveer 12 meter, waarbij over de resterende breedte tot NAP -15 m ongeveer een strook van 60 m overbleef met een flauwe taludhelling, zie Figuur 2.10. Het doel van deze flauwe taludhelling was te vermijden dat er als gevolg van het baggeren een horizontale drempel zou ontstaan die het begin van de vloeiing zou blokkeren. Met behulp van een navigatiesysteem en recente bodemmetingen die door de proefleiding tijdens de proef continu werden verstrekt aan de baggeraars, kon door hen gericht en nauwkeurig worden gewerkt. De gebaggerde hoeveelheden zand werden continu gemeten en in een logboek opgeslagen. Ook positie en zuigdiepte werden continu gelogd. Het baggeren ging 24 uur per etmaal door, gedurende 8,5 etmalen (23 september – 1 oktober 2014).



Figuur 2.10 Principe verstelling onderwatertalud met sleephopperzuiger

2.3 Definitie van een succesvolle proef

Voor het slagen van het project was het optreden van een volwaardige zettingsvloeiing met een voldoende grote omvang noodzakelijk. Voorafgaand aan de proef zijn daarom criteria opgesteld m.b.t. de minimale omvang en uitgestrektheid van de vloeiing:

- Omvang: de dikte (verticaal gemeten) van de maximale depositie of erosie van de optredende zettingsvloeiing dient tenminste 1 m te bedragen. Indien er meerdere afzonderlijke vloeiingen optreden (op verschillende momenten) kunnen de laagdikten niet bij elkaar worden opgeteld.
- Uitgestrektheid: de vloeiing moet reiken van bóven de NAP +0,5m-lijn tot onder het gebaggerde gebied, dus onder de NAP -15m-lijn.

Gedurende de baggerperiode traden er vijf kleine zettingsvloeiingen op. In deze zettingsvloeiingen was de dikte van zowel de erosie als de depositie ruim groter dan de vereiste 1 meter. Ze waren elk echter minder ver uitgestrekt dan de aangegeven grenzen.

2.4 Meet- en monitoringsprogramma

Vooraf, tijdens en na de baggerperiode vonden er monitoringsactiviteiten plaats met behulp van meettechnieken en data-analysesystemen, zie onderstaande tabel voor een overzicht. Deze meettechnieken en data-analysesystemen gezamenlijk verschaften informatie over het talud, het zandpakket en de zandstroming in het proefvak. De meettechnieken en data-analysesystemen zijn als volgt geclusterd: grondonderzoek, meten aan faalmechanisme, visualisatie en modellering.

Tabel 2.1 *Monitoringactiviteiten en modellering: toegepaste meettechnieken, data-analysesystemen en rekenprogramma's.*

Meettechnieken	Data-analysesystemen	Uitvoerende partij
Grondonderzoek		
Hydraulic Profiling Tool (HPT)		Fugro
Standaard boringen en sonderingen		Fugro, Marine Sampling Holland
Meten aan faalmechanisme		
Multibeam sonar systeem		GeoXYZ
Subbottom profiler (SBP)		Deltares
M3 sonar		National Oceanography Centre (NOC)
ADCP		National Oceanography Centre (NOC)
Laserscanner		GeoXYZ
Waterspanningsmeters		Fugro
Fugro Pressio Balg (FPB)		Fugro
Digitale camera		Miramap
Infraroodcamera		Miramap
	Visualisatiesystemen	
	ReadyMind	AGT International
	Lizard	Nelen en Schuurmans
	Modellering	
	HMBreach/HMTurb	Deltares
	SLIQ2D	Deltares
	MPM	Deltares
	Delft3D-Flow	Deltares
	Retrobreach	Deltares
	Target	Target Holding

2.4.1 Grondonderzoek

Aan de hand van grondonderzoek werd een aantal relevante parameters van het zandpakket gemeten. Grondonderzoek heeft plaatsgevonden in de maanden augustus en oktober, dus voor en na de baggerperiode. Voor het grondonderzoek werd een werkschip of –ponton ingezet. Toegepaste technieken zijn: Ackermann- en vibrocore-boringen, standaard sonderingen met meting van waterspanning, seismische sonderingen en sonderingen met de HPT-conus. Het grondonderzoek werd uitgevoerd door Fugro, Deltares en Marine Sampling Holland. Op het grondonderzoek zal nader worden ingegaan in paragraaf 3.2.

2.4.2 Meten aan faalmechanisme

Rondom de baggerperiode (23 september – 1 oktober 2014) werd getracht om de optredende zettingsvloeiing live te volgen met verschillende meettechnieken. Dat gebeurde aan de hand van een proefopstelling in het proefvak, rond het baggerschip. De proefopstelling bestond uit drie meetvletten met instrumenten (GeoXYZ), instrumenten in de waterbodem verbonden aan een ponton (Fugro) en twee geplande meetvluchten (Miramap). De meetvletten voeren meestentijds op en nabij de proeflocatie. Daarbij werd één meetvlet stationair op ongeveer dezelfde plaats gehouden in het midden van het proefvak. De andere meetvletten voeren langs de noord- en zuidzijde van het proefvak, respectievelijk langs de plaatrand en de vaargeul. Aan de schepen waren de volgende systemen bevestigd: Multibeam sonar systeem, Subbottom profiler, M3 sonar en ADCP (NOC). Op één van de twee varende schepen was bovendien een laserscanner gemonteerd, waarmee bij laag water een scan van de plaat boven water gemaakt kon worden, als aanvulling op de multibeammetingen.

In de taludbodem zijn al tijdens het grondonderzoek voorafgaande aan de proef waterspanningsmeters en Fugro Pressio Balgen geïnstalleerd. Deze waren verbonden met een datalogger op het ponton dat voor de plaat lag. Op het ponton werd de data verzameld en verzonden.

Tot slot waren er vlak voor en vlak na de baggerperiode vluchten gepland om luchtfoto's te maken, zowel gewone foto's als infrarood. Deze systemen zullen nader toegelicht worden in paragraaf 3.2.

2.5 Visualisatie, analyse en ontsluiting van de data

2.5.1 Visualisatie

Ruw ingewonnen data moet interpreteerbaar gemaakt worden. Dat gebeurde met behulp van visualisatiesystemen. Deze systemen maken van de ruwe interpreteerbare informatie. Data-visualisatie gebeurde met de systemen Ready-Mind en Lizard.

Visualisatiesystemen zullen nader toegelicht worden in paragraaf 3.4.

2.5.2 Modelleren

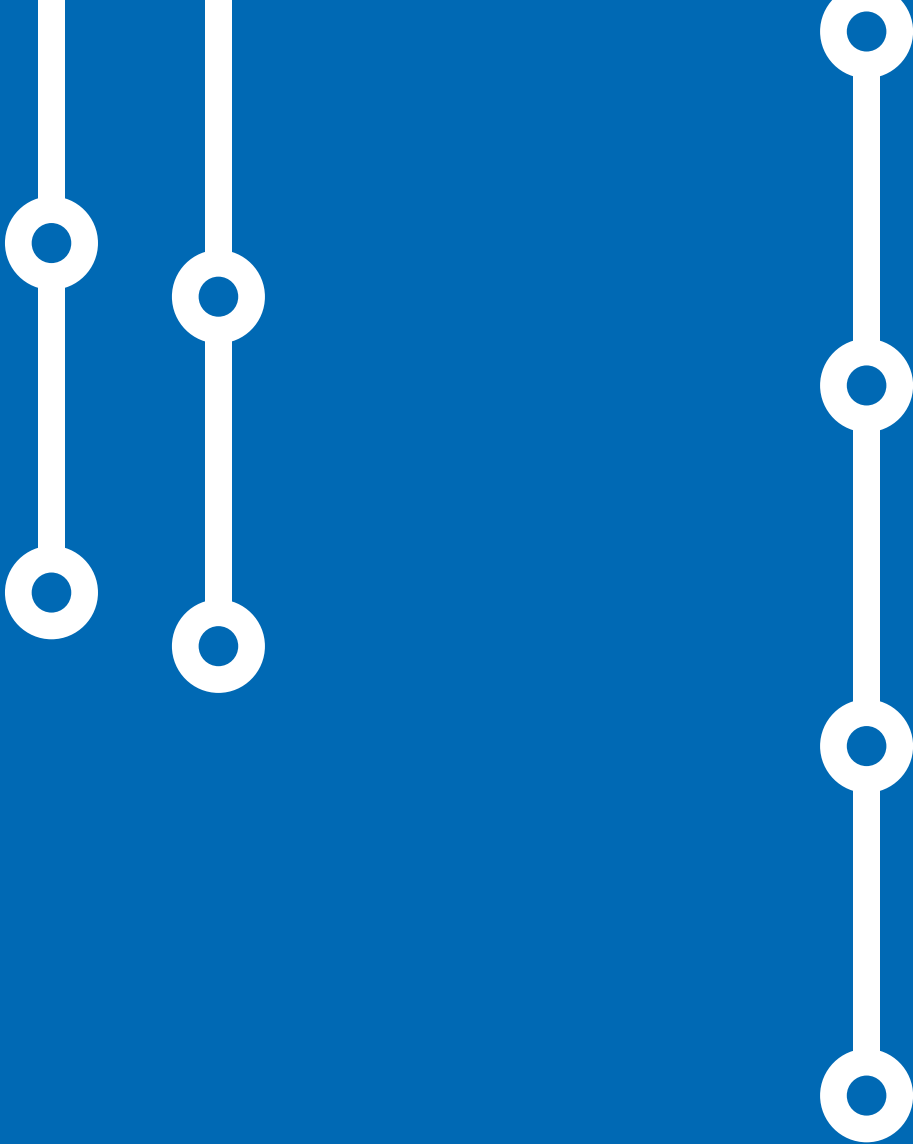
Modellen worden ingezet om een faalmechanisme te simuleren. Modellen zorgen daarom voor de voorspelcomponent in een monitoringssysteem. In dit experiment zijn, zij het vanwege de beschikbare tijd op beperkte schaal, modellen ingezet om het optreden en de ontwikkeling van een zettingsvloeiing op voorhand te simuleren. Deze predicties zijn tevens gebruikt om de haalbaarheid van het experiment in te kunnen schatten. Naderhand, op basis van de werkelijke gebeurtenissen, konden de modellen worden gevalideerd en doorontwikkeld. In dit experiment is gebruik gemaakt van HMBreach/HMTurb, SLIQ2D, MPM, Delft3D-Flow, Retrobreach en Target. Deze modellen zullen in paragraaf 3.5 uitgebreid worden toegelicht.

2.5.3 Data-ontsluiting

Data die tijdens de proef is ingewonnen is ontsloten, dat wil zeggen opgeslagen en weer beschikbaar gesteld voor data-analyse. Dat is gebeurd op twee locaties: lokaal en extern via de database Dijk Data Service Centrum (DDSC). De lokale data-ontsluiting was primair bedoeld ter ondersteuning van de proefleiding. Op basis van deze data zijn besluiten genomen over de baggerwerkzaamheden en over de focusgebieden. Voor de lokale data-ontsluiting waren vooral de gegevens van de multibeamssystemen, de M3 systemen en de waterspanningsmeters essentieel. De lokale data-ontsluiting verliep draadloos met een eigen WiFi systeem dan wel met aanwezig 3G mobiel internet.

Het DDSC werd ingezet voor de acquisitie, de opslag en datavoorziening. Het DDSC is een database waarin grote hoeveelheden data en verschillende datatypen kunnen worden opgeslagen. Het DDSC onderscheidt vier typen data: meetdata (getallen die temperatuur, druk, verplaatsing vertegenwoordigen), ortho-gerectificeerde data (geschikt voor GIS bestanden: luchtfoto's en hoogtemodellen), fotobeelden (webcam, inspectiefoto's) en bestanden (filmpjes en rapportages). Het DDSC functioneerde als centrale database in het project. Dat betekent dat meetpartijen hun data aanleverden naar het DDSC en data-analysepartijen de data in het DDSC gebruikten als bron voor verdere verwerking in eigen software.

Op de data-ontsluiting zal verder worden ingegaan in paragraaf 3.4



3 Resultaten en evaluatie

3.1 Inleiding

In het experiment is gebruik gemaakt van verschillende meettechnieken en data-analysesystemen. Deze technieken en systemen gezamenlijk verschaffen informatie over het talud, het zandpakket en de zandstroming in het proefvak. Op deze manier werd getracht de vooraf opgestelde vragen uit paragraaf 1.5.1 te beantwoorden.

In paragrafen 3.2 t/m 3.5 wordt per meettechniek en data-analysesysteem beschreven op welke manier deze werd ingezet. In paragraaf 3.6 worden de technieken bediscussieerd. In hoofdstukken 4 en 5 wordt een antwoord gegeven op de onderzoeksvragen.

Vanwege het korte tijdspad waarbinnen de proef inclusief analyse is uitgevoerd, heeft visualisatie, analyse van het grondonderzoek, laboratoriumonderzoek en data-analyse, waaronder simulaties met rekenmodellen, deels parallel plaatsgevonden. Daardoor konden in de data-analyse niet alle resultaten van het grond- en laboratoriumonderzoek meegenomen worden.

3.2 Grond- en laboratoriumonderzoek

3.2.1 Inleiding

Zoals in hoofdstuk 1 beschreven zijn de grondeigenschappen en grondtoestand cruciale parameters voor het optreden van een vloeijing en de uiteindelijke schade (de inscharingslengte) die kan ontstaan. Daarom zijn dit ook belangrijke invoerparameters voor de rekenmodellen waarmee zettingsvloeijing voorspeld kan worden (paragraaf 3.5).

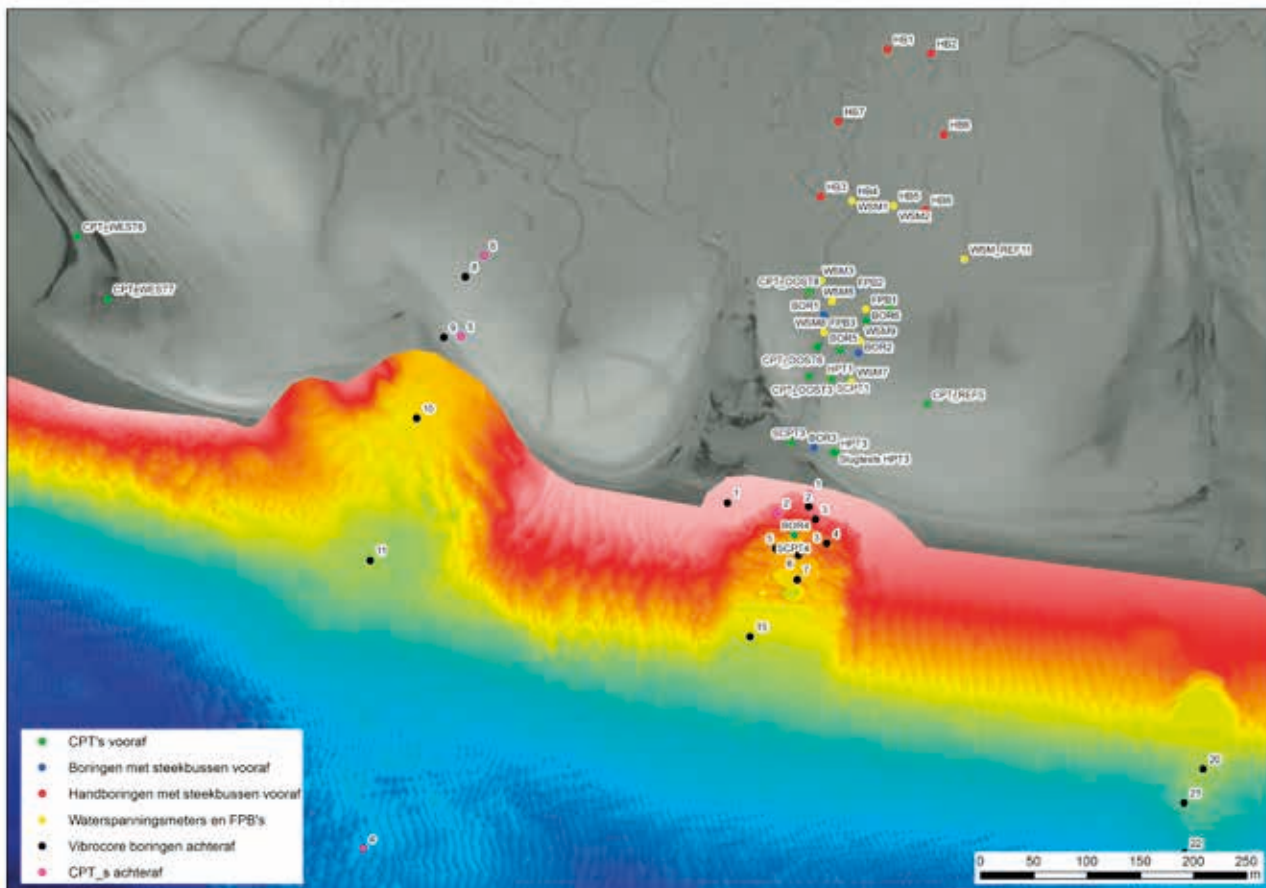
In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van het uitgevoerde grondonderzoek voorafgaand aan de proef én na afloop van de proef. Op die manier kon inzicht worden verkregen in de eigenschappen van het zand dat tijdens de vloeijingen is weggevoerd (of juist niet is weggevoerd), en ook van het zand dat tijdens de vloeijing is afgezet. Het laatste kan informatie geven over hoe het zand gestroomd heeft.

Daarnaast is een deel van het onderzoek na afloop van de proef uitgevoerd in het erosie- en afzettingsgebied van de grote vloeijing van juli 2014, circa 300 m ten westen van het proefvak. Mogelijk zouden verschillen in grondeigenschappen een verklaring kunnen geven voor het verschil in uiteindelijke omvang van de vloeijing van juli en de vloeijingen in het proefvak.

Naast het grondonderzoek wordt ook een overzicht gegeven van het uitgevoerde laboratoriumonderzoek op een aantal grondmonsters. Het grondonderzoek was deels standaard en deels innovatief.

3.2.2 Overzicht meetpunten

In Figuur 3.1 worden de locaties van alle boringen en sonderingen, alsmede de sensoren (waterspanningsmeters en Fugro Pressio Balgen) weergegeven. Op de achtergrond de multibeam eindmeting direct na afloop van de proef.



Figuur 3.1 Overzicht locatie grondonderzoekspunten en instrumentatie

3.2.3 Boringen en sonderingen

3.2.3.1 Techniek en toepassing

Zoals aangegeven is het standaard grondonderzoek, bestaande uit boringen en sonderingen, in twee fasen uitgevoerd:

- Voorafgaande aan de proef
- Na afloop van de proef

Het grondonderzoek voorafgaande aan de proef bestond uit (zie ook Figuur 3.1):

- Een Subbottom Profiling Survey van het westelijk deel van het proefvak, uitgevoerd door Deltares. Hierop wordt verder ingegaan in paragraaf 3.3.2
- 15 boringen tot circa 5 m onder de bodem, uitgevoerd door Fugro, waarvan:
 - 13 handboringen (HB) vanaf het land, uitgevoerd met een handpuls en een Ackermann steekapparaat (met dunwandige metalen steekbussen met een diameter van 70 mm en een lengte van 40 cm). Per handboring is elke meter een geslagen steekbusmonster genomen. Daarnaast zijn per boring 5 ongeroerde monsters genomen.
 - 2 mechanische boringen (BOR) vanaf het water, waarbij dezelfde monsternametechniek als bij de handboringen is aangehouden
- 16 sonderingen vanaf het water tot ca 15 m – bodem, uitgevoerd door Fugro, waarvan:
 - 10 standaard elektrische Cone Penetration Tests (CPT) met meting van kleef en waterspanning (u_2), waarvan één referentie-CPT buiten het verwachte vloeiingsgebied en twee CPT's in het begin augustus beoogde reservegebied, ten westen van de vloeiing van juli 2014.
 - 2 sonderingen met de Hydraulic Profiling Tool (HPT - zie paragraaf 3.2.4)

- 4 seismic Cone Penetration Tests (SCPT's)

Voor het grondonderzoek uitgevoerd door Fugro wordt verder verwezen naar [Scheepers et al., 2014].

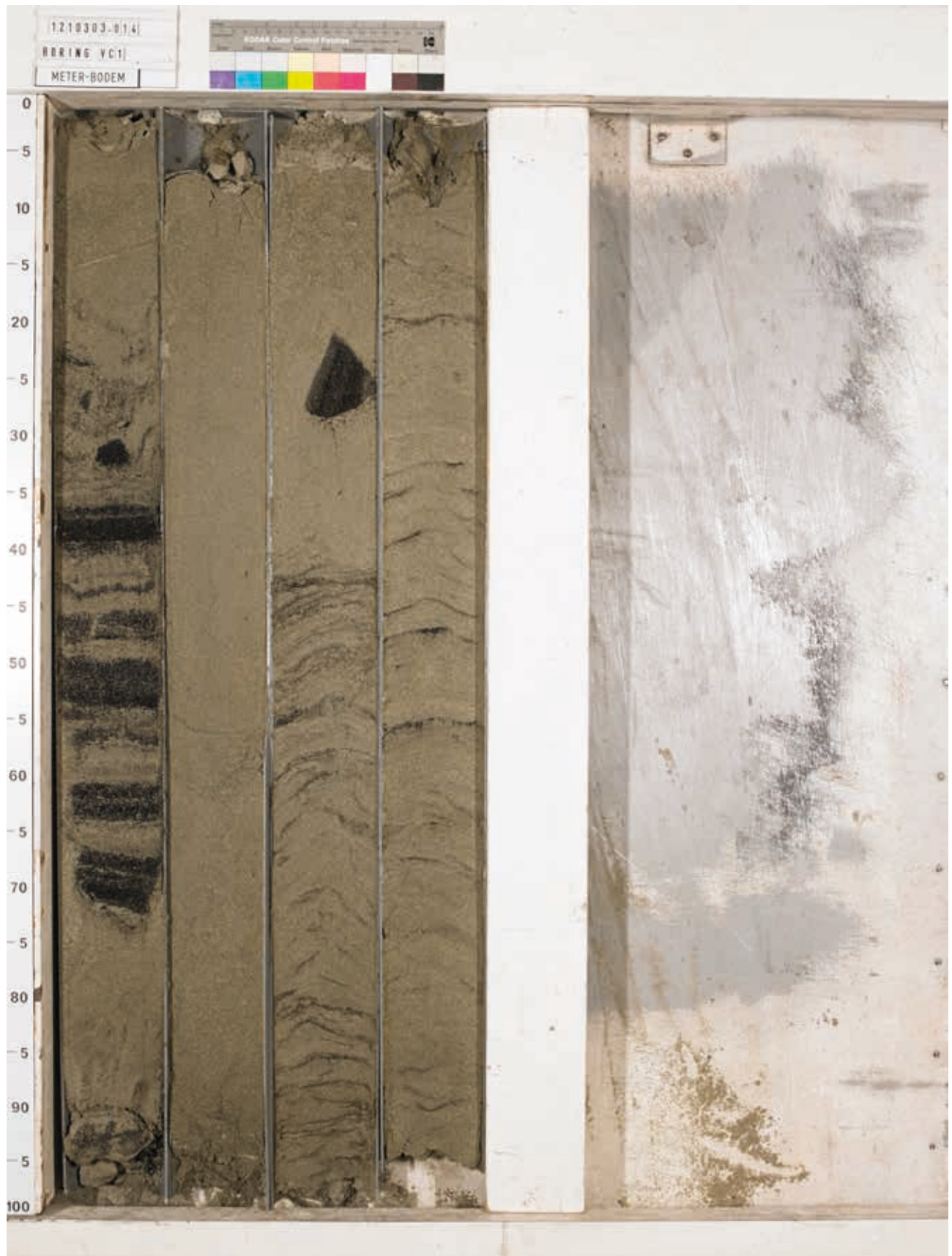
Het grondonderzoek na afloop van de proef is uitgevoerd door Marine Sampling Holland en bestond uit:

- 15 boringen vanaf het water met een hydraulische vibrocorer tot een diepte van ca 5m onder de bodem. PVC liners met een doorsnede van 100 mm zijn toegepast. Vier boringen zijn uitgevoerd ter plaatse van de vloeijing van juli 2014.
- 6 standaard elektrische CPT's vanaf het water, met meting van kleeft en waterspanning (u_2). Twee sonderingen zijn uitgevoerd ter plaatse van de vloeijing van juli 2014.

Het grondonderzoek is uitgevoerd onder supervisie van Deltares [Peters, 2014]. Alle grondmonsters zijn getransporteerd naar het laboratorium van Deltares. Voor het laboratoriumonderzoek wordt verwezen naar paragraaf 3.2.5

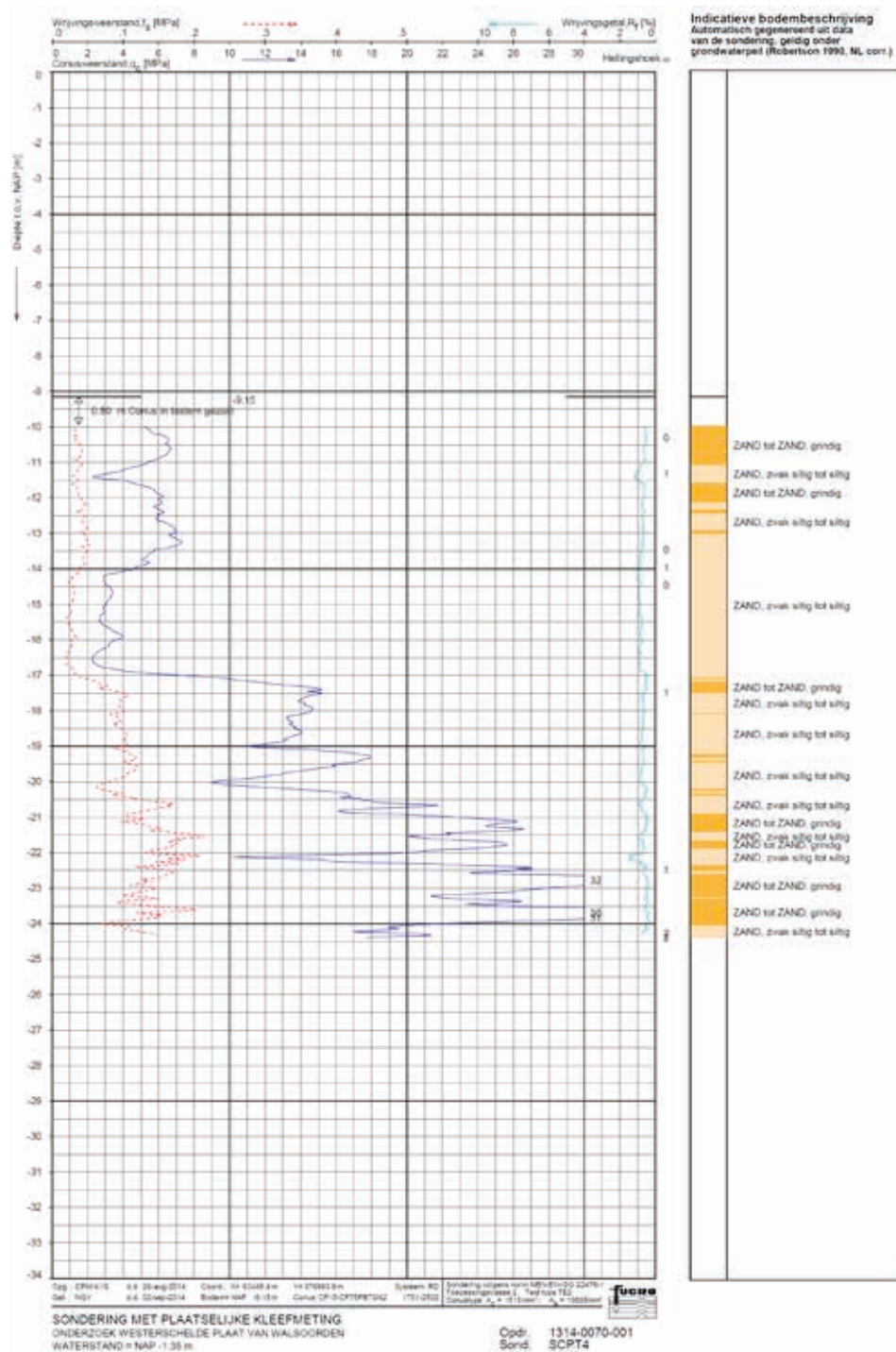
3.2.3.2 Resultaten

Uit de boorbeschrijvingen volgt dat in het proefvak sprake is van fijn zand. Veelvuldig is in de boorkernen sprake van een snelle afwisseling van klei- en zandlagen. Dit is typisch voor snel afgezette getijdeafzettingen. In de bovenste meter lijkt sprake van iets frequenter voorkomende kleilagen of organische stoflagen. Een voorbeeld van een redelijk representatieve boorkern is weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Foto boorkern uit vibrocore boring in proefvak (VC1)

Ook in de sonderingen is de regelmatig voorkomende snelle afwisseling van slib- en zandlaagjes terug te zien in een sterk fluctuerende conusweerstand. Uit de sonderingen volgt dat over het algemeen, met uitzondering van de bovenste meters, tot een diepte van circa NAP-9 m à NAP-13 m, maar lokaal nog dieper, sprake is van behoorlijk losgepakt zand. In termen van relatieve dichtheid (volgens de correlatie van Baldi) lager dan 30%. De bovenste meters, tot circa NAP-4 m is in de meeste sonderingen sprake van een iets vastere pakking. Dieper dan NAP-9 m à NAP-14 m wordt vastgepakt zand aangetroffen, met een relatieve dichtheid die meestal hoger ligt dan 60%. Een typisch sonderbeeld wordt weergegeven in Figuur 3.3.



Figuur 3.3 Voorbeeld sondering in proefvak (SCPT4)

3.2.4 Hydraulic Profiling Tool (HPT)

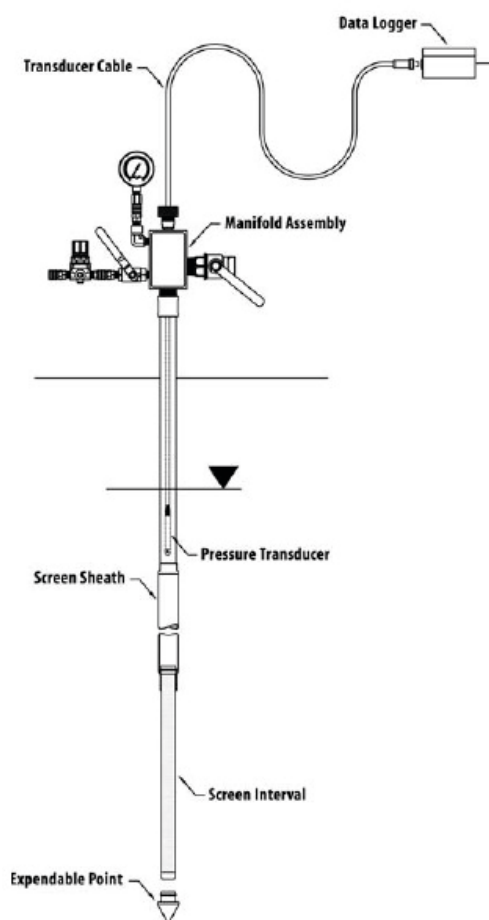
3.2.4.1 Techniek

Met de hydraulic profiling tool (HPT) kan inzicht verkregen worden in de relatieve doorlatendheid van de bodem. Deze tool wordt boven de conus ingebouwd (zie Figuur 3.4). Tijdens het sonderen wordt met een constant debiet water in de bodem geïnjecteerd door een opening in de HPT tool. Een druksensor meet hierbij de drukrespons van de bodem. Aan de hand van de geregisterde druk kan de relatieve doorlatendheid worden bepaald.



Figuur 3.4 Hydraulic Profiling Tool (HPT)

Aanvullend op de HPT test kunnen op een geringe afstand van de HPT-CPT op een aantal dieptes in situ pneumatic slug testen worden uitgevoerd waarmee de absolute in situ doorlatendheid van de bodem bepaald kan worden. Om een slug test uit te voeren wordt een sondeerstang met “verloren” punt weggedrukt. Wanneer de sondeerpunt op een vooraf bepaalde gewenste diepte is, wordt de filterconus opgetrokken met 0,5 à 1 m. In de sondeerstang wordt een datalogger gehangen tot onder het grondwaterniveau. Vervolgens wordt er een overdruk opgebouwd (via de inlaatklep) en gemeten hoe lang het duurt voordat het waterniveau in de sondeerstang zich herstelt na het openen van de uitlaatklep.



Figuur 3.5 Opstelling slug test

3.2.4.2 Toepassing

Bij het faalmechanisme zettingsvloeiing is de doorlatendheid een belangrijke parameter. Een lage doorlatendheid heeft een nadelige invloed op de veiligheid ten aanzien van dit mechanisme. Een lage doorlatendheid zal er bijvoorbeeld toe leiden dat wateroverspanningen door verweking minder snel dissiperen, waardoor een vloeiing kan ontstaan. Voor bepaalde deelprocessen kan een lage doorlatendheid ook de andere kant uitwerken: een geringe doorlatendheid leidt tot een lagere terugschrijdsnelheid van de bres, wat de kans op een onbeheerste bresvloeiing reduceert. De doorlatendheid is een directe invoerparameter in het rekenprogramma HMBreach voor het analyseren van bresvloeiing. Ook bij geavanceerde rekenprogramma's om verweking te modelleren, waarbij gekoppelde watergeneratie- en dissipatiemodellen worden gebruikt, is de doorlatendheid een belangrijke invoerparameter. Door middel van de HPT-sondeertechniek kan een continu doorlatendheidsprofiel over de diepte worden bepaald, waardoor nauwkeurige invoerdata voor deze modellen kan worden afgeleid.

