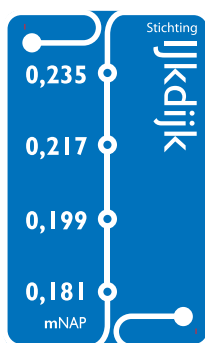


IJkdijk Pipingexperiment

Validatie van sensor- en meettechnologie
voor detectie van optreden van piping in waterkeringen



in samenwerking met



Een samenwerking tussen Stichting IJkdijk, beheerders, kennisinstellingen en bedrijfsleven

Eindredactie: dr. ir. A.R. Koelewijn, Deltares
dr. N. Pals, TNO
ing. M.J. Sas, STOWA
ing. W.S. Zomer M.Sc., Stichting IJkdijk

Vormgeving: mariëtte jongen vormgeving

Foto omslag: Pieter Meulenhoff

Rapportnummer: 2010-26 PIW

© Stichting IJkdijk

ISBN: 978.90.5773.485.4

IJkdijk Pipingexperiment

Validatie van sensor- en meettechnologie
voor detectie van optreden van piping in waterkeringen

Resultaten Pipingexperiment 2009

Eindredactie

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

dr. N. Pals *TNO*

ing. M.J. Sas *STOWA*

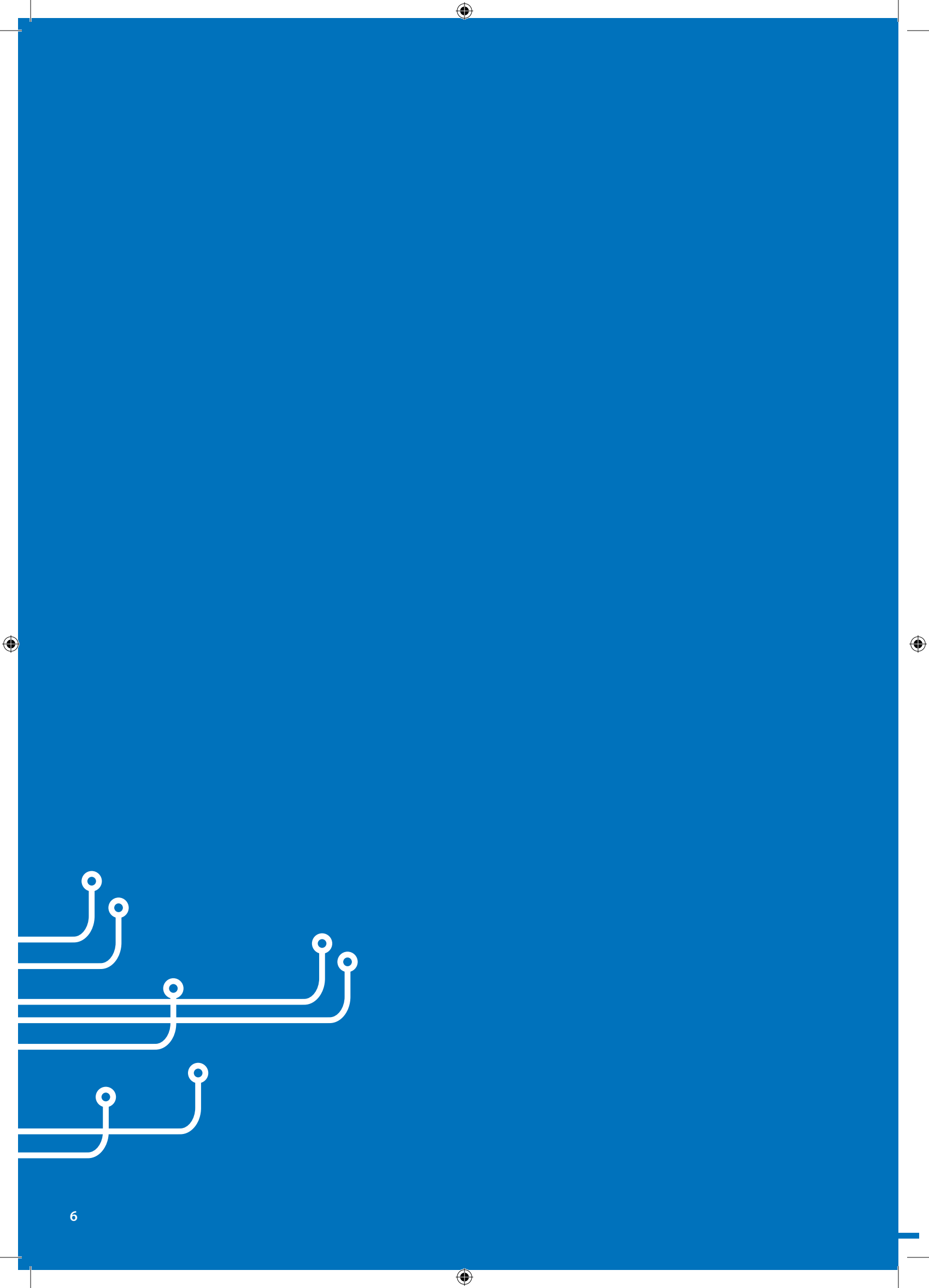
ing. W.S. Zomer M.Sc. *Stichting IJkdijk*

juli 2010

Inhoudsopgave

Voorwoord	7
Samenvatting	9
Summary	11
1 Inleiding	15
1.1 Doelstelling	15
1.2 Afbakening en uitgangspunten	15
1.3 Leeswijzer	16
2 Beoordelingskader	17
2.1 Inleiding	17
2.2 Waarom meten?	17
2.3 Wat meten?	17
2.4 Waar meten?	17
2.5 Wanneer meten?	18
2.6 In welke mate meten?	18
2.7 Beoordelingskader	18
2.8 Verdere overwegingen	19
3 Het Pipingexperiment	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Ontwerp van de pipingfaciliteit	24
3.3 Bouw van de pipingfaciliteit	26
3.4 Opzet van de monitoring	29
3.5 ICT	30
3.6 Afstemming met de beheerpraktijk	39
4 Uitvoering van het experiment	41
4.1 Geplande uitvoering	41
4.2 Daadwerkelijke uitvoering	41
5 Resultaten van de deelexperimenten	49
5.1 Deelexperiment Alert Solutions: GeoBeads Sensornetwerk	49
5.2 Deelexperiment DikeSurvey	66
5.3 Deelexperiment Fugro SP Monitoring	77
5.4 Deelexperiment GTC Kappelmeyer Vezeloptisch lekdetectie systeem	82
5.5 Deelexperiment InTech Dike Security Systems	92
5.6 Deelexperiment ITC Enschede	99
5.7 Deelexperiment Luisterbuis (Volker Wessels Telecom/Landustrie/TNO)	108
5.8 Deelexperiment TenCate Geosynthetics / Inventec: GeoDetect® systeem en optische glasfibers	129
5.9 2M Sensors	153
5.10 Referentiemonitoring Deltares	161

6	Conclusies en discussie	165
6.1	Conclusies met betrekking tot het pipingproces	165
6.2	Conclusies met betrekking tot de dataverwerking	165
6.3	Conclusies uit de deelexperimenten	166
6.4	Conclusies met betrekking tot de meetsystemen	167
6.5	Een monitoringssysteem voor het faalmechanisme piping	168
7	Toekomstblik	169
	Dankbetuiging	171



Voorwoord

In 2009 is door Stichting IJkdijk en Rijkswaterstaat Waterdienst een gecombineerd project uitgevoerd op de IJkdijklocatie. In het project werd in het kader van het programma Sterkte & Belastingen Waterkeringen kennis over het faalmechanisme piping ontwikkeld en testte Stichting IJkdijk en 9 bedrijven of consortia van bedrijven de toepasbaarheid van sensortechnologie voor ditzelfde faalmechanisme.

Op de foto is te zien dat deze dijken conform plan bezweken zijn. Een unieke gebeurtenis omdat dit het bewijs was dat ook het mechanisme piping voor de Nederlandse situatie kan leiden tot dijkbezwijking. In alle stadia hebben de monitoringstechnieken het pipingproces kunnen volgen en in één geval zelfs tot halt kunnen roepen.



De conclusies en aanbevelingen uit het sensortechnologie-onderdeel van het piping project zijn in dit eindrapport te vinden. De behaalde resultaten bieden voor beheerders instrumenten om pipinggevoelige dijken extra goed te kunnen monitoren en mogelijk zelfs te conditioneren.

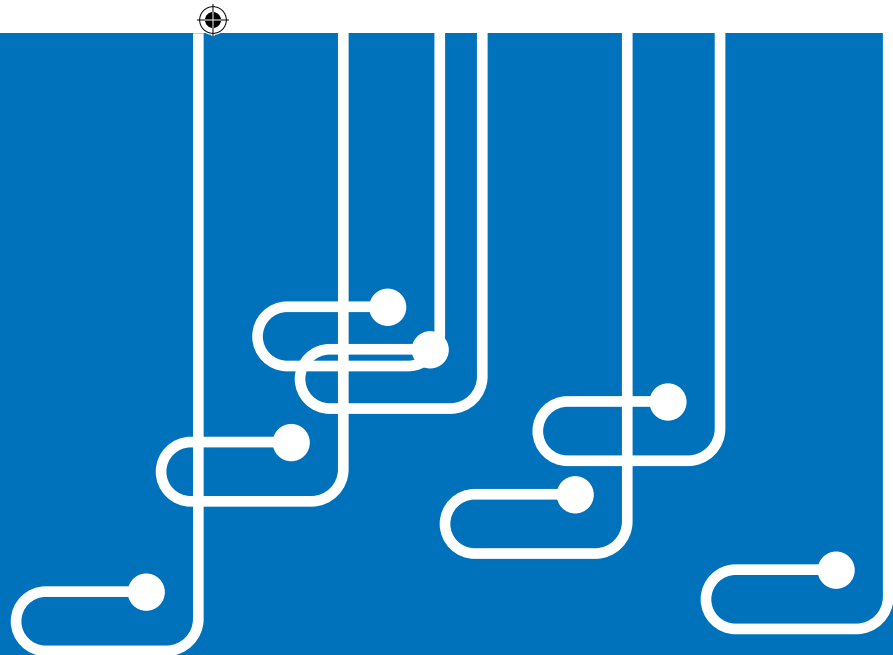
Zoals ook in het eindrapport van het Macrostabiliteitsexperiment is aangegeven, is dit validatie-experiment de volgende stap in de ontwikkeling van algemeen toepasbare monitoringssystemen voor waterkeringen. In nu gestarte- en de nog te starten LiveDijk-projecten (in beheer zijnde dijken die een waterkerende functie hebben en worden gemonitord) wordt de in dit experiment ontwikkelde kennis in de beheerpraktijk toegepast. Om uiteindelijk te komen tot een succesvolle ontwikkeling blijft intensieve samenwerking tussen kennisinstituten, overheden en bedrijfsleven van groot belang. Dat dit tot succes leidt, bewijst ook het Pipingexperiment.

Namens Stichting IJkdijk wens ik u veel succes met het in uw beheerpraktijk brengen van de in dit experiment behaalde resultaten.

ir. H. van 't Land *Voorzitter Stichting IJkdijk*

Stichting

IJkdijk



Samenvatting

De doelstelling van Stichting IJkdijk is het ontwikkelen van bouwstenen voor realtime monitoring systemen die algemeen toepasbaar zijn voor waterkeringen en inzicht geven in de actuele en verwachte sterkte van waterkeringen en ontwikkelingen hierin. Hiervoor is de realisatie van een aantal stappen noodzakelijk:

1. Het valideren van de toepasbaarheid van sensortechnologie (in situ en remote sensing) voor waterkeringen
2. Het op basis van gevalideerde technologie ontwikkelen van modellen die inzicht geven in de actuele sterkte van waterkeringen en voorspellingen doen over de ontwikkeling van de sterkte en het in de beheerpraktijk brengen van de gevalideerde sensortechnologie (LiveDijk, LiveDijk XL).
3. Het bundelen van de gegevens, verkregen uit digitaal gemonitoorde dijken in een Dijk Data Service Centrum. Dit is een digitaal centrum waarin gegevens over het gedrag van dijken ter beschikking staan voor trendanalyses, benchmarks, voorspellingen, etc.

In 2009 is door de Stichting IJkdijk het tweede grootschalige experiment, het Pipingexperiment, uitgevoerd. Na een succesvol experiment in 2008 waarin monitoringssystemen werden getest voor detectie van het faalmechanisme macro-instabiliteit, was in dit experiment het faalmechanisme piping (zandmeevoerende wellen) onderwerp van onderzoek. Met dit tweede validatie-experiment is de realisatie van de doelstellingen van Stichting IJkdijk verstevigd. Stichting IJkdijk en Rijkswaterstaat Waterdienst werkten samen in de uitvoering van het Pipingexperiment waarbij Rijkswaterstaat zich heeft gericht op kennisontwikkeling van het faalmechanisme piping in het kader van het programma Sterkte en Belastingen Waterkeringen. Voor Stichting IJkdijk lag het accent op de validatie van de geïnstalleerde sensortechnologie.

Het doel van het Pipingexperiment van Stichting IJkdijk is na te gaan of gebruik van meet- en sensortechnieken een aanvulling vormt op de reguliere visuele inspectie voor het tijdig detecteren van het optreden van het mechanisme piping rond waterkeringen. Hierbij is als doel gesteld om op een zodanige termijn het mechanisme te detecteren opdat ingrijpen nog mogelijk is.

Het aanleggen, belasten en laten bezwijken van vier pipingdijken gaf aan de betrokken partijen de gelegenheid diverse soorten meetapparatuur uit te testen. De betrokken partijen hebben ieder specifieke, bedrijfsrelevante experimenten opgezet, waarbij zij in de pipingdijken de gelegenheid hebben gekregen om hun deelexperimenten uit te voeren. Stichting IJkdijk heeft zich hierin gericht op het overkoepelende doel: de ontwikkeling van een algemeen toepasbaar monitoringstelsel voor waterkeringen dat toepasbaar is in de beheerpraktijk.

In het Pipingexperiment zijn verschillende soorten meettechnieken toegepast. Op hoofdlijnen richtten deze meettechnieken zich op de volgende parametergroepen: waterspanning, temperatuur, trilling en beweging, stromingspotentiaal en capaciteit.

De algemene conclusie uit de deelexperimenten is dat met de meeste meetsystemen het pipingproces goed kan worden gevolgd. Op basis van meerdere waterspanningsmeters met in dwarsrichting op de dijk bekende onderlinge afstanden het pipingproces kan worden getraceerd vanaf het ontstaan van de eerste zandmeevoerende wel. Met behulp van het open shell system for managing forecasting Delft-FEWS kunnen de waterspanningsmetingen realtime worden geanalyseerd en kan de voortgang van het proces worden voorspeld. Met de mogelijkheid om op basis van de waterspanningsmetingen ook de pipe-lengte uit te rekenen kan worden geanalyseerd hoe ver het proces inmiddels is gevorderd. Alle waterspanningsmetingen die gedaan zijn, zijn onderling goed vergelijkbaar en geven over het algemeen vergelijkbare resultaten.

De temperatuurmetingen die gedaan zijn door diverse partners geven een beeld te zien dat vergelijkbaar is met dat van de waterspanningsmeters. Ook met deze systemen kan het ontstaan van zandmeevoerende wellen worden gedetecteerd en gevolgd. Het werken met infrarood camera's heeft bewezen dat in een vroeg stadium met remote sensing technieken het pipingproces kan worden gemonitord.

Stichting

IJkdijk

Trillingen in het laagfrequente spectrum (1 – 10Hz) lijken gecorreleerd te zijn met het pipingproces. Ook zijn er bewegingen gemeten die kunnen wijzen op het ontstaan en groeien van pipes. Beide zaken worden op dit moment nog verder geanalyseerd. Metingen in het hogere spectrum leverde geen duidelijke resultaten op.

De metingen aan stromingspotentialen (self potentials) geven duidelijke indicaties dat er 4 tot 8 uur voor de doorbraak significante afwijkingen aan het spontane elektrische veld ontstaan. Dit wordt waargenomen door elektrodes die zich binnen een afstand van tien meter van de zwakke plek bevinden. Intreepunten van de pipes kunnen op deze wijze worden gedetecteerd.

De resultaten van de pipingexperimenten vormen de basis voor een monitoringssysteem voor dit bezwijkmechanisme. Het pipingproces kan goed worden gevolgd met de geteste technieken. De indicaties dat er piping optreedt variëren bij deze experimenten van 5 dagen tot 4 uur voor de doorbraak, hetgeen mede afhankelijk is van de gebruikte meettechniek en het type ondergrond. Voor sommige meettechnieken wordt verwacht dat verbeterde verwerkingstechnieken en rekenmodellen het moment waarop een onderbouwde waarschuwing kan worden gegeven vervroegd kan worden, tot aan het begin van pipe-vorming.

Onder 'ideale' omstandigheden, zoals bij deze experimenten, zal het begin van pipe-vorming onder gelijkblijvend verval onherroepelijk leiden tot een volledig doorgebroken pipe. Wanneer deze pipes niet instorten zal dit erosieproces vervolgens leiden tot het falen van de dijk. Onder normale omstandigheden kan het erosieproces echter stoppen door veranderingen in waterstanden (binnendijs of buitendijs) of door een verhoogde weerstand tegen erosie doordat in de groeiende pipe ander dijksmateriaal wordt bereikt. Ook (nood)maatregelen gericht op onderbreking of verlenging van het (potentiële) erosiekanaal kunnen worden toegepast. In deze draait het vooral om het tijdig detecteren van pipes zodat maatregelen kunnen worden genomen en er geen kans is op doorbrekende pipes.

De ontwikkeling van systemen die de actuele sterkte kunnen bepalen samen met voorspellende modellen vindt in de komende jaren plaats. Hierbij wordt nauwe samenwerking nagestreefd met beheerders, het innovatieprogramma Flood Control 2015, het EU 7e kaderprogramma Urban Flood en het Europees samenwerkingsprogramma FLIWAS, bedrijfsleven en kennisinstellingen. Tevens wordt hierbij aansluiting gerealiseerd bij ontwikkelingen in en bij het vigerend beleid zoals onder andere de commissie Veerman/Deltacommissie en het Nationaal Waterplan. Pilotprojecten waarbij sensorsystemen in de beheerpraktijk van waterbeheerders worden toegepast zullen een belangrijke rol innemen in de voorgestane ontwikkeling. De eerste stappen hierin zijn al gezet door het Hoogheemraadschap van Delfland bij de Vlaardingse kade en Waterschap Noorderzijlvest in de LiveDijk Eemshaven.

Met het tweede validatie-experiment voor het mechanisme piping en de implementatie van sensortechnologie bij verschillende waterschappen, wordt aangetoond dat de technische mogelijkheden en belangstelling vanuit de sector groot zijn. Het doel om (bouwstenen voor) algemeen toepasbare monitoringssystemen voor waterkeringen te ontwikkelen komt hiermee wederom belangrijke stappen dichterbij. Er zullen echter voor andere faalmechanismen nog een aantal validatie-experimenten moeten worden uitgevoerd, waaronder overslag/overloop en zettingsvloeiing.

Dijkmonitoring in de praktijk zal in de toekomst vrijwel zeker bestaan uit een combinatie van methoden. Het ligt voor de hand om daarbij een getrapte benadering te kiezen door met behulp van remote sensing technieken (satelliet, airborne of terrestial) in te zoomen op verdachte plekken en daar, naast visuele inspectie, werken met ondersteunende in situ sensoren (in de dijk).

Een monitoringssysteem dat voor waterkeringen geschikt is, dient over een langere periode gegevens te verzamelen om het "normale" gedrag van waterkeringen te leren kennen. Indien het gedrag bij belasting van de kering afwijkt, kan samen met gegevens over bijvoorbeeld waterstanden, weersvoorspelling, verwachte golfbelasting, etc. een voorspelling worden gemaakt van de ontwikkeling van de actuele sterkte. Hiermee kan de beheerder voor waterkeringen waarvoor deze informatie noodzakelijk is, op tijd maatregelen treffen indien de prognoses hiertoe aanleiding geven. Dit leidt tot optimalisatie van beheer en onderhoud, efficiëntere en effectievere inzet van middelen en een vergroting van de veiligheid in (bijna) calamiteuze situaties.

Summary

The aim of the IJkdijk Foundation is to develop building blocks for a generally applicable real-time monitoring system for water-retaining structures that gives insight into the current strength of, and development in, these structures. To achieve this aim, a number of steps will be required:

1. The applicability of sensor technology (in situ and remote sensing) in dikes will need to be validated.
2. Models will have to be developed on the basis of validated technology. They will need to provide a picture of the current strength of dikes and make predictions about how that strength will develop. Validated sensor technology will also have to be introduced to management practice (LiveDijk, LiveDijk XL).
3. The grouping of the data obtained from digitally monitored dikes in a Dike Data Service Centre. This is a digital centre that provides access to data about dike behaviour for the purposes of trend analysis, benchmarking, prognoses, etc.

The IJkdijk Foundation conducted the second large-scale experiment, the Piping experiment, in 2009. A first successful experiment took place in 2008, testing monitoring systems for the detection of the failure mechanism of macro-instability. The latest experiment looked at the failure mechanism of piping (in which water seeping under the dike erodes small channels that undermine the dike). This second validation experiment was another step forward in the achievement of the goals of the IJkdijk Foundation. The IJkdijk Foundation and the Rijkswaterstaat Centre for Water Management collaborated on the implementation of the Piping experiment. Rijkswaterstaat focused on developing knowledge about the failure mechanism of piping as part of the “Water Defences: Strength and Loads” (SBW) programme. For the IJkdijk Foundation, the emphasis was on validating the installed sensor technology.

The aim of the IJkdijk Foundation’s Piping experiment was to determine whether measurement and sensor technology is a useful addition to standard visual inspection for the timely detection of piping in dikes. The stated aim in this respect was to detect the mechanism early enough for intervention to be possible.

The construction, loading and controlled collapse of four piping dikes gave the parties involved the opportunity to test different types of measurement equipment. The parties each designed specific experiments relevant to the individual organisation, and they were given the opportunity to conduct their sub-experiments in the piping dikes. The IJkdijk Foundation focused on the overall objective: the development of a generally applicable monitoring system for dikes that can be used in management practice.

the Piping experiment used different types of measurement techniques. In broad terms, these measurement techniques addressed the following groups of parameters: water pressure, temperature, vibration and movement, self potential and capacity.

The general conclusion from the sub-experiments was that it is possible to monitor the piping process well with most measurement systems. On the basis of several water-pressure meters positioned at known intervals in a transverse direction, it is possible to trace the piping process from the point at which the first pipe is created. With the open shell system for managing forecasting Delft-FEWS, the water-pressure measurements can be analysed in real time and it is possible to predict how the process will continue. With the option of calculating the length of the pipes on the basis of the water-pressure measurements, it is also possible to determine how far the process has advanced. All the water-pressure measurements that were carried out can be compared and, in general, they produce similar results.

The temperature measurements conducted by various partners establish a picture that is comparable to that generated by the water-pressure meters. With these systems also, it is possible to detect and follow the creation of the pipes. Working with infra-red cameras has proved that it is possible to monitor the piping process at an early stage using remote-sensing technology.

Stichting

IJkdijk

Vibrations in the low-frequency spectrum (1–10Hz) seem to be correlated to the piping process. Measurements have also been made that may indicate the creation and growth of pipes. Both these issues are being analysed further at present. Measurements in the higher spectrum have not generated any clear results.

Measurements of self potentials generate clear indications that, between four and eight hours before failure, there are significant discrepancies in the spontaneous electric field. This was observed using electrodes within 10 metres from the weak point.

The results of the piping experiments constitute the basis for a monitoring system for this failure mechanism. The piping process can be monitored well using the techniques tested. Indications of piping vary in these experiments from five days to four hours before the failure, with this variation depending in part on the measurement technology used and the characteristics of the soil on which the dike rests. In the case of some measurement techniques, it is expected that improved processing techniques and computer models can make it possible to issue well-founded warnings earlier in the process, and even when pipe formation begins.

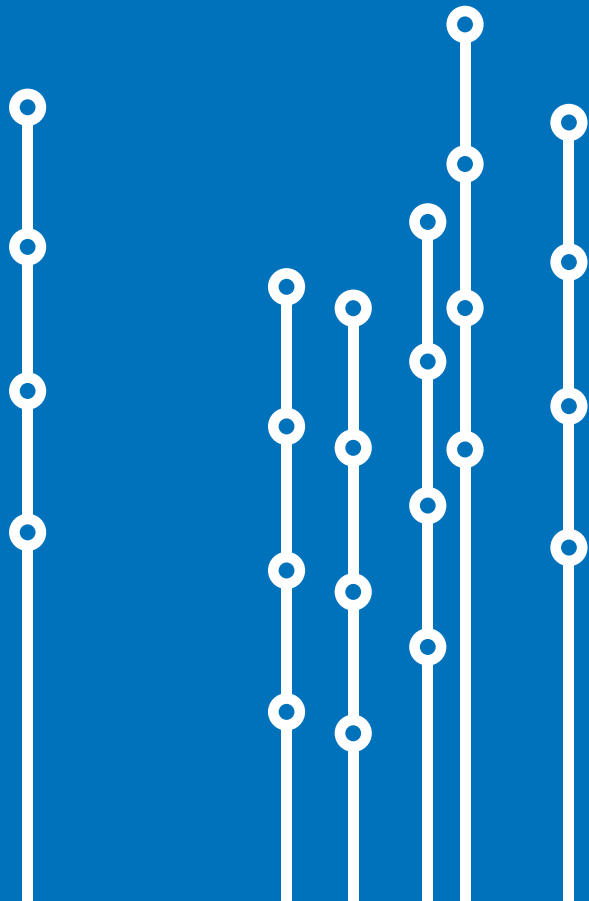
In “ideal” conditions (as in these experiments), the initiation of pipe formation will, if the difference in water level remains constant, inevitably lead to a pipe that breaks through completely. If the pipes do not collapse and stop developing, the failure of the dike will result. In normal conditions, however, the process of erosion may stop as a result of changes in water levels or as a result of increased resistance to erosion when a growing pipe comes up against a different type of material. Measures can also be taken to interrupt or extend the pipe. Here, the main focus is on the timely detection of pipes so that steps can be taken to eliminate the possibility of pipes breaking through.

Systems that can determine current strength in combination with predictive models will be developed in the years to come. The aim here will be to work together closely with water authorities, the innovation programme Flood Control 2015, the EU 7th Urban Flood Framework Programme and the European partnership FLIWAS, the corporate sector and knowledge institutions. Another aim here will be to link up to developments in, and associated with, the prevailing policy such as the conclusions of the Veerman Committee/Delta Commission and the Dutch National Water Plan. Pilot projects introducing sensor systems to the management practice of water authorities will play an important role in the proposed developments. The first steps in this direction have already been taken by the Hoogheemraadschap van Delfland in the Vlaardingse kade and the Noorderzijlvest Water Authority in the Eemshaven LiveDijk.

This validation experiment looking at piping and the implementation of sensor technology by various water authorities has shown that the technical potential and interest from the sector are considerable. The aim of developing building blocks for generally applicable monitoring systems for dikes has therefore, once again, moved several steps closer. However, a number of other validation experiments will have to be conducted for other failure mechanisms, including overtopping/overflowing and liquefaction.

Dike monitoring in practice will, in the future, almost certainly combine a range of methods. An obvious step is to opt for a phased approach by deploying remote sensing technology (satellites, airborne or terrestrial) to zoom in on suspect locations and to work with auxiliary sensors in the dike to supplement visual inspection.

A monitoring system suitable for dikes should collect data over a longer period of time in order to learn how dikes behave “normally”. If dike behaviour varies, it will be possible, in conjunction with data relating to, for example, water levels, weather predictions, predicted wave impacts etc., to predict how the current dike strength will develop. Water authorities will therefore be able to intervene in good time if the prognoses require them to do so. This will lead to the optimisation of management and maintenance, enhance the efficiency and effectiveness of the deployment of resources, and improve safety when there are calamities or near-calamities.



0,181

mNAP

0,217

0,235

0,199

235

0,217

0,181

mNAP

0,235

217

0,217

0,199

199

0,199

0,181

mNAP

181

mNAP

0,181

mNAP

1 Inleiding

Dit document bevat een beschrijving van de pipingexperimenten die in het kader van de IJkdijk zijn uitgevoerd in het najaar van 2009, met de nadruk op de metingen die zijn uitgevoerd door de deelnemende partijen in samenwerking met de Stichting IJkdijk (TNO, Deltares, NOM, STOWA en IDL) en Rijkswaterstaat Waterdienst. Stichting IJkdijk en Rijkswaterstaat Waterdienst werkten samen in de uitvoering van het Pipingexperiment waarbij Rijkswaterstaat zich heeft gericht op kennisontwikkeling van het faalmechanisme piping in het kader van het programma Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW). Voor Stichting IJkdijk lag het accent juist op de validatie van de gehanteerde meetsystemen. In totaal zijn vier experimenten uitgevoerd. In experiment 1 en 4 lag de nadruk op de doelen van Stichting IJkdijk, in experiment 2 en 3 op die van Rijkswaterstaat Waterdienst.

In dit hoofdstuk worden kort het doel van het Pipingexperiment en het faalmechanisme toegelicht.

1.1 Doelstelling

De doelstelling van Stichting IJkdijk is het ontwikkelen van bouwstenen voor realtime monitoring systemen dat algemeen toepasbaar is voor waterkeringen en inzicht geeft in de actuele sterkte van waterkeringen en ontwikkelingen hierin. Hiervoor zijn de realisatie van een aantal stappen noodzakelijk:

- 1 Het valideren van de toepasbaarheid van sensortechnologie (in situ en remote sensing) voor waterkeringen
- 2 Het op basis van gevalideerde technologie ontwikkelen van modellen die inzicht geven in de actuele sterkte van waterkeringen en voorspellingen doen over de ontwikkeling van de sterkte en het in de beheerpraktijk brengen van de gevalideerde sensortechnologie (LiveDijk, LiveDijk XL).
- 3 Het bundelen van de gegevens, verkregen uit digitaal gemonitoorde dijken in een Dijk Data Service Centrum. Dit is een digitaal centrum waarin gegevens over het gedrag van dijken ter beschikking staan voor trendanalyses, benchmarks, voorspellingen, etc.

In dit rapport worden de resultaten van het tweede grootschalige sensorvalidatie-experiment toegelicht; de resultaten van het Pipingexperiment. De eerste stap die hiervoor door Stichting IJkdijk en partners is gezet is de realisatie van het Macrostabiliteitsexperiment; een experiment gericht op de validatie van sensortechnologie rond het mechanisme macro(in)stabiliteit.

Het doel van het Pipingexperiment van Stichting IJkdijk is na te gaan of gebruik van meet- en sensortechnieken een aanvulling vormt op de reguliere visuele inspectie voor het tijdig detecteren van het optreden van het mechanisme piping rond waterkeringen. Hierbij is als doel gesteld om op een zo kort mogelijke termijn het mechanisme te detecteren zodat ingrijpen mogelijk wordt gemaakt.

Het aanleggen, belasten en laten bezwijken van de pipingdijken gaf aan de betrokken partijen de gelegenheid diverse soorten meetapparatuur uit te testen. De betrokken partijen hebben ieder specifieke, bedrijfsrelevante experimenten opgezet, waarbij zij in de pipingdijken de gelegenheid hebben gekregen om de experimenten uit te voeren. Stichting IJkdijk heeft zich hierin gericht op het overkoepelende doel: de ontwikkeling van bouwstenen waarmee algemeen toepasbare monitoringssystemen voor waterkeringen kunnen worden ontwikkeld.

1.2 Afbakening en uitgangspunten

De primaire afbakening van dit project binnen de IJkdijk is het faalmechanisme piping. Daarnaast is het Pipingexperiment duidelijk begrensd in de tijd door de planning van het experiment en is de doelstellingen die het project Sterkte & Belastingen Waterkeringen van Rijkswaterstaat Waterdienst met zich meebracht. In de speciaal voor dit experiment gecreëerde proefvakken zijn 4 proefdijken gebouwd. De deelnemers die gebruik maakten van deze pipingdijken richtten zich op toepassing van de sensoren voor het waterkeringbeheer. Met de resultaten, zo is het beoogde doel, kunnen beheerders het mechanisme piping beter waarnemen, onderscheiden, monitoren en eventueel zelfs stoppen.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport geeft de opzet en uitvoering van het Pipingexperiment weer en presenteert daarnaast de resultaten en conclusies van het experiment. In hoofdstuk 2 wordt beschreven welk beoordelingskader is gevolgd voor de verschillende stappen van de ontwikkeling van een monitoringssysteem voor piping in waterkeringen. Hoofdstuk 3 beschrijft de opzet van het experiment en hoofdstuk 4 geeft informatie over de uitvoering van de vier pipingexperimenten. In hoofdstuk 5 zijn de verschillende deelrapportages van de deelnemende bedrijven en consortia weergegeven. In de deelrapportages wordt de meettechniek van het bedrijf of consortium gepresenteerd en laten de bedrijven daarna zien welke meetgegevens zij hebben ingewonnen tijdens de experimenten. Iedere deelrapportage eindigt met de conclusie van het betreffende bedrijf of consortium over de betekenis van de resultaten uit het experiment voor de ontwikkeling van een monitoringssysteem voor piping in waterkeringen. In hoofdstuk 6 presenteert Stichting IJkdijk haar conclusies over het verloop van het experiment en de resultaten die met de verschillende meettechnieken zijn geboekt. Vervolgens wordt in hoofdstuk 7 een korte blik op de toekomst geworpen. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar de toekomstige ontwikkeling van monitoringssystemen en toepassing van monitoringssystemen in waterkeringen.

2 Beoordelingskader

2.1 Inleiding

Voor de beoordeling van de bij de IJkdijk toegepaste en uitgeteste meettechnieken is het kiezen van het juiste uitgangspunt van groot belang. Vanzelfsprekend zijn hier meerdere mogelijkheden voor, afhankelijk van het nagestreefde doel en de betrokken stakeholder(s). Voor deze rapportage is als uitgangspunt gekozen: *'de relevantie voor een Nederlandse dijkbeheerder (Rijkswaterstaat, Waterschap of Hoogheemraadschap)'*.

Andere uitgangspunten waarbij meer aandacht wordt geschonken aan bijvoorbeeld exportmogelijkheden, bedrijfs-economische aspecten of instrumenttechnische onderdelen leiden ten dele tot andere vragen, die buiten het hier gekozen kader vallen. De nagestreefde projectresultaten bieden het de participerende bedrijven echter wel handvatten om hier een analyse naar uit te voeren.

Voor het hier geschetste kader is gebruik gemaakt van de 'HerMes monitoringsfilosofie', die rond het jaar 2000 in enkele proefprojecten ontwikkeld is door GeoDelft en TNO Bouw en sindsdien met succes is toegepast. In deze monitoringsfilosofie staat de beantwoording centraal van de vragen *waarom, wat, waar en wanneer* meten. Voor dit beoordelingskader is een aangepaste versie van de HerMes monitoringsfilosofie gemaakt omdat het in het geval van dit experiment gaat om een beoordeling van reeds ingewonnen metingen op de toepasbaarheid in toekomstige situaties elders.

In paragraaf 3.6 wordt nader ingegaan op de afstemming met de beheerpraktijk, dat plaatsvond in nauwe samenwerking met de Klankbordgroep Dijkinspecties van de STOWA.

2.2 Waarom meten?

Meten is geen doel op zich. Het vormt een onderdeel van monitoren, in dit verband gedefinieerd als het herhaald uitvoeren van metingen aan of bij een waterkering om beslissingen te kunnen nemen. Die beslissingen kunnen betrekking hebben op onderhoud, versterking of (re-)constructie van de waterkering zelf, maar ook op het achterland, bijvoorbeeld in het geval van een evacuatie wanneer er niet meer op de waterkerende functie vertrouwd wordt.

Belangrijk voor het beoordelen van meetresultaten is dat er een beeld bestaat van het "normale" gedrag van een dijk. Bij welke gemeten parameters is er dreigend gevaar en wanneer is er niets aan de hand? Het beantwoorden van deze vraag wordt vaak op rekenmodelresultaten gebaseerd, bijvoorbeeld afkomstig uit de periodieke toetsing van de waterkering. Daarom is de koppeling van sensorgegevens met rekenmodellen van belang.

Ieder instrument dat in reguliere monitoring wordt ingezet zal moeten bijdragen aan het beantwoorden van tenminste één monitoringsvraag. Als de meting geen vraag kan beantwoorden, dan is deze zinloos. Als echter één instrument vele vragen moet beantwoorden, dan is het twijfelachtig of de meetdata voldoende uiteengesplitst kan worden om de afzonderlijke vragen te beantwoorden en zal de inzet van aanvullende instrumentatie veelal noodzakelijk zijn.

2.3 Wat meten?

Metingen moeten uiteindelijk kennis opleveren over maatgevende faalmechanismen en aspecten die voor het beheer en onderhoud relevant zijn. Overigens kan kennis over maatgevende faalmechanismen ook verkregen worden wanneer het falen van een dijk helemaal niet aan de orde is. Zo kunnen metingen van de fluctuaties in de grondwaterstand gedurende langere periode, onder gebruikelijke omstandigheden in veel gevallen zinvolle informatie geven over de grondwaterstand waar bij maatgevende omstandigheden veiligheidshalve vanuit moet worden gegaan. Hierdoor kan er bij de toetsing op veiligheid een scherpere onzekerheidsmarge worden aangehouden. Dit is soms sterk van invloed op het berekende veiligheidsniveau. Het leidt in elk geval tot een meer betrouwbare inschatting van de werkelijke veiligheid van de waterkering.

2.4 Waar meten?

De vraag 'waar te meten?' betreft de ruimtelijke spreiding van de metingen, zowel qua onderlinge afstand van bijvoorbeeld meetraaien als de relatieve positionering ten opzichte van de dijk (op, voor, achter, in of onder de dijk).

Ook hiervoor geldt dat het loont om instrumenten niet uit automatisme op 'de geijkte posities' te plaatsen, maar rekening te houden met de plaatselijke omstandigheden zoals: zandbanen in de ondergrond, hoog voorland, de te verwachten faalmechanismen, of een wiel ter plaatse van een voormalige dijkdoorbraak.

2.5 Wanneer meten?

Met welke frequentie wordt er gemeten, wanneer worden de metingen gestart en beëindigd en in hoeverre is dit afhankelijk van de situatie en/of de meetwaarden? Zo kan bijvoorbeeld de meetfrequentie worden verhoogd wanneer een bepaalde waarde wordt overschreden. Ook kan een instrument voorbij een bepaalde meetwaarde effectief uitvallen (denk bijvoorbeeld aan een peilmeter die droogvalt). Het kritisch beantwoorden van deze vragen voor elk instrument kan zo leiden tot aanpassing, en daarmee verbetering, van het monitorings- en instrumentatieplan van de beheerder, in dit geval voor het faalmechanisme piping.

2.6 In welke mate meten?

Tenslotte is er de vraag in welke mate gemeten moet worden. Door dezelfde instrumenten dubbel of nog vaker toe te passen kunnen de gevolgen van het uitvallen van individuele instrumenten op cruciaal geachte locaties beperkt worden. Het is ook mogelijk om dezelfde grootheid of eenzelfde verschijnsel met verschillende methoden te meten, bijvoorbeeld het ontstaan van kleine kanaaltjes onder een kleidijk ten gevolge van piping, dat zowel met waterspanningsmeters als met glasvezel (temperatuurmetingen) gedetecteerd kan worden. Toepassen van redundantie vergroot de betrouwbaarheid.

2.7 Beoordelingskader

De hiervoor geschetste systematiek is ten dele voorafgaand aan de experimenten toegepast. Nu de experimenten op de IJKdijk achter de rug zijn kunnen alsnog voor elk instrument de volgende vragen beantwoord worden:

- Waarom is het ingezet?
- Wat had gemeten moeten worden?
 - Is dat ook gemeten?
 - Waarvoor is die meting relevant?
 - In hoeverre worden de meetwaarden ondersteund dan wel bevestigd door andere meetdata of waarnemingen? Hoe zijn de afwijkingen te verklaren?
- Waar is het instrument ingezet?
 - In hoeverre is hiermee een volledig beeld verkregen?
 - Welke dichtheid wordt nagestreefd bij een 'echte dijk' van vergelijkbare omvang en samenstelling?
 - Was dit een goede plaats, of (eventueel met de achteraf beschikbare wijsheid) was een andere locatie beter geweest?
- Wanneer is gemeten?
 - Wanneer is begonnen, wanneer gestopt?
 - Is er een betrouwbare nulmeting?
 - Is er lang genoeg doorgemeten?
 - Met welke frequentie is er gemeten?
 - Was dit voldoende of eigenlijk zelfs teveel?
 - Zijn er mogelijkheden gezien en toegepast om de frequentie aan te passen aan de meetwaarden?
- In welke mate is er gemeten?
 - In hoeverre zijn metingen meervoudig uitgevoerd?
 - Was dat in het licht van potentiële uitval of onnauwkeurigheid van instrumenten terecht?
 - In hoeverre zijn instrumenten ook daadwerkelijk uitgevallen?
 - Wanneer is dat gebeurd?
 - Is daardoor essentiële informatie gemist?
 - Is dezelfde meting met verschillende methoden uitgevoerd?

Met de achteraf beschikbare kennis kan zo worden beoordeeld hoe effectief de instrumentatie van de experimenten is geweest en welke combinaties van instrumenten voldoende zou zijn geweest om tot dezelfde inzichten te komen.

Dit kan op verschillende niveaus: van kwantitatieve detailinformatie over het groeiproces van de diverse kanaaltjes tot een globaal oordeel over onvermijdelijk falen bij onverminderde belasting.

Het voert te ver om dit alles expliciet te rapporteren. De vragen vormen echter een belangrijk kader voor het rapport.

2.8 Verdere overwegingen

Voor effectieve monitoring is het van belang de data tijdig te verwerken, opdat er tijdig relevante beslissingen kunnen worden genomen. Mogelijk valt tijdig in deze te definiëren als *near real time*.

Bij vergelijking van metingen met andere metingen is het zinvol onderscheid te maken tussen de referentiemonitoring en data van derden. Referentiedata is verkregen met instrumenten die zich al eerder bewezen hebben en waarvan de betrouwbaarheid bekend is. Op basis van de referentiedata worden de resultaten van de geteste sensoren gevalideerd.

Een aanvullend aandachtspunt is de wijze van aanbrengen van de instrumenten. De wijze waarop de instrumenten bij de proefdijk zijn aangebracht kan nogal afwijken van de wijze die in een praktijksituatie voorgestaan wordt. Hierbij kan nog onderscheid gemaakt worden tussen een bestaande dijk, een grootschalige dijkversterking en een geheel nieuw te bouwen dijk. Een vraag die hierbij gesteld wordt is in hoeverre de wijze van aanbrengen invloed kan zijn geweest op de metingen?



3 Het Pipingexperiment

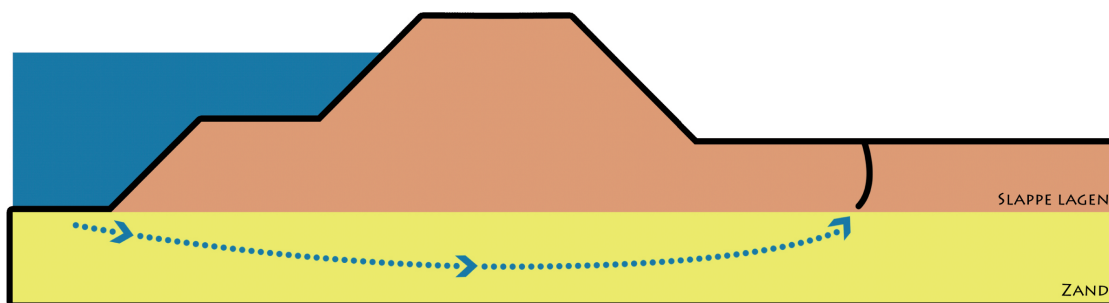
3.1 Inleiding

De aanleiding voor het Pipingexperiment was tweeledig:

- Enerzijds was er vanuit de Stichting IJkdijk en de participerende bedrijven (meestal kortweg aangeduid als 'participanten') de wens om hun sensoren voor het faalmechanisme piping (van belang voor Nederland en internationaal) te valideren;
- Anderzijds was er vanuit het onderzoeksprogramma 'Sterkte & Belastingen Waterkeringen' (SBW) van de Waterdienst van Rijkswaterstaat behoefte aan validatie op grotere schaal, liefst veldschaal, van de uitkomsten van recent laboratoriumonderzoek op het gebied van piping, uitgevoerd op kleine schaal (kwelweglengte circa 30 cm), middenschaal (kwelweglengte circa 140 cm) en in de geocentrifuge (kwelweglengte circa 30 cm bij een gravitatieversnelling van 30g en 80g, daardoor overeenkomend met een veldschaal van 10 à 30 meter).

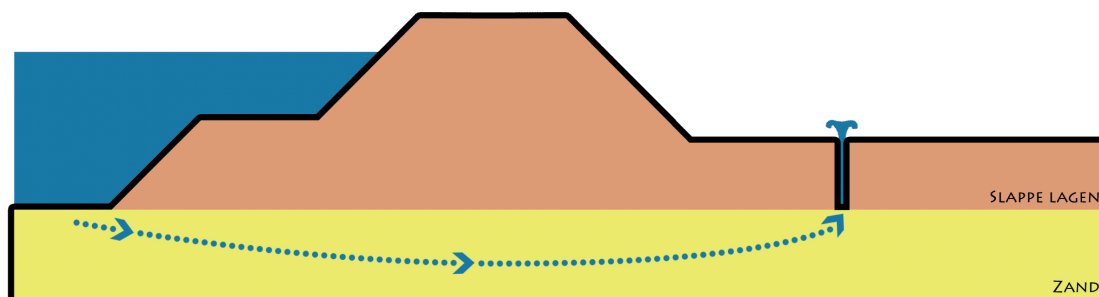
Het pipingmechanisme zoals hier beschouwd is kan in principe alleen optreden indien een cohesieve laag (doorgaans klei of veen, maar het kan ook een constructie zoals een betonnen keermuur zijn) over een zandlaag heen ligt, er sprake is van een significant waterstandsverschil (een groot verval over de kering) en die zandlaag voldoende contact maakt met het bovenstroomse water, zodat er een kwelstroming kan optreden. Het faalmechanisme kan op grond van eerder uitgevoerd onderzoek in het algemeen worden opgedeeld in een zevental fasen:

Fase 1, 'heave' genoemd, is alleen van toepassing wanneer de zandlaag binnendijks afgedekt is door een slappe lagenpakket, wat in de praktijk vaak zo is. Door de kweldruk wordt dit pakket enigszins opgeheven tot er scheuren in ontstaan, of deze scheuren zijn al eerder ontstaan, eventueel door een andere oorzaak, zie Figuur 3.1. Bij de IJkdijkexperimenten is deze fase niet relevant omdat een dergelijke deklaag ontbreekt.



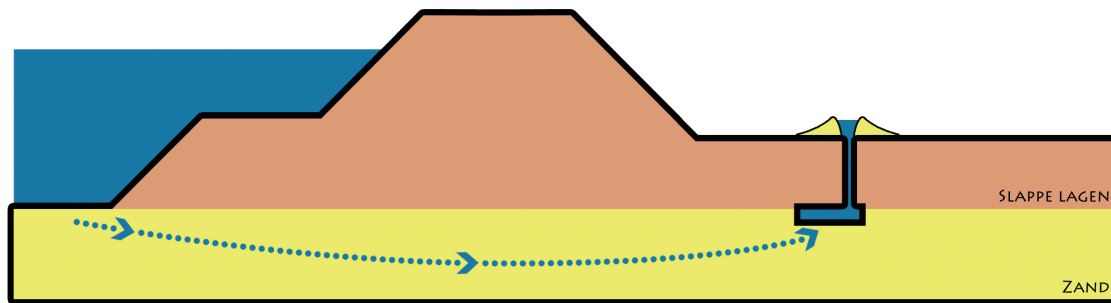
Figuur 3.1 Fase 1 van het pipingproces: heave

In fase 2 is er sprake van een geconcentreerde kwelstroom, waarbij water binnendijks op één punt of langs een smalle strook uit de grond stroomt, zie Figuur 3.2.



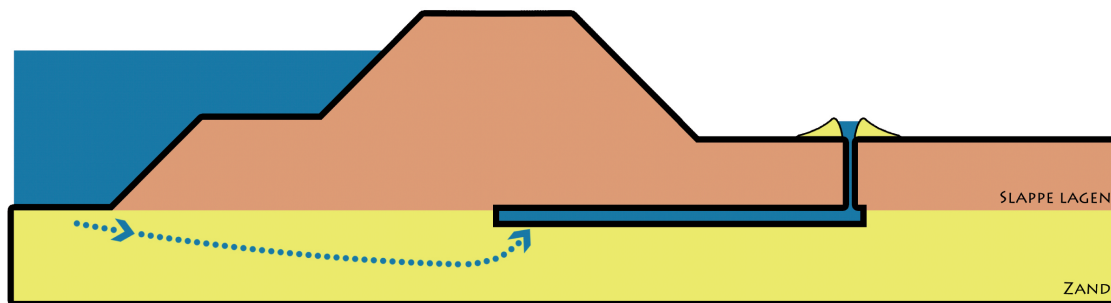
Figuur 3.2 Fase 2 van het pipingproces: kwel

Vervolgens ontstaat er een kanaaltje, in het Engels aangeduid als 'pipe' (vandaar de term 'piping') en wordt er zand afgezet rond de uitstroomopening, zie Figuur 3.3.



Figuur 3.3. Fase 3 van het pipingproces: kanaalvorming

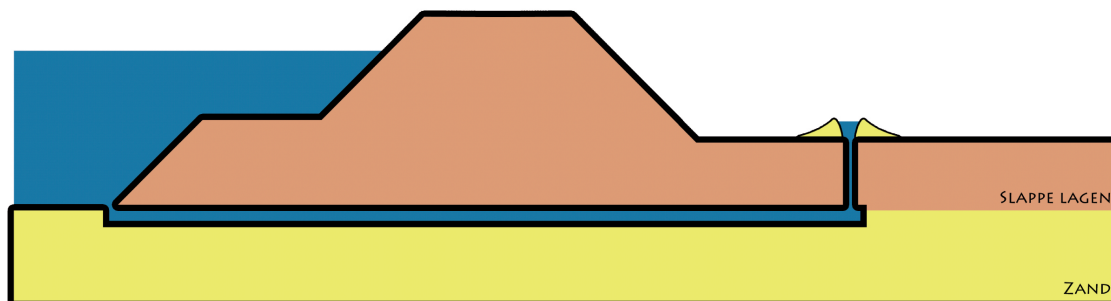
In fase 4 groeit het kanaaltje aan de onderkant van de cohesieve laag verder richting de bovenstroomse zijde, zie Figuur 3.4. Dit proces wordt terugschrijdende erosie genoemd. Het meegevoerde materiaal wordt rond de opening afgezet. Dit kan leiden tot een verhoging van de uitstroombening en daarmee tot een effectieve verkleining van het verval over de kering, waardoor het proces kan stoppen en er alleen nog 'schoon' water uitspoelt, net als eerder in fase 2. Indien er sprake is van een forse kwelstroming kan het overigens moeilijk zijn om vast te stellen of het water inderdaad vrij is van meegevoerde zanddeeltjes of toch nog een lage concentratie zand bevat – waarbij het proces van kanaalgroei dus voortgaat.



Figuur 3.4 Fase 4 van het pipingproces: terugschrijdende erosie

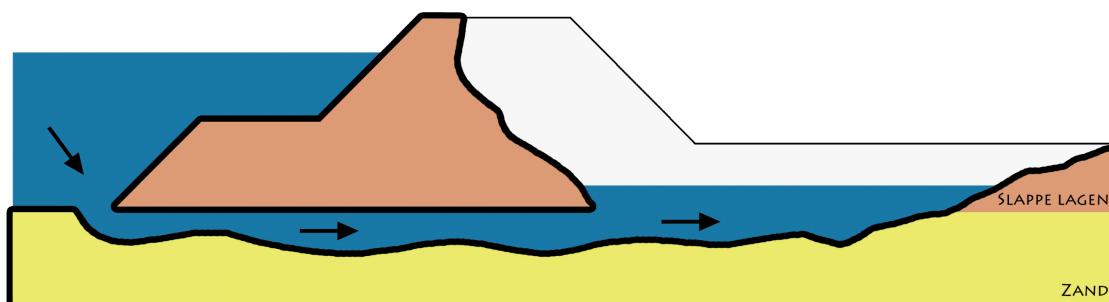
Uit eerder onderzoek is al bekend dat er diverse manieren zijn waarop de kanaaltjes groeien: er kan één kanaaltje zijn dat min of meer recht doorgroeit, maar meestal is er sprake van meerdere kanaaltjes die zich vertakken en waarbij sommige takken een poosje niet groeien en dan plotseling, in vrij korte tijd, weer verder groeien. Ook kan een kanaaltje instorten, hetgeen mede afhankelijk is van het bovenliggende materiaal.

Na verloop van het tijd leidt het proces van terugschrijdende erosie er toe dat de bovenstroomse zijde wordt bereikt. Dan begint de vijfde fase: verruiming van het kanaal, zie Figuur 3.5. Er is dan inmiddels sprake van progressieve erosie: alleen instortingen van het kanaaltje en veranderingen in de randvoorwaarden (zoals verkleining van het verval) kunnen het proces van dijkfalen dan nog stoppen.



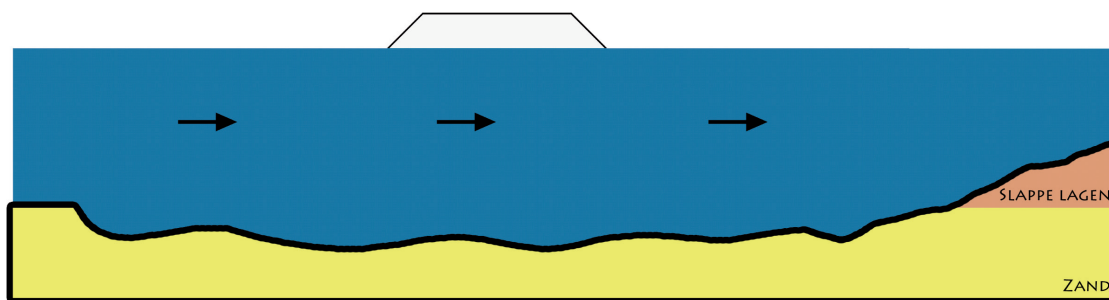
Figuur 3.5 Fase 5 van het pipingproces: verruiming van het kanaal

In fase 6 treedt bezwijken van de waterkering op, bijvoorbeeld door instabiliteit ten gevolge van de erosie in de ondergrond, zie Figuur 3.6.



Figuur 3.6 Fase 6 van het pipingproces: bezwijken van de waterkering

Na het bezwijken van de waterkering resteert fase 7: bresgroei, geïllustreerd in Figuur 3.7. Het proces van bresgroei zal geleidelijk afnemen naarmate het verval kleiner wordt en de bres breder.



Figuur 3.7 Fase 7 van het pipingproces: bresgroei

Aanvankelijk waren zes experimenten gepland, waarvan vier ten behoeve van SBW en twee ten behoeve van de participanten. Vanwege tijdsdruk van de kant van SBW zouden de experimenten voor SBW eerst worden uitgevoerd, met het betrekkelijke voordeel voor de participanten dat de testmonitoring nog aangepast zou kunnen worden op basis van de observaties bij de eerste experimenten.

Om praktische redenen moest het totale aantal experimenten echter beperkt worden tot vier. Mede vanwege de (aangenomen) beperkte mogelijkheden van de referentiemonitoring werd het bovendien noodzakelijk geacht dat de participanten in beperkte mate in de SBW experimenten zouden participeren. Dit werd echter tot een minimum beperkt, vanwege de vrees dat de aanwezigheid van in-situ instrumentatie tot verstoring van het tamelijk delicate pipingproces zou kunnen leiden. Uit de laboratoriumproeven was al naar voren gekomen dat met name tot aan fase 4 kleine onregelmatigheden in de bodemopbouw een merkbare invloed uitoefenen op het proces, met name waar het gaat om het loslaten van losse korrels of groepjes korrels. Bij een gemiddelde diameter van ongeveer 0,2 mm van de zandkorrels en een kanaaldiepte van niet meer dan enkele korreldiameters kan zelfs een kabeltje van 3 mm dikte een significante barrièrewerking hebben.

Uiteindelijk is in onderling overleg besloten om eerst één experiment ten behoeve van de participanten uit te voeren, waarbij de monitoringstechnieken beperkt zouden blijven tot systemen waarvan de invloed betrekkelijk gering geacht werd. Dit experiment zou, zo was de verwachting, veelzeggend kunnen zijn over de mate waarin een dergelijk experiment (uniek in de wereld) beheerst zou kunnen worden en daarmee ook grote waarde hebben voor de SBW-experimenten gericht op een zo nauwkeurig mogelijke observatie van het pipingproces onder geïdealiseerde veldomstandigheden. Bij een gunstig verloop konden de resultaten van dit experiment ook door SBW worden. In het tweede en derde experiment kwamen de doelstellingen van SBW specifiek aan bod. In het vierde en laatste experiment was er volop ruimte voor de validatiedoelstellingen van de participanten, waarbij ook procesversturende monitorings- en/of conditioneringssystemen getest zouden worden.

3.2 Ontwerp van de pipingfaciliteit

Vanuit de participanten was er de wens om een situatie te creëren overeenkomstig de praktijksituatie waarbij een niet al te kleine dijk zou bezwijken op piping, met voldoende ruimte om instrumentatie aan te brengen en een proefduur met relevante metingen gedurende minimaal enkele dagen.

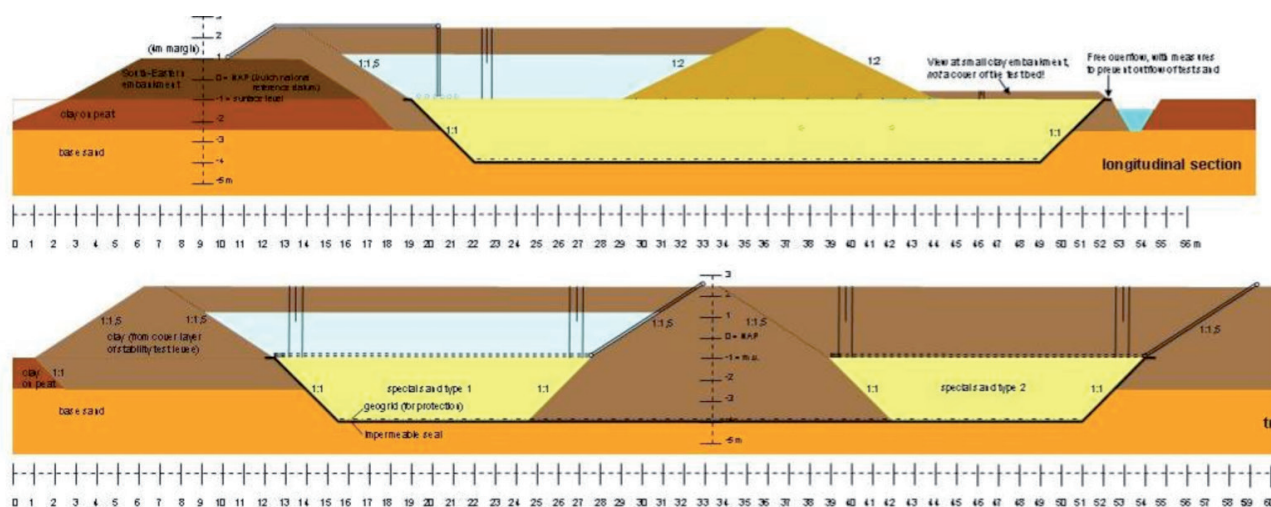
Vanuit SBW kwamen de wensen ten dele overeen. Bovendien wilde men een zo groot mogelijke kwelweglengte (= de minimale afstand waarlangs het kwelwater onder de dijk of constructie door moet stromen), die in elk geval meer zou bedragen dan de maximaal 12 meter van de experimenten in de Deltagoot nabij Marknesse aan het begin van jaren '90 van de 20^e eeuw. Daarnaast wilde men een dikte van de zandlaag van 3 meter, een dijk lengte van ten minste 10 meter, een homogeen verdicht zandpakket met een betrekkelijk hoge relatieve dichtheid (rond 70%) met een bekende korrelverdeling zonder fijnste fractie (d.w.z. zonder silt en kleideeltjes) en tenslotte twee verschillende typen zand, die voornamelijk qua gemiddelde korrelgrootte van elkaar moesten verschillen. Twee experimenten werden met de ene zandsoort uitgevoerd en twee experimenten met de andere zandsoort.

Om een dijk door piping tot bezwijken te brengen is het nodig om er aan één kant water tegenaan te zetten. Dat vereist de bouw van een bassin dat aan één kant wordt afgesloten door de te bezwijken dijk en aan alle andere kanten voldoende hoogte en sterkte bezit. Uit de eerdere activiteiten op de IJKdijk-locatie in Booneschans is bekend dat het betrekkelijk eenvoudig is om daar dijken tot een hoogte van pakweg 3 à 3,5 meter hoogte te bouwen. Bij een grotere hoogte spelen stabiliteitsproblemen vanwege de ondergrond en beperkingen van courant beschikbaar aannemersmaterieel een belangrijke en daarmee vertragende en kostenverhogende rol. Om aan hoogte te winnen kon het zandpakket in de ondergrond ingegraven worden, hetgeen ook de opvoerhoogte voor het bovenstrooms bassin zou beperken. Wel zou het water onder vrij verval aan de benedenstroomse zijde moeten kunnen wegstromen. Bij een dikte van het slappe-lagenpakket van 1 à 3 meter zou het ingraven van het zandpakket er ook toe leiden dat dit pakket ter plaatse van de pipingfaciliteit geheel weggegraven zou worden waardoor er op de stevige zandbasis gebouwd kon worden.

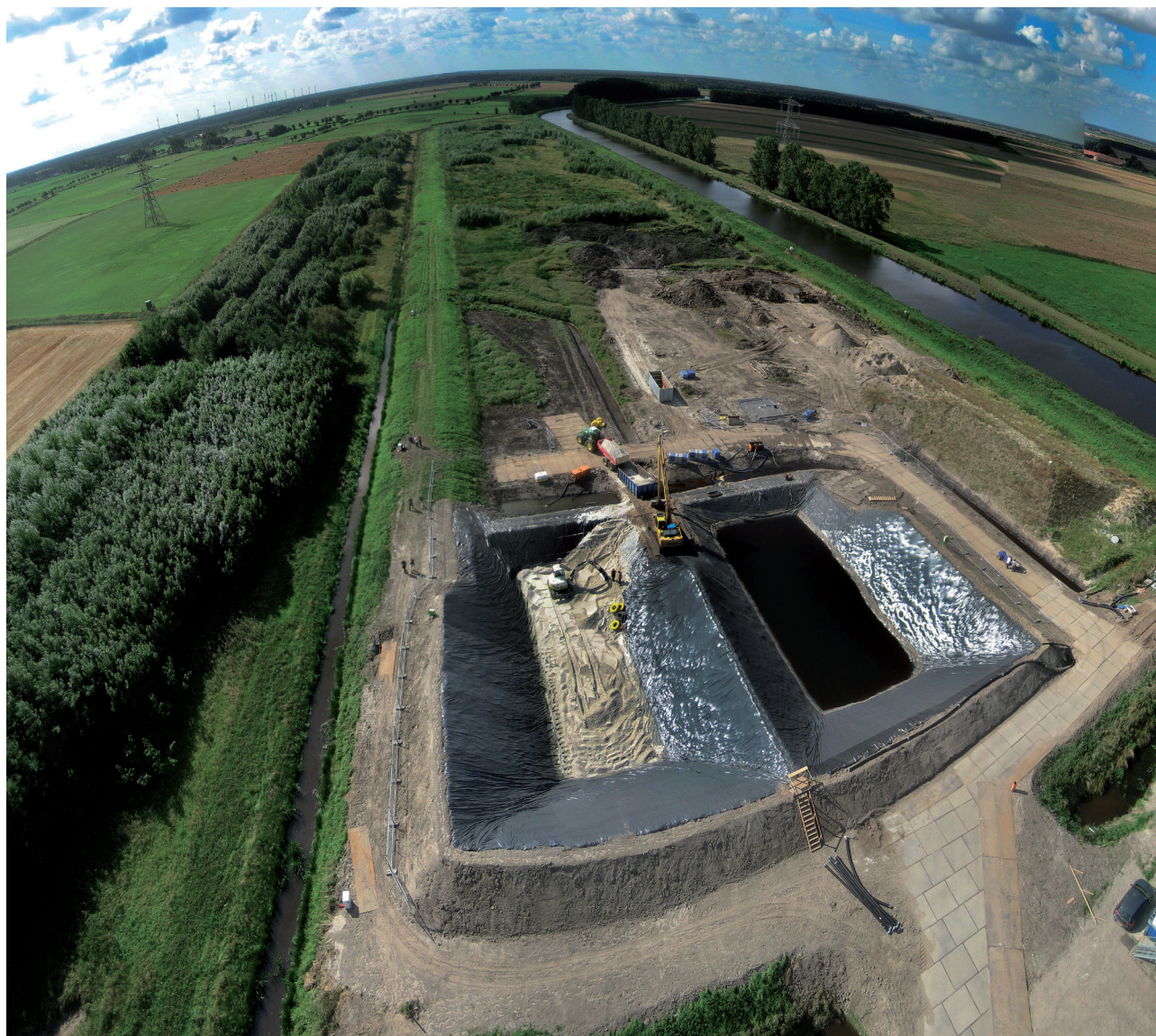
Bij de gestelde eisen zou bezwijken door piping volgens het model van Sellmeijer (dat blijkt de laboratoriumproeven betrouwbaar is) naar verwachting optreden bij de eerder genoemde randvoorwaarden en een verval van 2 à 2,5 meter indien een kwelweglengte van 15 meter zou worden toegepast. Dit leverde een marge van 1 meter op in de hoogte – een marge die noodzakelijk zou kunnen zijn indien het model aan de voorzichtige kant zou blijken te zijn en zich eventueel nog andere belemmerende factoren zouden voordoen, zoals bijvoorbeeld een weerstandbiënde laag aan de bovenstroomse zijde ten gevolge van meegevoerd slib of algenbloei.