3.2.4.3 Metingen en resultaten

Op basis van de sondeerresultaten bestaat de bodem ter plaatse van HPT1 voornamelijk uit zand met tussen NAP -4,5 m en -9 m zand met lemige/kleiige stoorlaagjes. Deze stoorlaagjes zijn slechts beperkt terug te zien in de waterspanningsmetingen, uitgevoerd met een u2-conus. Deze waterremmende laagjes zijn in de resultaten van de HPT goed zichtbaar.

Over het volledige traject van HPT3 wordt een relatief lage relatieve doorlatendheid gemeten, hetgeen op basis van het CPT-beeld en het beeld uit de HPT1 niet wordt verwacht. Mogelijk is dit het gevolg van een verstopping van (een deel van) het injectiescherm. Vergeleken met de resultaten uit CPT en HPT1 lijken de waarden een factor 3 te verschillen. Bij het verder toepassen van de HPT techniek dient zorgvuldig aandacht te worden besteed aan het voorkomen van verstopping.

Nadat de dissipatietesten zijn uitgevoerd en met de HPT verder gesondeerd wordt, blijkt er een sprong op te treden in de gemeten drukken/relatieve doorlatendheid. Deze sprongen kunnen op basis van de sondeerresultaten niet verklaard worden. Dergelijke sprongen in waterdruk en overige data zijn eerder bij metingen op het land niet geconstateerd.

3.2.5 Laboratoriumonderzoek

3.2.5.1 Techniek en toepassing

Ten behoeve van het narekenen van de vloeiingen in het proefvak met de diverse rekenmodellen (paragraaf 3.5), zijn verschillende laboratoriumproeven uitgevoerd.

Op kernen uit zowel boringen voorafgaand aan als na afloop van het experiment en zowel in het proefvak als in de vloeiing van juli 2014 zijn in het laboratorium van Deltares en door Wiertsema & Partners de volgende proeven uitgevoerd:

- 16 korrelverdelingen inclusief bepaling fijne fractie, uit monsters uit de vibrocore boringen, uitgevoerd door Wiertsema & Partners
- 6 bepalingen minimale en maximale dichtheid, watergehalte, volumiek gewicht droog
- 6 ongedraineerde en gedraineerde triaxiaalproeven op zowel ongeroerde als opgebouwde monsters
- 6 samendrukkingsproeven

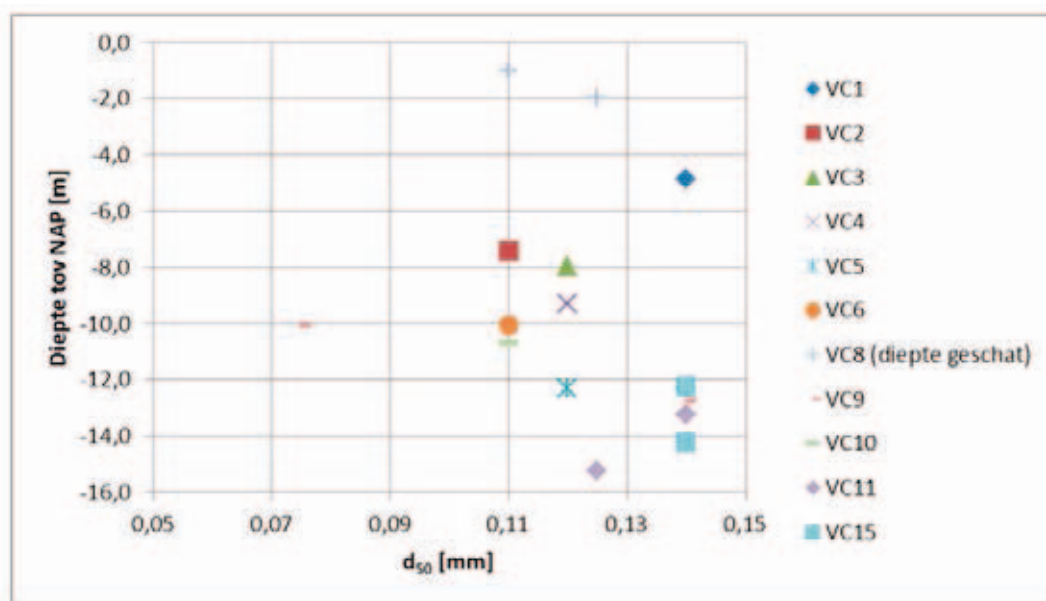
Aan boord van de peilvlet Geosurveyor XI waren voor bodem- en waterbemonstering tijdens de proef verder aanwezig:

- twee Niskin flessen (ook wel Delftse fles genoemd)
 - twee 2 liter Van Veen grabbers ("bodemhappers")
 - twee 0.5 liter Van Veen grabbers,
- elk met 30 m nylon koord.

3.2.5.2 Resultaten

In de korrelverdelingen komt duidelijk het onderscheid naar voren tussen:

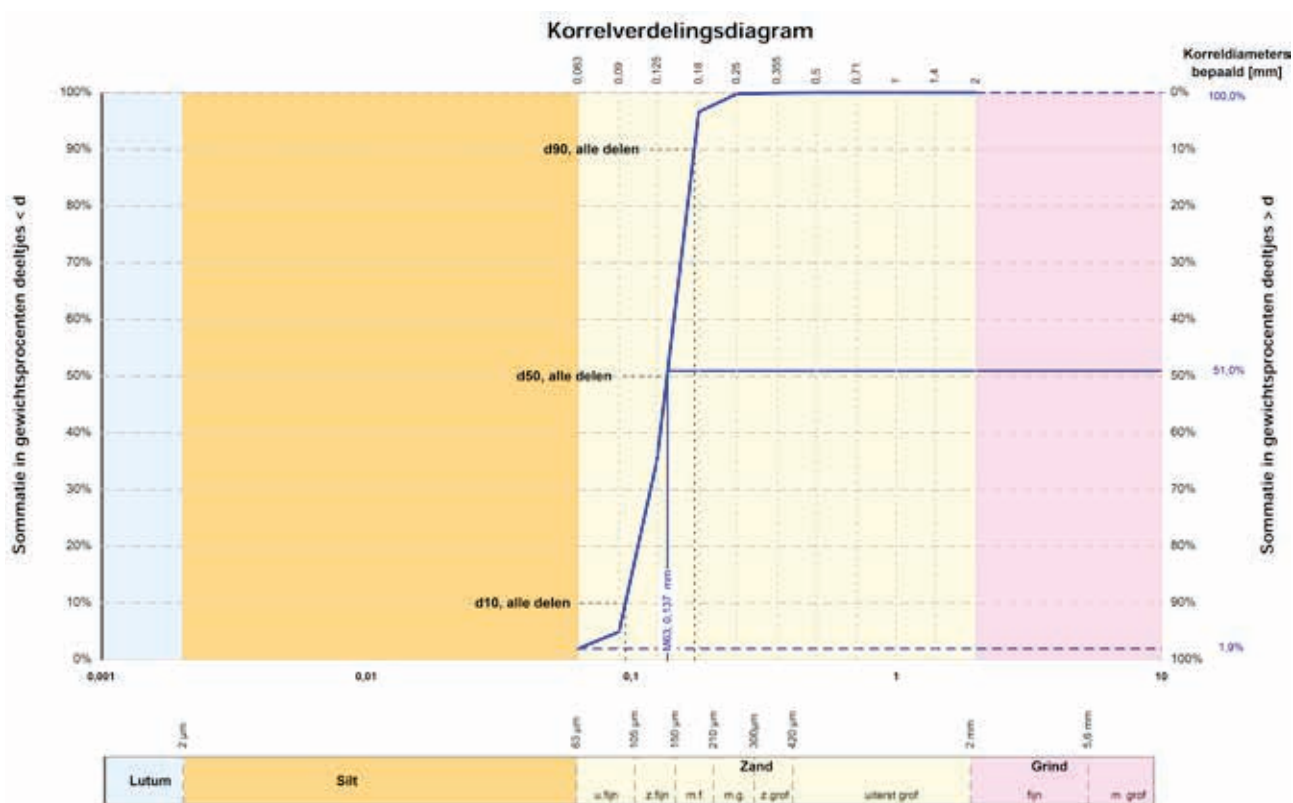
- Monsters bestaande uit fijn, uniform zand: een gemiddelde d_{50} van 130 μm (zie Tabel 3.1) en een gemiddelde d_{60}/d_{10} van 1,5. Slibgehalte lager dan 2%.
- Monsters met een zeer hoog slibgehalte, variërend van 15% tot meer dan 40%.



Figuur 3.6 Overzicht mediane d_{50} (50 percentielwaarde van de korrelverdeling) met de diepte

In Figuur 3.7 is een voorbeeld gegeven van een korrelverdeling. Voor details wordt verwezen naar [Wiertsema, 2014].

Met name in het erosiegebied van de vloeiing van juli 2014 bestaan de bovenste meters uit slib. Waarschijnlijk is dit slib afgezet in de maanden na de vloeiing.



Figuur 3.7 Voorbeeld korrelverdeling (boring VC04, 1-2 m diepte)

Triaxiaalproeven, samendrukkingsproeven en bepaling minimale en maximale dichtheid, watergehalte en volumieke gewichten zijn telkens op dezelfde (meng)monsters uitgevoerd. De proeven zijn uitgevoerd op zowel uniforme fijnzandige monsters als op monsters met een hoog slibgehalte.

Met de grote Van Veen grab zijn een aantal bodemmonsters binnengehaald op een waterdiepte tot maximaal ca. 17 m. Locatie en tijdstip zijn vermeld op de 2 liter monsterzakjes en in het logboek. Deze monsters zijn nog niet geanalyseerd.

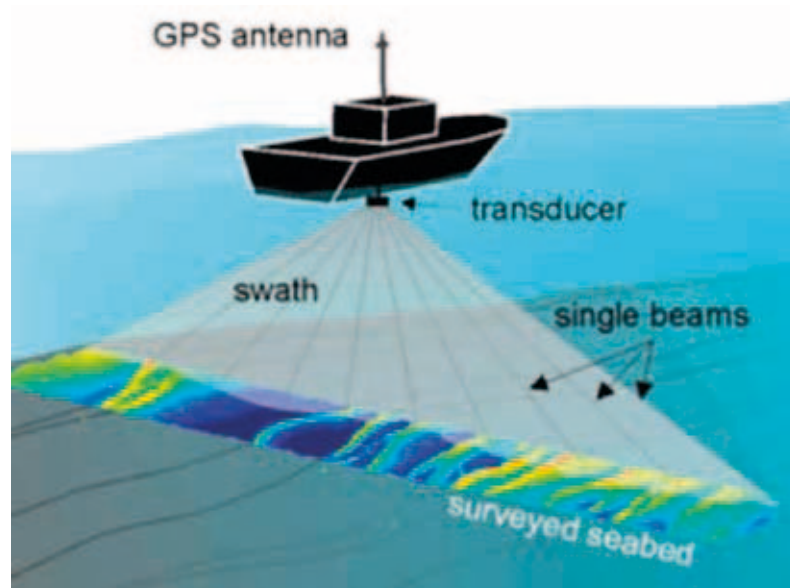
Het is niet gelukt met de Niskin fles een monster te nemen uit de zand-watmengselstroming dicht bij de bodem tijdens een vloeijing. Er zijn wel enkele watermonsters genomen en in 2 l plastic flessen bewaard.

3.3 Meten aan het faalmechanisme

3.3.1 Multibeam

3.3.1.1 Systeem

Multibeam echolood (MBES) is een apparaat dat gebruikt wordt in de hydrografie om de afstand tot de zeebodem mee te kunnen berekenen. Het is in principe een samengestelde singlebeam. De multibeam zendt in één keer meerdere geluidspulsen uit onder verschillende hoeken (in tegenstelling tot de singlebeam), zie Figuur 3.8. Deze bundel van pulsen vormt een waaier onder het schip. Deze waaier loopt van loodrecht onder het schip in dwarsscheepse richting naar beide zijden, tot een maximale openingshoek. Door deze bundel wordt een strook gemeten op de zeebodem. Deze strook wordt breder naarmate de diepte groter wordt. Een multibeam kan in principe niet werken zonder GPS, een bewegingscompensator en een geluidssnelheidsmeter (SVP Sound Velocity Profiler).



Figuur 3.8 Principe Multibeam meting (bron: Centre for Marine Environmental Science, Universiteit van Bremen)

3.3.1.2 Toepassing

Doel was het nauwkeurig vastleggen van de waterbodempligging in het proefvak. Dit werd bereikt door het uitvoeren van een vlakdekkende meting en een hoge herhalingsfrequentie van het gebied waar veranderingen in de bodempligging konden optreden door het ontstaan van een vloeijing. Er is gekozen voor het inzetten van drie nauwkeurig op elkaar afgestemde meetvletten met MBES, geleverd door GeoXYZ met bemanning en surveyors. De taakverdeling was als volgt, zoals van te voren vastgelegd in het draaiboek van de proef [Koelewijn, 2014]:

- Het ondiepe vlet, de Geosurveyor IV, dat tussen de plaatrand en het baggerschip opereerde,
- Het diepe vlet, de Orion, dat aan de vaargeulzijde van het baggerschip opereerde,
- Het 'vaste' vlet, de Geosurveyor XI

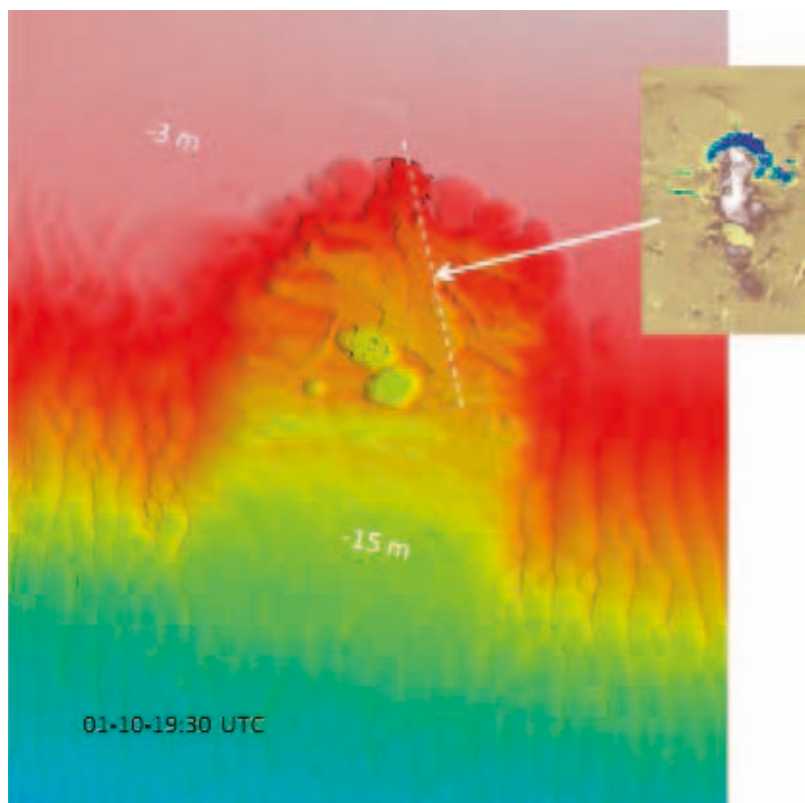
Op basis van de actuele meetresultaten kon het vaar- en baggerschema continu aangepast worden. Als referentie is bij begin en eind van de proef het gehele gebied ingemeten, over ongeveer 1500 m lengte van de plaatrand tot in de vaargeul.

3.3.1.3 Metingen en resultaten

De continue multibeam-metingen, resulterend in vlakvullende 'surfaces' van het proefvak, maakten het mogelijk de vorderingen van het baggerwerk goed te volgen, en voor het eerst ook de autonome ontwikkelingen die duiden op het ontstaan van een zettingsvloeiing zichtbaar te maken. De drie afzonderlijke MBES systemen genereerden x,y,z-data van het bemeten gebied. Indien er tijd beschikbaar was, werden de metingen aan boord geprocesst, anders niet. De ontwikkelingen werden gevolgd door het samenvoegen van de bathymetriemetingen, het genereren van plots en het vergelijken met de voorgaande meting en de 0-meting (differential plots ofwel verschilplaatjes) en dwarsprofielen van de bodemligging op geselecteerde lijnen. Achteraf werd de gehele dataset gecorrigeerd en opgeschoond door GSO. Vervolgens werd de data verwerkt in vlakvullende GeoTIFF-bestanden van het proefvak, met een interval van 15 minuten. Deze interpretatieslag gebeurde achteraf. Een aantal keren is het ontstaan van een (bres-)vloeiing waargenomen. Bij het begin van een vloeiing ontstond aan de hoge zijde van het gebaggerde talud een halfronde, kratervormige, actieve bres, zichtbaar in de verschilplaatjes omdat hier erosie optrad en aan de teen depositie van zand. Dit gebeurde zonder verder ingrijpen van het baggerschip, dat stand-by werd gestuurd. De bijna verticale bres bewoog langzaam taludopwaarts en kon daarbij in hoogte toe- of afnemen. Dit was een aantal keren gedurende enkele uren zichtbaar, waarbij een komvormige bres ontstond met een hoogte van 4 tot 6 m en een diameter van 30 tot 40 m, dus al van een aanzienlijke omvang die nog nooit onder laboratoriumomstandigheden is behaald. Het zand werd afgezet over een afstand tot 60 m. Door de bathymetrie- en de verschilmetingen en de dwarsprofielen in de tijd af te spelen wordt de beweging van het zand zichtbaar gemaakt. In totaal zijn op die manier 7 vloeiingen gedetecteerd. Een overzicht is gegeven in Tabel 3.1. In Figuur 3.9 is een momentopname van de laatste vloeiing weergegeven en een detail met een verschilweergave. In Figuur 3.10 is de ontwikkeling van deze vloeiing in het dwarsprofiel zichtbaar.

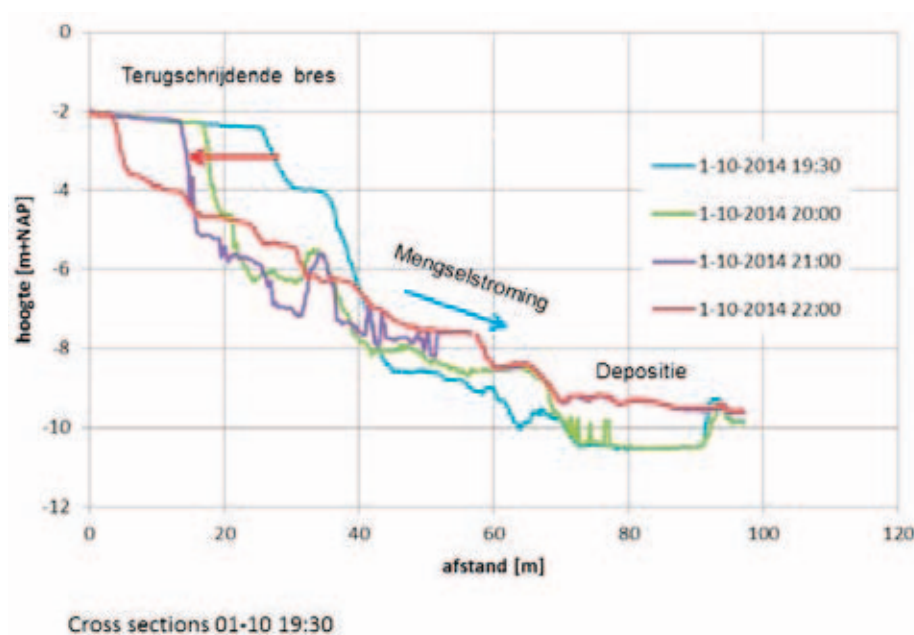
Tabel 3.1 Overzicht gedetecteerde vloeiingen uit multibeam-analyse. De laatste vloeiing is weergegeven in de volgende twee figuren

Datum	Periode (UTC)
28-09-2014	15:00-18:00
28-09-2014	22:00-01:00
29-09-2014	04:00-09:00
30-09-2014	07:00-11:00
30-09-2014	19:00-23:00
01-10-2014	05:00-08:00
01-10-2014	19:00-23:00



Figuur 3.9 Multibeam meting proefvak 1-10-2014-19:30 UTC met actieve bres, met ingevoegde 1 uur verschilmeting (blauw=erosie, geel/wit = depositie), zie ook volgende figuur.

De bressen bleven helaas niet actief, ondanks het feit dat in totaal bijna 60 000 m³ zand is gebaggerd, zodat het niet gelukt is een vloeijing te veroorzaken die bij het eerstvolgende laagwater ook in de plaatrand boven de laagwaterlijn doorliep, zoals de vloeijing van 22 juli 2014. De terugschrijfsnelheid van de bressen komt overeen met (schaarse) waarnemingen aan zettingsvloeijingen boven water.



Figuur 3.10 Dwarsprofielen langs streeplijn in vorige figuur. Terugschrijfsnelheid circa 15 m/uur

Dicht bij het baggerschip kon niet goed gemeten worden door verstoring door overvloeiend spoelwater, de schroefstraal of omdat de meetvlet niet voldoende dichtbij kon komen. Daarom werd extra gemeten op momenten dat het baggerschip uit het proefvak naar het stortvak bewoog en werd het baggeren pas hervat nadat de meting voltooid was. Vooral aan de ondiepe kant waren de metingen gevoelig voor verstoring, zichtbaar als ruis op het signaal.

3.3.2 Subbottom profiler

3.3.2.1 Systeem

Een chirp sub-bottom profiler (SBP) is net als een multibeam echolood een akoestische techniek. Een signaal wordt uitgezonden met een bepaalde tijdsduur (bijvoorbeeld 40 msec) waarbinnen de frequentie lineair toeneemt. In de akoestiek wordt dit signaal een 'sweep' of 'chirp' genoemd. Het signaal wordt opgewekt door een piëzo-elektrische bron en opgevangen door korte, in het sleeplichaam verwerkte, hydrofoonstreamer(s). De gebruikte frequentie bij SBP is veel lager (< 10 kHz) dan van een multibeam echolood (200 tot 400 kHz). Daardoor kan, afhankelijk van de samenstelling, de (zee)bodem enkele meters tot enkele tientallen meters gepenetreerd worden. Op basis daarvan kan een bodemprofiel gemaakt worden, bij voorkeur tezamen met aanvullende boringen en sonderingen.

3.3.2.2 Toepassing

De SBP-techniek is tijdens de proef op twee momenten toegepast, met verschillende doelstellingen:

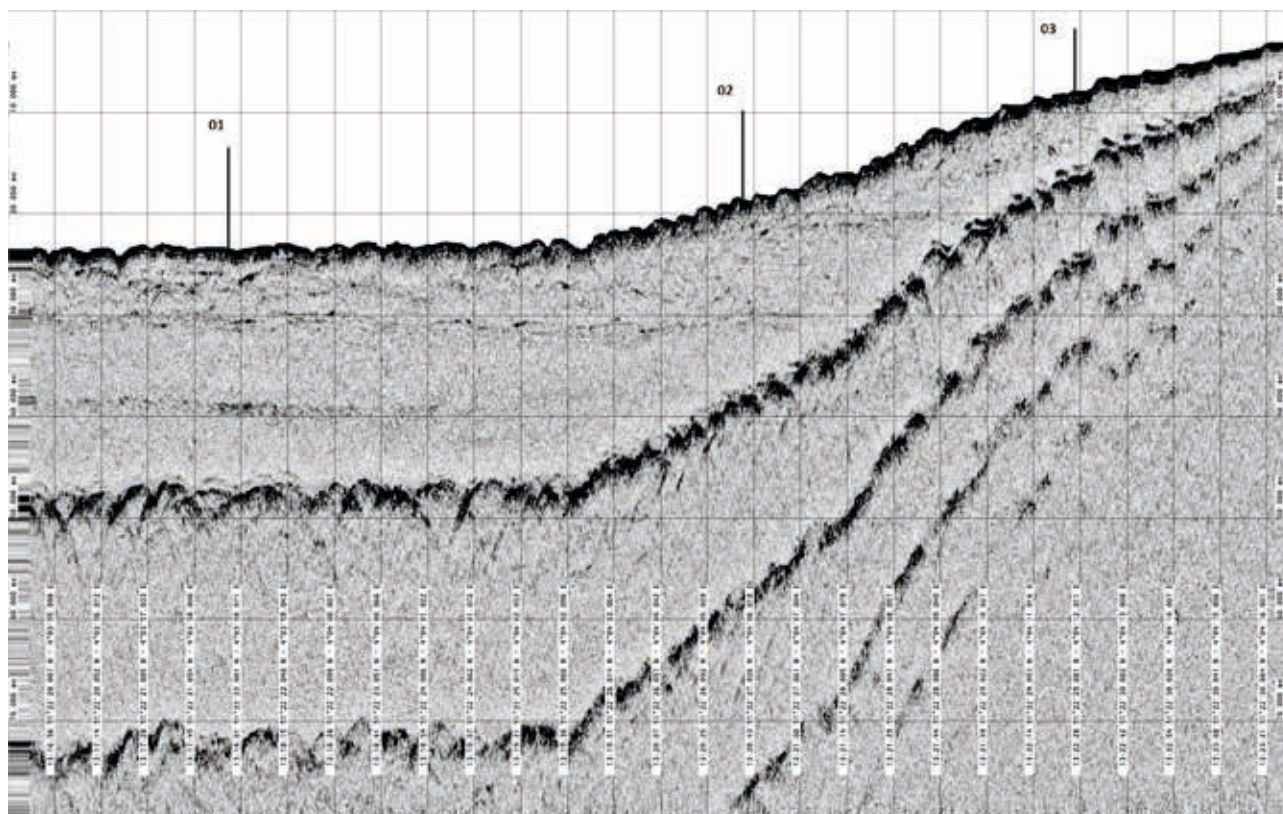
- Voorafgaande aan de proef, ter bepaling van de grondopbouw, als aanvulling op de sonderingen en boringen.
- Tijdens de proef:
 - Het vastleggen van de bodem, mocht de multibeam geen goede resultaten opleveren, bijvoorbeeld door troebeling ten gevolge van overvloed of de stofwolk die zou kunnen ontstaan tijdens een vloeiing
 - Het bepalen van de dikte van de suspensiestroom, die naar verwachting een lagere dichtheid heeft dan de vaste ondergrond waar de suspensiestroom overheen trekt.

Voorafgaande aan de proef is een subbottom profiling survey uitgevoerd van de natuurlijke vloeiing van juli 2014 en het westelijk deel van het beoogde proefgebied, dat toen in verband met de vloeiing van juli nog niet vaststond.

Tijdens de proef heeft op de ondiepe vlet, de GeoSurveyor IV, een subbottom profiler continu gemeten en zijn de data opgeslagen op de datalogger op het schip.

3.3.2.3 Metingen en resultaten

In Figuur 3.11 is een voorbeeld gegeven van één van de subbottom profiles, die gemaakt zijn voorafgaande aan de proef. Dit voorbeeld ligt in het westelijk deel van het beoogde proefgebied. Boringen van Fugro (zie paragraaf 3.2) zijn gebruikt om een eerste interpretatie te doen, zie de tabel onder Figuur 3.11.



boring nr	latitude WGS84	longitude WGS84	RD X	RD Y	op lijn	bijzonderheden (alle dieptes onder vis en omgerekend uit ms met 1 ms = 0.75 m)
1	51gr22'21.85"	04gr03'58.48"	63024,1	376783,2	19	diepte 23 ms (17.3m); channel fill? Tot 28ms (21m);cont.refl op 30ms (22.5m) en op 40ms (30m)
2	51gr22'27.15"	04gr04'05.90"	63170,7	376944	19	diepte 19ms (14.3m); dump/channelfill? Tot 25ms (18.8m);cont.refl op 30ms (22.5m)
3	51gr22'29.78"	04gr04'11.99"	63290	377023,7	19	diepte 8ms (6m);actieve laag tot 12ms (9m)

Figuur 3.11 Voorbeeld uitwerking Subbottom profile survey in westelijk deel van proefvak. De dikke zwarte lijnen zijn reflecties van de zeebodem en geven dus geen laagscheidingen weer.

Metingen tijdens de proef zijn niet uitgewerkt, maar wel opgeslagen en beschikbaar voor toekomstig onderzoek. Uitwerking hiervan vergt een meer diepgaande analyse dan in dit kader mogelijk was.

3.3.3 M3 Sonar

3.3.3.1 Systeem

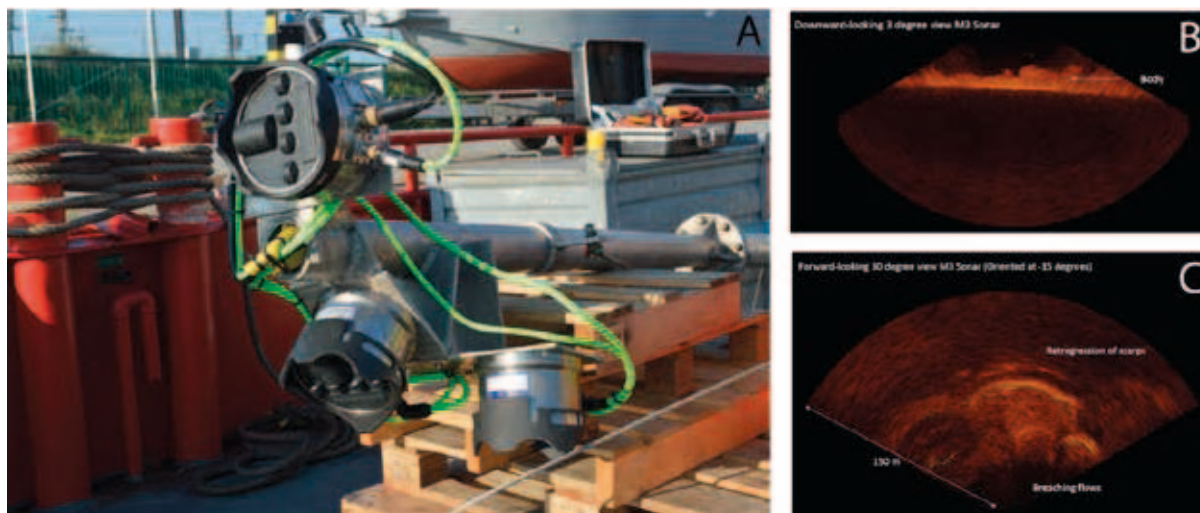
De Multi Mode Multibeam (M3) sonar is een nieuw meetinstrument dat een twee-dimensionaal beeld van de wereld onder water kan geven. De M3 is vergelijkbaar met het hiervoor beschreven multibeam echolood. Het zendt meerdere akoestische pulsen ('pings') uit, in een waaivorm middels een speciaal hiervoor ontworpen transducer. De uitgezonden geluidsgolven weerkaatsen tegen objecten die ze tegenkomen. Dit kan van alles zijn; de bodem, een ander schip, een luchtbel of een zandkorrel. De snelheid van het akoestische signaal door het water is bekend, de M3-apparatuur houdt ook nauwkeurig bij hoe lang het weerkaatste signaal er over doet om terug te komen. Zo kan de afstand van een object tot de transducer worden berekend. Tevens kan de amplitude (intensiteit) van het gereflecteerde signaal een indicatie geven van de dichtheid van wat er wordt gemeten, in dit geval de sedimentconcentratie in een troebelingsstroom.

3.3.3.1 Toepassing

Voor het experiment dat op de Westerschelde is uitgevoerd, zijn drie M3-units gemonteerd op aan een paal aan de bakboordzijde van de Geosurveyor XI. De instrumenten zijn van het model Kongsberg M3-sonar en opereren op een geluidsfrequentie van 500kHz. Eén van de drie M3's was recht naar beneden gericht en had een zichtsveld van 120° bij 3°. De andere twee koppen waren gericht op respectievelijk 15° en 44° ten opzichte van de horizon en hadden beide een zichtveld van 30° bij 120°. Middels deze setup werd geprobeerd een zo groot mogelijk deel van wat onder water gebeurde inzichtelijk te maken. De M3's waren ingesteld om 5 maal per seconde een akoestisch signaal af te geven. Als de beelden van de M3's met de positie en vaarrichting van het schip gecombineerd worden, kan een beeld van wat zich waar onder water afspeelde worden samengesteld.

3.3.3.2 Metingen en resultaten

Op de eerste resultaten van de M3's zijn verschillende dingen te zien; zo is het mogelijk om de sleepkop van het baggerschip in kaart te brengen, of luchtbellens van de schroeven van andere schepen. Meer relevant voor het experiment is dat de 'halve-maan-vormige erosievlakken' waar de zettingsvloeiing begint in kaart gebracht konden worden, inclusief de ontwikkeling in de tijd (Figuur 3.12B). Ook de troebelingsstroom die zich als gevolg van een zettingsvloeiing kan ontwikkelen, kan gevisualiseerd worden (Figuur 3.12C).



Figuur 3.12 A) de drie M3s aan een paal gemonteerd. B) De erosievlakken die door de zettingsvloeiing worden gevormd, gezien door de M3 die 15 graden onder het wateroppervlak gericht is, met een openingshoek van 30 graden. C) troebelingsstroom op de bodem, gezien op de naar beneden kijkende M3.