Andere aspecten die bij het ontwerp een rol speelden waren positionering van de testdijken ten opzichte van de reeds aanwezige infrastructuur (bouw/meetkeet, ICT en afvoerwegen), reeds aanwezige hoogteverschillen in het terrein (de lage omringdijk), de afstand tot het Boelo Tijdenskanaal waar het benodigde water vandaan gehaald zou moeten worden en de ter plaatse reeds aanwezige materialen (zand, klei en gemengde grond, voor een groot deel te betrekken uit de restanten van de Macro stabiliteitsdijk om zo de kosten en overlast voor omwonenden zoveel mogelijk te beperken. Om tijdrovend transport van zand tussen de experimenten in zoveel mogelijk te vermijden is er voor gekozen om twee aan elkaar grenzende bakken te maken. Doordat hiermee het omscheppen van zand werd voorkomen is ook het risico van beschadiging van het afsluitende folie beperkt.

Van het hieruit resulterende ontwerp zijn de langs- en dwarsdoorsnede weergegeven in Figuur 3.8. Het beproefde zandpakket is in (licht)geel weergegeven en de te bezwijken kleidijk in lichtbruin (in de lengtedoorsnede). In Figuur 3.9 is een luchtfoto van de beide bakken tijdens de aanleg weergegeven.



Figuur 3.8 Lengte- en dwarsdoorsnede definitieve ontwerp pipingfaciliteit

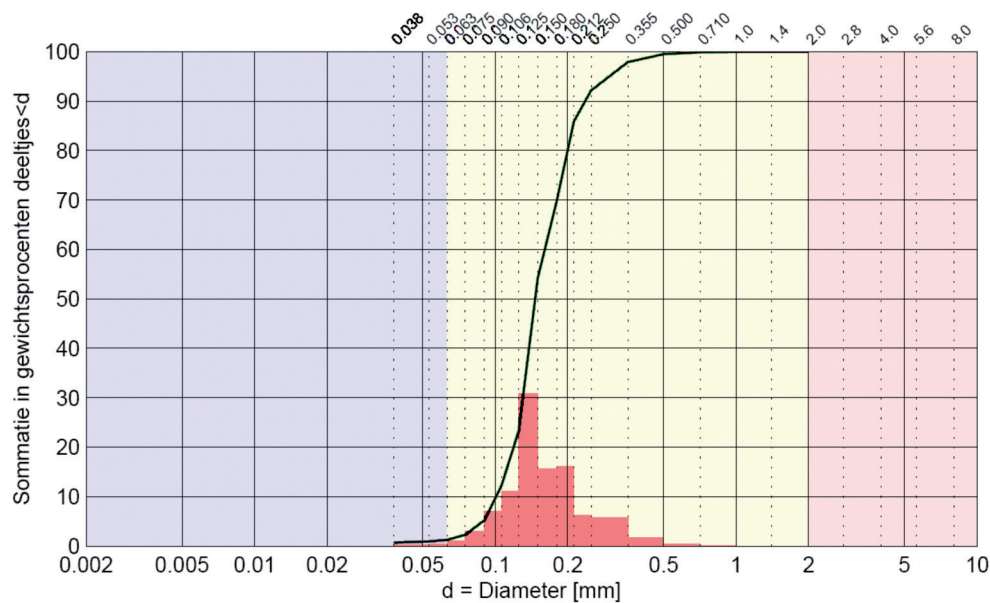


Figuur 3.9 Overzicht van de pipingfaciliteit in Booneschans tijdens de aanleg (foto: Pieter Meulenhoff)

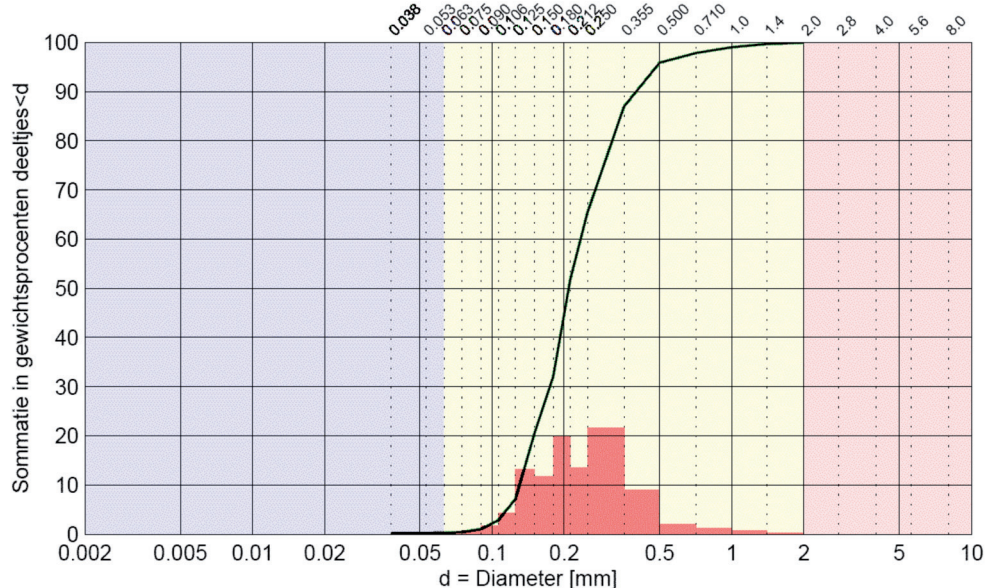
Stichting

IJkdijk

De korrelverdelingen van het toegepaste zand zijn weergegeven in Figuur 3.10 en 3.11. Het zand dat is toegepast in de oostelijke bak, wordt gekenmerkt door een mediane korreldiameter D_{50} van 0,150 mm, een voor het te valideren model van Sellmeijer relevante D_{70} van 0,180 mm en een uniformiteitsgetal $U (=D_{60}/D_{10})$ van 1,6. Dit zand is algemeen aangeduid als 'fijn zand'. Het zand dat is toegepast in de westelijke bak, heeft een D_{50} van 0,209 mm, een D_{70} van 0,260 mm en een U van 1,8. Op de bouwplaats en in de eerste publicaties na afloop is dit ietwat grovere zand meestal aangeduid als 'grof zand'. Dit is echter een onjuiste benaming, het behoort te worden geclassificeerd als 'matig fijn zand'.



Figuur 3.10 Korrelverdeling fijn zand (oostelijke bak)



Figuur 3.11 Korrelverdeling matig fijn zand (westelijk bak / abusievelijk aangeduid als 'grof zand')

3.3 Bouw van de pipingfaciliteit

De oostelijke bak is vrijwel volledig conform het ontwerp aangelegd, alleen de lengte van de proefdijk (ter hoogte van de onderzijde van de klei) is met 17 meter iets groter dan oorspronkelijk de bedoeling was. Bij de westelijke bak is er tijdens de aanleg een afschuiving ontstaan door een combinatie van slecht weer en een uitgevallen pomp.

Hierdoor is de bodem wat hoger komen te liggen en de zandlaag met 2,85 meter iets dunner dan de bedoeling was. Bovendien is de bodembreedte (onderaan de zandlaag) 11 meter in plaats van 9 meter en de lengte van de proefdijk in deze bak 19 meter in plaats van 15 meter. Figuur 3.12 laat de westelijke bak zien, met daarin de bodemdrainage met aansluitingen, het aanbrengen van het zand en (bij de rechterpijl) de afwijkingen in het talud.



Figuur 3.12 De westelijke bak tijdens de aanleg, met de onregelmatigheden ten gevolge van de afschuiving



Figuur 3.13 Langsdrainage op zandpakket

Het stelsel van horizontale drainage is aangebracht ten behoeve van de preparatie van het zandbed. Tijdens de experimenten was dit afgesloten. Het zandbed in iedere bak is droog aangebracht in lagen van 35 cm en verdicht met een kleine trilplaat. Met behulp van volumesteeeringen is de verdichting gecontroleerd. Deze lag rond de 70% met een aanvaardbare spreiding. Vervolgens is aan de bovenzijde van het zandpakket een langsdrainage aangebracht (zie Figuur 3.13).

Om een goede, zo uniform mogelijke doorlatendheid te bereiken is verzadiging van het gehele zandpakket van groot belang – slechts enkele volumeprocenten lucht kunnen al voldoende zijn om de doorlatendheid met een factor 10 te verlagen. Dit zou een grote impact hebben op de experimenten, en daarmee ook op de validatie van de pipingtheorie en de ijking van de monitoringssystemen.

Volgens het ontwerp zou de verzadiging worden bereikt door middel van opstroom van water van onderaf gedurende twee weken. Uit verkennende proeven bleek echter dat dit niet voldoende werkt en er teveel lucht in het zandpakket aanwezig zou blijven. Daarom is er voor gekozen het zandpakket eerst vacuüm te trekken en daarna onder vacuümdruk door middel van opstroom met water te verzadigen.

Om het vacuüm te kunnen creëren is het zandpakket afgesloten met folie, zie Figuur 3.14. De drainagepijpen zijn aangesloten op vacuümpompen via een brugconstructie van 10 meter hoogte (linksboven in Figuur 3.14 zichtbaar), om zo aanzuigen van water te vermijden. Na aanbrengen van 0,6 bar onderdruk is het water van onderaf met een betrekkelijk lage snelheid van 17 m³/uur opgestroomd. Door de lage snelheid kon de bereikte relatieve dichtheid bewaard blijven, hetgeen ook uit proefnemingen daarna gebleken is. Na opstroom zijn het folie en de langsdrainage verwijderd. Waar er wel voor gezorgd is dat er te allen tijde een laagje water op het zand bleef staan, om zo de verzadiging ook in het bovenste laagje te behouden.



Figuur 3.14 Folie en brugconstructie voor vacuümdrainage

Het benodigde water voor zowel het verzadigen als later tijdens de experimenten is aangevoerd vanuit het Boelo Tijdenskanaal (rechts in Figuur 3.9). Het water dat uit het kanaal wordt gepompt bevat fijne deeltjes, algen en waterluis. Dit kan leiden tot verstopping van het zandpakket. Om dit te voorkomen was juist de fijnste fractie uit het zand gezeefd. Daarom is besloten om dit water te filteren met een filtersysteem, dat maximaal deeltjes met een grootte

van 25 micrometer doorlaat. Er is ook geopperd om het water te koelen, dit verlaagt de gasopnamecapaciteit en vermindert de biologische activiteit (algengroei), maar dat is energietechnisch niet haalbaar. Het was echter de verwachting dat door de korte duur van opstroomen er niet voldoende algengroei plaats zal vinden om het pakket tijdens opstroomen te verstoppelen. De hoeveelheid algen en waterluis was overigens in het tweede experiment al veel lager dan in het eerste experiment door de lagere buitentemperatuur, bij de derde en ook bij dit vierde experiment heeft die trend zich doorgezet, hetgeen natuurlijk ook sterk samenhangt met de lagere buitentemperatuur.

Uiteindelijk is een systeem toegepast met een aanvoercapaciteit tot 240 m³/uur. De aanvoerbuis is met een vlotter op enkele meters vanuit de oever neergehangen op een diepte van een halve meter onder het wateroppervlak, om zo enerzijds het opzuigen van slib zoveel mogelijk te voorkomen en anderzijds het inzuigen van algen en waterluis van het oppervlak tegen te gaan. Figuur 3.15 geeft een impressie van de slangenmassa rond de filters op de dijk. Bij het vierde experiment zijn twee pompen in serie geplaatst: één met een zeer grote opvoercapaciteit, die om cavitatie te voorkomen het water kreeg aangeleverd vanuit een kleinere pomp die een lagere hoogteverschil hoefde te overbruggen.



Figuur 3.15 Doorspoelfilters voor zuivering van het kanaalwater

Benedenstrooms van de proefdijk stroomde het water door de debietmeter een sloot in waaruit het werd weggepompt. Dit pompsysteem had een capaciteit van 70 m³/uur, waardoor het terrein bij doorbraak van de testdijk enigszins blank kon komen te staan. Dit zou van dusdanige aard zijn dat dit geen wezenlijke invloed zou hebben op het experiment. Uiteindelijk is dit alleen bij de eerste en het vierde experiment in beperkte mate gebeurd; bij het tweede en de derde experiment kwam er minder water in korte tijd vrij en was de afvoersloot beter voorgemalen.

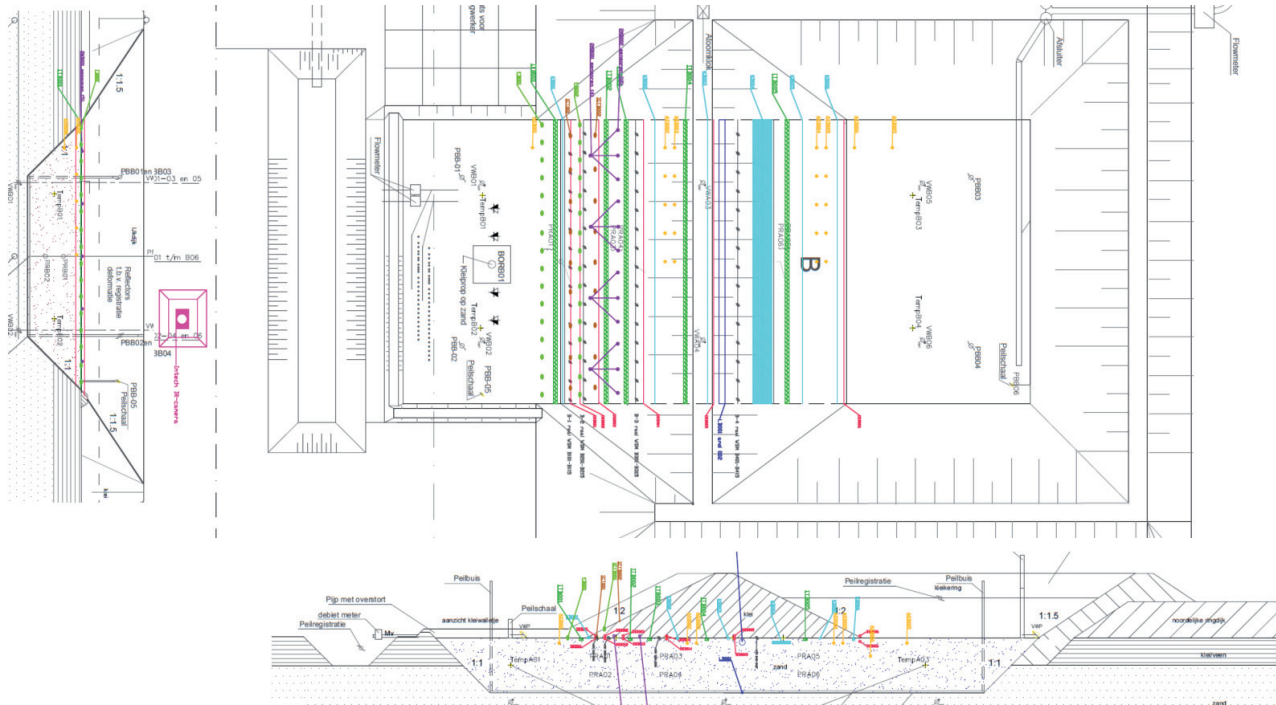
3.4 Opzet van de monitoring

Zoals reeds eerder aangegeven is, was er vooraf de verwachting dat het pipingproces met behulp van referentiemonitoring mogelijk niet goed gevolgd zou kunnen worden. Daardoor was er bij deze experimenten, anders dan bij het Macrostabieliteitsexperiment, een essentiële rol weggelegd voor testmonitoring.

Bij deze experimenten lag de nadruk op het meten van het pipingproces zoals hiervoor beschreven is in paragraaf 3.1 (Figuur 3.2 t/m 3.6; rekening houdend met het feit dat bresgroei onder deze omstandigheden niet realiseerbaar is). Daarnaast is ook monitoring van enkele randvoorwaarden en omgevingsomstandigheden van belang, te weten:

- bovenstrooms peil
- benedenstrooms peil
- instromend debiet
- uitstromend debiet
- luchttemperatuur
- neerslag
- wind

Ter illustratie is in Figuur 3.16 het monitoringsplan voor het vierde experiment weergegeven.



Figuur 3.16 Monitoringsplan voor pipingexperiment 4 (bovenaanzicht en doorsneden)

De details voor alle experimenten, zowel voor de referentiemonitoring als de testmonitoring, zijn te vinden in hoofdstuk 5.

3.5 ICT

3.5.1 Infrastructuur op locatie

Netwerk

Op de IJKdijk locatie is een bekabeld netwerk aangelegd om de sensor systemen op het netwerk aan te kunnen sluiten. Om de sensordata te kunnen transporteren is een internetverbinding aangelegd (SDSL). De SDSL-verbinding is geleverd door KPN. De KPN aansluiting is geleverd bij de ingang van de IJKdijk locatie (Hamdijk, Nieuweschans). Vanaf de openbare weg loopt een 800 meter lang pad naar de IJKdijk locatie. Deze afstand, van SDSL-modem naar controlekamer, is overbrugd met een glasvezelverbinding. In de controlekamer wordt deze glasvezelverbinding middels mediaconverters omgezet naar ethernet (koper).

De SDSL internetverbinding is tijdens de experimenten gebruikt om *remote management* te kunnen uitvoeren en de data door te kunnen sturen naar TNO ICT in Groningen.

Dataopslag

Dataopslag vond plaats op twee Network Attached Storage (NAS) machines met elke 10 Terabyte bruto capaciteit. Deze twee opslagmachines zijn bij de dataopslag voortdurend synchroon gehouden zodat bij uitval van één van de machines geen data verloren zou gaan. De machines waren elke voorzien van een redundante voeding en waren geplaatst achter een UPS (Uninterruptible power supply). De harddisk configuratie was bovendien zo ingesteld (RAID5) dat uitval van een aantal harde schijven geen gevolgen heeft voor de data-integriteit. Naast deze redundantie en failover maatregelen is de data tijdens de experiment direct naar TNO Groningen gestuurd waar een tweede instantie van AnySenseConnect was geïnstalleerd om de data ook op een fysiek andere plek veilig te stellen.



Figuur 3.17 Lokale dataopslag vond plaats in de witte container (controle kamer/meetkeet)

Stichting

IJKdijk

Tijdsynchronisatie t.b.v. correlatie

Om metingen goed met elkaar te kunnen vergelijken en correleren is tijd een belangrijk onderwerp. Alle sensor-systemen moeten een eenduidig begrip van tijd hebben en aan kunnen leveren. Om tijdsynchronisatie tussen de verschillende systemen te realiseren is op het locale netwerk een NTP-server (Network Time Protocol) aangesloten. Deze NTP-server is aangesloten op een GPS-antenne om de tijd van GPS-satellieten te ontvangen. GPS-satellieten bezitten zeer nauwkeurige klokken die nodig zijn om locatiebepaling goed te kunnen uitvoeren. Van deze eigenschap kan handig gebruik gemaakt worden om metingen tijdsynchroon op te kunnen slaan.



Figuur 3.18 NTP-Server aangesloten op GPS-buitenantenne voor accurate tijdsbepaling

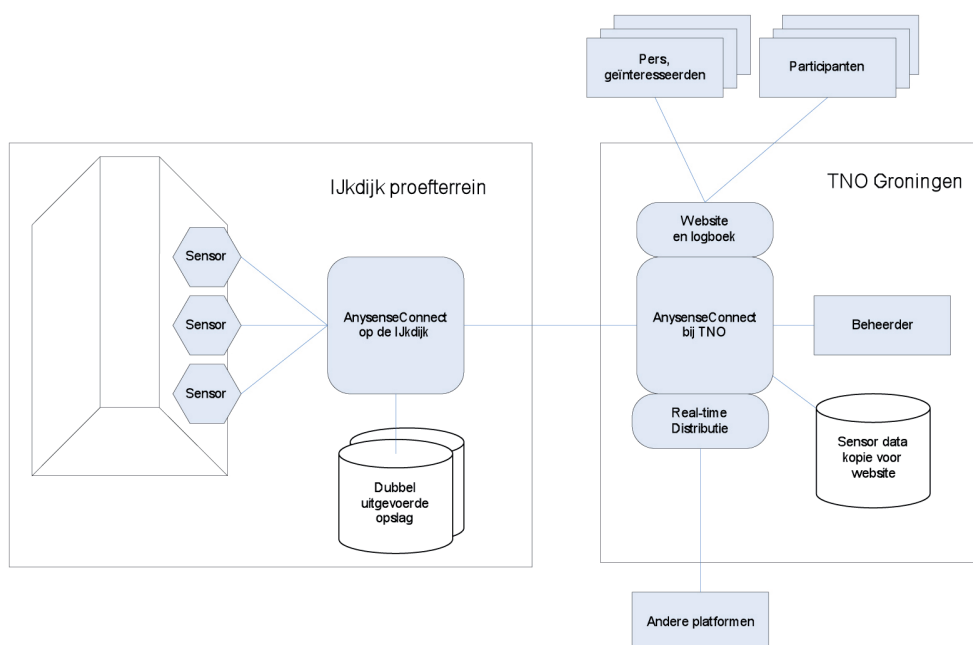
NTP is een tijdprotocol dat door veel besturingssystemen ondersteund wordt. PCs die aangesloten werken op het Ikdijk netwerk werden zo ingesteld dat deze automatisch synchroniseerden met de tijden van deze NTP-server.

3.5.2 Dataverwerking

Het betrouwbaar en veilig opslaan van de experimentsdata is van cruciaal belang. Sensordata moet verzameld worden uit zeer uiteenlopende systemen met verschillende interfaces en manieren van data-aanlevering. Daarnaast moet de data ook snel en eenduidig beschikbaar (genormaliseerd) gemaakt worden voor onderzoekers en andere belanghebbenden. AnysenseConnect is voor de Ikdijk doorontwikkeld tot een platform dat in deze behoeften voorziet. In 2008 is voor het Macrostabieliteitsexperiment de eerste versie van AnySenseConnect gebruikt, in 2009 is AnySenseConnect doorontwikkeld en zijn o.a. distributie, visualisatie via internet en verdere verfijning van de opslag doorgevoerd.

High-level architectuur

Hieronder is een sterk vereenvoudigde weergave van de opstelling van het platform weergegeven:



Figuur 3.19 Vereenvoudigde weergave van het AnySenseConnect platform zoals ingezet bij de pipingexperimenten

De sensordata werd verzameld op het IJkdijk proefterrein, en daar opgenomen in het AnysenseConnect platform. Dit platform zorgt dat het in de databases op de dijk zelf wordt opgeslagen, en dat de data real-time doorgestuurd wordt naar het platform dat bij TNO in Groningen in de hosting-omgeving geplaatst is.

Het platform in de hosting-omgeving slaat van deze data vervolgens een kopie op, zodat historische data snel opgevraagd kan worden via de website, zonder dat er data-verkeer naar het IJkdijk proefterrein hoeft plaats te vinden. Daarnaast wordt de data real-time vanaf de hosting-omgeving doorgestuurd naar een aantal andere platformen die behoefte aan deze data hebben. In de volgende paragraaf wordt de website nader omschreven.

Gerealiseerde aansluitingen

De verschillende partijen die op het AnysenseConnect platform aangesloten zijn geweest bij de pipingexperimenten zijn in Tabel 3.5.1 en Figuur 3.20 weergegeven.

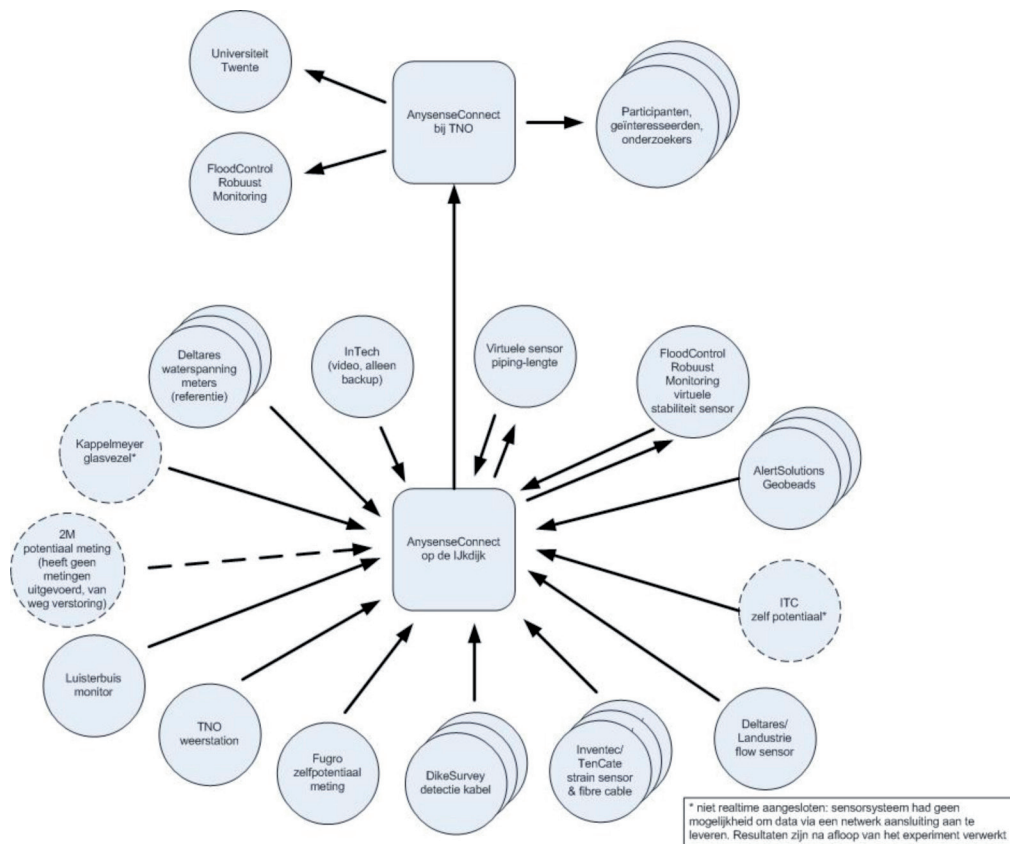
Tabel 3.5.1 Aangesloten partijen met aansluit methode (manier van data aanlevering)

Participant	Sensorsysteem	Aansluitmethode
Alert Solutions	Geobeads	Socket
Dike Survey	Detectiekabels	Socket
TNO	Weerstation	Mysql database
GTC Kappelmeyer	Horizontale Glasvezel	File polling
	Verticale Glasvezel	
Luisterbuis Consortium	Luisterbuis (geluid)	File polling en stream
	Druk en temperatuur	File polling
Intech	Video (thermisch beeld)	stream
ITC	Zelfpotentiaal meting	File polling
IJkdijk pompsysteem	Debiet en flowmeters	Socket
Fugro	Zelfpotentiaal meting	Socket
2M	Capacitieve methode	File
Inventec/Tencate	Glasvezel, rek & temp	File polling
Referentie -monitoring	Waterspanning	File polling

Onderin het schema in Figuur 3.20 staan de partijen die sensoren in de proefdijk geïnstalleerd hebben en daarmee hun data aan AnysenseConnect hebben geleverd. De real-time distributie van deze data is weergegeven in het bovenste deel van het schema, deze distributie gebeurt vanaf een web server die bij TNO is geplaatst. Voor de ITC Enschede en FloodControl is een speciaal distributiemechanisme aangemaakt, waardoor zij de IJkdijk-sensordata geheel automatisch en real-time op hun respectievelijk platformen binnenkregen.

Zoals zichtbaar wordt in het schema is er dus een groot aantal partijen op AnysenseConnect aangesloten, en kan er dus gezegd worden dat het platform er zeker in geslaagd is om de verschillende datastromen tijdens het experiment bij elkaar te brengen.

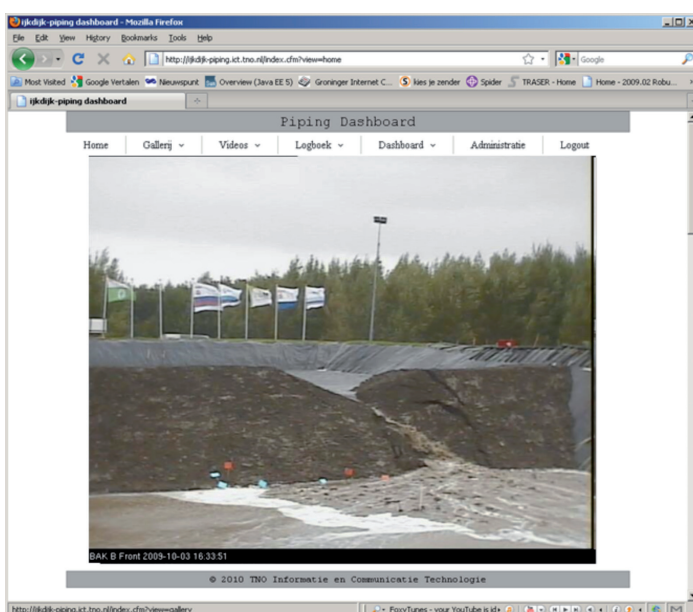
Experiment 1 leverde ruim 81 miljoen sensormetingen op, experiment 4 een klein 25 miljoen. Dit verschil komt met name door aanpassing (naar beneden) van de *sample rate* van een aantal sensorsystemen.



Figuur 3.20 Gerealiseerde aansluitingen op AnySenseConnect

3.5.3 Visualisatie van de data: Het dashboard

Nu er een goede dataset voorhanden is om mee te werken is het mogelijk data met verschillende doorsneden uit het platform te verkrijgen om bijvoorbeeld grafieken te kunnen maken. Om sensordata te kunnen correleren is een interactieve en dynamische website gerealiseerd die zijn data verkrijgt via AnySenseConnect. Het dashboard is beveiligd via een username/password.



Figuur 3.21 Startpagina van het Pipingdashboard na login

Dit dashboard biedt in het kort de volgende functionaliteit:

- Het weergeven van camerabeelden van de IJkdijk locatie
- Door gebruikers kunnen grafieken van alle aangesloten sensoren worden gemaakt
- Door gebruikers kunnen groepen van sensoren (b.v. waterspanningen in een specifiek raai) gedefinieerd worden.
- Gebruikers kunnen berichten achterlaten om waarnemingen te delen met andere gebruikers (logboek)
- Gebruikers kunnen datasets downloaden van gespecificeerde periodes en sensoren in verschillende dataformaten (CSV, GEF en XML)

Metadatering van sensordata

Data over data, dat is in het kort de definitie van metadata. Metadata beschrijft of is aanvullend op de metingen. Voor de IJkdijk experimenten is een logboek geïmplementeerd om door de proefleiding notities te kunnen maken over het verloop van het experiment en om sensorparticipanten de mogelijkheid te geven (tussen)resultaten van hun metingen te kunnen delen en vergelijken met observaties van anderen.

Gebruikers kunnen middels het logboek berichten achterlaten die voor elke ingelogde gebruiker te lezen zijn. Op deze manier kon tijdens de experimenten kennis gedeeld worden over het verloop van de experimenten.

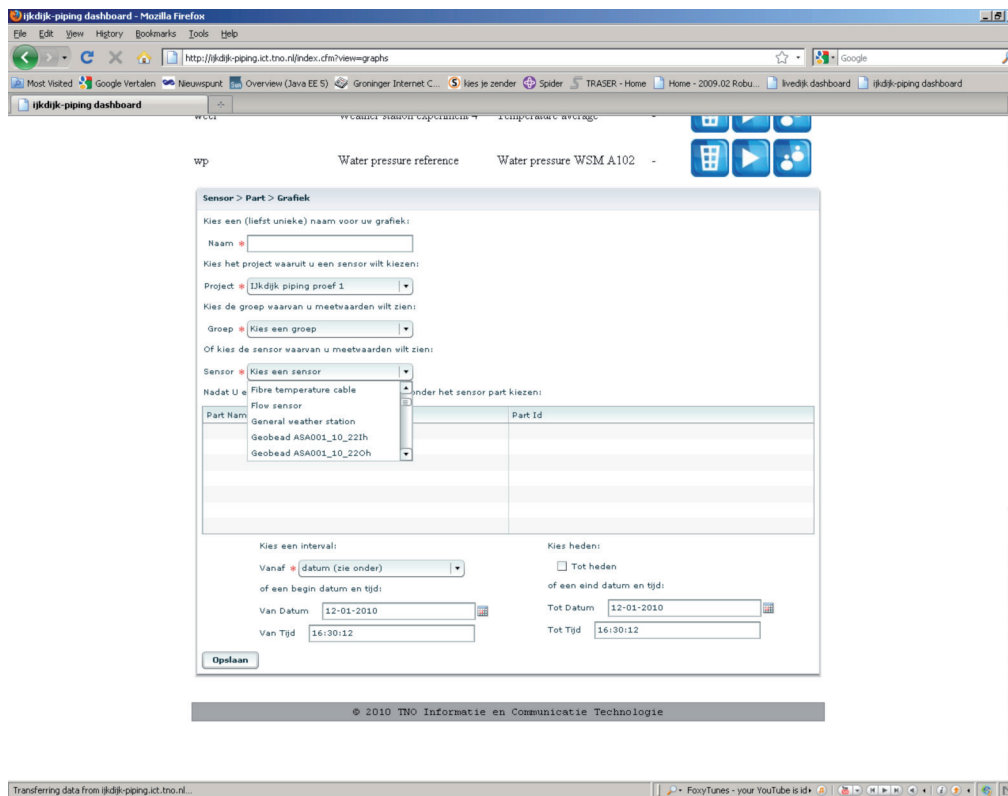
Door logboekmeldingen ook te voorzien van een tijdstempel (timestamp) zijn deze goed te relateren aan de sensoren metingen. Een logboek, of een andere vorm van metadatering, kan ook beschouwd worden als 'tekst-sensor'



Figuur 3.22 Logboek om tijdens de experimenten kennis te delen en daarmee sensordata te voorzien van metadata

Grafieken definiëren

Gebruikers kunnen grafieken van sensoren aanmaken op basis van een specifieke tijdsspanne (van t tot $t+x$) of kunnen een *real time* grafiek aanmaken die continue ververscht wordt (b.v. van de laatste 5 uur). Hier is het mogelijk om visueel sensordata te vergelijken om meerdere grafieken tegelijk te kunnen vergelijken.



Figuur 3.23 Definiëren van grafieken

Onderstaande figuur geeft een grafiek weer van een flowsensor. Deze sensor meet de hoeveelheid water (in liters/minuut) die door de dijk stroomt. De grafiek geeft de periode van het eerste experiment weer, gedurende het experiment neemt de hoeveelheid water die door de dijk stroomt steeds meer toe met een aantal duidelijke pieken daarin.

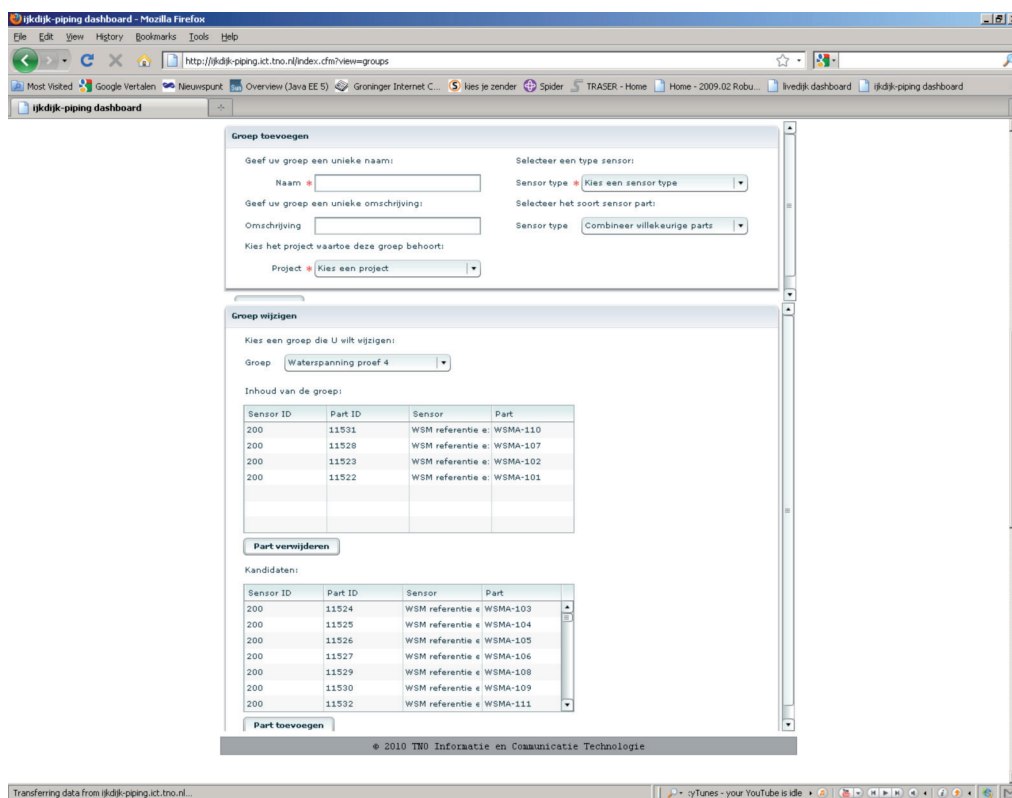
- Grafiek 'Flow Bak B' gegevens uit Afvoer bak B tussen 2009-09-29 12:44 en 2009-10-04 12:44
meetwaarden : Flow_dm3_min (dm3/min)



Figuur 3.24 Grafiek flow sensor (liters/minuut) tijdens experiment 1

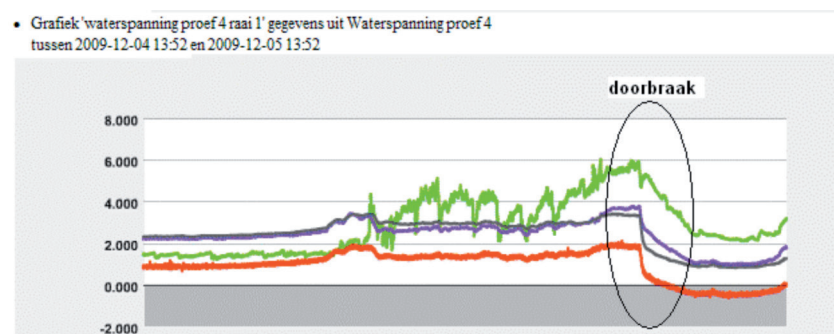
Groepen van sensoren definiëren

Het platform biedt de mogelijkheid om groepen van sensoren te maken van hetzelfde type. Dit geeft de mogelijkheid om verschillende sensoren aan elkaar te relateren.



Figuur 3.25 Sensoren van hetzelfde type groeperen

Zodra groepen gedefinieerd zijn, kan van een groep een grafiek gedefinieerd worden. De groep zal dan verschijnen onder het menu waar grafieken aangemaakt kunnen worden.



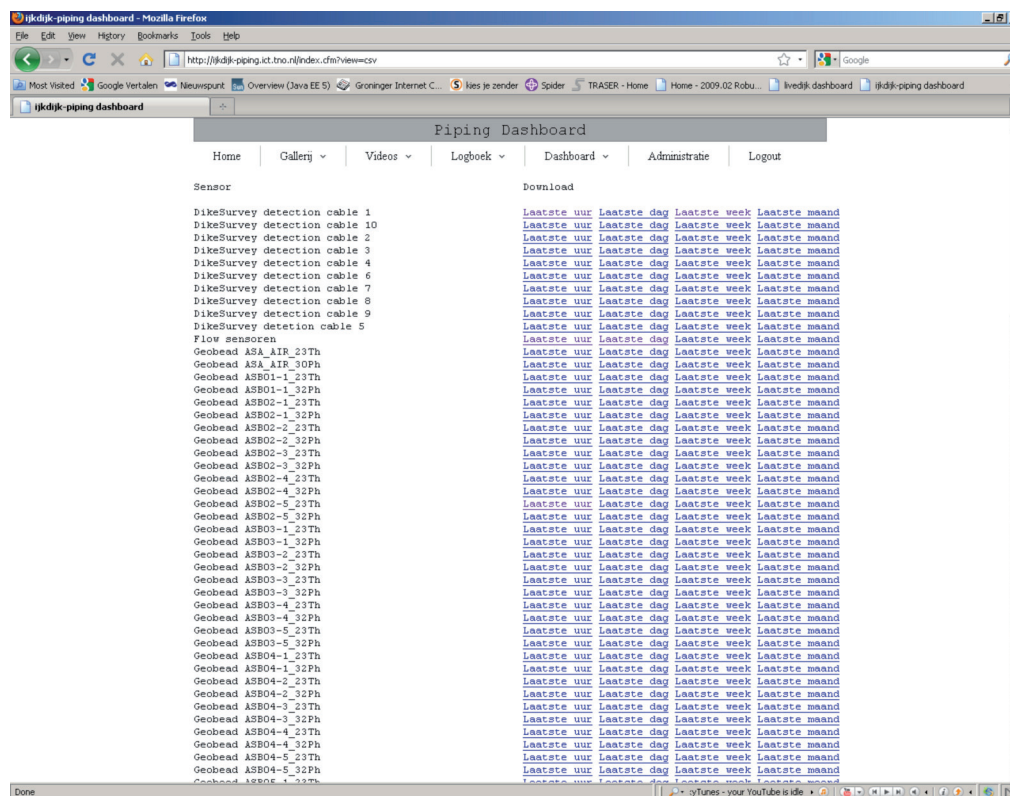
Figuur 3.26 Groep van waterspanningssensoren gegroepeerd op meetraai tijdens experiment 4

Bovenstaande grafiek geeft de waterspanning weer gedurende de laatste dag van het vierde experiment. De verschillende dips in de lijnen (m.n. de groene lijn) geven het ontstaan van pipes aan. De sterke daling aan de rechterkant van de grafiek laat de doorbraak zien.

Downloaden sensordata

Naast dat partijen aangesloten kunnen worden op een *real time* datastream (zoals dat gedaan is voor FloodControl2015 – Robuust Monitoren en Universiteit Twente) kan data ook gedownload worden in verschillende dataformaten voor verdere analyse door gespecialiseerde pakketten zoals MatLab of Excel.

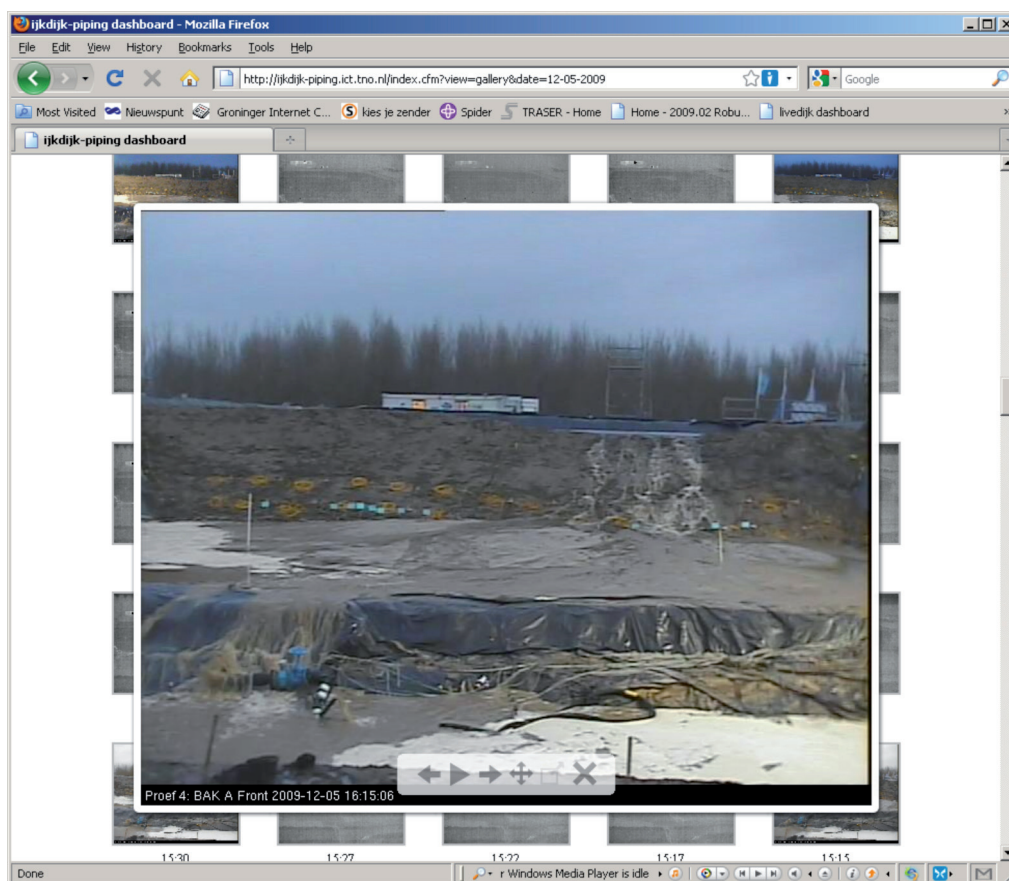
De data kan gedownload worden in een CSV (Comma Separated Value) formaat of in GEF (Geotechnical Exchange Format). CSV is een gangbaar formaat voor inlezing in Excel of Matlab. GEF is een formaat dat is ontwikkeld door Deltares. Om GEF files te kunnen lezen en analyseren is software beschikbaar op www.geffiles.org.



Figuur 3.27 Downloaden van data in verschillende dataformaten t.b.v. verdere analyse

Sensor streams bekijken

Sensor streams van videobeelden konden tijdens het experiment bekeken worden op het dashboard. Videobeelden konden op basis van tijd geselecteerd worden. Hierna, in Figuur 3.28, is een snapshot opgenomen van de *sensor streams*.



Figuur 3.28 Snapshot van de videocamera die het verloop van het experiment filmde

3.6 Afstemming met de beheerpraktijk

In dit hoofdstuk is de opzet van het Pipingexperiment tot nu toe gepresenteerd vanuit het oogpunt van ICT en geotechniek. Dit zijn twee belangrijke uitgangspunten omdat het experiment gaat over informatie inwinning (ICT) over een geotechnisch verschijnsel. Naast deze twee aspecten bestaat er in de ontwikkeling van monitoringssystemen voor piping nog een derde essentieel aspect, de aansluiting van het monitoringssysteem bij de beheerpraktijk van de waterkeringbeheerders.

De aansluiting bij de informatievraag uit de beheerpraktijk is essentieel voor het nut en toepassing van het monitoringssysteem binnen de werkprocessen van de eindgebruikers, Waterschappen en Rijkswaterstaat. Gedurende de opzet, uitvoering en afronding van het experiment is contact gehouden met beheerders om de aansluiting van de monitoringssystemen bij de beheerpraktijk te faciliteren. In deze paragraaf zijn de bevindingen op dit gebied samengevat. Deze bevindingen komen grotendeels voort uit de klankbordgroepbijeenkomst van 27 mei 2010.

De behoefte naar de informatie over de staat van waterkeringen en specifiek het plaatsvinden van piping komen voort vanuit een aantal aspecten en werkprocessen bij waterkeringbeheerders.

3.6.1 Calamiteiten

Een hoogwatersituatie, extreme weersomstandigheden of andere extreme belastingen kunnen aanleiding geven om bepaalde keringen beter in de gaten te houden. Een beheerder kan vaak op basis van zijn bestaande kennis en ervaring een inschatting maken bij welke keringen zich mogelijk problemen met piping voor doen bij bepaalde extreme omstandigheden. Het kan dan nog steeds gaan om vele kilometers waterkering die de beheerder beter in de gaten zou willen houden. Een monitoringssysteem zou hierin kunnen voorzien door het leveren van informatie over de ontwikkeling van piping tijdens extreme omstandigheden.

Op een locatie waar geconstateerd wordt dat piping zich zover heeft ontwikkeld dat er een risico ontstaat of dat zelfs een falen van de kering dreigt te ontstaan, zou een monitoringssysteem in de vraag kunnen voorzien naar

extra informatie over de staat van de kering. In zo'n calamiteitsituatie helpt deze informatie om een goede beslissing te nemen over noodmaatregelen en, in het uiterste geval, over het moment van evacueren.

3.6.2 Informatievoorziening (versterkingen)

Een monitoringssysteem kan nuttig zijn om aanvullende informatie in te winnen bij dijkversterkingen of andere aanpassingen aan een kering. Betere informatie over bijvoorbeeld de ondergrond en ontwikkeling van waterspanningen in de ondergrond of het effect van belastingen op een kering kunnen nuttige informatie opleveren ten behoeve van het ontwerp van een dijkversterking. Daarnaast kan een monitoringssysteem de ontwikkeling van nazettingen en eventuele veranderingen in de actuele sterkte na de dijkversterking in beeld brengen.

Daarnaast kan monitoringssysteem aanvullende informatie opleveren over pipinggevoeligheid van bepaalde keringen en zo de algemene kennis van de beheerder over zijn keringen vergroten.

3.6.3 Beoordeling en inspectie

Reguliere inspectie, de schouw en de vijfjaarlijkse toetsing van keringen vragen uitgebreide informatie over de waterkeringen. De inspectie van waterkeringen is vooral ingesteld op visuele inspectie en de toepassing van rekenregels voor beoordeling van de sterkte van de kering. Binnen de rekenregels zijn veiligheidsmarges ingebouwd die onzekerheden over bijvoorbeeld dijkopbouw en ondergrond compenseren. Deze onzekerheden kunnen grote invloed hebben op de uiteindelijke beoordeling en zelfs afkeuring van een kering. Een monitoringssysteem kan preciezere informatie geven over de ondergrond en opbouw van een kering en de ontwikkeling van waterspanningen. Hiermee kan, door het verkleinen van onzekerheden, de beoordeling van pipinggevoeligheid van een kering worden verbeterd. Een punt van discussie hierbij is echter of deze informatie op dit moment al geaccepteerd wordt binnen de formele beoordeling van de keuring.

4 Uitvoering van het experiment

4.1 Geplande uitvoering

De geplande uitvoering was voor alle experimenten in principe gelijk, alleen bij het vierde experiment waren vooraf enkele extra activiteiten voorzien die verband hielden met één van de geteste monitoringssystemen: de Luisterbuis.

Bij ieder experiment zou een cyclus van een uur worden gehanteerd, beginnend met een peilverhoging in het bovenstroomse bassin met 10 centimeter. Met de beschikbare pompcapaciteit zou dit telkens ruim 10 minuten duren. Daarna zou primair op basis van visuele waarnemingen aan de benedenstroomse zijde van de dijk, besloten worden of na afloop van het uur door zou worden gegaan met een nieuwe peilverhoging, of niet. Deze beslissing werd genomen op basis van het ontstaan van zandtransport. Indien gedurende minimaal een kwartier geen veranderingen zouden worden geconstateerd in de situatie direct benedenstrooms van de dijk zou het peil 10 centimeter worden verhoogd. Bij continu zandtransport uit een wel zou het peil niet verhoogd worden, tenzij het peil al betrekkelijk lang hetzelfde zou zijn en de resterende experimentsduur betrekkelijk kort zou zijn; een peilverhoging zou dan naar verwachting tot de benodigde versnelling van het pipingproces moeten leiden. De totale experimentsduur was beperkt tot zeven dagen, onder meer vanwege de wettelijke regels op het gebied van arbeidsomstandigheden.

Naast continu zandtransport en veranderingen in de situatie is er ook een lijst van andere scenario's opgesteld die zich zouden kunnen voordoen waardoor de experimentsuitvoering aangepast zou moeten worden, zoals bijvoorbeeld onweer.

Voor de proefnemingen met de Luisterbuis waren tijdens het vierde experiment drie perioden voorzien waarbij het gebruikelijke schema doorbroken zou worden. De Luisterbuis is, simpel gesteld, een geïnstrumenteerde drainagebuis onderin een dijk. Tijdens het grootste deel van de experimenten zou de Luisterbuis gesloten zijn en dus niet als drainage fungeren, maar er zou natuurlijk wel mee gemeten worden, conform de opzet van dit systeem. Tijdens het vierde experiment zou de Luisterbuis kortstondig worden opengezet:

- tijdens de kwelfase (zie Figuur 3.2) of de vroege fase van kanaalvorming (zie Figuur 3.3);
- tijdens de fase van terugschrijdende erosie (zie Figuur 3.4);
- tijdens de ruimfase (zie Figuur 3.5).

Het openzetten van de Luisterbuis zou telkens een kwartier tot twee uur moeten duren, mede afhankelijk van de aanpassingssnelheid van de omgeving.

Na afloop van ieder experiment heeft telkens een korte evaluatie plaatsgevonden, gericht op het vaststellen van gewenste aanpassingen voor het volgende experiment. Dit heeft geleid tot aanpassingen van de posities van de instrumenten (vooral: verplaatsen van instrumenten in bovenstroomse richting vanaf experiment 2), het vervangen van zandgevulde *big bags* in de kern van de proefdijk door gewone klei (eveneens vanaf experiment 2) en het sneller verhogen van het peil tot een verval van 1 meter, in drie stappen in plaats van tien, in het laatste experiment.

4.2 Daadwerkelijke uitvoering

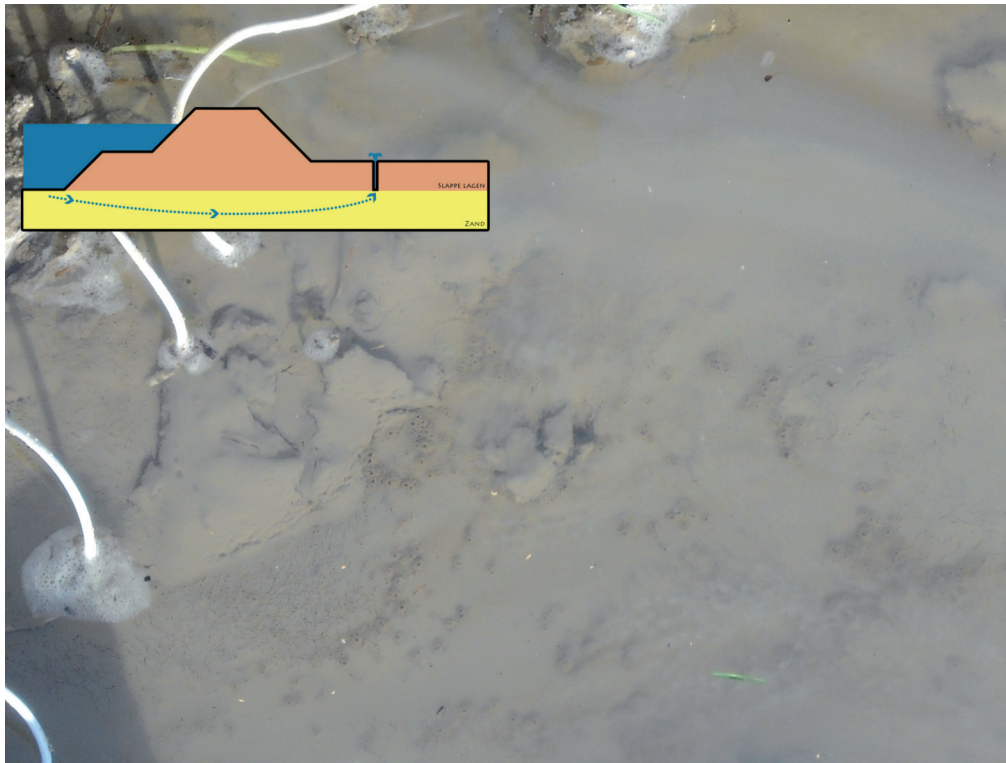
4.2.1 Volgorde van uitvoering

Het was oorspronkelijk de bedoeling om te starten met de westelijke bak, met het matig fijne zand, vanuit de gedachte dat dat gemakkelijker te observeren zou zijn dan het fijne zand. Vanwege de eerder genoemde uitvoeringsproblemen (zie paragraaf 3.3, Figuur 3.12) is de volgorde van beproeven echter omgewisseld, zodat experiment 1 en 3 zijn uitgevoerd in de oostelijke bak met het fijne zand, en experiment 2 en 4 in de westelijke bak met het matig fijne zand.

4.2.2 Algemene experimentsverloop

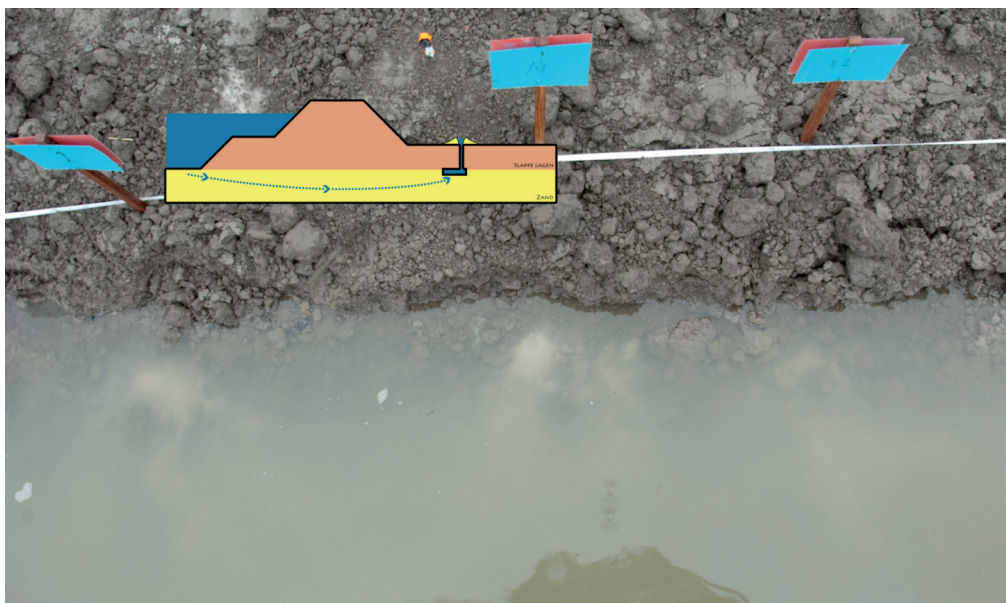
De experimenten zijn in grote lijnen uitgevoerd zoals gepland. In deze paragraaf worden de observaties die tijdens de verschillende fasen gedaan zijn beschreven. In de paragrafen daarna worden per experiment de bijzonderheden aangegeven.

Gedurende het opzetten van de eerste meter verval gebeurt er weinig; aan de hand van de debietmetingen is vast te stellen dat zich langzamerhand een stroming door het zandpakket heen ontwikkelt. Bij een verval iets boven een meter ontstaan in het benedenstroomse bassin de eerste zichtbare tekenen van kwelstroming, in de vorm van minimale gaatjes in de klei, soms zandafzettinkjes daaromheen en een 'wolk' van materiaal in suspensie, zie Figuur 4.1.



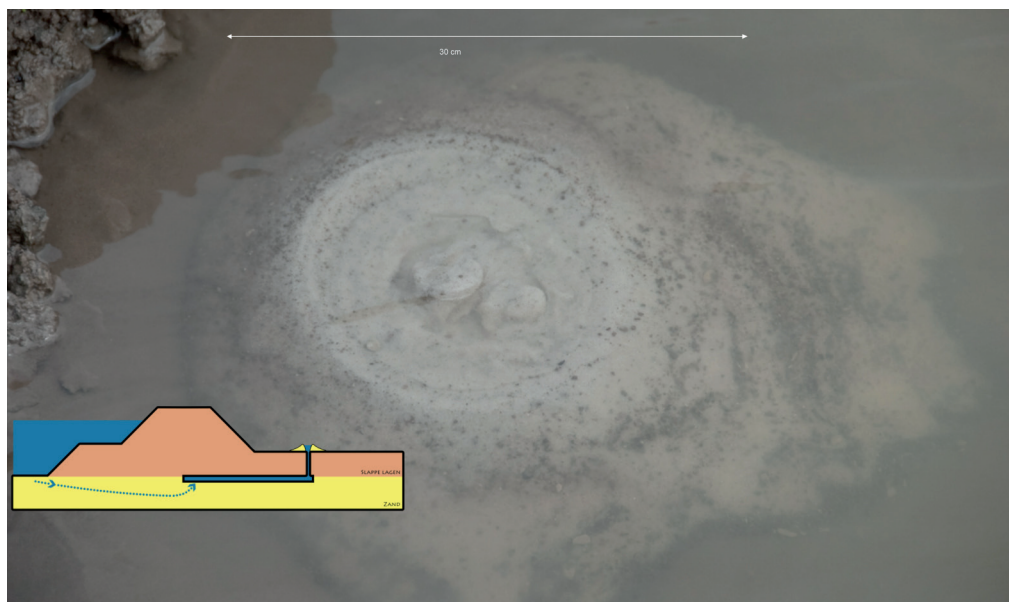
Figuur 4.1 Minieme welletjes (midden en linksonder), zandsporen (rechtsonder) en een 'zandwolk': fase 2 (vergelijk Figuur 3.2)

Vervolgens, bij een verval rond de anderhalve meter, ontstaan wat grotere wellen, waarbij ook meer zand wordt meegevoerd. Er is echter nog geen sprake van continu zandtransport, zie Figuur 4.2.



Figuur 4.2 Grotere wellen, maar nog geen continu zandtransport: fase 3 (vergelijk Figuur 3.3)

De daaropvolgende fase is die van het continue zandtransport vanuit één of meerdere wellen. Dit trad telkens op bij een verval ruwweg rond twee meter, zie Figuur 4.3 en 4.4.

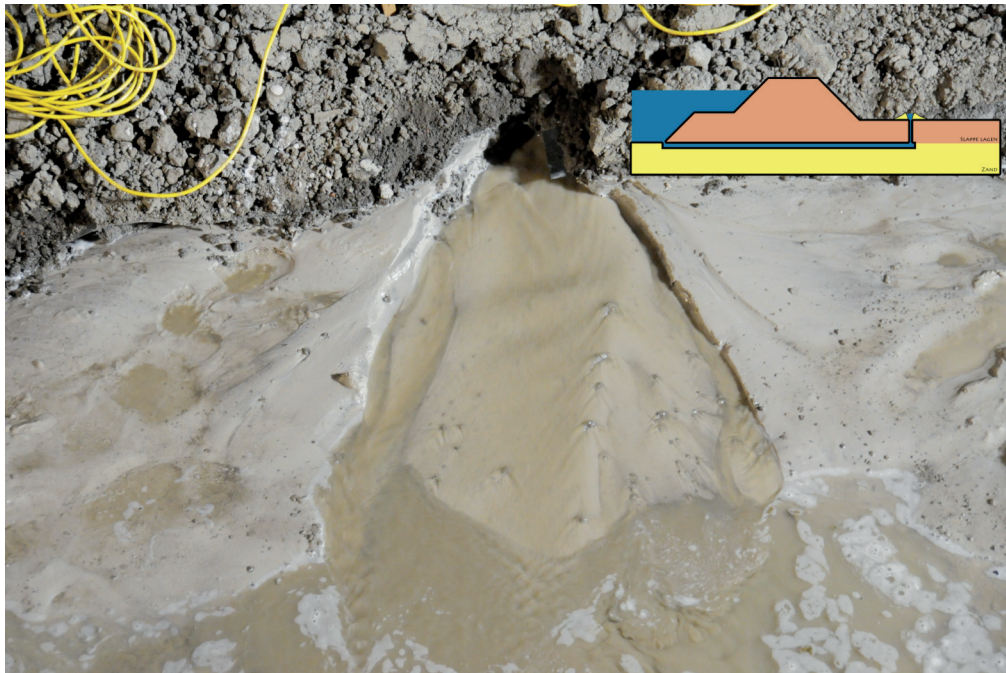


Figuur 4.3 Continu zandmeevoerende wel met doorgaande groei van het kanaaltje: fase 4 (vergelijk Figuur 3.4)



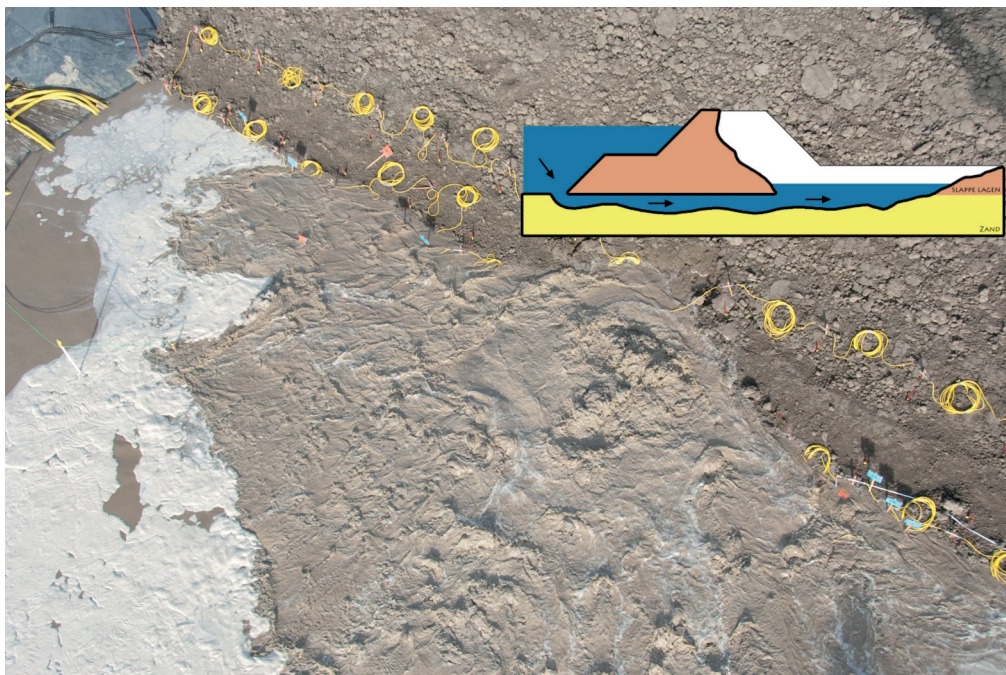
Figuur 4.4 Twee actieve zandkraters vlak bij elkaar. Merk op dat er in de rechterkrater twee afzonderlijke wellen zichtbaar zijn

De overgang van de fase van terugschrijdende erosie naar de fase van verruiming van het kanaal is voor waarnemers op of achter de dijk niet merkbaar. In de nieuwe fase treedt er echter een toename van de kwelstroom op, evenals een toename van de hoeveelheid zand die uit de wel getransporteerd wordt. Na enige tijd is de fase-overgang daardoor wel degelijk zichtbaar, zie Figuur 4.5.



Figuur 4.5 Toegenomen water- en zandtransport: fase 5 (vergelijk Figuur 3.5)

Hierna treedt de laatste fase in: bezwijken van de dijk, gepaard gaand met een aanzienlijke toename van de uitstroom van water, zand en klei, zie Figuur 4.6.

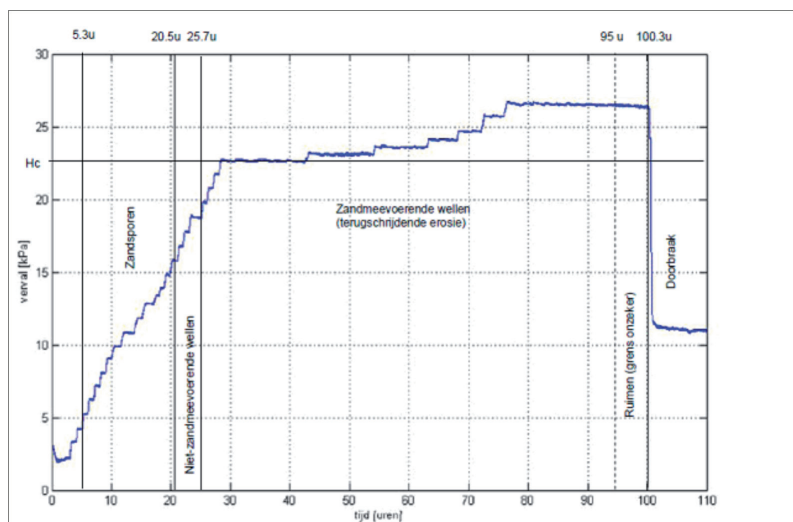


Figuur 4.6 Doorbraak van de dijk: fase 6 (zie ook Figuur 3.6)

De aanzet hiertoe is niet altijd even duidelijk; tijdens ieder experiment zijn er meerdere momenten geweest in de loop van fase 5 waarop er een aanzienlijke toename van de uitstroom was, dit zette dan echter niet altijd door. Dat de doorbraak niet doorzette hing waarschijnlijk samen met het instorten van de kleidijk boven het kanaal. Er lijkt echter geen overeenkomst tussen de verschillende experimenten in aard en ernst van deze zogenoemde 'oplevingen' van de modderstroom en het moment van optreden van uiteindelijk falen.

4.2.3 Verloop en bijzonderheden experiment 1

In Figuur 4.7 is het verloop van het verval tegen de tijd weergegeven voor experiment 1. Tijdens dit experiment was er nog tamelijk veel onzekerheid over de snelheid van het erosieproces, daarom is er betrekkelijk vaak een peilverhoging toegepast.



Figuur 4.7 Verval tegen de tijd voor experiment 1, met vermelding van de verschillende fasen

Na een etmaal of twee werd één van de drie zandmeevoerende wellen, aan de linkerkant van de proefdijk (van benedenstrooms af gezien) steeds dominanter – tot enkele uren voor het uiteindelijke bezwijken, toen de wel aan de rechterkant vrij snel aan betekenis won.

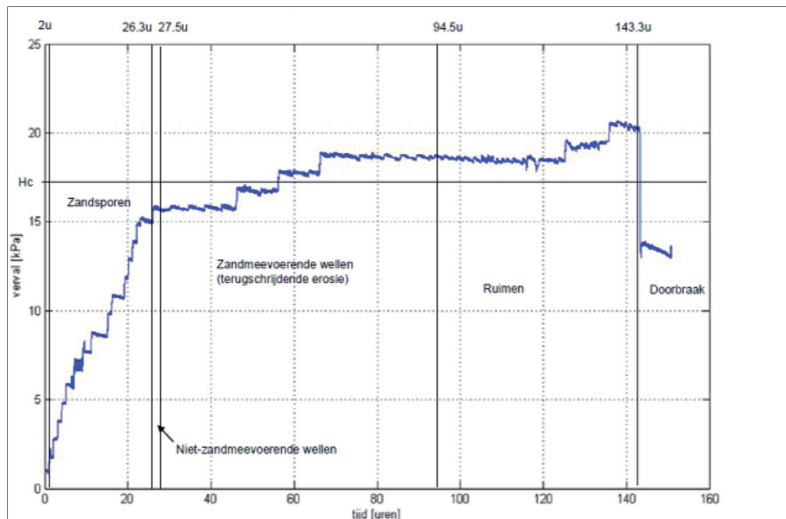
Bij dit experiment trad bezwijken vrij spectaculair op: mede doordat het water in het bovenstroomse bassin vrij hoog stond, maar ook doordat de dijk vrij diep inzakte (mogelijk onder invloed van de aanwezigheid van bigbags en een folie in de kern van de dijk – bij de latere experimenten is dat niet meer toegepast), zakte de dijk zover in dat het water over de dijk kon gaan stromen en er bresgroei optrad, zie Figuur 4.8.



Figuur 4.8 Experiment 1 na bezwijken

4.2.4 Verloop en bijzonderheden experiment 2

Het verloop van experiment 2 is in hoofdlijnen weergegeven in Figuur 4.9. Bij dit experiment kwam opvallend veel zand vrij. Het was de gewoonte om het vrijgekomen zand weg te scheppen, teneinde opkisten te voorkomen. De hoeveelheid vrijgekomen zand werd in de ruimingsfase al snel meer. Ongeveer een etmaal voor bezwijken werd door een rupskraan met lange giek bij elkaar zo'n 5 à 6 kubieke meter uitgestroomd zand weggeschept. Hierna is het proces van opkisten noodgedwongen toegelaten. Figuur 4.10 toont de situatie na het bezwijken.



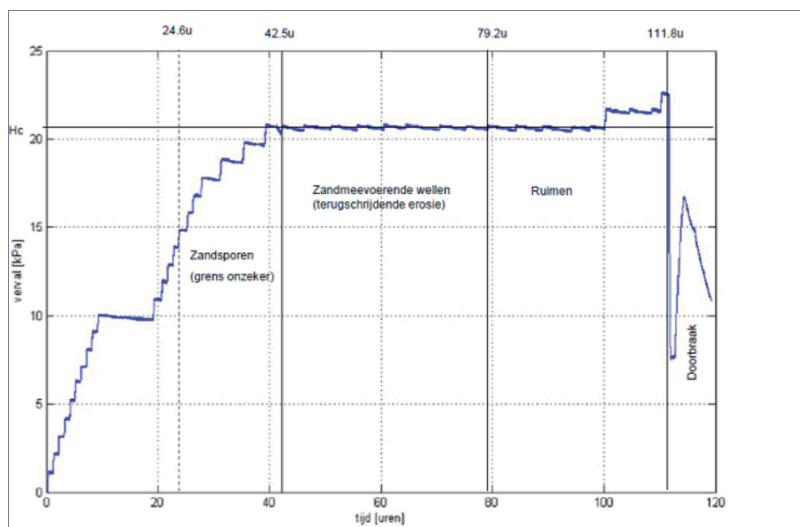
Figuur 4.9 Verval tegen de tijd voor experiment 2, met vermelding van de verschillende fasen



Figuur 4.10 Experiment 2 na bezwijken

4.2.5 Verloop en bijzonderheden experiment 3

Het verloop van experiment 3 is op hoofdlijnen weergegeven in Figuur 4.11. Dit experiment kenmerkt zich door het getoonde geduld: het heeft lang geduurd voordat er werd opgehoogd zodra de fase van continu terugschrijdende erosie werd bereikt. Dit is mede in de hand gewerkt door de geringe hoeveelheid zand die werd afgevoerd: in totaal is tot aan bezwijken slechts ongeveer 0,3 kubieke meter vrijgekomen. Figuur 4.12 toont de proefdijk tegen het einde van de bezwijkfase.



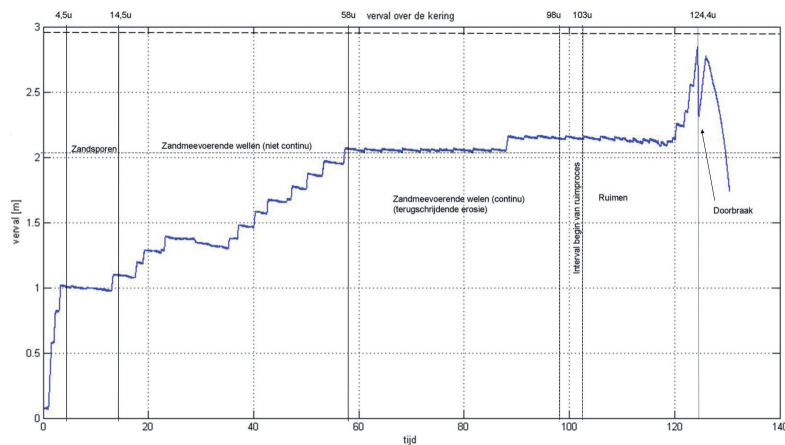
Figuur 4.11 Verval tegen de tijd voor experiment 3, met vermelding van de verschillende fasen



Figuur 4.12 Experiment 3 aan het einde van de bezwijkfase

4.2.6 Verloop en bijzonderheden experiment 4

Het verloop van het voorsnog laatste pipingexperiment is in hoofdlijnen te vinden in Figuur 4.13. Net als bij experiment 2, in dezelfde bak, kwam hier veel zand vrij voorafgaand aan het bezwijken.



Figuur 4.13 Verval tegen de tijd voor experiment 4, met vermelding van de verschillende fasen

Hoewel dit experiment in hoofdlijnen goed overeenkwam met de eerdere experimenten hebben de experimenten met de Luisterbuis, een zogenaamd 'actief monitoringssysteem', een belangrijk stempel op dit experiment gezet. Het schema voor deze experimenten, aangegeven in paragraaf 4.1, is in grote lijnen wel gevolgd, met dien verstande dat:

- de eerste actie met de buis min of meer spontaan werd ingeleid doordat de gesloten afvoerbuis ter plaatse van een aansluiting op een zogeheten 'T-stuk', in het midden van het benedenstroomse bassin, begon te lekken bij een verval van bijna 1,40 meter. Met enig improvisatietalent is deze lekkage provisorisch gedicht. Ondertussen waren de relevante metingen naar het effect van drainage in deze fase ruimschoots ter beschikking gekomen, zodat het experiment kon worden voortgezet
- de derde actie wel zoals gepland gestart kon worden, maar het provisorische afdichtingssysteem was inmiddels gaan lekken. Hierdoor kon de Luisterbuis niet meer geheel worden gesloten, maar bleef er een lekkage bestaan van tussen de 5 en 10 kubieke meter water per uur via deze drainagebuis midden onder de dijk. Dit had een significante verlaging van de waterdrukken in het zandpakket tot gevolg. Rekening houdend met de beperkte daglichtperiode (het was inmiddels begin december) en de wens om het bezwijken bij daglicht te laten gebeuren zodat het zo goed mogelijk waargenomen en vastgelegd kon worden is het peil toen in een zeer hoog tempo verhoogd, uiteindelijk met 40 cm/uur (het maximaal mogelijke met de beschikbare pompcapaciteit). Bezwijken trad vervolgens op halverwege de middag, bij een peil dat 67 cm boven het proefondervindelijk vastgestelde kritische peil lag.

De tweede actie met de Luisterbuis heeft overigens geheel volgens planning plaatsgevonden.

5 Resultaten van de dealexperimenten

Met het Pipingexperiment heeft Stichting IJkdijk samen met SBW (Sterkte & Belastingen Waterkeringen) de mogelijkheid geschapen voor verschillende partijen om dealexperimenten uit te voeren. Net als in het Macrostabilitéxperiment hebben verschillende bedrijven de gelegenheid gekregen om sensorsystemen te installeren in de verschillende proefdijken. In totaal zijn er negen dealexperimenten uitgevoerd en zijn er gegevens beschikbaar vanuit de referentiemonitoring van Deltares. In dit hoofdstuk presenteren de deelnemende bedrijven hun sensortechnologie en de resultaten van de toepassing van hun technologie in het Pipingexperiment. De hier gepresenteerde resultaten en conclusies zijn geschreven door de deelnemende bedrijven zelf. In hoofdstuk 6, Conclusies en discussie, zijn op basis van de deelrapportages door Stichting IJkdijk zelf conclusies geformuleerd over de resultaten van de dealexperimenten.

5.1 Dealexperiment Alert Solutions: GeoBeads Sensornetwerk

Auteurs: Erik Peters en Pepijn van der Vliet

5.1.1 Achtergrond

Na succesvolle beproeving in het IJkdijk Macrostabilitéxperiment in september 2008, zijn GeoBeads in najaar 2009 ingezet om monitoring van het faalmechanisme piping te onderzoeken.

GeoBeads is een meetnetwerk opgebouwd uit een aantal gekoppelde sensormodules om zo een raster van meetlocaties in het dijkvak te realiseren. Elke sensormodule bevat een collectie sensoren die gelijktijdig een complete set parameters waarnemen.

In april 2009 is bij Deltares in een medium-scale labopstelling een serie van pipingproeven uitgevoerd. In enkele van de proeven zijn ook GeoBeads meetinstrumenten ingezet.

Resultaten van deze labproeven bij Deltares gaven goede aanwijzingen voor de bruikbaarheid van de parameters waterspanning en temperatuur voor detectie van het mechanisme. Ook zijn er inzichten vergaard over kansrijke meetconfiguraties (d.w.z. de onderlinge posities van sensoren) en effectieve data-analyse. Ervaringen met de GeoBeads sensormodules in de medium-scale proeven leverden veel informatie voor een bruikbare inrichting bij de IJkdijk pipingexperimenten.

Omdat de kanalen bij piping zich volgens een grillig patroon kunnen vormen is gekozen voor een vrij hoge dichtheid aan meetpunten, met name in de lengterichting van de proefdijk. Dit biedt de mogelijkheid om in een later stadium de dichtheid te reduceren tot een bruikbare configuratie voor monitoring in de praktijk.



5.1.2 Doelstellingen en Resultaat

De doelstellingen van Alert Solutions ten aanzien van het plaatsen van instrumentatie in de IJkdijk pipingexperimenten zijn:

- Bepaling en vervolgens bevestiging van de mate waarin het faalmechanisme piping vroegtijdig gesignaleerd kan worden op basis van waarneming met GeoBeads sensortechnologie.
- Bijdragen aan toetsing van hypothesen en rekenregels ten aanzien van het optreden van het faalmechanisme piping.

De fluctuaties en trends in de waargenomen data worden gekoppeld aan het logboek van de proefuitvoering, visuele waarnemingen en referentiemonitoring.

5.1.3 Meetprincipes

Op basis van eerste analyse van de meetdata uit de medium-schaal proeven werd in de pipingexperimenten gericht op het inzetten en valideren van de volgende meetprincipes:

Waterspanning

Resultaten van zowel de kleine als medium schaal labproeven laten zien dat het verloop van waterspanningsverschillen tussen twee opnemers op beperkte onderlinge afstand geplaatst in de stroomrichting een indicatie kan zijn voor 'voorbijtrekkende' (groeïende) pipingkanalen. Door de opnemers nabij de benedenstroomse teen te plaatsen kan in een relatief vroegtijdig stadium de vorming van kanalen worden gedetecteerd.

Temperatuur

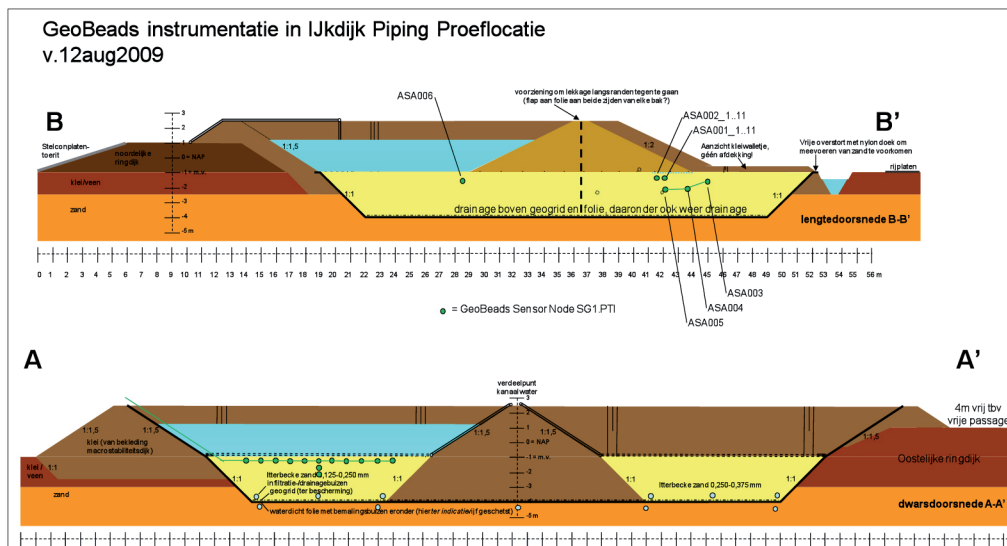
Temperatuurveranderingen kunnen een indicatie zijn voor toenemende waterstroming veroorzaakt door piping. De detectie hiervan zal mede afhankelijk zijn van reeds aanwezige temperatuurgradiënten in het water in de zandlaag. Wij verwachten initiële temperatuurverschillen tussen verschillende dieptes in de zandlaag. Door piping kan water uit diepere lagen dichter naar het oppervlak gaan stromen.

5.1.4 Experiment 1

Meetconfiguratie

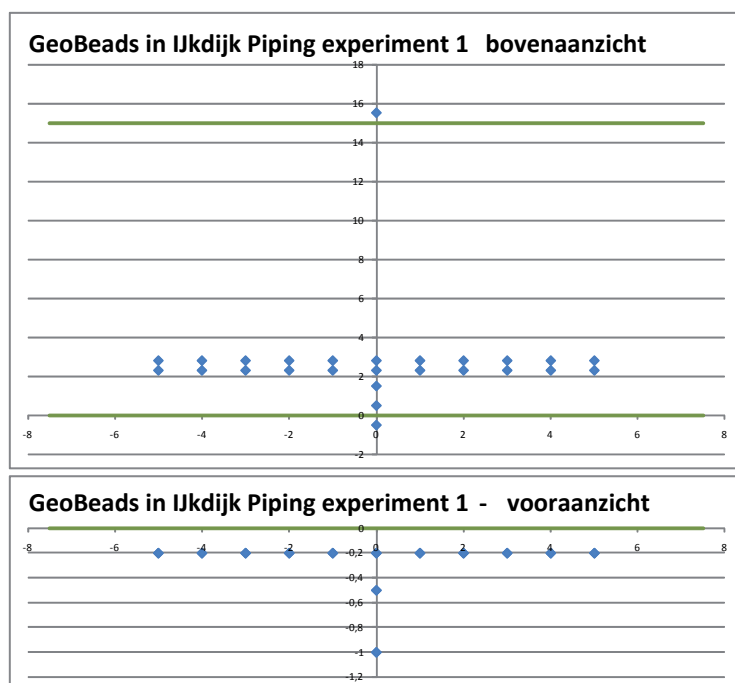
De ketens van sensormodules (voor meting van de parameters waterspanning, temperatuur en beweging (inclinatie)) zijn geplaatst in de zandlaag op 20cm diepte ten opzichte van het oppervlak (zand-klei grensvlak). Het betreft twee parallelle ketens evenwijdig aan het dijklichaam met elk 11 GeoBeads sensormodules geplaatst onder het dijklichaam nabij de teen van de dijk. Onderlinge afstand tussen de twee ketens is 50 cm.

Daarnaast zijn op de middenlijn van de bak op 50 en 100 cm diepte in de zandlaag aan zowel boven- als benedenstroomse zijde in totaal vier GeoBeads sensormodules geplaatst. Voor het overzicht wordt ook verwezen naar Figuren 5.1.1 en 5.1.2.



Figuur 5.1.1 Zij- en vooraanzicht van pipingexperiment 1 locatie

Op elke aangegeven locatie is een GeoBeads sensormodule van type SG1.PTI ingezet, waarbij op elk meetpunt gelijktijdig waterspanning, temperatuur en een indicatie voor beweging (middels hellingshoek) kunnen worden waargenomen.



Figuur 5.1.2 Boven- en vooraanzicht van pipingexperiment 1 locatie

Installatie

De dieper gelegen sensormodules ASA003, 4, 5 en 6 zijn in het droge zandpakket ingegraven op 26 augustus 2009. Na verzadiging van het zandpakket met water (onder vacuümcondities, zie Hoofdstuk 3, Beschrijving proefuitvoering door Deltares), zijn de twee ketens ASA001 en ASA002 ingegraven in het natte zandpakket op 16 september 2009. Er liepen in totaal 4 GeoBeads netwerkkabels de bak uit. Deze zijn op de rand van de bak gekoppeld in een GeoBeads junction box. Één enkele netwerkkabel is naar een aanwezige IJkdijk veldkast geleid, waar deze is aangesloten op een GeoBeads netwerkcontroller. Deze netwerkcontroller is direct in de veldkast op de TNO intranet/internet-switch aangesloten voor dataverzending en remote management (zie Figuur 5.1.3).



GeoBeads Junction Box voor 4 ketens GeoBeads netwerkcontroller direct op ethernet

Figuur 5.1.3 GeoBeads junction box en netwerkcontroller

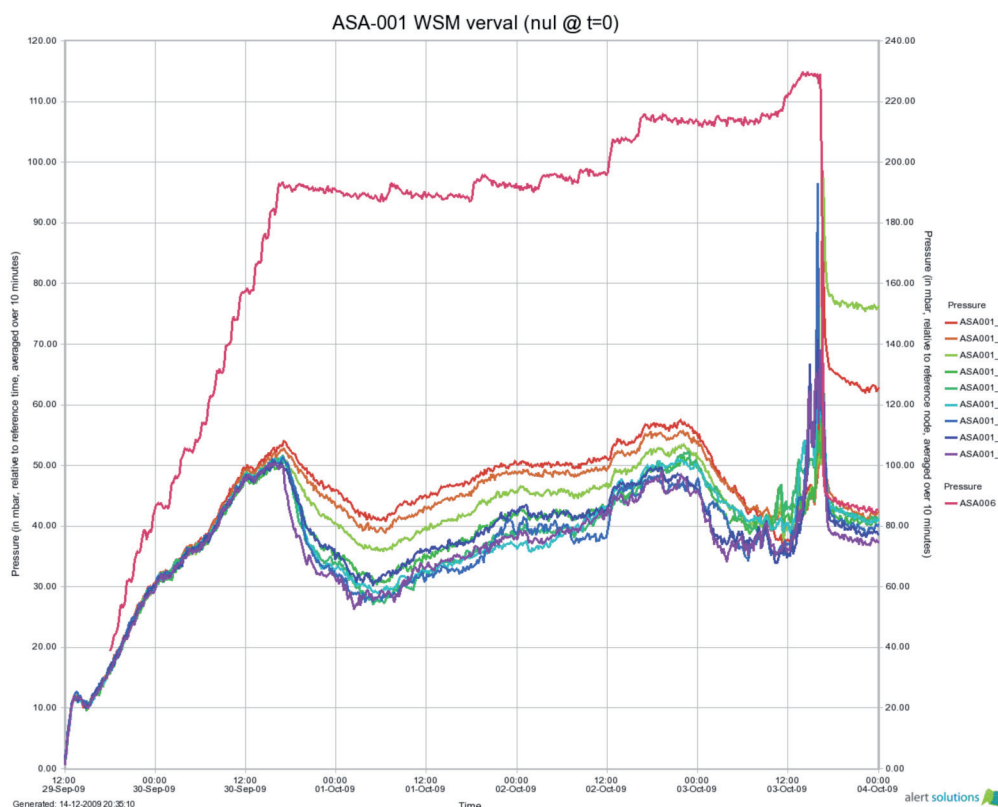
Experimentuitvoering

Pipingexperiment 1 startte op dinsdag 29 september, officieel startmoment 15.00 uur en liep door tot zaterdag 3 oktober, 16.20 uur, wanneer de dijk doorbreekt.

Voor de acties en visuele waarnemingen tijdens de proefuitvoering wordt verwezen naar het 'factual report' van Deltares met daarin opgenomen het logboek van de uitvoering.

Meetfrequentie van alle parameters in alle aangebrachte GeoBeads sensormodules was gedurende het gehele experiment 1x per minuut. Verzending van de data vond live plaats.

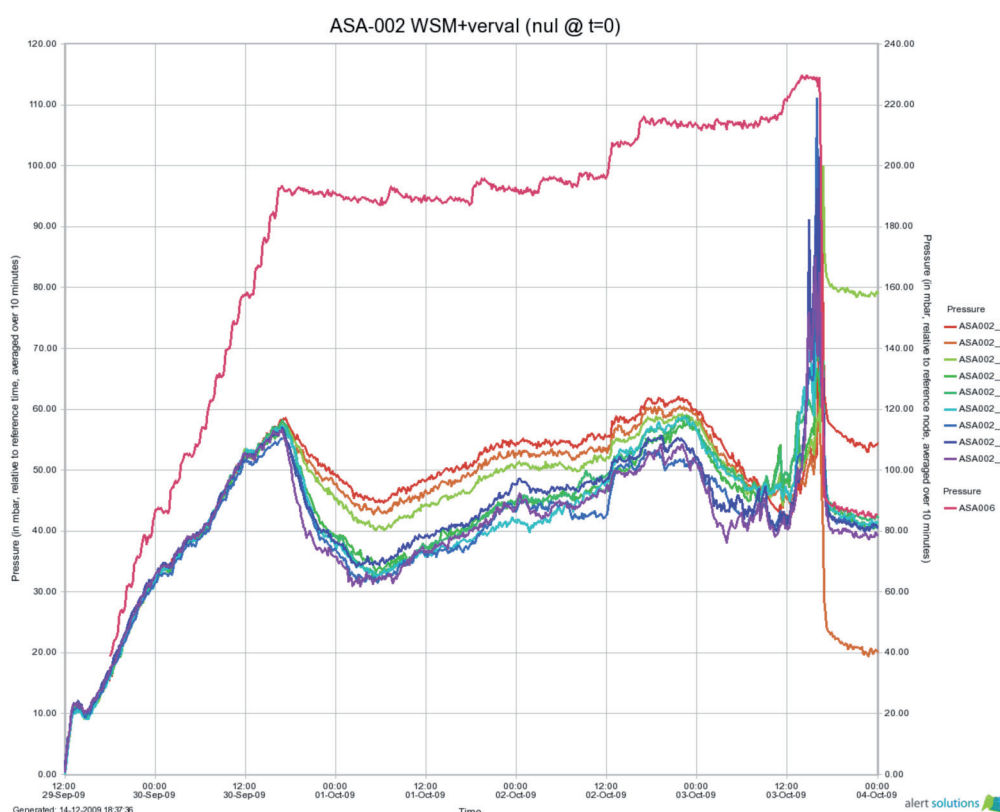
Resultaten



Grafiek 5.1.1 Waterspanningen gemeten door ASA006 en sensorketen ASA-001

- Tijdens experiment 1 werd stapsgewijs het waterniveau aan de bovenstroomse zijde opgehoogd. Met de GeoBeads sensormodule ASA0006 die op 1 meter diepte onder de 'waterbak' is geïnstalleerd is dit waarneembaar.
- De druk onder de dijk bouwde zich op in lijn met het opgebouwde verval. De waterspanningen gemeten met de GeoBeads sensormodules in rij ASA-001 tonen in de eerste fase van het experiment een gelijk verloop met sensormodule ASA006.
- Volgens logboek vindt op 30 september, 13.41 uur de eerste visuele waarneming van een significante zandmeevoerende wel plaats. Rond dit tijdstip wordt in de metingen van de waterspanningen een duidelijke drukverlaging waargenomen. De verlaging vindt op ongeveer hetzelfde moment over de gehele breedte van de dijk plaats. De mate van verandering verschilt wel per meetpositie en kan mogelijk verklaard worden door verschillen in de doorsnede of nabijheid van de kanalen.
- Vanaf 1 oktober 7.00 uur werd het verval weer verder opgebouwd. Onder invloed hiervan zien we na een periode van dalende waterspanningen, deze nu weer oplopen.

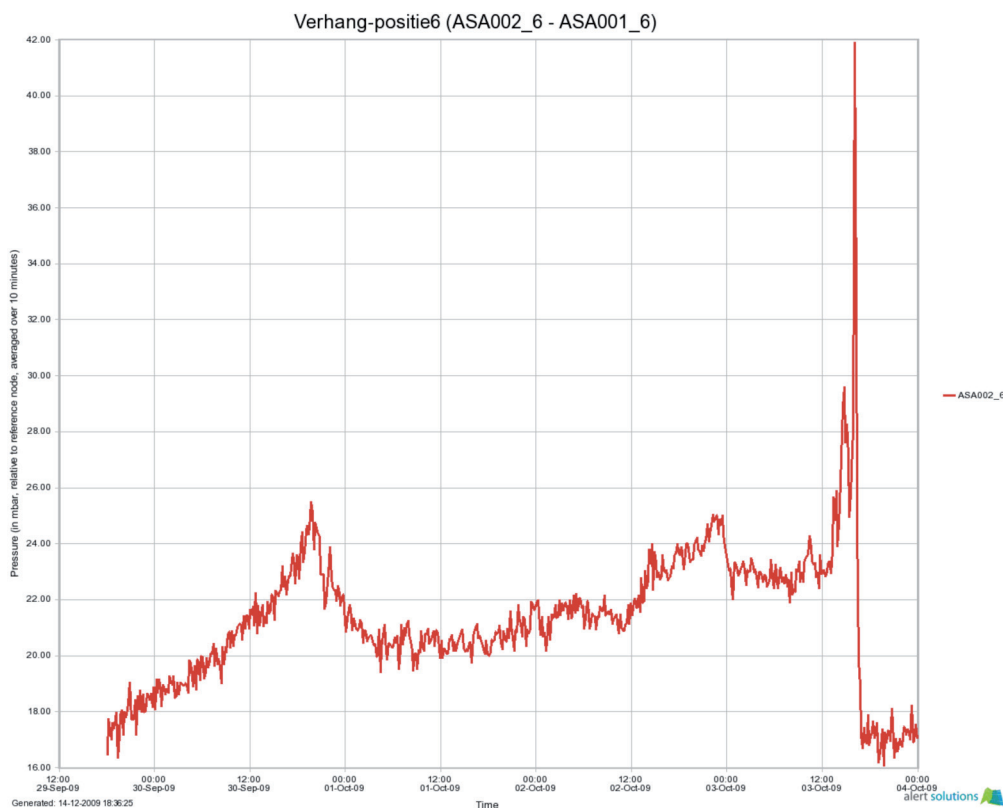
- Vanaf het einde van dag 2 oktober tot laat in de ochtend op 3 oktober, zien we de waterspanningen over een brede lijn dalen. Volgens de logboek aantekeningen, nam de welvorming in de ochtend van 3 oktober ook duidelijk toe. Daarbij ontstaan ook nieuwe wellen.
- De druk neemt sterk toe vlak voor doorbraak. De kanalen hebben op dat moment de bovenstroomse zijde bereikt. Het verval van de bak liep over een kortere weglengte (horizontale afstand kruin bovenstrooms tot teen benedenstrooms in plaats van teen tot teen). Als er daarna ruiming van de kanalen en vervolgens bezwijken van de dijk plaatsvindt vereffent de druk zich overal uiteindelijk met de uitstroomzijde. (Dit vrij naar de verklaring van Deltares over vergelijkbaar drukverloop van referentiewaterspanningsmeters in experiment 1).



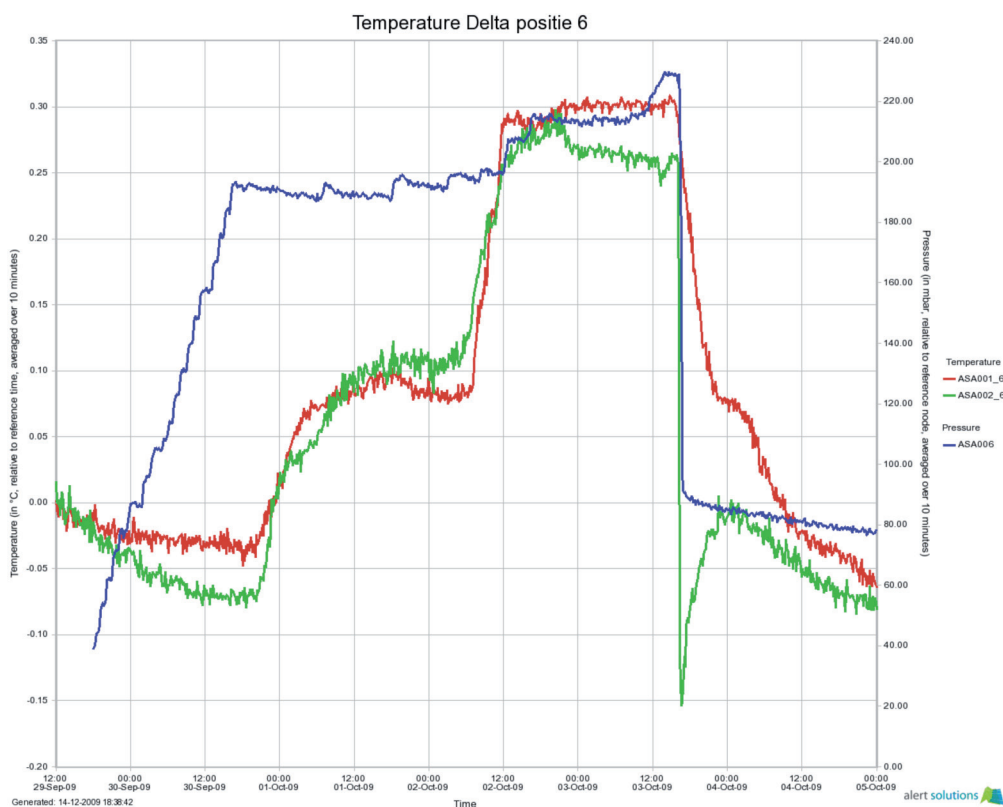
Grafiek 5.1.2 Waterspanningen gemeten door ASA006 en sensorketen ASA-002

De waterspanningen in rij 2 van de GeoBeads sensormodules vertonen een vrijwel identiek verloop als die in rij 1, maar op algeheel hoger drukniveau vanwege een halve meter meer afstand ten opzichte van de benedenstroomse teen.

Het wordt interessant als het drukverschil tussen rij 2 en rij 1 (per meetpositie) in de tijd wordt uit gezet. De verwachting is immers dat een pipingkanaal dat in lengte onder de dijk groeit, een verhoging van drukverschil tussen de rijen geeft als deze tot rij 1 reikt. Vervolgens treedt een afname van het drukverschil op als het kanaaltje rij 2 bereikt. Op deze wijze kon de groei van pipingkanalen gevolgd worden.



Grafiek 5.1.3 Verschil in waterspanningen vs. tijd gemeten door ASA001 en ASA002 op positie 6 (= middenlijn van de dijk)



Grafiek 5.1.4 Op de linker y-as temperatuurverloop van sensormodules rij 1 en 2 op positie 6 (middenlijn) en de rechter y-as de waterspanning van ASA006 (verval over de bak)

Er zijn inderdaad pieken te zien in het waterspanningsverschil tussen rij 1 en 2 van GeoBeads sensormodules onder de dijk. Zo is bijvoorbeeld op 30 september rond 20.00 uur het maximum van een eerste scherpe piek te zien. De scherpe afname is het teken dat het pipingkanaal rij 2 heeft bereikt en verder in bovenstroomse richting doorgroeit. Gedurende het gehele experiment zijn drie duidelijke momenten van piekverschillen te zien. Deze komen overeen met 1) eerste zandmeevoerende welvorming, 2) vergroting zanduitstroom en nieuwe welvorming, 3) ruimproces en bezwijken.

Significante temperatuursveranderingen binnen een beperkte tijdspanne vinden in het zandpakket plaats in dezelfde periodes als waarin de waterspanningspieken zich voordoen. De temperatuursveranderingen kunnen daarmee toegeschreven worden aan de vorming van pipingkanalen. De temperatuursveranderingen ten gevolge van zo'n pipingevenement zijn in de orde van grootte van tienden van graden Celsius, maar zijn zeer goed en onomstotelijk waar te nemen. Hieronder wordt duiding gegeven aan de relatie tussen piping en temperatuurveranderingen. In een zandpakket zonder wellen of piping is de waterdoorstroming relatief gering. De temperatuur zal slechts langzaam variëren onder invloed van externe omstandigheden. Wel zal er een temperatuurgradiënt ontstaan naar diepte, waarbij het warmere water hoger ligt dan het koudere water.

Wanneer zich pipingkanalen vormen wordt er water uit de directe omgeving uit het zandpakket onttrokken om via het kanaal uit te stromen. Vanwege de natuurlijke temperatuurgradiënten van water in het zandpakket is te verwachten dat de vorming van pipingkanalen direct tot temperatuursveranderingen leidt. Deze temperatuurveranderingen zullen zich op kortere tijdschaal afspelen dan de natuurlijke variatie.

Volgend op voorgaande is het voor de detectie van piping met temperatuurmetingen ook niet noodzakelijk dat bijv. rivierwater van een afwijkende temperatuur is dan het water in de dijk. Dit kan ook met de natuurlijke temperatuursverschillen die bestaan als gevolg van wateraanwezigheid op verschillende diepten. Wel moet voor vroegtijdige detectie de meetresolutie dusdanig zijn dat veranderingen van enkele honderdsten van een graad Celsius goed te onderscheiden zijn. De GeoBeads instrumenten hebben in het Pipingexperiment aangetoond dit te kunnen bieden. In grafiek 5.1.4 is elk vakje in verticale richting 0,05 graad Celsius groot.

Vergelijking met waterspanningen referentiemonitoring

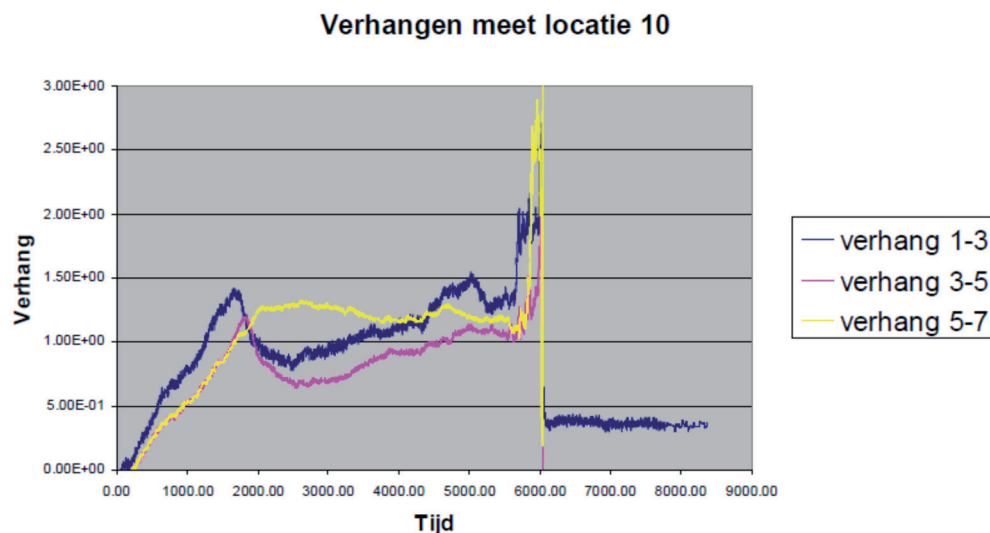
Deltares heeft ten behoeve van de referentie monitoring ook rijen met waterspanningsmeters (WSM's) geplaatst in de lengterichting van de dijk. Deze waren direct op de zand-klei overgang gepositioneerd voor een zo klein mogelijke afstand tot de laag waarin pipingkanalen zich zouden kunnen vormen. GeoBeads rijen ASA001 en ASA002 liggen beide tussen Referentie WSM rijen 2 en 3.



Figuur 5.1.4 Groen lijnen geven locatie aan van GeoBeads ketens, ASA001 links en ASA002 rechts

De rijen met referentie-WSM's geplaatst op de zand-klei interface en tijdens de bouw op de plaats gehouden door kleibroodjes zijn duidelijk zichtbaar.

Referentie WSM rij 1 ligt dicht bij de benedenstroomse teen en geeft dus vrijwel het uitstroomwaterniveau. Het verhang (=verschil) tussen referentie-WSM rijen 1 en 3 vormt dus de meeste directe vergelijking voor de waterspanningsmeters van de GeoBeads rijen.



Grafiek 5.1.5 Verhangen (waterspanningsverschillen) tussen verschillende rijen van Deltares referentie monitoring instrumenten gedurende pipingexperiment 1 (Afkomstig uit het factual report experiment 1 door Deltares.)

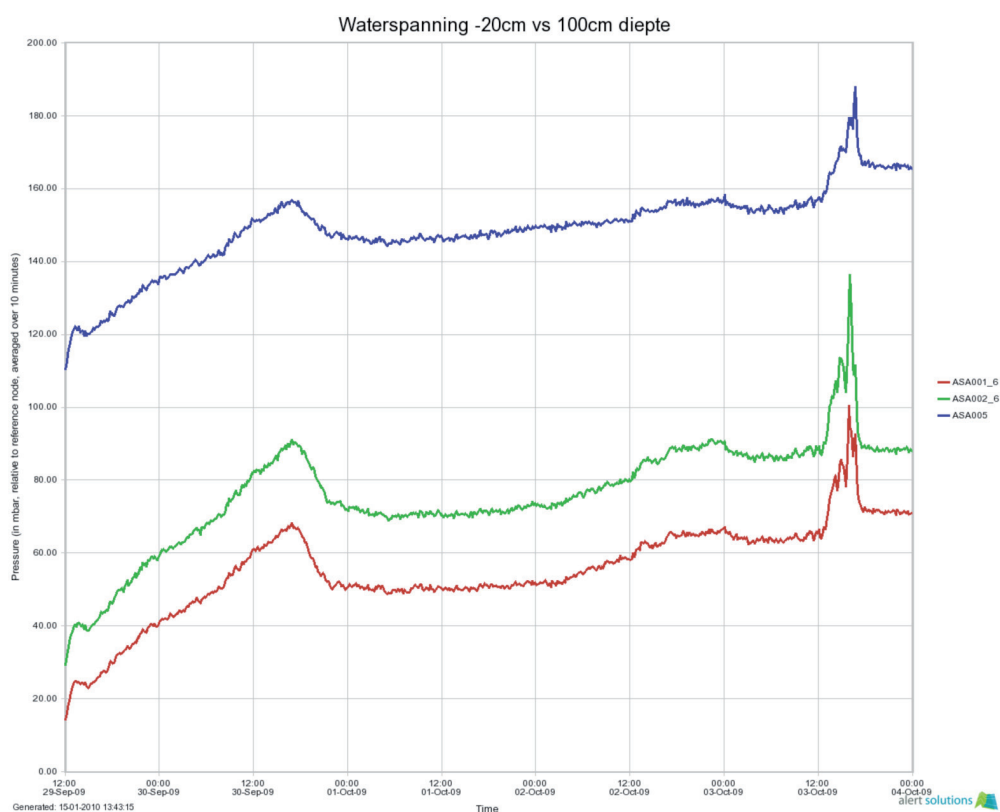
Het verloop gedurende geheel experiment 1 van Verhang 1-3 is zeer vergelijkend met het verloop van GeoBeads waterspanningen in ketens ASA001 en ASA002. Zie ter vergelijking Grafieken 5.1.4 en 5.1.5.

Waarnemingen op 100cm diepte in zandpakket

Tot op welke fysieke afstand kan de kanaalvorming worden gedetecteerd?

De GeoBeads sensoren zaten op 20 cm en 100cm diepte ten opzichte van de zand-klei overgang (daar waar de pipingkanalen zich bevinden). De Deltares sensoren lagen op de overgang (0cm). Eerder is al laten zien dat de respons van de Deltares en GeoBeads metingen op het ontstaan van piping niet wezenlijk van elkaar verschillen. Nu wordt ook de op 100cm geplaatste GeoBeads sensormodule meegenomen in de vergelijking.

Allereerst de respons van de GeoBeads sensormodules ASA001_6, ASA002_6 en ASA005. De eerste twee zijn geplaatst op 20cm diepte ter hoogte van de middenlijn. ASA005 is geplaatst op 100cm inbouwdiepte, op de middenlijn en 150cm binnen de teen. Dit plaatst deze sensor vrijwel onder ASA001_6.



Grafiek 5.1.6 Waterspanningen gemeten door ASA001_6, ASA002_6 en ASA005 gedurende experiment 1

Los van het constante absolute drukverschil tussen ASA005 WSM en de minder diep gelegen rijen is de respons op piping kanaalvorming ook op 100cm nog duidelijk waarneembaar, hetzij iets minder geprononceerd, maar wel duidelijk met hetzelfde profiel. Dit laat zien dat het effect van pipingkanalen ook op behoorlijke afstand in een (goed doorlatende) zandlaag te detecteren is.

Ook de temperatuurrepons op 100cm diepte is onderzocht. Deze respons is ten opzichte van de meting op 20cm echter dusdanig verminderd dat vanuit die waarnemingen in experiment 1 geen duidelijke signalering van pipingevenementen naar boven te halen is.

Conclusies

Op basis van de gemeten waterspanningen kan het ontstaan van pipingkanalen vroegtijdig worden geregistreerd. Een scherpe afname van gemeten waterspanning kon met het logboek direct worden gekoppeld aan het moment waarop duidelijk welvorming zichtbaar was. Deze kanaalvorming kon ook op basis van de temperatuurmetingen worden herleid.

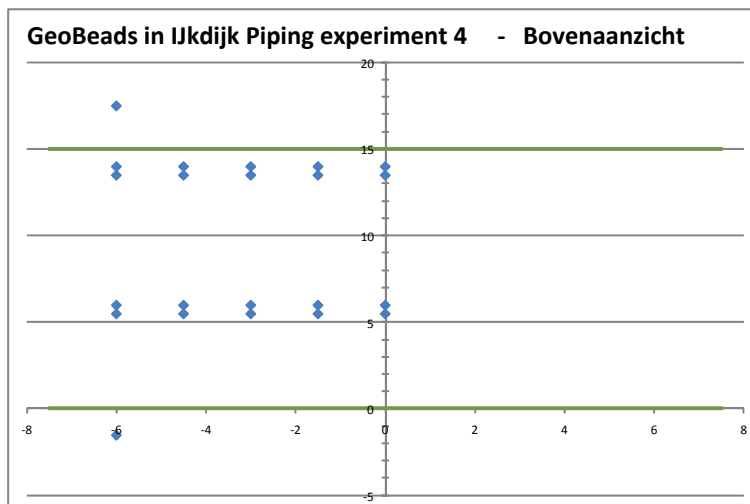
Doordat met twee parallel geplaatste meetrijen is beproefd, kon het verhang tussen twee achter elkaar geplaatste WSM's worden bepaald. Dit verhang liep (scherp) op voorafgaand aan het ontstaan van kanaalvorming. Waarneming van het verhang kan daarmee wellicht meer informatie geven over de mogelijke aanloop naar kanaalvorming.

Ten aanzien van de plaatsing van de meetinstrumenten is het interessant te constateren dat de meetwaarden over de volle breedte van de dijk gelijke bewegingen doormaken. Daarmee kan de vraag worden gesteld of het dichte netwerk van instrumenten benodigd was geweest voor detectie van kanaalvorming. Waarschijnlijk was over de volle breedte van de proefdijk ook met 1 of 2 sensormodules kanaalvorming geregistreerd. Daarnaast is op basis van specifieke diepteplaatsing van de GeoBeads sensormodules waargenomen dat ook een dieper gelegen sensormodule (tot 100cm van de zand/klei overgang) het ontstaan van kanaalvorming goed kan detecteren. Bij het plaatsen van sensormodules lijkt daarmee de precieze afstand tot de klei/zand overgang minder kritiek, wat voor praktische inzetbaarheid van meetssystemen in het veld een goed uitgangspunt geeft.

5.1.5 Experiment 4

Meetconfiguratie

De ketens van GeoBeads sensormodules (voor meting van de parameters waterspanning, temperatuur en beweging (inclinatie)) zijn geplaatst in de zandlaag op 20cm diepte ten opzichte van het oppervlak (zand-klei grensvlak). Het betreft twee groepen van 2 parallelle ketens evenwijdig aan het dijklichaam met elk 5 GeoBeads sensormodules geplaatst onder de westelijke helft van de proefdijk. Onderlinge afstand tussen de twee ketens binnen een groep is 50 centimeter, overeenkomstig met experiment 1. Daarnaast is aan weerszijden van de proefdijk in het zand op 20cm diepte nog een enkele sensormodule geplaatst om het aangebrachte verval over de bak te monitoren gedurende de proefuitvoering.



Figuur 5.1.5 Posities van GeoBeads sensormodules in piping experiment 4

Installatie

Bij experiment 4 zijn alle GeoBeads sensoren in het droge zandpakket voor verzadiging ingegraven op 20cm diepte in het zandpakket. Dit is uitgevoerd op 9 november 2009.

Gelijk aan experiment 1 kwamen er in totaal 4 GeoBeads netwerkkabels de bak uit. Deze zijn op de rand van de bak gekoppeld in de GeoBeads junction box. Één enkele netwerkkabel is naar een aanwezige IJkdijk veldkast geleid, waar deze is aangesloten op de GeoBeads netwerkcontroller. Deze netwerkcontroller is direct in dezelfde veldkast op de TNO intranet/internetswitch aangesloten voor dataverzending en remote management.

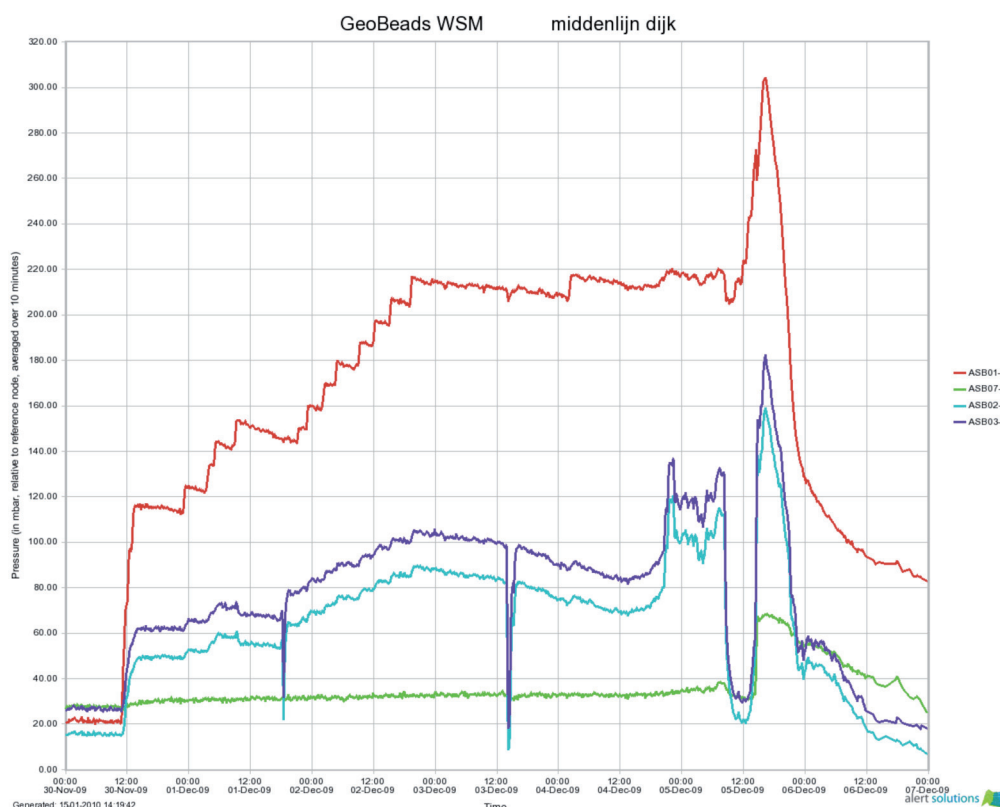
Experimentuitvoering

Pipingexperiment 4 is gestart op maandag 30 november 2009 en liep door tot zaterdagmiddag 5 december, wanneer de dijk als bezwiken werd bestempeld.

Meetfrequentie van alle parameters in alle aangebrachte GeoBeads sensormodules was gedurende het gehele experiment 1x per minuut. Verzending van data vond live plaats.

Resultaten

Net als in de behandeling van experiment 1 wordt eerst de waterspanning door het gehele experiment heen bekeken om een beeld te krijgen van het aangebrachte verval over de proefdijk en voor een eerste blik op mogelijke periodes waarin zich pipingkanalen zich zijn gaan vormen.

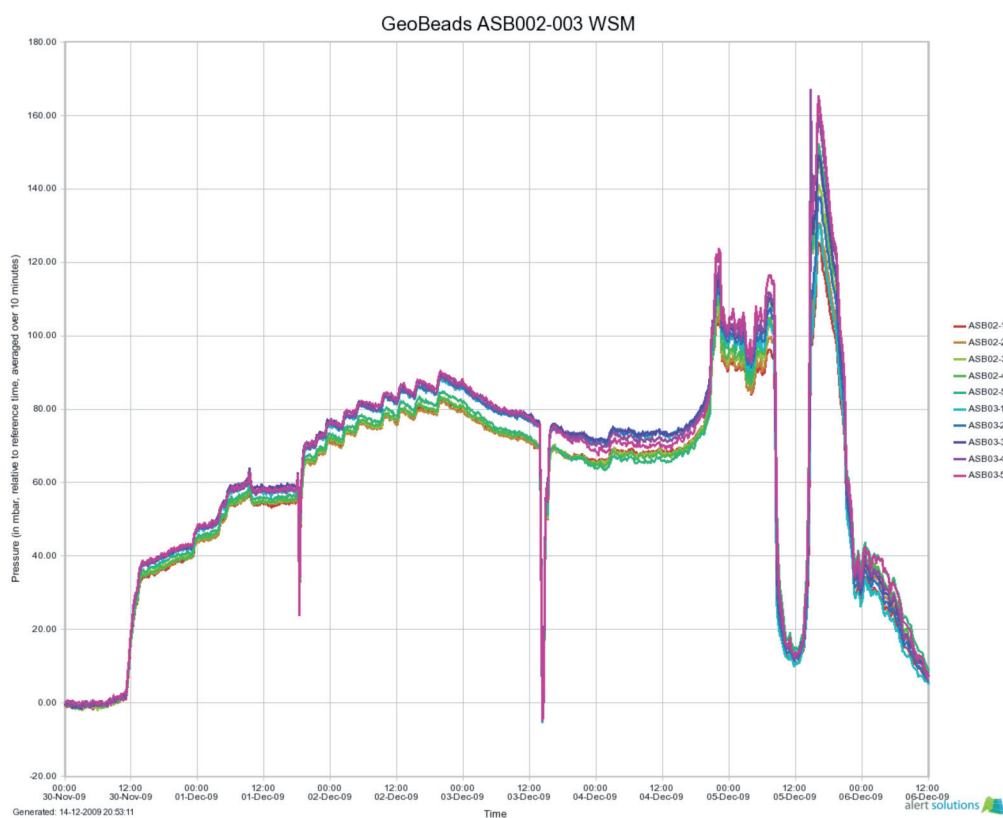


Grafiek 5.1.7 Waterspanning gedurende experiment 4 van ASB01 (aangebracht niveau in de bak), ASB007 (niveau uitstroomzijde) en ASB02_5 en ASB03_5, respectievelijk de GeoBeads modules in rij 2 en rij 3 ter hoogte van de middenlijn van de proefdijk

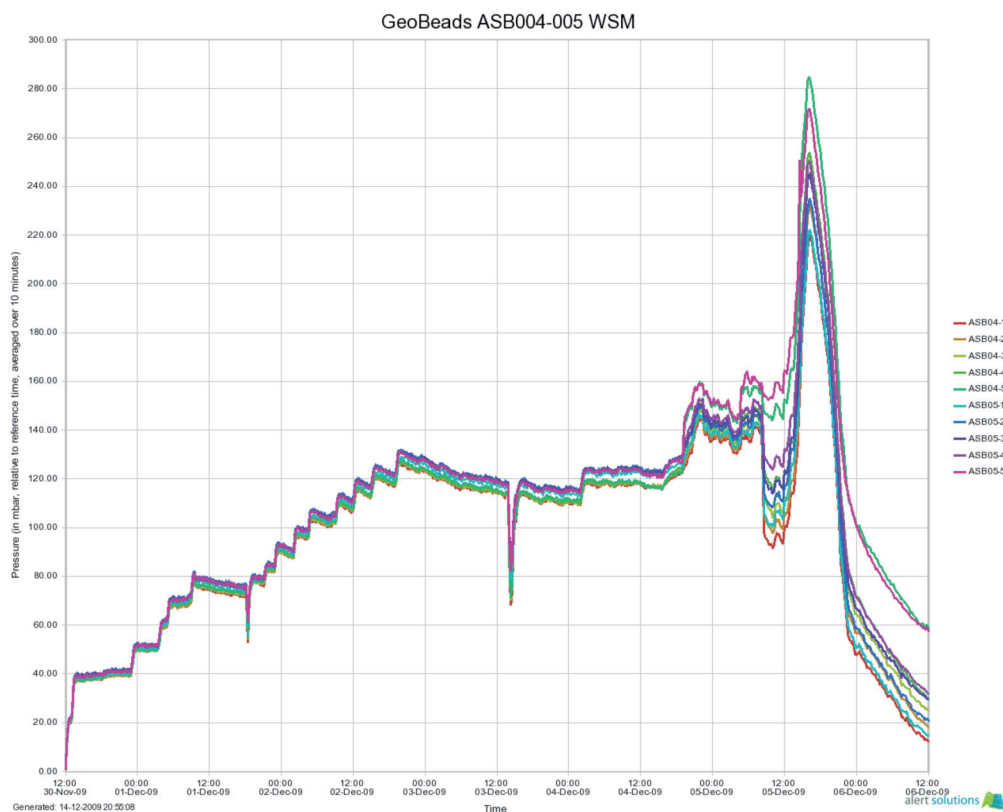
Wederom is de proefuitvoering van het aangebrachte verval goed volgen (rode lijn). Het waterniveau in het uitstroombassin is van constant niveau tot aan de uiteindelijke doorbraak (groene lijn). Het waterspanningsverloop van de sensoren in de zandlaag onder de dijk laat weer periodes zien van afname, maar dit is minder scherp afgetekend en verloopt geleidelijker dan in experiment 1 waarneembaar was.

De twee korte pieken van scherpe daling zijn de momenten in de proefuitvoering dat de Luisterbuis in het zandpakket actief werd gebruikt (al dan niet gepland) om water te onttrekken aan de zandlaag en de waterspanning te verlagen. Dit laatste is duidelijk gelukt. De waterspanning herstelde zich snel weer na sluiten van de Luisterbuis.

De derde keer dat de Luisterbuis voor bovenstaand doeleinde is ingezet was op 5 december rond het middaguur voor een duur van enkele uren. Kort na het dichtzetten kon de ruiming van pipingkanalen doorzetten in een dusdanige mate dat dit uiteindelijk op 5 december in de middag tot een bezwijking van de dijk leidde.



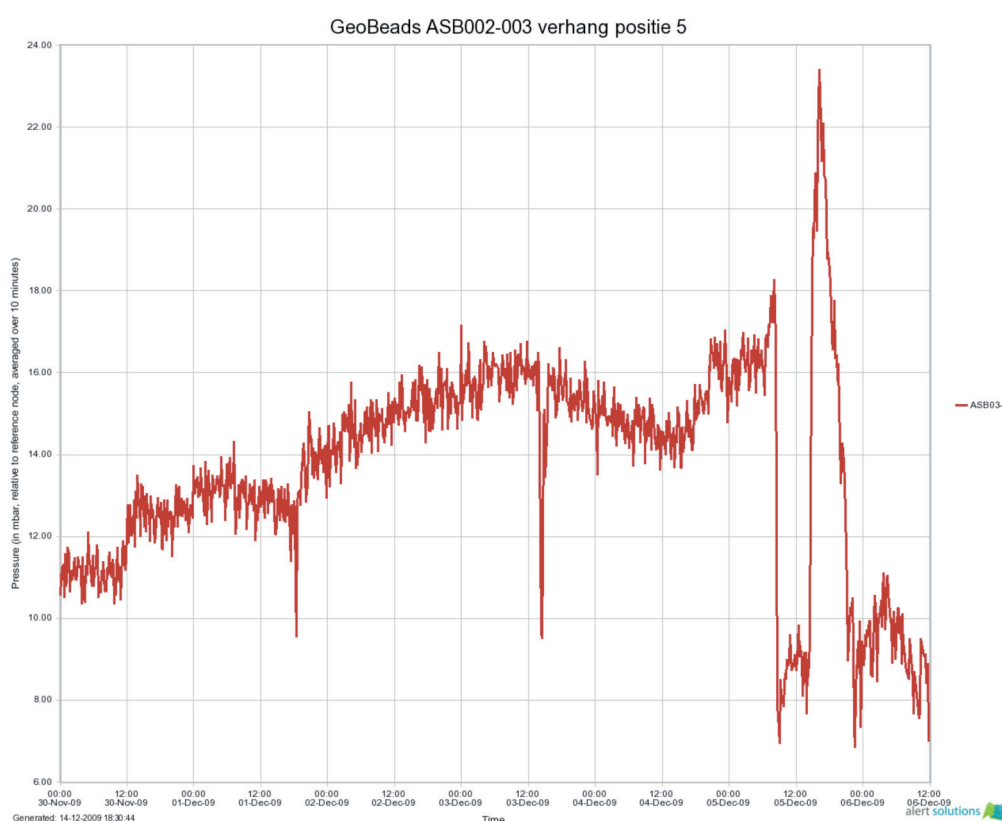
Grafiek 5.1.8 Waterspanningsverloop van alle GeoBeads in rijen 2 en 3



Grafiek 5.1.9 Waterspanningsverloop van alle GeoBeads in rijen 4 en 5

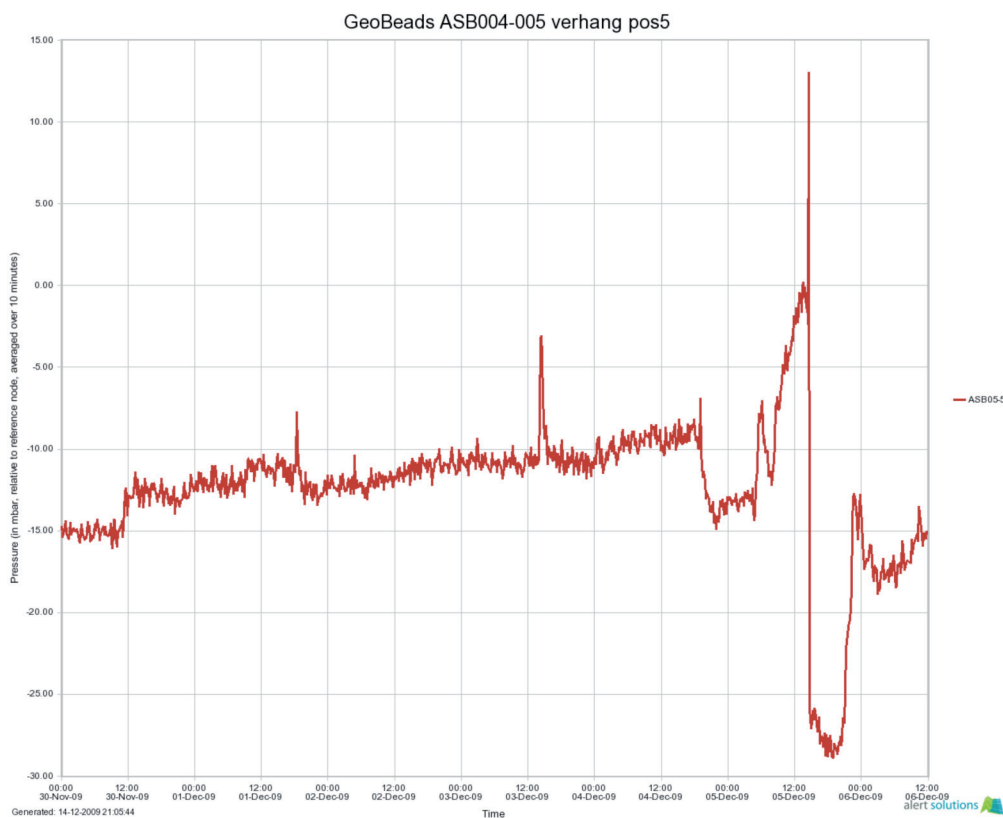
Het drukverschil tussen opeenvolgende rijen door toenemend verval over de bak is goed waarneembaar. Het verloop van waterspanning is overal onder de dijk, die in dit experiment vrij uniform van opbouw is, vrijwel identiek. Alleen in de directe aanloop naar de bezwijking ontstaan duidelijke verschillen in respons tussen de posities. Ook bij de laatste Luisterbuis-pompactie is duidelijk te zien dat de sensoren helemaal aan de rand van de bak weinig waterspanningsverlaging vertonen.