3.3.4 ADCP

3.3.4.1 Systeem

Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP's) zijn bijzonder geschikt voor het meten van stroomsnelheden onder water, ook vanaf een schip, zoals de stroomsnelheid van troebelingsstromen (turbidity currents) ten gevolge van een bresvloeiing. De ADCP's worden aan een schip gemonteerd met de sensoren in het water. De sensoren van de ADCP bestaan uit vier piëzo-elektrische elementen die geluidgolven genereren en de reflecties van deze golven ontvangen. De vier elementen versturen geluidsgolven van een vaste frequentie in de richting van de zeebodem voor een korte periode (ping). Een gedeelte van de geluidsgolven wordt in de waterkolom weerkaatst door kleine deeltjes. Deze weerkaatste geluidsgolven worden door dezelfde sensoren weer ontvangen. De geluidsgolven die terugkomen kunnen verschillen in frequentie als gevolg van de Doppler verschuiving. Deze frequentieverschuiving is terug te brengen tot de snelheid van het deeltje dat de weerkaatsing veroorzaakt heeft, en daarmee tot de snelheid van de waterkolom ter plaatse. Aan de hand van het tijdsverschil tussen het verzenden en ontvangen signaal is de diepte van het deeltje onder het schip te bepalen. De combinatie van tijdsverschil en Dopplerverschuiving geeft dan een snelheidsprofiel van de waterkolom onder het schip ten opzichte van het schip. Om het absolute snelheidsprofiel

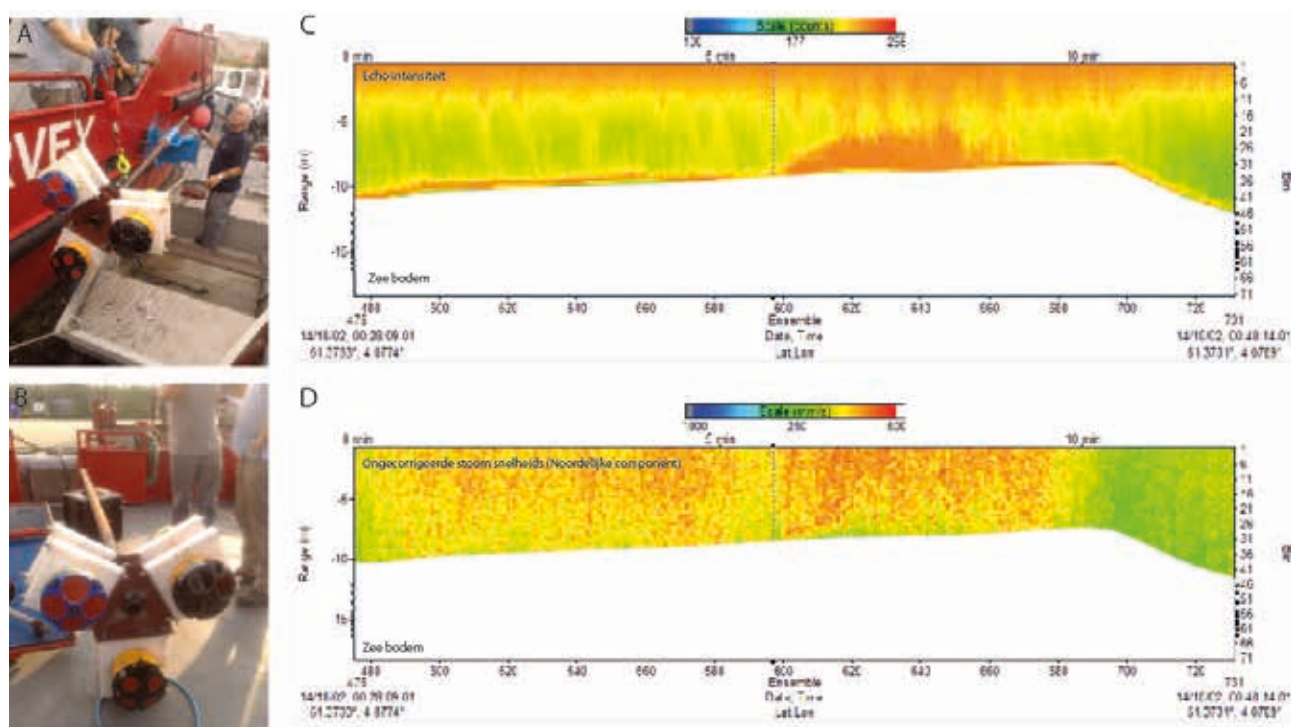
te krijgen moet het ontvangen profiel worden gecorrigeerd voor de scheepssnelheid. Een directe meting van de scheepssnelheid wordt verkregen door een "bottomtracking" ping van de ADCP. Deze ping richt zich enkel op de Doppler shift van de zeebodem, om daaruit de scheepsbeweging af te leiden, welke vervolgens gebruikt wordt om een absoluut snelheidsprofiel van de waterkolom te verkrijgen.

3.3.4.2 Toepassing

Voor de proef zijn er drie ADCP's gemonteerd op een meetpaal aan de stuurboordkant van de Geosurveyor XI (zie Figuur 3.13A&B). De gebruikte instrumenten waren een 300kHz, een 600kHz en een 1200 kHz workhorse ADCP van het merk Teledyne. De bedoeling van het gebruik van drie verschillende frequenties is om sedimentgrootte en sedimentconcentratie te bepalen aan de hand van de verschillende weerkaatsingssterktes als functie van de geluidsfrequentie.

3.3.4.3 Metingen en resultaten

Enige eerste meetresultaten zijn weergegeven in Figuur 3.13C&D. Deze data laten zien dat de gemeten troebelingsstroming maximaal enkele meters dik is en een snelheid heeft van ongeveer 0.6 m/s. Meer gedetailleerde analyse van de data is nog afhankelijk van de correctie voor scheepsbeweging die nog niet is toegepast. Na het toepassen van deze correctie zal de analyse van de korrelgrootte en sedimentconcentratie uitgevoerd kunnen worden.



Figuur 3.13 A) Bevestiging van de ADCP meetpaal op de Geosurveyor XI. B) Bevestiging van de ADCPs op de meetpaal. C) Onbewerkte ADCP meting van de echo intensiteit van een troebelingsstroming (tussen 6 en 8 minuten). D) Onbewerkte ADCP meting van noordelijke component van stroomsnelheid in de waterkolom. Troebelingsstroming snelheid in zuidelijke richting heeft een orde van grootte van ongeveer 0.6 m/s.

3.3.5 Waterspanningsmeters

3.3.5.1 Systeem

Er is gebruikgemaakt van piëzo-elektrische druktransmitters met een meetbereik van 0 tot 400 kPa en een nauwkeurigheid van 0,1 kPa. Deze sensoren zijn verloren geplaatst, door ze handmatig weg te drukken in een pulsboor-casing. Daarna is de casing getrokken en is het gat gevuld met lokale grond.

Alle waterspanningsmeters (en ook de pressiobalgen, zie paragraaf 3.3.6) zijn met offshore kabels verbonden met

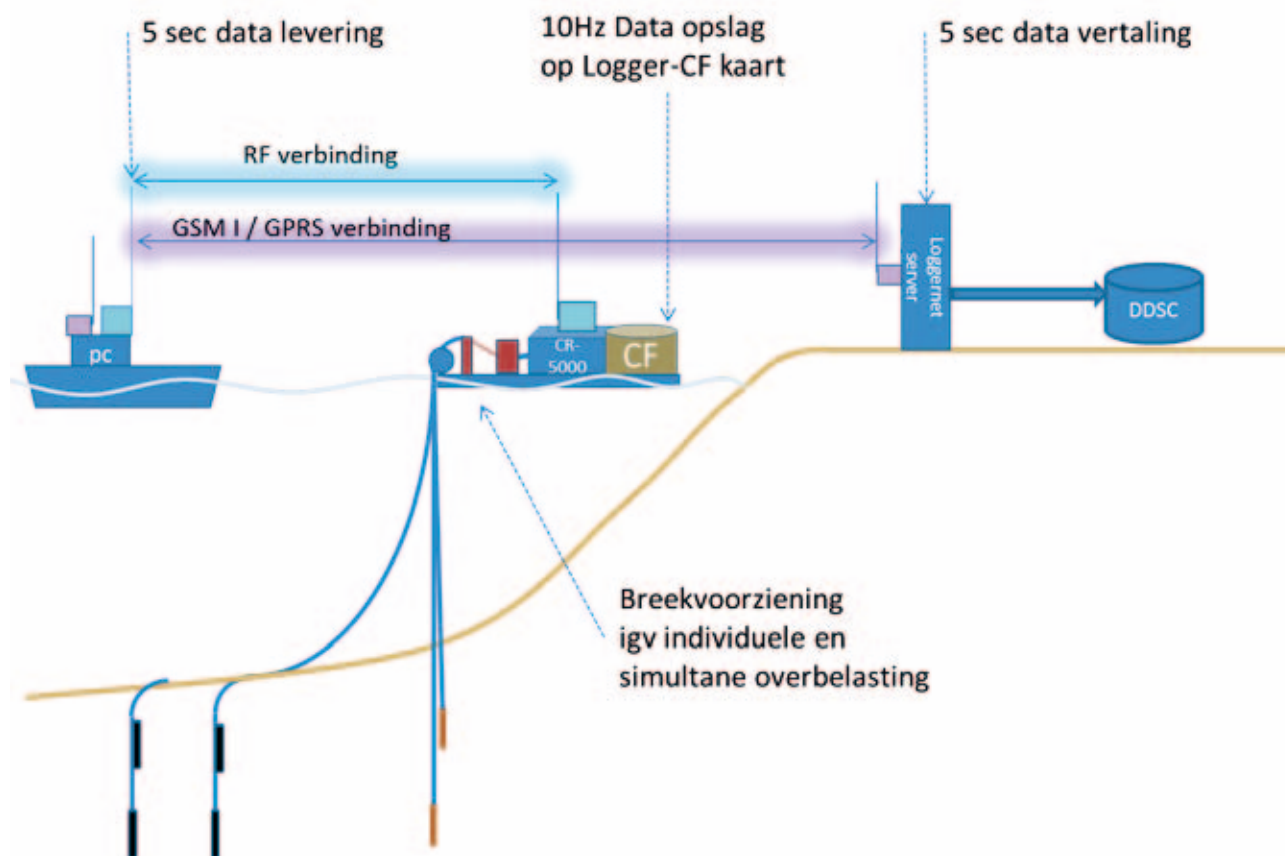
een datalogger op een meetponton. Bij hoogwater dreef het ponton, bij laagwater lag het op de plaat. Voorzien was dat in geval van een vloeiing die tot (ver) voorbij het meetponton zou doorzetten, de kabels gekapt zouden kunnen worden en het ponton weggesleept zou worden.

Voor meer informatie wordt verwezen naar [Hogervorst et al., 2014].

3.3.5.2 Toepassing

In totaal zijn op de plaat en nabij de plaatrand 10 waterspanningsmeters geplaatst. Daarbij zijn 6 waterspanningsmeters individueel geplaatst op een diepte van mv-5,0 m. De overige vier zijn geplaatst in groepjes van twee, op een diepte van mv-2,5 m en mv-5,0 m.

Tevens is iets ten oosten van het gebied waar de vloeiing zich volgens de verwachtingen zou uitstrekken een getijdesensor geplaatst, die bestond uit een waterspanningsmeter op de bodem, vastgemaakt aan een in de grond geslagen buis.



Figuur 3.14 Datastroom waterspanningsmeters en FPB's

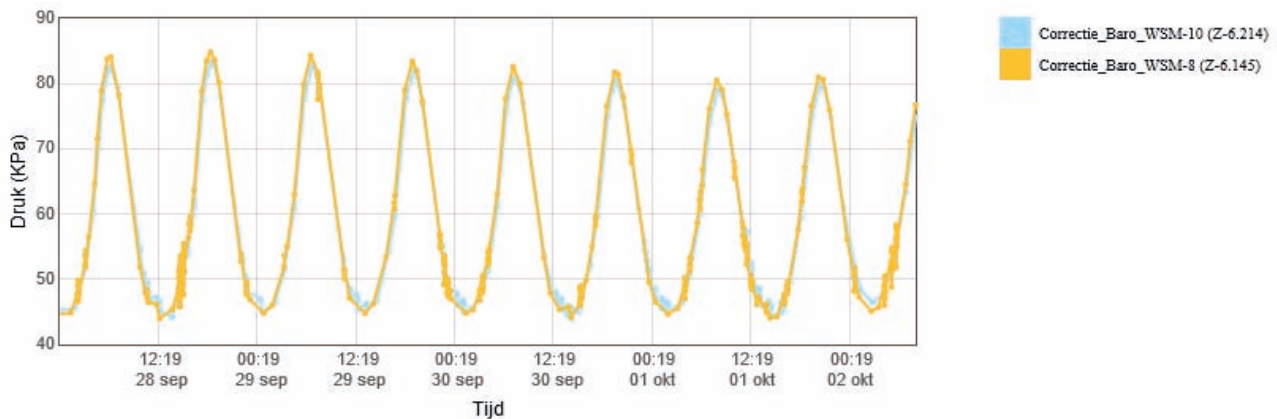
Waterspanningen zijn tijdens de proef gemeten met een frequentie van 10 Hz. Deze metingen zijn opgeslagen in een datalogger. Gedurende de gehele proef zijn elke 5 seconden meetwaarden van alle sensoren (ook van de balgen) via een radioverbinding van de logger naar het schip van de proefleiding gestuurd, zodat proefleiding real-time kon meekijken met de meetwaarden.

Een plotselinge verandering van waterspanning zou een indicatie kunnen zijn van een verwekingsvloeiing of een richting plaat terugschrijdende bres. Het eerste zou waarneembaar moeten zijn door het plotseling optreden van wateroverspanningen, het laatste juist door het ontstaan van wateronderspanningen. Naast de multibeam-metingen hadden ook de waterspanningsmetingen dus de functie van verklikker.

3.3.5.3 Metingen en resultaten

Net als in de balgen (zie paragraaf 3.3.6) is in de waterspanningsmetingen duidelijk het getijdeverloop (circa 3,5 m) zichtbaar, net als het passeren van grote schepen.

Omdat een zeer grote vloeïing, zoals de natuurlijke vloeïing van juli 2014, is uitgebleven, zijn er geen wateroverspanningen of wateronderspanningen ten gevolge van de tijdens de proef opgetreden vloeïingen gemeten. De vloeïingen die wel zijn opgetreden hadden geen merkbare invloed op de metingen. Een voorbeeld is gegeven in Figuur 3.15. De locaties van de instrumenten staan in Figuur 3.1.



Figuur 3.15 Verloop waterspanningen op twee locaties

3.3.6 Fugro Pressio Balg (FPB)

3.3.6.1 Techniek

De Fugro Pressio Balg (FPB, zie Figuur 3.17) is een nieuw ontwikkeld instrument om het gedrag van slappe gronden te bepalen. De FPB bestaat uit een rubberen cilinder met interne en externe druksensoren en een waterspanningsmeter, waardoor gelijktijdig de korrelspanning en de waterspanning gemeten worden. De FPB wordt geplaatst in een boorgat waarna de balg op druk wordt gebracht waardoor uiteindelijk met minimale verstoring de horizontale gronddruk kan worden overgenomen. Bij deformaties, verandering van de waterspanning of bovenliggende bodemhoogte zal de verandering in gronddruk gemeten worden.

Het meetprincipe is gebaseerd op het waarnemen van drukverandering in en naast de rubberen cilinder die voorafgaand aan de metingen met water is opgeblazen in een boorgat.



Figuur 3.16 Fugro Pressio Balgen (FPB's)

3.3.6.2 Toepassing

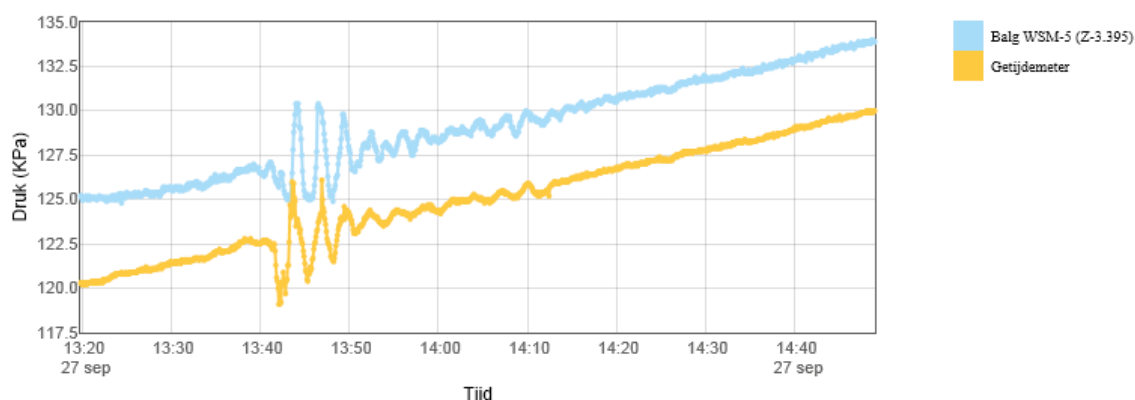
De Fugro Pressio Balg is een in ontwikkeling zijnde meettechniek welke bedoeld is om het gedrag van slappe bodems beter in kaart te kunnen brengen, aangezien hier op dit moment geen geschikte meettechnieken voor beschikbaar zijn. De ontwikkelde meettechniek is onder andere bedoeld om de gronddruk te monitoren bij onder andere ontgravingen, ophogingen en dijken. Hierbij is het doel dat het instrument kan worden toegepast om voor ontwerpdoeleinden de spannings-rek karakteristiek van de ondergrond vast te stellen of om als monitoringsinstrument kleine drukveranderingen in de ondergrond te registreren.

Omdat de stijfheid van de grond bij verweking sterk afneemt kan de Fugro Pressio Balg worden gebruikt om het proces van verweking te registreren. Hierbij kan het verband tussen wateroverspanning (welke separaat wordt gemeten) worden gerelateerd aan een afname van de stijfheid van de ondergrond.

3.3.6.3 Metingen en resultaten

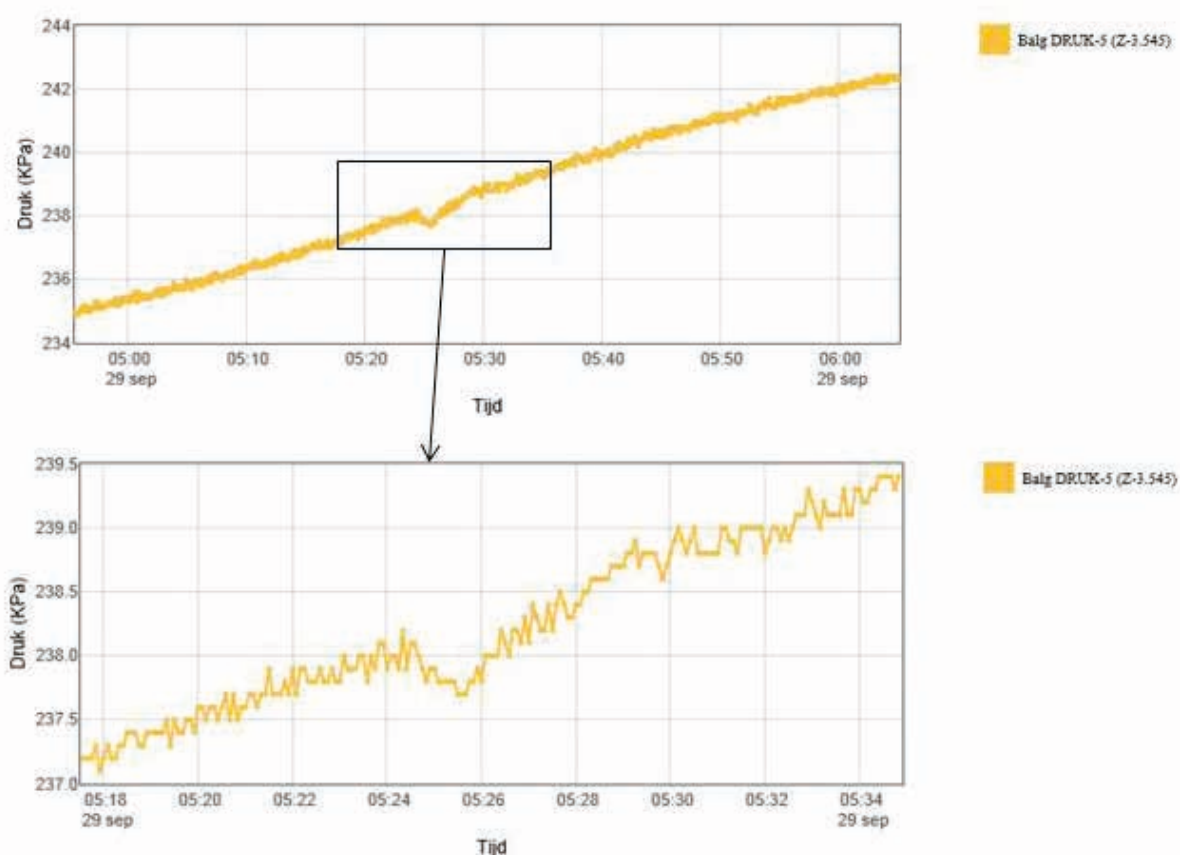
Bij de zettingsvloeiingsproef is de pressiobalg ingezet als monitoringsinstrument om (grond)drukveranderingen tijdens zettingsvloeiingen te registreren. Tijdens de proef zijn verschillende vloeiingen (mogelijk verweking of bresvorming) opgetreden. Geen van deze vloeiingen heeft zich echter doorgezet tot bij de balgen. Ondanks dat er visueel met de echosounder geen vloeiing waargenomen is bij de balgen, zijn er wel veranderingen in balgdruk en de waterspanning gemeten. Naast het getijde zijn er 2 soorten veranderingen waargenomen welke zijn weergegeven in onderstaande 2 figuren.

Tijdens de proef is herhaaldelijk een uitdempende sinusvormige fluctuatie in de waterdruk met een periode van ca. 3 minuten waargenomen, zie Figuur 3.17. Voor deze veranderingen zijn verschillende verklaringen mogelijk, zoals scheepvaart of meteorologische invloeden. Deze fluctuaties zijn zowel in de getijde- als balgsensoren geregistreerd.



Figuur 3.17 Schommeling van de druk op 27 september

Tijdens de 1ste zettingsvloeiing is een kleine tijdelijke afname van de druk waarneembaar vanaf 29 sept, 5:24:30. Deze drukafname zou mogelijk het gevolg kunnen zijn van de opgetreden zettingsvloeiing, maar het is ook mogelijk dat een ander mechanisme voor de drukverlaging heeft gezorgd.



Figuur 3.18 Grafieken behorend bij FPB-5 (bron: DDSC), de opwaartse trend wordt veroorzaakt door het getij, op 29 september rond 05:24 is een kleine daling van de druk te zien.

Opvallend is dat de balgdruk doorgaans het patroon van de waterspanningsmeters volgt. Blijkbaar zijn er geen significante grondrukveranderingen opgetreden. Het uitvoeren van meer testen met de Fugro Pressio balg wordt aanbevolen om meer inzicht te verkrijgen in de eigenschappen en de werking van de balg. Voor meer details wordt verwezen naar [Hoogervorst et al., 2014].

3.3.7 Laseraltimetrie

3.3.7.1 Systeem

Met een laserscansysteem kan zeer nauwkeurig en snel de hoogteligging van een object worden vastgelegd. Laserscanning kan vanuit de lucht, een vaste positie of vanaf een meetauto of vaartuig plaatsvinden. Bij deze laatste toepassing moet rekening gehouden worden met de meethoek, die bij een lage positie op een flauw hellend terrein minder gunstig is. Multibeam- en laserscandata kunnen op dezelfde wijze in een GIS systeem verwerkt worden.

3.3.7.2 Toepassing

Op de Geosurveyor IV is door GeoXYZ een laserscansysteem geïnstalleerd waarmee de oever van het bovenwaterdeel van de plaatrand kon worden gescand. Zodra er een vloeiing op zou treden die zich zou uitbreiden tot boven de laagwaterzone van de plaatrand, zou de peilvlet dicht onder de oever kunnen varen en zou het inscharingsproces vastgelegd kunnen worden met de laserscan.

Door een multibeam met hoogwater en een laserscan met laagwater uit te voeren ontstaat er een overlap in de data van de plaatrand in de getijzone zodat een volledig beeld van de morfologie van de zandplaat kan worden verkregen, zij het op verschillende tijdstippen.

3.3.7.3 Metingen en resultaten

Er is een inmeting uitgevoerd om de uitgangssituatie voorafgaand aan de proef vast te leggen. Omdat de taludhelling bij de plaatrand erg flauw is en bovendien bij vallend water nog nat was waardoor het laserlicht reflecteerde, bleek het lastig een goede inmeting te verkrijgen.

Omdat er tijdens de proef geen inscharing tot boven de waterspiegel is opgetreden, zijn de metingen niet verwerkt, maar wel beschikbaar voor latere analyse.

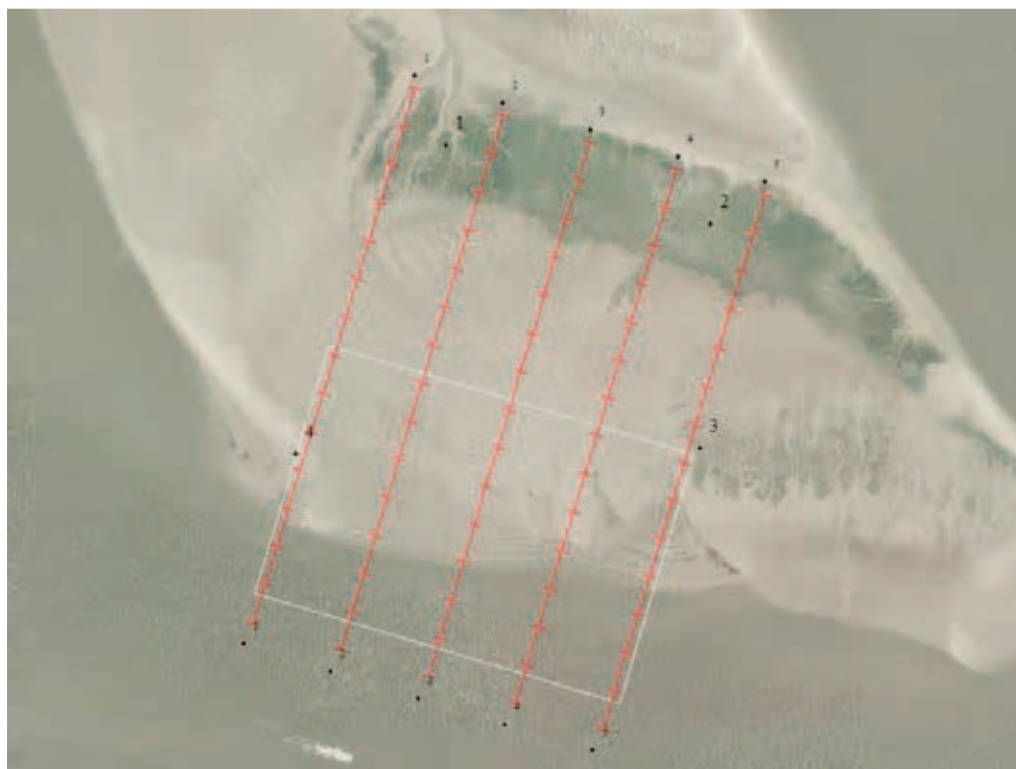
3.3.8 Airborne technieken

3.3.8.1 Systeem

Er is gebruik gemaakt van een tweetal technieken. Ten eerste een luchtfoto met UltraCam camera voor een zeer hoge resolutie van 2 cm. Uit de luchtfoto is vervolgens met een speciaal matching algoritme een hoogtemodel berekend met een puntafstand van 10 cm. Ten tweede een thermografische luchtfoto met FLIR SC6000 HS met een InSb detector, spectraal bereik van 3 tot 5 μm , gekalibreerd en gekoeld, S/N 1159, voor een resolutie van 30 cm. Doel van de inzet van beide meettechnieken was het zicht krijgen van de aantasting van de plaatrand boven water als gevolg van de zettingsvloeiing. Daarnaast is gekeken of de thermische data gebruikt kan worden om achteraf te kijken of temperatuurverschillen op water of land een aanwijsbare factor zijn die kunnen voorspellen op welke locatie een zettingsvloeiing plaatsvindt.

3.3.8.2 Toepassing

Miramap heeft voor en na de proef vluchten over het projectgebied in de Westerschelde uitgevoerd. Voor de luchtfoto en het afgeleide hoogtemodel is gevlogen volgens het vliegplan in Figuur 3.19.



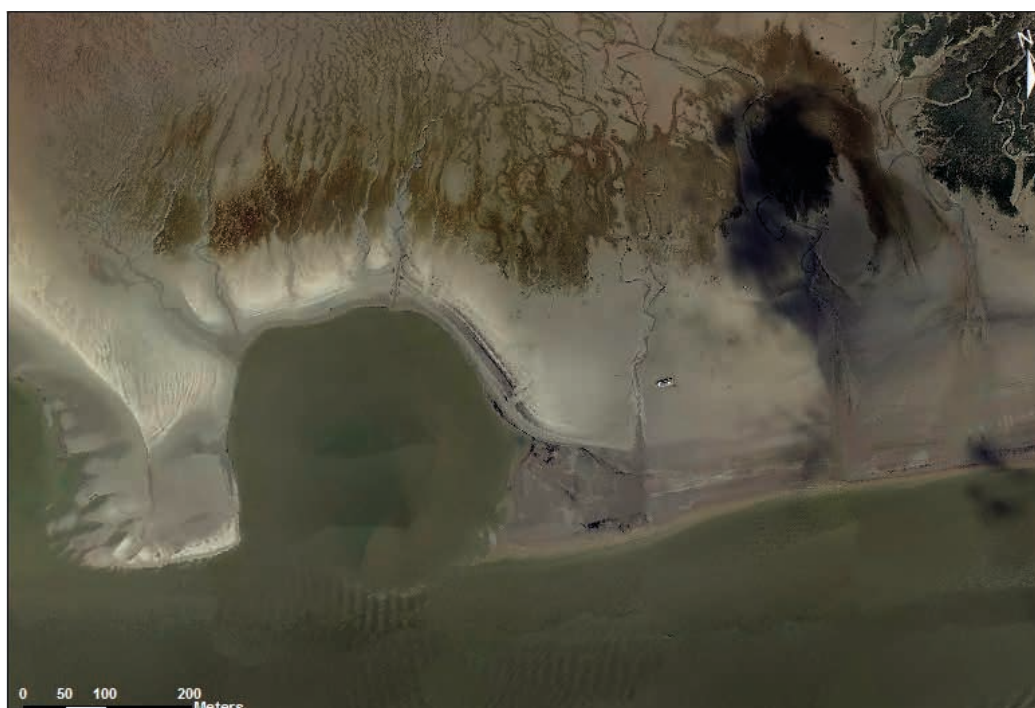
Figuur 3.19 Vliegplan

De eerste meting heeft plaatsgevonden bij springeb, voorafgaand aan het experiment. Vanuit een vliegtuig zijn op 12 september 2014 op exact tijdstip van springeb om 12:24 uur bij voorspeld tij van NAP -2,27 m de zeer gedetailleerde luchtfoto's en nauwkeurige warmtebeelden opgenomen. De opnamecondities waren ideaal. Het was helder weer en er was geen bewolking. De tweede meting heeft plaatsgevonden na afloop van het experiment

om zodoende vast te kunnen stellen wat het effect van de zettingsvloeiing is geweest op de zandplaat. Vanuit een vliegtuig zijn op 9 oktober 2014 op exact tijdstip van springeb om 10:36 uur bij voorspeld tij van NAP -2,27 m de nauwkeurige warmtebeelden opgenomen. Het was die dag kouder en heijger dan tijdens de eerste vlucht. Vanuit een vliegtuig zijn tenslotte op 13 oktober 2014 op exact tijdstip van laagwater om 13:20 uur bij NAP -2,09 m de hoge-resolutie luchtfoto's opgenomen. De dagen ervoor was het licht te ontoereikend (te weinig contrast) of was het te slecht weer om uit de luchtfoto's het hoogtemodel te kunnen berekenen. Om de luchtbeelden goed te kunnen geo-refereren en tot een orthofoto te kunnen verwerken zijn voorafgaand aan de vluchten drie paspunten aangebracht op de zandplaat. Deze paspunten zijn landmeetkundig ingemeten.

3.3.8.3 Metingen en resultaten

De opgenomen beelden zijn verwerkt tot een orthofoto met een resolutie van 2 cm, een hoogtemodel met puntafstand van 10 cm en een warmtebeeld met een resolutie van 30 cm.