Net als bij experiment 1 wordt met name weer naar de drukverschillen tussen twee opeenvolgende rijen WSM's gekeken om groeiende pipingkanalen te detecteren. Lokale maxima (pieken) in dit verschil treden op bij langstrekende kanalen.

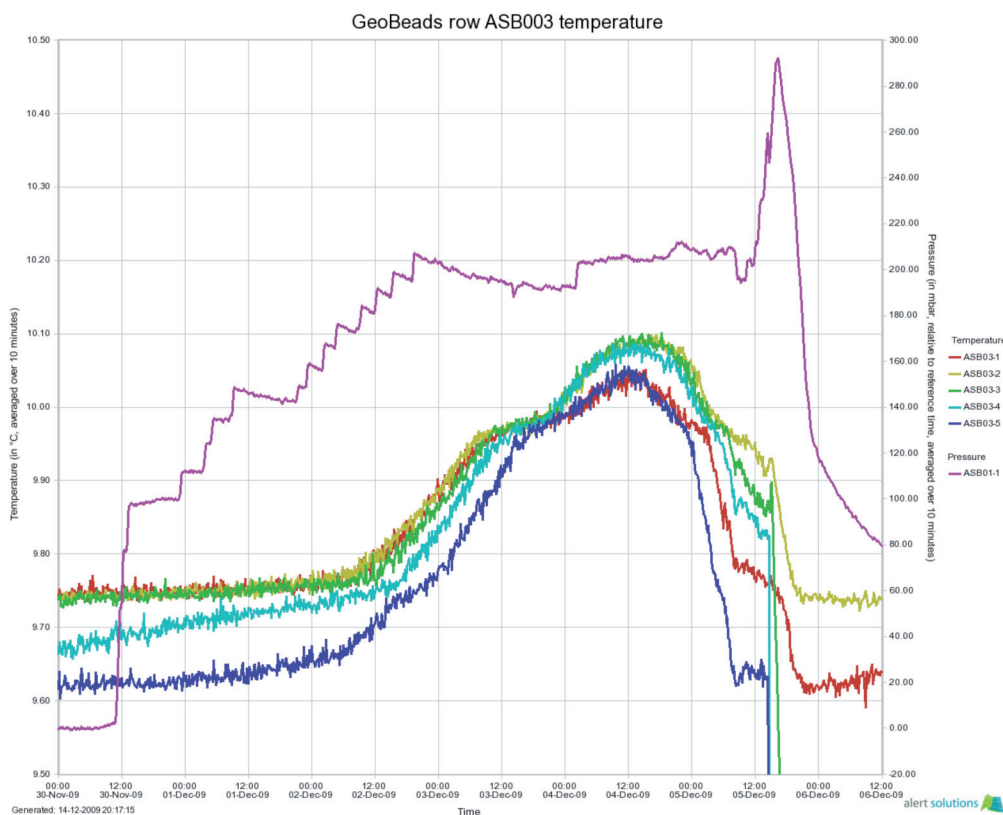


Grafiek 5.1.10 Verschil in waterspanning tussen rij ASB02 en ASB03 op positie 5 (middenlijn)

In het verhang tussen rij 2 en 3 zijn weer pieken (maxima) terug te zien op relevante momenten, ook al zijn ze minder scherp dan in experiment 1. Dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat in dit experiment de sensoren zich op enige horizontale afstand van de locaties bevonden waar de meest prominente zandmeevoerende wellen en pipingkanalen ontstonden. De GeoBeads sensoren bevonden zich in de westelijk helft terwijl de bezwijking van de dijk plaatsvond in de oostelijk helft. Niettemin heeft de respons wel een signatuur die overeenkomt met het plaatsvinden van piping.



Grafiek 5.1.11 Verschil in waterspanning tussen rij ASB04 en ASB05 op positie 5 (middenlijn)



Grafiek 5.1.12 Temperatuurverloop rij ASB03 tijdens experiment 4

Rijen ASB04 en ASB05 bevinden zich vrij dicht bij de bovenstroomse zijde van de dijk. De pipingkanalen groeien pas laat in het proces tot deze positie. Vandaar dat er geheel in lijn met verwachting in het eerste gedeelte van de proefuitvoering op deze posities geen pieken in het verhang worden waargenomen. Wel detecteren we natuurlijk de kortstondige 'Luisterbuis pieken'.

Pas later in het experiment zien we het verschil tussen rij 4 en 5 oplopen, waarna het ruimproces en bezwijking volgen.

In experiment 4 zien we net als in experiment 1 weer de stijging van temperatuur in het zandpakket op specifieke momenten terug. Deze tijdstippen komen overeen met de periodes waarin we de pieken in verhang tussen rij 3 en 2 signaleren. Net als het verhang is het temperatuurverloop minder scherp dan in experiment 1. Niettemin lijkt het een indicatie te geven voor kanaalvorming door piping.

Vergelijking met referentiemonitoringwaterspanningen

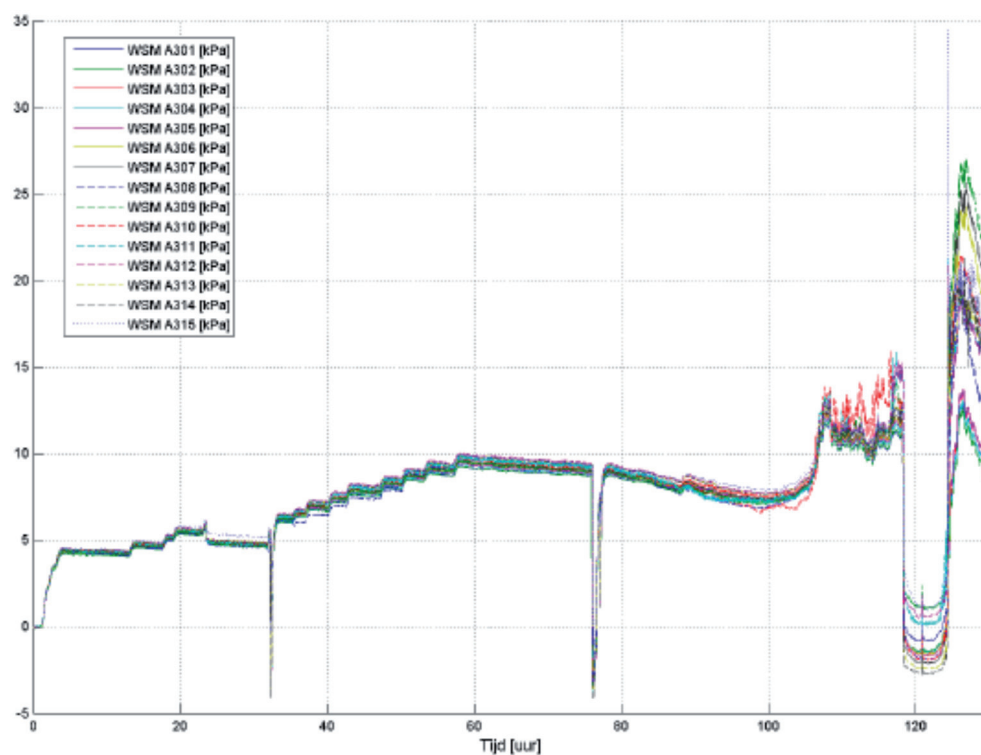
Deltares heeft ten behoeve van referentiemonitoring ook in experiment 4 weer rijen met waterspanningsopnemers (WSM's) geplaatst in de lengterichting van de dijk. Deze waren direct op de zand-klei overgang gepositioneerd voor een zo klein mogelijke afstand tot de laag waarin pipingkanalen zich zouden kunnen vormen.

Referentiemonitoring rij B-3 ligt nabij GeoBeads rijen ASA002 en ASA003.

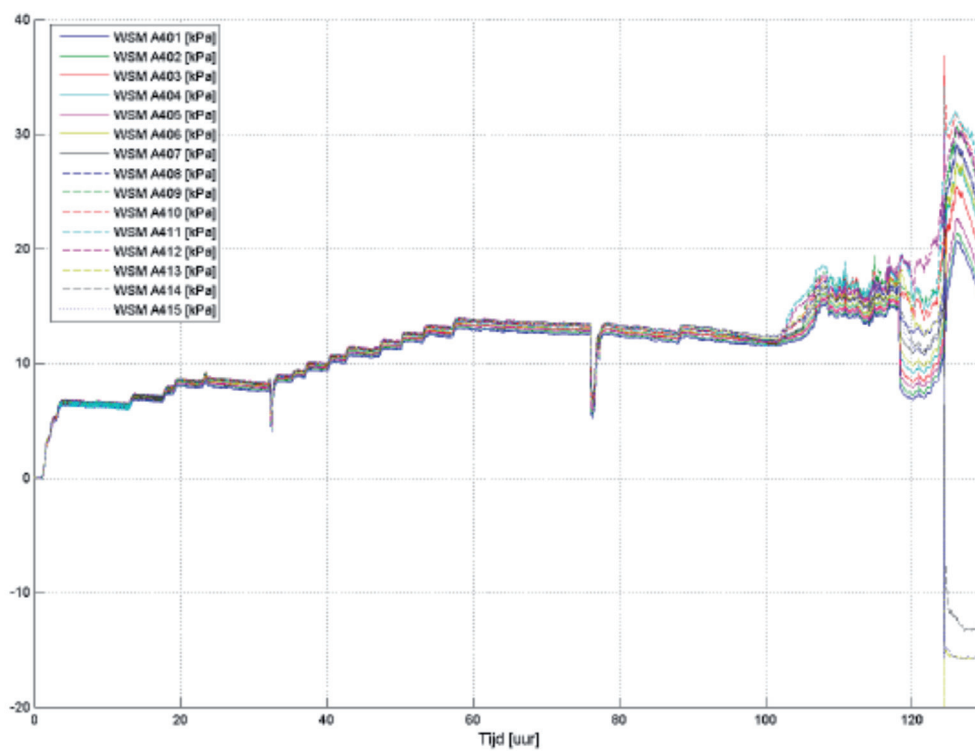
Referentie rij B-4 ligt in de richting van GeoBeads rijen ASA004 en ASA005, al liggen de GeoBeads nog zo'n 4,5 meter verder naar de bovenstroomse zijde. Voor de exacte posities verwijzen wij naar de Deltares instrumentatietekening van experiment 4.

Vergelijking van Grafiek 5.1.8 met Grafiek 5.1.13 en Grafiek 5.1.9 met 5.1.14 laat zien dat het verloop van de referentie monitoring zeer sterk overeenkomt met het verloop van de GeoBeads waterspanningen gedurende de gehele proefuitvoering.

Daarbij kan opgemerkt worden dat ook bij experiment 4 de signatuur die waterspanningsverschillen vertonen bij vorming van pipingkanalen over de gehele breedte van de proefdijk waarneembaar zijn, dus ook op enige afstand van de meest prominente kanalen die uiteindelijk tot bezwijken van de dijk hebben geleid. Deze lagen namelijk aan de rechterzijde van de proefdijk, waar in experiment 4 geen GeoBeads modules geplaatst waren.



Grafiek 5.1.13 Waterspanningen van Deltares referentiemonitoringinstrumenten rij 3 gedurende pipingexperiment 4 (Afkomstig uit het factueel report experiment 4 door Deltares.)



Grafiek 5.1.14 Waterspanningen van Deltares referentiemonitoringinstrumenten rij 4 gedurende pipingexperiment 4 (Afkomstig uit het factueel report experiment 4 door Deltares.)

5.1.6 Algehele beschouwing

- De GeoBeads waterspanningsmetingen en temperatuurmetingen – met de daarin tijdens de experimenten naar voren komende veranderingen en fluctuaties – zijn goede indicatoren voor het ontstaan van pipingkanalen. De metingen geven een beeld dat vergelijkbaar is met de referentie monitoring.
- Alle GeoBeads sensormodules hebben zonder uitzondering goed gefunctioneerd. Alle verrichte metingen zijn zonder onderbrekingen uitgevoerd en continu zonder vertragingen tijdens de experimenten eenmaal per minuut binnen gekomen.
- In pipingexperiment 1 treedt kanaalvorming op over de volle breedte van de uniform opgebouwde proefdijk. Grote dichtheid van het aantal sensormodules is daarom in een dergelijke situatie niet strikt noodzakelijk voor detectie van het pipingfenomeen. Ook pipingexperiment 4 laat zien dat de vorming van pipingkanalen op alle geïnstrumenteerde posities in het zandpakket waarneembaar is.
- Meetresultaten op verschillende dieptes ten opzichte van de zand-klei overgang (0cm, +/- 20cm en +/- 100cm) geven vergelijkbare resultaten. De pipingkanalen zijn op enige afstand van de zand-klei overgang doeltreffend te volgen mits sensoren in een goed doorlatende (zand)laag zijn geplaatst.
- Een meetraai in de lengterichting en aan de teen van de dijk is een goede positie om kanaalvorming vroegtijdig te detecteren.
- Het plaatsen van een tweede meetraai parallel aan de eerste, kan een scherpere detectie leveren en informatie over de groeisnelheid van kanalen. Daarbij is de veranderingen in het verhang tussen twee achter elkaar geplaatste sensormodules in de dwarsrichting op de dijk de relevante parameter.
- Ook temperatuurverloop heeft potentie als indicator voor het ontstaan van pipingkanalen. De met de pipingkanalen tot stand gebrachte waterstromingen zorgen voor een herverdeling of vermenging van de aanwezige temperatuurgradiënten in het daarvoor stilstaande grondwater in het zandpakket. De correlatie tussen temperatuurverloop en pieken in het waterspanningverhang tonen dat het verloop plaatsvindt op momenten dat de vorming van pipingkanalen het meest prominent is.

5.1.7 Volgende stappen

Alert Solutions is geïnteresseerd in het benutten van de vergaarde meetdata om de relatie naar de gangbare rekenregels voor piping te leggen. De mogelijkheden hiertoe zullen in de komende periode nader worden beschouwd.

Nadere analyse van de meetresultaten zal ook worden gericht op het bepalen van de dichtheid van meetpunten, die nodig is wanneer een kering voor detectie van piping zou moeten worden uitgerust. Met de reeds opgedane ervaring in het plaatsen van GeoBeads sensormodules in het veld zou een praktijkproef in het land zich lenen voor het verder uitbouwen van de ervaringen.

Stichting

IJkdijk

5.2 Deelexperiment DikeSurvey

Auteur: Ing. W.M. Hauptmeijer en Ing. M. Th. van Kelegom

5.2.1 Korte beschrijving van DikeSurvey v.o.f.

DikeSurvey is een bedrijf dat zich richt op het detecteren van bewegingen en trillingen in bodem en grondlichamen. Voor het project van de IJkdijk is DikeSurvey een samenwerkingsverband aangegaan met Lightspeed Systems, leverancier van detectiesystemen.

In deze fase van bedrijfsvoering richt DikeSurvey zich op innovatie en ontwikkeling van het detectiesysteem.

5.2.2 Doelstelling bij deelname aan het Pipingexperiment

Analyse

Het al of niet optreden van piping hangt af van:

- het aanwezig zijn van een pipinggevoelige grondopbouw
- de eigenschappen van het zand
- de dikte van de zandlaag
- het verval over de waterkering
- de kwelweglengte

Volgens de voorlopige analyse van Deltares, bij de uitvoering van kleinschalige laboratoriumproeven, zijn als eigenschappen van het zand vooral de dichtheid en de grootte van de maatgevende korrel van belang waarbij wordt opgemerkt dat de korreldiameter van grote invloed is op de doorlatendheid van het zandpakket.

Doelstelling

Gegeven de bovenstaande problematiek worden bij het pipingexperiment 4 experimenten uitgevoerd. Voor deze experimenten heeft DikeSurvey de volgende doelstelling geformuleerd:

De experimenten bij het Pipingexperiment geven onder wisselende omstandigheden inzicht in:

- de data die het systeem oplevert
- de betekenis van deze data

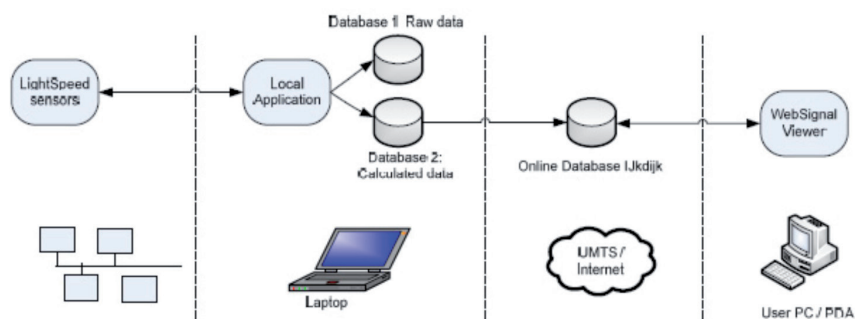
5.2.3 Instrumentatie

Systematiek

Uitvoering van de pipingexperimenten is gebeurd onder auspiciën van Stichting IJkdijk op de locatie van de IJkdijk te Bellingwolde.

Met betrekking tot het Pipingexperiment heeft DikeSurvey per experiment een compleet pakket ingezet voor het monitoren en detecteren van bewegingen en trillingen in en rond het dijklichaam. Voor de experimenten 1 en 4 bestond het product van DikeSurvey/Lightspeed per experiment uit 10 detectiekabels en 10 detectie-units. In de controlekamer was een laptop met een GPRS/UMTS-box geplaatst voor de verbinding met de server. Op deze server draaide een Webapplicatie gebaseerd op Sensor Web Enablement (SWE) volgens de Europese INSPIRE-standaard (zie Figuur 5.2.1). De gebruikte internettechnologie is geleverd door de firma Real Detection uit Holten.

Als detectiekabel wordt een blokjeskabel gebruikt. De kerndraad is van nylon met een diameter van 2 mm. Om de centimeter is een kunststofblokje om de kabel bevestigd met een diameter van 6 mm en een lengte van 10 mm. Aan weerszijden van deze blokjeskabel is de feitelijke gladde detectiekabel bevestigd. Het geheel heeft een doorsnede van 9 mm. Deze constructie is gekozen om een maximale mechanische gevoeligheid te bereiken. De detectiekabel vormt samen met de detectie-unit de kern van het detectiesysteem. Dit systeem werkt op basis van optische detectie. Bij optische detectie dient de volledige lengte van de kabel -door middel van de aanwezige kunststofblokjes- als sensor. Er wordt continu licht door de kabel (de optische geleider) gestuurd. Aan het eind wordt het licht ontvangen en voortdurend vergeleken met het signaal dat aan het begin is verstuurd. Bij mechanische vervorming van de kabel vindt detectie plaats. Het gebruikte detectiesysteem is geleverd door de firma Lightspeed uit Asten.



Figuur 5.2.1 Technisch ontwerp van het monitoringssysteem

Positie

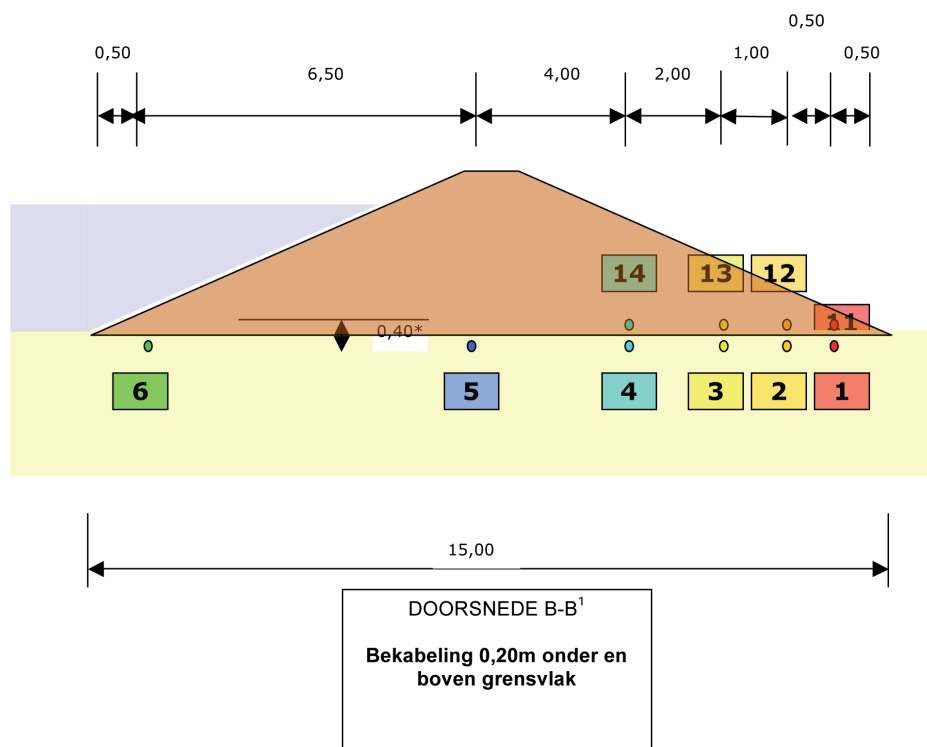
DikeSurvey heeft aan twee van de vier experimenten deelgenomen.

In onderstaande tabel is per experiment het aantal en de positie van de detectiekabels aangegeven, zoals ze daadwerkelijk zijn aangebracht.

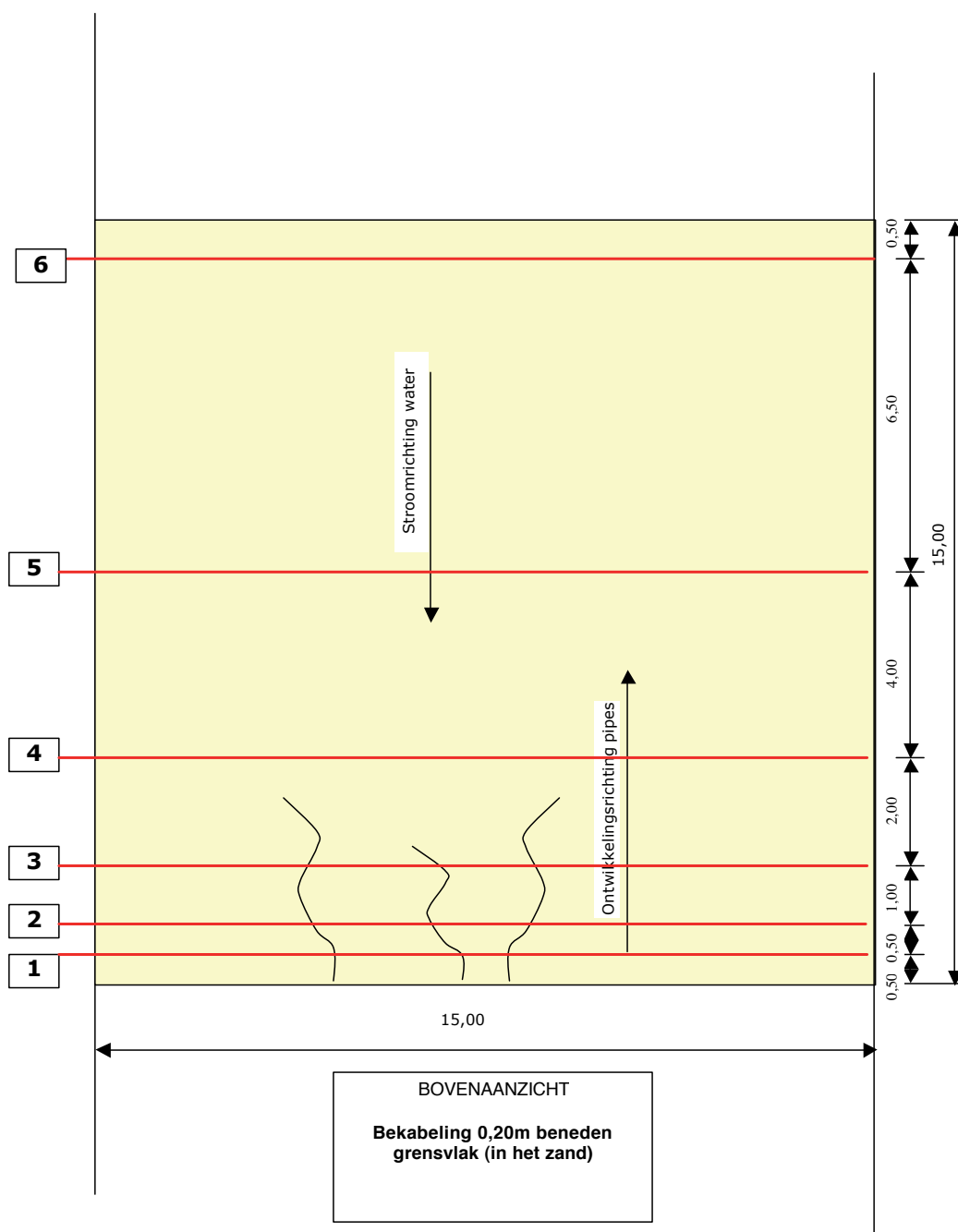
Experimentnr.	Aantal detectiekabels	Positie	Afstand t.o.v. grensvlak klei/zand
1	10	4 stuks in kleilichaam en 6 stuks in zandlichaam	In klei 20 cm boven en in zand 20 cm beneden het grensvlak
4	10	4 stuks in kleilichaam en 6 stuks in zandlichaam	In klei 20 - 50 cm boven en in zand 5 cm beneden het grensvlak

In Figuur 5.2.2 is de ligging van de detectiekabels in experiment 1 in drie deelfiguren aangegeven.

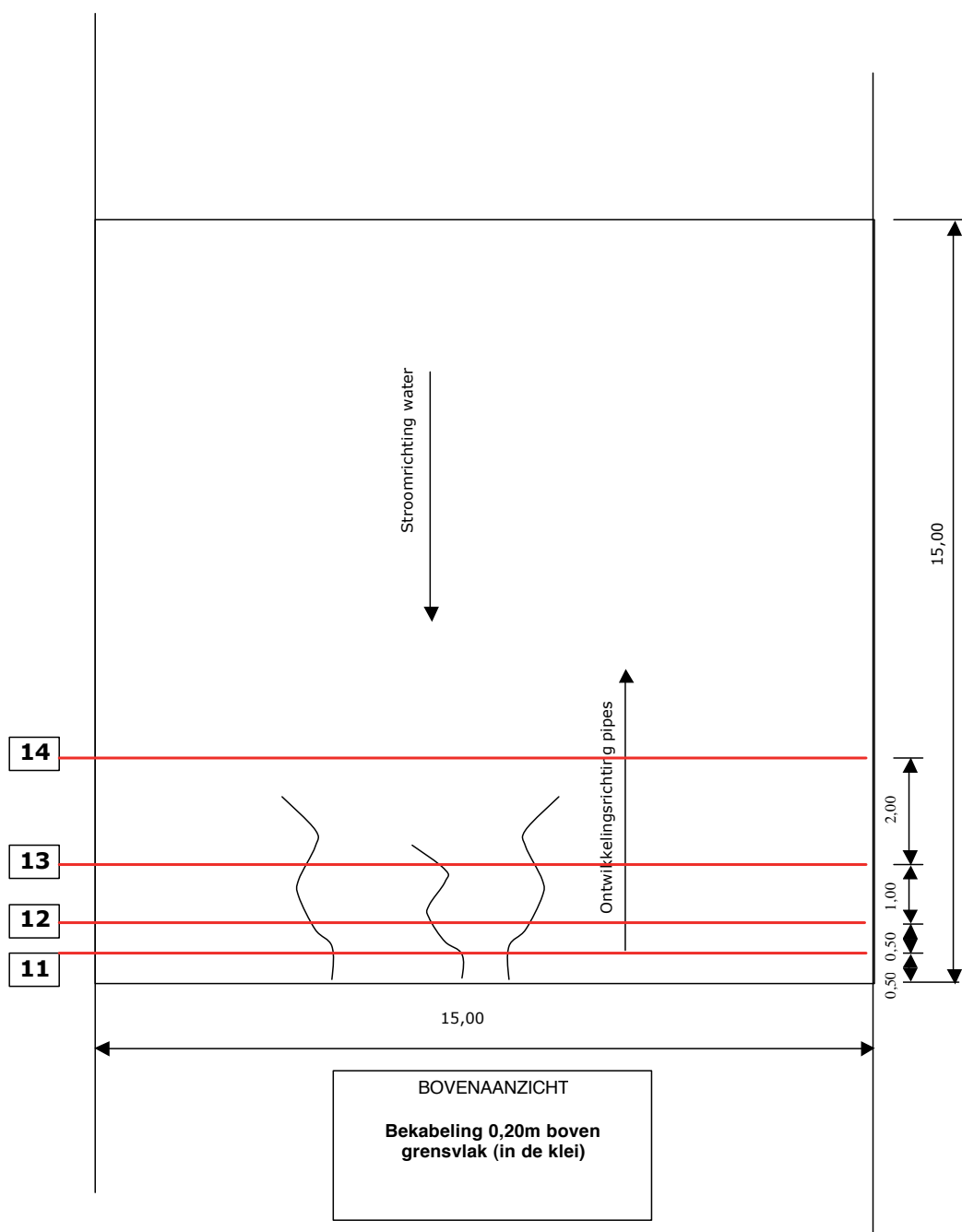
In Figuur 5.2.3 is de ligging van de detectiekabels in experiment 4 in twee deelfiguren aangegeven.



Figuur 5.2.2 Bekabeling pipingexperiment 1

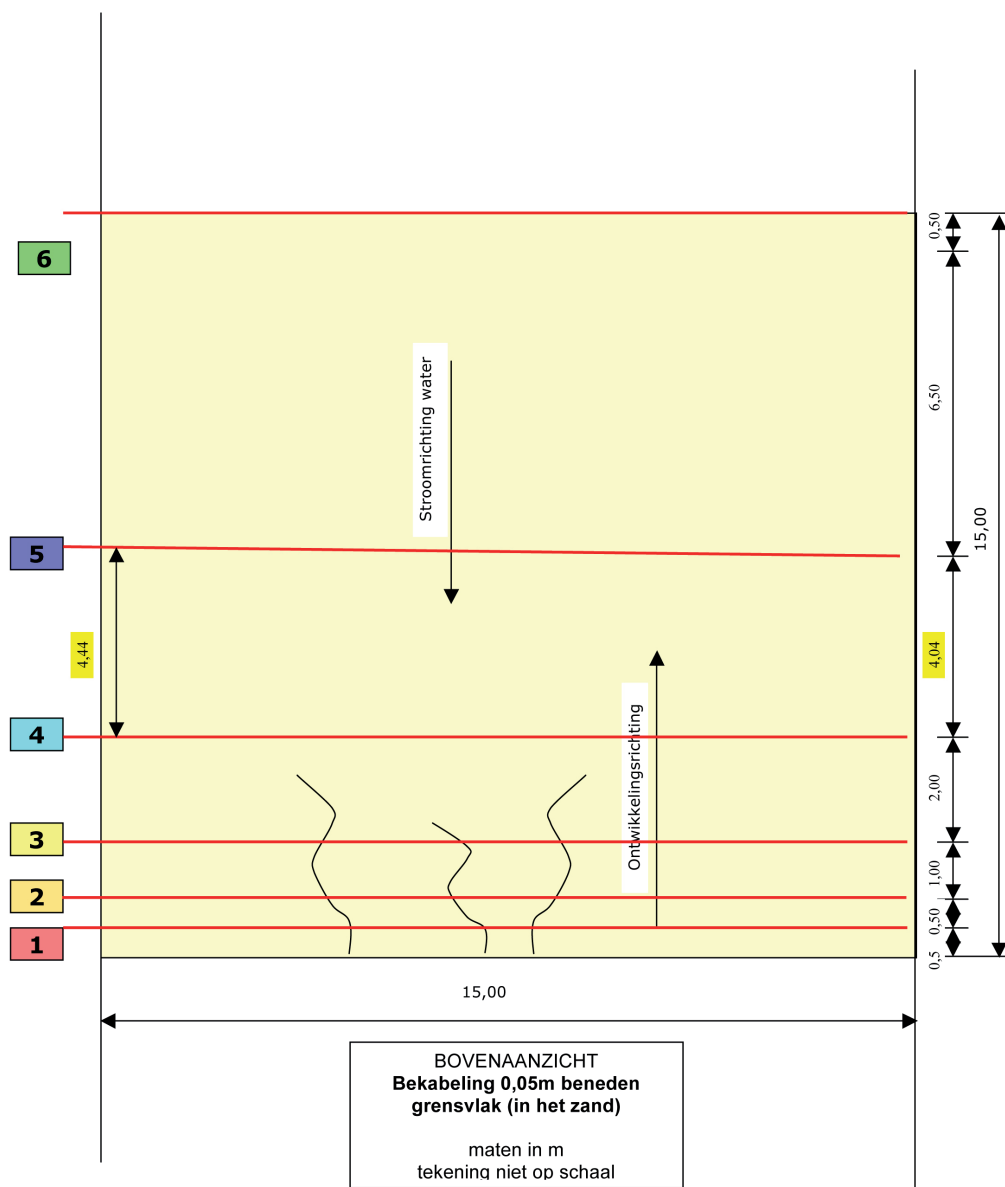


Figuur 5.2.2 Vervolg: Bekabeling pipingexperiment 1

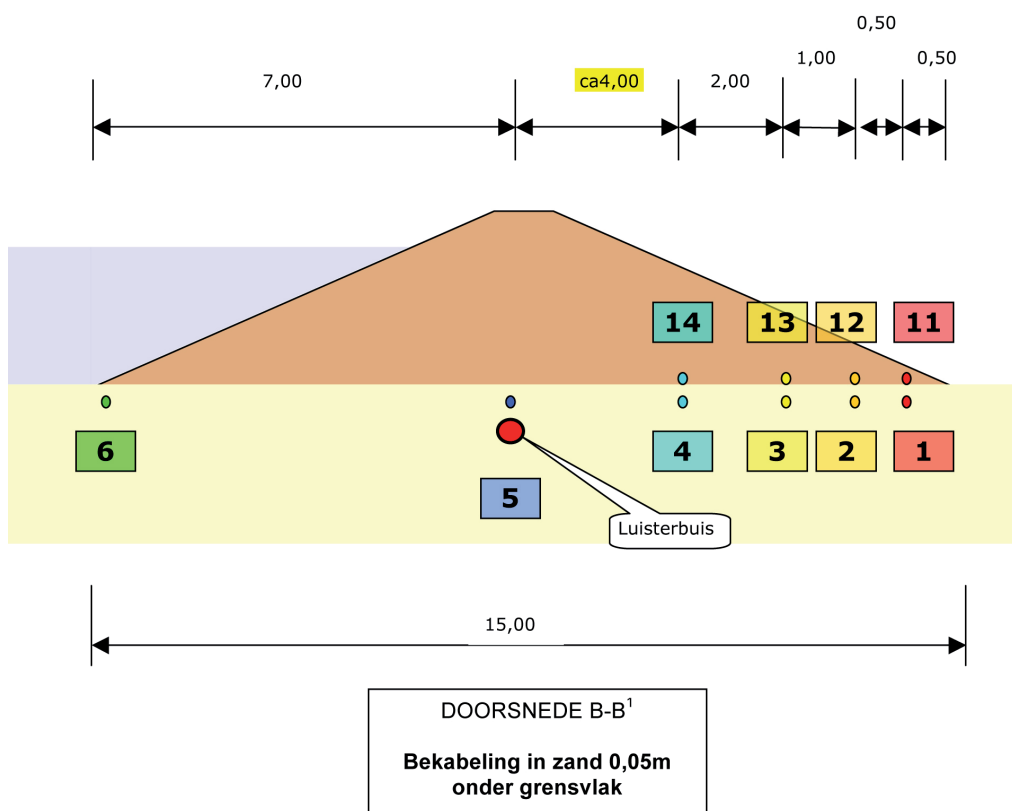


Figuur 5.2.2 Vervolg: Bekabeling pipingexperiment 1

Revisie detectiekabels in zand 4e experiment



Figuur 5.2.3 Bekabeling pipingexperiment 4



Figuur 5.2.3 Vervolg: Bekabeling pipingexperiment 4

Bekabeling

Vanaf het grensvlak lopen de detectiekabels naar kastjes die op de paralleldijken zijn geplaatst. Door DikeSurvey zijn vanaf de paralleldijk (zwak)stroom- en databekabeling naar de meterkast aangebracht. Vanaf deze meterkast zijn de verbindingen naar de centrale meldkamer aangebracht door Stichting IJkdijk, conform de werkwijze bij het Macrostabieliteitsexperiment. Zie Figuur 5.2.4 voor enkele foto's van de uitvoering.

Wijze van aanbrengen

De kabels zijn door 2 personen handmatig in de juiste positie gebracht en met stalen pennen aan de uiteinden in het zand en de klei verankerd. De uiteinden van de kabels kwamen uit aan de teen van het talud van de paralleldijken nabij het grensvlak van klei en zand. Boven op de paralleldijken zijn kastjes geplaatst voor het afmonteren van de detectie-units.

Stichting

IJkdijk



26 augustus 2009: aanbrengen detectiekabels voor pipingexperiment 1 in het zand 20 cm diep



Afmonteren van detectiekabels op detectie-untis

Ligging detectiekabels 1 t/m 6 in zand

Figuur 5.2.4 Uitvoering van de installatie van de sensorkabels(4 foto's)

Doorlooptijd bij de bouw

Bij beide experimenten 1 en 4 zijn de detectiekabels 1 t/m 6 in één dag handmatig in de bovenkant van de zandlaag aangebracht. Ook in de kleilaag zijn de detectiekabels 11 t/m 14 in één dag aangebracht. Voor het graven van de sleuven in de klei is gebruik gemaakt van een hydraulische kraan.

Potentiële beïnvloeding van andere instrumenten, pipingproces en planning

Om beschadiging of verstoring van de mechanische werking van de detectiekabels te voorkomen dienden de andere participanten rekening te houden met de volgende maatvoering:

- bij kabels in het zicht: een afstand van tenminste 0,5 m
- bij kabels buiten het zicht: een afstand van tenminste 1,0 m

Te detecteren fenomenen

Bij spectraalanalyse van het lichtsignaal kunnen vele parameters worden gemeten en berekend. Bij het Macrosta-biliteitsexperiment hebben we ons bij de analyse in eerste instantie gericht op vijf parameters. Bij het Pipingexperiment is naar zeven parameters gekeken (zie verder Paragraaf 5.2.4). Op basis van deze zeven parameters hebben wij ons gericht op het monitoren en detecteren van bewegingen en trillingen. Uit nadere analyse moet blijken of met dezelfde systematiek ook verschillen in temperatuur en/of waterspanning zijn te registreren.

5.2.4 Meetresultaten

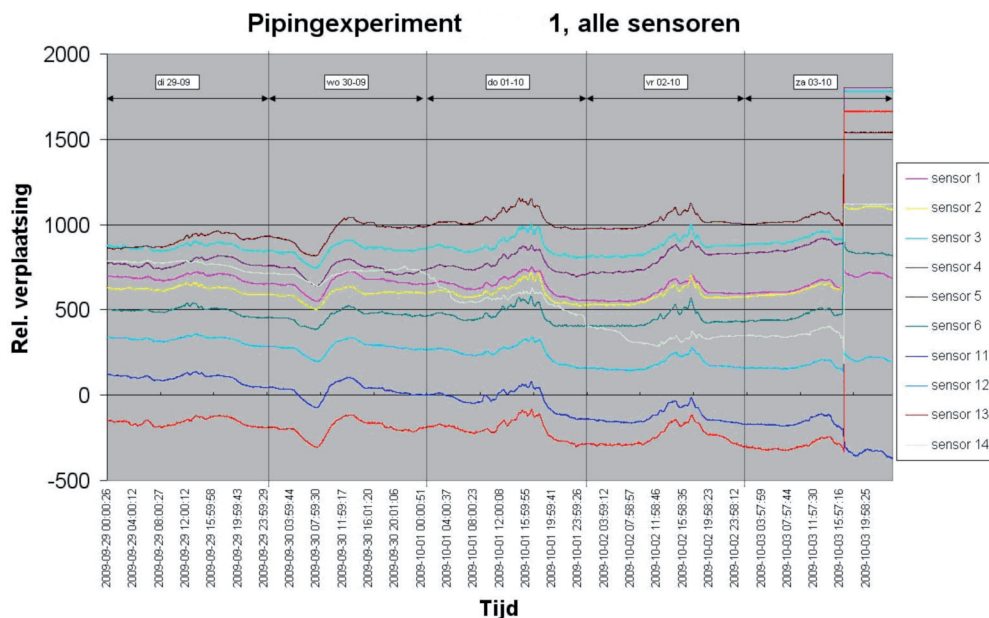
Parameters en eenheden

Bewegingen en trillingen worden gesignaleerd door wijziging van frequentie en amplitude van de verschillende kleuren in het spectrum van het verzonden lichtsignaal.

- Vanaf het moment van de start van elk experiment is in de detectie-units het lichtsignaal ca. 2000 à 3000 keer per seconde gescand en opgeslagen. De ruwe signalen zijn gefilterd, waarbij 8 grootheden één keer per ca. 10 seconden zijn opgeslagen in de database van de laptop. De signalen zijn vanuit de laptop doorgezonden naar de database op onze server. Er is op dat moment nog steeds sprake van semi-ruwe data.
- Per kabel zijn in de database acht grootheden vastgelegd, te weten:
 - 1 verplaatsing in de x-richting in mm
 - 2 verplaatsing in de y-richting in mm
 - 3 verplaatsing in de z-richting in mm
 - 4 frequentieband A van 0,5 t/m 2,5 Hz
 - 5 amplitude van frequentieband A in dB
 - 6 frequentieband B van 2,5 t/m 12,5 Hz
 - 7 amplitude van frequentieband B in dB
 - 8 nog nader te bepalen grootheid
- De semi-ruwe data is inmiddels bewerkt tot betrouwbare en reproduceerbare data. In het vervolg van deze rapportage wordt uitgegaan van deze bewerkte data.

Meetresultaten 1e pipingexperiment van 29 september t/m 3 oktober 2010

In onderstaande grafiek zijn de meetresultaten van alle 10 de detectiekabels (nrs. 1 t/m 6 in het zand en nrs. 11 t/m 14 in de klei) weergegeven. Het betreft hier per kabel de resultante van de verplaatsing in de y-richting (= horizontaal en haaks op de lengterichting van de proefdijk) en de z-richting (= verticaal). Zie ook Figuur 5.2.2.

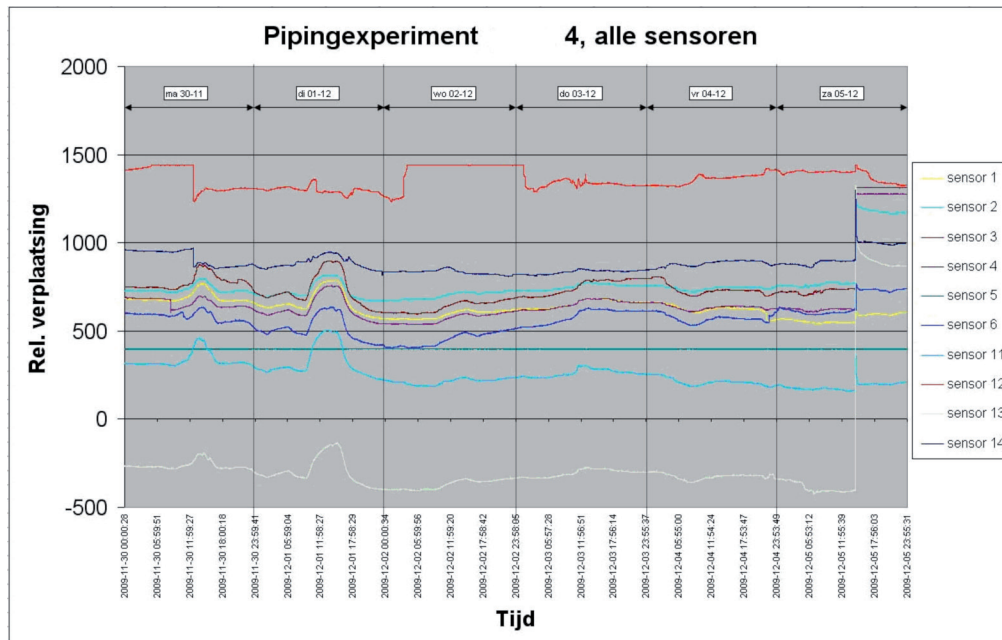


Bij de grafiek worden de volgende opmerkingen gemaakt:

- alle 10 de kabels (m.u.v. kabel 14 in de klei) vertonen een overeenkomstig patroon
- de detectiekabels gelegen in het zand en de klei leveren in relatieve zin vergelijkbare en bruikbare bewegingen
- net als bij het Macrostabilitéxperiment worden verplaatsingen van een kabel ingeleid door een toename van de amplitude van de frequentie van 1,81 Hz
- er zijn aanwijzingen dat de ontwikkeling van pipes zich manifesteert in het frequentiebereik tussen 4 en 7 Hz
- in het zand zijn tussen de detectiekabels bewegingen geregistreerd met een voortplantingssnelheid van ca. 4 - 10 mm/s

Meetresultaten 4e pipingexperiment van 30 november t/m 5 december 2010

In onderstaande grafiek zijn de meetresultaten van alle 10 de detectiekabels (nrs. 1 t/m 6 in het zand en nrs. 11 t/m 14 in de klei) weergegeven. Het betreft hier per kabel de resultante van de verplaatsing in de y-richting (= horizontaal en haaks op de lengterichting van de proefdijk) en de z-richting (= verticaal). Zie ook Figuur 5.2.3.



Bij de grafiek worden de volgende opmerkingen gemaakt:

- in het zand vertonen alle 6 de sensoren (m.u.v. sensor 5) een overeenkomstig patroon. Sensor 5 was gelegen direct boven de Luisterbuis. Dit is een bewuste keuze geweest. Gebleken is nu dat de sensor in zijn bewegingen wordt gehinderd door het relatief starre obstakel van de Luisterbuis. Verder onderzoek moet echter duidelijk maken in welke mate de trillingen in de frequentiebanden A en B wel zinvolle informatie opleveren
- in de klei vertonen de sensoren 11 en 13 een bewegingspatroon dat overeenkomt met de sensoren in het zand. De sensoren 12 en 14 vertonen een afwijkend patroon dat mogelijk te maken heeft met het verschil in hoogte (> 500 mm) t.o.v. het scheidingsvlak zand/klei
- de detectiekabels gelegen in het zand en de klei leveren in relatieve zin vergelijkbare en bruikbare bewegingen
- net als bij het Macrostabieliteitsexperiment worden verplaatsingen van een kabel ingeleid door een toename van de amplitude van de frequentie van 1,81 Hz
- er zijn aanwijzingen dat de ontwikkeling van pipes zich manifesteert in het frequentiebereik tussen 4 en 7 Hz
- in het zand zijn tussen de detectiekabels bewegingen geregistreerd met een voortplantingssnelheid van ca. 3 - 4 mm/s



5.2.5 Conclusies

Op basis van de meetresultaten en de analyse van de data kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- er is sprake van een robuust systeem. Evenals bij het Macrostabiliteitsexperiment hebben alle sensoren, detectie-units en de opslag en het beheer van de data probleemloos gefunctioneerd. Dit geldt voor beide experimenten
- de bewegingen in het zand- en kleipakket werden duidelijk geregistreerd
- de verschillende sensoren geven overeenkomstige bewegingspatronen te zien, hetgeen betekent dat bij volgende projecten met minder detectiekabels kan worden volstaan
- geconstateerd is dat (net als bij het Macrostabiliteitsexperiment) verplaatsingen van een sensor worden ingeleid door een toename van de amplitude van de frequentie van 1,81 Hz
- er zijn aanwijzingen dat de ontwikkeling van pipes zich manifesteert in het frequentiebereik tussen 4 en 7 Hz. Uit nader onderzoek (Fourieranalyse) moet blijken of een maatgevende trilling in de frequentieband van 4-7 Hz kan worden berekend. Het gaat hier om analyse van een driedimensionale data waarin de 3 assen gevormd worden door de amplitude, de tijd en de verschillende frequenties in het bereik van 4-7 Hz. Tot op heden duiden deze frequenties op z.g. "ruisgebieden" die vermoedelijk het optreden van piping kunnen registreren
- bij experiment 1 zijn in het zand tussen de detectiekabels bewegingen geregistreerd met een voortplantings-snelheid van ca. 4 - 10 mm/s
- bij experiment 4 zijn in het zand tussen de detectiekabels bewegingen geregistreerd met een voortplantings-snelheid van ca. 3 - 4 mm/s
- de sensoren aan de teen van het binnentalud leveren de meest betrouwbare gegevens op
- binnen een marge van 0 – 500 mm ten opzichte van het scheidingsvlak zand/klei zijn geen grote verschillen in het bewegingspatroon van de verschillende sensoren waargenomen. Geconcludeerd kan worden dat de afstand van de detectiekabels ten opzichte van het scheidingsvlak zand/klei minder gevoelig is dan aanvankelijk werd verondersteld
- sensoren aangebracht in de klei leveren vrijwel net zo waardevolle informatie als de sensoren in het zand
- gedurende het verloop van de beide experimenten is gebleken dat de stabiliteit van de proefdijken geleidelijk afnam
- door gebruik van zeven verschillende parameters is er een grote betrouwbaarheid in de berekende meetresultaten geconstateerd

In het algemeen kan worden geconcludeerd dat voldaan is aan de doelstellingen van het Pipingexperiment. Het meten van bewegingen en trillingen levert een waardevolle bijdrage voor het aantonen van het faalmechanisme piping. De gebruikte sensortechnologie is een meetsysteem dat sterk afwijkt van de meer traditionele systemen en heeft daardoor een groot innovatief karakter. De vele mogelijkheden die analyse van het licht bieden, kunnen (weliswaar via complexe berekeningen) van grote toegevoegde waarde zijn om faalmechanismen in dijken en grondlichamen vroegtijdig te signaleren.

5.3 Deelexperiment Fugro SP Monitoring

Auteur: Fugro, afdeling Geofysica

5.3.1 Inleiding

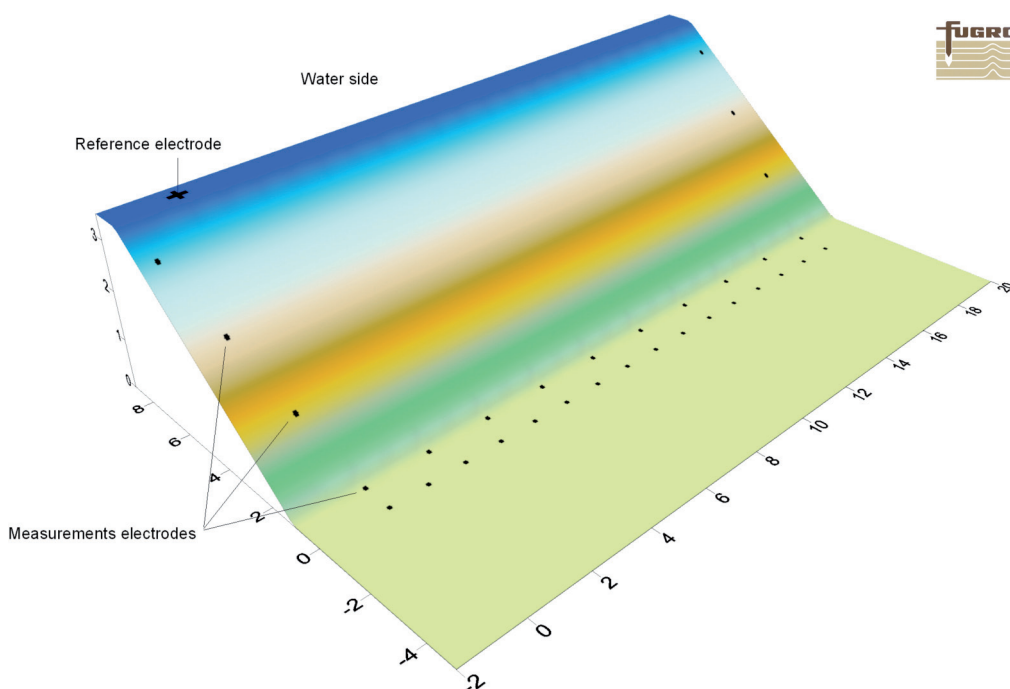
De enige geofysische technieken welke gevoelig zijn voor vloeistofstroming in een poreus medium zijn temperatuurmetingen en Self-Potential (Spontane Potentiaal oftewel SP) metingen. De SP methode is een passieve geoelektrische methode die het van nature aanwezige elektrisch veld in de grond meet, dus zonder gebruik te maken van een actieve stroombron. Zo'n elektrisch veld in de grond kan veroorzaakt worden door zuurstofreductie van begraven metalen objecten zoals pijpleidingen, gewapend beton, enz. Maar ook grondwaterstroming veroorzaakt een elektrisch veld.

Het van nature aanwezig elektrisch veld kan gemeten worden aan het oppervlak of in boorgaten met speciale niet-gepolariseerde elektroden. De SP methode berust op metingen van het elektrisch veld welke correspondeert met het elektrisch potentiaal verschil tussen twee elektroden (een referentie elektrode en een meetelektrode) en de afstand tussen die elektroden.

De SP methode wordt door Fugro gebruikt om lekkages in civieltechnische waterremmende constructies (zoals dijken en dammen) te lokaliseren en daardoor informatie te verkrijgen over piping. Tijdens de 4e test op de IJkdijk heeft Fugro de SP methode toegepast om het ontstaan van piping te monitoren.

5.3.2 Aanpak en werkwijze

De SP metingen op de IJkdijk zijn gedaan door Fugro Geotechnique France samen met Fugro Ingenieursbureau. Er zijn in totaal 32 niet-gepolariseerde elektroden geplaatst. Twee rijen van ieder 3 elektroden zijn geplaatst aan de linker- en rechterzijde op de helling van de dijk, een rij van 10 elektroden is in het zand aan de voet van de dijk geplaatst met een tussenafstand van 2 m en een rij van 16 elektroden is 1 m uit de voet van de dijk in het zand geplaatst met een tussenafstand van 1.25 m. De referentie-elektrode is op de dijk geplaatst (zie Figuur 5.3.1).



Figuur 5.3.1 Positie van de SP elektroden

Deze elektroden waren gekoppeld aan een hoog frequent (200 Hz) acquisitie systeem, welke centraal stond opgesteld. Elke 10 seconden is er een meting gedaan en opgeslagen.

Stichting

IJkdijk

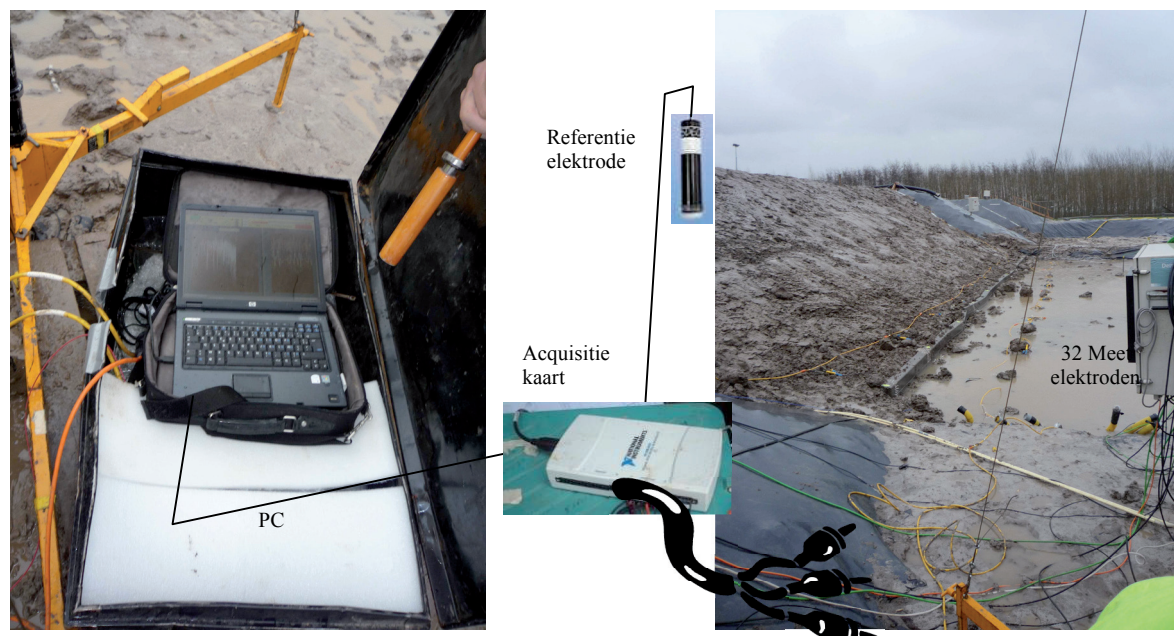
De bedoeling van deze monitoring set-up was om in een vroeg stadium een grondwaterstroming (kwel) te detecteren die in het zand onder de dijk zou doorlopen naar de voet van de dijk.

5.3.3 Instrumentatie

De set-up van het acquisitiesysteem is globaal weergegeven in Figuur 5.3.2.

Eén referentie-elektrode was bovenop de dijk geplaatst, twee rijen van 3 elektroden bevonden zich op de dijk en 26 elektroden waren in het zand aan de voet van de dijk geplaatst. De elektroden die gebruikt zijn, zijn Pb - PbCl₂ NaCl elektroden.

De elektroden waren gekoppeld aan een acquisitiekaart welke weer gekoppeld was aan een laptop.



Figuur 5.3.2 Acquisitiesysteem set-up

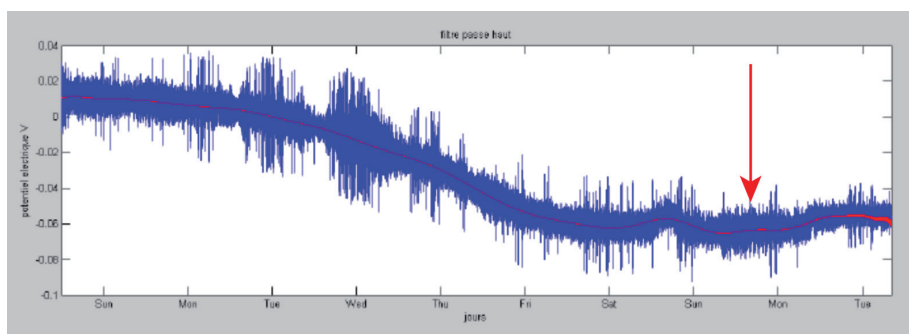
De gekozen acquisitiefrequentie was 200 Hz met een datacollectie elke 10 seconden.

5.3.4 Verloop van experiment

Op zaterdag 28 november 2009 is het systeem in het veld geïnstalleerd. De eerste metingen zijn gedaan van zaterdag 28 november 2009 tot aan maandag 30 november 2009. Deze metingen zijn bedoeld om de achtergrondruis te monitoren voordat de eigenlijke test zou beginnen. Op maandag 30 november is test nr. 4 gestart met het vullen van het basin achter de dijk. Ook is op die dag gepoogd de Fugro computer op het netwerk van TNO aan te sluiten, om de resultaten real-time uit te lezen. Dit was tevergeefs, de resultaten konden alleen via de Fugro computer achteraf worden uitgelezen.

Figuur 5.3.3 laat een voorbeeld zien van de SP metingen die gedaan zijn over een periode van 10 dagen.

In de loop van het experiment vertonen sommige elektroden relatief veel ruis, zoals te zien is in Figuur 5.3.3 op maandag, dinsdag en woensdag. De reden van de ruistoename is vaak terug te vinden in elektrische verstoringen in de ondergrond. De piek op zaterdag 5 december springt er duidelijk uit.



Figuur 5.3.3 Ruwe velddata van elektrode

Dag

Zaterdag 28 november 2009
 Zondag 29 november 2009
 Maandag 30 november 2009
 Dinsdag 1 december 2009
 Woensdag 2 december 2009
 Donderdag 3 december 2009
 Vrijdag 4 december 2009
 Zaterdag 5 december 2009
 Zondag 6 december 2009
 Maandag 7 december 2009
 Dinsdag 8 december 2009

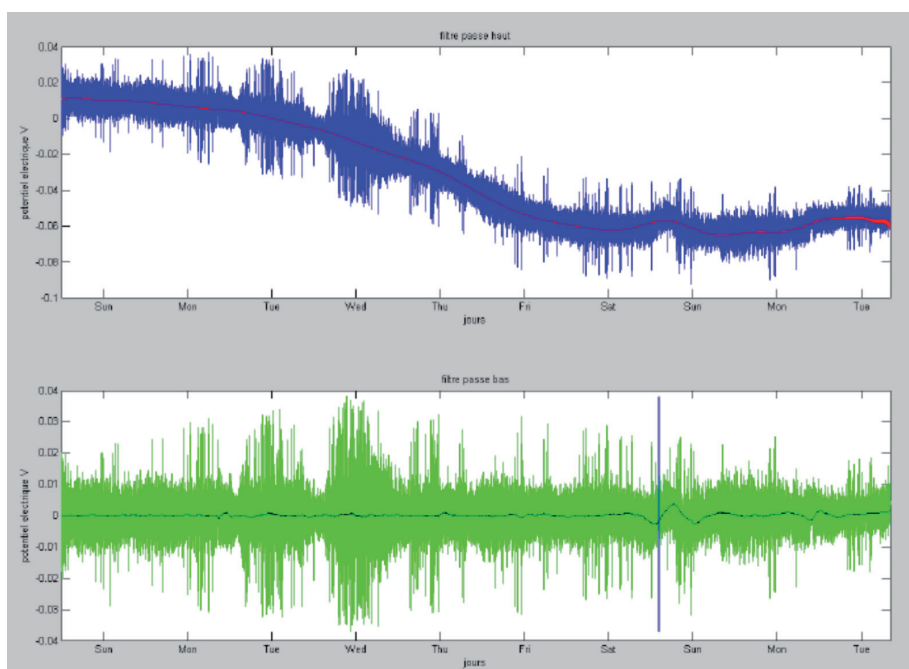
Experiment

Installatie SP systeem, start SP metingen achtergrondruis
 SP metingen achtergrondruis
 Start van test nr. 4, start SP metingen test nr.4
 SP metingen test nr. 4
 SP metingen test nr. 4
 SP metingen test nr. 4
 SP metingen test nr. 4
 SP metingen test nr. 4, dijk bezwijkt
 SP metingen test nr. 4
 SP metingen test nr. 4
 Afbreken SP metingen

Na afloop van de test is op dinsdag 8 december het SP systeem afgebroken en de apparatuur weggehaald.

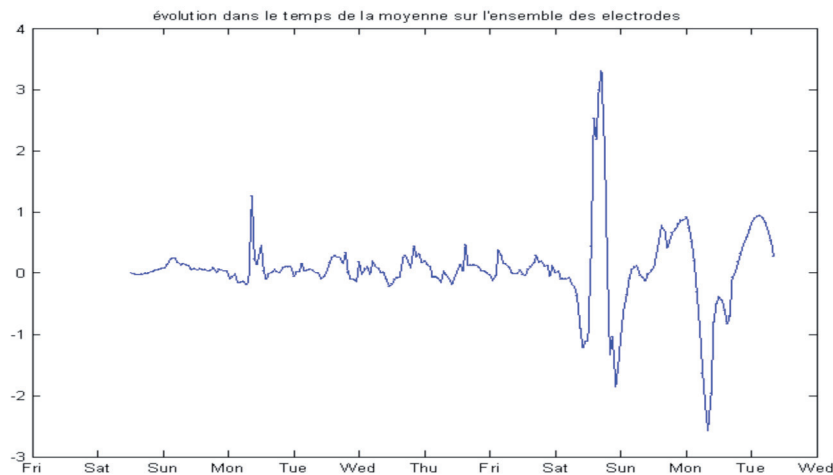
5.3.5 Meetresultaten

Om de SP data te analyseren is het nodig om de ruwe data te filteren. Allereerst is op de signalen een high pass filter toegepast om de lage frequentie eruit te halen dat veroorzaakt wordt door elektronische drift, zie Figuur 5.3.4.