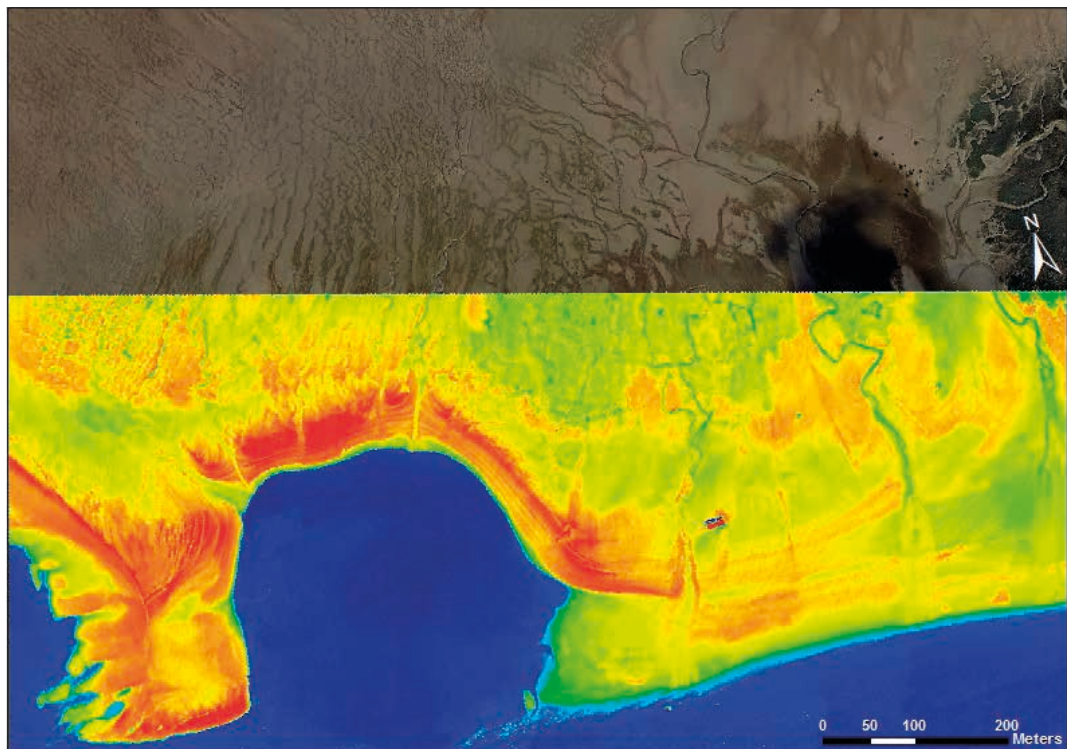
Figuur 3.20 Orthofoto gebied rond zettingsvloeiingsproef vóór het experiment



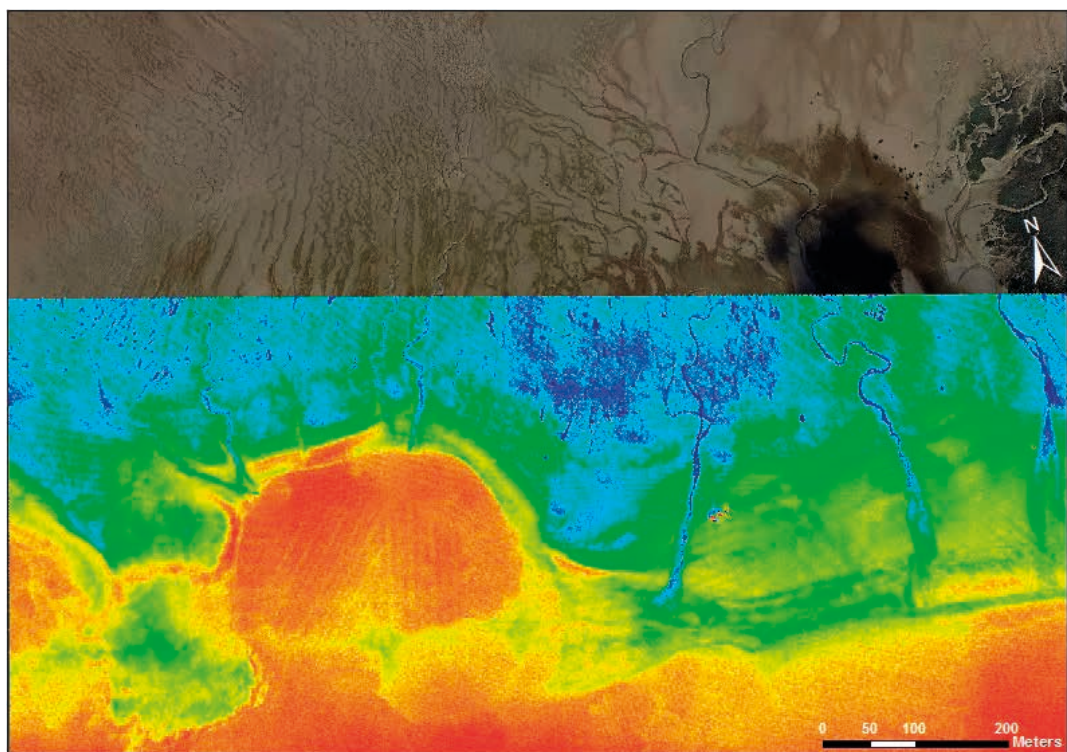
Figuur 3.21 Orthofoto gebied rond zettingsvloeiingsproef ná het experiment



Figuur 3.22 Orthofoto met de verandering tussen vóór en ná het experiment door landaanwinst en -verlies



Figuur 3.23 Thermografische luchtfoto gebied rond zettingsvloeiingsproef vóór het experiment ($T=16.3\text{--}22.3^{\circ}\text{C}$)

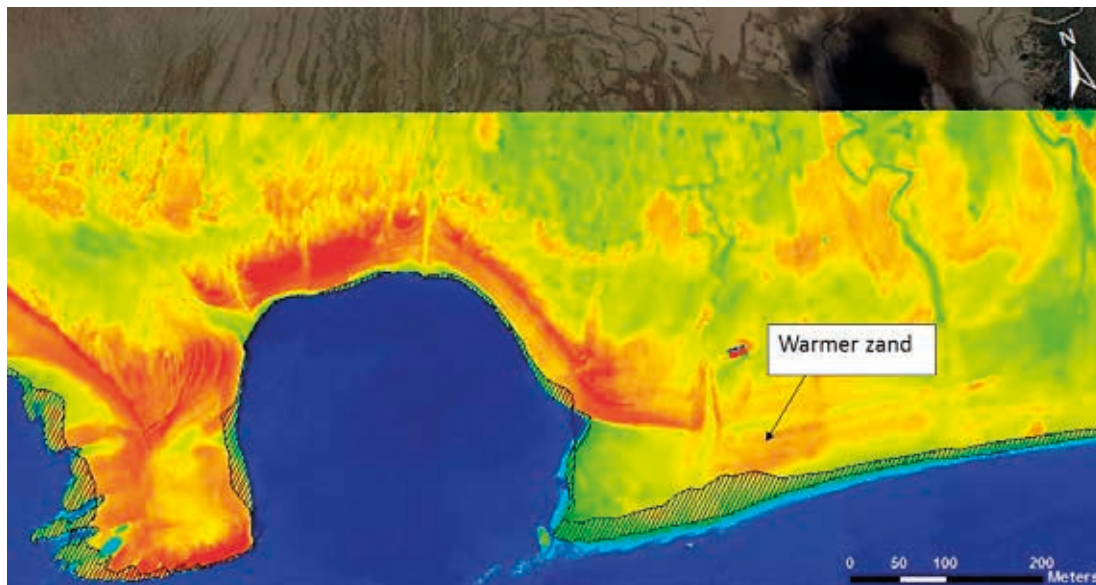


Figuur 3.24 Thermografische luchtfoto gebied rond zettingsvloeiingsproef ná het experiment ($T=13.0\text{--}14.7^{\circ}\text{C}$)

De warmtebeelden van voor en na het experiment vertonen een verschil in kleurstelling. Dat is te verklaren door de oppervlaktetemperatuur op het tijdstip van opname. De temperatuurrange van de eerste vlucht ligt tussen 16.3

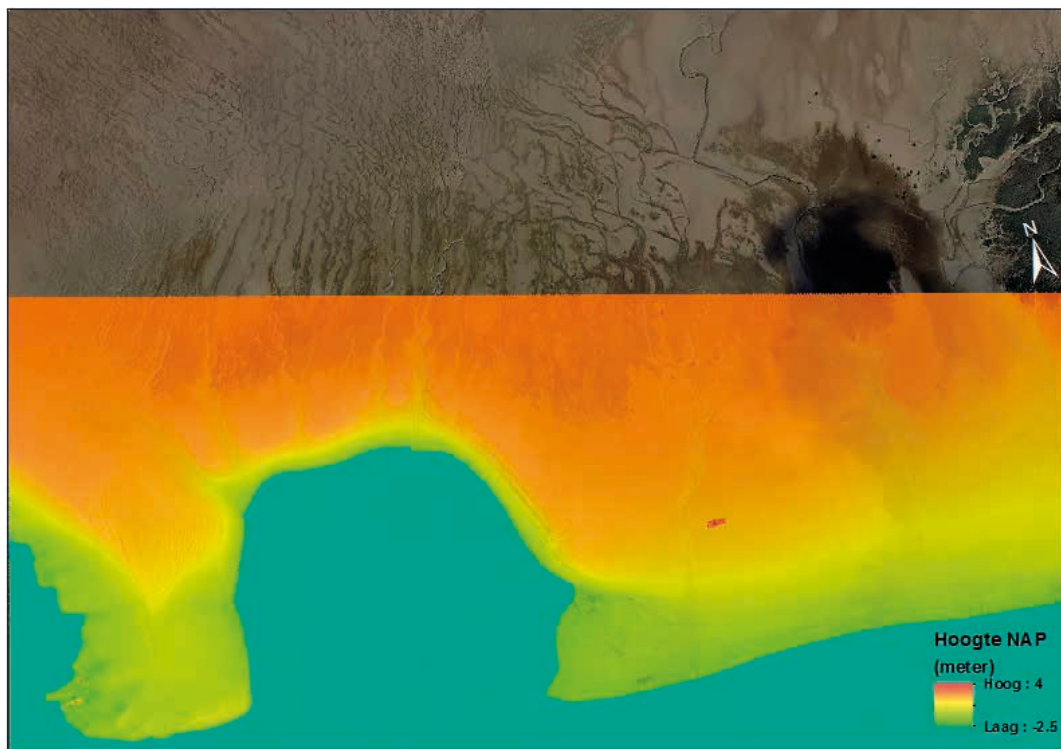
en 22.3 °C en die van de tweede vlucht tussen 13.0 en 14.7 °C. Vóór de zettingsvloeiing is het water kouder dan het zand en ná de zettingsvloeiing is het water juist warmer dan het zand. In het eerste beeld geldt bijvoorbeeld dat hoe kouder het water, hoe dieper het water is.

Voor wat betreft de temperatuurbeelden zou, met de nodige slagen om de arm, geconcludeerd kunnen worden dat de zettingsvloeiing heeft plaatsgevonden daar waar het zand vóór de zettingsvloeiing warmer was dan in de omgeving.

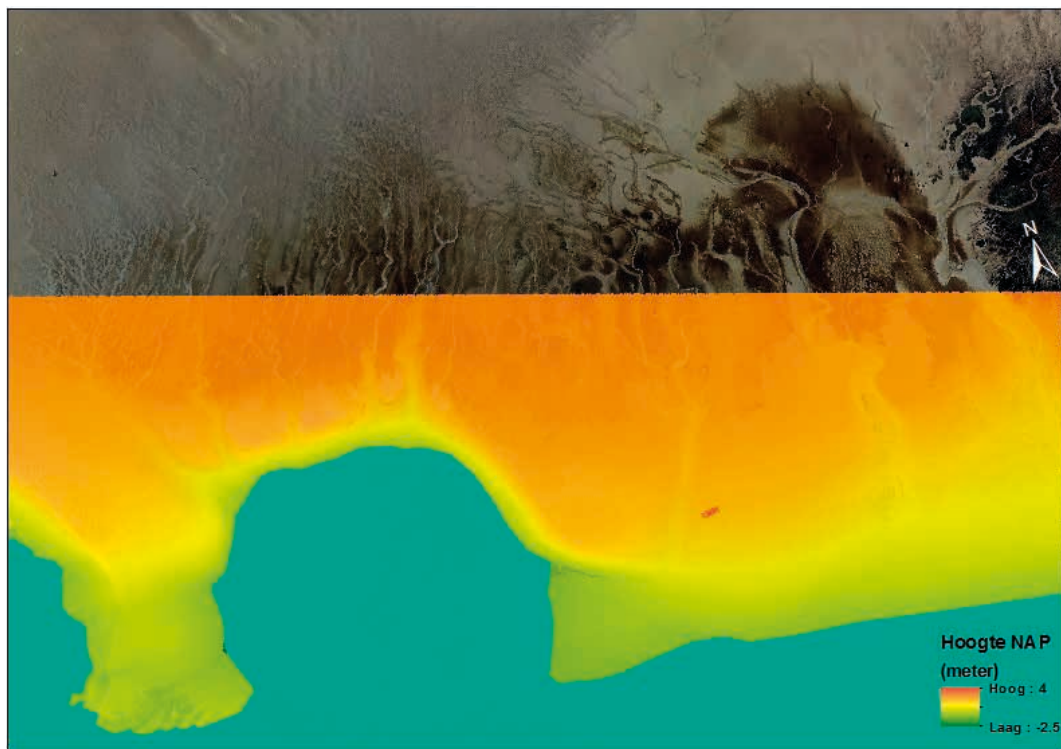


Figuur 3.25 Warmtebeeld met de verandering tussen vóór en ná het experiment door land aanwinst en verlies

Uit de luchtfoto's zijn door middel van stereo-matching nauwkeurige hoogtemodellen van de zandplaat vervaardigd. Daarvan zijn ook verschilbeelden tussen de vóór en ná het experiment gemaakt en opgeleverd.



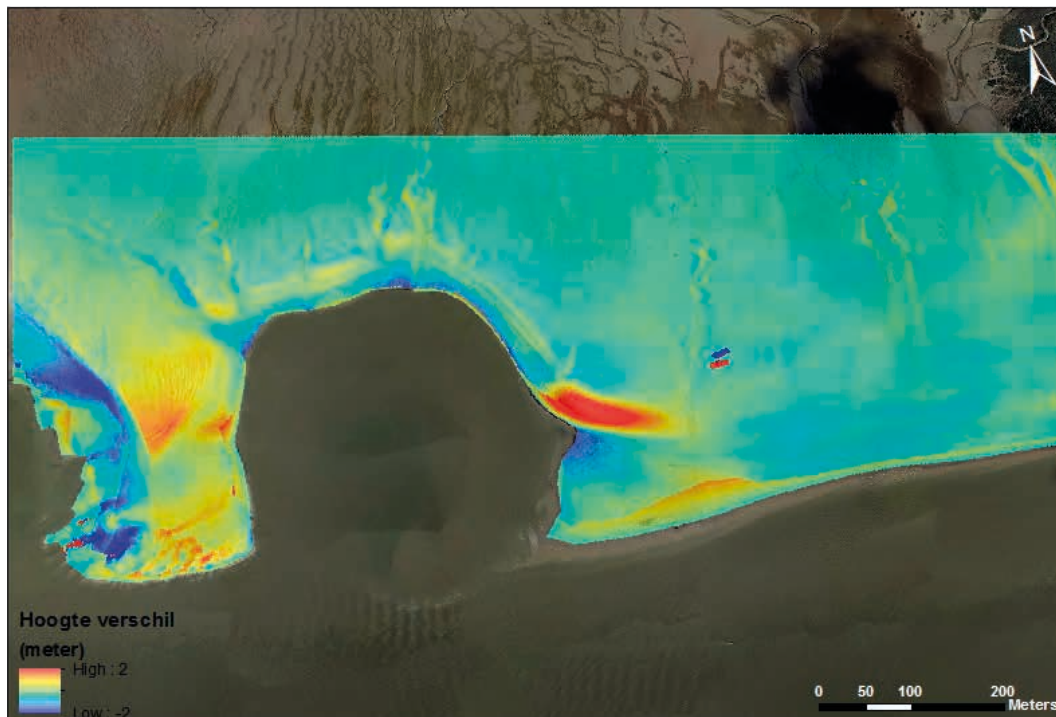
Figuur 3.26 Hoogtemodel gebied rond zettingsvloeiingsproef vóór het experiment



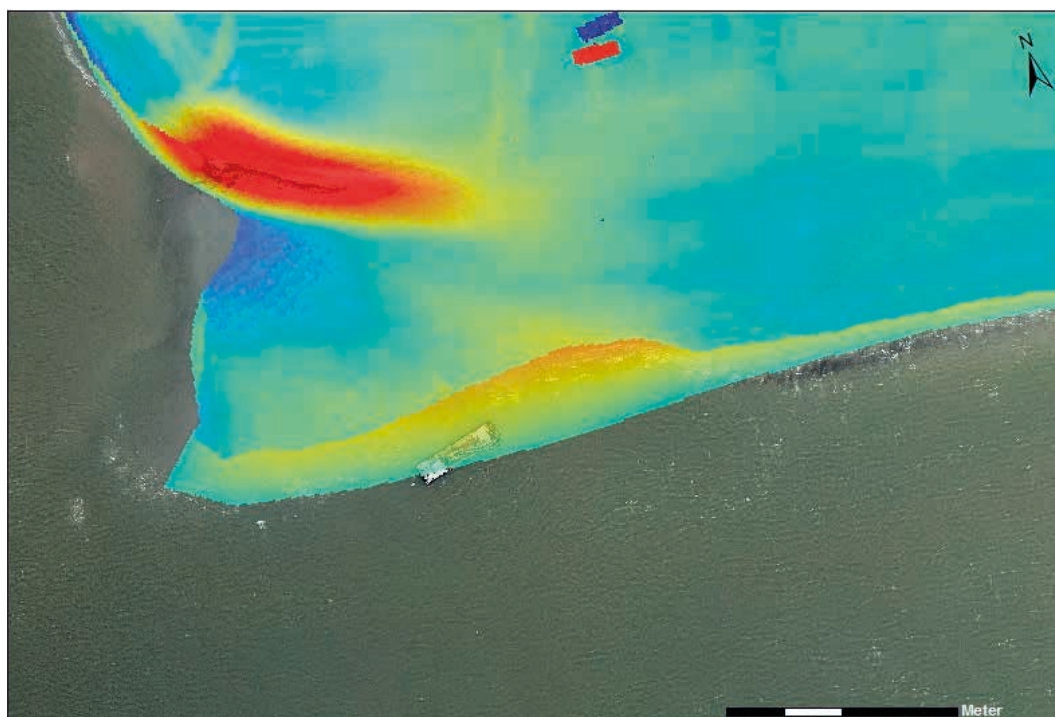
Figuur 3.27 Hoogtemodel gebied rond zettingsvloeiingsproef ná het experiment

Op de hoogtebeelden is het effect van de zettingsvloeiing op het gedeelte van de zandplaat dat boven water ligt ook goed te zien. De hoogteverschilbeelden van Figuur 3.28 en Figuur 3.29 tonen in rood de gebieden die zijn

gezakt en in blauw de gebieden die zijn gestegen. De verzakking door de zettingsvloeiing is duidelijk zichtbaar. Aan de westkant is aanwinst zichtbaar in blauw. Ook valt op dat het ponton een beetje is gedraaid en in noordelijke richting is verschoven met een afstand van 12 meter.



Figuur 3.28 Hoogtemodel met de verandering tussen vóór en ná het experiment door land aanwinst en verlies



Figuur 3.29 Verlies van zand boven water (detailopname vorige figuur) (rood)

3.4 Visualisatie

3.4.1 ReadyMIND

3.4.1.1 Systeem

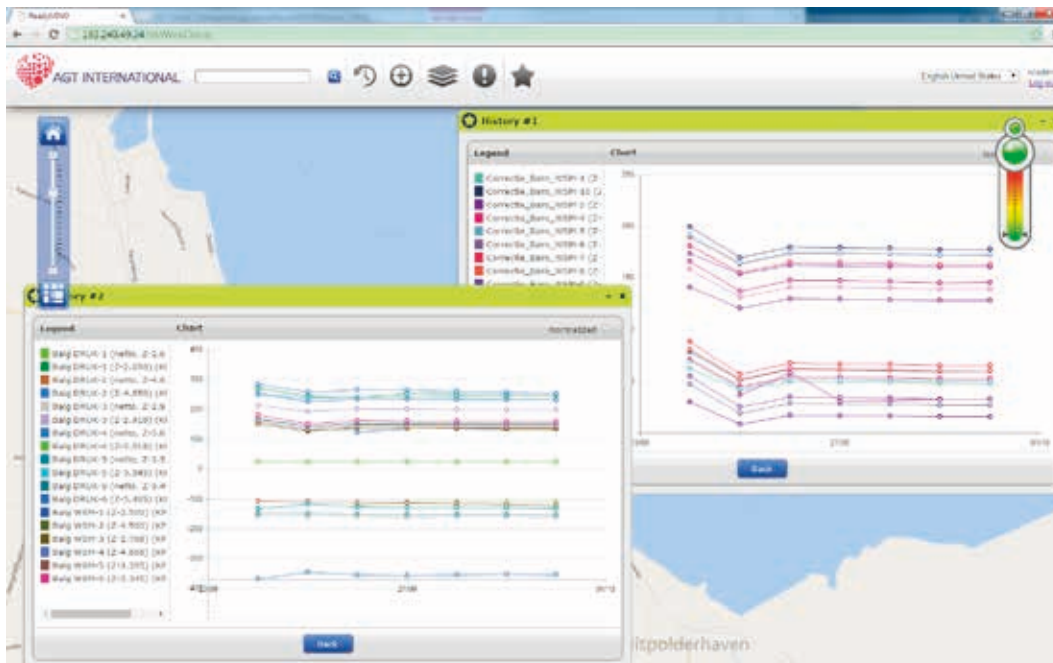
Ten tijde van dit onderzoek maakte AGT gebruik van haar Services en Integratie platform, genaamd ReadyMIND. ReadyMIND bestaat uit drie onderdelen:

- aan de onderkant bevindt zich de sensor gateway die in staat is om vrijwel elk type sensor aan te sluiten en de data om te zetten in een gemeenschappelijk formaat;
- het centrale deel bestaat uit een aantal functies, zoals bijvoorbeeld data-analysemodules, een GIS-module, incidentbeheer en rapportage;
- aan de voorkant bevindt zich de gebruikersinterface die gebaseerd is op een gelaagd geografisch informatie-systeem, waarin actuele sensormetingen en events, welke gegenereerd zijn door sensoren en analysemodellen, getoond worden. De gebruikersinterface kan via een webbrowser ontsloten worden.

ReadyMIND is via de Web Service interface gekoppeld aan het DDSC en verkrijgt op deze manier de resultaten van de verschillende sensormetingen uitgevoerd tijdens het onderzoek.

3.4.1.2 Toepassing

De doelstelling van dit deelonderzoek is tweeledig: ten eerste wordt beoogd de meest relevante gegevens die een zettingsvloeiing zouden kunnen duiden te identificeren. Hierop is tevens de toe te passen data-analyse gebaseerd. Ten tweede wordt bepaald op welke wijze deze gegevens het beste gevisualiseerd kunnen worden. Hiertoe wordt ReadyMIND gebruikt, zodat alle sensordata vanuit DDSC zichtbaar worden en eventuele afwijkende waarden die op een zettingsvloeiing kunnen duiden, gesignaleerd worden. Figuur 3.30 toont een voorbeeld van twee groepen van sensoren, waarvan de data geïntegreerd wordt getoond.



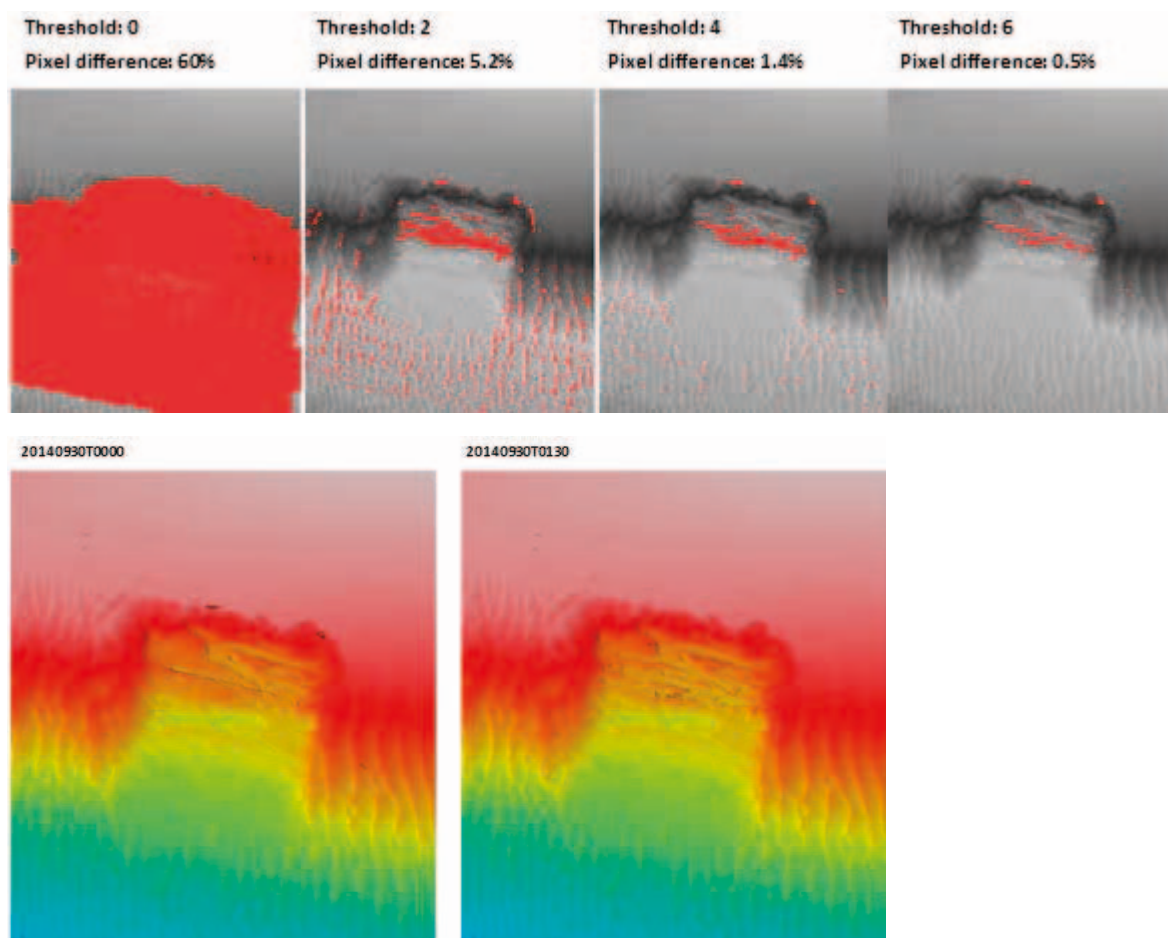
Figuur 3.30 Integratie van twee groepen sensoren

Drie soorten datatypen werden onderzocht. Het eerste type bevat statische data, zoals de contour, het 3D-model en laserscangegevens van het gebied. Deze data helpen om de omgeving inzichtelijk te maken, maar is niet gerelateerd aan het identificeren van de zettingsvloeiing. Het tweede type betreft de tijdreeks van sensormetingen, bijvoorbeeld piëzometers. Het derde type wordt gevormd door tijdreeksen van sonarbeelden. Aangezien er een grote hoeveelheid sonarbeelden op dezelfde locatie beschikbaar zijn, is het zinvol om deze beelden direct te analyseren.

3.4.1.3 Visualisaties en resultaten

Uit de geanalyseerde gegevens zijn veranderingen geobserveerd in de piëzometers met betrekking tot de dagelijkse golfbeweging in de orde van 30 KPa, en zijn incidentele kleine veranderingen te signaleren van enkele kPa, die echter moeilijk te koppelen zijn aan een zettingsvloeiing. Van de sonar zijn meer dan 400 geo-gerefererde tijdreeksen sonarbeelden beschikbaar op dezelfde locatie. Uit de visuele vergelijking tussen deze beelden kunnen duidelijke verschillen worden waargenomen als gevolg van zettingsvloeiing. Op basis hiervan zijn de multibeam geotiffs te beschouwen als de meest effectieve en intuïtieve data om een zettingsvloeiing onder water te kunnen identificeren. Het is daarentegen tijdrovend en onnauwkeurig om veranderingen te identificeren op basis van visuele vergelijking. Hiervoor zijn beeldanalyse-algoritmen gebruikt om afwijkende waarden tussen twee beelden te analyseren en automatisch de verschillen inzichtelijk te maken.

De gegevensanalyse van sonarbeelden wordt getoond in Figuur 3.31. Onderin zijn twee originele afbeeldingen weergegeven van dezelfde locatie. Aan de bovenkant zijn de verschillen tussen de twee afbeeldingen inzichtelijk gemaakt. Als de beelden pixel voor pixel worden vergeleken, zijn de verschillen tussen de twee afbeeldingen enorm. Dit is te zien in de afbeelding linksboven waarbij 60% van de pixels verschilt. Zo'n vergelijking laat niet het werkelijke verschil zien, omdat rekening moet worden gehouden met ruis van de sonarbeelden of kleine bewegingen van het zand als gevolg van de waterstroming. Om deze ruisfactoren te elimineren, is gebruikgemaakt van een "tolerantie" waarde. Dit laat een zekere tolerantie toe in het verschil in waarde tussen twee pixels, voordat de pixels als verschillend worden gemarkeerd. Zoals te zien is in Figuur 3.31 neemt het verschil tussen de afbeeldingen af als de tolerantiewaarde toeneemt. Op dit moment kan alleen maar worden geschat wat een goede tolerantiewaarde zou kunnen zijn. In de afbeeldingen lijkt een waarde van 4 of 6 een goede indicatie van de mate van zettingsvloeiing.



Figuur 3.31 Verschilkaarten multibeam geotiffs

3.4.2 Zettingsvloeiing App

3.4.2.1 Systeem

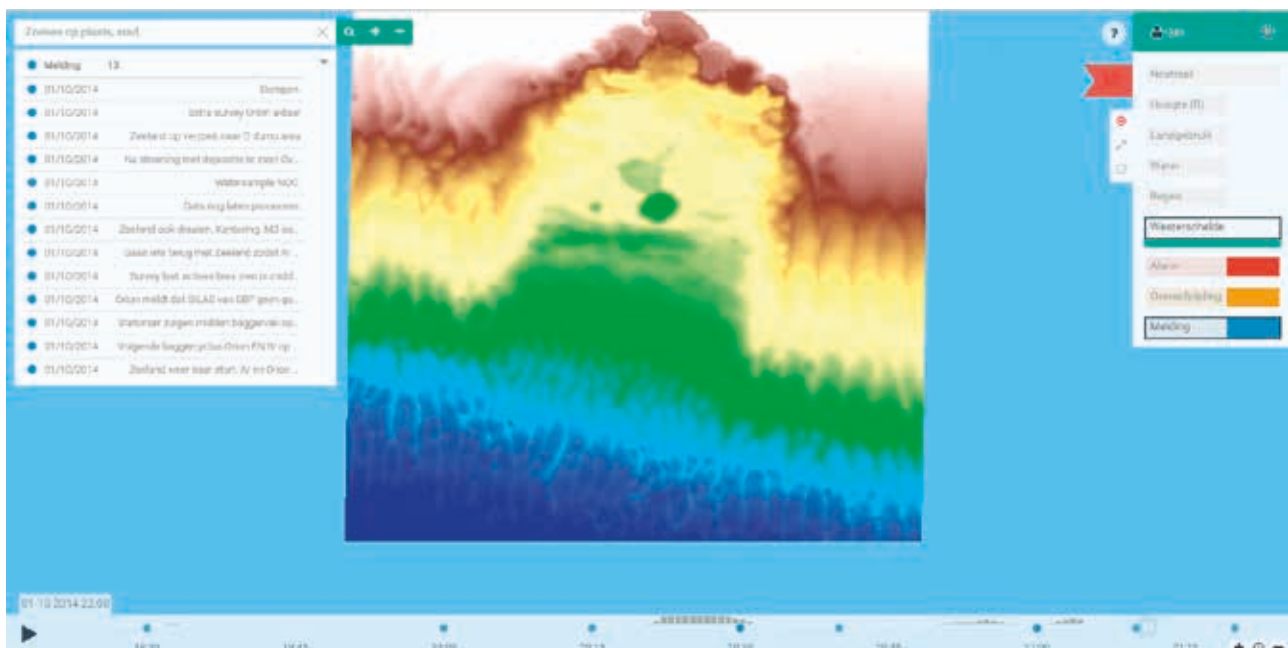
Nelen en Schuurmans heeft de Zettingsvloeiing App ontwikkeld. De basistechniek achter de Zettingsvloeiing App is de afgelopen jaren ontwikkeld in het kader van 3Di (overstromingsmodelleringen), nationale regenradar en Lizard. Deze technieken zijn voor de visualisatie van het zettingsvloeiingsexperiment gecombineerd en verder ontwikkeld. Zettingsvloeiing is een proces dat zich ruimtelijk in de tijd afspeelt. Een goede visualisatie van het proces (door middel van de metingen gerelateerd hieraan) in zowel de ruimte als in de tijd geeft de beheerder inzicht in de situatie, waarmee bijzondere of potentieel gevaarlijke situaties herkend kunnen worden.

3.4.2.2 Visualisaties en resultaten

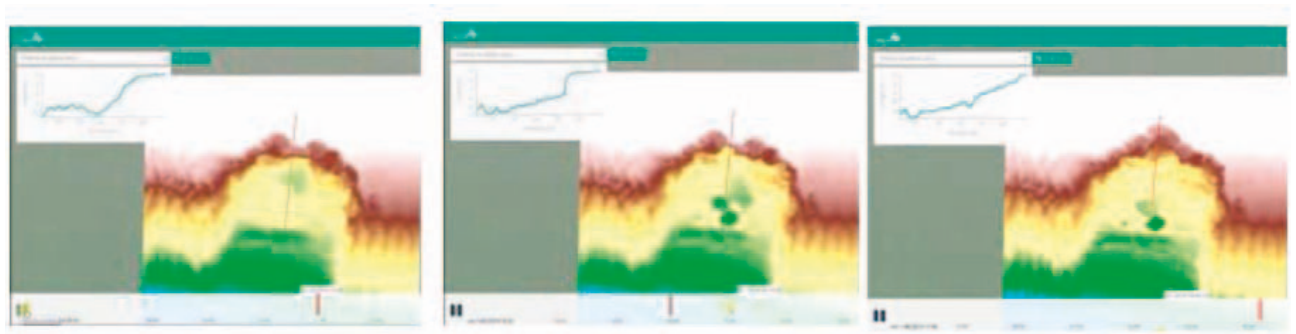
Alle beschikbare gegevens van het zettingsvloeiing experiment zijn opgenomen in de Zettingsvloeiing App (www.nxt.lizard.net). Met behulp van deze applicatie wordt via een cloudoplossing de ingewonnen data (bodemhoogte, annotaties, etc) en basisdata (neerslag, AHN, landgebruik, etc) gecombineerd en ontsloten. De Zettingsvloeiing App heeft de volgende specifieke functionaliteiten die in het experiment zijn toegepast:

1. Het kiezen van een tijdstip en op dat tijdstip de bodemhoogte zien (de single beam- of multibeambeelden van de proef) en de annotaties die op dat moment actief zijn;
2. De bodemhoogte kunnen animeren, hierbij worden ook de relevante annotaties getoond;
3. Het kiezen van een locatie en in een grafiek zien hoe het de bodemhoogte in de tijd verloopt;
4. Het hoogteprofiel langs een willekeurig gekozen lijn zien, deze animeren in de tijd en kunnen exporteren in een csv bestand;
5. Het kunnen kiezen van twee tijdstippen en daarbij de verschillen in de bodemhoogte kunnen zien (deze worden 'online' berekend);
6. De details van de annotaties tonen;
7. Andere beschikbare kaartlagen tonen (AHN2 hoogtekkaart, landgebruik, etc).

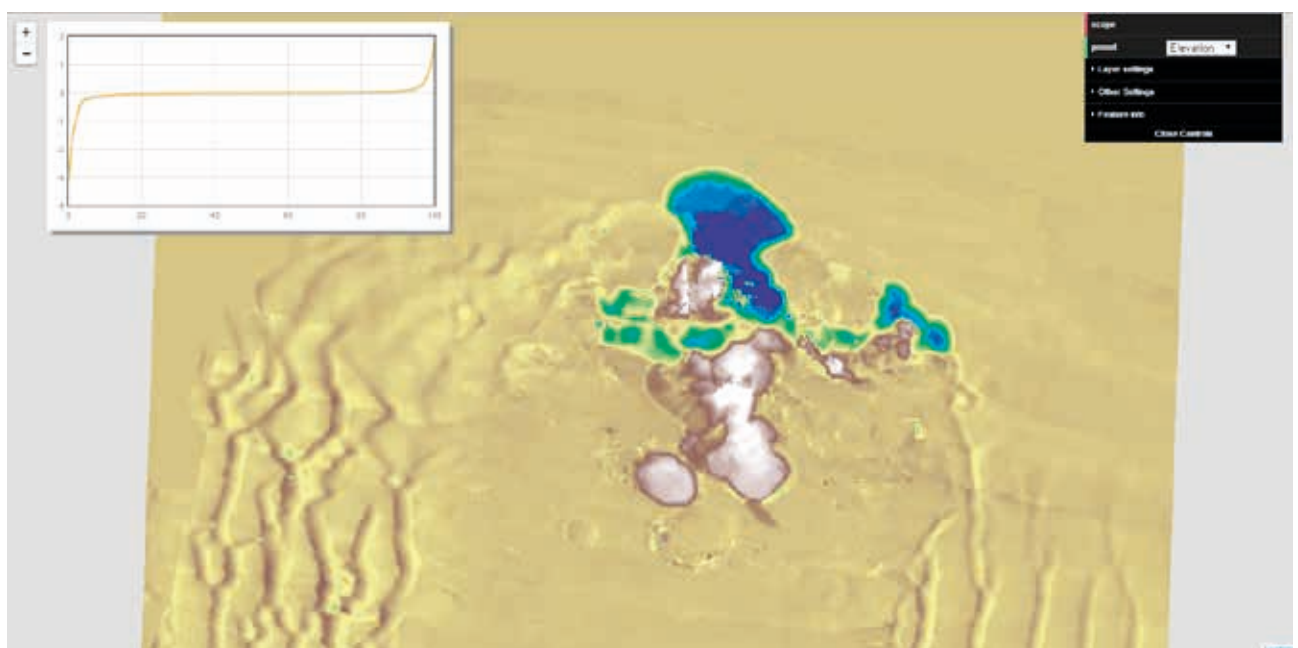
De Zettingsvloeiing App beschikt over verschillende interactieve tools om de data te visualiseren (zie Figuur 3.32 t/m Figuur 3.35).



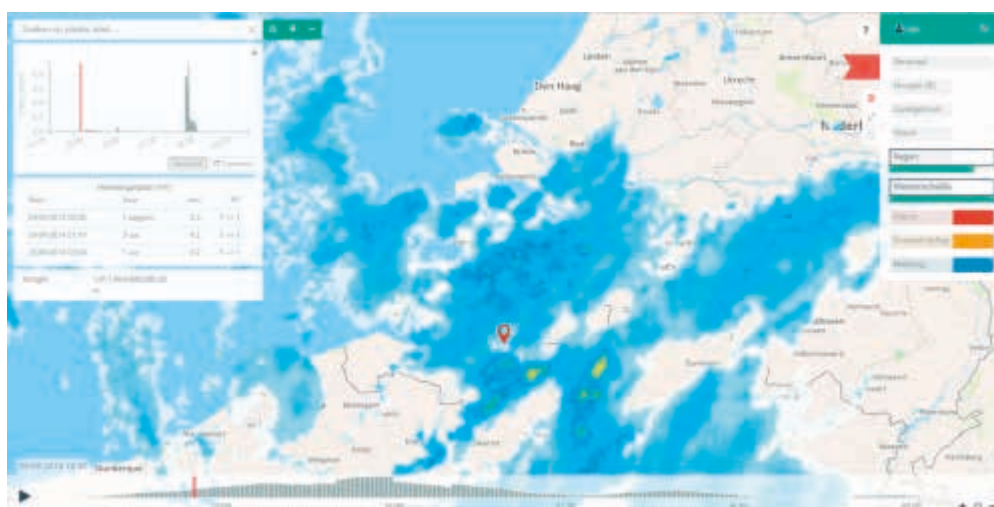
Figuur 3.32 Combinatie van bodemhoogte baggervak en annotatie proefleiding 1 oktober 2014 tussen 19:00 en 21:30 uur. Melding op 20:30: Survey laat actieve bres zien in midden. Ge-e-mailed. 11 m diameter.



Figuur 3.33 Verloop vloeiing op 1 oktober 2014 tussen 20:00 en 24:00 uur.



Figuur 3.34 Verschilkaart op 1 oktober 2014 tussen 20:00 en 00:00 uur.



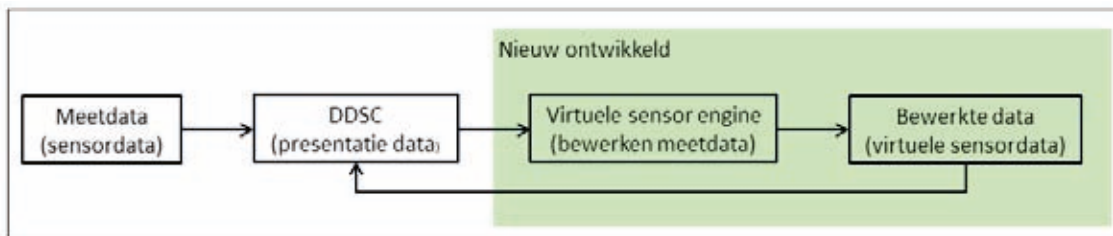
Figuur 3.35 Volgens de nationale regenrader 5,4 millimeter regen op 29 september tussen 14:00 en 21:00 op de proeflocatie.

3.4.3 Virtuele sensor Fugro

3.4.3.1 Systeem

Met behulp van een virtuele sensor is het mogelijk om data, afkomstig van sensoren in het veld, in real time te bewerken en de bewerkte data te presenteren. Allereerst wordt de meetdata van sensoren uit DDSC of een ander platform opgehaald. De continue informatie stroom afkomstig van de aanwezige sensoren wordt met behulp van speciaal ontwikkelde software rekenkundig bewerkt, waardoor een nieuwe datareeks van een 'virtuele sensor' ontstaat. Hierbij kan gedacht worden aan het bepalen van het verschil tussen twee sensorwaarden, de afgeleide van een sensorwaarde of het gemiddelde van verschillende sensorwaarden. De bewerkte datareeksen worden vervolgens geüpload naar het DDSC en/of een ander platform. In het DDSC kan de bewerkte datareeks worden gepresenteerd in grafiekvorm, zoals ook gebeurt met de meetdata van sensoren in het veld.

In onderstaande figuur is het proces van het genereren van virtuele sensordata schematisch weergegeven. De meetdata wordt door een dataleverancier in DDSC ingelezen. Vervolgens pakt een nieuw ontwikkelde Virtuele Sensor Engine de data op en voert rekenkundige bewerkingen uit. Het resultaat is een nieuwe datareeks, welke weer in het DDSC wordt ingevoerd en kan worden gepresenteerd.

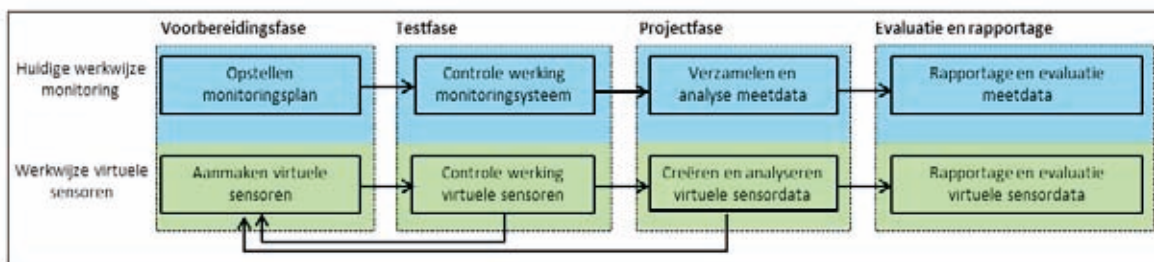


Figuur 3.36 Toevoeging van de virtuele sensor in het DDSC

3.4.3.2 Toepassing

Virtuele sensoren geven de gebruikers van het DDSC een flexibele tool om de geleverde sensordata te transformeren of bewerken naar hun specifieke behoeften, waarmee de gebruikswaarde van het DDSC voor de eindgebruikers toeneemt. Met behulp van de afgeleide data van de virtuele sensoren is het mogelijk om meer inzicht te verkrijgen in de processen die tijdens de proef optreden. Zo kan de data inzichtelijker en begrijpelijker gepresenteerd worden en kan data van verschillende sensoren gecombineerd worden. Door het op slimme wijze bewerken van data kan een indicator voor (in dit geval) het optreden van zettingsvloeiing worden gecreëerd.

Het toepassen van de virtuele sensor kent een aantal fasen. In de voorbereidingsfase wordt bedacht welke bewerkingen op de meetdata van toegevoegde waarde kunnen zijn. Vervolgens volgt er een testfase, waarin het project nog niet begonnen is, maar er al wel meetdata wordt verzameld en bewerkte data wordt gegenereerd. Waar nodig wordt de virtuele sensor of het rekenhart aangepast. Vervolgens volgt de uitvoerings- of projectfase. In deze fase zijn de (virtuele) sensoren operationeel en helpen bij het interpreteren van de data. Indien nodig kan alsnog bijgestuurd worden om de virtuele sensoren te bewerken. Idealiter is dit na een goede testfase echter niet meer nodig.



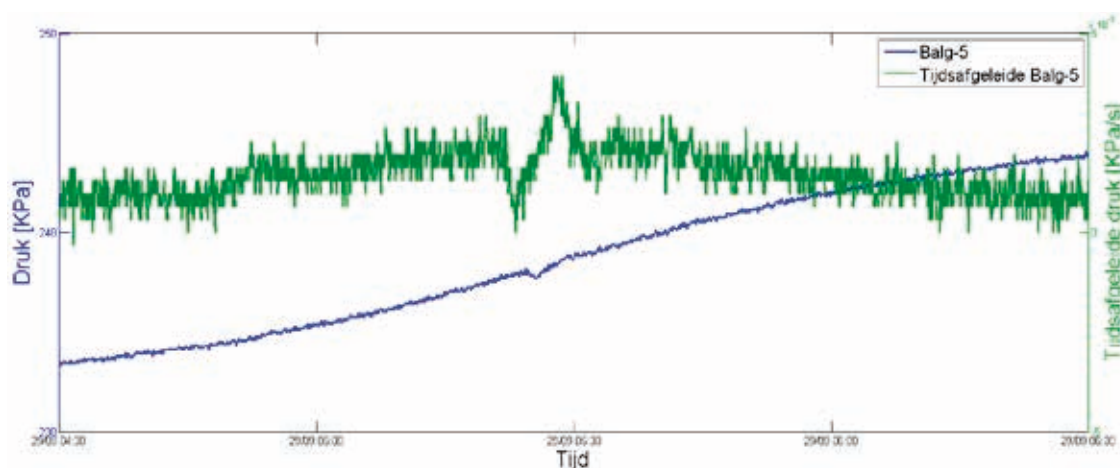
Figuur 3.37 Werkwijze met virtuele sensoren in aanvulling op de huidige werkwijze

3.4.3.3 Visualisaties en resultaten

Tijdens de zettingsvloeiingsproef heeft Fugro een aantal virtuele sensoren toegevoegd aan het DDSC. Voor de proef zijn de volgende virtuele sensoren ontwikkeld:

- 1 Virtuele sensoren welke het verschil tussen 2 sensorwaarden bepalen.
- 2 Virtuele sensoren welke het gewogen gemiddelde van 3 sensorwaarden bepalen.
- 3 Virtuele sensoren welke het tijdgemiddelde van een sensorwaarde bepalen.
- 4 Virtuele sensoren welke de tijdsafgeleide van een sensorwaarde bepalen.

Een voorbeeld van de vierde genoemde virtuele sensor is weergegeven in fig. 3.38. De grafiek geeft de tijdsafgeleide weer op het moment dat in het logboek een zettingsvloeiing is aangegeven (29 september tussen 5:15u en 6:30u). Met behulp van deze virtuele sensor is het mogelijk om snelle veranderingen in druk makkelijker waar te nemen. Als een grote verandering wordt waargenomen kan dit een aanduiding zijn voor een zettingsvloeiing. Uit de figuur blijkt dat de geconstateerde variatie in de druk klein is. Dit wordt veroorzaakt omdat de sensor ver van de vloeiing staat.



Figuur 3.38 Balg-5 (blauwe lijn) en tijdsafgeleide (gemiddeld over 5 min.) van de balg (groene lijn)

Uit Figuur 3.38 kan echter wel duidelijk de meerwaarde van de virtuele sensor worden herkend. Op het moment dat fluctuaties optreden treedt een duidelijke piek op. Door interventiewaarden verstandig te kiezen kunnen afwijkingen snel herkend worden. Toepassing hiervan bij andere monitoringsprojecten kan derhalve waardevol zijn. Dit geldt ook voor de andere virtuele sensoren, waar hier niet op in is gegaan.

3.5 Modelleren

3.5.1 Inleiding

Eén van de doelen van de zettingsvloeiingsproef is het verbeteren en valideren van modellen waarmee het optreden van of de schade door zettingsvloeiing kan worden voorspeld.

De in dit experiment toegepaste modellen zijn onder te verdelen in twee typen:

- Rekenmodellen die de fysica van zettingsvloeiing beschrijven
- Modellen gebaseerd op artificiële intelligentie.

Uit de eerste groep zijn meerdere modellen met elkaar vergeleken, die weer onderverdeeld kunnen worden in twee groepen:

- Modellen waarmee het optreden van een zettingsvloeiing voorspeld kan worden:
 - HMBreach/HMTurb, een door Deltares ontwikkeld model om bresvloeiing mee te berekenen. Dit model en resultaten worden beschreven in paragraaf 3.5.2
 - SLIQ2D, een door Deltares ontwikkeld model om initiatie van verwekingsvloeiing mee te berekenen, zie paragraaf 3.5.3

- Modellen waarmee zowel optreden als schade voorspeld kan worden:
 - RetroBreach, een model voor bresvloeiing dat gebaseerd is op HMTurb, maar waarin de ontwikkeling van de bodemligging in de tijd kan worden gesimuleerd. Dit model en resultaten worden beschreven in paragraaf 3.5.4
 - Delft3D-Flow, een door Deltares ontwikkeld hydrodynamisch model dat toegepast is voor simulatie van bresvloeiing. Dit model en resultaten worden beschreven in paragraaf 3.5.5
 - Material Point Method, een model geschikt voor grondvervorming en verwekings-vloeiing. Dit model en resultaten worden beschreven in paragraaf 3.5.5.

Uit de tweede groep is één techniek toegepast door Target. Dit model en resultaten worden beschreven in paragraaf 3.5.7

Voorafgaand aan de proef zijn berekeningen uitgevoerd met SLIQ2D en HMBreach. Op basis van de gemeten profielen ter plaatse van de proeflocatie en het baggerplan, is een dwarsprofiel bepaald als uitgangspunt van de berekeningen met Delft3D en Retrobreach.

Voor het narekenen van de gemeten vloeiing zelf is voor alle modellen zoveel mogelijk gebruik gemaakt van dezelfde invoer, zodat de uitkomsten zo goed mogelijk met elkaar vergeleken kunnen worden. Hiertoe is met behulp van Lizard (paragraaf 3.4.2) een representatieve vloeiing geselecteerd. Hieruit is een dwarsprofiel geselecteerd. Op basis van de uitkomsten van het grond- en labonderzoek (paragraaf 3.2) zijn de materiaaleigenschappen bepaald. Dit is gebruikt in MPM en Retrobreach. In Delft3D is gebruik gemaakt van de achteraf gemeten korrelverdeling naast de vooraf aangenomen waarden.

Zoals aan het begin van het hoofdstuk opgemerkt, moest door de beperkte beschikbare tijd de modellering deels tegelijk plaatsvinden met de uitwerking van het grondonderzoek en het laboratoriumonderzoek. Hierdoor konden niet alle resultaten van het grond- en laboratoriumonderzoek gebruikt worden.

3.5.2 HMBreach/HMTurb

3.5.2.1 Systeem

HMBreach is een door Deltares ontwikkeld computermodel dat de dichtheidsstroming van een turbulent zand-watermengsel beschrijft gevoed door een bres, op basis van impuls en continuïteit van zand en water in de stroming, de bodem en het bovenliggende water met een erosie en een turbulente mengformulering [Mastbergen en van den Berg, 2003].

Het is een 1-dimensionaal stationair 2-lagen rekenmodel. Met HMBreach kan optioneel een evenwichtsbodemvorm iteratief berekend worden, met de variant HMTurb wordt uitgegaan van een gegeven bodem, deze versie is hier toegepast. Het model wordt gebruikt in de gedetailleerde toetsing van vooroevers van dijken (D-Flow Slide) of voor het ontwerp of toetsing van veilige onderwatertaluds in zandwinputten [CUR 113, 2008]. Daarbij wordt nagegaan of een bestaand onbeschermde zandig onderwatertalud gevoelig is voor bresvloeiing.

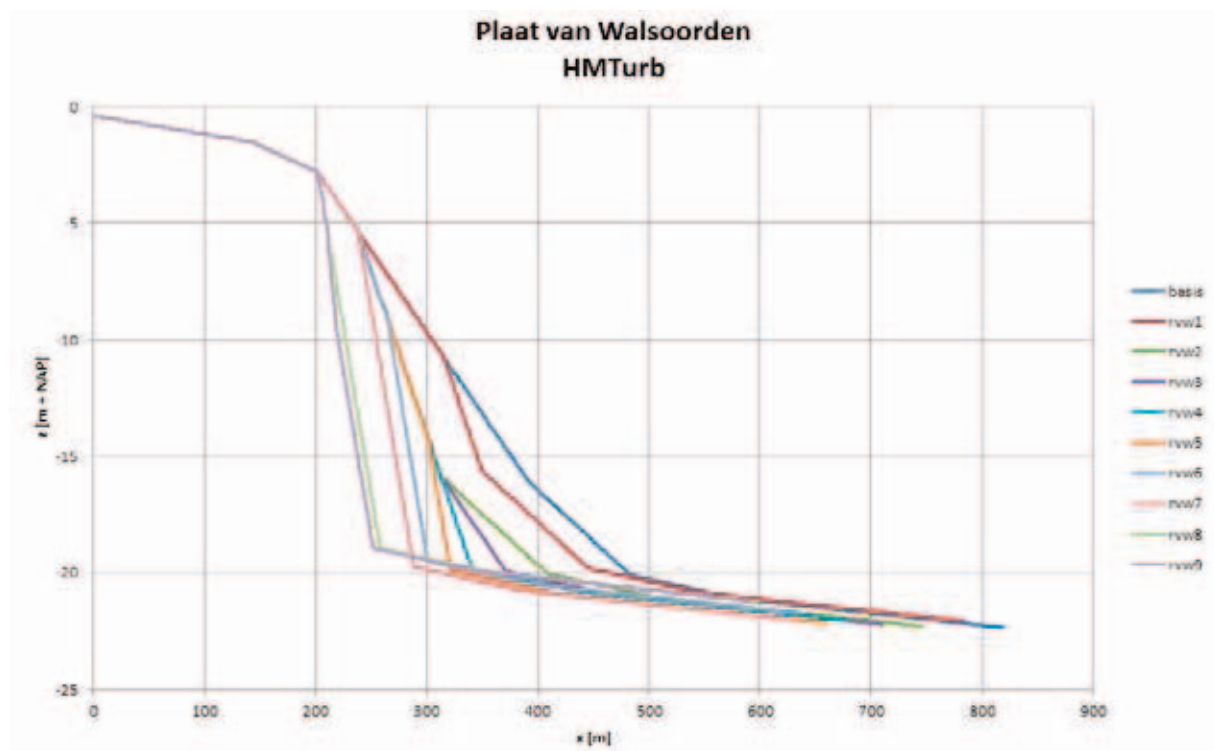
3.5.2.2 Toepassing

Ten behoeve van de voorbereiding van de IJkdijkproef is een aantal predictieberekeningen uitgevoerd met HMTurb. Daaruit volgt dat het bestaande talud versteild moet worden door baggeren om een bresvloeiing mogelijk te maken. De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van het bestaande gemeten talud bij de Plaat van Walsoorden met daarin een aangenomen versteiling over een bepaalde hoogte en een aansluitend flauw deel bij aangenomen 225 μm vastgepakt zand (porositeit 40%). In Figuur 3.41 is de geometrie weergegeven bij toenemende versteiling en hoogte. Later zijn vergelijkbare berekeningen gemaakt met 160 μm zand, wat meer overeenkomt met het aange troffen fijne zand.

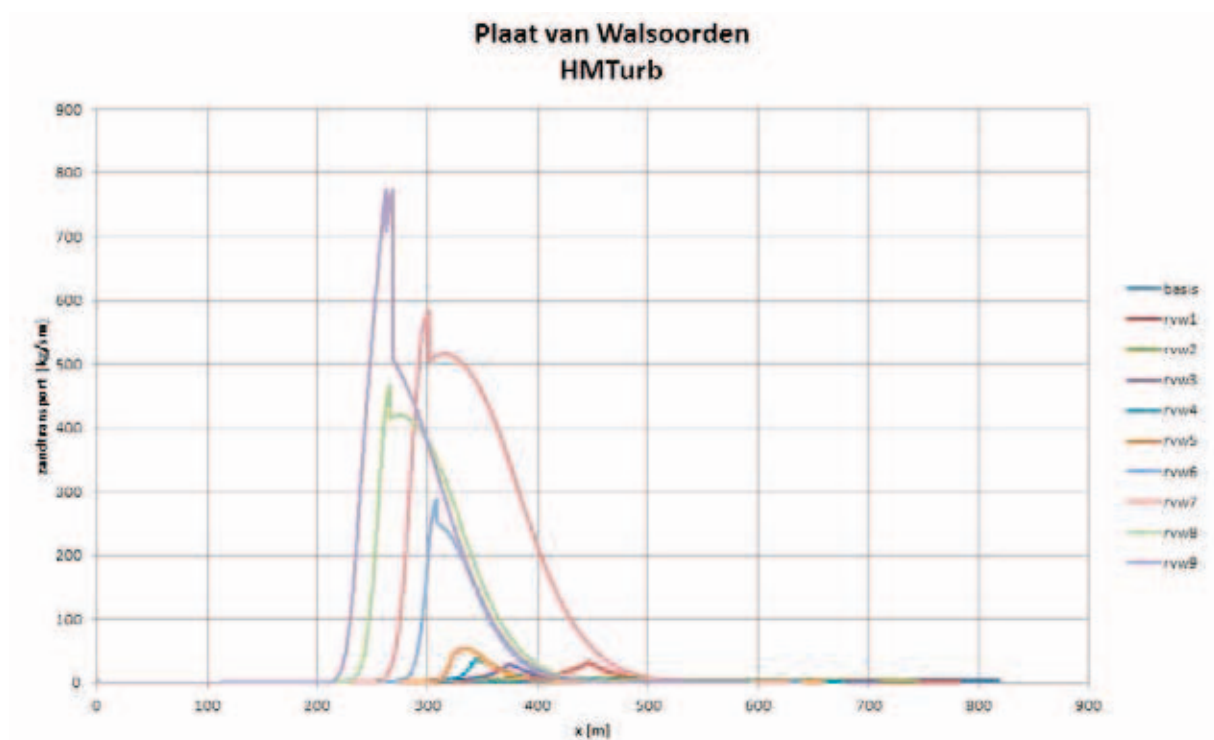
3.5.2.3 Modelleren en resultaten

In Figuur 3.40 is het bijbehorende berekende zandtransport weergegeven. De snelheid en het zandtransport bij een initiële bres van 0,40 m (= zuigdiepte sleepopperzuiger per track bij lage vaarsnelheid) vallen terug en blijven zeer laag, dus er treedt geen bresvloeiing op. De steilste helling gaat van 1:14 naar 1:7 en uiteindelijk 1:3,5 (16°). Als deze

helling over een hoogte van tenminste 10 m aanwezig is, groeit het zandtransport explosief. Bij verdere verhoging en versteiling (tot 1:2 over 5 m) blijft het zandtransport verder groeien en beweegt deze zich over enkele honderden meters, dit noemen we een bresvloeiing.



Figuur 3.39 Berekende profielen na baggeren



Figuur 3.40 Bijbehorend berekend zandtransport HMBreach/HMTurb (per m breedte)

3.5.3 Sliq2D

3.5.3.1 Systeem

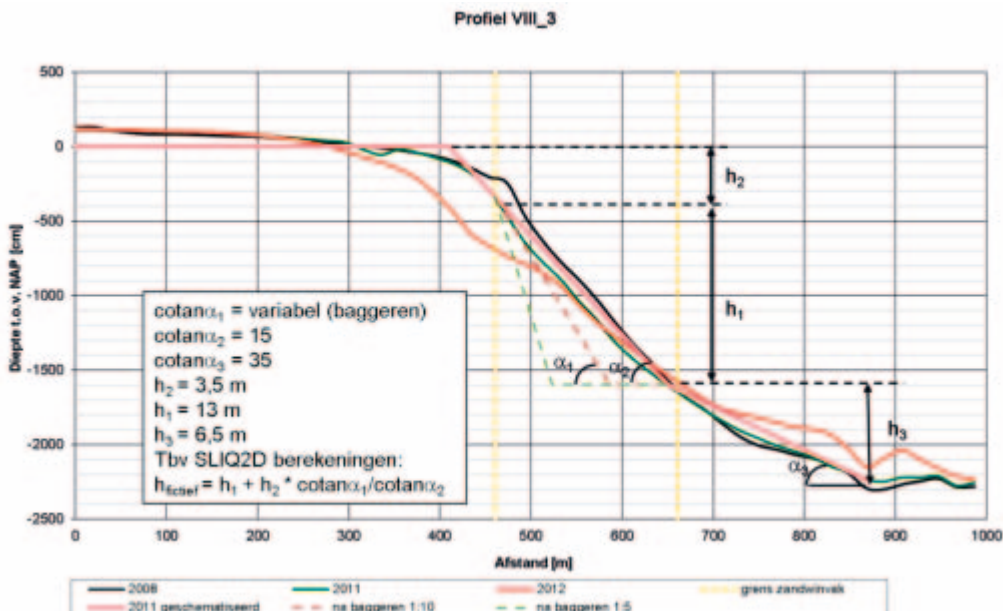
SLIQ2D is een door Deltares ontwikkeld computermodel dat het ontstaan van instabiliteit door verweking in losgepakt zand berekent als functie van het materiaalgedrag, de pakking, de taludhelling en de taludhoogte. Met het programma Sliq2D wordt onderzocht of een verwekingsvloeiing kan ontstaan.

3.5.3.2 Toepassing

Ten behoeve van de voorbereiding van de IJkdijkproef is een aantal predictieberekeningen uitgevoerd met Sliq2D. Voor de Sliq2D-berekeningen zijn parameters geschat op basis van laboratoriumproeven op zand afkomstig van elders in Nederland, dat wat betreft eigenschappen (korrelgrootteverdeling en waarschijnlijk ook hoekigheid) lijkt op het Westerschelde zand. Waarschijnlijk zijn dit enigszins *conservatieve waarden*.

Voor de Sliq2D berekeningen is het talud voorafgaande aan de vloeiing (inclusief versteiling door baggeren) geschematiseerd, zie Figuur 3.41.

Omdat met Sliq2D alleen rechte taluds berekend kunnen worden is dit tweedelige talud omgerekend in een recht talud met een fictieve taludhoogte en een hellingshoek gelijk aan die van het onderste (steile) taludgedeelte.

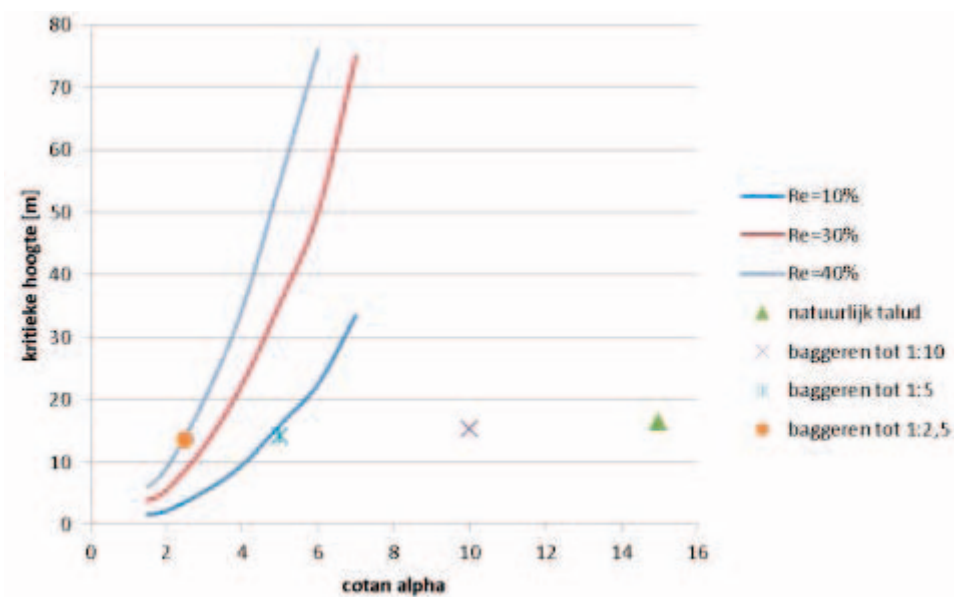


Figuur 3.41 Profiel Plaat van Walsoorden, inclusief vereenvoudigde schematisatie ten behoeve van SLIQ2D berekeningen

3.5.3.3 Modelleren en resultaten

Figuur 3.42 geeft de (fictieve) taludhoogte en –helling van het talud in het baggervak voor drie verschillende relatieve dichtheden van het zand. De doorgetrokken lijnen geven weer bij welke combinatie van taludhelling, fictieve taludhoogte en relatieve dichtheid van het zand metastabiliteit in het talud optreedt. De punten geven het werkelijk aanwezige talud weer voor verschillende taludhellingen in het baggervak. Met natuurlijk talud wordt bedoeld het geschematiseerde talud in voorgaande figuur. Berekend is bij welke combinatie in het talud minimaal 1 metastabiel punt ontstaat.

Omdat de plastrand zich in de afgelopen jaren relatief snel in zuidelijke richting heeft uitgebreid, mag er vanuit worden gegaan dat er sprake is van zeer losgepakt zand, waarschijnlijk ergens tussen de 10% en 40%. In de grafiek kan worden afgelezen dat bij een relatieve dichtheid van 10% verweking kan optreden als binnen het baggervak het talud 1:5 wordt. Indien de relatieve dichtheid 40% zou zijn, zou verweking pas optreden bij een 1:2,5 talud.



Figuur 3.42 Resultaten Sliq2D

3.5.4 Retrobreach

3.5.4.1 Systeem

Retrobreach is een geparametriseerd morfologisch rekenmodel, waarmee de terugschrijding van de bres en daarmee de inscharingslengte berekend kan worden.

De beginsituatie bestaat uit een taludvorm, waarbij ergens in het talud een verstoring is aangebracht in de vorm van een stukje talud met een helling steiler dan het natuurlijk talud ("initiële bres"). Daardoor ontstaat een dichtheidsstroming van een turbulent zand-watermengsel die zorgt voor verstoring van het taludgedeelte ter plaatse van dat stukje talud en daar beneden. In dat verstoorde deel van het talud, worden vier regimes onderscheiden op basis van de taludhelling en het lokaal aanwezige zandtransport in de dichtheidsstroming:

- 1 Walregime.
- 2 Erosieregime.
- 3 Evenwichtsregime
- 4 Sedimentatieregime.