Figuur 5.3.4 Ruwe velddata (blauw) en data (groen) na high pass filtering van elektrode 21

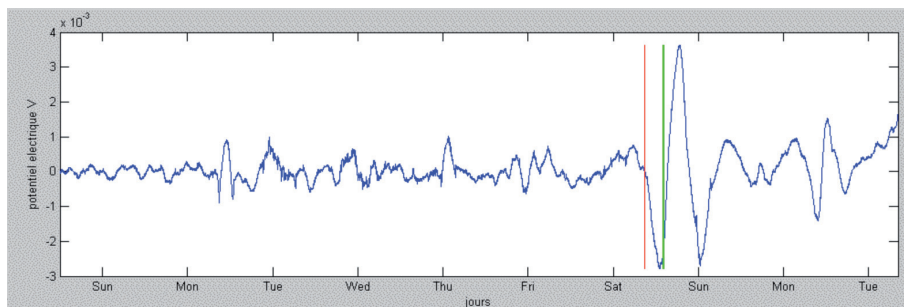
Daarna is er een low pass filter toegepast om de achtergrondruis, die veroorzaakt wordt door elektromagnetische ruis op de locatie, eruit te filteren, zie Figuur 5.3.5.



Figuur 5.3.5 Gefilterde SP data

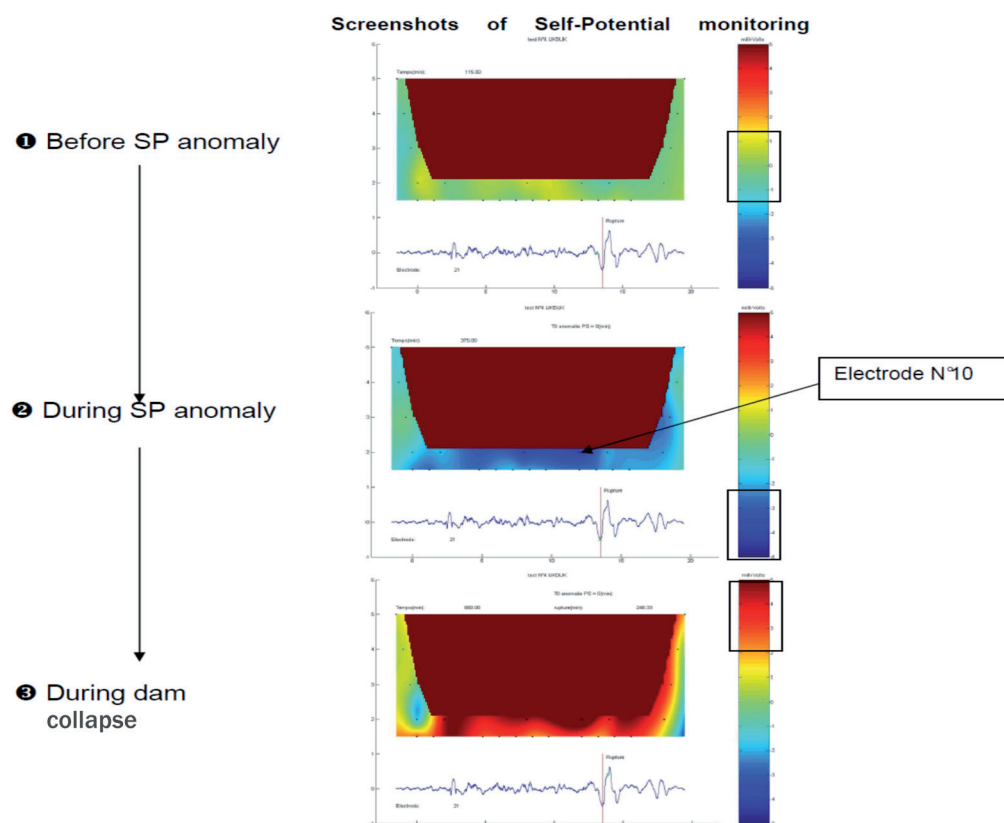
Na het filteren is getracht het SP signaal te vergelijken met het optreden van kwel.

Figuur 5.3.6 laat de SP data zien van een representatieve elektrode 21, gemeten over de gehele testperiode. De rode lijn geeft aan wanneer de SP anomalie ontstaat en de groene lijn geeft het tijdstip van het bezwijken van de dijk aan. Het tijdsverschil tussen deze twee lijnen is ca. 4 uur.



Figuur 5.3.6 SP data van elektrode 21

Figuur 5.3.7 laat de evolutie zien van het SP signaal voor alle elektroden in de tijd. Tijdens het eerste gedeelte van het experiment is het signaal in de orde van grootte tussen -1 en +1 mV en wat overeen komt met een kleine achtergrond ruis. Op zaterdag 5 december zien we rond 10:30 uur een negatieve elektrische anomalie ontstaan in elektrode nummer 10. Deze verstoring groeit en heeft ook zijn impact op de andere elektroden in de omgeving. Ook is te zien dat de SP anomalie verder weg van de voet van de dam migreert vergelijkbaar met de stromingsrichting van de kwel.



Figuur 5.3.7 Evolutie van SP data van alle elektroden in de tijd

5.3.6 Conclusie en aanbevelingen

Het eerste optreden van een relatief grote SP anomalie gebeurde op zaterdag 5 december om 10:30 uur. Het bezwijken van de dam gebeurde rond 14:45 uur op die zaterdag.

Het verschil tussen het optreden van de relatief grote SP anomalie en het bezwijken van de dijk is ca. 4 uur en 15 minuten.

De SP methode is een makkelijk te installeren methode die overal aan de voet van dijklichamen en dammen te plaatsen is. Het is een effectieve methode om het bezwijken van een dijk te voorspellen, maar dan moet de data wel online af te lezen zijn. Tijdens test nr. 4 op de IJkdijk was de data helaas niet online af te lezen, dat zal in een eventueel vervolg wel moeten gebeuren om een duidelijker instrument te zijn voor het monitoren van het optreden van kwel.

5.4 Deelexperiment GTC Kappelmeyer Vezeloptisch lekdetectie systeem

Auteur: Jürgen Dornstaedter en Inge Lafeber

5.4.1 Inleiding

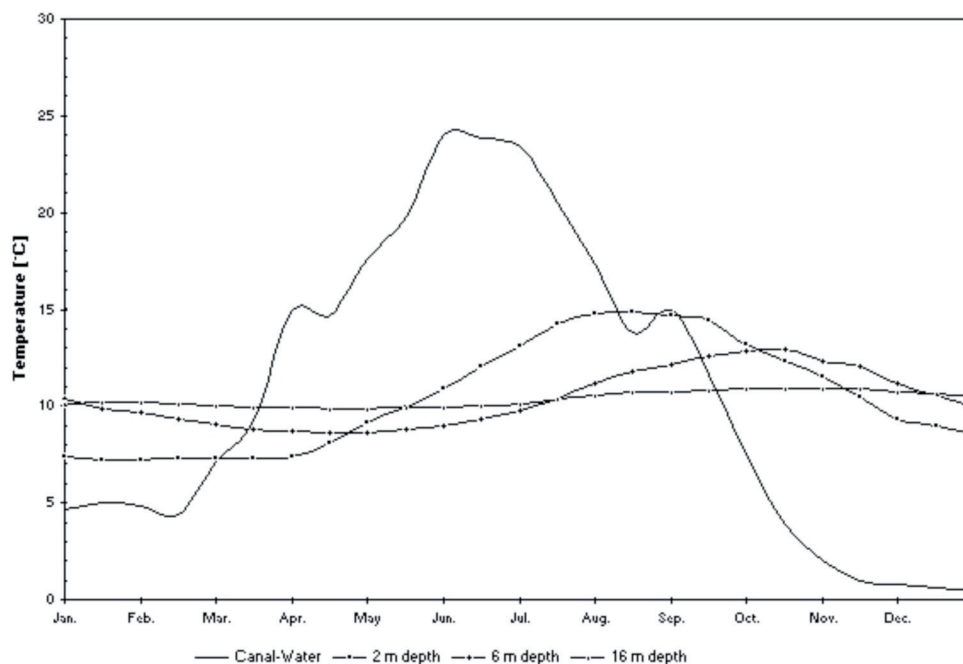
GTC Kappelmeyer GmbH nam deel aan de pipingexperimenten 1 en 4.

Gedurende de experimenten kon GTC de geschiktheid van de vezeloptische kabels voor de lekdetectie met behulp van verwarming (oftewel heat-pulse methode) aantonen.

5.4.2 Meetmethodes

Vezeloptische temperatuurmeetmethode

Watertemperaturen aan de oppervlakte en bodemtemperaturen verschillen per seizoen door het klimaat. Door de lage thermische geleiding van de bodem, ontstaat er een faseverschuiving tussen de temperatuur van het water en de temperatuur van het bodemmateriaal. Verder neemt de amplitude van de temperatuurverschillen van de seizoenen bij toenemende diepte in de bodem af. Hierdoor zijn seizoengebonden temperatuurverschillen in de bodem minder dan aan het oppervlaktewater (Figuur 5.4.1). Indien oppervlaktewater door de bodem stroomt, veranderen de bodemtemperaturen door het hiermee gekoppelde advectieve warmtetransport (geforceerde convectie). De bodem neemt de temperatuur van het kwelwater aan.



Figuur 5.4.1 Seizoensgebonden-temperatuurverschillen in een kanaal en onverstoorde bodemtemperaturen, in 2 m, 6 m en 16 m diepte

Het effect kan geïllustreerd worden met een voorbeeld van een stuwconstructie. Indien kwelwater van het reservoir/kanaal door een lek of een zwakke plek in het dichtingssysteem indringt, verandert de bodemtemperatuur door het advectieve warmtetransport. Deze anomalie is te vinden in de directe omgeving van de kwel en in de naaste omgeving, door de geleiding van de warmte van het bodemmateriaal. Temperatuurmetingen kunnen de lekkages in het dichtingssysteem lokaliseren.

Gedurende temperatuurmetingen in de zomer zullen de lekkages een positieve temperatuuranomalie aangeven – de temperatuur van het oppervlaktewater is hoger dan de ongeroerde bodemtemperatuur. Gedurende de lente en herfst zijn de temperatuurverschillen klein. In deze tijden kan kwel uitsluitend door intervallen van gelijke temperaturen over enkele meters diepte gelokaliseerd worden.

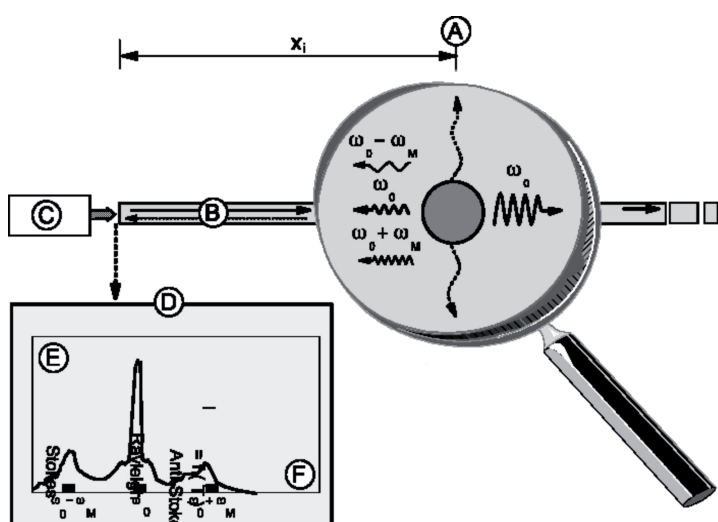
De beginselen van thermische lekdetectie zijn sinds de vijftiger jaren al bekend. Systematische temperatuurmetingen in dijken werden tegen het einde van de tachtiger jaren uitgevoerd. Er zijn verschillende monitoringssystemen voor het meten van temperaturen in dijken: in een van de monitoringssystemen kunnen temperaturen met bestaande piezometers voor het meten van het waterpeil gebruikt worden; met een ander systeem worden temperatuursonderingen uitgevoerd. Door de kleine hoeveelheid piezometers in dijken, en door vrije geleiding binnen de piezometerbuizen – vooral bij grotere diameters dan 50 mm – zijn piezometers niet geschikt voor betrouwbare temperatuurprofielen.

De temperatuursonderingsmethode is in de late tachtiger jaren door GTC ontwikkeld (Patent DE 41 27 646). Deze methode maakt bodemtemperatuurmetingen tot een diepte van 30 m, met een hoge technische betrouwbaarheid en lage kosten mogelijk, en wordt voor de herkenning van dichtingsfouten in dijken ingezet. Met deze methode is meer dan 500km dijklength met meer dan 20.000 temperatuursonderingen onderzocht; vele lekkages konden duidelijk geïdentificeerd worden. Door de hoge gevoeligheid van de methode kan kwel met een snelheid van 10^{-7} m/s op tijd ontdekt worden.

De bovengenoemde methodes – conventionele temperatuurmetingen – leveren betrouwbare informatie over lekkages door een dicht meetrooster. Met behulp van een nieuwe technologie, de vezeloptische temperatuurmeting, was het mogelijk een nieuwe methode voor lekdetectie en structuurmonitoring te ontwikkelen. Met een geschikte vezeloptische kabel-layout kunnen 2D en 3D metingen makkelijk verwezenlijkt worden. Deze techniek kan duurzaam in nieuwe constructies en bij dijkverbeteringen toegepast worden.

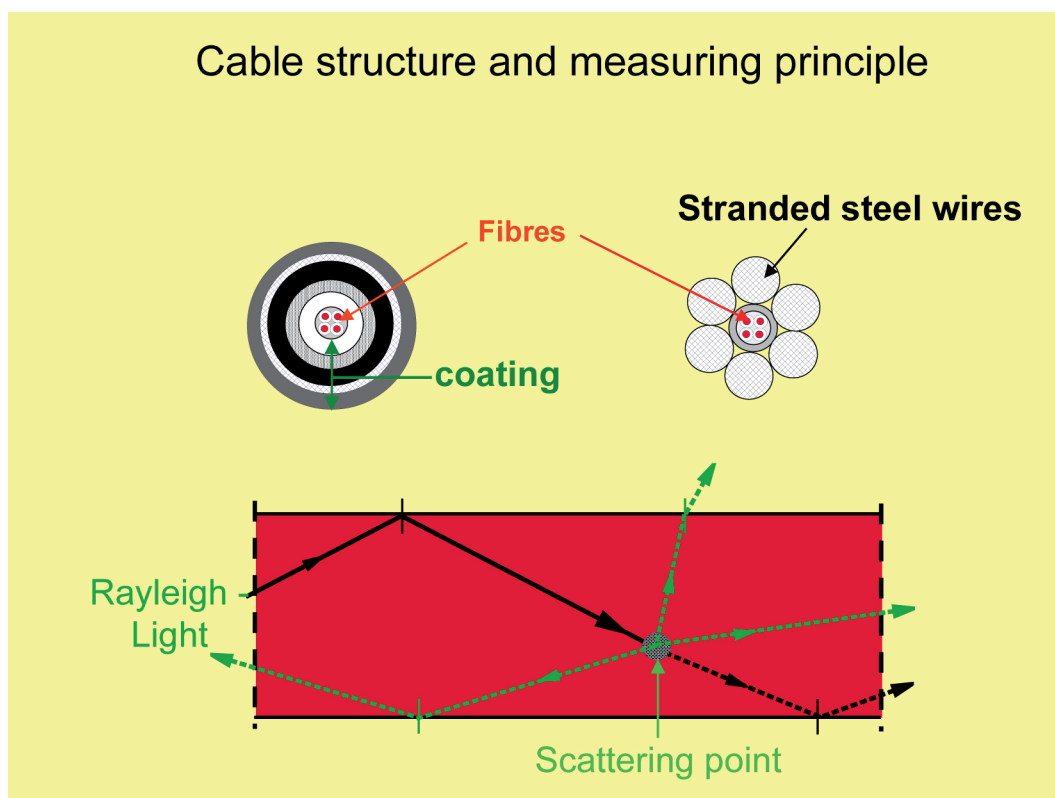
Vezeloptische temperatuurmeetmethode

De technologie van gedistribueerde vezeloptische temperatuurmetingen heeft nu de mogelijkheid om de omgevingstemperatuur langs vezeloptische kabels van meerdere kilometers lengte, continu en met hoge betrouwbaarheid te meten. Deze techniek levert, vergeleken met de conventionele meetmethode, levert hogere informatie-dichtheid en verbetert hierdoor de evaluatie van de temperatuurverdeling in grote constructies aanzienlijk. De methode is gebaseerd op het feit dat de optische eigenschappen van glasvezel o.a. afhankelijk zijn van de omgevingstemperatuur. Een hoog ontwikkelde meettechniek, die de analyse en de evaluatie van constructieveranderingen d.m.v. betrouwbare temperatuurverdelingen langs de kabel vereenvoudigt.



Figuur 5.4.2 Meetprincipe

Een lichtbron (laser) stuurt een gedefinieerd optisch signaal door de optische glasvezel, en wordt hierna over de gehele lengte gereflecteerd. De gereflecteerde optische impuls heeft een lage intensiteit en wordt "Rayleigh-effect" (Figuur 5.4.2 en 5.4.3) genoemd. Dit "Rayleigh-effect" wordt begeleid door een ander zwakker verstrooiingseffect, het "Raman-effect". Deze kan in een "Stokes" en een "anti-stokes"-gedeelte gesplitst worden. De intensiteit en de frequentieverschuiving zijn afhankelijk van temperatuur op het reflectiepunt. Door een geperfectioneerde frequentieanalyse kan de temperatuur op deze punten nauwkeurig vastgesteld worden. Met behulp van de vertragingstijd van de reflectie en de specifieke lichtsnelheid van het materiaal kunnen de posities van de reflectiepunten bepaald worden.



Figuur 5.4.3 Schematische afbeelding van verschillende kabeltypes (boven).
Schematische afbeelding van terugstrooiing en reflectie van een optisch signaal in een vezel (beneden)

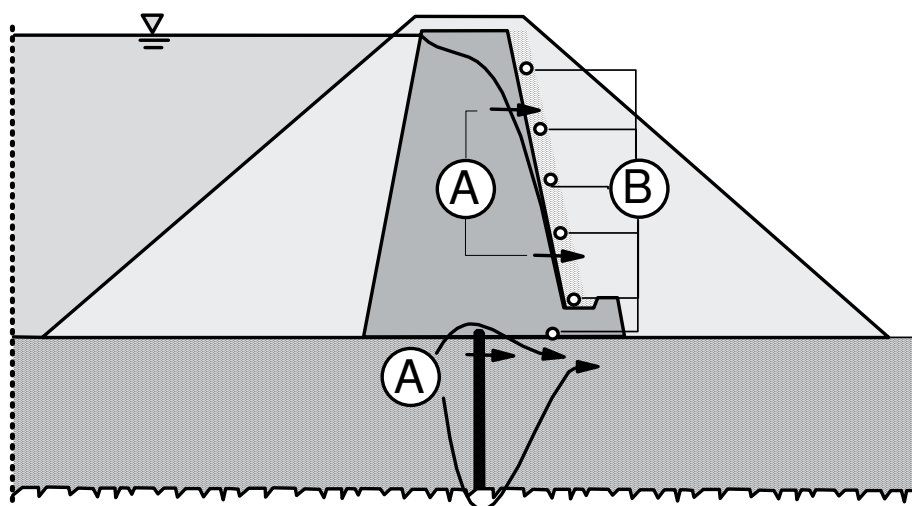
Op het gebied van de waterbouwkunde met hoge kwaliteitseisen aan constructiemonitoring wordt deze techniek veelvuldig toegepast. Gedistribueerde vezeloptische temperatuurmetingen kunnen ook voor de lokalisatie van kwelkanalen in dijken, en voor de vaststelling van temperatuurverdelingen in beton gebruikt worden. Vezeloptische kabels voor de waterbouwkunde bestaan meestal uit een kern met op zijn minst twee vezels en uit een mechanisch kabelsupport met een mantel (Figuur 5.4.3). Indien koperen kabels geïntegreerd worden wordt deze kabel een hybride kabel genoemd. Voor het gebruik van de kabel in waterreservoirs en in beton worden gewoonlijk temperatuurmonitorskabels van 10 mm doorsnede gebruikt. Deze kabels hebben een hoge mechanische sterkte en zijn daarom geschikt voor bouwterreincondities. Voor de temperatuurmetingen worden de vezels in de kabel aan een laser verbonden. De metingen kunnen quasi-continu, of in vooraf bepaalde tijdintervallen uitgevoerd worden.

Lekdetectie met behulp van gedistribueerde optische temperatuurmetingen

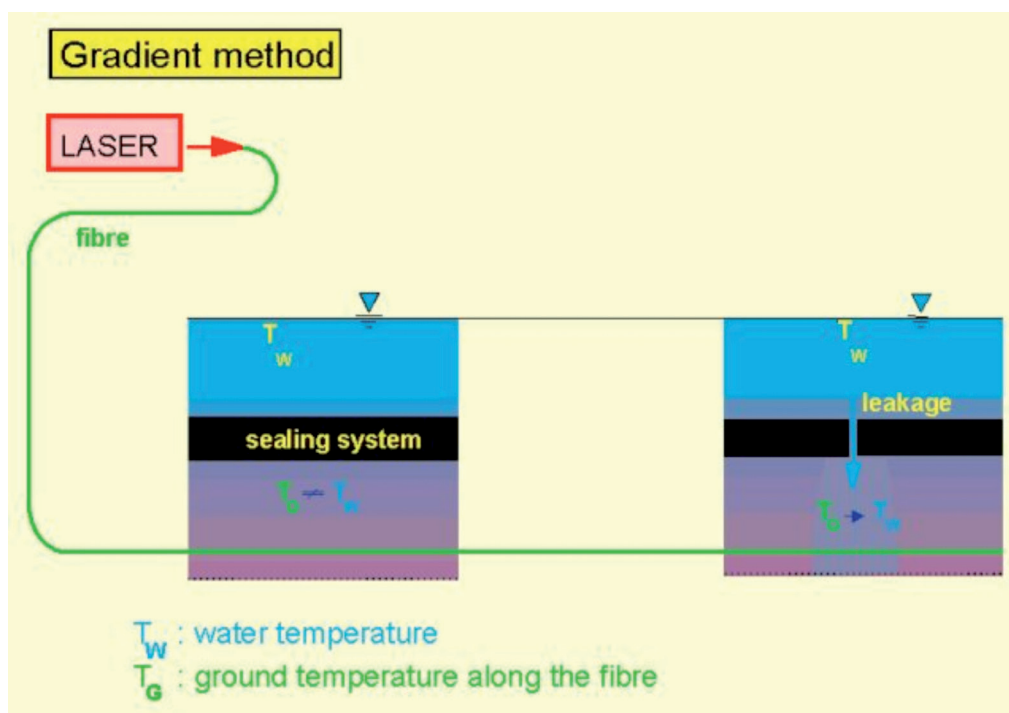
Het verhinderen van hydro-dynamische bodemdeformaties (uitwassen, erosie) bij de constructie van dijken is een essentieel onderdeel van het ontwerp. Interne erosie in dammen en dijken wordt meestal door kwel veroorzaakt. De lokalisatie van deze kwelkanalen is een van de meest geavanceerde opgaven in de dijkbewaking. Gedistribueerde vezeloptische temperatuurmetingen zijn het meest geschikt voor deze opgave, door de hoge informatie dichtheid. Er bestaan twee meetmethodes:

Gradiënt methode

Met behulp van het vezeloptische meetsysteem wordt de absolute temperatuurverdeling langs de optische vezel bepaald. Een eerste vereiste voor een succesvolle toepassing van de gradiëntmethode is het temperatuurverschil tussen het water in het reservoir en het dijkmateriaal. Om dit te kunnen garanderen, moet er voldoende afstand tussen de vezeloptische kabel en het reservoir aangehouden worden, om het temperatuurverschil over een langere tijd in een jaarlijks traject te kunnen meten (Figuur 5.4.4). De lekkage wordt gedetecteerd door een beduidende verlaging van de temperatuurgradiënt tussen het water en de bodemtemperatuur (Figuur 5.4.5). De ideale positie van dit meetsysteem is uiteraard aan de benedenstroomse kant van het dichtingssysteem, omdat hier de afwijkingen goed te detecteren zijn.



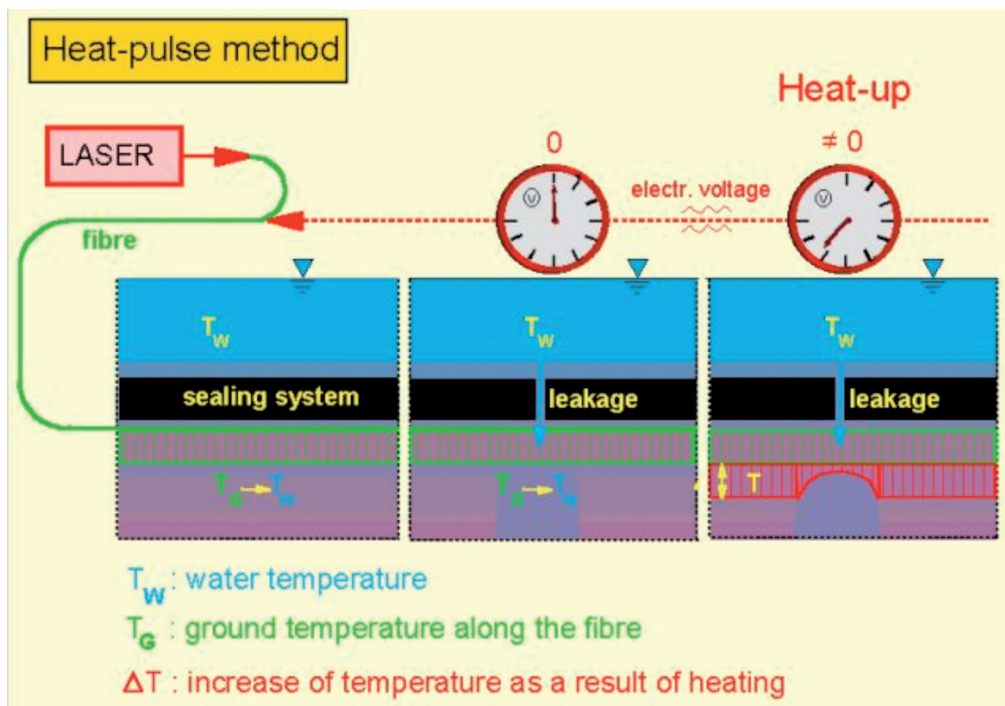
Figuur 5.4.4 Gradient methode – conceptuele opstelling
(A) lekkages (voorbeelden) (B) vezeloptische kabels



Figuur 5.4.5 Voor de gradiënt methode is het noodzakelijk dat de watertemperatuur T_w duidelijk verschilt met de bodemtemperatuur T_g langs de kabel

Heat-pulse method

Een verdere ontwikkeling van de boven genoemde methode ontkracht de restrictie dat de watertemperatuur duidelijk verschilt van de bodemtemperatuur (Heat-pulse methode - Patent DE 198 25 500). Door het aansluiten van elektrische stroom op de metalen kabelcoating (ter bescherming tegen knaagdieren, afscherming) of een geïntegreerde elektrische geleider (koperen draad) kan de vezeloptische kabel aanzienlijk en tegen lage kosten verwarmd worden. De temperatuurverhoging in de nabije omgeving van de kabel is afhankelijk van de warmtecapaciteit en warmtegeleiding van het omgevingsmateriaal. Gedurende kwel vindt minder warmtetransport plaats door het effectievere advectieve warmtetransport. Hierdoor ontstaan er duidelijk zichtbare afwijkingen in deze gebieden gedurende opwarming (Figuur 5.4.6).



Figuur 5.4.6 Voor de heat-pulse methode is het niet noodzakelijk dat de watertemperatuur (T_w) duidelijk van de bodemtemperatuur (T_g) verschilt langs de kabel; T_w kan gelijk aan T_g zijn.

Deze methode verhoogt de toepassingsmogelijkheden van gedistribueerde vezeloptische temperatuurmetingen voor de detectie van kwel. Met de bovenbeschreven procedure kan bijna ieder dichtingssysteem onafhankelijk van de seizoensgebonden temperaturen geverifieerd worden. De vereiste ruimtelijke afstand – of andere warmtetransportvertragingen – tussen de vezeloptische kabel en het water zijn niet meer noodzakelijk. Sinds enkele jaren is het vezeloptische monitoringssysteem reeds in ca. 30 waterkeringen en dammen geïnstalleerd. Een van de meest gebruikelijke toepassingen van de vezeloptische monitoringssystemen door GTC Kappelmeyer GmbH is het plaatsen van vezeloptisch kabel onder het dichtingssysteem zoals asfalt, geomembranen, bentoniet, etc. Van de speciale toepassing van geomembranen als dichtingssysteem in combinatie met de heat-up methode zijn er wereldwijd al 6 systemen geïnstalleerd.

5.4.3 Aanpak en werkwijze

De vezeloptische kabel, met geïntegreerde multi-mode vezels (50/125 μm) zijn in experiment 1 in het zand en de klei geplaatst, en uitsluitend in het zand gedurende experiment 4. Voor elk experiment is de kabel parallel aan de lengteas van de dijk geplaatst. De parallelle kabelsecties werden KA001-KA006 in experiment 1 en KB001-KB006 in experiment 4 genoemd.

Behalve de sectie KB004 zijn alle kabels in rechte lijnen geplaatst (zie Figuur 5.4.7). Kabel KB004 is een mat waarin de kabel in parallelle lussen op gelijke afstand verloopt (Figuur 5.4.8).



Figuur 5.4.7 Experiment 1 - fiberoptische -kabel in zand



Figuur 5.4.8 Experiment 4 - fiberoptische -mat in zand

Kabelposities

Alle afstands aanduidingen verlopen in de richting van de benedenstroomse teen. De verticale afstanden hebben de overgang van zand/klei als referentie.

Experiment 1**Zand**

KA001 1.5m (10cm diep in de zandlaag)

KA003 7.5m (10cm diep in de zandlaag)

KA005 13.5m (10cm diep in de zandlaag)

Klei

KA002 5m (10cm diep in de kleilaag)

KA004 8.5m (10cm diep in de kleilaag)

KA006 10m (10cm diep in de kleilaag)

Experiment 4

KB001 aan de voet 0m (10cm diep in de zandlaag)

KB002 5m (10cm diep in de zandlaag)

KB003 8m (10cm diep in de zandlaag)

KB004 10-11m (mat) (20cm diep in de zandlaag)

KB005 12.5m (10cm diep in de zandlaag)

KB006 14.7m (10cm diep in de zandlaag)

De exacte posities van de kabels en de mat kunnen van de officiële CAD-tekeningen overgenomen worden. Deze zijn niet onderdeel van deze rapportage.

Voor de heat-pulse methode is de vezeloptische kabel d.m.v. elektrische stroom door de metalen bekleding van de kabel verwarmd

Tabel 5.4.1 Technische details van de temperatuurlussen voor elk experiment

Sectie	Verwarming lengte	Stroomtoevoer	Elektrische weerstand	Theoretische elektrische uitgangsspanning
Experiment 1	143 m	390 V	59 Ω	18.0 W/m
Experiment 4	218 m	385 V	82.5 Ω	8.2 W/m

Instrumentatie experiment 1 en 4

De vezeloptische temperatuurmetingen zijn met een OTS 40P laserunit (Figuur 5.4.9) uitgevoerd. Alle instrumenten en het controlesysteem voor de verwarming van het kabel zijn in een box op de kruin van de dijk geplaatst (Figuur 5.4.10). Een mobile generator verzorgde de stroom voor de verwarming van het kabel.



Figuur 5.4.9 OTS 40P laser unit voor gedistribueerde temperatuurmeting



Figuur 5.4.10 OTS 40P en controle systemen voor het experiment

5.4.4 Meetresultaten en interpretatie

Met de heat-up (of heat-pulse) methode, beschreven in Paragraaf 5.4.2, kunnen veranderingen in de opwarmings-temperatuur, of de verschillen tussen de opwarmingstemperatuur voor en na de start van het experiment langs de vezeloptische kabel aangetoond worden. Deze kunnen worden gerelateerd aan een verhoogd warmtetransport door de verschillende waterverzadigingen van de bodem, of aan stromingen langs het kabel. Hoge temperaturen, of grote temperatuurverschillen geven aan dat de stromingssnelheid rond de kabel aanzienlijk toeneemt.

Experiment 1

Zand

Met de start op 02.10.2009 konden duidelijke verschillen in de opwarmingstemperatuur in alle in het zand geplaatste kabels gedetecteerd worden. Dit geeft aan dat er aanzienlijke verschillen in de verzadiging van het zand en zelfs

beginnende matige kwel bestond. Op een bepaald moment ontstond er een duidelijke kwelweg over kabel KA005 aan de bovenstroomse kant. Vanaf dit tijdstip ontstonden er meerdere kwelwegen naar de benedenstroomse kant. Tegelijkertijd kon geobserveerd worden dat de kwel door deze kanalen toenam.

Klei

In de kleilaag werd de kwel slechts kort voor het falen van de dijk waarneembaar.

Experiment 4

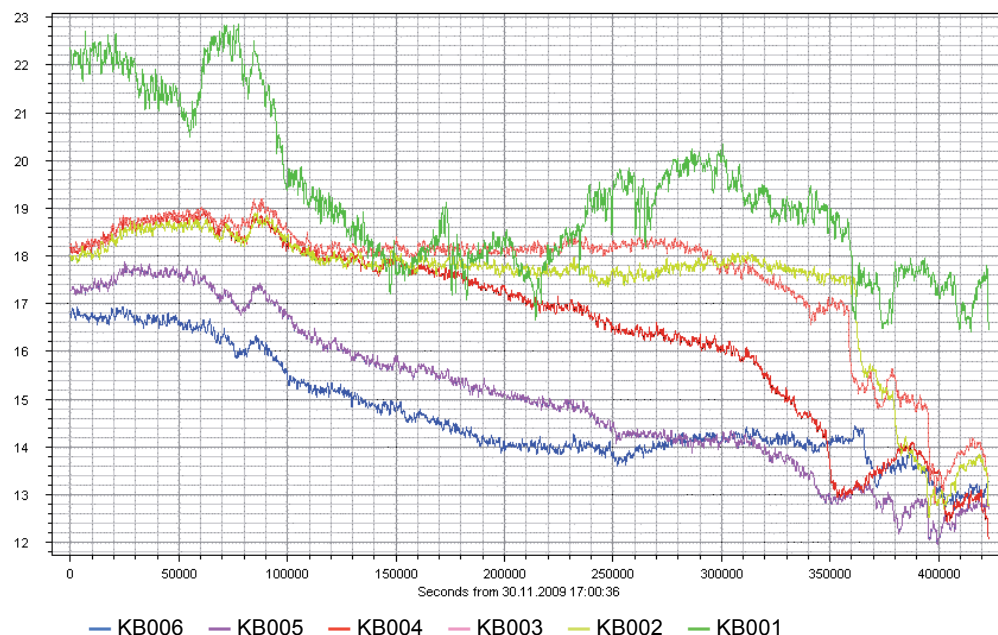
Met het vullen van het waterreservoir geeft kabel KB006 een verandering van temperatuur aan. Dit suggereert een verandering van de verzadiging van de bodem rond de vezeloptische kabel. De verzadiging neemt continu met de tijd toe, en er ontstaat kwel. Vanaf het begin van het experiment de 30.11.2009 tot 04.12.2009 verspreid de verzadiging/kwel zich meer of minder gelijkmatig over de gehele lengte van de dijk, vanaf de bovenstroomse kant naar ongeveer het midden van de dijk (dwarsdoorsnede). Vanaf dat moment ontstaan er plaatselijke kwelkanalen in de benedenstroomse helft van de dijk over kabel KB003, KB002 en later KB001.

Om het kwelwater door de dijk beter te visualiseren, is de warmteontwikkeling in geselecteerde meetlocaties op het vezeloptische kabel in Figuur 5.4.11 aangegeven.

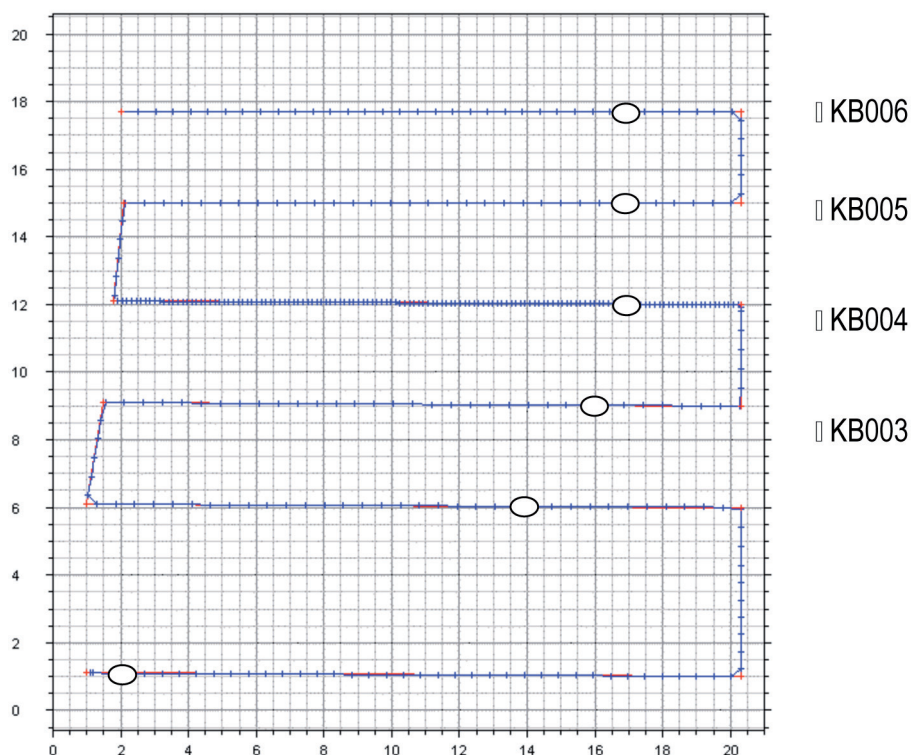
De afbeelding geeft duidelijk weer dat de verzadiging aan de bovenstroomse kant van de dijk bij KB006 tot KB004 continu stijgt. KB006 reageert onmiddellijk na de start van het opvullen van het bassin. Na ongeveer 4 dagen kwel (350000 sec) verschijnt er een plotselinge doorbraak bij KB004.

De benedenstroomse helft van de dijk behoudt een meer of mindere constante staat na een geringe verhoging van de verzadiging in het begin (na ongeveer 1 dag na de start van het experiment). Na de doorbraak bij KB004 geven de kabels (KB003, KB002 en KB001) van de benedenstroomse helft kort na elkaar een duidelijke temperatuurdaling aan. Dit geeft aan dat de kwelkanalen die bij KB004 begonnen, groeien.

De iets verschillende temperatuurontwikkeling van KB001 wordt hoogstwaarschijnlijk door kwelwater vanaf de benedenstroomse kant veroorzaakt.



Figuur 5.4.11 Temperatuurontwikkeling bij geselecteerde meetpunten van de vezeloptische kabel gedurende experiment 4. De posities worden in Figuur 5.4.12 weergegeven



Figuur 5.4.12 Posities van de meetpunten op het vezeloptische kabel gedurende experiment 4, geven de temperatuurontwikkeling zoals in Figuur 5.4.11 weergegeven, aan

5.4.5 Conclusies

Het vezeloptische lekdetectiesysteem geeft reeds met de start van het opvullen van het bassin veranderingen van de verzadiging van de bodem rond de kabels aan. De posities van de kwelkanalen worden correct gedetecteerd. Het systeem kan een kwalitatieve onderscheiding van de ernst van de verzadiging aangeven. Een kwantitatieve evaluatie van de kwel kan door het vaststellen van de zichtbare thermische geleiding langs de kabel met behulp van een variatie van de door GTC Kappelmeyer GmbH ontwikkelde EGRT-methode geschieden.

Stichting

IJkdijk

5.5 Deelexperiment InTech Dike Security Systems

Auteurs: Onne Rösingh en Willem de Vries

5.5.1 Inleiding

InTech Dike Security Systems BV heeft een remote sensing-techniek ontwikkeld om faalmechanismen van waterkeringen vroegtijdig te kunnen opsporen. Deze techniek berust op het op afstand meten van de uitstraling van infrarood van de waterkering.

Met behulp van speciale software kunnen verschillende faalmechanismen zoals piping in een vroeg stadium worden herkend.

Doordat met deze techniek op afstand wordt gemeten wordt het dijklichaam niet verstoord of verzwakt. Daarom kon deze sensortechniek bij alle vier de pipingexperimenten worden beproefd. De vier experimenten hebben plaatsgevonden in de 2e helft van 2009.

Voor het verrichten van de metingen tijdens de vier experimenten heeft InTech gebruik gemaakt van een mobiele meetopstelling.



Figuur 5.5.1 Installatie meetopstelling InTech 1

Met de vier verschillende experimenten is een zeer grote hoeveelheid meetdata verzameld (8 terra byte). In deze rapportage worden per experiment de behaalde resultaten weergegeven en gevisualiseerd. Momenteel wordt nog gewerkt aan een nadere analyse van alle meetgegevens en een vergelijking met de resultaten van de referentiemonitoring en andere sensorsystemen.

5.5.2 Aanpak en werkwijze

Voorafgaand aan de experimenten is door InTech BV een vraagspecificatie voor het Pipingexperiment opgesteld. In deze vraagspecificatie is de opzet van het experiment beschreven. Aansluitend is een meetplan opgesteld waarin de werkwijze voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen wordt beschreven.

De basis van de techniek van InTech berust op het op afstand meten van temperatuursverschillen aan het dijkoppervlak. Deze temperatuursverschillen worden gemeten middels speciale thermische camera's in combinatie met hiervoor ontwikkelde software die verschillende faalmechanismen van waterkeringen vroegtijdig kan herkennen.

Thermische infraroodcamera's kunnen zeer nauwkeurig temperatuursveranderingen meten. Het principe van piping is dat door kleine waterstroompjes door een waterkering zand- en gronddeeltjes worden meegenomen waarna verloop van tijd de waterkering zal bezwijken (de z.g. "zandmeevoerende wellen"). De (beginnende) waterstroompjes zullen automatisch worden gedetecteerd doordat deze een temperatuursverandering aan het dijkoppervlak zullen geven. Het uiteindelijke doel is door het meten met deze camera's om piping in een zo vroeg mogelijk stadium automatisch te laten herkennen.

Het dijkbewakingssysteem van InTech berust op het principe: het vaststellen van herkenningsspatronen in temperatuursverloop en vervorming van een waterkering die ontstaan door faalmechanismen. Deze herkenningsspatronen worden met behulp van speciale software omgezet in modellen die gebruikt kunnen worden voor een early-warning system.

Het doel van dit experiment is:

- Vaststellen wanneer zandmeevoerende wellen worden waargenomen met thermische camera's
- Vaststellen wat de temperatuursverandering is die veroorzaakt wordt door zandmeevoerende wellen aan het dijkoppervlak
- Vaststellen wat het effect is van omgevingsfactoren (zon, regen, wind) op de meetresultaten van thermische camera's en of deze automatisch (softwarematig) kunnen worden verminderd ("ruis onderdrukking")
- Vaststellen van de snelheid waarmee een dijkvlak bezwijkt als gevolg van piping (relaties stijghoogteverschillen water / opbouw dijklichaam (grootte en materiaal) / snelheid en hoeveelheid uittredend water
- Vaststellen of het huidige software-model van InTech voldoende betrouwbaar is voor het automatisch herkennen en voorspellen van het faalmechanisme piping

5.5.3 Instrumentatie en installatie

Bij de proefopstelling voor de pipingexperimenten is gebruik gemaakt van drie verschillende camera's die geplaatst zijn op een hiervoor speciaal ingericht meetvoertuig met telescoopmast.

Het voertuig is voorzien van een stabilisatiesysteem om een zo stabiel mogelijk beeld te verkrijgen. Om de camera's op afstand te kunnen bedienen is een draadloos communicatiesysteem met een HSDPA UMTS router geïnstalleerd.

Het voertuig is tevens voorzien van een noodstroomvoorziening bestaande uit vier accu's (met in totaal 1000 Ampère-uur) en een omschakelautomaat met omvormer van 24V naar 220V. Hierdoor kan het systeem over een lange tijd (ca. 8 uur) autonoom metingen verrichten.

- Twee servers voor opslag en bewerking van meetdata
- reserve energievoorziening (totaal 1000 Ampère-uur) met omschakelautomaat
- Telescoopmast ca 11 meter hoogte
- Stabilisatiesysteem meetvoertuig
- Draadloos Umts router en data communicatiesysteem
- 16 terra bite opslag capaciteit
- Weerstation (buitentemperatuur, luchtdruk, windsnelheid, windrichting, stralingswarmte, luchtvochtigheid en binnentemperatuur meetvoertuig)
- 4 draadloze sensoren voor meting bodemtemperatuur en bodemvochtigheid tbv referentie
- Twee infraroodcamera's en één kleuren videocamera met onderstaande specificaties

Camera nummer	Type camera	Sensor	Thermische gevoeligheid	Video compressie	Functie in experiment
1	Kleurenvideo camera met 50 mm lens 26x optical zoom		Optische camera (daylight)	Digital video compressie mpeg4	Optisch beeld, kleuren video overzicht van de dijk met daglicht
2	Thermische camera met 50 mm lens en 2X optical zoom	320 X 240 76.800 meetpunten	85 mK	Video compressie mpeg4	Standaard thermisch, video gericht op midden van de dijk
3	Gemodificeerde thermische high resolution camera met 25 mm lens en 4X optical zoom	640 X 512 327.680 meetpunten	85 mK	(analoge) video compressie mpeg4 en digital 14 bit data zonder compressie	Gemodificeerde thermische camera met volledig overzicht van de dijk

De bovenstaande meetopstelling is voor alle vier de pipingexperimenten gebruikt.

5.5.4 Verloop van experiment en analyses

Onderstaand is het verloop per experiment weergegeven en zijn omstandigheden vermeld die de meetresultaten hebben beïnvloed.

Na afloop van ieder experiment is de meetdata bewerkt middels special software (beeldbewerking op basis van algoritmen) om het faalmechanisme beter te kunnen visualiseren en herkennen.

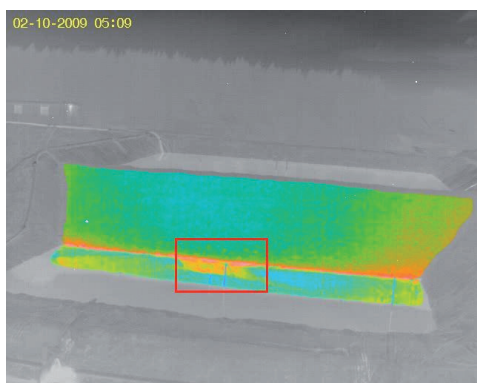
Experiment 1

De proefdijk van experiment 1 was opgebouwd uit een kern bestaande uit bigbags gevuld met zand en een kleibe-kleding.

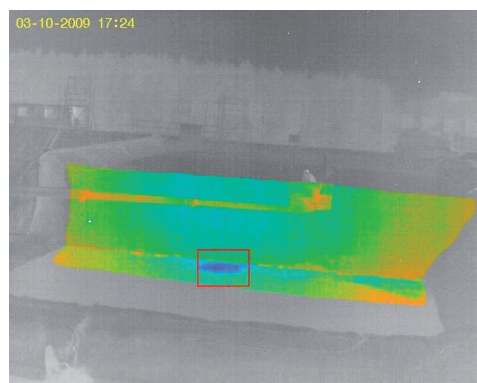
Experiment 1 is gestart op 29 september om 12:00 uur. De metingen van InTech zijn iets later gestart doordat de locatie op 28 september niet goed bereikbaar was voor het meetvoertuig. Uit de meting blijkt dat de eerste zandmeevoerende wellen zichtbaar zijn op 1 oktober om 20:00 uur. Onderstaand een impressie van deze zandmeevoerende wellen op 2 oktober om 5:09 uur. De temperatuur van uitstromend water en zand is duidelijk warmer dan de temperatuur van het benedenstrooms bassin.

Op 3 oktober 2009 om 03:00 uur is de wintertijd ingegaan. Doordat de tijd van de server niet was gesynchroniseerd, loopt de tijdregistratie na 3:00 uur één uur voor op de werkelijke tijd.

Op 3 oktober 2009 vanaf 10:00 uur neemt de temperatuur van het uitstromende water en zand aanzienlijk af. Dit wordt veroorzaakt door de toename van het debiet. Op 3 oktober om 16:25 (wintertijd) vindt de doorbraak plaats. De periode tussen detectie van zandmeevoerende wellen en doorbraak bedraagt 45 uur.



Warme uitstroom van zandmeevoerende

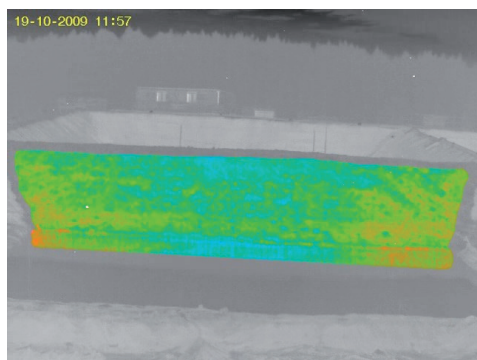


Proefdijk experiment 1 vlak voor de doorbraak wellen

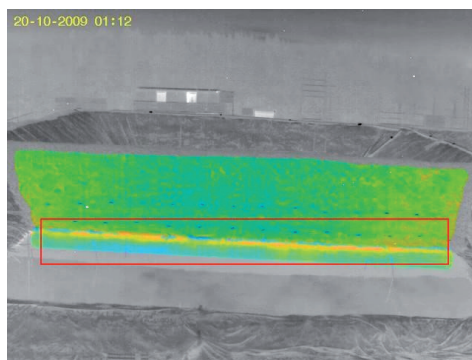
Figuur 5.5.2 Beeldserie van experiment 1

Experiment 2

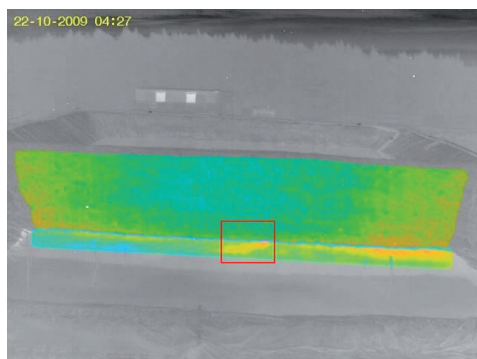
Experiment 2 is gestart op 19 oktober 2009 om 12:00 uur. In eerste instantie is duidelijk kwel zichtbaar. De eerste verschijnselen van zandmeevoerende wellen zijn op 21 oktober om 20:00 uur duidelijk meetbaar. De periode tussen detectie van zandmeevoerende wellen en doorbraak bedraagt 87 uur.



Start experiment 2



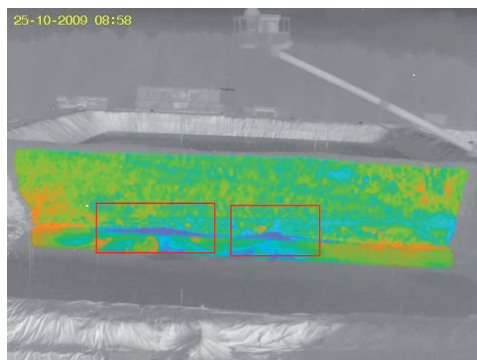
Kwel



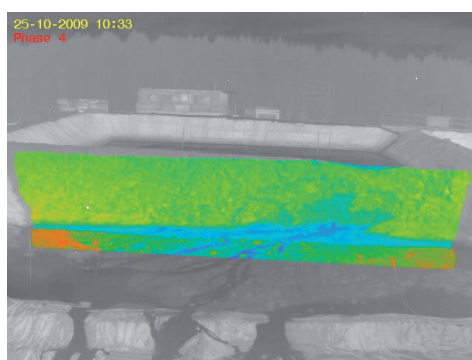
Piping



Temperatuur omslag



Vlak voor doorbraak

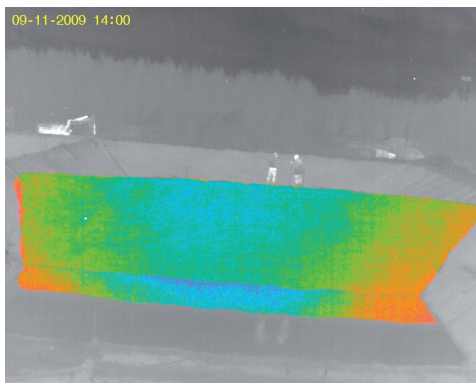


De doorbraak

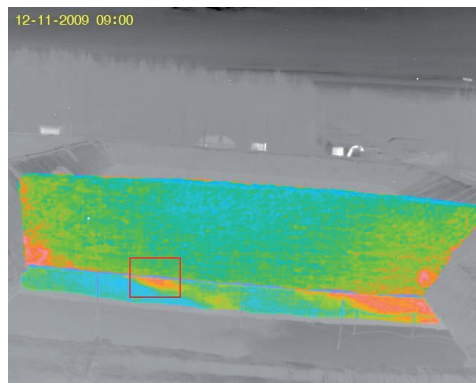
Figuur 5.5.3 Beeldserie van experiment 2

Experiment 3

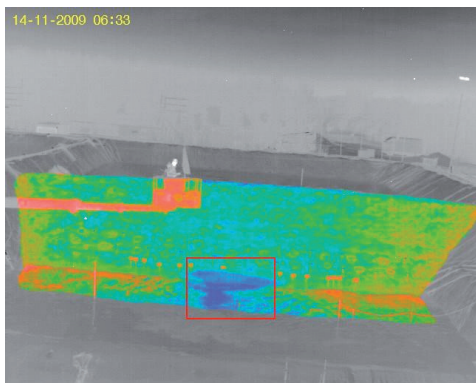
Experiment 3 is gestart op 9 november 2009 om 14:00 uur. In eerste instantie is duidelijk kwel zichtbaar. De eerste verschijnselen van zandmeevoerende wellen zijn op 12 november om 01:30 uur duidelijk herkenbaar. Op 14 november om 06:36 bezwijkt de proefdijk. De periode tussen detectie van zandmeevoerende wellen en doorbraak bedraagt 53 uur.



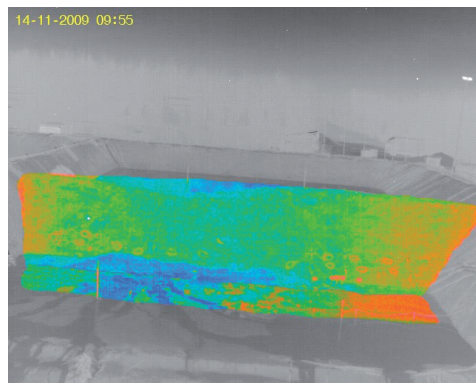
Start experiment



Wellen duidelijk detecteerbaar



Vlak voor doorbraak



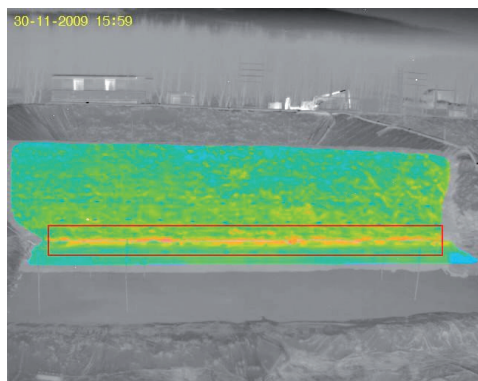
Na doorbraak

Figuur 5.5.4 Beeldserie van experiment 3

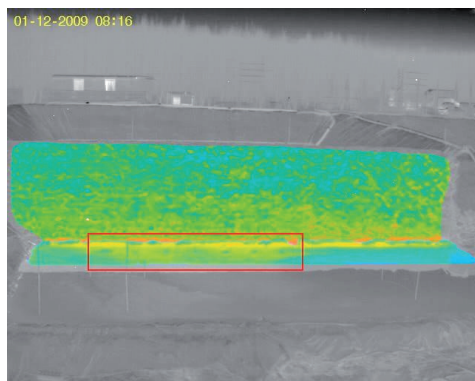
De zwarte folie aan weerszijde van de proefdijk straalt een aanzienlijke hoeveelheid warmte uit die de metingen aan het uiteinde van de proefdijk sterk hebben beïnvloedt.

Experiment 4

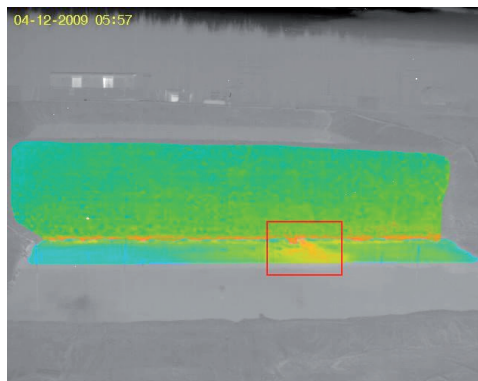
Experiment 4 is gestart op 30 november 2009 om 11:00 uur. Door een kabelbreuk en een softwarematig probleem is de meting van InTech later gestart. Op 30 november is wel een aantal metingen verricht. Vanaf 1 december om 8:00 uur waren alle problemen verholpen. Op 30 november is kwel duidelijk zichtbaar. De eerste verschijnselen van piping zijn vanaf 1 december om 08:16 uur duidelijk meetbaar. Op 5 december om 14:21 uur bezwijkt de proefdijk. De periode tussen detectie van zandmeevoerende wellen en doorbraak bedraagt 102 uur.



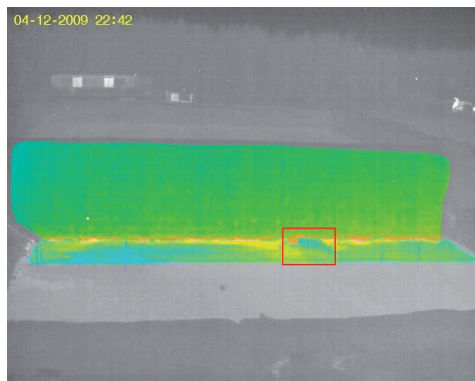
Kwel



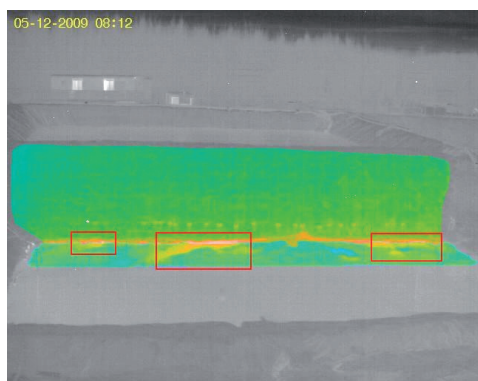
Eerste zandmeevoerende wellen zichtbaar



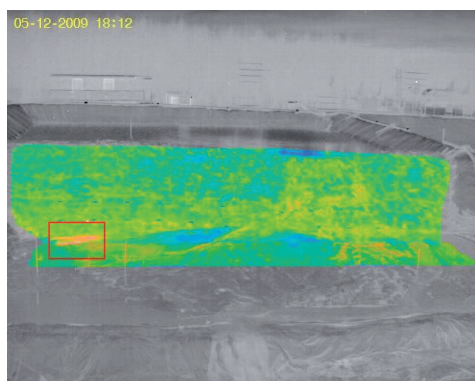
Wel 11 is de meest actieve



Temperatuurslag bij wel 11



Andere wellen actiever



Ook na "doorbraak" gaat "pipingproces" op andere plekken verder

Figuur 5.5.5 Beeldserie van experiment 4

5.5.5 Conclusie en aanbevelingen

InTech Dike Security Systems BV heeft in de periode van september 2009 tot en met december 2009 metingen verricht bij vier pipingexperimenten op de IJkdijksite.

Het verloop van het pipingproces bij alle vier de experimenten is met name met de gemodificeerde "high resolution camera" met ca. 330.000 meetpunten zeer goed te volgen.

De zandmeevoerende wellen zijn met de meettechniek van InTech bij alle vier de experimenten in een vroeg stadium te herkennen. Zandmeevoerende wellen geven een duidelijk temperatuursverandering aan het dijkoppervlak c.q. het benedenstroomse bassin. Uit de resultaten van de experimenten blijkt dat het kwelwater in eerste instantie wordt opgewarmd door warmte in het dijklichaam. Gebleken is dat wanneer de snelheid van water van de zandmeevoerende wellen toeneemt, het water minder warmte van het dijklichaam kan opnemen en de temperatuur van het uitstromende water afneemt.

Het tijdspad tussen detectie van zandmeevoerende wellen en doorbraak varieert tussen 45 uur en 102 uur. Aan de hand van nadere analyse moet duidelijk worden waar deze variatie door wordt veroorzaakt. Ondanks deze variatie is met deze techniek bewezen dat het detecteren van zandmeevoerende wellen in een zéér vroeg stadium mogelijk is. Aan de hand van de nadere analyses zullen de algoritmen van het herkenningsmodel verder worden verbeterd waarmee de betrouwbaarheid van de metingen nog verder zal worden vergroot.

5.6 Deelexperiment ITC Enschede

Auteur: Dr. Mark van der Meijde

5.6.1 Inleiding

Het ITC heeft aan 3 van de 4 experimenten deelgenomen. Dit waren experiment 2, 3 en 4. Tijdens deze experimenten zijn er metingen uitgevoerd voor het bepalen van potentiaalverschillen veroorzaakt door stroming van water door en onder de dijk. Deze metingen zijn uitgevoerd door middel van absolute potentiaalmetingen via non-polariseerbare elektrodes op 24-27 locaties op de dijk. In de volgende paragrafen wordt de apparatuur en de meetopstelling van de elektrodes besproken.

5.6.2 Aanpak en werkwijzen

Er is voor gekozen om twee parallelle lijnen met elektrodes in de lengterichting op de dijk aan te brengen, ongeveer 1-1,25 meter van elkaar. Per lijn zijn tussen de 12 en 14 elektrodes geplaatst (afhankelijk van de aanwezige ruimte op de dijk). Er is aan beide zijkanten van het dijklichaam een ruimte van ongeveer 1 meter aangehouden tussen de rand en de eerste elektrode. De verschillende opstellingen, elektrodenummers en onderlinge afstanden staan per experiment in paragraaf 5.6.3 weergegeven. Specifieke zaken per experiment worden hieronder verder uitgewerkt.

Experiment 2

Alle absolute potentialen zijn gemeten ten opzichte van een zogeheten nul-aarde. Dit is nodig om een stabiele referentie te krijgen voor alle metingen. Een nul-aarde is gezocht in de buurt van de dijk maar buiten het bereik van mogelijke potentiaalstromen resulterend van het experiment of van externe bronnen. Voor dit experiment is de nul-aarde verbonden aan een lang metalen hek dat in contact stond met de bodem.

In experiment 2 is er per elektrode meerdere keren gemeten en is het resultaat gemiddeld. Een meting duurde gemiddeld rond de 20 seconden per elektrode. Voor dit experiment wordt bij de resultaten ook de variatie per meting aangegeven.

Door problemen met de apparatuur was het niet mogelijk een zogenaamde nul-meting uit te voeren voordat het experiment werkelijk zou beginnen. Het was ook niet mogelijk om de metingen via het netwerk van TNO te laten verlopen. Alle metingen werden echter opgeslagen in het interne geheugen van de STING. Daar kon voor ongeveer 11 uur aan data in worden opgeslagen voordat het geheugen "geflushed" moest worden. Met regelmatige tussenpozen is er dus een korte periode (maximaal 20 minuten) waarin geen data verzameld is in verband met het data-transport.

Experiment 3

Voor experiment 3 hebben we de nul-aarde direct in de grond aangebracht (ongeveer 20 cm diep) in het bos aan de oostkant van het terrein, ongeveer ter hoogte van de dijk. De data zag er in eerste instantie goed uit maar na anderhalve dag was er rond 1.30 's nachts opeens een piek in de data en was de signaal-ruis verhouding daarna veel minder. Verplaatsing en vernieuwing van de nul-aarde heeft geen duidelijke verbetering van de signaal-ruis verhouding opgeleverd.

In experiment 3 is er besloten om niet meer te middelen (tests bij ITC tussen experiment 2 en 3 hadden uitgewezen dit weinig toegevoegde waarde had, een verhoging van de meetfrequentie (elke 6 seconden) zou echter veel meer data en meer preprocessing mogelijkheden geven. De metingen werden in dit experiment aangestuurd via een externe computer verbonden via het TNO-netwerk. Metingen konden daarom continue doorgaan.

Ook in dit experiment was het niet mogelijk een nul-meting uit te voeren. Door een verlate oplevering van de dijk konden we pas maandag aan het eind van de ochtend installeren terwijl het experiment aan het begin van de middag al van start ging.

Experiment 4

Voor experiment 4 is de nul-aarde aangebracht aan de oostkant van het terrein aan de binnenkant van de ringdijk op ongeveer 20 cm diepte in de grond. Dit om te voorkomen dat activiteiten wederom tot een verstoring van de nul-aarde zouden leiden. Er is een extra elektrode als alternatieve nul-aarde geplaatst (elektrode 15) in de kleilaag die nog aanwezig was in de andere proefbak. In de processing kan deze eventueel ook nog ingezet worden als nul-aarde mocht er een probleem blijken te zijn met de primaire nul-aarde.

De verdere opzet van het meetschema is hetzelfde gebleven als in experiment 3.