Voor ieder regime is een formule afgeleid voor de terugschrijdsnelheid als functie van de taludhelling en het zandtransport. Onder "terugschrijdsnelheid" wordt de snelheid verstaan waarmee het lokale talud terug- of vooruitschrijdt ofwel de snelheid waarmee de bodem omlaag of omhoog komt. De afleiding is zodanig uitgevoerd dat die snelheid redelijk overeenkomt met die gevonden bij HMTurb berekeningen bij een globaal overeenkomstige taludgeometrie.

Bovenin de initiële bres heerst het walregime. De initiële bres zal terugschrijden in het bestaande talud. Hij kan daarbij kleiner (en flauwer) worden en vervolgens "uitsterven". Maar hij kan ook uitgroeien tot een grote bres (een steil taludgedeelte dat terugschrijdt in het bestaande talud). Daarbij wordt een flink zandtransport gegenereerd dat groeit in benedenstroomse richting. Op basis van de geometrie en de berekende terugschrijdsnelheid wordt de bodemverandering berekend per tijdstap. De inscharingslengte wordt gevonden wanneer de breshoogte tot 0 is afgenomen. De ontwikkeling van dit rekenmodel is gestart in WTI kader en voortgezet door Maarten de Groot en Gijs Peelen. Er is inmiddels een goed werkend Excel rekenmodel beschikbaar. Onderdelen moeten nog worden verbeterd en getest. De verwachting is dat de opgetreden verschijnselen dan redelijk gesimuleerd kunnen worden.

3.5.4.2 Toepassing

Uitgegaan is van een geschematiseerd talud van de Plaat van Walsoorden, waarin over een hoogte van 5 m of 8 m een talud van 1:3 is gebaggerd.

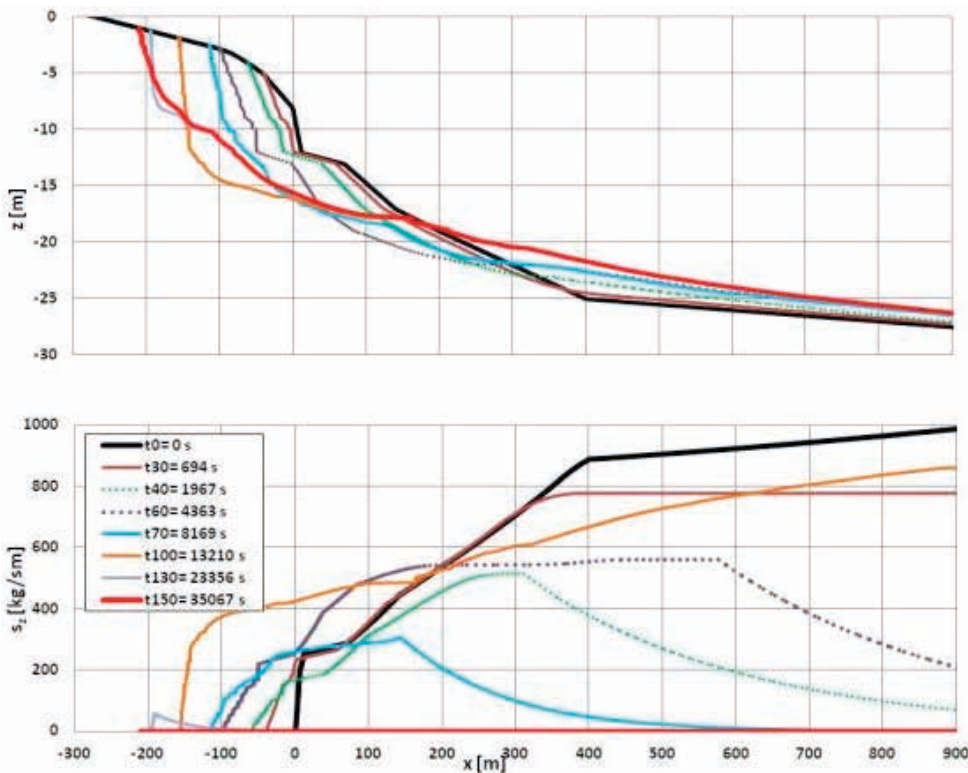
In de berekening is aangenomen dat de grondopbouw bestaat uit twee grondlagen. Onder NAP -10m is het zand losgepakt, maar wel dilaterend. De eigenschappen zijn zoals eerder aangenomen bij HMTurb-berekeningen. Boven NAP -10m bevindt zich een zeer losgepakte laag, waar op het startmoment een verwekingsvloeïing optreedt. Hierdoor wordt een extra hoeveelheid zand aangeboden. Om de verwekingsvloeïing in de berekening te simuleren is boven NAP-10m gedurende 11 minuten een natuurlijk talud van slechts een paar graden (wateroverspanning van 90%) aangehouden en, bij sommige berekeningen, vervolgens gedurende enige uren een geleidelijk afnemende wateroverspanning.

3.5.4.3 Modelleren en resultaten

De ontwikkeling van geometrie en zandtransport zijn weergegeven in Figuur 3.43 voor de berekening met 1:3 over 5 m hoogte waarbij 694 s (11 minuten) lang 90% wateroverspanning heerste en daarna nog gedurende ruim twee uur een geleidelijk afnemende gedeeltelijke verweking. Volgens deze berekening treedt een forse zettingsvloeïing op met een uiteindelijke inscharing na ongeveer 10 uur (vanaf de top van het steile taludgedeelte) van ruim 200m en een eindtalud dat bovenaan ongeveer 1:8 is en onderaan ongeveer 1:70.

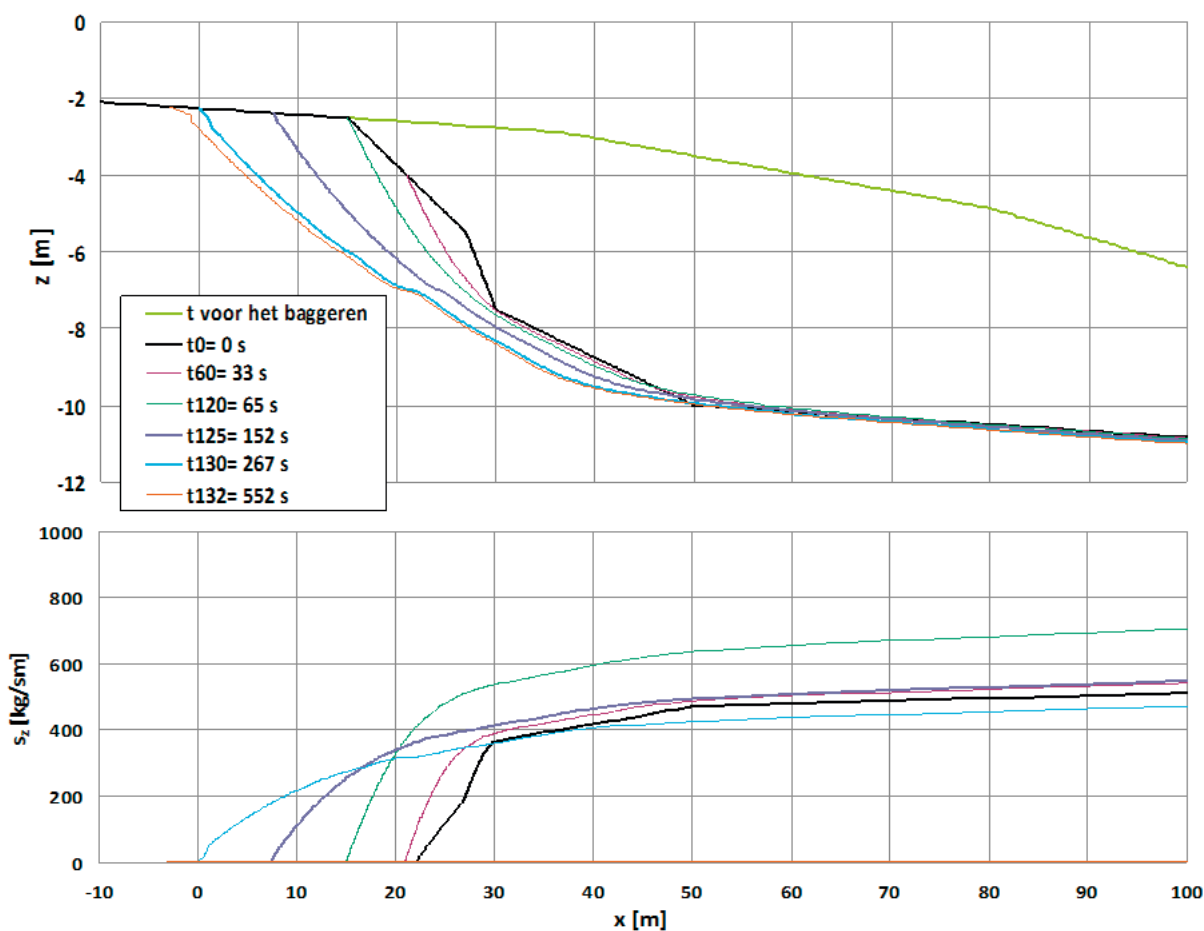
In een tweede berekening werden identieke uitgangspunten gehanteerd tot 694 s (11 minuten). Maar vervolgens werd aangenomen dat er geen enkele wateroverspanning meer optrad. Dat resulteerde uiteraard in een identieke geometrie en zandtransport tot het overeenkomstige tijdstip ("t30 = 694 s"). Maar vervolgens werd praktisch geen enkele terugschrijding gevonden en een verwaarloosbaar klein zandtransport, zodat de eindgeometrie praktisch overeenkomt met die op t30 in de figuur voor de eerste berekening met een inscharing van ongeveer 40m.

De berekeningen met 1:3 over 8 m hoogte vertonen een overeenkomstig beeld.



Figuur 3.43 Resultaten voorspelling met Retrobreach (boven ontwikkeling talud, onder zandtransport)

Tijdens de proef zijn meerdere vloeiingen opgetreden, onder meer op 1 oktober. Voorlopige peilingen van de taludvorm voor en na die vloeiing zijn beschikbaar. Gepoogd is om die vloeiing na te rekenen met RetroBreach. Daartoe is weer een berekening gemaakt waarbij verweking is aangenomen in de bovenste laag grond en een berekening zonder enige verweking om na te gaan of die vloeiing een zuivere bresvloeiing kan zijn geweest. De grondparameters zijn verder praktisch gelijk genomen aan die bij de voorspelling. Het resultaat van de tweede berekening is weergegeven in Error! Reference source not found.. De inscharing komt redelijk overeen met die welke is waargenomen. Maar het zand sedimenteerde volgens de berekening niet op de plaats waar sedimentatie opgetreden is. Dat wijst er op dat het berekende zandtransport te groot was.



Figuur 3.44 Resultaten narekenen met Retrobreach (boven ontwikkeling talud, onder zandtransport)

Volgens de berekening zonder verweking zou de waargenomen begingeometrie niet tot een instabiel bresproces leiden.

3.5.5 Material Point Method

3.5.5.1 Numerieke methode

Een volgende analyse is uitgevoerd met de 'Material Point Method' (MPM), dat beschouwd kan worden als een uitbreiding van de veelgebruikte eindige-elementenmethode (EEM), waar Plaxis een voorbeeld van is. MPM is specifiek ontwikkeld voor de simulatie van grote vervormingsprocessen van vaste materialen [Sulsky et al., 1994], waarvoor de eindige-elementen methode tekort schiet. De eerste toepassingen voor korrelige materialen zijn beschreven door Wieckowski [2004] en Coetzee [2005]. Sindsdien is het succesvol toegepast in de geotechniek, zie bijvoorbeeld Beuth et al. [2007], Alonso en Zabala [2011] en Al-Kafaji [2013].

Met MPM wordt de vervorming van een grondlichaam gemodelleerd met behulp van een wolk van materiaalpunten, bewegend door een vaststaand net (mesh) op de achtergrond. De materiaalpunten hebben alle fysieke eigenschappen van het continuüm, zoals materiaalparameters, rekken en spanningen, alsmede externe belastingen. Het achtergrondnet wordt gebruikt om de bewegingsvergelijkingen van het geheel op te kunnen lossen, net als bij de eindige-elementenmethode. Uit de verkregen versnellingen op de knopen worden de locaties van de materiaalpunten vernieuwd. Het achtergrondnet omvat de gehele ruimte waarin mogelijk beweging van het materiaal kan optreden.

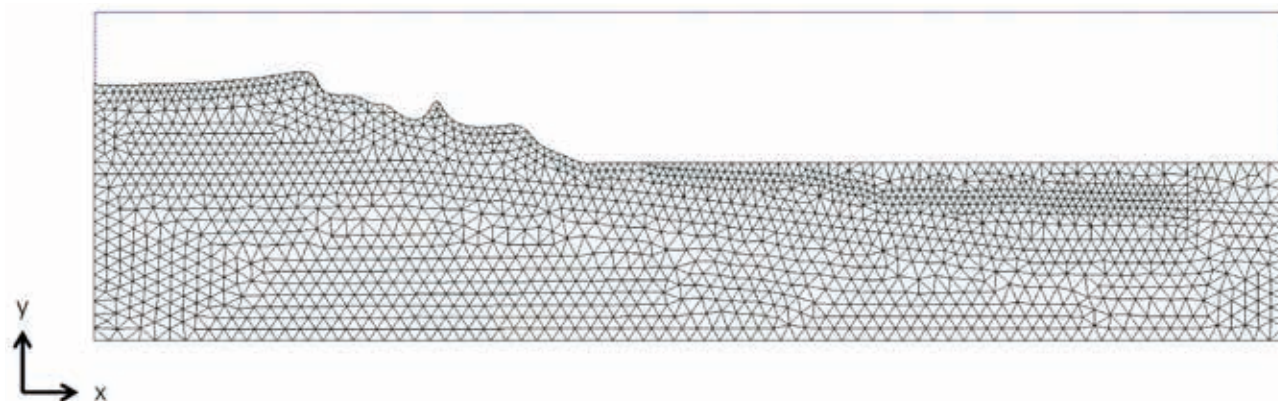
In dit onderzoek is een 3D MPM met dynamisch evenwicht gehanteerd. Dit omvat een volledig gekoppelde twee-fasen formulering waarmee de simulatie van de generatie en dissipatie van wateroverspanningen en wateronder-spanningen in grond mogelijk is. De evenwichtsvergelijkingen worden opgelost met de versnelling van het korrelskelet en het water als primaire onbekende variabelen. Effectieve spanningen in het korrelskelet en poriëndrukken worden berekend, maar noch de stroming van water door het korrelskelet, noch de overgang tussen ('gewone') grond en geïnduseerde grond worden beschouwd. De grond wordt geacht een dichtheid te behouden die tenminste gelijk is aan de minimumdichtheid waarbij de grond geacht wordt geïnduseerd te zijn. Voor nadere informatie over MPM en de gehanteerde twee-fasen formulering wordt verwezen naar Jassim et al. [2012] en Al-Kafaji [2013].

3.5.5.2 Numerieke analyse

De metingen van de proef laten zien dat een vloeïng optrad op 1 oktober 2014 tussen 18:30 UTC en 22:40 UTC, nadat zand was verwijderd aan de teen van het onderwatertalud. Voor de analyse is een dwarsdoorsnede gebruikt. De analyse spitst zich toe op het begin van de waargenomen vloeïng, tussen 18:30 UTC en 18:40 UTC, hetgeen hier beschouwd wordt als de periode tussen het einde van het baggeren en het begin van de vloeïng. Om 18:25 UTC was een hoop zand zichtbaar aan de teen, tot een hoogte van NAP -8m, welke verdwenen was om 18:40 UTC. Aangenomen is dat het wegbaggeren van deze hoop zand de vloeïng heeft veroorzaakt en dat het verwijderen van het zand is doorgegaan tot iets ná 18:30 UTC, leidend tot een diepere vore in het talud. Op basis van de beschikbare data lijkt een baggerdiepte van 2m redelijk. Het moge duidelijk zijn dat er een aanzienlijke onzekerheid zit in deze schatting, waarbij ook in aanmerking genomen dient te worden dat de verwijdering van het zand ook aan weerszijden van de dwarsdoorsnede plaatsvond.

De beperkt beschikbare data aan het begin van de analyse maakte het noodzakelijk allerhande aannames en schattingen te doen met betrekking tot de invoerdata, zodat de uitgevoerde analyse uiteindelijk als niet meer dan een eerste inschatting kan worden gezien.

Figuur 3.45 toont de geometrie en het resulterende elementennet, gegenereerd met behulp van een interpolatiefunctie en de punten van de geometrie van de beschouwde doorsnede. Het net bestaat uit ongeveer 16.400 vierknoops tetraëders inclusief aanvankelijk inactieve elementen, 31.500 knopen en 74.000 materiaalpunten. Met de gehanteerde 3D code is een volume met een dikte van 1 meter gediscrètiseerd. Dit levert een net met elementen met acceptabele vormverhoudingen. De breedte van het gemodelleerde gebied is ongeveer 76 meter. De hoogte van de grondmassa is ongeveer 18 meter aan de linkerrand en 12 meter aan de rechterrand. Figuur 3.46 toont de gegenereerde verdeling van de materiaalpunten voor en na baggeren. Vanwege tijdgebrek is het baggerproces als instantaan gemodelleerd.



Figuur 3.45 Geometrie en Eindige Elementennet van de beschouwde dwarsdoorsnede van het talud, gemodelleerd als een schijf met dikte 1 m.



Figuur 3.46 Discretisatie van de materiaalpunten voor en na de onmiddellijke verwijdering van zand.

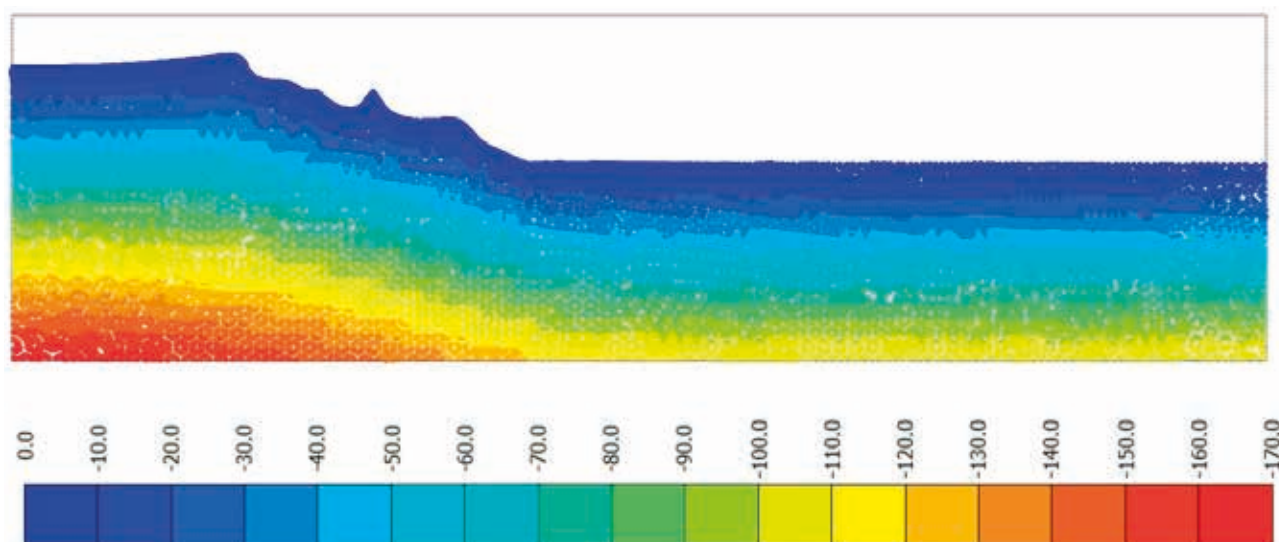
Voor de vaste fase zijn de randen van het net gefixeerd loodrecht op de randen (schuifrandvoorwaarden). De onderkant van het net is geheel star. Absorberende randen zouden gebruikt moeten worden om niet-fysische reflecties van spanningsgolven te vermijden. In deze verkennende studie zijn dergelijke bijzondere randvoorwaarden niet gehanteerd. Voor de water-fase zijn de voor- en achterzijde gesloten randen. De linker- en rechterrاند zijn open grenzen, evenals de onderzijde, zodat wateroverspanningen en –onderspanningen kunnen dissiperen voorbij de randen.

In de analyse is gebruik gemaakt van het Mohr-Coulomb model. Noch een verandering van de stijfheid bij een verandering in effectieve spanningen, noch een verandering in doorlatendheid bij een veranderende dichtheid zijn in beschouwing genomen. Echter, de dilatantiehoek is spanningsafhankelijk zodanig dat deze gelijk aan 0 wordt bij voortgaande afschuiving. De materiaaleigenschappen zijn onveranderlijk beschouwd in het gehele volume. Er is een verzadigde twee-fasen analyse uitgevoerd, waarbij rekening is gehouden met het gewicht onder water van het materiaal op de helling.

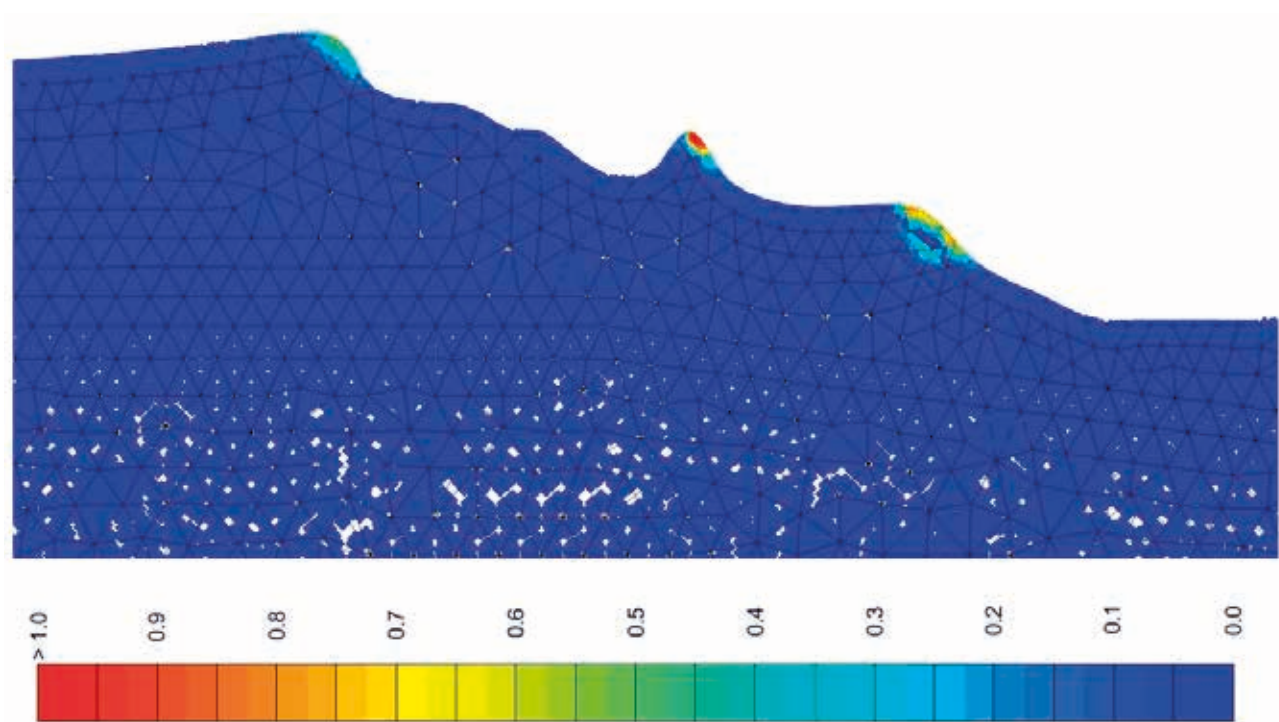
De gehanteerde grondeigenschappen zijn gebaseerd op de beschikbare gegevens voor de proeflocatie en de eerste analyse van de laboratoriumproeven. Aangenomen dat het zand losgepakt is, is de porositeit n geschat op 0,42. Een onderwatergewicht van $9,5 \text{ kN/m}^2$ is aangenomen en een doorlatendheid van $2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Voor de elasticiteitsmodulus E is 7500 kN/m^2 gekozen en voor de dwarscontractiecoëfficiënt 0,3. Rekening houdend met de samendrukbaarheid van het poriewater ten gevolge van luchtbelletjes, is een bulk modulus van de water-fase van $K_w = 58 \text{ MN/m}^2$ gehanteerd (komt overeen met 0,2% lucht) overeenkomend met een ongedraineerde Poisson ratio van 0,49. De wrijvingshoek van het zand is geschat op 32° en een kleine cohesie van $0,05 \text{ kPa}$ is gebruikt. De dilatantiehoek is gesteld op -2° . Dit leidt tot samendrukking van schuivend zand, hetgeen leidt tot de vorming van wateroverspanningen en daarmee een reductie van de effectieve spanningen, zoals verwacht mag worden tijdens de waargenomen vloeiing. De neutrale gronddrukcoëfficiënt K_0 is geschat op 0,47.

3.5.5.3 Resultaten

Figuur 3.47 toont de verticale effectieve spanningen vlak voor de verwijdering van het zand aan de teen. De spanningen onderaan het elementennet zijn in overeenstemming met het aangebrachte onderwatergewicht en de hoogte van de zandkolom. Figuur 3.48 toont verder de berekende grootte van de snelheden voor de initiële toestand. De steilste hellingen schuiven af, zoals verwacht mag worden, met bij initialisatie lage snelheden (in de orde van centimeters per seconde).

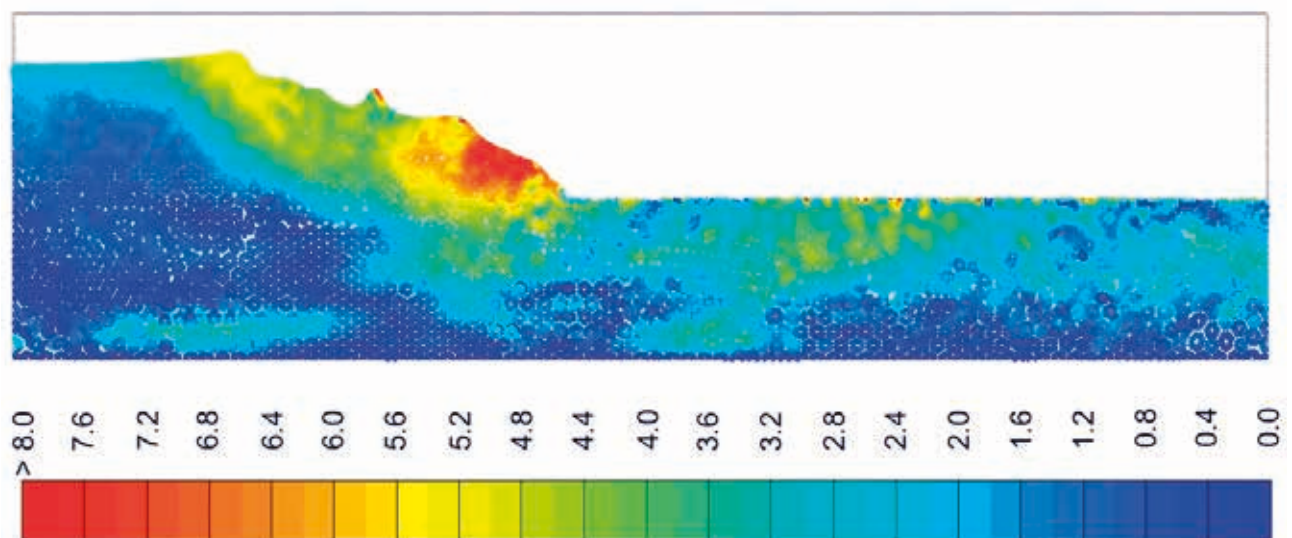


Figuur 3.47 Verticale spanningen in kPa voor helling voor baggeren.



Figuur 3.48 Orde van grootte van de snelheden in cm/s voor helling voor baggeren met piekwaarden tot 1.2 centimeter per seconde.

Figuur 3.49 toont de orde van grootte van de snelheden 0,57 seconde na de instantane verwijdering van zand. Een schuifvlak blijkt zich op twee plaatsen te ontwikkelen binnen het zandlichaam, onder de zandhopen. De uitkomsten tonen dat de wateroverspanningen in deze zones geleidelijk toenemen en dat de grond plastisch wordt. De relatief snelle verplaatsing van de zandhopen zal waarschijnlijk bijdragen aan de ontwikkeling van een afschuiving. Op dit tijdstip zijn de piekwaarden van de snelheid bij de zandhopen toegenomen tot 10 cm/s.



Figuur 3.49 Grootte van de snelheden op $t=0,57s$ na de instantane verwijdering van het zand, in cm/s (in rode zones loopt de snelheid op tot 10 cm/s).

3.5.6 Delft3D-Flow

3.5.6.1 Systeem

Delft3D Flow is het numerieke rekenmodel dat bij Deltares is ontwikkeld voor complexe open waterstromingen en sedimenttransport in rivieren, getijdegebieden en zeeën [Lesser et al., 2004]. De afgelopen jaren is het model zodanig ontwikkeld dat ook dichtheidsstromingen beschreven kunnen worden, omdat de gridlijnen dichtbij de bodem verfijnd kunnen worden (sigma lagen) en het dichtheidseffect als aandrijvende kracht ook in rekening wordt gebracht. Turbulente diffusie van het sediment wordt berekend met een gekalibreerd $k-\epsilon$ turbulentiemodel. Voor het zandtransport wordt de modellering van bodem- en suspensietransport van zand volgens Van Rijn [2004] toegepast en er wordt rekening gehouden met hellingseffecten en 'hindered settling'. In het kader van WTI, onderdeel verbetering modellering bresvloeiing, zijn al eerder verkennende Delft3D berekeningen uitgevoerd om een zettingsvloeiing te simuleren [Mastbergen et al, 2012].

3.5.6.2 Toepassing

Het profiel van de Plaat van Walsoorden zoals voor de proef gemeten, met daarin aangebracht een lokale versteiling door baggeren is als invoer gebruikt. Voor de geometrie is uitgegaan van het gemeten talud profiel 37 van ongeveer 1:12, vanaf een diepte van 25m – NAP verflauwend bij de laagwaterlijn van de plaatrand. De versteiling wordt aangebracht van -15 tot -5 m + NAP. De waterlijn ligt op NAP. De berekening geldt per eenheid van breedte, dus is in feite een 2D tijdsafhankelijke berekening. Door de komvormige bresvorm in rekening te brengen is in principe ook een volledige 3D berekening mogelijk, maar daarvoor was in dit kader geen gelegenheid meer.

De situatie met een verstoring op een onderwatertalud wordt in rekening gebracht door de bres als een taludopwaarts bewegende bronterm te modelleren. Verder is er geen stroming aanwezig, ook niet in het bovenliggende water (dus geen getij). Voor het zand is een d_{50} aangehouden van 140 μm (zoals gemeten) en voor de droge dichtheid van de bodem 1600 g/l, dit komt overeen met een porositeit van 40%.

Voor de bres is een terugschrijdsnelheid van 10 mm/s aangenomen, beginconcentratie 318 g/l (mengseldichtheid dus 1200 kg/m³), begindebiet (per eenheid van breedte) variabel, maximaal 0,064 m³/s,m en bijbehorende begin-

zandtransport 20 kg/s,m. Dit komt overeen met een bres van 1 à 2 m hoogte, al is de gekozen terugschrijdsnelheid nogal hoog voor 140 µm zand.

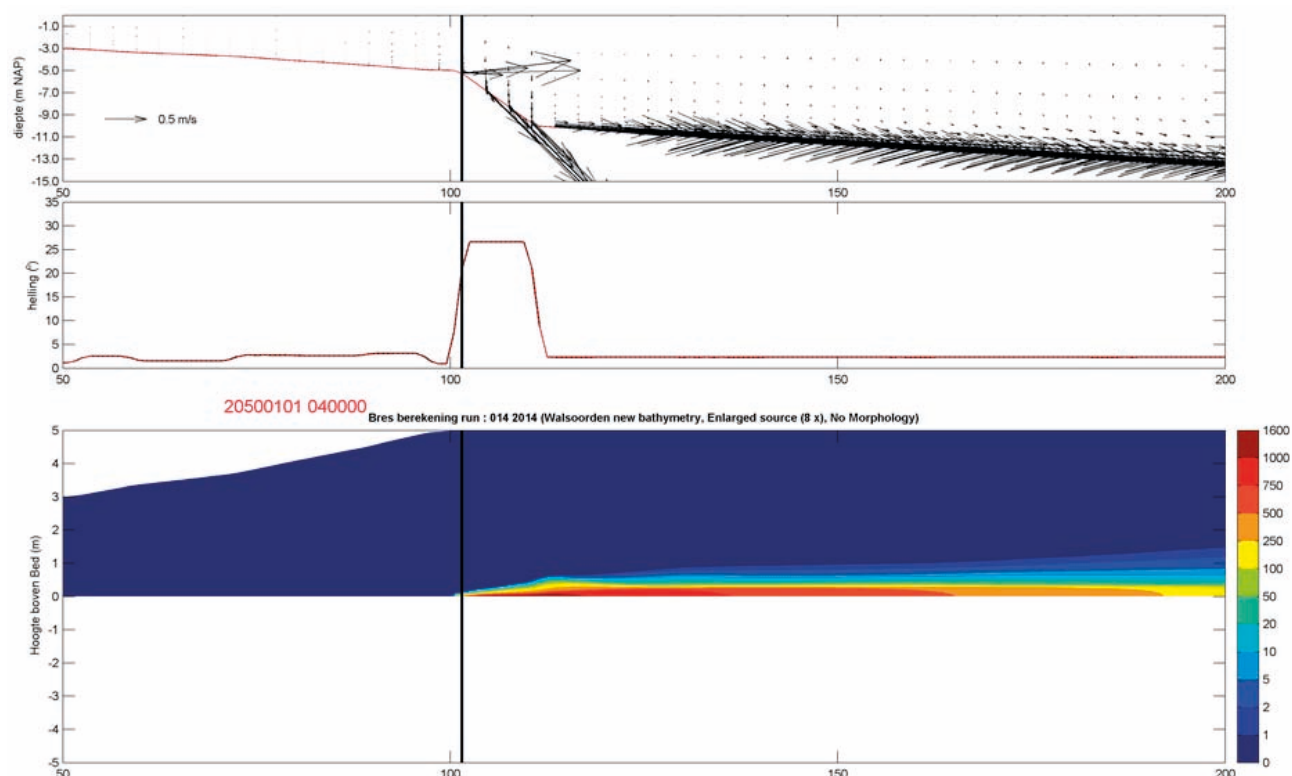
3.5.6.3 Modelleren en resultaten

De berekeningen zijn weergegeven als animaties in de tijd. De bres begint op het vlakkere deel onder aan het steilere talud (op ongeveer 120 m) en beweegt langzaam taludopwaarts. Het omgevingswater is aanvankelijk in rust.. In Figuur 3.50 en Figuur 3.51 zijn als voorbeeld snapshots te zien. Weergegeven worden 3 grafieken met steeds dezelfde horizontale x-as. De verticale zwarte lijn geeft aan waar de bron op dat moment aanwezig is. De bovenste grafiek geeft het talud weer met het berekende stroomsnelheidsvectorveld, de middelste grafiek geeft de lokale taludhelling (in graden) voor (zwarte lijn) en na (rode lijn) passeren van de bres. De onderste grafiek geeft de bodemverandering aan met daarboven de dichtheidsstroming, de kleur is een indicatie van de mengseldichtheid, de donkerblauwe achtergrond is schoon water. Er zijn verschillende berekeningen uitgevoerd met variatie van geometrie en bronsterkte.

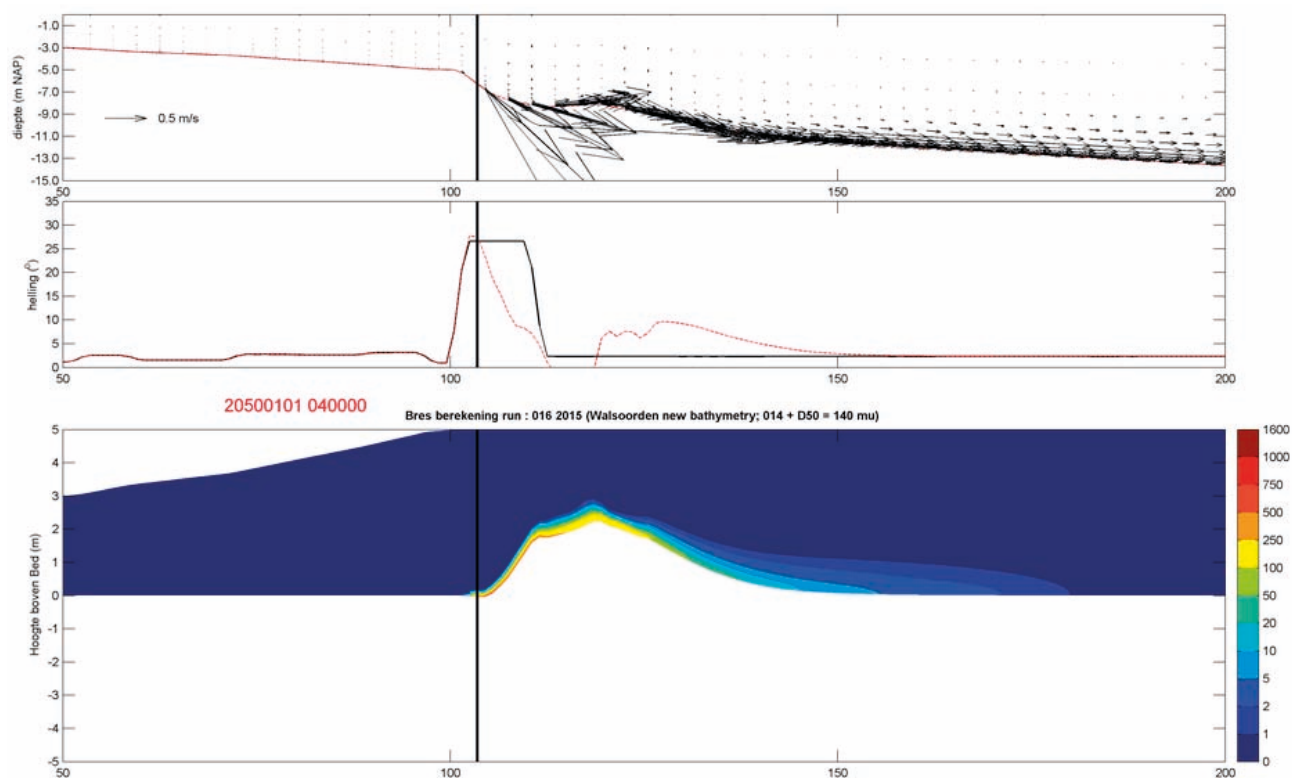
In berekening 017, zie Figuur 3.50, is het resultaat te zien zonder morfologische effecten (bodemupdate), terwijl in berekening 016, zie Figuur 3.51 de bodemveranderingen wel in rekening worden gebracht (morfologische berekening). In berekening 017 is te zien dat wanneer de bres op het steile deel van het talud komt (hier 1:2, ofwel 26°) een significante dichtheidsstroming met hoge zandconcentraties, die zich over meer dan 100 m uitstrekt wordt opgewekt (zand-water mengselstroom of turbidity current). Voor dezelfde situatie, maar met bodemveranderingen, berekening 016, is te zien dat direct stroomafwaarts van de bres veel zand sedimenteert waardoor de stroming gehinderd wordt en nauwelijks over de 'bult' komt. Het meeste zand zet zich af binnen 50 m terwijl de stroming nog tot 100 m afstand zichtbaar is. Met 200 i.p.v. 140 µm zand (berekeningen 013 en 016, hier niet weergegeven) is dit effect, zoals te verwachten nog sterker. Er ontstaat dus geen stroming die het zand over veel grotere afstand transporteert, wat tijdens de proef ook niet is waargenomen. Aan de teen van het steile gebaggerde deel van het talud vindt sedimentatie plaats. Dit zou betekenen dat de breshoogte hier afneemt.

Tijdens de proef bleek dat na gericht baggeren zich een actieve bres vormde over meer dan 4 m en de stroming wel op gang kwam waarbij de bres enige tijd (tot enkele uren) in stand bleef, maar dat de gegenereerde mengselstroming weer vrij snel bezonk. Mogelijk kwam dit door de flauwe taludhelling in het baggervak onder de steile bressen of de lokaal aanwezige drempels en putten. In deze zin komt de berekening wel overeen met de waarneming. Het doorgaande bresvloeiingsproces dat onder sterk vergelijkbare omstandigheden bij de plaatval van 22 juli wél optrad kan dan mogelijk verklaard worden door de afwezigheid daar van die flauwe taludhelling en de lokale drempels en putten. Daarvoor is het dus noodzakelijk dat onderaan de bres geen sedimentatie maar erosie optreedt en de breshoogte kan toenemen.

Een talud steiler dan het natuurlijk talud kan nog niet worden gemodelleerd in Delft3D. Een vervolgstap in de modellering zou kunnen zijn het vervangen van de bron door een daadwerkelijk terugschrijdende, zand leverende verticale bres, waarmee de inscharing kan worden berekend, zoals in Retrobreach.



Figuur 3.50 Delft 3D Berekening 017 zonder morfologie (140 µm zand)



Figuur 3.51 Delft 3D Berekening 016 met morfologie (140 µm zand)

3.5.7 Target

3.5.7.1 Systeem

Het data-analysesysteem dat Target Holding met betrekking tot de zettingvloeiingsproef heeft ontwikkeld richt zich op de multibeamdata die tijdens de proef zijn verzameld. De multibeamdata zijn in wezen lokale dieptemetingen op verschillende momenten. Op basis van deze data en de bijbehorende tijdstippen waarop zettingsvloeiingen zijn opgetreden is het doel van dit systeem tweeledig: a) het extraheren van de meest onderscheidende kenmerken en b) het ontwerpen van een machine-learningmodel dat het profiel van een zettingsvloeiing representeert. Om (a) te bereiken zal Target Holding gezien de aard van de beschikbare data twee verschillende aanpakken uitproberen: de multibeamdata als 1) oppervlaktes of 2) multidimensionele tijdreeksen behandelen.

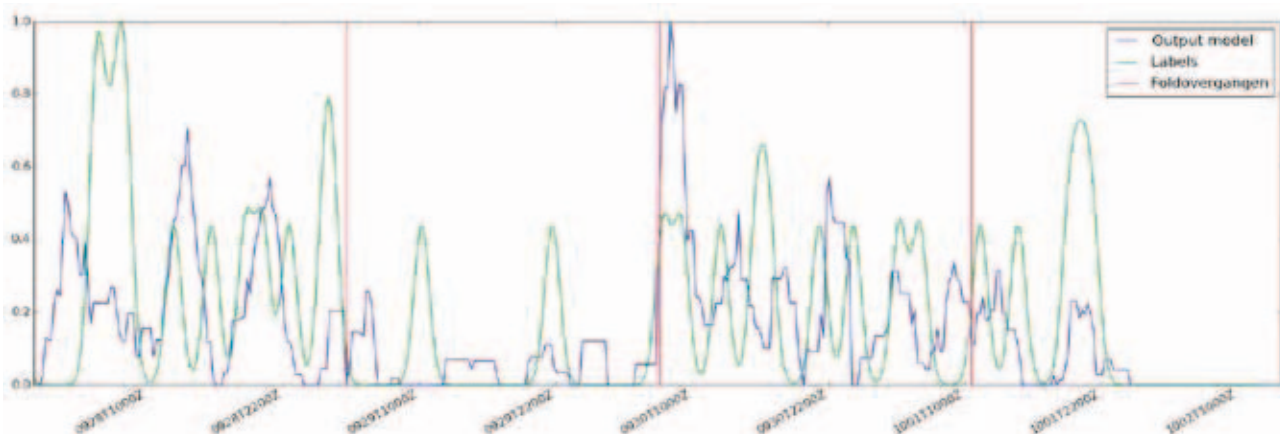
3.5.7.2 Toepassing

Als de multibeamdata naar oppervlaktes zijn getransformeerd, kunnen verschillende methodieken uit het gebied van beeldverwerking worden toegepast die kenmerken extraheren uit de data [Jiang, 2009]. In dit geval was het doel vooral kenmerken te vinden die op een rekenkundig efficiënte manier te gebruiken zijn [De Beurs & Henebry, 2005]. Als laatste stap van deze aanpak is de precisie van verschillende classificatiealgoritmen met betrekking tot het detecteren van de zettingsvloeiing getest.

De alternatieve aanpak (multidimensionele tijdreeksen) is op de bestaande techniek 3S Time Series Analysis [Kruitbosch et al., 2014] van Target Holding gebaseerd. Het 3S-framework splitst tijdreeksen in segmenten van verschillende lengtes op en kent aan elk segment een symbool toe op basis van een monotone functie die het best bij dit segment past. Ieder segment wordt vervolgens gerepresenteerd door vijf kenmerken: a) de offset (gemiddelde waarde), b) de amplitude, c) de lineaire drift, d) de vorm en e) de lengte (aantal datapunten). De 3S-representatie vergelijkt dan segmenten en reeksen van segmenten in deze kenmerkenruimte op basis van een combinatie van Dynamic Time Warping [Gupta et al, 1996] (voor uitlijning) en de Euclidische afstand. De uitdaging van deze aanpak ligt in de uitbreiding van de methode naar multidimensionele tijdreeksen met betrekking tot a) de meest geschikte datarepresentatie [Yoon et al., 2005], b) de toevoeging van geocoördinaten aan het model en c) de geschikte afstandsmaat.

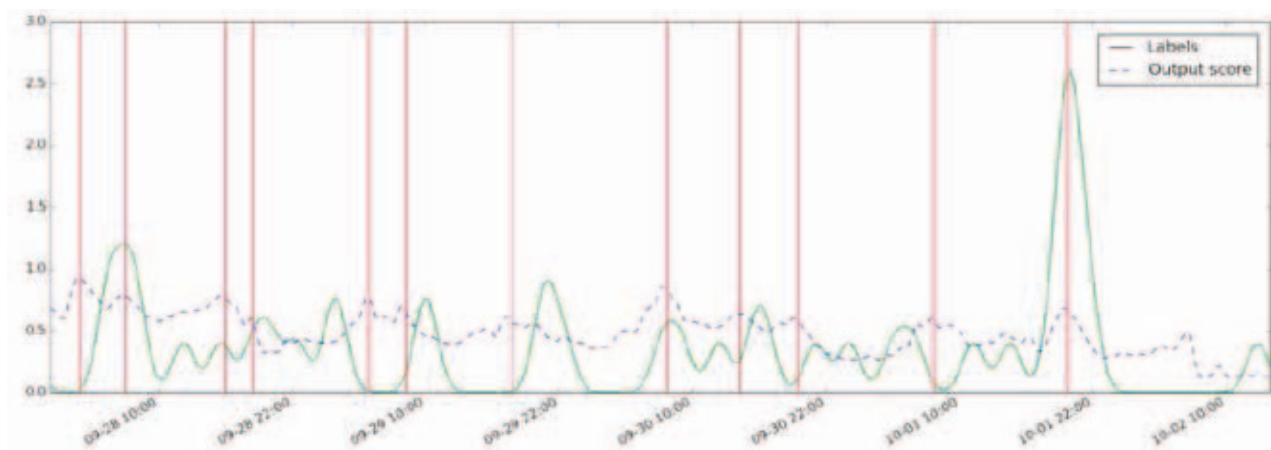
3.5.7.3 Modelleren en resultaten

Met betrekking tot de eerste aanpak zijn de data in 4 even grote, opeenvolgende delen gesplitst. Deze evaluatietechniek heet k-voudige kruisvalidatie, met $k=4$ in dit geval. Het model wordt k maal geëvalueerd: telkens met het k^e deel als testset en de rest van de delen als trainingsset (d.w.z. data die wordt gebruikt om de parameters van het model te optimaliseren). Vervolgens zijn de voorspellingen voor ieder testdeel vergeleken met de labels die op basis van het logboek van de proef zijn gedefinieerd. Dit is gebeurd voor verschillende aantallen clusters en vensterbreedtes. Figuur 3.52 toont de voorspelling en de bijbehorende labels voor ieder deel met de instellingen met de beste resultaten. Figuur 3.52 laat zien dat het systeem op basis van de clusterverdeling vrij goed kan inschatten of er in het logboek een zettingsvloeiing is gerapporteerd.



Figuur 3.52 De voorspelling van het model op delen die het tijdens de training niet zag

Met betrekking tot de tweede (35) aanpak is het volgende op te merken: Figuur 3.53 presenteert de resultaten die deze aanpak oplevert op basis van de labels die uit het logboek naar voren komen. De rode, verticale lijnen geven de momenten waar het systeem met grote zekerheid ($\text{score} \geq 0.6$) een zettingsvloeiing heeft gedetecteerd.



Figuur 3.53 Resultaten zettingsvloeiingdetectie

Deze aanpak is ook in staat de momenten waar in het logboek een zettingsvloeiing is gerapporteerd vrij goed te detecteren. De twee voorkomens van zettingsvloeiing uit het logboek met de grootste zekerheid (28/09 07:00 en 01/10 20:00) zijn zeer nauwkeurig gevonden. Ook meerdere pieken (rapportages van zettingsvloeiing in het logboek) zijn in hun beginfase gedetecteerd. Echter, soms lijkt het systeem te vroeg (b.v. 29/09 17:45) of te laat (b.v. 01/10 08:00) te reageren. Dat kan gebeuren door onnauwkeurigheid van de methode zelf maar ook vanwege onzekerheid in de labels.

3.6 Discussie

3.6.1 Meetmethoden

Uit de voorafgaande aan en na afloop van de proef uitgevoerde boringen, (seismische) sonderingen en subbottom profiling survey en aanvullend laboratoriumonderzoek blijkt dat de grondopbouw van het proefvak op grote schaal vrij homogeen is. In ieder geval tot een diepte waarin de grote vloeiing van juli 2014 en de meervoudige vloeiingen in het proefvak hebben plaatsgevonden is sprake van snel afgezette getijdeafzettingen. Op sommige plekken wordt over meerdere meters schoon fijn zand aangetroffen. Op veel plekken is echter sprake van een snelle afwisseling van slib- en zandlaagjes. Er lijkt geen groot verschil in grondopbouw te zijn ter plaatse van de vloeiing van juli 2014 en het proefvak. Wel lijkt in het erosiegebied van de vloeiing van juli sinds de vloeiing een flink dikke laag niet geconsolideerd slib afgezet. Uit historische peilingen blijkt dat er op die locatie de laatste jaren meerdere vloeiingen hebben plaatsgevonden. Mogelijk dat de opvulling van de erosie-nis, bestaande uit dikke pakketten niet-geconsolideerde sliblagen, extreem gevoelig is voor verweking, ook bij zeer flauwe hellingen.

De hydraulische profiling technique (HPT-sonde) lijkt goed bruikbaar voor het detecteren van slechtdoorlatende stoorlaagjes, beter dan bijvoorbeeld een gewone sondering met een u2-conus. Op basis van de (beperkte) resultaten lijkt de techniek bij toepassing op het water gevoeliger te zijn voor complicaties waardoor bijvoorbeeld verstopping kan optreden, waardoor hier ten dele minder goede resultaten zijn verkregen.

Met de multibeam-metingen kon de bodemligging tijdens het experiment nauwkeurig in kaart worden gebracht. Ook konden meerdere tussentijdse opnamen worden gemaakt van de opgetreden vloeiingen. Uit deze metingen bleek onmiskenbaar dat het ging om bresvloeiingen, die qua omvang groter waren dan ooit in laboratoria nagebootst konden worden. Tot een grote, doorgaande zettingsvloeiing is het echter niet gekomen; daarvoor is het proces telkens te vroeg gestopt. Deze meettechniek bleek uitermate goed aan de verwachtingen te voldoen. Met multibeam kan de ontwikkeling van de geometrie voorafgaande aan het begin van een eventuele vloeiing op

een bepaalde locatie (door baggerwerk of natuurlijke erosie of sedimentatie) dus nauwkeurig gemonitord worden (bijvoorbeeld jaarlijks of dagelijks) evenals het ontstaan en de ontwikkeling van de vloeïng zelf (met intervallen van minder dan 1 uur). Het duurt dan nog enkele uren voordat het schadeprofiel is ontstaan. Voor een permanente dijk- of vooroever signalerings- of bewakingsfunctie is de methode echter niet geschikt.

De resultaten van de metingen met de subbottom profiler *tijdens* de proef zijn nog niet uitgewerkt maar beschikbaar voor toekomstige, meer diepgaande analyses.

De M3-sonar bleek aan de verwachtingen te voldoen: hiermee was het mogelijk om de suspensiestroom bij een vloeïng in beeld te brengen. Dit vormt een waardevolle aanvulling op de multibeam-metingen, omdat hiermee het proces gedetailleerder in de tijd kan worden gevolgd. De techniek vereist echter wel een juiste positionering die tijdens het experiment lang niet bij iedere vloeïng optimaal bereikt kon worden. Ook geeft deze meettechniek geen informatie over de bodemligging op een wijze waaruit deze te relateren is aan een referentievlak zoals NAP, hetgeen wel mogelijk is met de gewone multibeam-metingen.

De voorlopige resultaten van de ADCP-metingen geven een indicatie van de dikte en snelheid van de opgetreden sedimentstroom, maar deze vergen nog een nadere analyse zodat definitieve conclusies nog niet getrokken kunnen worden.

De waterspanningsmeters waren aangebracht om als een soort verklikker te dienen als de waterdruk beïnvloed zou worden door een nabijkomende zettingsvloeïng. De opgetreden vloeïngen zijn echter op vrij grote afstand van de waterspanningsmeters gebleven en er is geen merkbare invloed op zichtbaar geweest. Dit was alleen te verwachten als er een grotere vloeïng zou zijn opgetreden. Naast de veranderingen in de waterspiegel ten gevolge van getij en stroming is alleen de passage van grote zeeschepen zichtbaar in deze metingen.

Ook voor de Fugro Pressio Balgen geldt dat deze zich zo ver van de (in beperkte mate) opgetreden zettingsvloeïngen bevonden dat er geen invloed waarneembaar is geweest, met uitzondering van één kleine, kortstondige anomalie welke nader onderzoek verdient.

De laserscan heeft uiteindelijk alleen een serie nul-metingen opgeleverd, omdat tijdens de proef geen inscharing tot in de plaatrand is opgetreden. Wel is tijdens het experiment gebleken dat metingen met deze techniek beter niet bij vallend water kunnen worden uitgevoerd, omdat het zojuist drooggevalen land dan nog te vochtig is om een goede reflectie te verkrijgen.

Uit de thermografische luchtfoto's is vooralsnog speculatief afgeleid dat een warmer zandlichaam gevoeliger zou kunnen zijn voor een zettingsvloeïng, mogelijk kan dit samenhangen met een wat lagere bulkdoorlatendheid. Dit kan echter evengoed op toeval berusten. Opgemerkt wordt dat de laatste laserscan vanaf de peilvlet omstreeks dooftij is uitgevoerd, aan het einde van de proef. Uit de (thermografische) luchtfoto's die Miramap ruim een week na afloop van de proef bij springeb heeft gemaakt, is zichtbaar dat de inscharing wel boven de springlaagwaterlijn is gekomen.

3.6.2 Visualisatietools

Van de visualisatietools valt de Zettingsvloeïng App van Nelen en Schuurmans in positieve zin op. Hiermee kan de vele verzamelde data, na intensieve verwerking, op inzichtelijke wijze op verschillende manieren worden ontsloten, zoals verandering van dwarsprofielen in de tijd. Dit is zeer bruikbaar voor de interpretatie van de verkregen resultaten.

3.6.3 Modellen

Uit de analyse met SLIQ2D voorafgaand aan de proef volgt dat het optreden van een verwekingsvloeïng hier tamelijk onwaarschijnlijk is, uitgaande van het bestaand talud, zowel voor de in het verleden opgetreden vloeïngen als voor de proefsituatie. Bij flinke versteiling door baggeren neemt de kans toe, nog afhankelijk van de relatieve dichtheid van het zand.

Uit de berekeningen met HMBreach voorafgaande aan de proef blijkt dat het optreden van een bresvloeiing op het talud van de proeflocatie onwaarschijnlijk is. Pas door lokale versteiling van het talud door baggeren neemt de kans op bresvloeiing toe. Het versteilen van het talud van 1:10 naar 1:3 over 5 m hoogte en 100 m breedte betekent 9000 m³ baggeren en over 10 m hoogte 35 000 m³ baggeren. Het talud op de nieuwe locatie was nog iets flauwer dan aanvankelijk aangenomen, ongeveer 1:12. Pas na meer dan 5 dagen baggeren werd een voldoende steil talud gerealiseerd waarbij spontaan bressen begonnen te 'lopen', echter met beperkte stromingslengte (tot 100 m).

Met RetroBreach wordt gevonden dat als een verwekingsvloeiing optreedt, een waarde van 90% wateroverspanning in de laag boven NAP – 10m gedurende 11 minuten (voorspelling) of 4 minuten (narekenen opgetreden vloeiing) een redelijke veronderstelling lijkt. Wellicht zal daarna nog enige tijd een afnemende wateroverspanning optreden, maar dat dit een paar uur zou zijn, zoals bij de in Figuur 3.43 en Figuur 3.44 aangegeven voorspelling, lijkt onwaarschijnlijk tenzij de effectieve doorlatendheid veel kleiner is dan die van schoon zand als gevolg van kleilaagjes. De meest waarschijnlijke berekening met verweking leidt dus niet tot een zettingsvloeiing met de omvang van de vloeiing van 22 juli 2014; wel tot een vloeiing met een omvang zoals waargenomen tijdens de proef.

MPM is specifiek ontwikkeld voor de simulatie van grote vervormingsprocessen van grond, zoals naar verwachting bij een verwekingsvloeiing optreedt. De analyse met het MPM-model is veelbelovend, maar kent vooralsnog een te voorlopig karakter om heldere conclusies uit te kunnen trekken.

Met Delft 3D kan de stroming die bij een bresvloeiing optreedt in detail beschreven worden. Uit de analyse met Delft3D volgt vooralsnog dat met een morfologische berekening (140 µm zand) slechts een bresvloeiing (turbidity current) van beperkte omvang wordt gegenereerd omdat het bezonken zand de stroming weer enigszins tegenhoudt. Zonder morfologische aanpassing tijdens de berekening treedt deze stroming veel duidelijker op. Tijdens de proef bleek dat na gericht baggeren zich een actieve bres vormde en de stroming wel op gang kwam waarbij de bres enige tijd in stand bleef, maar dat de gegenereerde mengselstroming weer vrij snel bezonk. Mogelijk kwam dit door de flauwe taludhelling in het baggervak onder de steile bressen of de lokaal aanwezige drempels en putten. In deze zin komt de berekening overeen met de waarneming.

Met de beide voorspellingsmethoden die Target heeft ontwikkeld, blijkt het begin van optreden van een zettingsvloeiing onder de proefomstandigheden redelijk goed voorspelbaar te zijn, rekening houdend met de onzekerheden in de invoergegevens (zoals het begin van detectie zoals vastgelegd in het logboek) en het feit dat voor de eerste methode alleen het beste uit meerdere modellen is gepresenteerd en een dergelijk model alleen voor een analyse achteraf te maken is voor de opgetreden proefsituatie waarbij niet, zoals vooraf verwacht, slechts één grote vloeiing optrad, maar meerdere kleinere vloeiingen optraden.

4 Kennisopbouw faalmechanisme zettingsvloeiing

4.1 Welke bezwijkvorm treedt op?

Op basis van het vooronderzoek was al geconcludeerd dat de bestaande taluds op de testlocatie bij de Plaat van Walsoorden feitelijk te flauw zijn om een plaatval (door bres- of verwekingsvloeiing) te mogen verwachten (rekenmodellen Sliq2D en HMBreach).

Daarom is uitgegaan van een zekere hoeveelheid benodigd baggerwerk om het talud te versteilen over voldoende hoogte zodat er wel een vloeingsgevoelige situatie zou ontstaan d.w.z. dat dan slechts een geringe 'trigger' nodig is. Berekend was dat een taludhelling van 1:3 over tenminste 5 tot 10 m nodig was bij een totale taludhoogte van meer dan 15 m. Het baggeren vormt dan hoogstwaarschijnlijk ook de aanleiding van de feitelijke vloeiing. Ter plaatse was het talud 1:10 tot 1:14, de totale hoogte gerekend tot het diepste punt in de vaargeul was ruim 25 m. Het versteilen van het talud van 1:10 naar 1:3 over 5 m hoogte en 100 m breedte betekent 9000 m³ baggeren en over 10 m hoogte 35 000 m³ baggeren. In werkelijkheid is tijdens de proefperiode ruim 60 000 m³ zand gebaggerd. Kennelijk was het toch niet zo eenvoudig een vloeiing te veroorzaken hoewel in deze omgeving regelmatig van nature plaatvallen optreden.

Nadat het talud voldoende versteild was, na enkele dagen baggeren, werd een aantal keren waargenomen (vooral uit de verschilbathymetrieën volgend uit de multibeam metingen) dat zich spontaan en autonoom (d.w.z. zonder verdere baggeractiviteit) een steile bres begon te vormen die zich langzaam taludopwaarts komvormig begon uit te breiden, met een hoogte van maximaal 4 tot 10 m en een breedte tot 30 m, zie Figuur 3.8 en Figuur 3.9.

In de multibeam metingen is te zien dat de bovenzijde van de proeflocatie uiteindelijk gevormd was door een aantal aan elkaar aansluitende bressen die vrijwel tot de laagwaterlijn (ongeveer -3 m + NAP) waren teruggeschreden, tot ver boven de baggerzone. Niettemin zijn deze bressen steeds weer stilgevallen.

Een aantal keren is waargenomen dat aan de teen van een dergelijke bres een zand-watermengsel begon af te stromen en vervolgens binnen enkele tientallen meters tot 100 meter weer bezonk, dus nog binnen in het gebaggerde gebied. Uit laboratoriumonderzoek uit het verleden is gebleken dat deze zand-water suspensiestromingen een hoge dichtheid (10 tot 30 vol% zand) hebben en sterk turbulent zijn zodat het zand in suspensie blijft en met behoorlijke snelheden (orde tenminste 1 m/s) weg stroomt. Bij de proef werd het zand vaak al direct opgezogen bij passeren van het baggerschip zodat het niet in de peilingen was terug te zien. Als de bres echt duidelijk doorzette werd het baggerschip in overleg tijdelijk weggestuurd. Het zand stroomde gedurende één tot enkele uren van de bres over het flauwe deel van het gebaggerde gebied over een breedte van enkele meters (dit is zichtbaar in de multibeam metingen). Het zandtransport bedraagt dan tenminste enkele honderden kg/s.

Als antwoord op de onderzoeksvraag geformuleerd in 1.5.1 kan dus gesteld worden dat er duidelijk en herhaaldelijk sprake was van het begin van een bresvloeiing.

In het begin van de proefperiode, toen nog op wat grotere diepte werd gebaggerd (tot -15 m + NAP) zijn af en toe wel kleinere afschuivingen waargenomen. Daarbij bleef het zand aan de teen liggen en was er geen sprake van een flauwe eindhelling. Mogelijk vond dit plaats in de wat dieper gelegen losgepakte zandlagen. Of hierbij verweking is opgetreden is niet vast te stellen omdat de waterspanningsmeters nog te ver weg waren, er was in ieder geval geen sprake van een grote verwekingsvloeiing. In een later stadium van de proef bleven de taluds na baggeren gedurende meerdere surveys steil en bleven dan taludopwaarts bewegen (actieve bressen). Het zand gedroeg zich hier kennelijk voldoende dilatant. Na verloop van tijd nam de breshoogte weer af en stopte het proces.

Het is waarschijnlijk dat de vloeiing van 22 juli op soortgelijke wijze is begonnen en dat uiteindelijk de kleine bressen zijn samengevloeid tot één grote bres die is doorgezet en uiteindelijk een grote amfitheater-vormige kom met een diameter van bijna 300 m heeft gevormd. Het zand is via een centrale geul afgevoerd naar het depositiegebied midden in de vaargeul (ruim 800 000 m³ zand) waar het weer is uitgewaaid, beïnvloed door de lokale diepteligging en tegengehouden door de met stortsteen beklede taludhelling aan de overzijde. Waargenomen is toen dat de rand van de bres zeer steil en zeer diep was wat overeenkomt met waarnemingen elders [Beinssen et al., 2014, Wilderom, 1972]. Nadat de baai was gevormd (van 22 juli rond 8:30 tot de volgende ochtend) is op 28 juli het proces

voortgezet ter plaatse van de geulen. Ook is toen waargenomen dat verticale moten zand in het water schoven, dat wijst op dilatant gedrag en een langzaam terugschrijdend proces, zie Figuur 2.7 [Dekker, 2014].

4.2 Welke vragen blijven er nog over?

Bij de Plaat van Walsoorden treden net als op veel andere locaties in Ooster- en Westerschelde van nature plaatvallen op, omdat er versteiling van het onderwatertalud optreedt. Dat kan door erosie aan de teen (zoals in de Oosterschelde is waargenomen), maar treedt op bij de Plaat van Walsoorden (tenminste sinds de verdieping van de Westerschelde) omdat de plaatrand voortdurend aanzandt.

De omstandigheden zijn voor de IJkdijk proeflocatie ogenschijnlijk allemaal gelijk aan die van de plaatval van 22 juli 2014. Waardoor is de omvang van die vloeiing dan uiteindelijk bepaald? De directe aanleiding (trigger) van een natuurlijke zettingsvloeiing is niet bekend. Steile delen werden hier eigenlijk niet aangetroffen. Extreem laag water? Hevige regenval (in combinatie met aanwezigheid van geulen)? Zandwinnactiviteiten in de voorafgaande periode? Op de testlocatie is intensief gebaggerd en er zijn vervolgens inderdaad vloeiingen opgetreden, maar toch beperkt van omvang vergeleken met die van 22 juli. Er is dus ook een voorwaarde nodig om de vloeiing te laten doorzetten. Bij het baggeren wordt ook een flauw talud gecreëerd. Remt dit de groei van de bressen af omdat het zand niet ver genoeg wegstroomt en weer snel bezinkt (binnen het baggervak) waardoor de bres in hoogte afneemt (nabressen)? Of is het zandtransport toch te gering waardoor de stroming geen erosie veroorzaakt waardoor de dichtheid verder toeneemt en mogelijk een erosiegeul ontstaat (trigger onvoldoende)? Bij de vloeiing in juli stroomde het zand over enkele honderden meters tot in de vaargeul.

Zijn er nog andere verschillen tussen de testlocatie en de oorspronkelijke locatie, waar de vloeiing van juli is opgetreden en die nog niet in detail zijn bekeken, zoals opbouw (gelaagdheid van zand en sliblaagjes), het effect van de geulen, het effect van regenval, de wijze van opvulling met zand en slib bij eerdere plaatvallen?

Een factor die voor de initiatie van de vloeiing van juli mogelijk een rol heeft gespeeld, is dat er direct voorafgaande aan die vloeiing flink wat neerslag is gevallen (tussen 4:00 en 7:00 's-ochtends 20 mm, waarvan 10 mm binnen één uur). In combinatie met laagwater heeft dit mogelijk tot een extreme uittreding van grondwater geleid, waardoor een zodanig groot sedimenttransport op gang is gekomen dat een bresvloeiing kon ontstaan. Tijdens de proef was de neerslaghoeveelheid zeer beperkt.