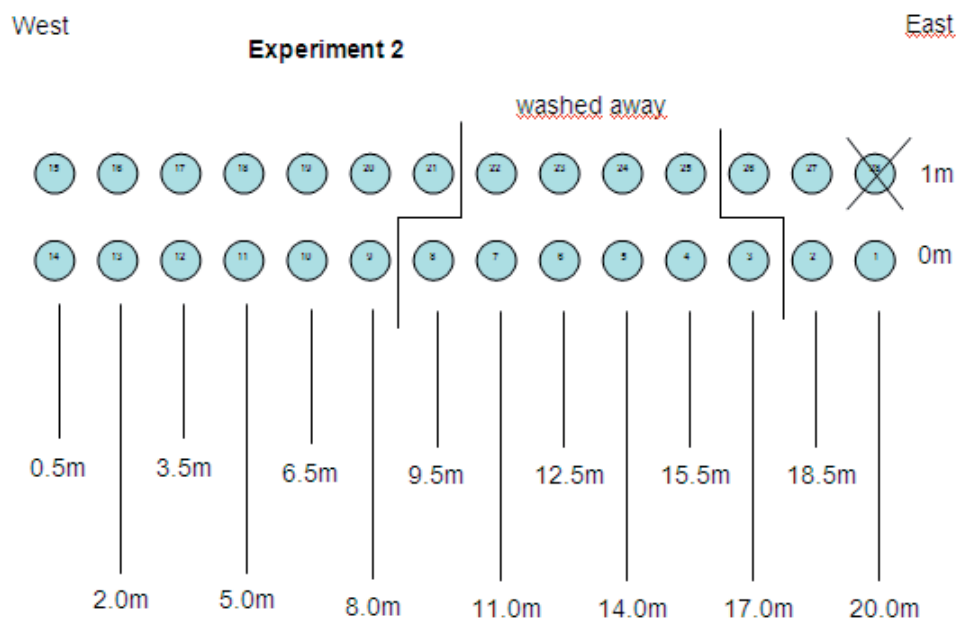
Voor dit experiment kon een nul-meting worden uit gevoerd. De apparatuur is de dag voor het begin van het experiment aan het einde van de dag aangezet, in de loop van de volgende ochtend is het experiment gestart. Dit resulteerde in een nul-meting van ongeveer 16 uur.

5.6.3 Instrumentatie

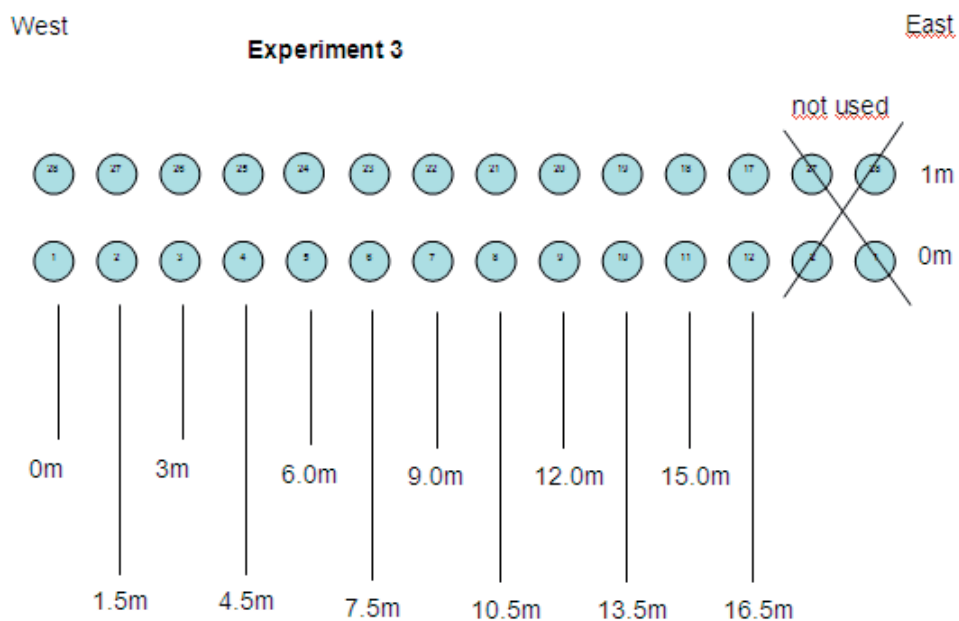
Er is gebruikt gemaakt van een STING R1 weerstandsmeter met SWIFT box van Advanced Geosciences Inc. (AGI, www.agiusa.com). Aan deze apparatuur waren een tweetal volledig geïsoleerde kabels met daaraan 14 zogenaamde 'dual mode smart switches' aangesloten. Deze elektrodes kunnen via een computer afzonderlijk aan- en uitgeschakeld worden. Er is gebruikt gemaakt van non-polariseerbare elektrodes bestaande uit een plastic cilinder met een poreuze keramische top en gevuld met een verzadigde kopersulfaat oplossing.

Ondanks verzekering vooraf van de fabrikant dat de apparatuur geschikt zou zijn voor automatische zelf-potential acquisitie bleek dit eenmaal in het veld niet het geval te zijn. De apparatuur is daarom aangepast om toch automatisch te kunnen meten. Dat heeft wel geresulteerd in een verhoging van het ruisniveau met een factor 3 in alle experimenten. Verder hebben deze problemen invloed gehad op de uitvoering van experiment 2, door een verlate start van het ITC deelexperiment (ongeveer 2 dagen te laat) en een variërende opstelling van de apparatuur tussen de 3 experimenten. Daarom zijn de data onderling lastig vergelijkbaar. Het is wel gegarandeerd dat de metingen per experiment correct zijn, er is alleen een offset in de absolute waarde van de gevonden waarden per experiment.

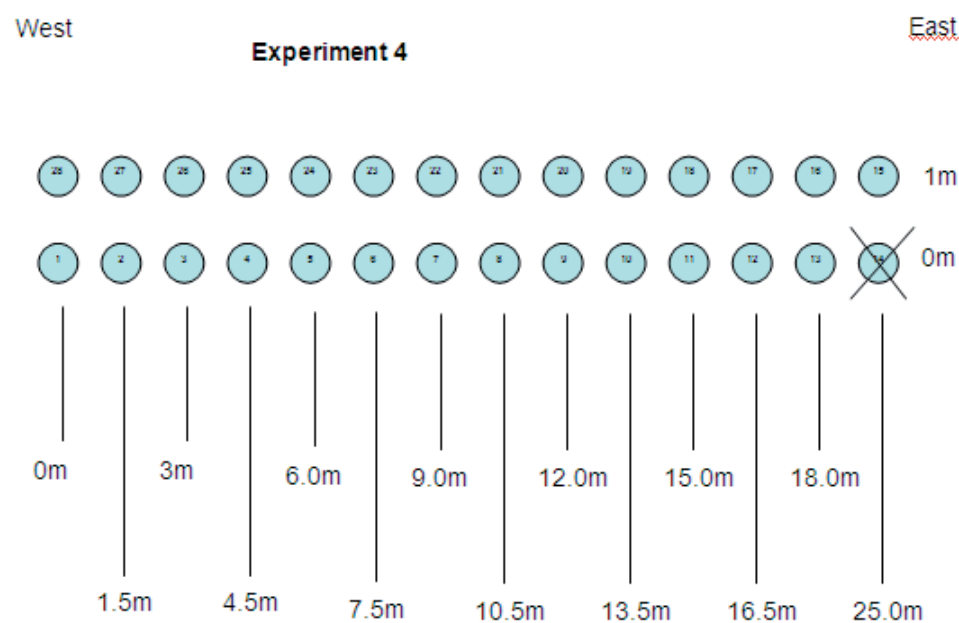
Op de hierna volgende pagina's is de opstellingen van de elektrodes in de verschillende experimenten weergegeven.



Figuur 5.6.1 Opstelling van elektrodes in experiment 2



Figuur 5.6.2 Opstelling van elektrodes in experiment 2



Figuur 5.6.3 Opstelling van elektrodes in experiment 4

5.6.4 Verloop van het experiment

Het experiment is wisselend verlopen.

In experiment 2 zorgden problemen met de apparatuur voor een verlate start van het ITC experiment (zie voor meer details Paragraaf Aanpak en werkwijzen). De metingen zijn verder goed verlopen, databetrouwbaarheid is onzeker. Het signaal/ruis niveau is minder dan vooraf bepaald, wat resulteert in een grotere onzekerheid. Zoals te zien is in de volgende Paragraaf Meetresultaten lijkt de juiste processing de meeste van de problemen te ondervangen. De juiste apparatuur en kabels hebben hoogstwaarschijnlijk een positieve invloed op de kwaliteit van de data voor toekomstige toepassingen van deze methode. Door deze beperkingen in de apparatuur is de hier gepresenteerde data een heel conservatieve inschatting van de mogelijkheden van deze methode.

Tijdens experiment 3 is ook storing ontstaan in de data die maar deels gecorrigeerd zijn.

Experiment 4 verliep zoals gewenst. Ruim voor de start van het experiment stond de apparatuur gereed en het heeft zonder storingen tot het einde van het experiment gefunctioneerd. Op een bepaald moment in het experiment had een deel van de elektrodes hoger op de dijk last van een externe storing waarvan de oorzaak niet gevonden is (elektrodes 20 t/m 28). Deze zijn niet meegenomen in de analyse.

5.6.5 Meetresultaten

Resultaten experiment 4

Zoals beschreven onder 'aanpak en werkwijzen' was experiment 4 het meest uitgebreide en complete experiment waarbij een nul-meting kon worden uitgevoerd en een volledige meetreeks (zonder storingen) is opgenomen gedurende het hele experiment. Een voorbeeld van een tijdreeks van zelfpotentialen voor elektrode 9 (aan de oostelijke kant van het doorbraakgebied) laat duidelijk zien dat er gedurende de nul-meting een zeer laag signaal niveau is op de sensoren. Er lopen geen stromen en er zijn geen externe activiteiten die tot grote elektrische stromingen in de grond kunnen leiden. Op 30 november begonnen 's ochtends de voorbereidingen voor het opstarten van de test zichtbaar met de scherpe piek iets voor de groene lijn die het begin van het experiment aangeeft. Vanaf de groene lijn gaat het ruisniveau duidelijk omhoog. Dit blijft ook gedurende de test op hetzelfde niveau. Naast het effect van water dat achter de dijk komt te staan kunnen deze signalen komen van de overige meetapparatuur, en menselijke activiteit rond het terrein.

Uit de onbewerkte data is het lastig om de trend te onderscheiden van kleinere potentiaalverschillen. De amplitudes lopen wel wat op tijdens de laatste uren voor de dijkdoorbraak. Om deze verschillende bronnen van signaal van elkaar te scheiden is de data gefilterd met een bandpassfilter. Het voordeel van een bandpass filter is dat de meest extreme variaties (zowel hoog als laagfrequent) verwijderd kunnen worden. In dit geval zijn verschillende frequenties getest.

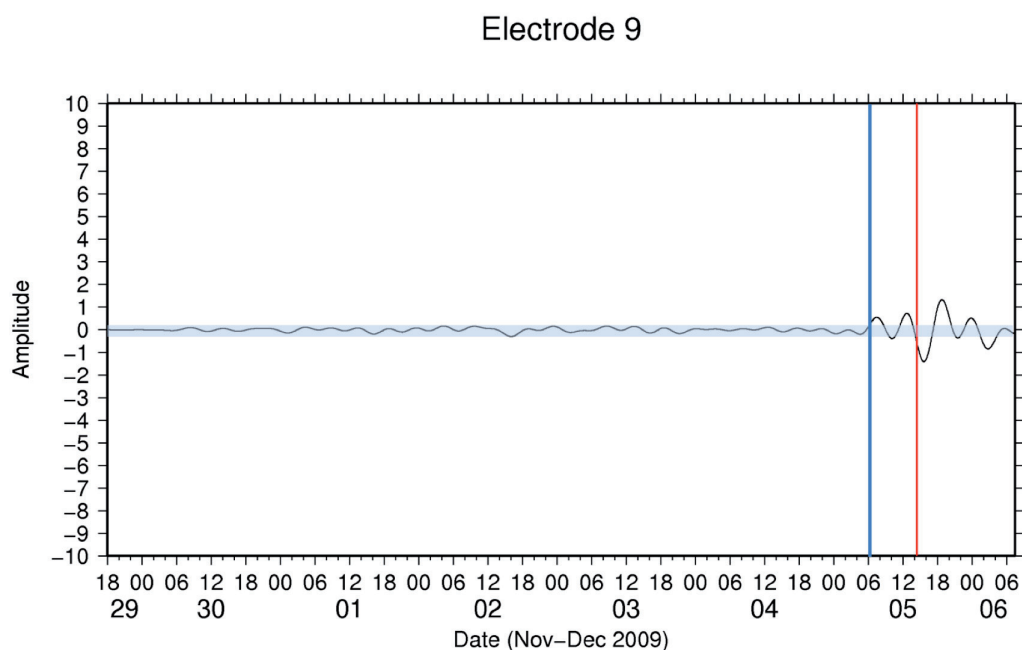
In Figuur 5.6.5 is de data voor elektrode 9 gefilterd met een bandpassfilter waarbij de hoog en laagfrequente signalen verwijderd zijn (met een periode van ongeveer 2 uur en 20 uur, respectievelijk). Het 'ruis'-niveau, aangegeven met de blauwe balk, is aanzienlijk lager en onderscheidt zich duidelijk van de signalen die optreden vanaf 6:00 uur; 8 uur voor de dijkdoorbraak (blauwe verticale lijn). Voor de naastgelegen elektrode 8, aan de westelijke kant van het uiteindelijke doorbraakgebied, is een vergelijkbaar signaal zichtbaar (Figuur 5.6.6 *Voorbeeld van zelf potentialen gemeten voor elektrode 8, de westelijke elektrode in het dijkdoorbraakgebied (zie voor locatie Paragraaf 5.6.3)*). Beide bovenstaande elektrodes stonden op de onderste rij elektrodes, het dichtst bij de teen van de dijk. Elektrode 19 (Figuur 5.6.7) is een voorbeeld van een elektrode van de rij die een meter hoger op de dijk stond. Door de iets grotere afstand tot de bron van de potentiaalverschillen is het ruisniveau licht hoger. Wel is al eerder een signaal zichtbaar wat boven het ruisniveau uitkomt (al vanaf begin van de avond op 4 december). Door het hogere ruisniveau is het wel lastiger om dit al uniek aan de dijkdoorbraak toe te kennen. Verder is het patroon voor deze elektrode zeer vergelijkbaar met wat zichtbaar is op elektrodes 8 en 9.

Voor referentiedoeleinden hebben we tijdens dit experiment ook een elektrode in de naastgelegen bak (oostelijk van de dijk) geplaatst (elektrode 15, Figuur 5.6.8). Deze elektrode zou geen directe signalen van processen gaande in de dijk moeten registreren. De afstand en ontkoppeling van deze elektrode met het eigenlijke dijklichaam heeft tot gevolg dat voor deze elektrode geen kleine elektrische stromen vanuit of vanonder het dijklichaam geregistreerd worden. Dit is ook duidelijk zichtbaar in het lage signaalniveau en het ontbreken van een indicator van de

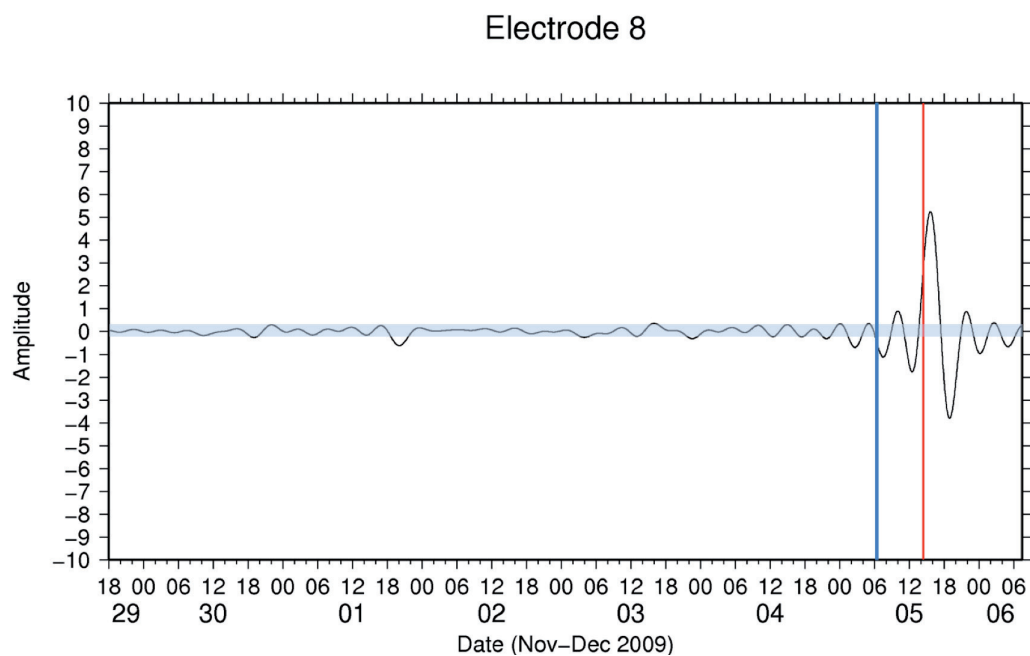
De bovenstaande data is allemaal bewerkt met hetzelfde filter. Figuur 5.6.9 laat zien dat de vorm van het toegepaste filter niet direct van belang is. De data gebruikt is van elektrode 9 en is gelijk aan de data in figuren 5.6.4 en 5.6.5. In dit geval is er minder van het hoogfrequente signaal verwijderd. Er zijn dus meer piekjes te zien, maar de algemene vorm en ruisniveau is vergelijkbaar met de data uit Figuur 5.6.5 met een lagere frequent signaal. Zowel de werkelijke dijkdoorbraak als wel de indicator een paar uur vooruit zijn duidelijk herkenbaar en te onderscheiden van het ruisniveau.

De data van de andere experimenten (2 en 3) zijn vergelijkbaar met de resultaten in dit experiment. Door een andere opstelling en verlate start in beide gevallen is de signaal-ruisverhouding lager, en heeft de data wat grotere schommelingen die niet direct aan interne dijk processen kunnen worden gerelateerd. Voor de data van experiment 2 is de meetfrequentie ook een stuk lager (3 keer minder data dan voor de andere twee experimenten). In experiment 3 hebben we wat last gehad van data-uitval door problemen met een van de kabels

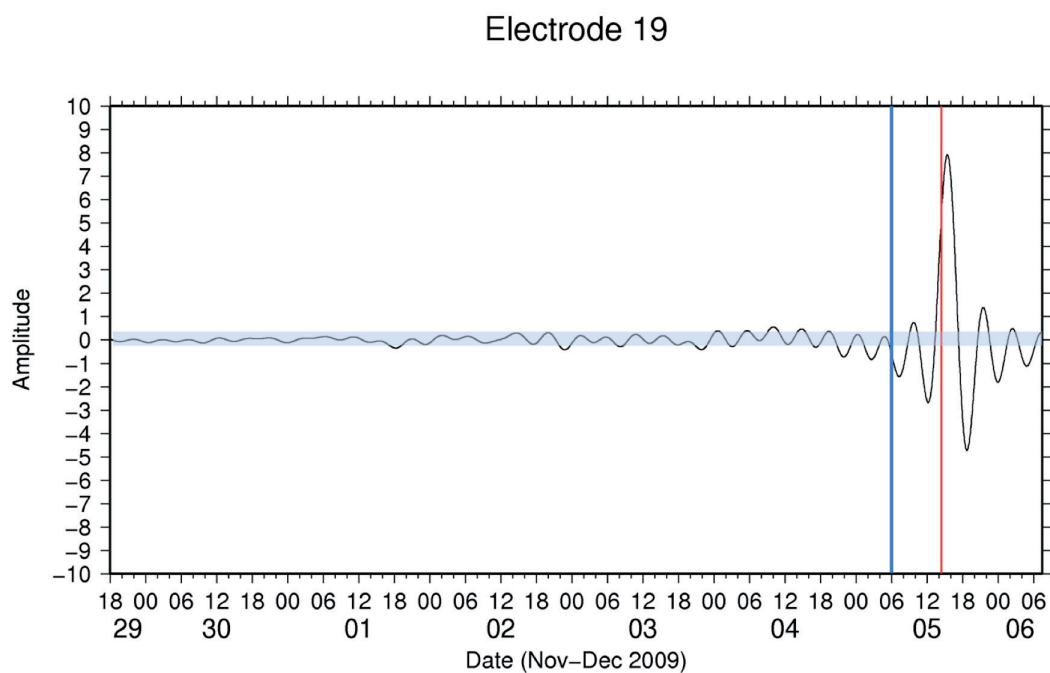




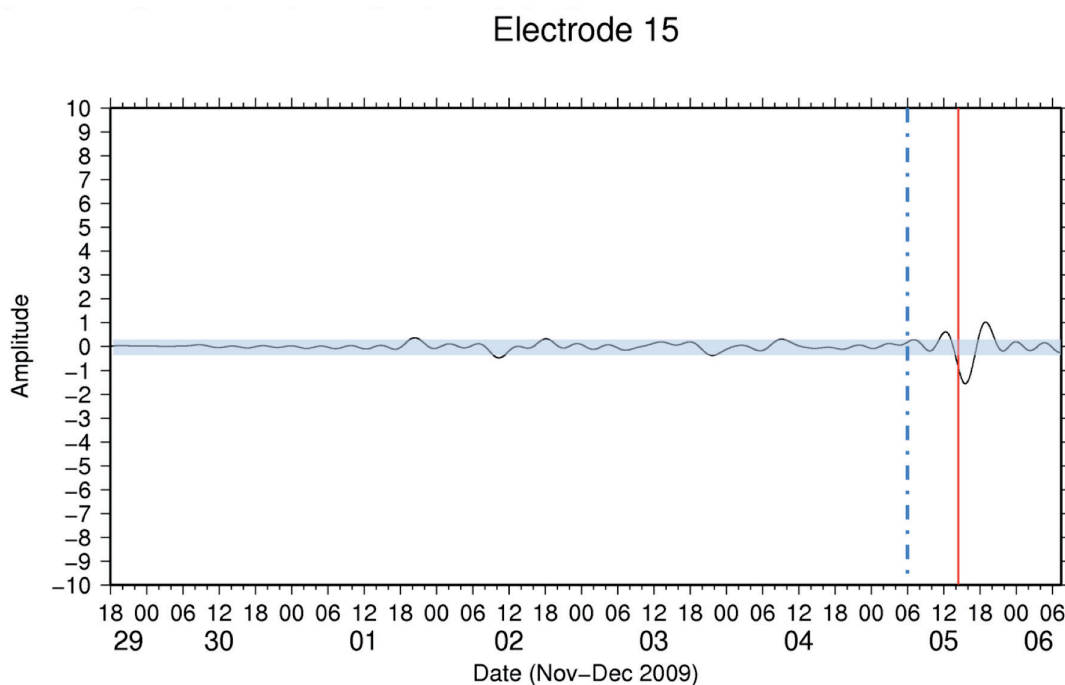
Figuur 5.6.5 Data gefilterd met een bandpassfilter van ongeveer 2 uur (hoogfrequent) en 20 uur (laagfrequent). Duidelijk is zichtbaar dat het signaal stabiel is geworden, een boel 'ruis' die zichtbaar werd bij het opstarten van het experiment is verdwenen. De blauwe balk geeft het 'ruis'-niveau aan voor deze elektrode. Om 6:00 uur op 5 december treden de eerste signalen op die buiten het ruisniveau vallen (blauwe verticale lijn), de eerste indicatie van de dijkdoorbraak die om 14:27 plaats vindt (rode lijn)



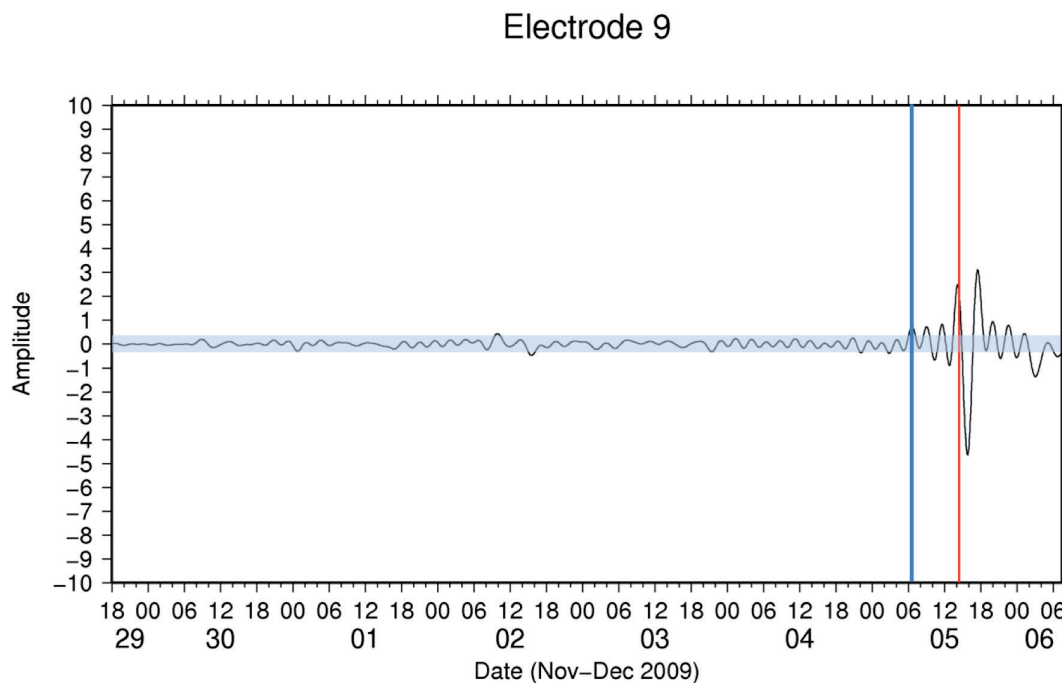
Figuur 5.6.6 Voorbeeld van zelfpotentialen gemeten voor elektrode 8, de westelijke elektrode in het dijkdoorbraakgebied (zie voor locatie Paragraaf 5.6.3)



Figuur 5.6.7 Voorbeeld van zelf potentialen gemeten voor elektrode 19, de oostelijke elektrode in het dijkdoorbraakgebied op de rij die hoger op de dijk gelegen is



Figuur 5.6.8 Referentie-elektrode 15, geplaatst in de naastgelegen bak (ongeveer 10 meter oostelijk van de dijk). Duidelijk is het veel lagere signaalniveau. Dit versterkt het argument dat met de elektrodes geplaatst op de dijk dus werkelijk gemeten wordt wat in de dijk gebeurt en dat deze weinig tot geen last hadden van externe invloeden. De blauwe gestippelde lijn geeft het tijdstip aan waarop bij de elektrodes die op de dijk geplaatst staan een indicatie werd gegeven van de dijkdoorbraak. Op de referentie-elektrode is geen signaal te zien, pas op het moment dat de dijk werkelijk doorbreekt en de stromingen zeer sterk worden, wordt pas iets gemeten met deze elektrode



Figuur 5.6.9 Respons voor elektrode 9, gelijk aan de data gebruikt voor Figuren 5.6.1 en 5.6.2, nu met een ander filter. Alhoewel de vorm van het signaal wat veranderd en hoger frequent is blijft de werkelijke doorbraak en de indicator vooraf duidelijk zichtbaar

5.6.6 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Op de IJkdijk zijn elektrische zelf-potentiaalmetingen uitgevoerd om te onderzoeken of ondergrondse erosie in het dijklichaam leidt tot kleine elektrische stromen die vanaf het oppervlak van de dijk meetbaar zijn. De data van experiment 4 laat duidelijk zien dat dit het geval is. Er is een nul-meting uitgevoerd waaruit blijkt dat een dijk in 'rust' een ander signaal geeft dan een dijk waar water tegen aan gezet wordt en waarin erosieve processen optreden die uiteindelijk leiden tot ondergraving van het dijklichaam. De metingen lijken beïnvloed te worden door externe invloeden (zowel invloed van andere sensoren in de dijk als oppervlakteverstoringen). Deze verstoringen zijn over het algemeen hoogfrequent met een beperkte amplitude en zijn met behulp van filtertechnieken goed te verwijderen. In het overgebleven signaal is een indicator van de dijkdoorbraak zichtbaar vanaf 8 uur voor de werkelijke dijkdoorbraak. Dit is duidelijk zichtbaar in alle elektroden die binnen 10 meter van de zwakke plek staan. Dit geldt ook voor de elektroden hoger op de dijk, waar zelfs al een paar uur eerder signalen waargenomen worden die er mogelijk op duiden dat er een proces gaande is in de dijk. Vergelijkbare sensoren buiten het dijklichaam laten een dergelijke trend niet zien waarmee bevestigd is dat de indicatoren werkelijk gerelateerd zijn aan interne dijkprocessen en niet aan externe invloeden.

Aanbevelingen

De huidige opnameapparatuur bleek, ondanks uitspraken van de fabrikant, niet direct geschikt voor de metingen zoals bedoeld in het projectvoorstel. Met wat alternatieve constructies hebben we toch nog kunnen meten, maar dit ging wel ten koste van de kwaliteit (=signaal/ruis verhouding) van de data. Voor toekomstig onderzoek wordt aangeraden om een andere datalogger aan te sluiten die deze metingen zonder kunstgrepen kan uitvoeren.

De analyse is tot nu toe gebaseerd op analyse en processing van de hele meetreeks, inclusief de dijkdoorbraak zelf. Wat verder onderzocht moet worden is of deze indicator van dijkdoorbraak ook aanwezig is in de data als alleen de data van voor de dijkdoorbraak geanalyseerd wordt. Het filteren van de hele tijdreeks levert namelijk altijd een

sinus-vormig signaal op rond het werkelijke moment van dijkdoorbraak en zal dus ook resulteren in verhoogde amplitudes voorafgaand aan de dijkdoorbraak. Deze amplitudes zijn niet noodzakelijk werkelijk gemeten maar een resultaat van de gevolgde processingtechnieken.

Het ontwikkelen van de precursor heeft verdere studie nodig. In de huidige processing wordt gewerkt met alle data, ook van na de dijkdoorbraak. Dat zou aangepast moeten worden in een zogenaamde progressieve analyse (alleen de data die tot dat moment beschikbaar is, waarbij de tijdreeks dus steeds langer wordt).

5.7 Deelexperiment Luisterbuis (Volker Wessels Telecom/Landustrie/TNO)

Auteur: Harrie Bos, Volker Wessels Telecom

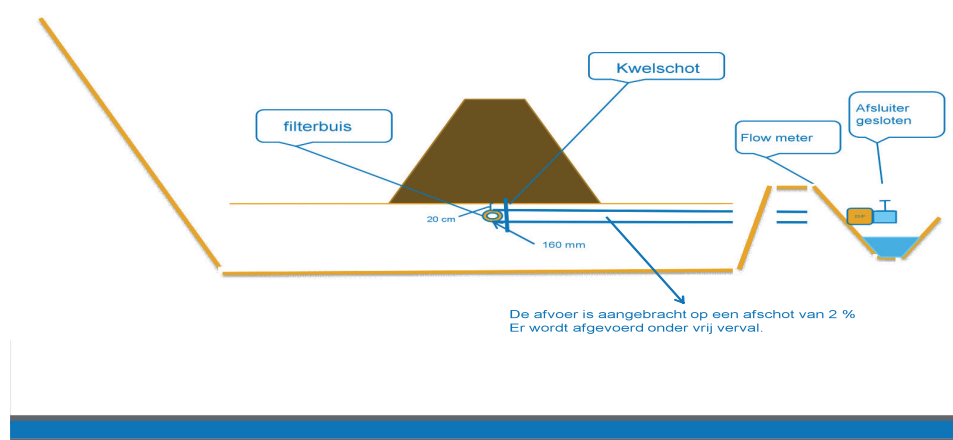
5.7.1 Inleiding

Het Luisterbuis consortium had de volgende onderzoekdoelstellingen in het 4e experiment:

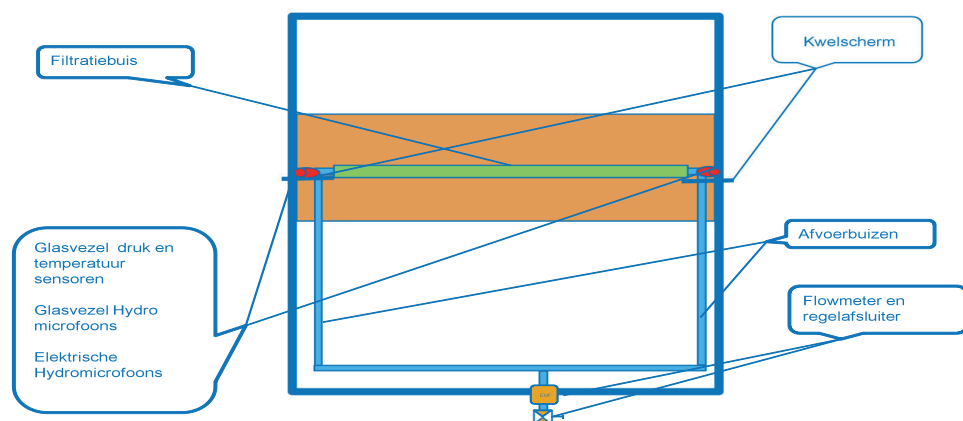
- 1 De mate waarin het conditioneringssysteem in staat is de piping te remmen en/ of te stoppen
- 2 De inzetbaarheid van glasvezelsensoren op basis van fiber bragg grating technologie voor het meten van druk (waterspanning) en temperatuur
- 3 Het waarnemen van events middels akoestische waarnemingen
- 4 Het middels een uiterst nauwkeurige tiltmeter waarnemen van minimale hoek veranderingen over de x- en y-as

5.7.2 Geïnstalleerd systeem

Het geïnstalleerde systeem bestaat uit een speciaal voor dit doel ontwikkelde filterbuis (drain), waarin de sensoren zijn aangebracht. De filterbuis bevindt zich in het midden van de dijk. Door de waterstroom onder de dijk af te voeren via de filterbuis zal piping stoppen.



Figuur 5.7.1 Afbeeldingen van installatie werkzaamheden



VolkerWessels Telecom



Figuur 5.7.2 Afbeeldingen van installatie werkzaamheden (2)

5.7.3 Resultaten van het conditioneringssysteem

Gaande het 6 dagen durend experiment is het conditioneringssysteem in drie fases (zie Hoofdstuk 3) van het pipingproces in werking gesteld door het afvoeren van water uit de filtratiebuis.

- 1 In de fase waarin zich de eerste zandmeevoerende wellen voordeden
- 2 In de fase waarin de pipe zich tot onder de kruin bevond (midden van de dijk)
- 3 In de fase waarbij de pipe zich een weg onder de gehele dijk door had gevormd

Fase 1

Na ca. 30 uur (dinsdag 1-12-09) ontstonden de eerste zandmeevoerende wellen. Om een lekkage in het T-stuk van de afvoerleiding te verhelpen moest het systeem tijdelijk in werking worden gesteld. Het resultaat was dat de gevormde zandmeevoerende wellen binnen enkele minuten waren gestopt en er ook geen watervoerende wellen meer waren. Het totale pipingproces was gestopt.

Fase 2

Na ca. 75 uur (donderdag 2-12-09) had het pipingproces zich verder ontwikkeld en de zich sterkst ontwikkelde pipe had inmiddels het midden (kruin) van de dijk bereikt. Om 14:00 uur is het systeem in werking gesteld door water af te voeren. Het resultaat was wederom dat de zandmeevoerende wellen binnen enkele minuten waren gestopt. Ook waren er geen watervoerende wellen meer.

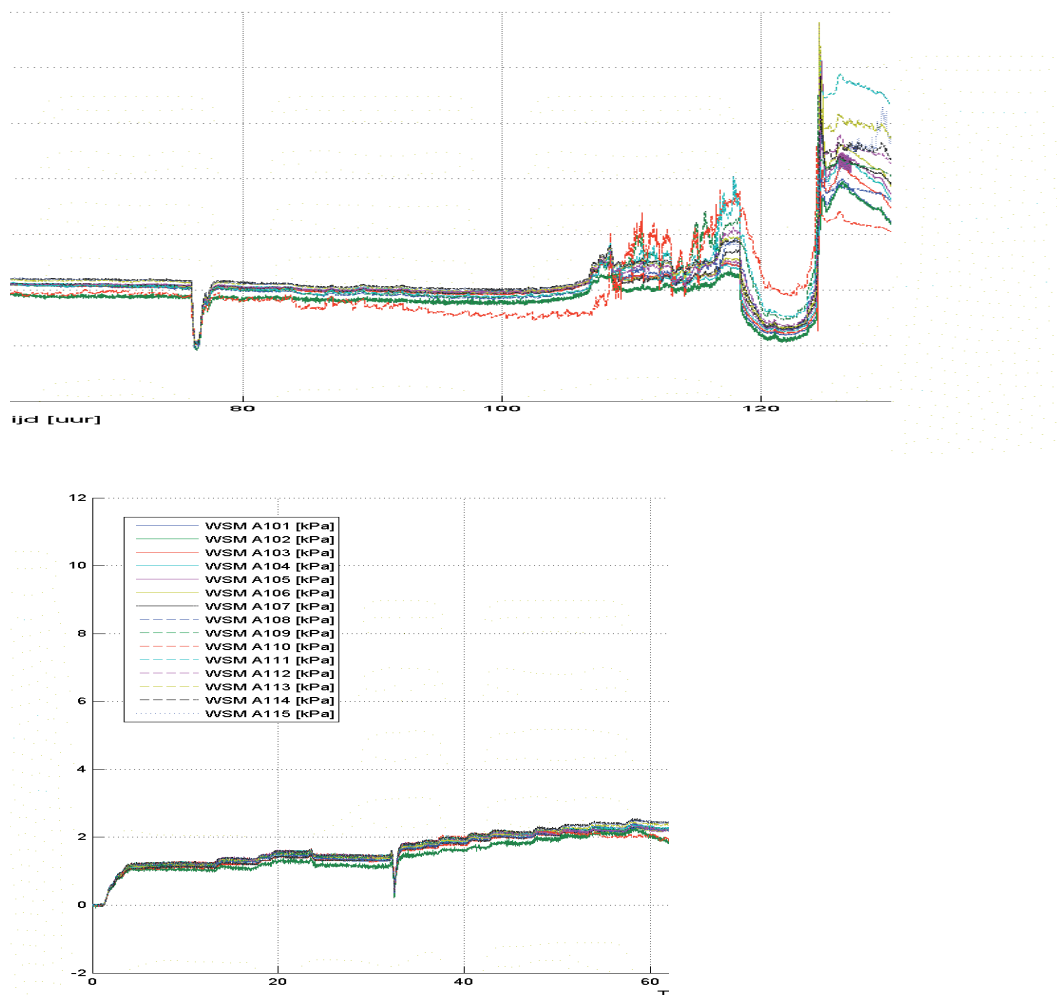
Stichting

IJkdijk

Fase 3

Na ca. 144 uur (zaterdag 5-12-09) had de pipe inmiddels een kanaal onder de gehele dijk door gevormd. Het debiet was ca. $140 \text{ m}^3 / \text{h}$. Om 08:00 uur is het systeem wederom in werking gesteld. Ook in deze fase is het gelukt de zand-meevoerende wel te stoppen. Er bleven nog wel enkele watervoerende wellen over, maar de flow door deze wellen was significant afgenomen. De afvoer door de filterbuis bedroeg circa $60 \text{ m}^3 / \text{h}$.

De eerder ontstane lekkages waren, nadat het systeem voor de derde keer in werking was gesteld, niet meer volledig dichten. Hierdoor bleef het systeem ca. $6 \text{ m}^3/\text{u}$ water afvoeren. Het gevolg was dat het bovenstroomsniveau aanzienlijk moest worden verhoogd om het pipingproces weer op gang te brengen.



Grafiek 5.7.1 Twee grafieken van het functioneren van het conditioneringssysteem

Het effect van het conditioneringssysteem is duidelijk zichtbaar in Grafiek 5.7.1 .

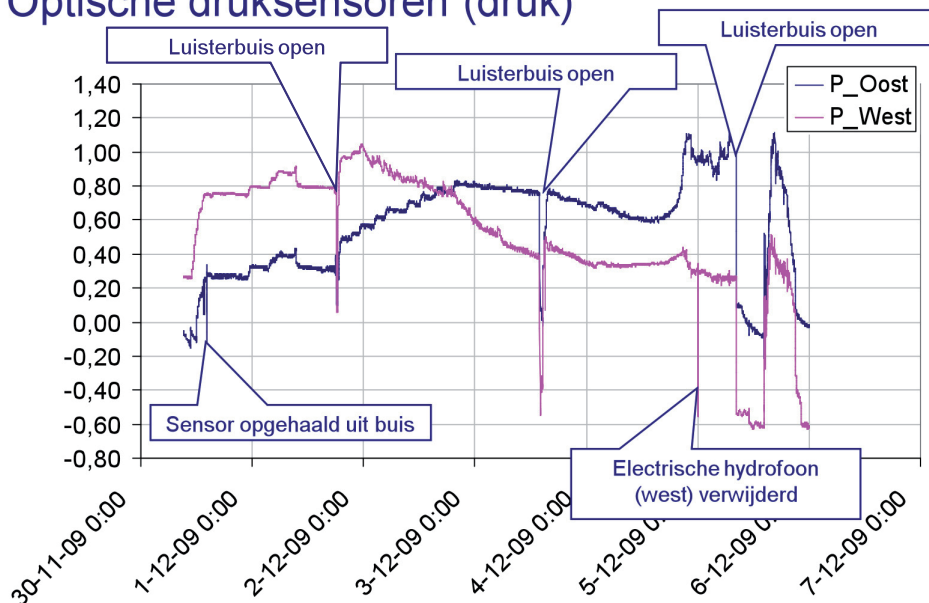
Het conditioneringssysteem werd gemonitord door de inzet van glasvezel gebaseerde druk en temperatuursensoren op basis van *fiber bragg grating* technologie die zich in de buis bevonden.

Glasvezelsensoren op basis van fiber bragg grating technologie voor het meten van druk (waterspanning) en temperatuur.

Aan beide zijden van het conditioneringssysteem (in de buis) zijn glasvezel druk- en temperatuursensoren aangebracht. Deze sensoren hebben een nauwkeurigheid van 20 mm. wk. en zijn voldoende nauwkeurig om het conditioneringssysteem te monitoren.

Het grote voordeel van deze techniek is dat deze sensoren via een enkele glasvezel op grote afstand van energie kan worden voorzien en dat de datacommunicatie kan worden aangestuurd en uitgelezen. De hiervoor benodigde glasvezelkabel kan door het conditioneringssysteem lopen en kan meerdere sensoren bevatten.

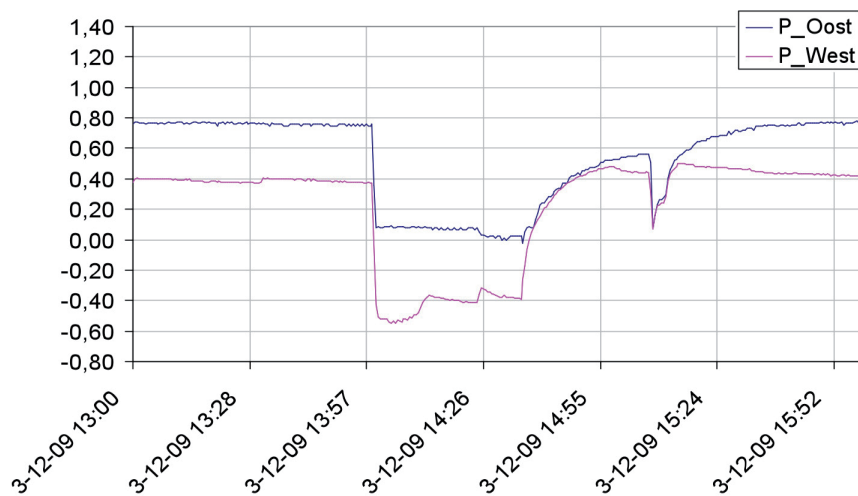
Optische druksensoren (druk)



Grafiek 5.7.2 Optische druksensoren

Het verschil tussen de oost en west sensor is veroorzaakt door de onderdruk van de eerste drainage. De vloeistof uit de west sensor is weggevloeid.

Optische druksensoren (druk) Donderdag omstreeks 14:00



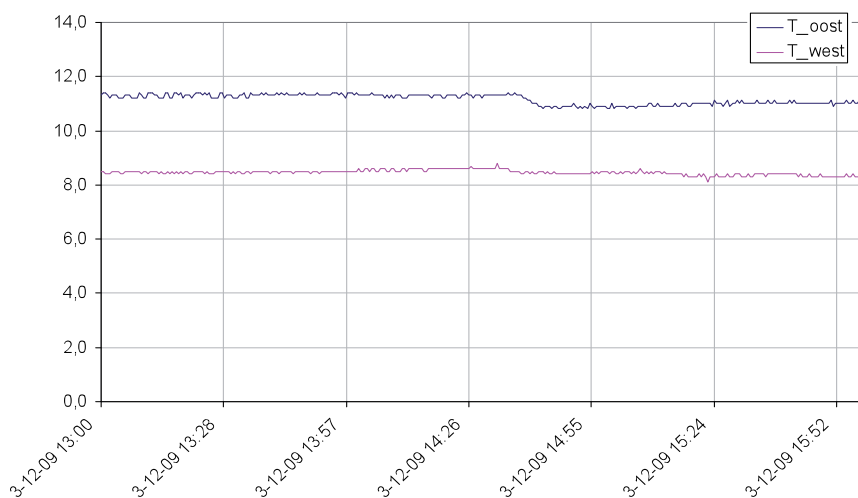
6

IJkdijk Storage

Groningen, dinsdag 31 maart 2009



Optische druksensoren (temperatuur) Donderdag omstreeks 14:00



7

IJkdijk Storage

Groningen, dinsdag 31 maart 2009



Grafiek 5.7.3 Optische druksensoren (2)

5.7.4 Metingen met optische sensoren

- 1 Optische glasvezel metingen in de Luisterbuis; druk en temperatuur
- 2 Optische glasvezel metingen in de Luisterbuis; akoestiek
- 3 Elektrische metingen in de Luisterbuis; akoestiek

Van de in totaal 4 experimenten die gedaan zijn, is er tijdens experiment 1 en 4 gebruik gemaakt van optische glasvezelsensoren.

Doel en aanpak van de metingen

Tijdens de experimenten werden optische glasvezelsensoren gebruikt om verschijnselen binnen in de dijk waar te nemen. Een beschrijving van deze meetmethode wordt in de volgende paragraaf gegeven.

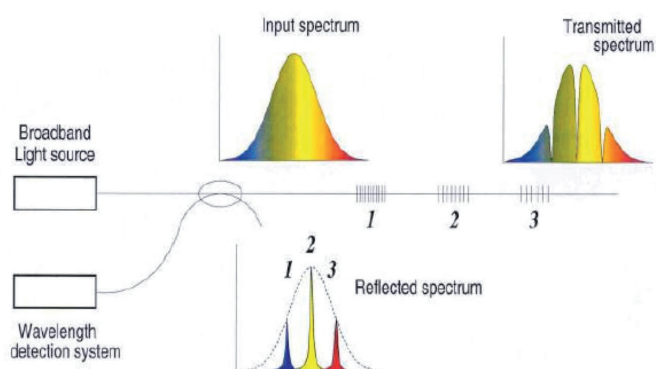
Voor deze experimenten is een sensor gebruikt waarmee statische en dynamische druk en temperatuur gemeten kan worden. Deze drie parameters geven vanuit de Luisterbuis informatie over de gebeurtenissen en verschijnselen in de dijk.

Aangezien de temperatuur en druk langzame verschijnselen zijn, zijn deze met een resolutie van 0.1s gemeten. Bij de dynamische drukmetingen (hydrofoon) is dit hoogfrequent gedaan (100kHz in experiment 1; 20kHz in experiment 4).

Beschrijving meetmethode en meetsysteem

De sensoren die gebruikt zijn, zijn gebaseerd op een meetprincipe dat gebruik maakt van *Fiber Bragg Grating* (FBG) sensoren. In Figuur 5.7.3 is het meetprincipe van deze meetmethode schematisch weergegeven. In een glasvezel kunnen één of meerdere FBG sensoren gemaakt worden d.m.v. belichting met een UV bron. Hierbij wordt een periodiek patroon (grating) in de glasvezel gecreëerd. Eigenschap van deze grating is dat deze een specifieke golflengte reflecteert die bepaald wordt door de periode van de grating. Meerdere sensoren kunnen binnen een glasvezel worden aangemaakt door elke sensor een eigen grating periode te geven.

Fysische parameters kunnen worden gemeten door de gereflecteerde golflengte te meten. Deze golflengte zal veranderen als de grating lengte wordt uitgerekt door invloeden van buitenaf. Een mechanische constructie zorgt ervoor dat een fysische parameter zoals druk omgezet wordt in een rek op de FBG.



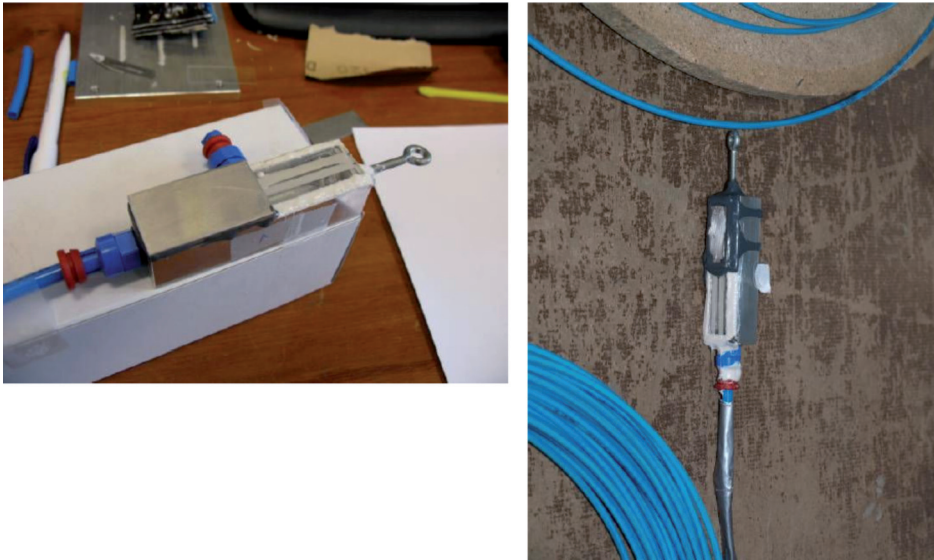
Figuur 5.7.3 Meetprincipe FBG sensoren

Sensoren

Voor de pipingexperimenten zijn sensoren ontworpen gebaseerd op Fiber Bragg Grating (FBG) technologie, die zijn gemaakt op basis van bekende kennis. De sensoren zijn geïntegreerd in één behuizing. Omdat bij deze experimenten onduidelijk was wat voor signalen er gemeten gaan worden is er geen specifiek ontwerp gemaakt wat aan vooraf bepaalde specificaties voldoet. E.g. sensor performance m.b.t. gevoeligheid en meetbereik is gebaseerd op zgn. 'best effort'.

Pipingexperiment 1

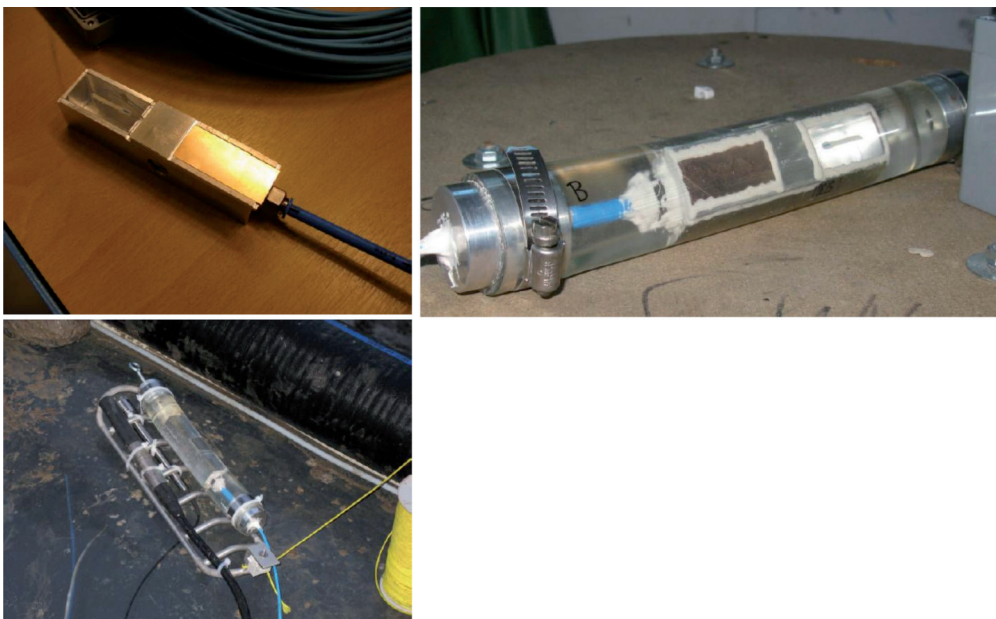
Voor het eerste pipingexperiment zijn een tweetal van onderstaande sensoren gemaakt. De blauwe kabel in beide figuren is de aanvoer fiber waaraan de FBG sensoren zijn gelast.



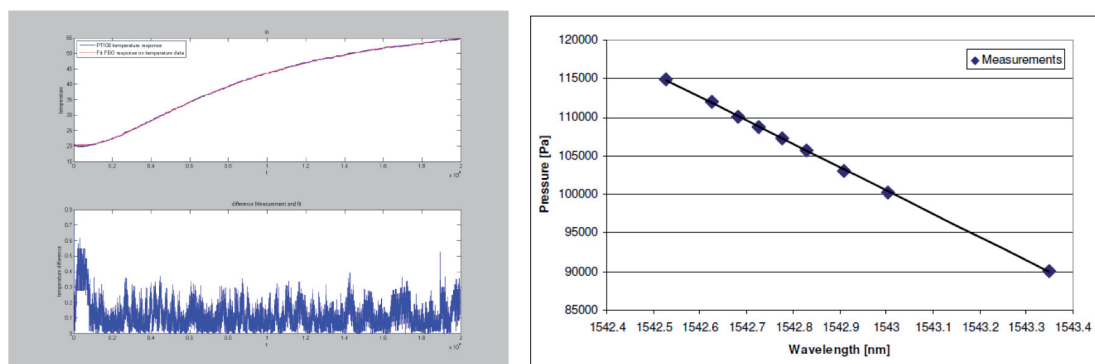
Figuur 5.7.4 A. Sensor assemblage (links) en B. de geassembleerde sensor (rechts)

Pipingexperiment 4

De sensoren die gemaakt zijn voor experiment 1 zouden ook in latere experimenten gebruikt worden. Zoals later in deze paragraaf wordt gemeld zijn twee sensoren kapot uit de dijk gekomen na afloop van experiment 1. Dit betekent dat voor het 4e experiment nieuwe sensoren gemaakt zijn. Deze zijn te zien in Figuur 5.7.5. Deze sensoren zijn vergeleken met de vorige sensoren en zijn op enkele plekken aangepast. Het belangrijkste verschil is dat er extra bescherming rondom de sensoren is aangebracht. Hiervoor is een (akoestisch transparante) buis om de sensor geschoven. Dit beschermt de sensor tegen de omgeving.



Figuur 5.7.5 A. Sensor assemblage (linksboven), B. Complete sensor (rechtsboven) en C. sensor op slee samen met elektrische hydrofoon (linksonder)



Figuur 5.7.6 A. Temperatuur callibratie (links) en B. Druk callibratie (rechts)

Sensoren inbrengen in de dijk

Bij beide experimenten zijn de sensoren aangebracht in de drainagebuis onderin de dijk (Figuur 5.7.7 a en b). De glasvezel is vanuit deze buis uitgerold tot in de TNO meetbus waarin de detectiesystemen zijn opgesteld (Figuur 5.7.7 c en d). In de meetbus staat het meetsysteem waarmee de data van de optische hydrofoons gelogd kan worden. Deze data is tijdens experiment 1 gelogd met een sample frequentie van 100kHz. Tijdens het tweede experiment is deze verlaagd tot 10 kHz omdat de sensor hiervoor geen gevoeligheid heeft.

De temperatuur- en druksensoren zijn met een tweede systeem gelogd. Omdat deze verschijnselen langzaam zijn, zijn deze gesampled met 10Hz. In het tweede experiment zijn naast TNO sensoren ook een tweetal commerciële druksensoren aangebracht in de buis. Deze data is met hetzelfde meetsysteem gemeten als de TNO sensoren. In Figuur 5.7.7 c en d zijn de meetopstellingen te zien die in de meetbus zijn neergezet.



Figuur 5.7.7 A. Dijk (linksboven), B. Drainagebuis (rechtsboven). C. Meetopstelling experiment 1 (linksonder), D. meetopstelling experiment 4 (rechtsonder)

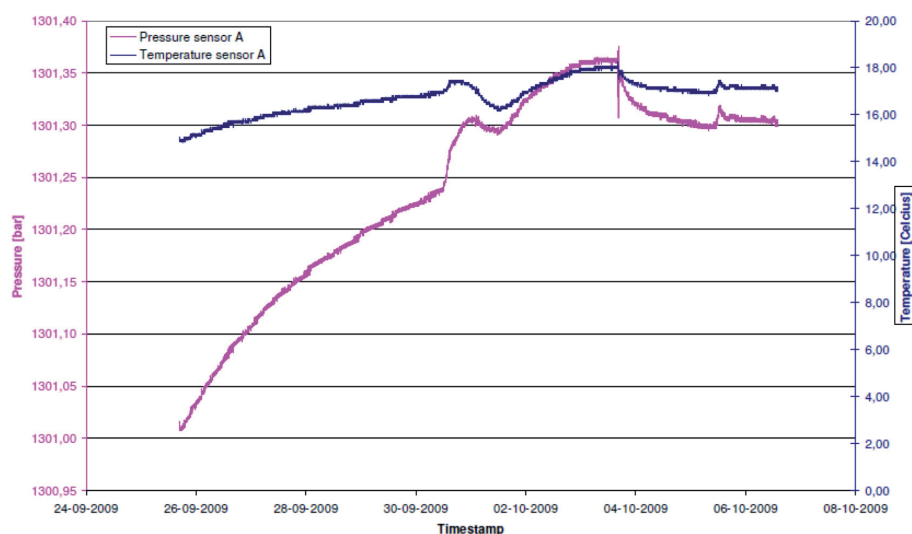
Resultaten experiment 1

Na het aanbrengen van de sensoren in de dijk is er gedurende 10 dagen gemeten. Bij het doorbreken van de dijk zijn de sensoren beschadigd. In onderstaande figuren zijn foto's te zien na afloop van het experiment. In Figuur 5.7.8a is de beschadigde buis te zien waarin de sensoren waren aangebracht. In Figuur 5.7.8c zijn de blauwe glasvezel te zien die strakgetrokken in de dijk liggen. Hierdoor is de fiber vlak voor de sensor gebroken (zie Figuur 5.7.8b). Dit is de reden waardoor er voor het 4e experiment nieuwe sensoren gemaakt moesten worden.



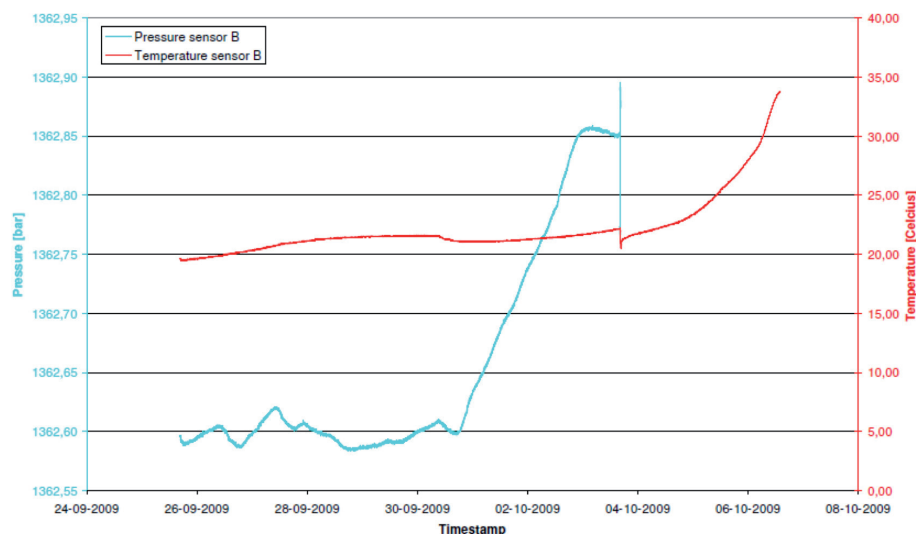
Figuur 5.7.8 A. Gebroken buis (linksboven), B. Afgebroken bekabeling van sensor (rechtsboven), C. Glasvezels staan onder spanning na doorbreken dijk (middenonder)

Sensor A



Figuur 5.7.9 Meetgegevens van Sensor A

Sensor B



Figuur 5.7.10 Meetgegevens van sensor B

In Figuur 5.1.9 en Figuur 5.7.10 zijn de resultaten van de druk- en temperatuur sensoren weergegeven. De hydrofoon data is hierin niet verwerkt, deze is verderop in deze paragraaf uitgewerkt.

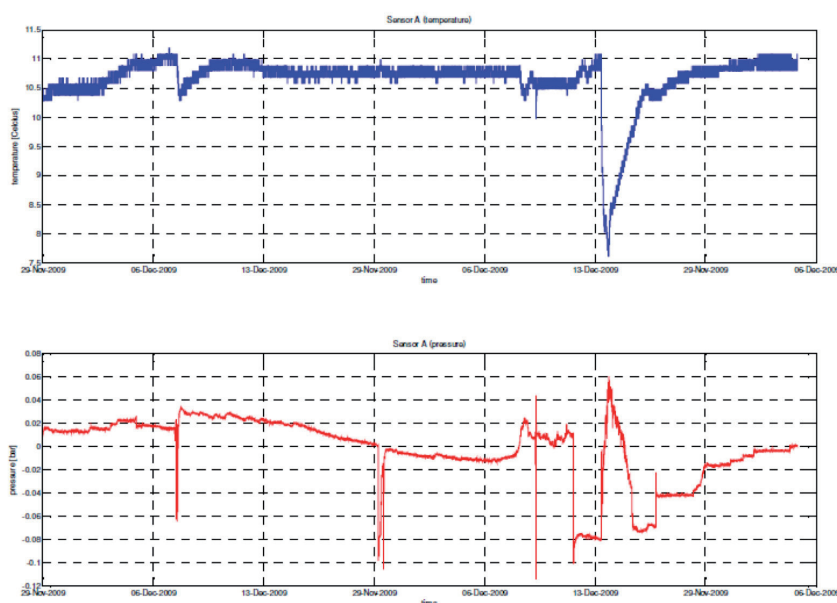
Resultaten experiment 4

Op de volgende pagina's zijn de resultaten van het vierde experiment te zien.

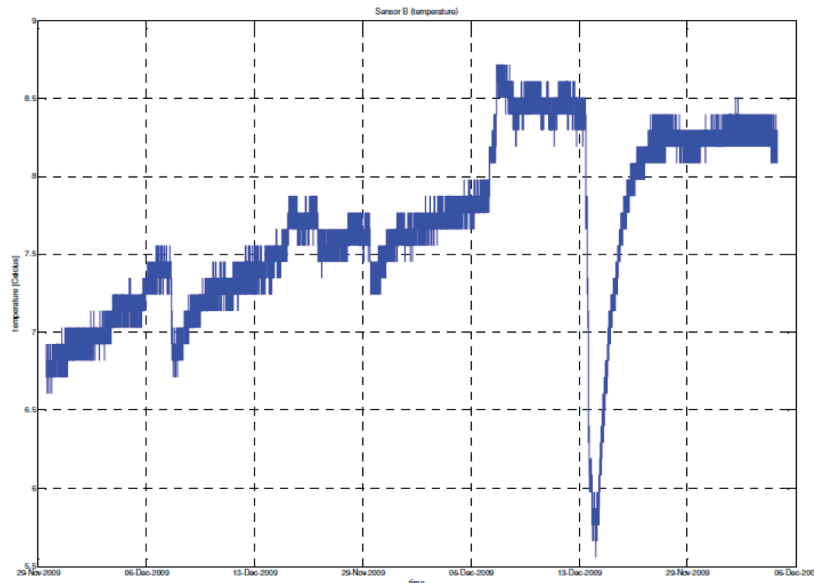
De commerciële sensoren geven geen absolute temperatuur, maar alleen een verloop van de temperatuur. Hierdoor is deze data in arbitrary units aangegeven en wordt er alleen naar het verloop gekeken.

Een vergelijking van de data geeft aan dat alle sensoren overeenkomstige signalen laat zien. Dit geeft vertrouwen in de resultaten van zowel de TNO als de commerciële sensoren.

Sensor A (temperatuur en druk)



Figuur 5.7.11 Sensor A met temperatuur en druk. De tijdsas is niet correct

Sensor B (temperatuur)

Figuur 5.7.12 Temperatuur van Sensor B

5.7.5 Meetresultaten van akoestische metingen

In deze paragraaf worden de akoestische experimenten beschreven die zijn uitgevoerd bij het 4e pipingexperiment op de IJKdijklocatie in Groningen.

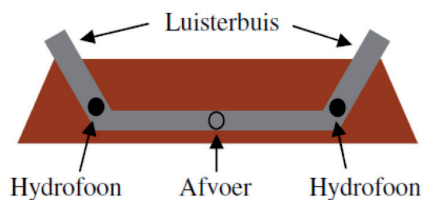
Doel

Het primaire doel van deze meetreeks is het onderzoeken van de mogelijkheid om het pipingproces akoestisch te detecteren. Het gaat hierbij om het geluid dat wordt veroorzaakt door het meevoeren van zandkorrels. Secundair wordt er gekeken of andere events akoestisch terug te zien zijn. Voorbeelden van dit soort events zijn gegeven in Tabel 5.7.1. Daarnaast is er ervaring opgedaan met het akoestisch monitoren van een dijk en met het verwerken van grote hoeveelheden data.

Aanpak van de metingen

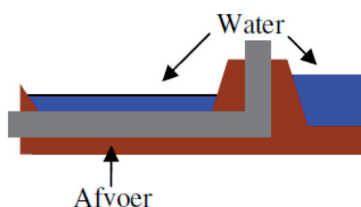
Voor de metingen zijn twee hydrofoons gebruikt die in de Luisterbuis zijn geplaatst. De Luisterbuis is in de dijk verwerkt. De Luisterbuis zit vol water en door dunne sleuven in de buis kan deze worden gebruikt voor drainage van de dijk. Figuur 5.7.13 en Figuur 5.7.14 tonen een schematische weergave van de proefdijk.

Uit de literatuur blijkt dat het pipingproces hoogfrequent geluid kan uitstralen⁽¹⁾. Daarom is er een meetsysteem gebruikt dat geschikt is voor hoge samplefrequenties. Zo is het mogelijk om de data tot 100 kHz te analyseren.



Figuur 5.7.13 Dwarsdoorsnede van het vooraanzicht van de IJKdijk met Luisterbuis

¹ K. KoVari, "Field Measurements in Geomechanics", *Proceedings of the International symposium Zurich, September 5-8, 1983*.



Figuur 5.7.14 Dwarsdoorsnede van het zij aanzicht van de IJkdijk met Luisterbuis

Beschrijving meetmethode, meetsysteem en verwerkingsmethodiek

Alle signalen zijn volledig synchroon opgenomen met B&K Pulse data-acquisitie systemen. De signalen zijn opgenomen met een high pass filter (>7 Hz).

Er is gemeten voor aanvang van het experiment tot na het bezwijken van de dijk. De data is in de vorm van .dat files opgeslagen. De totale omvang van de meetfiles is 1299 GB. De opgenomen .dat files zijn omgezet in .mat files voor verdere verwerking.

Resultaten

De akoestische data worden weergegeven in spectrogrammen. In een spectrogram worden de geluidsniveaus weergegeven per frequentieband over de tijd. In dit rapport is de frequentie verdeeld in tertsbanden. Er wordt gekeken naar spectrogrammen over de volledige meetperiode en op akoestisch interessante events.

De ruisvloer van de meetapparatuur is onderzocht. Door deze ruisvloer te vergelijken met gemeten data kunnen de verhouding tussen gemeten waarden en de ruisvloer afgeschat worden.

Er zijn plots gemaakt die per tertsband de variatie van de geluidsniveaus over de tijd weergegeven. Met deze plots kunnen trends in de geluidsniveaus over de gehele meetperiode per tertsband worden onderzocht.

Events

In Tabel 5.7.1 staan de mogelijk interessante events. Hierbij dient te worden opgemerkt dat er overdag vaak graafmachines rond de dijk reden en dat er elke dag tussen zonsondergang en zonsopgang aggregaten aanstonden voor de verlichting.

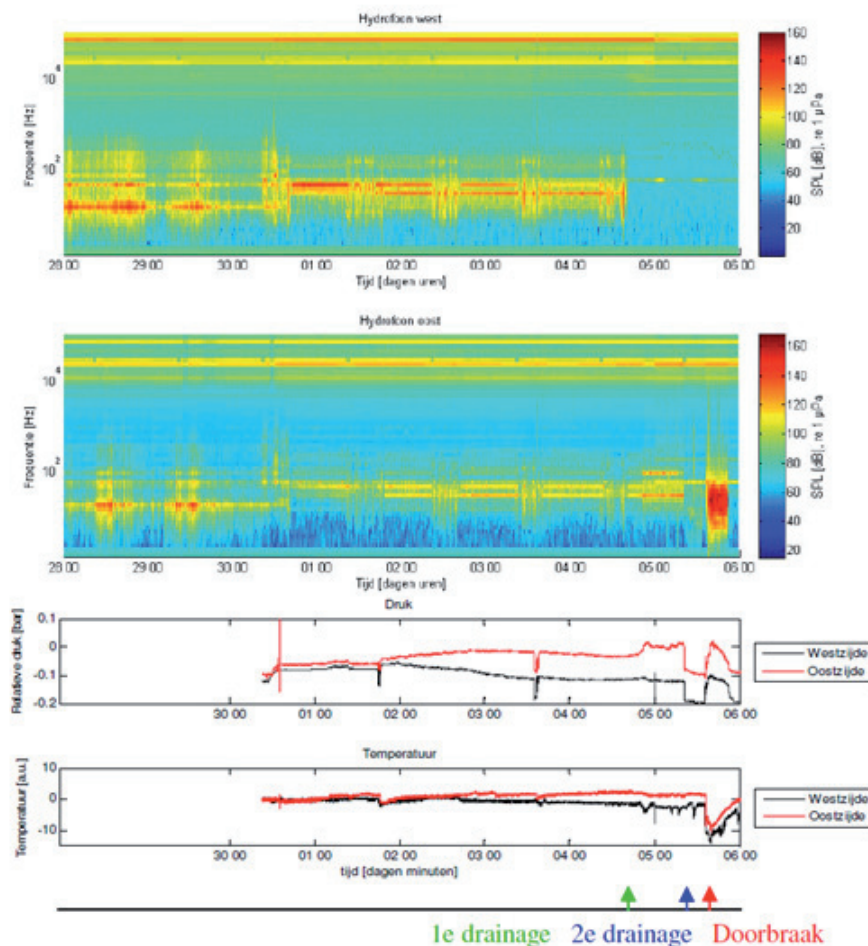
Tabel 5.7.1 Een overzicht van de meest interessante akoestische gebeurtenissen

Datum	Tijd	Gebeurtenis	Nut
3-12-2009	14:00 – 14:30	Stilte moment, de machines worden een half uur uitgezet.	Er kan gemeten worden zonder verstoringen.
3-12-2009	14:03	Drainage van de dijk door water uit de Luisterbuis te laten ontsnappen. Piping stopt tijdelijk.	Er wordt in korte tijd gemeten aan een dijk met en zonder piping.
3-12-2009	15:16	Aarde/Klei over de het uiteinde van de Luisterbuis gelegd (westen) en aangestampt.	Eventuele verstoringen die van buiten af de Luisterbuis inkomen kunnen worden onderzocht.
4-12-2009	08:20	Drainage van de dijk door water uit de Luisterbuis te laten ontsnappen. Piping stopt tijdelijk.	Er wordt in korte tijd gemeten aan een dijk met en daarna zonder piping.
4-12-2009	05:00	Aardschok in Noord Groningen. Epicentrum rond Ten Boer, hemelsbreed 25 km van de IJkdijk.	Er kan worden onderzocht of dit event met akoestische sensoren waarneembaar is.
5-12-2009	15:00	De dijk bezwijkt.	Er kan voor het bezwijken gemeten worden aan het steeds groter wordende pipingproces.

Volledige meetperiode

Figuur 5.7.15 geeft de spectrogrammen weer van de gemeten data aan de west- en oostzijde van de dijk. De frequentie is weergegeven op een logschaal. De tijd is aangegeven per dag vanaf 00:00 uur. De metingen beginnen op 28 november 00:00 en eindigen op 5 december 24:00. Op dezelfde tijdschaal zijn de waterdrukken en temperaturen in de Luisterbuis geplot. Deze waarden zijn verkregen met commerciële sensoren⁽²⁾. De waarden zijn gemeten op dezelfde positie als de akoestische drukken. De waterdrukken zijn gemeten in bar ten opzichte van een referentiedruk. De temperaturen zijn gemeten in arbitrary unit (a.u.).

In de spectrogrammen is de variatie van de geluidsniveaus te zien per tertsband over de tijd. Elke dag zijn er verstoringen te zien van 08:00 tot 17:00. Deze verstoring lijken vooral tot +/- 300 Hz de metingen te beïnvloeden. De oorzaak van deze verstoringen is niet bekend, maar er kan worden aangenomen dat ze gerelateerd zijn aan de dagelijkse activiteiten rond de dijk.

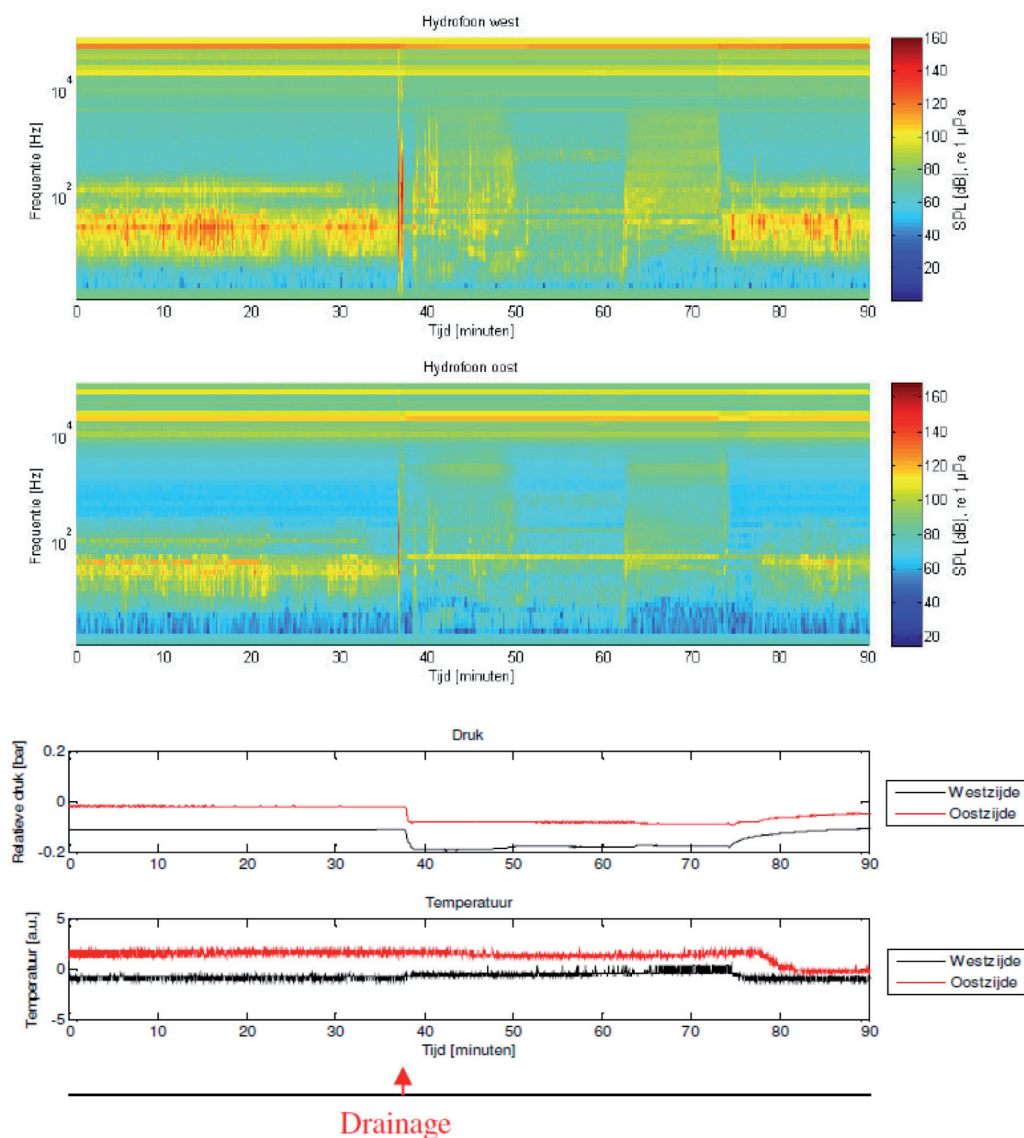


Figuur 5.7.15 De spectrogrammen, de waterdrukken en de temperaturen over de gehele meetperiode. De metingen van de waterdrukken en temperaturen zijn op een later tijdstip gestart

² P.M. Toet, R. Nieuwland, "IJkdijk Piping experiment resultaten optische sensoren", Intern Memorandum TNO, 2010.

Eerste Drainage

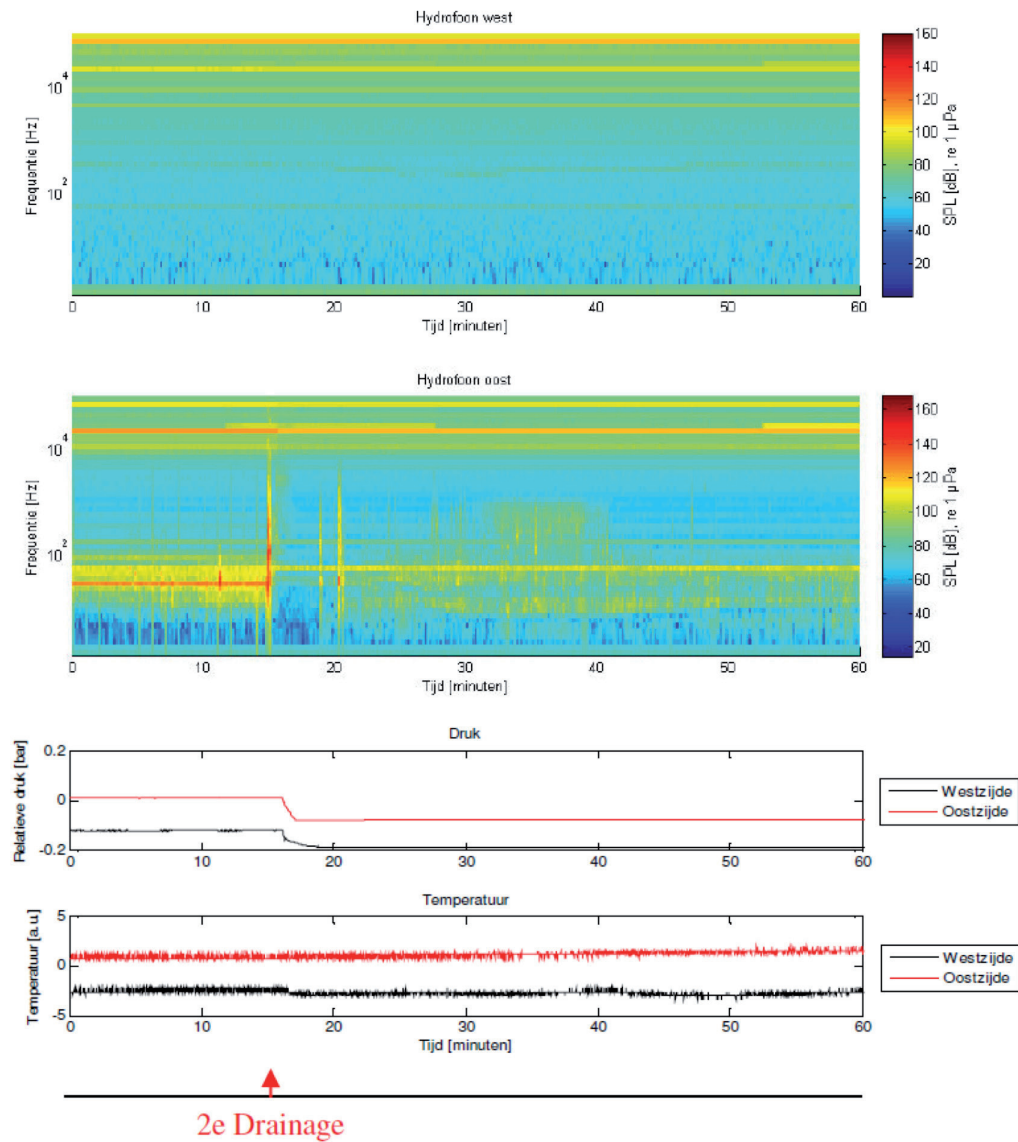
Figuur 5.7.16 geeft de spectrogrammen, de waterdrukken en de temperaturen in de Luisterbuis tijdens de drainage, die op 3 december net na 14:00 plaatsvond. Na de drainage is het pipingproces tijdelijk gestopt. De drainage is goed terug te zien in zowel de spectrogrammen als de waterdrukken. Rond deze drainage is een stilte moment afgekondigd. Dit betekent dat er bij deze metingen relatief weinig verstoringen zijn gemeten. Er is duidelijk te zien dat de gemeten geluidsniveaus afnemen na de drainage. Een mogelijke oorzaak is het wegvallen van de waterdruk. Er is te zien dat 35 minuten na de drainage de geluidsniveaus nagenoeg gelijk zijn als voor de drainage.



Figuur 5.7.16 Drainage: van 3 december 13:30 t/m 15:00

Tweede drainage

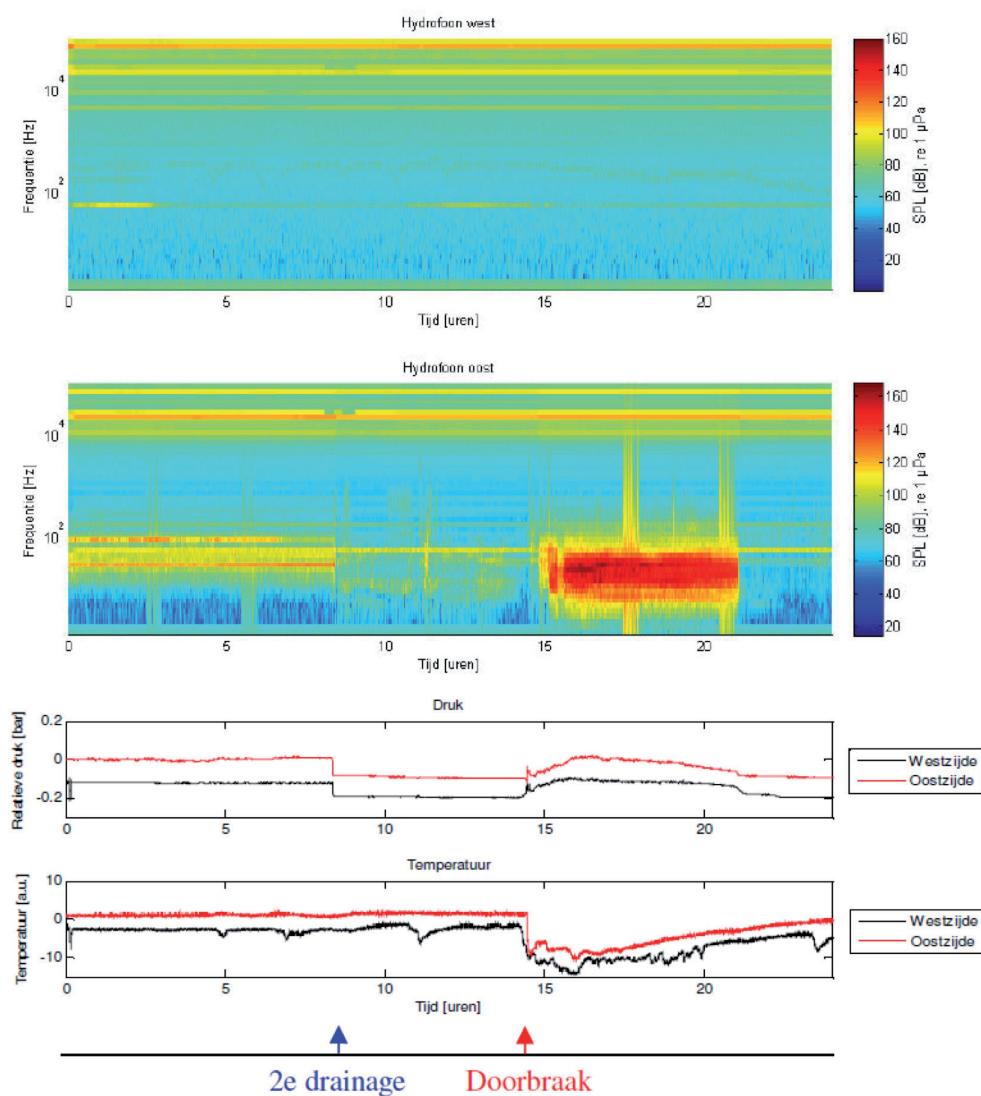
Figuur 5.7.17 geeft de spectrogrammen, de waterdrukken en de temperaturen in de Luisterbuis tijdens de 2e drainage. Deze heeft plaats gevonden op 4 december rond 8:20. De drainage is terug te zien in de spectrogrammen en de drukken. De westelijke hydrofoon meet op dit moment al significant lagere geluidsniveaus, zoals ook te zien is in Figuur 5.7.15. Meetgegevens van deze hydrofoon zijn in deze periode niet bruikbaar. Het spectrogram van de oostelijke hydrofoon en de drukken lijken op de waarnemingen van de eerdere drainage.



Figuur 5.7.17 Drainage: van 5 december 08:00 t/m 09:00

Doorbraak

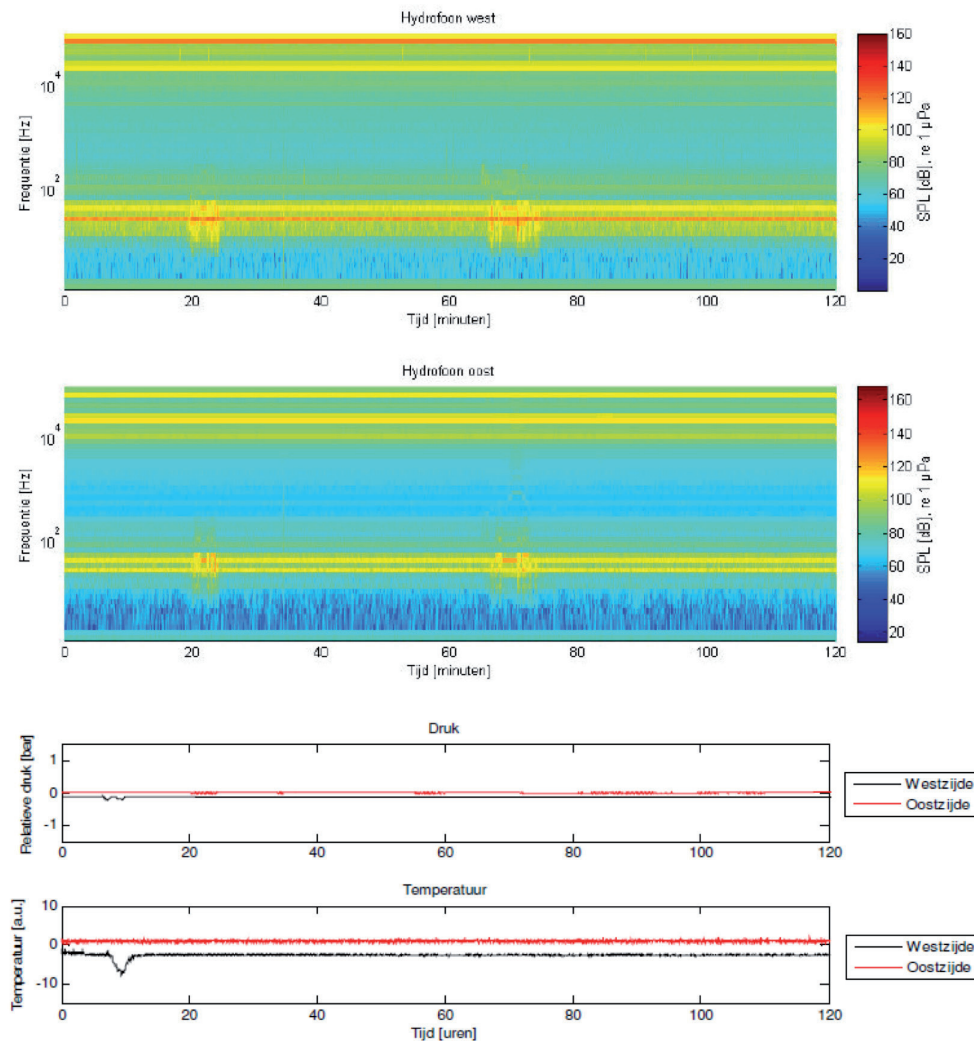
Figuur 5.7.18 geeft de spectrogrammen, de waterdrukken en de temperaturen in de Luisterbuis tijdens de dag van de doorbraak. De doorbraak is duidelijk te zien in het spectrogram van de oostelijke hydrofoon en de waterdrukken en de temperaturen. De hydrofoon aan de westzijde meet deze dag veel lagere geluidsniveaus. Dit is ook terug te zien in Figuur 13. Rond 8:20 vindt de laatste drainage plaats.



Figuur 5.7.18 Doorbraak: van 5 december 00:00 t/m 24:00

Nachtmeting

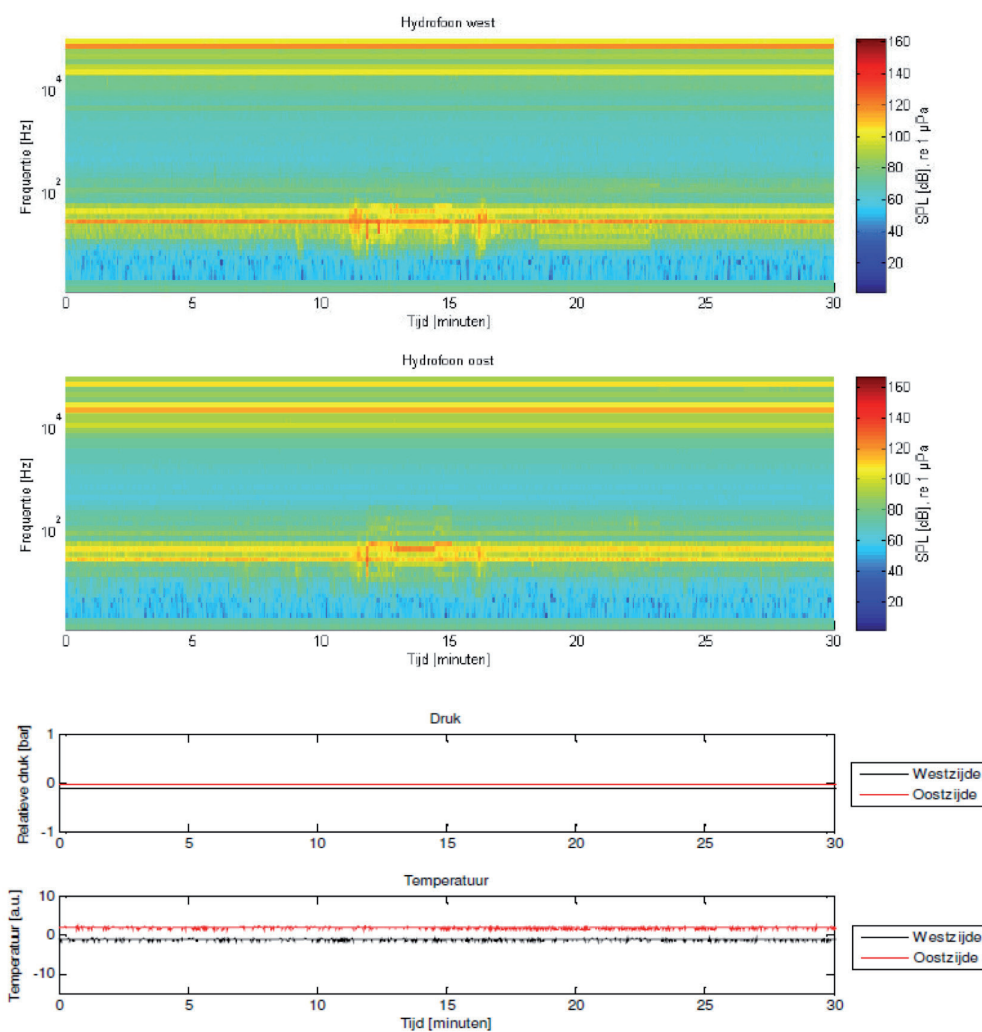
Figuur 5.7.19 geeft de spectrogrammen, de waterdrukken en de temperaturen in de Luisterbuis voor twee willekeurige nachtelijke uren. Er kan aangenomen worden dat de enige verstoringen tijdens deze meting worden veroorzaakt door de aggregaten van het licht en andere meetapparatuur. Er is een stelselmatige verstoring te zien die om de 45 minuten terug lijkt te komen en vijf minuten duurt. Na verder onderzoek blijkt dat deze verstoring tijdens deze en andere nachten met dezelfde frequentie terug komt. De oorzaak van deze verstoringen is niet bekend.



Figuur 5.7.19 Nacht: 3 december van 00:00 tot 02:00

Aardschok

Op 4 december rond 05:00 uur heeft het KNMI een aardschok geregistreerd in Groningen. Deze aardschok had een kracht van 2.3 op de schaal van Richter. Het epicentrum lag bij ten Boer, hemelsbreed +/- 25 kilometer van de IJkdijk. Figuur 18 geeft de spectrogrammen, de waterdrukken en de temperaturen in de Luisterbuis tijdens de periode rond de aardschok. Bij lagere frequenties lijken de geluidsniveaus te variëren tijdens de periode van de schok. Deze verstoring lijkt echter vaker voor te komen 's nachts zoals te zien is in Figuur 5.7.19. Daarbij is de periode van de verstoring te lang om veroorzaakt te worden door een aardschok. Het is daarom aannemelijk dat de aardschok niet gemeten is door de hydrofoons.

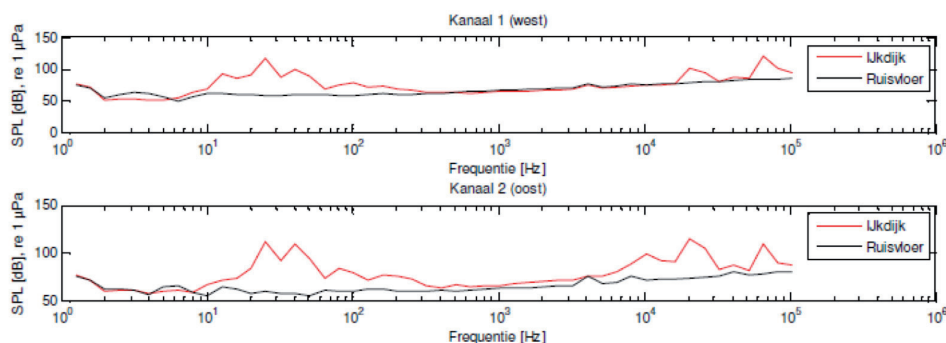


Figuur 5.7.20 Aardschok: 4 december 4:45 t/m 05:15

Ruisvloer

De data-acquisitie apparatuur heeft een ruisvloer. Deze ruisvloer hangt af van de maximale input range. Bij deze metingen was dat 700 mV. De verhouding tussen de daadwerkelijk gemeten waarden en deze ruisvloer kan worden afgeschat per tertsbands. Figuur 5.7.21 geeft per kanaal de ruisvloer weer ten opzichte van een willekeurige meting in de nacht. Uit de grafieken blijkt dat de ruisvloer verschillend is per ingang. De ruisvloer is over meerdere minuten gemeten en bleek nagenoeg constant over de tijd.

Uit deze grafieken blijkt dat voor sommige tertsbands de ruisvloer een dominante rol speelt in de metingen. Daarmee zijn de gemeten waarden voor die specifieke tertsbands onbruikbaar voor verdere analyse.



Figuur 5.7.21 De frequentiespectra van een willekeurige nachtmeting vergeleken met de ruisvloer

Plotten per tertsbands

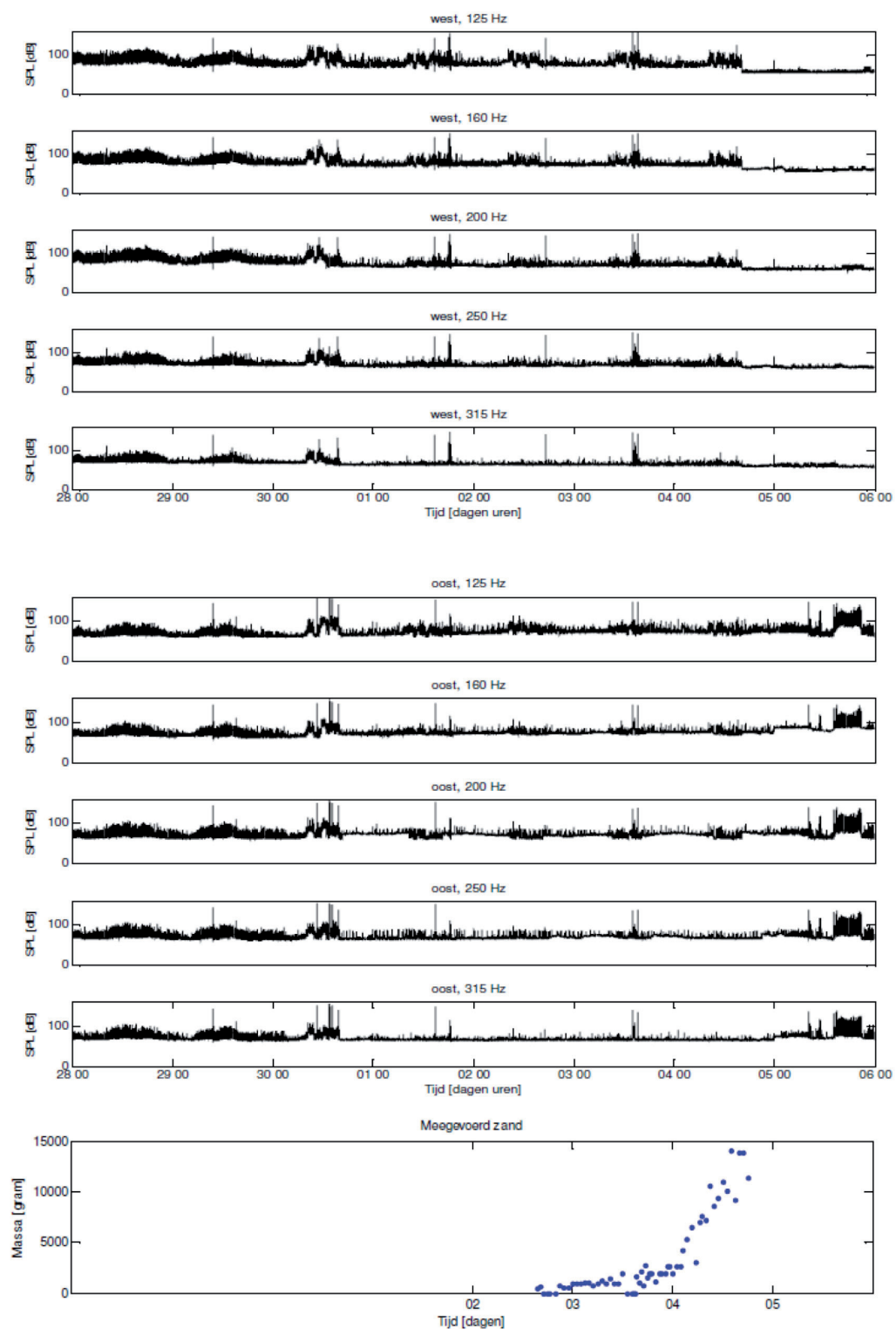
De data zijn per tertsbands verder onderzocht. Per tertsbands is het verloop van de geluidsniveaus over de tijd geplot. Met twee kanalen en vijftig tertsbands levert dit honderd grafieken op. Deze grafieken worden niet allemaal gepresenteerd. Figuur 7.7.22 geeft voorbeelden van deze grafieken. De mate van piping is op dezelfde tijdschaal geplot. De droge massa van het weggeschepte zand is weergegeven. Vanaf het einde van 4 december is het niet mogelijk om deze informatie duidelijk te plotten. Vanaf die tijd wordt er erg veel zand meegenomen.

Uit de honderd grafieken blijkt dat er voor de tertsbands 4 Hz tot en met 315 Hz verstoringen te zien zijn van 08:00 tot 17:00. Dit verschijnsel is ook te zien in Figuur 20. Er kan worden aangenomen dat ze gerelateerd zijn aan de dagelijkse activiteiten rond de dijk.

Daarnaast lijken op 30 november nagenoeg alle tertsbands een verstoring te hebben van 08:00 tot 17:00. Het is niet duidelijk waarom de repeterende verstoring op deze dag meer impact lijkt te hebben.

De westelijke hydrofoon is 4 december 16:24 verwijderd.

Er zijn geen langdurige trends te zien in de metingen. De geluidsniveaus variëren per tertsbands nagenoeg rond dezelfde evenwichtsstand. Dit verandert alleen bij de in dit verslag aangegeven verstoringen



Figuur 5.7.22 De geluidsniveaus (re 1 μ PA) per tertsband over de gehele meetperioden en de massa van het weggeschepte zand

5.7.6 Conclusies

Conclusie conditioneringsstelsel

De resultaten van het conditioneringsstelsel hebben de verwachtingen sterk overtroffen. De verwachting was dat in de 1e fase en mogelijk in de 2e fase invloed kon worden uitgeoefend op het pipingproces. Zoals nu blijkt is in de 1e en 2e fase het pipingproces volledig te stoppen en is het mogelijk zelfs in de 3e fase nog een zeer goed resultaat te behalen. Opmerkelijk is dat bij het afvoeren van water uit de filterbuis de waterspanning niet alleen lokaal in de omgeving van de bus afneemt maar over vrijwel de gehele dijk tot nul kan worden teruggebracht.

De resultaten van dit experiment zijn een aanvulling op het al in het Macrostabiliteitsexperiment ontwikkelde conditioneringsstelsel waarmee de freatische lijn in een dijk kan worden beïnvloedt.

Conclusie metingen met optische sensoren

Optische sensoren zijn geschikt voor het meten van druk en temperatuur in het conditionerings-systeem. Deze sensoren hebben een nauwkeurigheid van 20 mm. wk. en zijn voldoende nauwkeurig om het conditioneringsstelsel te monitoren.

Het grote voordeel van deze techniek is dat deze sensoren via een enkele glasvezel op grote afstand van energie zijn te voorzien en dat datacommunicatie kan worden aangestuurd en uitgelezen. De hiervoor benodigde glasvezelkabel kan door het conditioneringsstelsel lopen en kan meerdere sensoren bevatten.

Conclusie akoestische metingen

Aangezien de mate van piping over de tijd toeneemt, zou dit moeten leiden tot een oplopende trend in de geluidsniveaus voor één of meerdere tertsbanden. Een dergelijke trend lijkt bij geen van de onderzochte tertsbanden op te treden. Hieruit blijkt dat het pipingproces bij geen van de onderzochte tertsbanden een dominante rol speelt. Er kan daarom geconcludeerd worden dat met de gebruikte opstelling en analyse het pipingproces niet te detecteren is.

5.8 Deelexperiment TenCate Geosynthetics / Inventec: GeoDetect® systeem en optische glasfibers

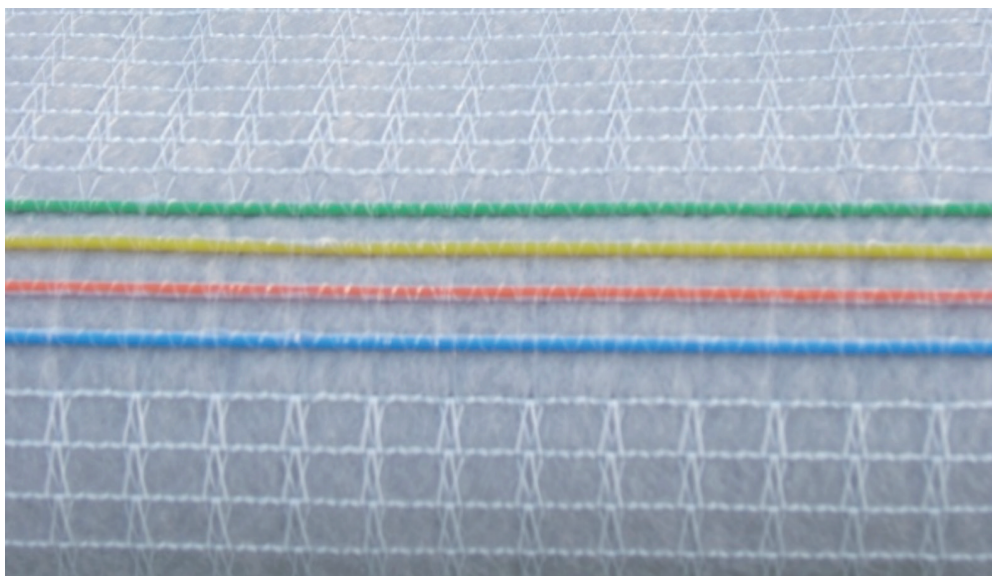
Auteurs: TenCate / Inventec / EDF / GeophyConsult

5.8.1 Introductie

In het kader van het Pipingexperiment hebben Ten Cate Geosynthetics en Inventec B.V. een monitoringssysteem toegepast op basis van optische glasfiber kabel en de TenCate GeoDetect® monitoringstechnologie. Het ontwerp, de installatie van het systeem (sensoren en instrumentatie) en de data analyse werden uitgevoerd in partnerschap met de Franse bedrijven EDF en GeophyConsult.

5.8.2 Plan van aanpak en werkwijze

Optische glasfibertechniek wordt reeds vele jaren gebruikt in structural health monitoringssystemen voor civiel-technische toepassingen. TenCate GeoDetect®, een met optische glasfibers geïntegreerd geokunststof, is het eerste optische systeem dat specifiek voor geotechnische toepassingen is ontwikkeld. Het TenCate GeoDetect® S BR concept omvat een geocomposiet weefsel, optische glasfibers en instrumentatie en biedt daardoor een innovatieve oplossing voor het multifunctionele eisenpakket ten behoeve van geotechnische toepassingen zoals verankering met de grond, "in-plane" drainagevermogen en bescherming van de optische fiber voor een nauwkeurige oplevering van meetdata.



Figuur 5.8.1 De TenCate GeoDetect® S BR sensor

TenCate GeoDetect® S BR maakt gebruik van zgn. stimulated Brillouin en Raman backscattering technologie in single mode en multimode fibers om rek en temperatuur te meten met een ruimtelijke resolutie van 1,0m over afstanden van vele kilometers.

Voor de 4 pipingexperimenten werden de optische fibers op 6 locaties (ITA0 t/m ITA5) in de lengterichting van de dijk geïnstalleerd. Tijdens experimenten werden met de fibers zowel temperatuur als rek gemeten, met uitzondering van experiment 1 waarbij alleen temperatuur werd gemeten. De fibers bevonden zich aan de onderzijde van de dijk met het doel om met een ruimtelijke resolutie van 1m optredende pipes te detecteren en te lokaliseren.

De uitleesapparatuur was opgesteld in de meetkeet en was verbonden met het TenCate GeoDetect® systeem via een multi-fiber verbindingskabel.

Tijdens het verloop van elk experiment werden de ruwe data van zowel temperatuur- als rekmetingen regelmatig geanalyseerd. Na ieder experiment werden de meetresultaten meer diepgaand geanalyseerd.

Stichting

IJkdijk

5.8.3 Instrumentatie

Experiment 1

Voor experiment 1 werd Ten Cate gevraagd alleen optische fiberkabel toe te passen, dus zonder geotextiel, om te voorkomen dat het erosieproces dat verwacht werd op te treden op het klei/zand scheidingsvlak, zou worden verstoord.

Om het temperatuursverloop te monitoren werd één multimode optische kabel geïnstalleerd en aangesloten op de Raman uitleesunit.



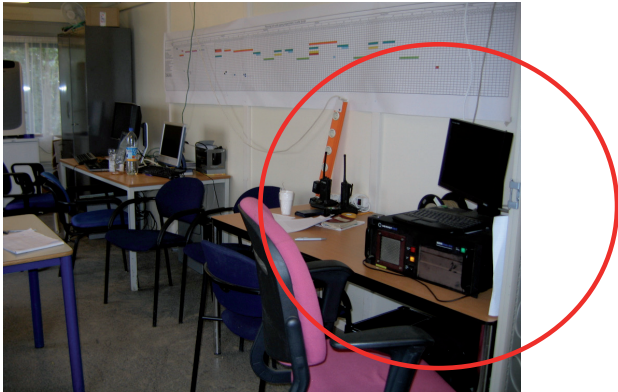
Figuur 5.8.2 Pipingexperiment 1: Installatie van de optische fiberkabel onder water in de zandlaag



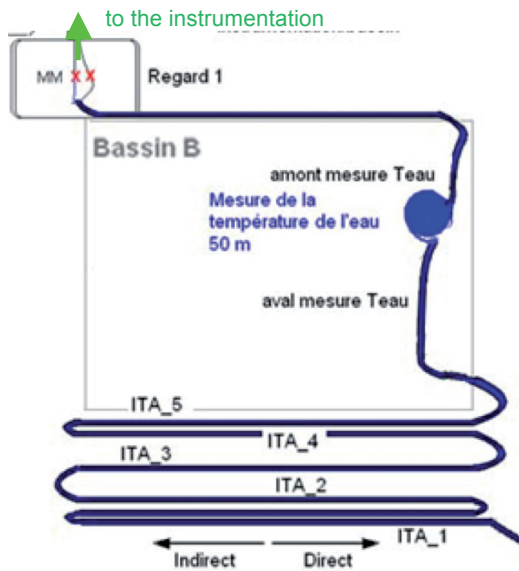
Figuur 5.8.3 Pipingexperiment 1: Lay-out van de optische kabel (blauw) aan een uiteinde van de dijk (d.w.z. aan een zijkant van het bassin)

Hoewel het grensvlak zand/klei de optimale locatie is om pipes te detecteren, werd gevraagd de optische kabel te installeren in de verzadigde zandlaag op een diepte van 10cm beneden het zand/klei scheidingsvlak.

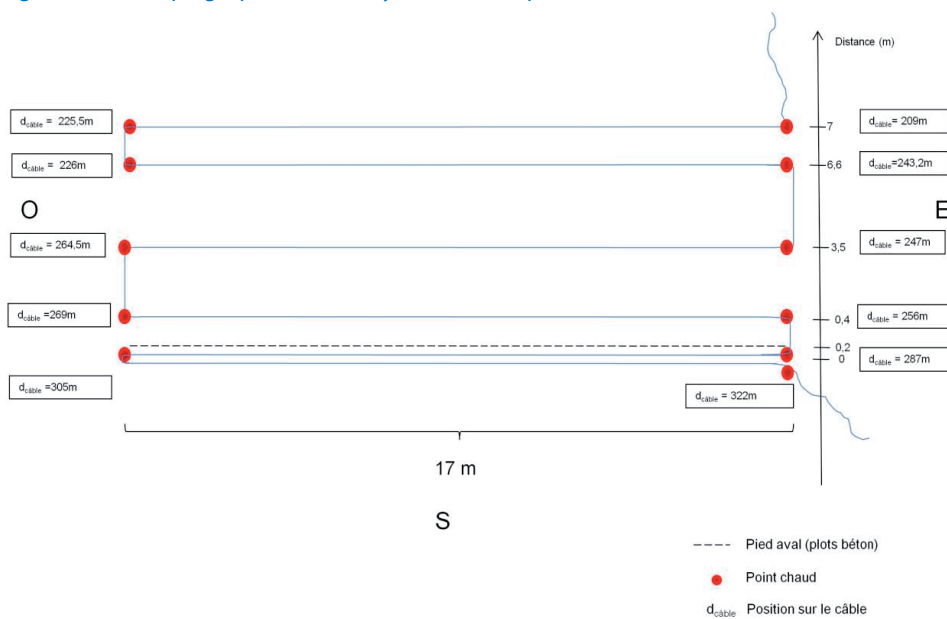
De kabel werd in lussen in de lengterichting van de dijk aangebracht, te beginnen bij de teen van de dijk, resulterend in 6 verschillende locaties in de dwarsdoorsnede van de dijk.



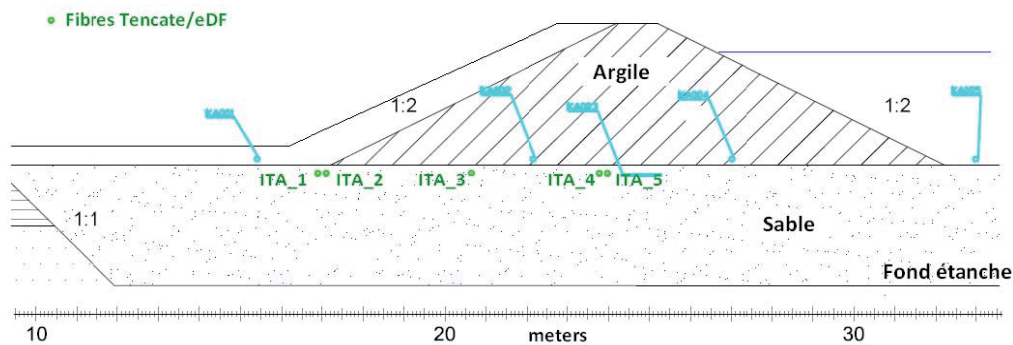
Figuur 5.8.4 Pipingexperiment 1: Raman uitleesunit in de meetkeet



Figuur 5.8.5 Pipingexperiment 1: Lay-out van de optische kabel



Figuur 5.8.6 Pipingexperiment 1: Lay-out van de optische kabel. De gestippelde lijn is de teen van de dijk (betonnen rand)



Figuur 5.8.7 Pipingexperiment 1: de 6 locaties van de kabel in de dwarsdoorsnede van de dijk

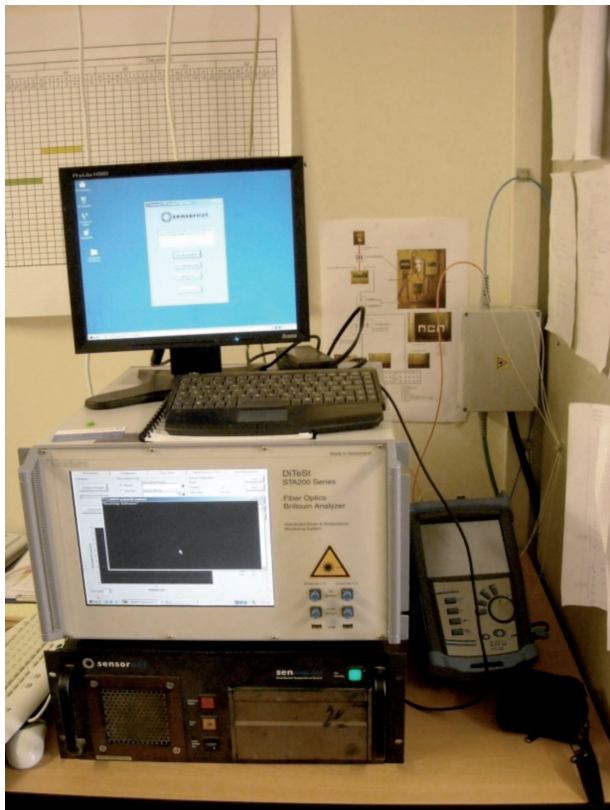
Experimenten 2 en 3

Ook voor experimenten 2 en 3 werd Ten Cate gevraagd uitsluitend optische kabels zonder geotextiel toe te passen om te voorkomen dat het beoogde erosieproces zou worden beïnvloed.

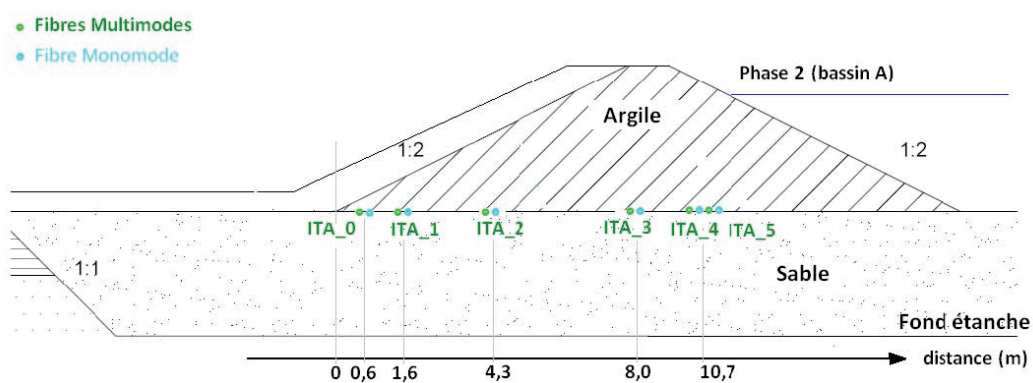
Gevraagd werd rek te meten met een tight buffer single mode kabel, hoewel verwacht werd dat een kabel alleen zonder geotextiele verankering minder goede resultaten zou opleveren dan TenCate GeoDetect®. De kabel werd uitgelezen door een Brillouin unit.

Ten Cate en haar partners installeerden daarnaast een tweede kabel voor temperatuurmeting. Dit was een multi-mode loose tube optische kabel die werd uitgelezen door een Raman unit.

Beide kabels werden geïnstalleerd op het zand/klei grensvlak.



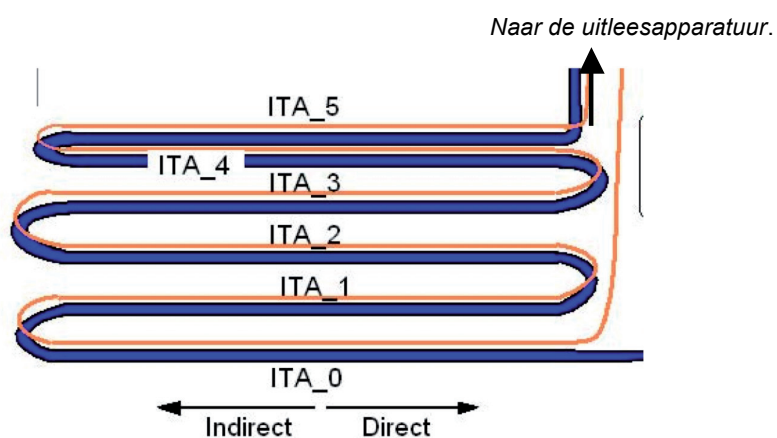
Figuur 5.8.8 Pipingexperimenten 2, 3 en 4:
Raman uitleesunit (zwart) en Brillouin uitleesunit (wit)



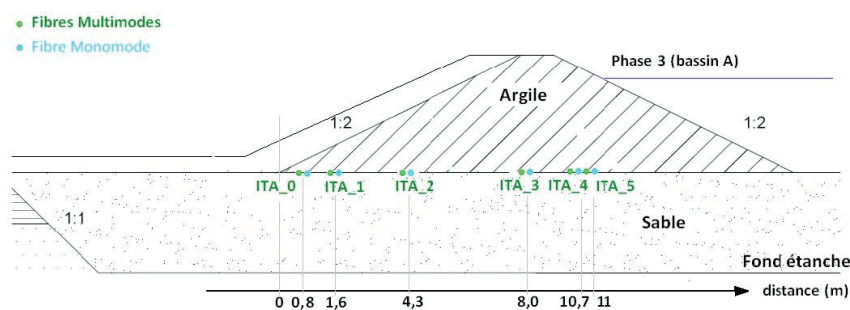
Figuur 5.8.9 Pipingexperiment 2: Schematische weergave van de locaties van de optische fibers op het grensvlak zand/klei



Figuur 5.8.10 Pipingexperiment 2: Aanbrengen van de optische kabels



Figuur 5.8.11 Pipingexperiment 3: Schematische lay-out van de optische kabel (blauw: temperatuur; rood: rek)



Figuur 5.8.12 Pipingexperiment 3: Schematische weergave van de locaties van de optische fibers op het grensvlak zand/klei



Figuur 5.8.13 Pipingexperiment 3: Posities van de optische kabel

Experiment 4

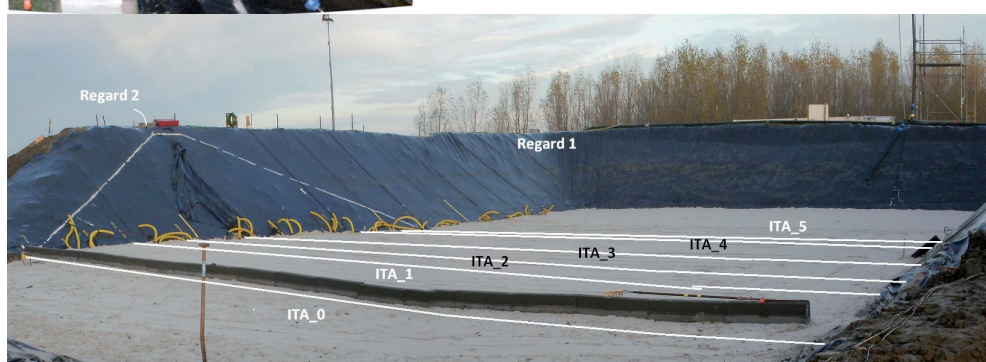
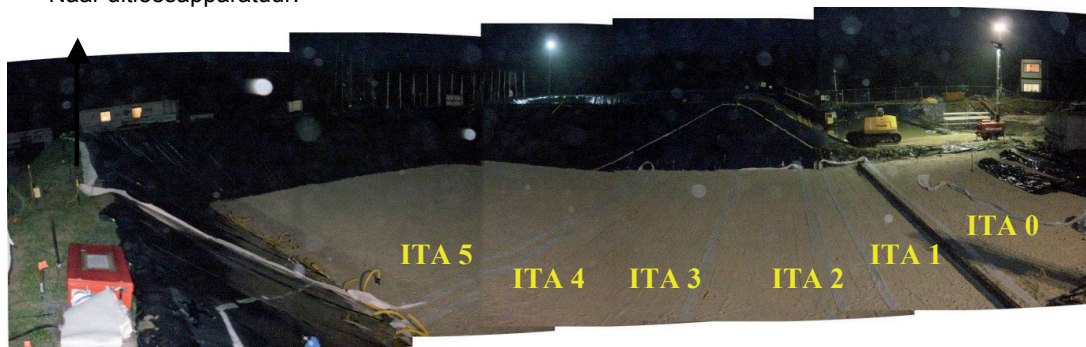
Voor experiment 4 werden stroken TenCate GeoDetect® met geïntegreerde optische fiberkabels op 6 locaties in de dijkdoorsnede aangebracht om zowel temperatuur als rek te meten. De uitlezing van de rek was beperkt tot de eerste 3 locaties. De breedte van de strook TenCate GeoDetect® was ongeveer 40cm.

Ten Cate werd geïnstrueerd om de TenCate GeoDetect® strips 10cm in het droge zand in te graven om zo een mogelijke beïnvloeding van het erosieproces te voorkomen.

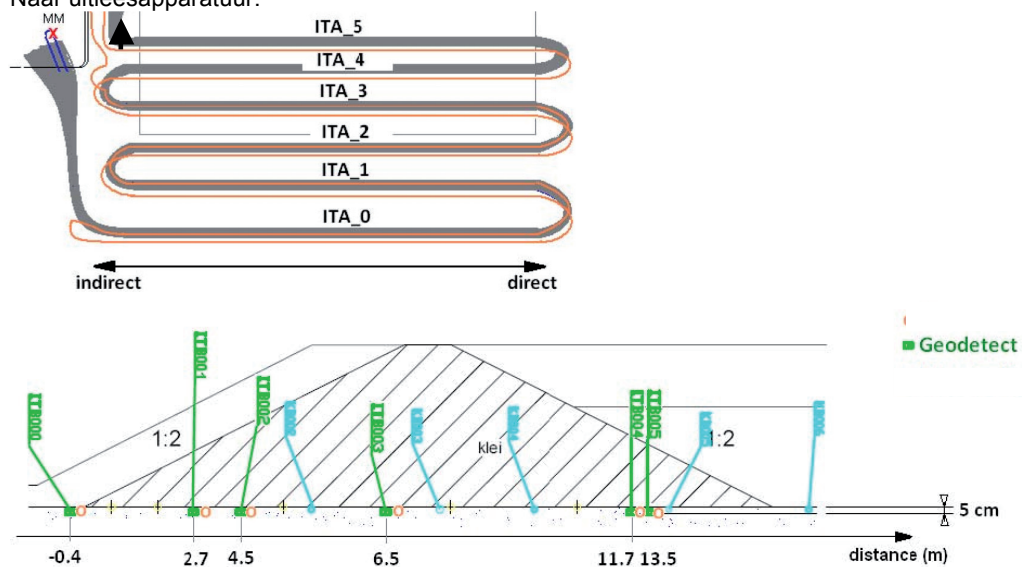


Figuur 5.8.14 Piping experiment 4: Aanbrengen van het TenCate GeoDetect® systeem in de zandlaag

Naar uitleesapparatuur.



Naar uitleesapparatuur.

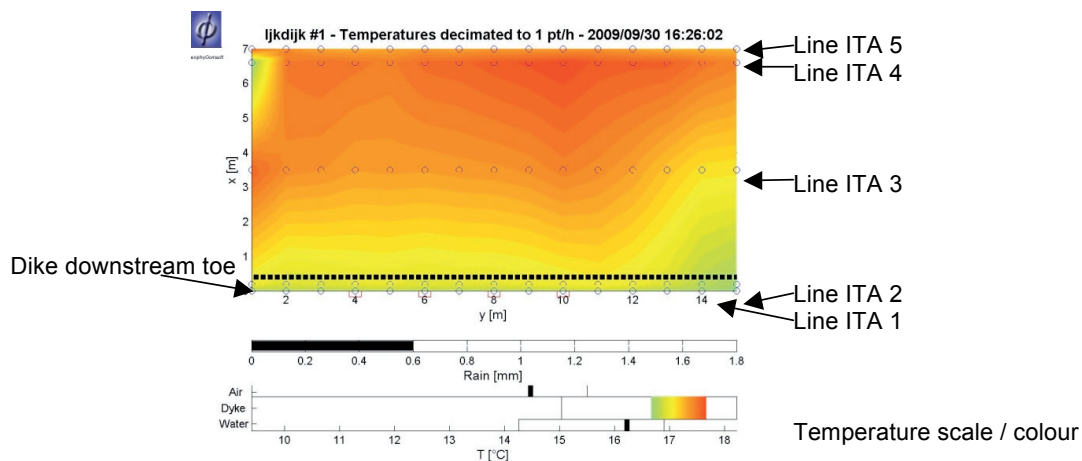


5.8.4 Meetresultaten

In het hierna volgende worden de meetresultaten gepresenteerd zoals in het hieronderstaande voorbeeld aangegeven. Het toont de ontwikkeling in de tijd van:

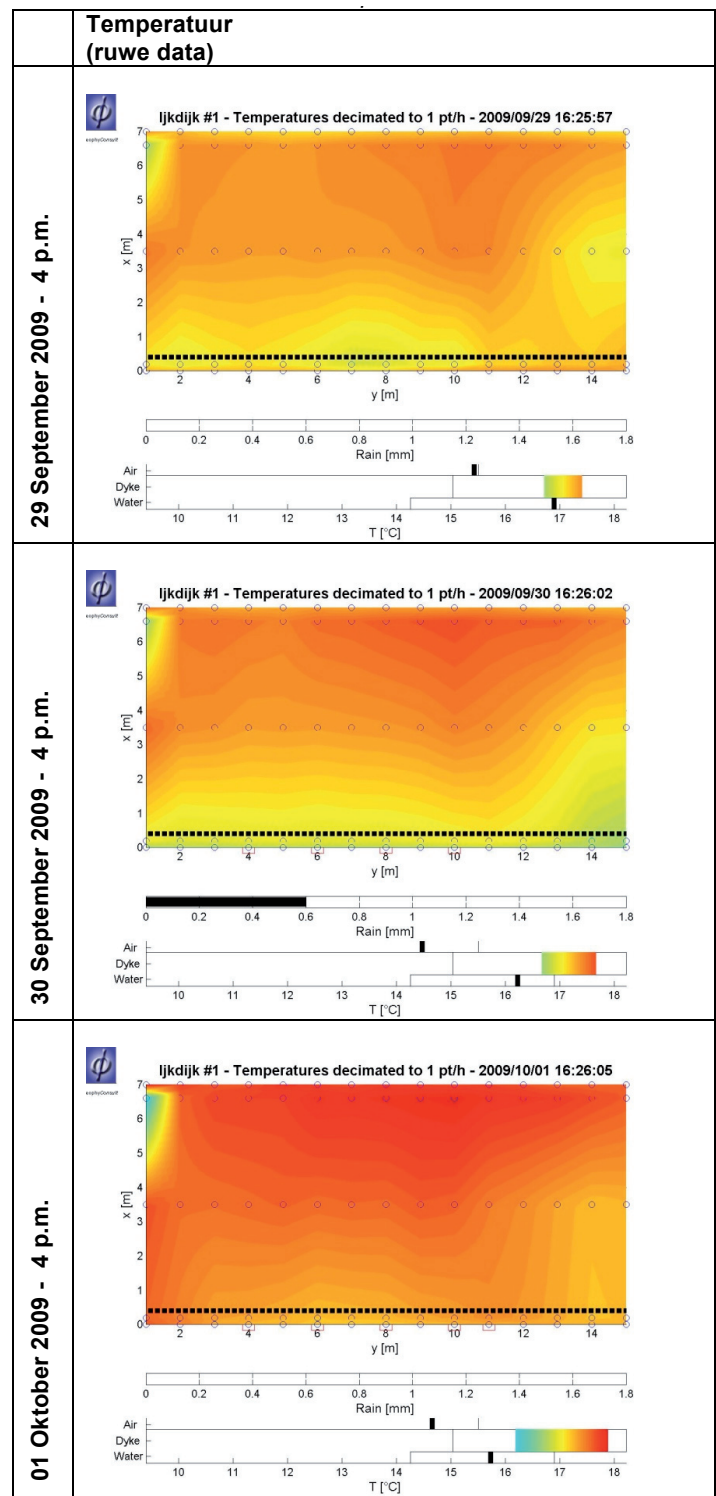
- het temperatuurprofiel in relatie tot de watertemperatuur
- het rek (=deformatie) profiel ten opzichte van de nulmeting bij de start van de metingen.