Omdat de inscharing beperkt is gebleven zijn er geen bovenwatersverschijnselen, zoals afschuivende schollen zand waargenomen. Ook zijn de bressen niet in de buurt van de waterspanningsmeters gekomen, zodat er geen over- of onderspanningen zijn gemeten die het inzicht in het proces zouden kunnen vergroten. Het is niet uitgesloten dat op grotere diepte waar de losgepakte zandlagen aanwezig waren, kleinere verwekingvloeiingen zijn opgetreden die zich dan manifesteren als kleinere afschuivingen.

De zand-watermengselstroming (turbidity current) zelf is nog niet goed gemeten, het nemen van een monster (met Niskin of Delftse fles) is niet gelukt en de ADCP data geven vooralsnog geen duidelijk beeld (deze moeten nog nader uitgewerkt worden). Met de M3 zijn wel zandwolken gemeten maar nog niet duidelijk is welke dichtheid deze hadden. De multibeam metingen laten waarschijnlijk het grensvlak van deze stroming zien en niet de onderliggende bodem, want de hoogte is hoger dan de naastliggende bodem, maar deze details van de stroming moeten nog nader worden geanalyseerd.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

5.1.1 Algemeen

In het experiment is het gelukt om voor het eerst onder natuurlijke omstandigheden een zettingsvloeiing te initiëren en tijdens het optreden van het faalmechanisme relevante data te verzamelen door middel van monitoringsystemen. Data bleek essentieel om kennis te verkrijgen over het faalmechanisme en kennisleemten op te vullen. De hoofdvraag was in hoeverre waterbeheerders meettechnieken en data-analysesystemen kunnen inzetten in de huidige beoordelingsmethoden van vooroevers waar zettingsvloeiing een risico is en om meer kennis over het optreden van zettingsvloeiing te verkrijgen. Relevante parameters waren niet vaststaand en zijn aan de hand van verkregen kennis inzichtelijk gemaakt. Het experiment bood participerende bedrijven de mogelijkheid om deze relevante parameters te monitoren door middel van diverse meettechnieken en data-analysesystemen, die in het experiment op basis van werkelijke omstandigheden gevalideerd zijn. Gezien de zettingsvloeiingproblematiek van waterbeheerders, het vigerende WTI-beleid en de aanwezige kennisleemten over het faalmechanisme, biedt dit bedrijven een marktperspectief.

5.1.2 Relevante parameters

De eerste stap in het experiment was het inzichtelijk maken van informatie dat de beheerders helpt in de beoordeling van zettingsvloeiing. De volgende informatie is hiervoor nodig (zie ook [Van den Ham et al., 2015]):

- Actuele geometrie van diepste punt geul tot kruin dijk (het bovenwatergedeelte bepaalt de spanningstoestand in het onderwatertalud en daarmee de kans op verweking)
- Geometrie onderwatertalud afgelopen 10 jaar
- Aanwezigheid van bestortingen
- Grondeigenschappen en –toestand vanaf waterlijn tot circa een half keer de geuldiepte onder de geulbodem:
 - Grondopbouw
 - Pakking van zand- en siltlagen dikker dan 0,5 m: state parameter of relatieve dichtheid
 - Korrelverdeling van zand- en siltlagen dikker dan 0,5 m

Beleidskader toetsen zettingsvloeiing en relevante parameters

In het kader van WTI (Wettelijk Toetsinstrumentarium) wordt in 2017 een nieuwe beoordelingsmethode voor zettingsvloeiing opgeleverd. Er is een relatief eenvoudig uitvoerbare gedetailleerde toetsmethode ontwikkeld, waarmee een kans op schade door zettingsvloeiing kan worden berekend. Deze methode is gebaseerd op een combinatie van empirie (statistiek van opgetreden vloeiingen in Zeeland) en gevoeligheidsberekeningen met thans beschikbare en gevalideerde rekenmodellen voor verweking (SLIQ2D) en bresvloeiing (HMBreach/HMTurb). Naast de actuele geometrie van het onderwatertalud, de pakking en korrelverdeling van de zand- en siltlagen en de aanwezigheid van stoorlagen, is ook de in de beoordelingsperiode verwachte beweeglijkheid (d.w.z. snelheid van verandering van geometrie) van de vooroever een belangrijke invoerparameter voor zowel de globale als gedetailleerde toets. In sommige gevallen kan de verandering van geometrie van het onderwatertalud door erosie of sedimentatie direct worden uitgesloten, bijvoorbeeld als zeker is dat er een voldoende lange en dikke bestorting aanwezig is of als er sprake is van zeer lage stroomsnelheden (bv in een zandwinput). In de meeste gevallen zullen om de beweeglijkheid van de vooroever vast te stellen echter gedurende meerdere jaren regelmatig peilingen moeten worden uitgevoerd en geanalyseerd. Indien er geen informatie over de beweeglijkheid van de vooroever beschikbaar is, wordt er in de toetsmethode default vanuit gegaan dat deze gelijk is aan die van een gemiddeld Zeeuws talud. Buiten Zeeland zal dit in de meeste gevallen tot een conservatief toetsoordeel leiden. Dit alles betekent ook dat een 12-jaarlijkse beoordeling, zoals in de toetsing, voor voorland in veel gevallen niet zal volstaan.

5.1.3 Inzetbaarheid meet- en data-analysesystemen

Op basis van de ervaringen in het validatie-experiment is per monitoringstechniek aangegeven in hoeverre deze gevalideerd is voor de monitoring van zettingsvloeiingsgevoelige vooroevers conform de beoordelingsmethode:

- Multibeam echoloding: blijkt snel en nauwkeurig en is toepasbaar in meeste estuaria en rivieren in Nederland. Bij voorkeur dienen de metingen bij hoogwater uitgevoerd te worden, omdat zo een zo groot mogelijk deel van de vooroever gepeild kan worden. Naast de uitvoering van de metingen zelf, is processing, visualisatie en interpretatie van de lodingen cruciaal. Tools zoals de in de proef ingezette Zettingsvloeiing App zijn daarbij zeer behulpzaam. Er kunnen eenvoudig verschilkaarten en dwarsprofielen worden gemaakt, die door de tijd “afgespeeld” kunnen worden.
- Bepaling van het bovenwater-gedeelte van de geometrie: airborne laseraltimetrie lijkt hier handiger dan vanaf een schip. Echter leveren luchtfoto's ook bruikbare hoogtemodellen, die qua nauwkeurigheid niet onder doen voor een hoogtemodel bepaald via airborne laseraltimetrie. Bepaling aanwezigheid bestortingen: hoewel niet toegepast in de proef, zijn er geschikte technieken om bestorting onder water aan te tonen, bijvoorbeeld side scan sonar.
- Grondonderzoek: vooral in dynamische omgeving zoals de Wester- of Oosterschelde zijn de voor zettingsvloeiing relevante grondeigenschappen in de vooroever vaak anders dan die onder de dijk. In die situaties lijkt het aanbevelenswaardig om het grondonderzoek dan ook in de vooroever zelf, dus buitendijks, uit te voeren. In de proef is aangetoond dat zelfs vrij innovatieve technieken, zoals seismische sonderingen of een HPT sondering, vanaf het water uitgevoerd kunnen worden. In veel gevallen zal de extra nauwkeurigheid waarmee relevante grondeigenschappen bepaald kunnen worden door grondonderzoek in het voorland uit te voeren, dus vaak vanaf het water, opwegen tegen de extra kosten ten opzichte van grondonderzoek vanaf het land. De bruikbaarheid van geofysische methoden zoals subbottom profiling, als aanvulling op boringen en sonderingen, dient verder te worden uitgezocht. Hetzelfde geldt voor thermografische luchtfoto's.
- Waterspanningsmetingen in de ondergrond geven in laboratoriumomstandigheden een duidelijk signaal van welk faalmechanisme optreedt (overspanning bij verweking, onderspanning bij bressen), maar bij de validatieproef is gebleken dat met de geplaatste sensoren op een afstand van meer dan enkele tientallen meters van het proces geen bruikbaar signaal wordt geregistreerd, anders dan de stijghoogte als gevolg van getij en scheepsgolven.

Bovenstaande informatie is ook in Tabel 5.1 weergegeven. Verder zijn daarin ook de monitoringssystemen opgenomen welke niet direct toepasbaar zijn in de huidige beoordelings- methoden van zettingsvloeiinggevoelige vooroevers, maar wel essentieel zijn in de kennisvergaring over het faalmechanisme.

Tabel 5.1 Toepasbaarheid monitoringstechnieken voor keringbeheerder

Meettechnieken	Data-analyse-systemen	Uitvoerende partij	Direct toepasbaar voor huidige beoordelingsmethoden van vooroevers waar zettingsvloeiing een risico is	Leidt op langere termijn (ca 5 jaar) tot kennisontwikkeling en verbeterde beoordelingsmethoden
Grondonderzoek				
Hydraulic Profiling Tool (HPT)		Fugro	X	X
Standaard boringen en sonderingen		Fugro, Marine Sampling Holland	X ¹	X
Metten aan faalmechanisme				
Multibeam sonar systeem		GeoXYZ	X ²	X
Subbottom profiler (SBP)		Deltares	X ¹	
M3 sonar		National Oceanography Centre (NOC)		X
ADCP		National Oceanography Centre (NOC)		X
Laserscanner		GeoXYZ	X ³	X
Waterspanningsmeters		Fugro		X
Digitale camera		Miramap	? ³	X
Fugro Pressio Balg (FPB)		Fugro	X ⁴	X
Infraroodcamera		Miramap	? ³	X
	Visualisatie systemen			
	ReadyMind	AGT International	X ²	X
	Lizard	Nelen en Schuurmans	X ²	X
	Modellering			
	HMBreach/HMTurb	Deltares	X ⁴	X
	SLIQ2D	Deltares	X ⁴	X
	MPM	Deltares	X ⁴	X
	Delft3D-Flow	Deltares	X ⁴	X
	Retrobreach	Deltares	X ⁴	X
	Target	Target Holding		X

1 Invoer eenvoudige en gedetailleerde beoordelingsmethoden: grondopbouw en grondparameters

2 Invoer eenvoudige en gedetailleerde beoordelingsmethoden: monitoring ontwikkeling vooroevers (zie elders in hoofdstuk 5)

3 Invoer eenvoudige en gedetailleerde beoordelingsmethoden: geometrie boven water (zie elders in hoofdstuk 5)

4 T.b.v. toets op maat (geavanceerde rekenmodellen, parameters voor geavanceerde rekenmodellen zoals gronddruk (FPB))

Hoewel de verschillende meettechnieken en data-analysesystemen elk over een eigen functionaliteit beschikken en op een element in monitoring focussen, is duidelijk dat systemen in een gecombineerde vorm in staat zijn geweest uitgebreide kennis te genereren over het optreden van het faalmechanisme zettingsvloeiing. Meettechnieken zoals hierboven beschreven meten parameters met betrekking tot geometrie en grondeigenschappen. Door middel van visualisatietechnieken kon deze data vanuit andere invalshoeken worden bekeken en geïnterpreteerd. Bovendien is verzameling van data essentieel in het valideren van bestaande rekenmodellen.

5.2 Aanbevelingen

5.2.1 Frequentie monitoring

In principe wordt de vereiste frequentie waarmee peilingen dienen te worden uitgevoerd bepaald door twee factoren:

- hoe ver het beschouwde traject van afkeuren op zettingsvloeiing zit volgens de hierboven beschreven beoordelingsmethoden
- De snelheid waarmee de kans op afkeuren door zettingsvloeiing af- of toeneemt door beweeglijkheid van de vooroever

Om het tweede aspect vast te kunnen stellen kan het zinvol zijn om op basis van peilingen uit het verleden de kans op zettingsvloeiing grafisch uit te zetten tegen de tijd (hetgeen betekent dat de gedetailleerde methode, of een andere probabilistische methode, meerdere keren moet worden uitgevoerd). Indien er in de afgelopen 10 jaar regelmatig (bijvoorbeeld elk jaar) een peiling is uitgevoerd, zal vrij nauwkeurig een voorspelling van de geulontwikkeling gemaakt kunnen worden. Daarbij moet uiteraard wel gelet worden op grondopbouw in de geul. Indien de geul insnijdt in een kleilaag en deze bijna op doorbreken staat, kunnen metingen uiteraard niet geëxtrapoleerd worden. Indien regelmatige peilingen over de afgelopen jaren ontbreken, is een voorspelling lastiger en zal (in eerste instantie) frequenter gemonitord moeten worden met een combinatie van technieken en systemen (grondonderzoek, peilingen en modellering). Van belang is verder de te kiezen toelaatbare faalkans. Indien getoetst wordt of een vloeiing tot schade aan een eventueel aanwezige bestorting leidt, zal de toelaatbare faalkans waaraan getoetst wordt uiteraard hoger zijn dan wanneer getoetst wordt of de kans op een overstroming ten gevolge van een zettingsvloeiing voldoende klein is. Dat kan betekenen dat minder snel maatregelen genomen hoeven te worden.

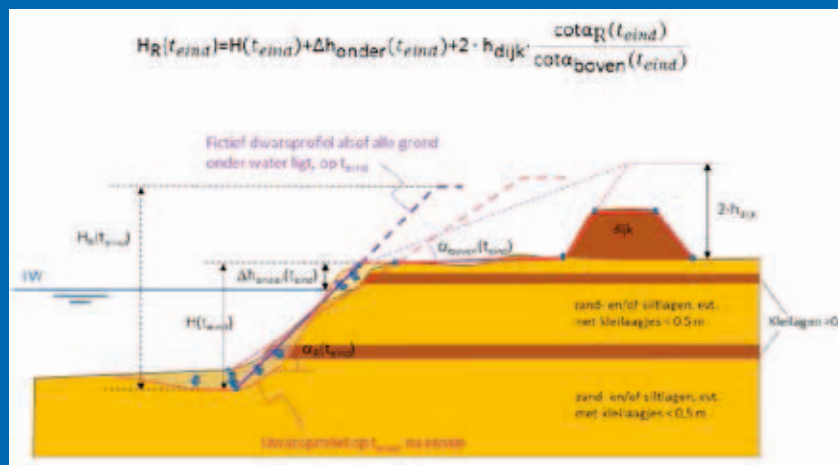
Bepaling beweeglijkheid vooroever

Kwantificeer de te verwachten beweeglijkheid tussen t_0 (actueel) en t_{eind} (einde beoordelingsperiode, zie onderstaande figuur) van de oever met de snelheid V_{lokaal} . Dit kan gedaan worden met een trendanalyse van (jaarlijkse) peilingen van de afgelopen 10 jaar.

De snelheid V_{lokaal} kan vervolgens bepaald worden door de grootste waarde te nemen van:

- de snelheid van de terugschrijding of vooruitgang van de waterlijn,
- de terugschrijding of vooruitgang van het gemiddelde talud
- de snelheid van de verdieping aan de teen maal $\cot\alpha_R$.

De snelheid van een gemiddelde Zeeuwse vooroever, waarop de optredingskansformule in de gedetailleerde toetsmethode gebaseerd is, is geschat op $V_{\text{Zeeland}} = 1$ m/jaar. De optredingskans van het te beoordelen onderwartertalud mag nu vermenigvuldigd worden met $V_{\text{lokaal}}/V_{\text{Zeeland}}$.



5.2.2 Verbetering beoordelingsmethoden

Monitoringsdata kan gebruikt worden om bestaande rekenmodellen, zoals beschreven in paragraaf 3.5, maar bijvoorbeeld ook rekenmodellen die thans aan de TU Delft worden ontwikkeld (PhD onderzoek Dave Weij en het in 2015 gestarte STW onderzoek MPM-Flow), te valideren. Op het zettingsvloeiingssymposium “Zettingsvloeiingen: verweken of bressen” dat op 23 januari 2015 te Delft plaatsvond is een overzicht gegeven van de huidige ontwikkelingen op dit gebied. Momenteel is de betrouwbaarheid en zeker de praktische toepasbaarheid van deze rekenmodellen nog onvoldoende om direct gebruikt te kunnen worden voor een toetsoordeel en zijn deze alleen geschikt voor een toets op maat. Mogelijk is dat over enkele jaren verbeterd. In ieder geval kunnen gevoeligheidsberekeningen met deze nieuwe rekenmodellen uitgevoerd worden waarmee de in het laatste kader beschreven (probabilistische) gedetailleerde methode verder aangescherpt kan worden en daarmee uiteindelijk ook de (semi-probabilistische) globale beoordelingsmethoden. Uiteindelijk zal op termijn dus scherper getoetst kunnen worden.

Veiligheidsbeoordeling op zettingsvloeiing

Omdat het optreden van een zettingsvloeiing onafhankelijk is van de waterstand, zal een zettingsvloeiing meestal niet direct leiden tot een overstroming (behalve in geval van een dijkval en een laag achterland). Wel kan het wegvloeien van het voorland leiden tot een toename van de kans van optreden van faalmechanismen die wel hoogwater-gedreven zijn, waarvan piping, overslag/overloop en macrostabiliteit de belangrijkste zijn, zie [Van der Krogt et al., 2015]. Daarmee kan zettingsvloeiing een indirect faalmechanisme genoemd worden (waarbij opgemerkt wordt dat dat ook geldt voor buitenwaartse macrostabiliteit). De meest elegante wijze om zettingsvloeiing in de berekening van de overstromingskans mee te nemen, is om het schadeprofiel na een vloeiing als stochast mee te nemen in de probabilistische berekeningen van de directe faalmechanismen die beïnvloed worden. Omdat dit ingewikkeld is, is het zeer wenselijk dat zettingsvloeiing ook onafhankelijk van de directe faalmechanismen beoordeeld kan worden, waarbij getoetst wordt of de bijdrage van zettingsvloeiing aan de overstromingskans “verwaarloosbaar” (d.w.z. kleiner dan 1% van de normkans van het dijktraject) is. Binnen WTI wordt momenteel nog onderzocht wat een voor alle waterkeringen veilig criterium is [Van der Krogt et al., 2015]. Vermoedelijk wordt dit iets als: de inschарingslengte ten gevolge van een zettingsvloeiing met een overschrijdingskans van 1% van de normkans van het dijktraject mag niet voorbij de invloedszone van de waterkering reiken. Pas als op basis van dat criterium niet tot een oordeel voldoende gekomen kan worden, wordt het schadeprofiel als stochast (of als geometriescenario) meegenomen in de beoordeling van de directe faalmechanismen. Zowel de nieuwe globale toets (die licht zal worden gewijzigd ten opzichte van de globale methode in het huidige VTV) als gedetailleerde toets op zettingsvloeiing zullen binnenkort met de binnen WTI ontwikkelde toetssoftware D-FlowSlide kunnen worden uitgevoerd. Ook kan in D-FlowSlide, indien meer gedetailleerde gegevens (laboratoriumproeven) beschikbaar zijn, een SLIQ2D berekening (verweking) en HMTurb berekening (bresvloeiing of onbeheerst bressen) worden uitgevoerd, bijvoorbeeld ten behoeve van een toets op maat. D-FlowSlide zal naar verwachting gekoppeld worden aan D-SoilModel, de software waarin waterschappen al hun gegevens met betrekking tot de ondergrond dienen op te slaan en geschikt te maken voor de toetsing in RingToets (de toetssoftware voor overige faalmechanismen). Voor alle primaire keringen in Nederland is eind 2014 een globaal Stochastisch Ondergrond Schematisatie (SOS) voor zettingsvloeiing beschikbaar gekomen. Daarin zijn de keringen opgeknipt in segmenten van maximaal enkele kilometers lengte. Per segment zijn de mogelijke grondopbouwscenario's gegeven, inclusief kans van voorkomen. Binnen een grondopbouwscenario worden de voor zettingsvloeiing relevante grondlagen gegeven tot een diepte van NAP-40 m. Het globale SOS zal in D-SoilModel ingelezen kunnen worden en in combinatie met lokaal grond- en labonderzoek omgezet kunnen worden in een lokaal (stochastisch) ondergrondmodel. De verschillende lokale ondergrondscenario's kunnen vervolgens met D-FlowSlide worden getoetst. D-FlowSlide is tevens aanstuurbaar vanuit DAM.



6 Toekomstvisie

Het zettingsvloeiingsexperiment toont aan dat niet alle faalmechanismen van dijken op eenzelfde manier gemonitord kunnen worden; de monitoringsstrategie voor zettingsvloeiing wijkt sterk af van die van andere mechanismen, zoals piping en macrostabiliteit. Tijdens de voorbereidingen van de proef ontstond er op de voorkeurslocatie van de zettingsvloeiingsproef een grote zettingsvloeiing. Er waren op deze plek korte tijd daarvoor metingen verricht in voorbereiding op het experiment. Tijdens het experiment, dat op een andere locatie werd uitgevoerd, bleek dat het optreden van een vloeiing soms onverwacht plaatsvindt. Dit is anders dan in de voorgaande bezwijkexperimenten.

In de IJkdijk-experimenten van de afgelopen jaren is bewezen dat met behulp van meetsystemen meer kennis en inzicht is verkregen in faalmechanismen voor dijken. Met ingewonnen meetgegevens uit de dijk die gecombineerd werden met statische data over bodemopbouw en dynamische gegevens over de belasting werden voorspellingen over dijksterkte en –bezijking gedaan. Deze bleken, wellicht boven verwachting, qua tijd, locatie en mechanisme vrij betrouwbaar en nauwkeurig te zijn. Beseft dient te worden dat het hier om zorgvuldig ontworpen proefdijken ging met vaak een kortdurende (boven) maatgevende belasting.

Het combineren van verschillende databronnen is in de projecten op kleine schaal succesvol gebleken. Het blijkt echter, onder andere op basis van de ervaringen uit de LiveDijk-projecten, dat het op grote schaal combineren van deze bronnen een andere wijze van dataverwerking vergt. Met name patroonherkenning in grote datasets lijkt hierbij kansrijk. Zo doet kunstmatige intelligentie voorzichtig zijn intrede in de dijkdata-analyse. De vraag is of deze techniek tijdig afwijkend gedrag kan detecteren of voorspellen. Onder tijdig worden zowel de korte termijn ((bijna) calamiteiten en bijzondere situaties) als de lange termijn (regulier onderhoud, toetsing, versterking) verstaan; het omvat alle fasen van de levenscyclus van een waterkering.

Het verkrijgen van meer data en informatie over dijken stelt de beheerder in staat om nauwkeuriger en betrouwbaarder (met minder onzekerheid) een (toets)oordeel te vormen over de gevoeligheid voor specifieke faalmechanismen. Dit kan worden geconcludeerd op basis van de validatie-experimenten en de LiveDijk-projecten. Dit heeft een positief effect op de prioritering van onderhouds- en versterkingsmaatregelen. Hiervoor is het nodig dat relevante data en informatie in voldoende grote hoeveelheden beschikbaar is én wordt gebruikt in dijkbeheer en de toetsing op veiligheid. Kennisleemten die worden geïdentificeerd moeten worden ingevuld om het dijkbeheer verder te verbeteren. Deze verbetering vindt plaats op basis van heldere en reproduceerbare kosten-baten analyses van praktijkcases.

Op basis van alle ervaringen die in de afgelopen jaren zijn opgedaan in IJkdijk en FloodControl verband, wordt vorm gegeven aan een volgend programma waarin de stap van gevalideerde innovaties naar de praktijk centraal staat. De verwachting is gerechtvaardigd dat een efficiencyslag kan worden gerealiseerd. Op basis van heldere en reproduceerbare kosten-baten analyses zal beoordeeld moeten worden in welke mate en onder welke omstandigheden dit geldt. Hierbij dient op zorgvuldige wijze te worden bepaald welke dijken hiervoor geschikt zijn.



7 Literatuur

[Aantjes, 2014]

Aantjes, H., 2014. Beoordeling sedimentbezwaar vaargeul Westerschelde nav zettingsvloeiingsproef Plaat van Walsoorden (aangepaste versie nav nieuwe gegevens). Deltares memo, geen kenmerk, 11 juni 2014

[Al-Kafaji, 2013]

Al-Kafaji, I.K.J., 2013. Formulation of a dynamic material point method (MPM) for geomechanical problems, proefschrift Universiteit van Stuttgart.

[Alonso & Zabala, 2011]

Alonso, E., Zabala, F., 2011. Progressive failure of Aznalcollar dam using the material point method, *Géotechnique* 61(9):795-808.

[Beinssen et al., 2014]

Beinssen, K., D.T. Neil and D.R. Mastbergen, Field Observations of Retrogressive Breach Failures at two Tidal Inlets in Queensland, Australia (2014), *Australian Geomechanics*, 49, No. 3, 55-63

[Beuth et al., 2007]

Beuth, L., Benz, T., Vermeer, P.A., Coetzee, C.J., Bonnier, P., Van den Berg, P., 2007. Formulation and validation of a quasi-static material point method, *Proceedings of the 10th international symposium on numerical methods in geomechanics (NUMOG X)*, Rhodos, pp. 189-195.

[Coetzee, 2005]

Coetzee, C.J., 2005. The material point method, Technisch rapport, universiteit van Stellenbosch.

[CUR 113, 2008]

CUR Aanbeveling 113, Oeverveiligheid bij Zandwinputten, CUR Gouda, 2008

[De Beurs & Henebry, 2005]

K. M. de Beurs & G. M. Henebry, 2005. "A statistical framework for the analysis of long image time series", *International Journal of Remote Sensing*, Volume 26, Issue

[Dekker, 2014]

Dekker, L., 2014. Plaatval dd '22 juli 2014' plaat van Walsoorden/Valkenisse, Rijkswaterstaat memo, geen kenmerk, 14 augustus 2014

[Deltares, 2014]

D-Flowslide - Slope Liquefaction and Breaching, Deltares Public Wiki, 2014

[Delft Cluster, 2006a]

Delft Cluster, 2006, Oeverstabiliteit bij zandwinputten, rekenmodel HMBreach, 2006

[Delft Cluster, 2006b]

Delft Cluster, rekenmodel SLIQ2D, 2006

[De Groot, M., 2013]

De Groot, M., Deltares, 1207813-009-GEO-0006-m, HMBreach - Retrobreach modellering inscharing

[de Vries et al., 2013]

Vries, de, G., Brake, ter, C.K.E., Bruijn, de, H., Koelewijn, A.R., Langius, E.A.F., Lottum, van, H. & Zomer, W.S. (2013). *Dijkmonitoring: beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen*. Amersfoort: STOWA/Stichting IJkdijk.

- [Gupta et al., 1996]
Gupta, L., Molfese, D.L., Tammana, R., Simos, P.G., 2009. "Nonlinear alignment and averaging for estimating the evoked potential", IEEE Transactions on Biomedical Engineering 43 (4): 348–356
- [Hogervorst et al., 2014]
Hogervorst, F., Schuurmans, V., Van der Weij, R., 2014. Datarapportage betreffende Monitoring validatie-experiment zettingsvloeiing – Plaat van Walsoorden. Fugro rapport, kenmerk 1314-0070-000.DR01, versie 1, 18 december 2014.
- [Jassim et al., 2012]
Jassim, I.K.J., Stolle, D., Vermeer, P.A., 2012. Two-phase dynamic analysis by material point method, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics 37(15):2502-2522.
- [Jiang, 2009]
Jiang, X., 2009. "Feature extraction for image recognition and computer vision", 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology.
- [Koelewijn et al., 2010]
Koelewijn, A., Pals, N., Sas, M. & Zomer, W. (2010). *IJkdijk Piping experiment. Validatie van sensor- en meettechnologie voor detectie van optreden van piping in waterkeringen* (2010-26 PIW). Groningen: Stichting IJkdijk.
- [Koelewijn, 2014]
Koelewijn, A.R., 2014. "Validatie-experiment zettingsvloeiing, draaiboek", rapportage 1210303-005-GEO-0002 versie 2, Deltares, Delft, 19 september 2014.
- [Kruitbosch et al., 2014]
Kruitbosch, H.T. & Giotis, I. & Biehl, M., 2014. "Segmented shape-symbolic time series representation", European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning 2014, in press
- [Lesser et al., 2004]
G.R. Lesser, J.A. Roelvink, J.A.T.M. van Kester, G.S. Stelling, Development and validation of a three-dimensional morphological model, Coastal Engineering 51 (2004) 883– 915
- [Mastbergen et al., 2012]
Mastbergen, D.R., Van der Kaaij, Th. en Van Kester, J.A.T.M., Verbetering modellering Bresvloeiing, 1206014-001-GEO-0015-r en 1207813-009-GEO-0007-m, Deltares, 2012
- [Mastbergen, D.R., Van den Berg, J.H., 2003]
Mastbergen, D.R., Van den Berg, J.H., 2003, Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. Sedimentology 50 (4) pp. 625-637.
- [Peters, 2014]
Peters, D.J., Veldverslag grondonderzoek, 1210303-016-GEO-0001, Deltares, 25 september 2014.
- [Scheepers et al., 2014]
Scheepers, B.D., Van der Weij, R., Alink, E., 2014. Veldwerkrapportage betreffende Grondonderzoek en monitoring validatie-experiment zettingsvloeiing Plaat van Walsoorden. Fugro rapport, kenmerk 1314-0070-000.VW01, versie 1, 29 september 2014
- [Sulsky et al., 1994]
Sulsky, D., Chen, Z. Schreyer, H., 1994. A particle method for history-dependent materials, Computer methods in applied mechanics and engineering 118(1-2):179-196.

[Van den Ham et al., 2014]

Van den Ham, G.A., Koelewijn, A.R., Mastbergen, D.R., 2014. Validatie-experiment zettingsvloeiing – (geo)technische haalbaarheid ten behoeve van vergunningsverlening. Deltares rapport, kenmerk 1206508-000-GEO-0007, januari 2014

[Van den Ham et al., 2014b]

Van den Ham, Geeralt A., Maarten B. de Groot and Dick R. Mastbergen, A Semi-Empirical Method to Assess Flow Slide Probability (2014) in: Submarine Mass Movements and Their Consequences, 6th Int. Symp., Kiel, p. 213-223, Springer.

[Van den Ham et al., 2015]

Schematiseringshandleiding zettingsvloeiing. CONCEPT. Deltares rapport, kenmerk 1209439-002-GEO-0002-v2-r

[Van der Krogt et al., 2015]

Van der Krogt, M.G., Van den Ham, G.A., Kok, M., 2015. Safety Assessment Method of Flood Defences for Flow Sliding. Ingediend bij het Fifth International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR), Rotterdam, 2015

[Van Rijn, 2004]

Rijn, L. C. van, D. R. Walstra and M. v. Ormondt, 2004. Description of TRANSPOR2004 and implementation in Delft3D-ONLINE. Tech. Rep. Z3748.10, WL | Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. 69, 85, 237, 239

[Wieckowski, Z. 2004]

Wieckowski, Z., 2004. The material point method in large strain engineering problems, Computer methods in applied mechanics and engineering 193(39-41):4417-4438.

[Wiertsema, 2014]

Wiertsema & Partners, 2014. Geotechnisch laboratoriumonderzoek Validatieproef zettingsvloeiing – Vibrocores te Delft. Kenmerk VN-61608-1, 2 december 2014.

[Weijers et al., 2009]

Weijers, J., Elbersen, G.T., Koelewijn, A.R. & Pals, N. (2009) Macrostabieliteit IJkdijk: Sensor en meettechnologie (VIW 2009-19). Delft: Rijkswaterstaat.

[Wilderom, 1972]

Plaatvallen, OTAR 57 (1972) 7, blz 288-305.

[Yoon et al., 2005]

Yoon, H. & Yang, K. & Shahabi, C., 2005. "Feature subset selection and feature ranking for multivariate time series", IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Special Issue on Intelligent Data Preparation, vol. 17, 9, p.1186-1198

portal.ddsc.nl

Het validatie-experiment werd mede mogelijk gemaakt door:

Ministerie van Economische Zaken

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA)

Hoogwaterbeschermingsprogramma en Rijkswaterstaat (Ministerie van Infrastructuur en Milieu)



Ministerie van Economische Zaken

stowa



Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Met bijdragen van:

Nelen en Schuurmans

Miramap

Fugro

Target Holding

AGT International

Deltares

TNO

NV NOM

de Vries en van de Wiel

Nelen & Schuurmans



miramap



TNO innovation for life

NOM
INVESTERS IN WATERWIRING



En in samenwerking met:

National Oceanography Centre (UK)

Universiteit van Gent (B)

Universiteit van Utrecht

Waterschap Scheldestromen

Waterschap Hollandse Delta

Vlaamse overheid

Provincie Zeeland

geoXYZ

Marine Sampling Holland

Polderman Berging

GSO

Habitat Advies

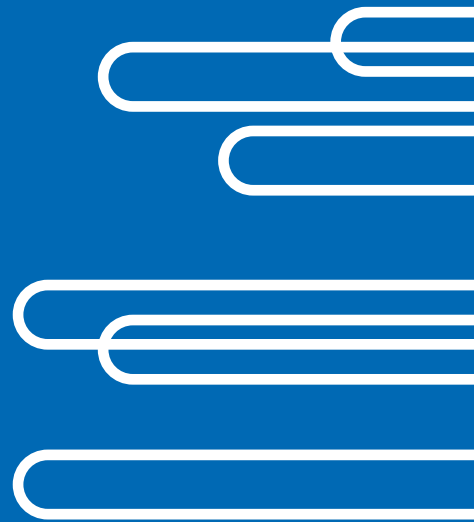
Kongsberg Maritime



Data van het experiment is te vinden in het Dijk Data Service Centrum:

Inlog: zettingsvloeiing

Wachtwoord: zettingsvloeiing



Contact

Stichting IJkdijk
Postbus 424
9700 AK Groningen

E info@ijkdijk.nl
T 050 521 44 66

www.ijkdijk.nl