Leeswijzer :

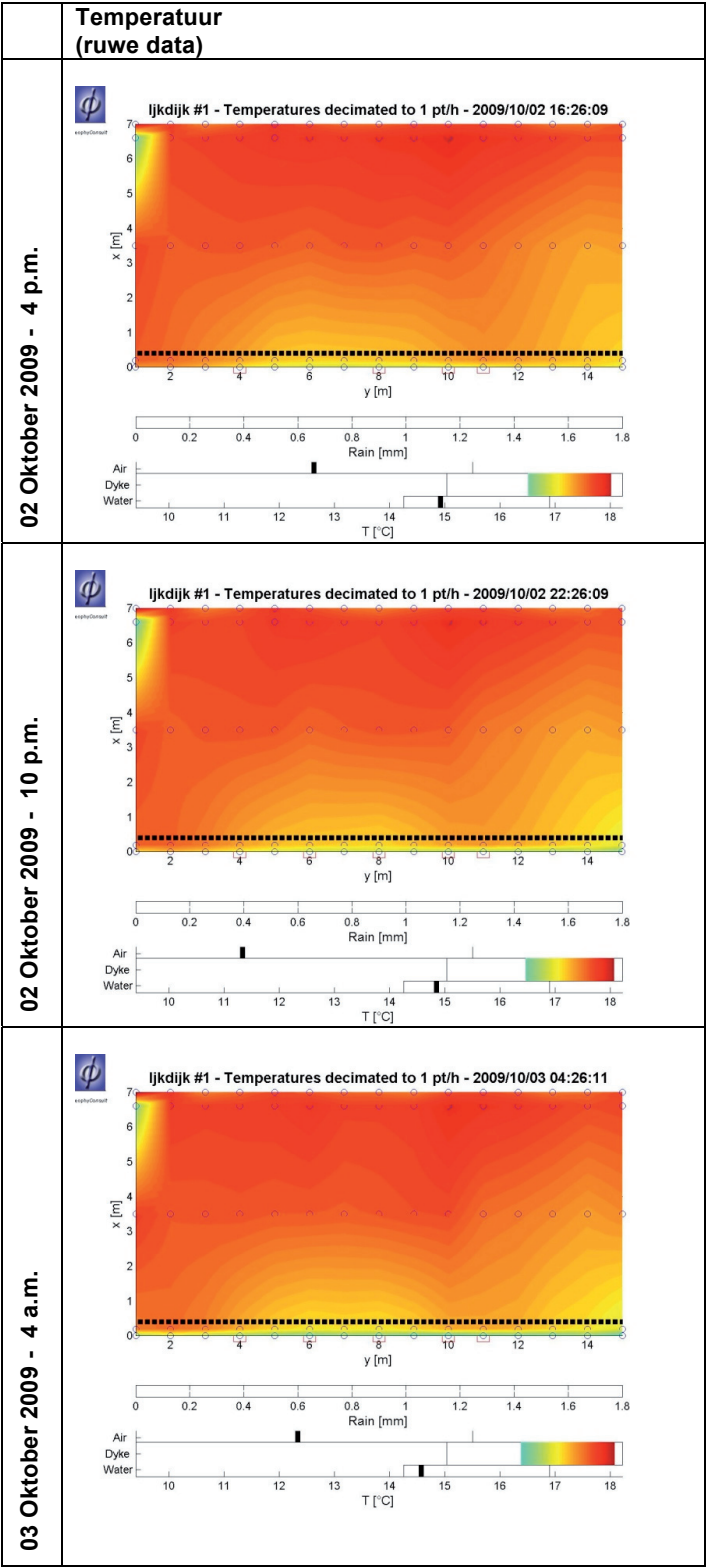


Experiment 1

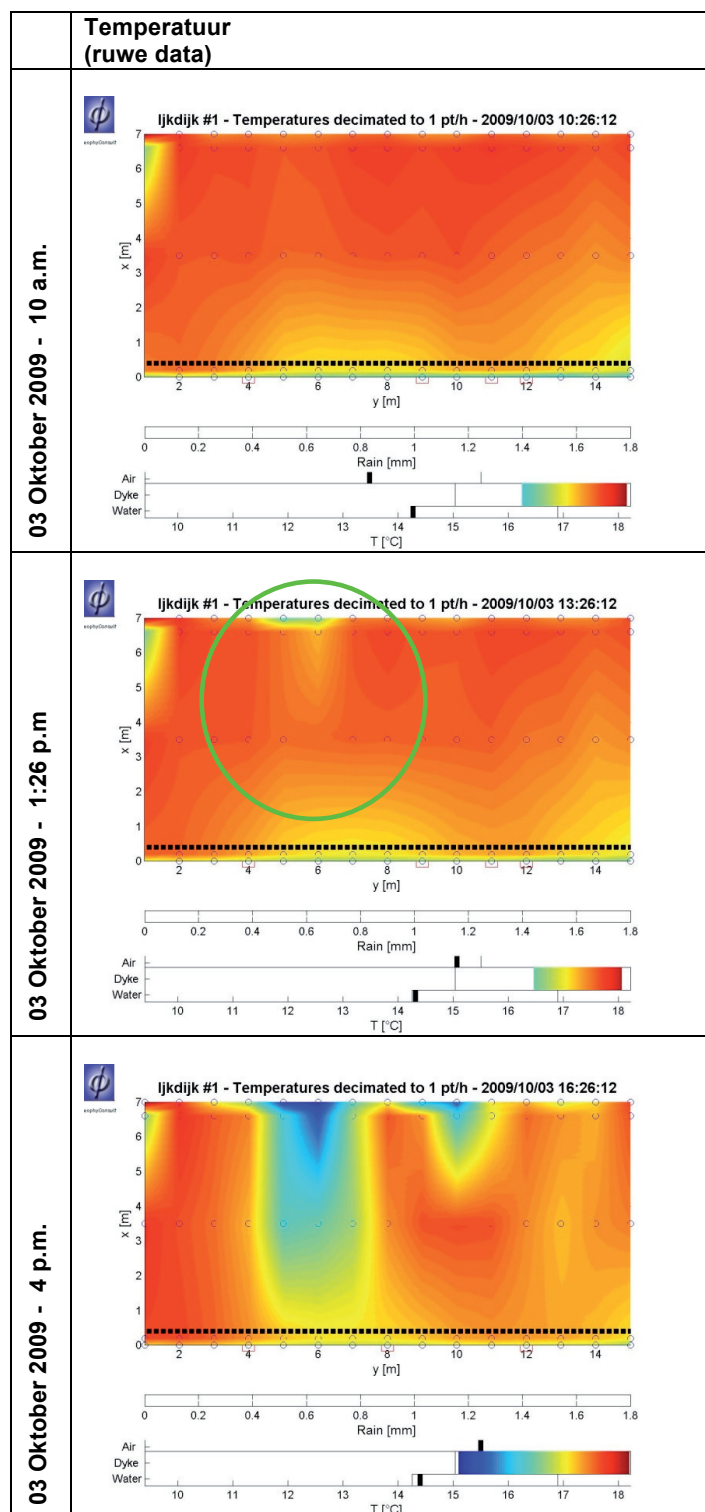
Het beeld van de door de optische kabel gemeten ruwe temperatuurdata toont duidelijk het ontstaan van een pipe van de bovenstroomse naar de benedenstroomse kant van de dijk. Dit beeld dateert van 13.26 uur op 3 oktober 2009, dus meer dan 4 uur vóór het bezwijken van de dijk.
NB: de fiber ligt 10cm diep in het zand.



Grafiek 5.8.1 Meetresultaten experiment 1



Grafiek 5.8.1 Vervolg. Meetresultaten experiment 1



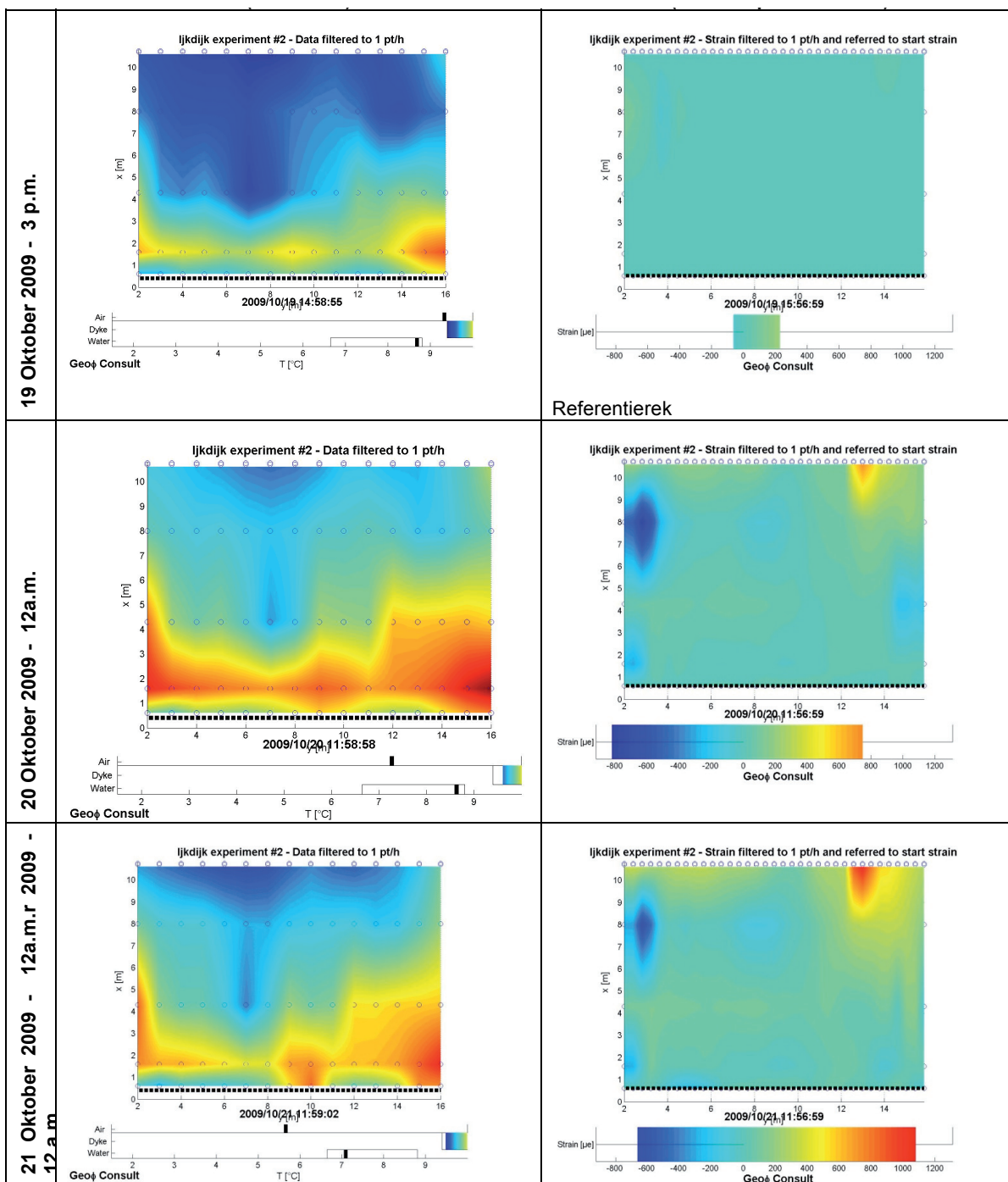
Grafiek 5.8.1 Vervolg. Meetresultaten experiment 1

Experiment 2

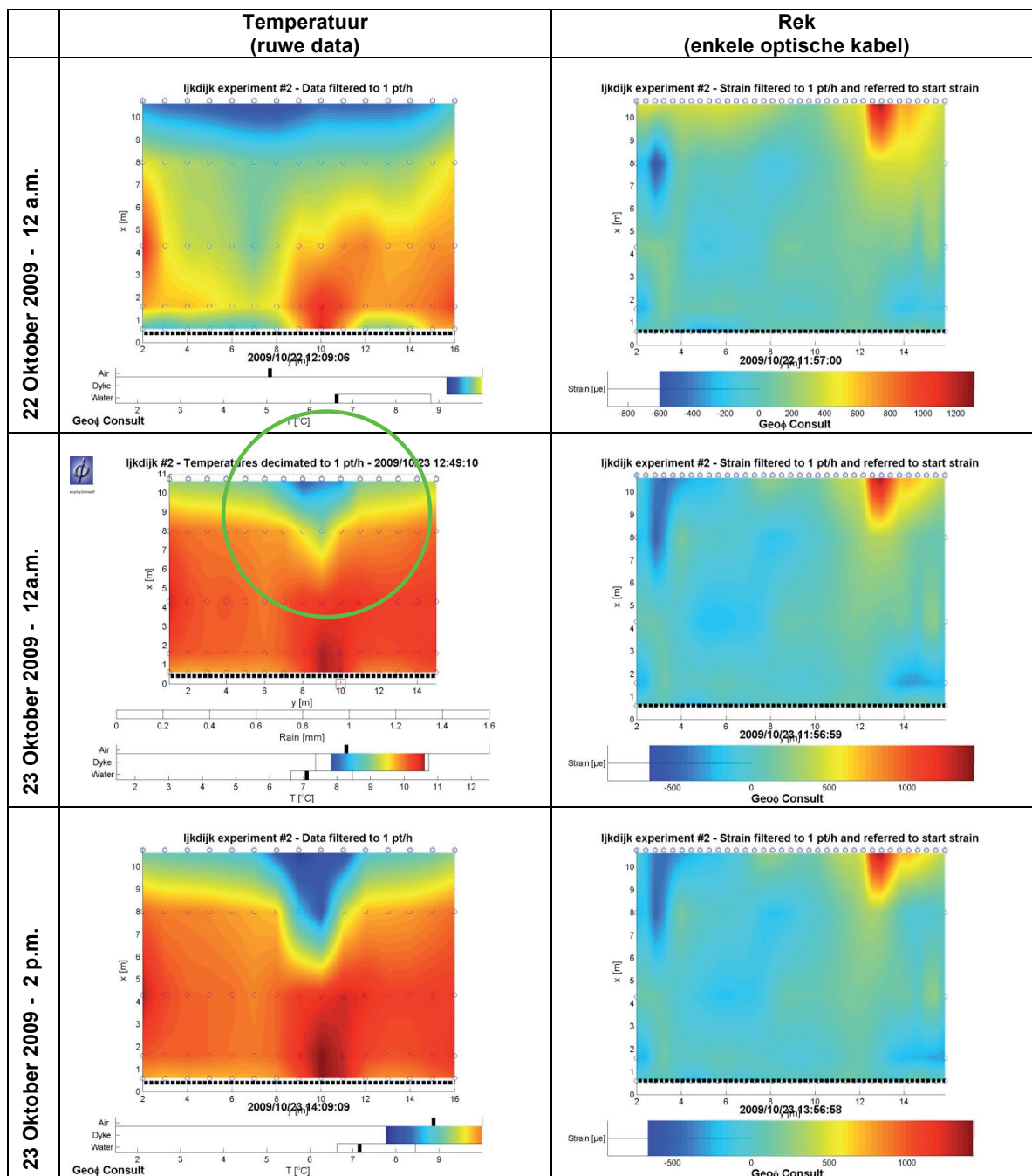
Experiment 2 - Ruwe data

De beelden van het verloop van de ruwe temperatuurdatta tonen duidelijk een beginnende pipe van de bovenstroomse naar benedenstroomse kant van de dijk. Dit beeld dateert van 12.00 uur op 23 oktober 2009, dus ongeveer 2 dagen voordat de dijk bezwijkt. Bij dit experiment liggen de fibers op het grensvlak zand/klei. Dit resultaat is duidelijk beter dan bij experiment 1 waar de fiber 10cm in het zandbed lag.

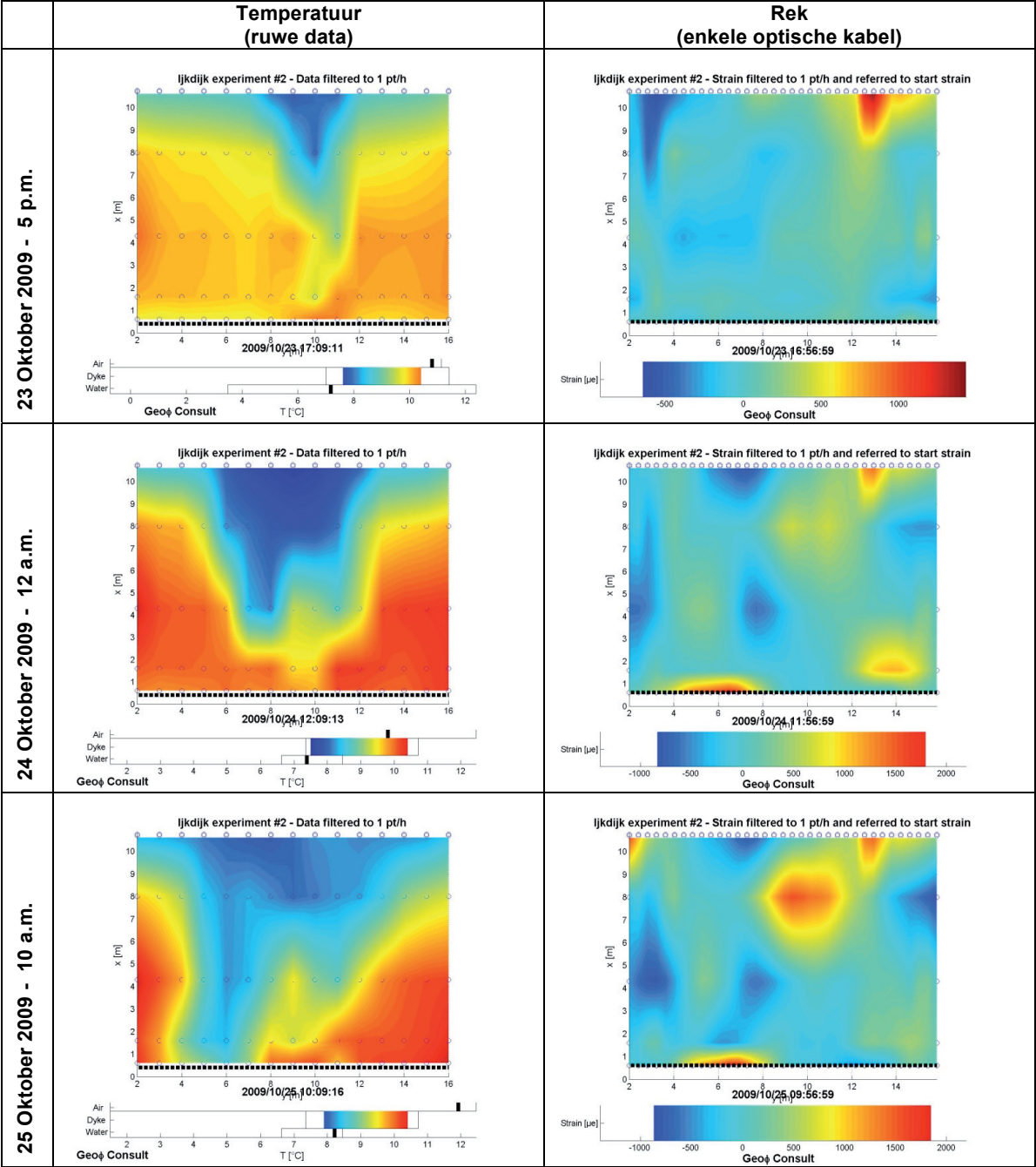
Het verloop van de rek toont enige zetting van de ondergrond, maar de metingen zijn tamelijk stabiel en leveren geen verband op met de locaties van de pipes. Voor dit experiment werd alleen kabel toegepast, zonder geotextiel.



Grafiek 5.8.2 Meetresultaten experiment 2 – ruwe data



Grafiek 5.8.2 Vervolg. Meetresultaten experiment 2 – ruwe data

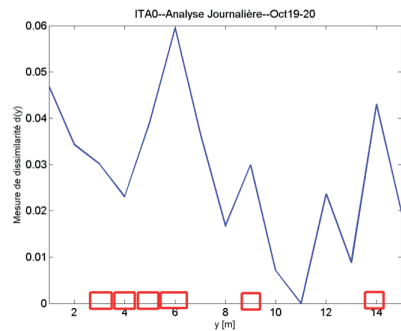


Grafiek 5.8.2 Vervolg. Meetresultaten experiment 2 – ruwe data

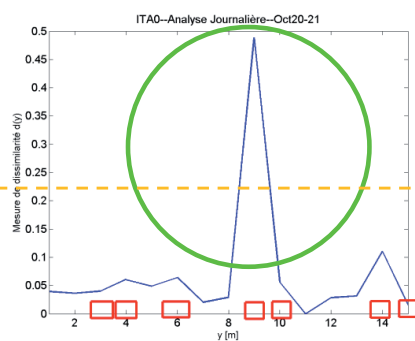
Experiment 2 – Analyse temperatuurdata

Uit een meer diepgaande analyse van de data, uitgevoerd met een door EDF ontwikkeld model, was de regressie van het erosiekanaal (dus van de benedenstroomse naar de bovenstroomse kant van de dijk) al zichtbaar op 21 oktober (dissimilariteit groter dan 0,1), d.w.z. meer dan 4 dagen vóór het bezwijken van de dijk.

Te zien is dat de pipes die worden gedetecteerd, een duidelijke correlatie hebben met de visuele waarneming aan de benedenstroomse teen van de dijk (gemarkt met rode vierkanten).

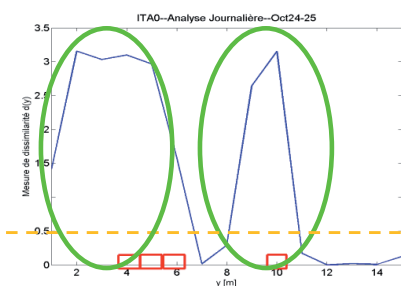


20 oktober



Limit at 0.1 of dissimilarities

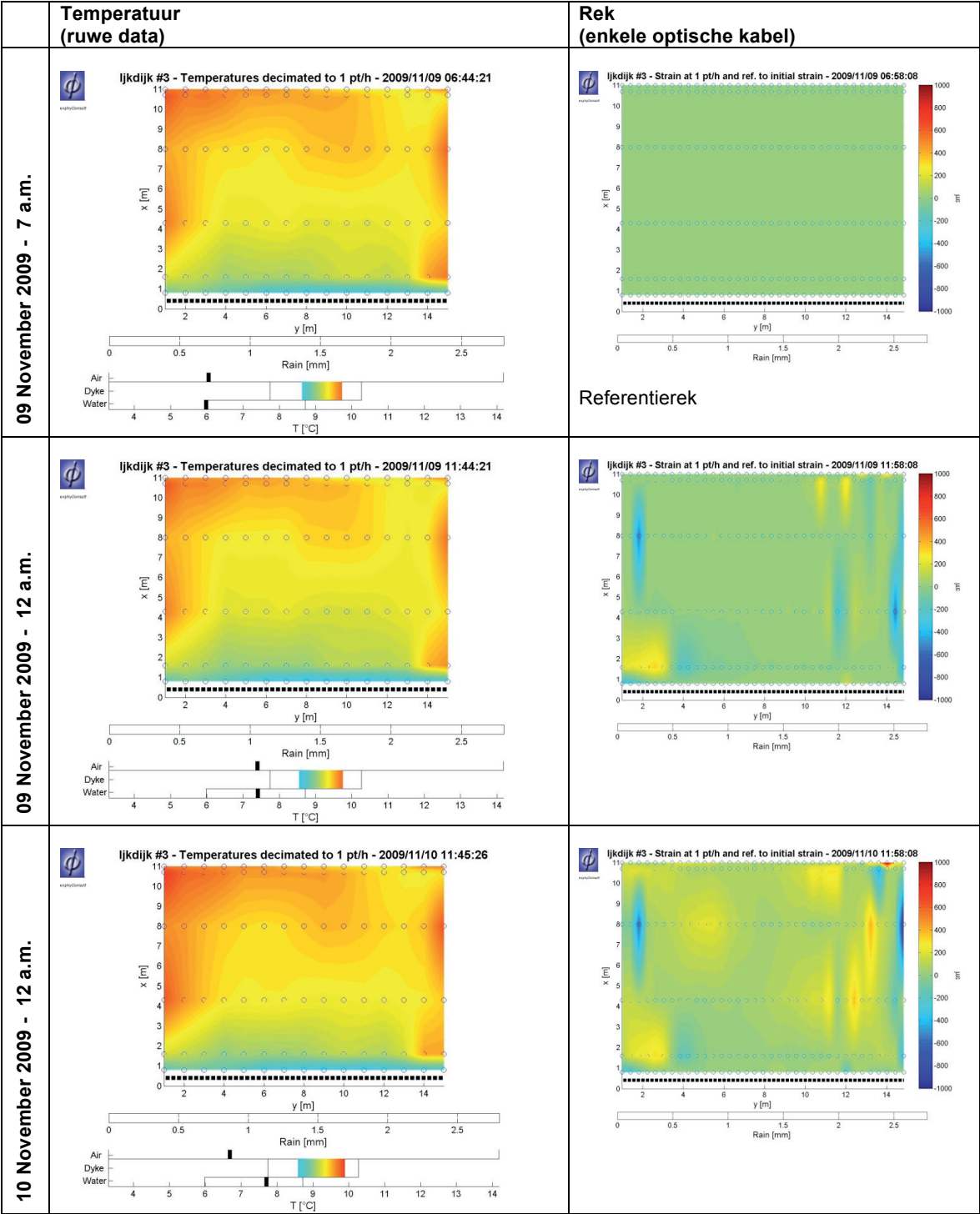
21 oktober



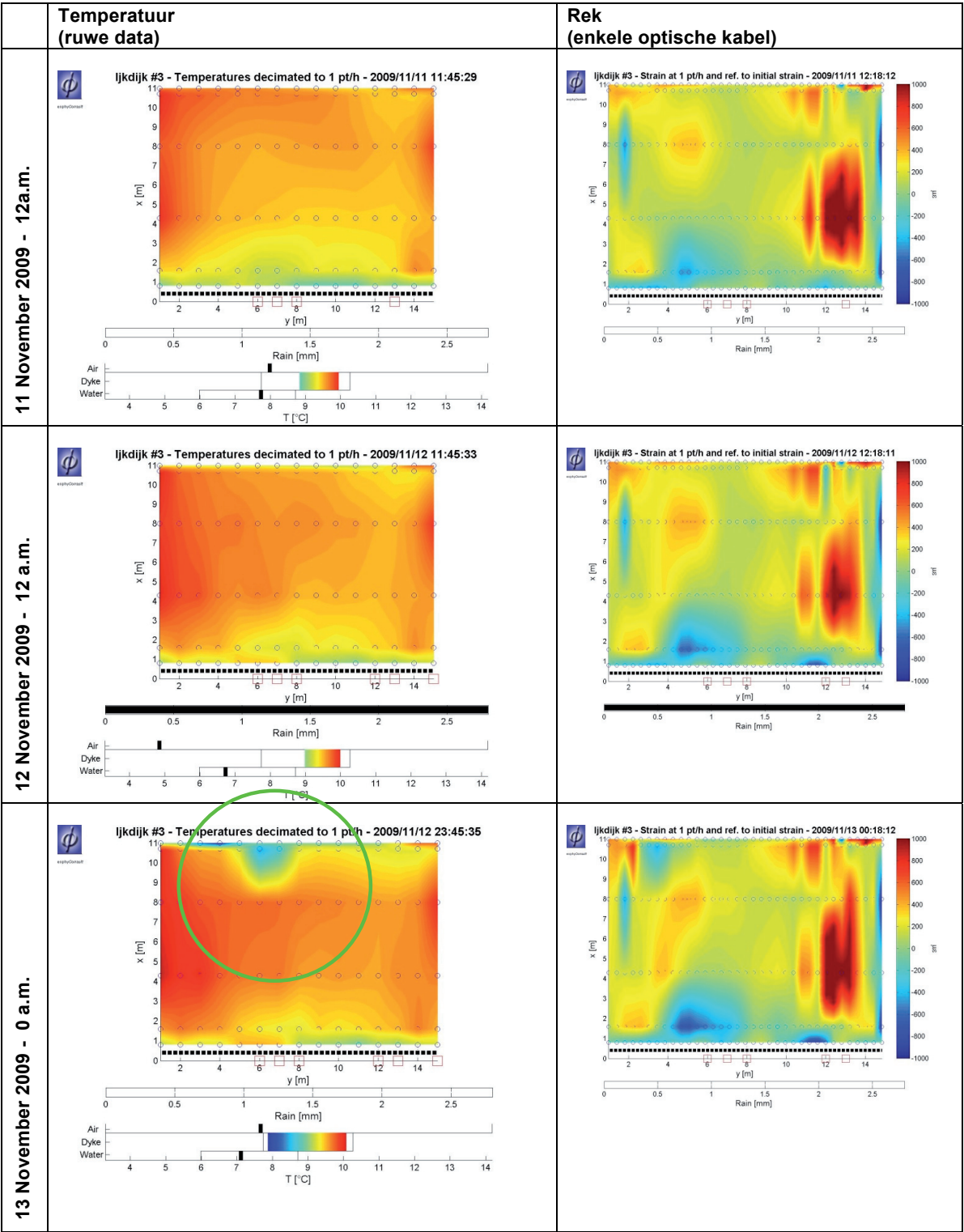
25 oktober

Experiment 3

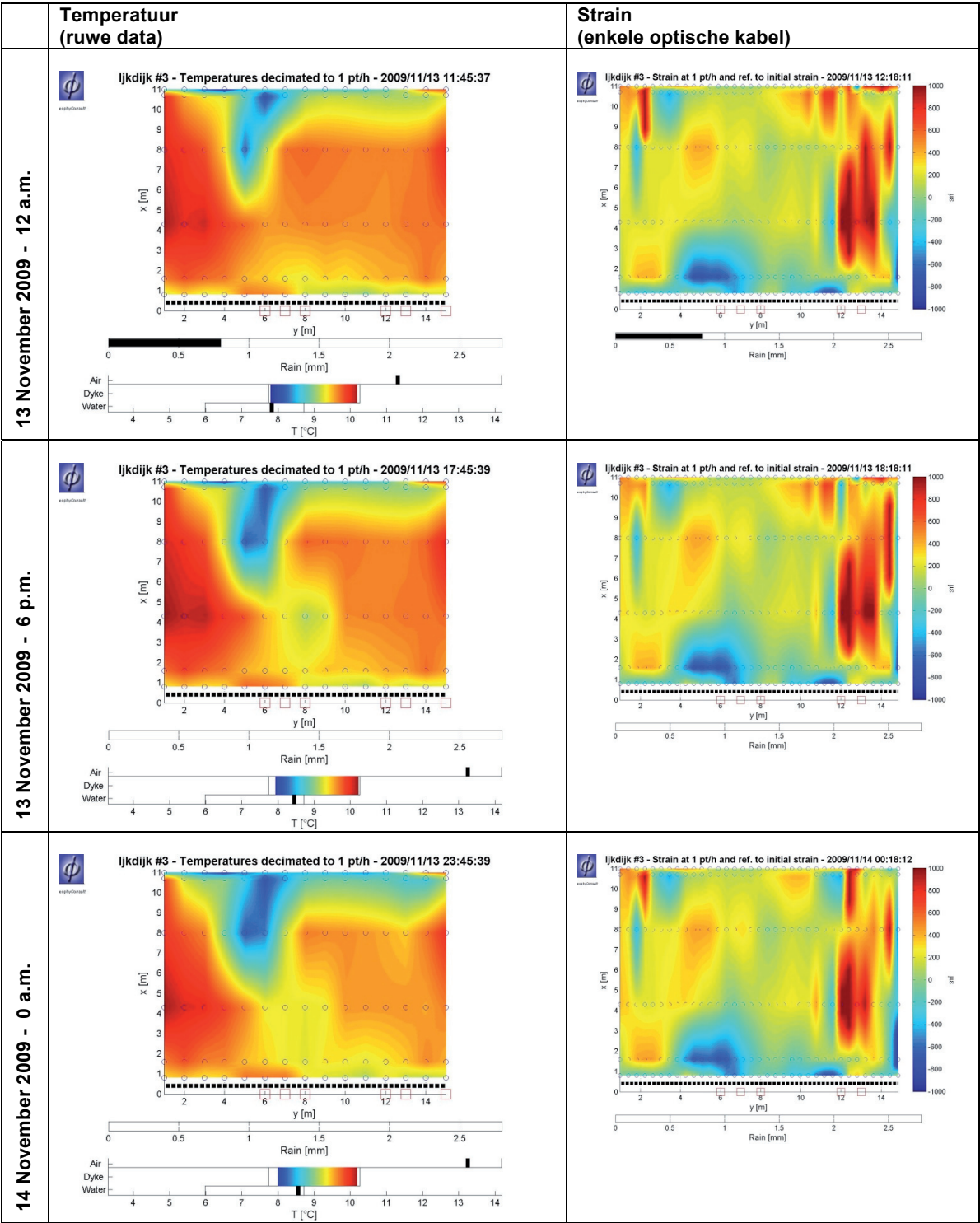
De figuren van het verloop van de ruwe temperatuurddata gemeten met de optische fiberkabel (linkerkolom) tonen duidelijk een beginnende pipe van de bovenstroomse naar de benedenstroomse kant van de dijk. Dit was het geval om 00.00 uur op 13 november 2009, d.w.z. ongeveer 2 dagen voordat de dijk bezweek. Dit komt ongeveer overeen met experiment 2, waar de fibers op dezelfde wijze waren aangebracht. Evenals bij experiment 2 geven ook hier de rekmetingen geen duidelijk verband met de locaties van de pipes.



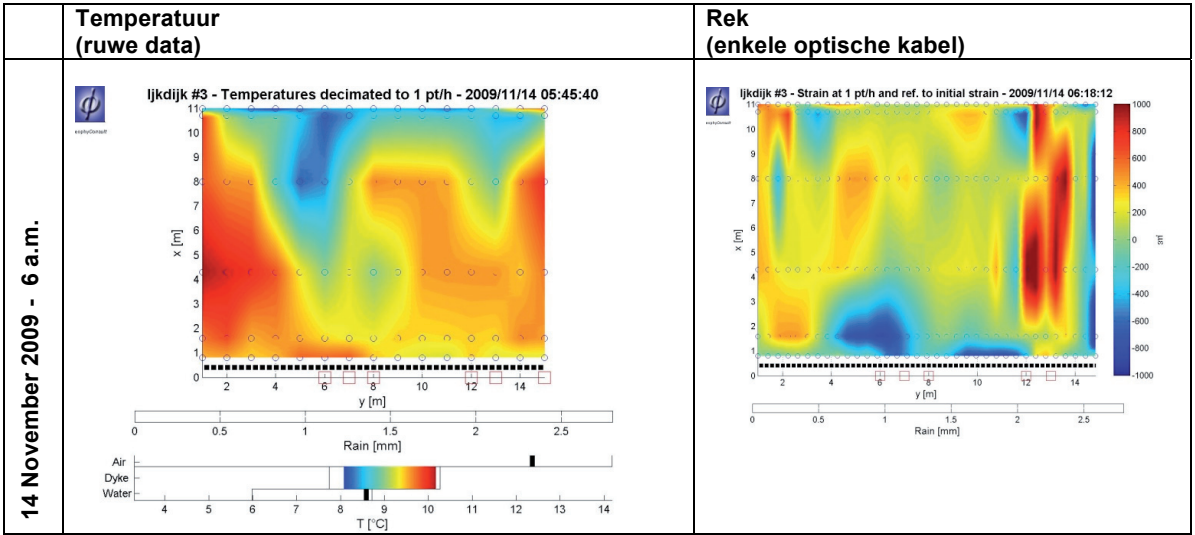
Grafiek 5.8.3 Meetresultaten experiment 3



Grafiek 5.8.3 Vervolg. Meetresultaten experiment 3



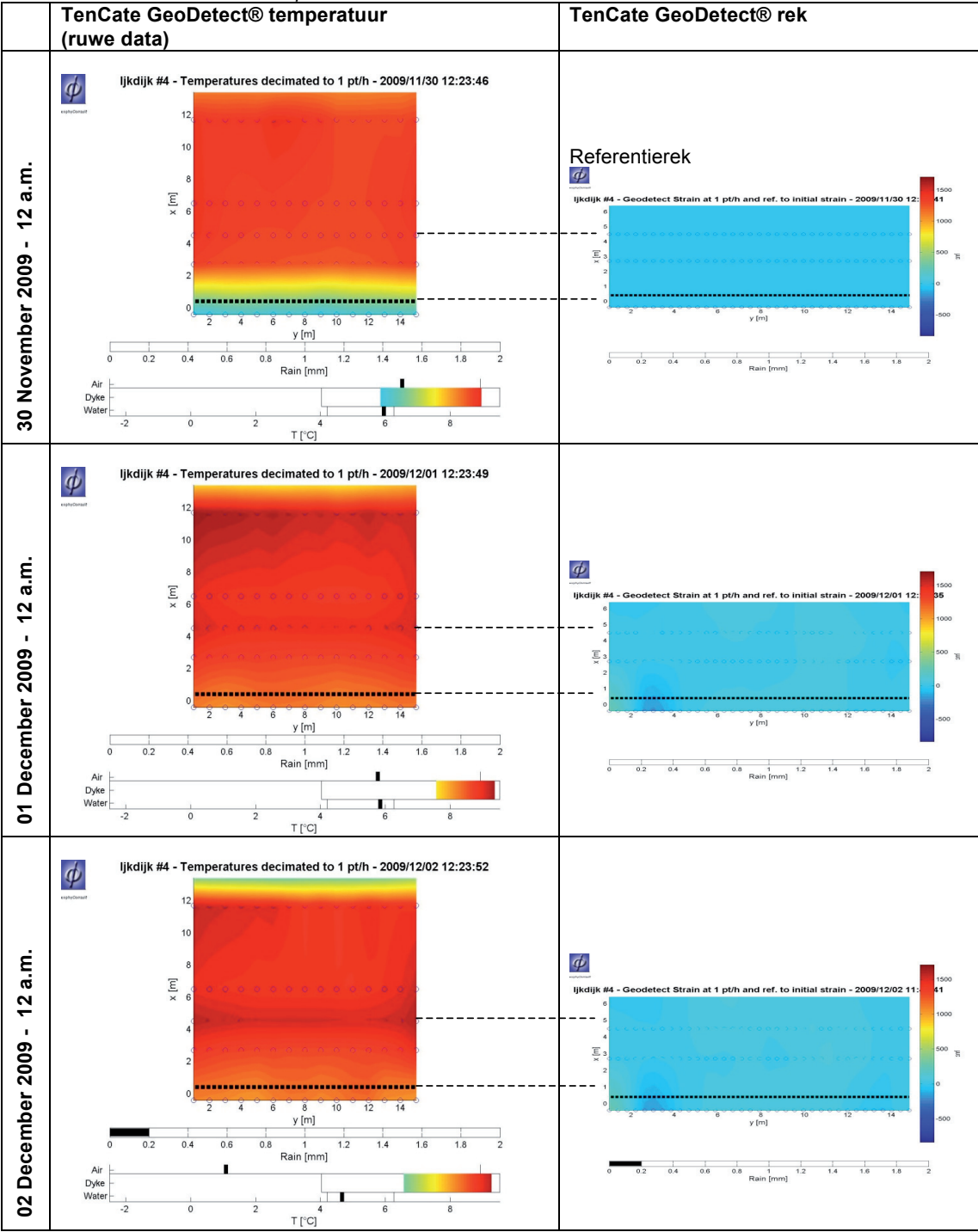
Grafiek 5.8.3 Vervolg. Meetresultaten experiment 3



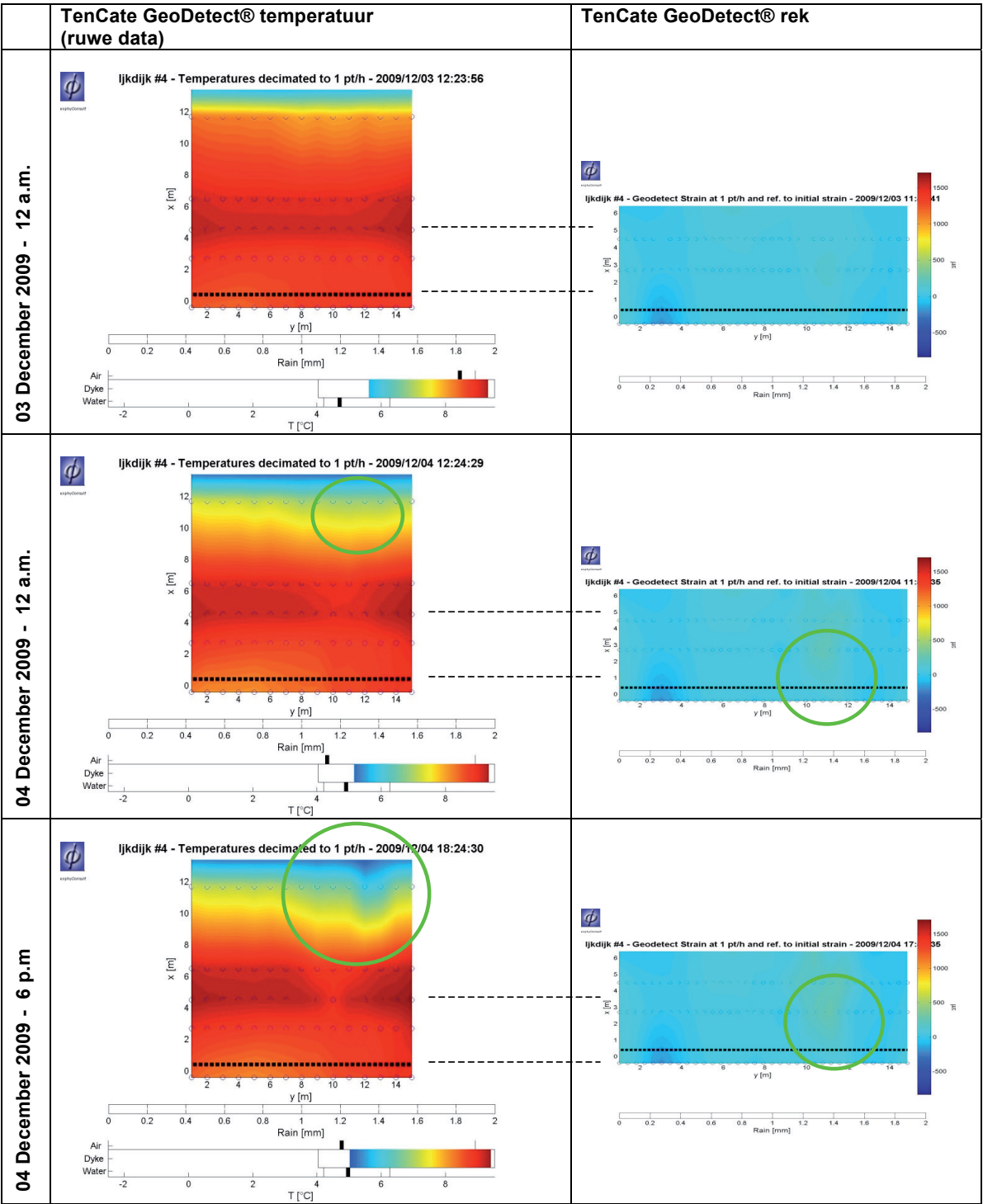
Grafiek 5.8.3 Vervolg. Meetresultaten experiment 3

Experiment 4

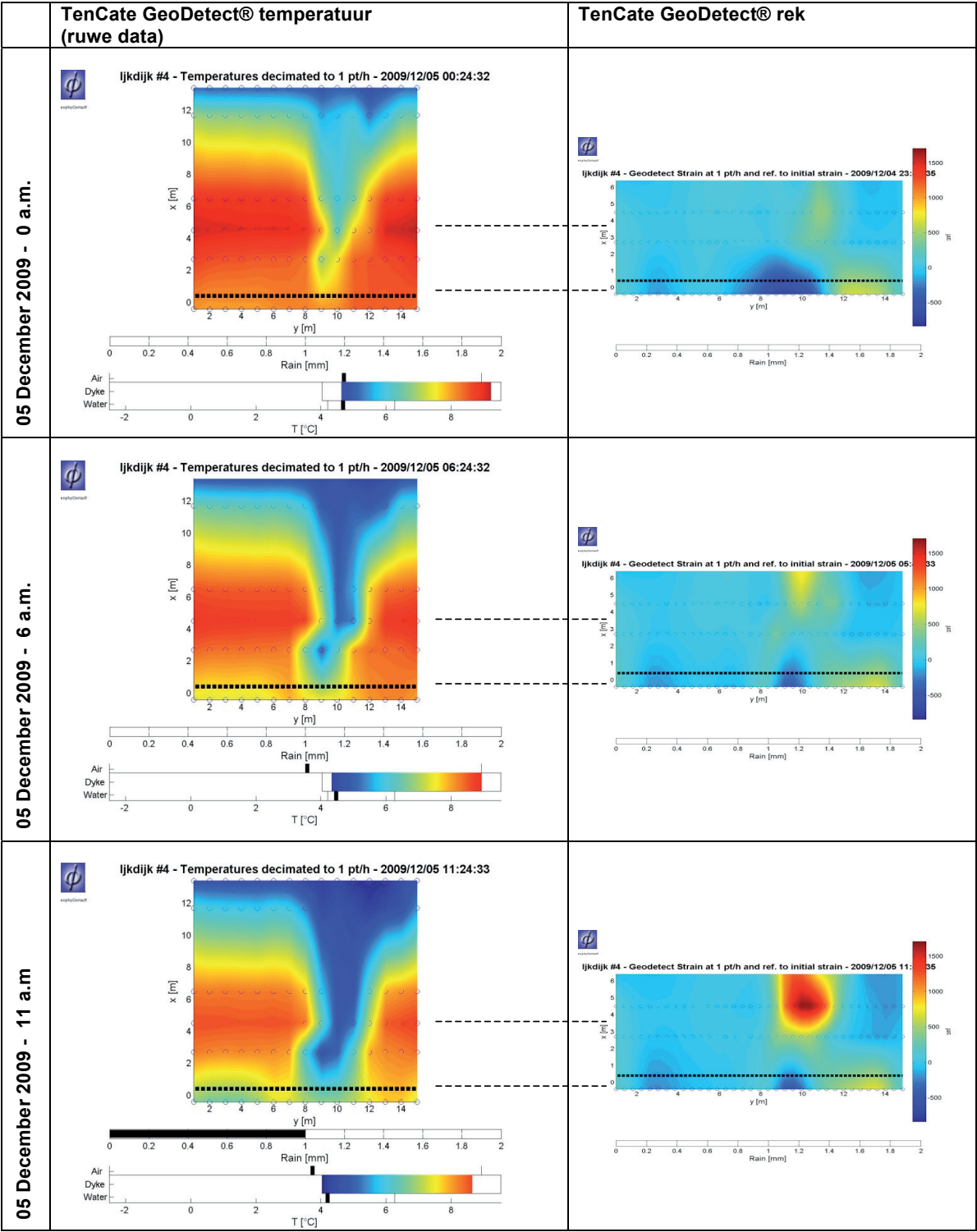
Het verloop van de ruwe data van de temperatuurmetingen (linker kolom) en van de relatieve rekmetingen (rechter kolom) van het TenCate GeoDetect® tonen duidelijk een beginnende pipe vanaf de bovenstroomse naar de benedenstroomse kant van de dijk. Dit beeld dateert van 12.00 uur tot 18.00 uur op 4 december 2009, dus meer dan 12 uur vóór het bezwijken van de dijk. Evenals voor experiment 1 was hier de TenCate GeoDetect® strip 10cm in het zand begraven, waardoor de eerste tekenen van het ontstaan van piping minder snel zichtbaar waren. De rekmetingen zijn duidelijk veel beter dan met alleen een fiberkabel zoals toegepast bij experimenten 2 en 3.



Grafiek 5.8.4 Meetresultaten experiment 4



Grafiek 5.8.4 Vervolg. Meetresultaten experiment 4



Grafiek 5.8.4 Vervolg. Meetresultaten experiment 4

5.8.5 Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste conclusies kunnen als volgt worden samengevat:

- De resultaten van experimenten 1 t/m 4 van het Pipingexperiment laten zien dat optische glasfibertechnologie piping vroegtijdig kan detecteren.
- Zoals de temperatuurmetingen aantonen, wordt piping eerder waargenomen naarmate de kabels dichter liggen bij het niveau waar piping verwacht wordt, in dit geval derhalve op het zand/klei grensvlak.
- Monitoring van de ruwe temperatuurdata resulteert bij deze experimenten in een waarschuwing ongeveer 2 dagen voordat de dijk bezwijkt.
- Analyse van de temperatuurdata met het EDF model vervroegt de detectie tot 2 tot 5 dagen vóór bezwijken (onder proefomstandigheden) doordat het mogelijk is de regressie van het pipingkanaal van de benedenstroomse naar de bovenstroomse kant van de dijk te volgen.
- Rekmeting met alleen een optische kabel levert geen duidelijke informatie op over de locatie van erosiekanalen.
- Rekmeting met stroken TenCate GeoDetect® BR laat de locatie van erosiekanalen binnen dezelfde tijdsduur zien als bij meting van temperatuur.

5.9 2M Sensors

Auteur: Paul Ngana, Gillian Mimmagh, Jan Mink (2M)

5.9.1 Inleiding

Met het Pipingexperiment is het de bedoeling om in een vroeg stadium eventuele veranderingen in de dijk waar te nemen zodat tijdig tot vervolgactie besloten kan worden. Essentieel hierbij is dat de monitoring een voorspellende waarde heeft en niet alleen een registratie is van de gebeurtenissen net voor of tijdens een calamiteit.

Metingen uitvoeren in de beginfase van het experiment, wanneer de pipingkanalen nog aan het ontstaan zijn is erg moeilijk omdat er voorkomen moet worden dat enerzijds het pipingproces gehinderd wordt terwijl er toch veel meetsensoren verspreid ingebouwd moeten worden om zo veel mogelijk informatie te verzamelen uit de gebieden waar er een mogelijkheid is dat piping ontstaat.

Piping is een erg lokaal verschijnsel. Daarom is het van belang een grote dichtheid van meetgebieden te hebben. De meeste sensoren hebben een puntwaarneming terwijl een breder waarnemingsgebied nodig is om een betere dekking te krijgen.

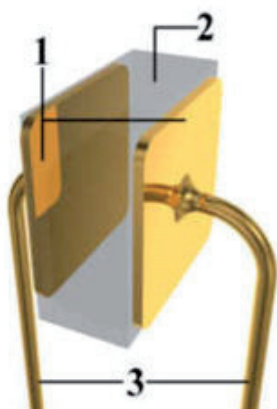
De eisen voor de sensoren zijn dus dat ze erg klein moeten zijn, dat ze met een hoge dichtheid aangebracht moeten worden, bijvoorbeeld om de 1 à 2 meter en een breder detectiegebied hebben dat niet beperkt blijft tot een puntwaarneming.

2M heeft gedurende de laatste jaren meerdere producten (o.a. meetsystemen) ontwikkeld die gebruik maken van sensoren.

Er is gekozen voor een meetsysteem gebaseerd op een capacitive sensor gecombineerd met een temperatuursensor omdat dit waarschijnlijk de beste resultaten kan geven voor het registreren van het pipingfenomeen.

Een capacitieve sensor kan gemaakt worden in een kleine behuizing terwijl door het principe van de meting er toch een groot gebied bemeten kan worden.

In Figuur 5.9.1 is een voorbeeld van een condensator schematisch weergegeven; een condensator is een opslagtank voor lading. Hij bestaat uit 2 metalen platen (1), tussen de metalen platen zit de opslagtank (2) en via de draden (3) wordt de stroom aan en afgevoerd. Als de ruimte tussen de platen gevuld wordt met water neemt bij gelijke spanning ook de lading toe. Dit gaat lineair met de hoeveelheid water. Via de draden (3) is uit te lezen hoeveel water (of vocht) er tussen de platen zit.



Figuur 5.9.1 Schematische weergave van een condensator

Bij deze sensoren is een andere implementatie voor de condensatoren gekozen en is het water dat aan de buitenkant van de condensator zit via de sensor te zien.

Met deze (condensator)sensor kan dus water worden gemeten dat dichtbij de sensor zit maar ook waterveranderingen die verder bij de sensor vandaan plaatsvinden. Dit is met name van belang bij piping.

Initieel als de stroming aan het toenemen is zal de hoeveelheid water toenemen en kan dit worden waargenomen

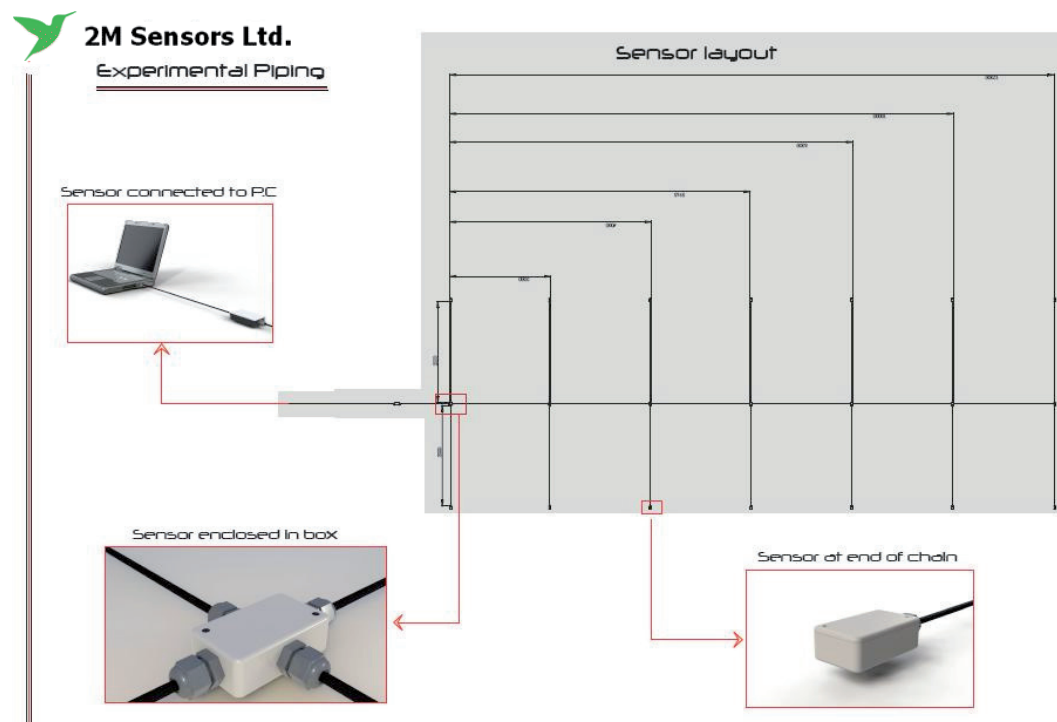
als een toename in de waarden van de testcapaciteit. Omdat deze sensor ook over een groter gebied kan meten is er een grotere kans om de kanalen te detecteren.

Op het moment dat de flow significant is toegenomen zal het zinvol zijn om een temperatuurmeting toe te voegen, om de aan flow gerelateerde temperatuur te kunnen meten.

5.9.2 Aanpak en werkwijze

2M Sensors heeft voor deze experimenten een nieuwe sensor ontworpen en uitontwikkeld op basis van een capacitieve methode. Deze methode meet de vochtigheid en water in de bodem. De capaciteit neemt proportioneel toe met de hoeveelheid zand in het water. Als gevolg hiervan kan piping gevolgd worden.

Zoals hiervoor is aangegeven is voor deze experimenten een speciale sensor ontwikkeld. In deze paragraaf zal het concept, het ontwerp en de ontwikkeling hiervan besproken worden.

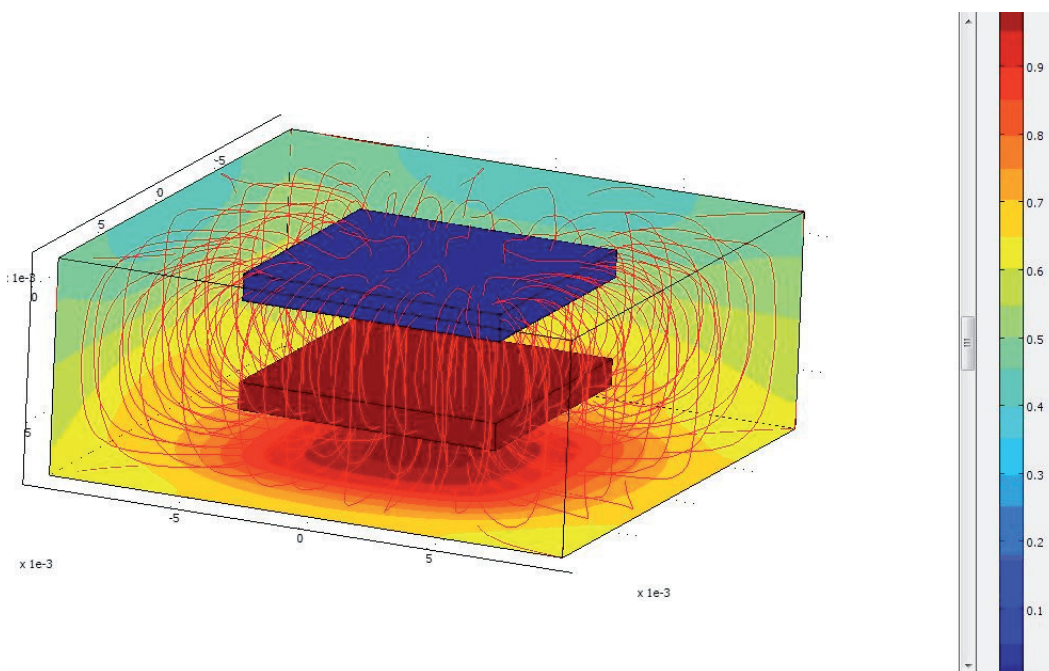


Figuur 5.9.2 Concept van 2M Sensors capacitief meetsysteem

In bovenstaande figuur is het concept van het sensorsysteem weergegeven. De metingen gebeuren in de modules die hierboven "sensor at end of chain" genoemd worden. De informatie van deze sensoren wordt verzonden naar de "Sensor enclosed in box" waar de informatie verwerkt wordt en via een USB verbinding naar de computer wordt overgedragen. De laatste box bevat ook een capacitieve sensor.

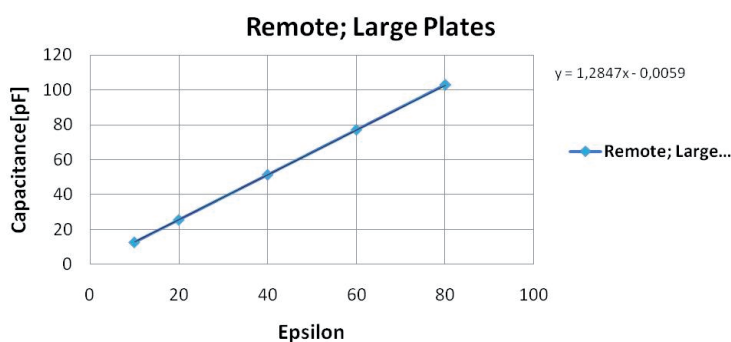
In het kader van het definiëren van de afmetingen van de sensor zijn er simulaties gedaan om deze afmetingen te berekenen. Met deze analyses is een concrete inschatting gemaakt van de te verwachten capaciteiten in het zand en de klei afhankelijk van de geometrie van de sensoren.

In de volgende figuur is een berekende weergave van de veldlijnen te zien zoals die ontstaan bij een capacitieve meting.



Figuur 5.9.3 Visualisatie van de veldlijnen rondom de condensatorplaten

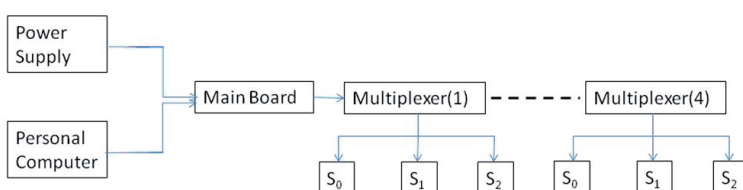
Vervolgens is voor een groot aantal geometriën en epsilonwaarden de te verwachten capaciteit gesimuleerd door middel van berekeningen. In onderstaande figuur is aangegeven hoe de capaciteit kan afhangen van de hoeveelheid water(epsilon) in de bodem.



Figuur 5.9.4 Visualisatie van de invloed van waterhoeveelheid (epsilon) op de capaciteit

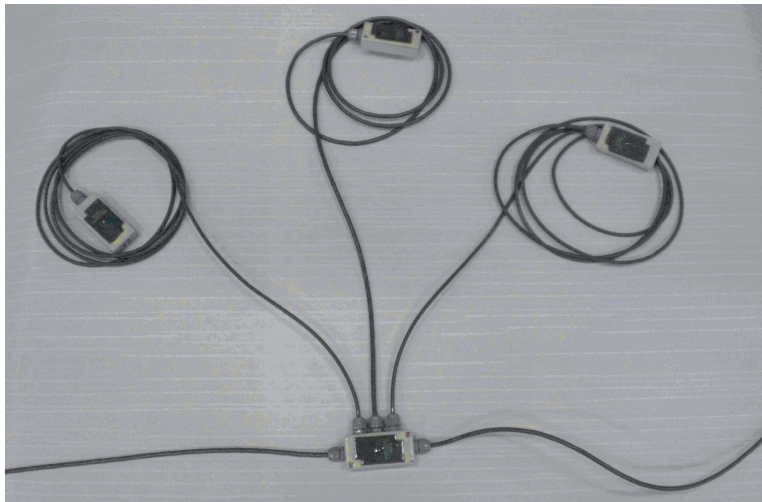
Architectuur

De belangrijkste bouwblokken van het systeem met hun functie zijn weergegeven in Figuur 5.9.5. Een PC is via een USB verbinding verbonden met het mainboard. Het mainboard bevat de programmeerbare microchips die geprogrammeerd worden met behulp van een PC. Deze computer heeft ook verbinding met het internet voor een verdere distributie van de data. Het mainboard stuurt via 4 multiplexers (voor elke multiplexer 3 sensoren) de sensoren aan.



$S_{1,2,3}$ - Capacitive Sensors

Figuur 5.9.5 Block diagram van het sensor systeem

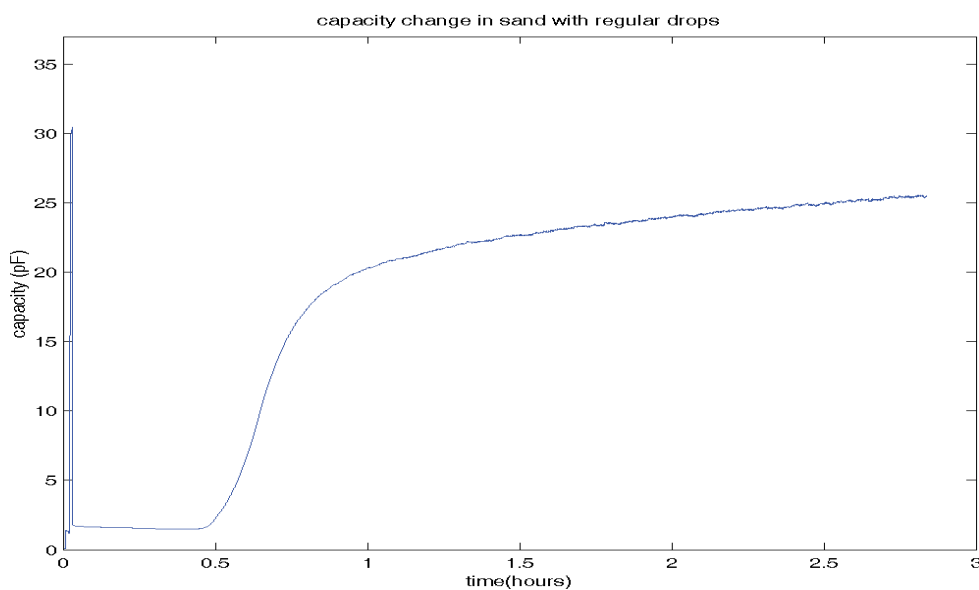


Figuur 5.9.6 Unit block van het sensor systeem

In Figuur 5.9.6 zijn de sensoren weergegeven, aan de onderzijde is de multiplexer geplaatst, aan de bovenzijde de drie sensoren. De multiplexers worden met elkaar en aan de PC verbonden.

Meetcapaciteit

Voor de capaciteitsmeting is een speciaal ADC circuit ontwikkeld om de capaciteitwaardes digitaal uit te lezen. In deze schakeling is een omzetter met een hoge resolutie gebruikt; daarnaast kan de meetrange extern worden ingesteld. Het resultaat van de analoog naar digitaal conversie wordt via een vaste of draadloze verbinding naar een PC gezonden. Met de hulp van conversie-algoritmes wordt vervolgens de capaciteit en daarmee de hoeveelheid water in de grond berekend.



Grafiek 5.9.1

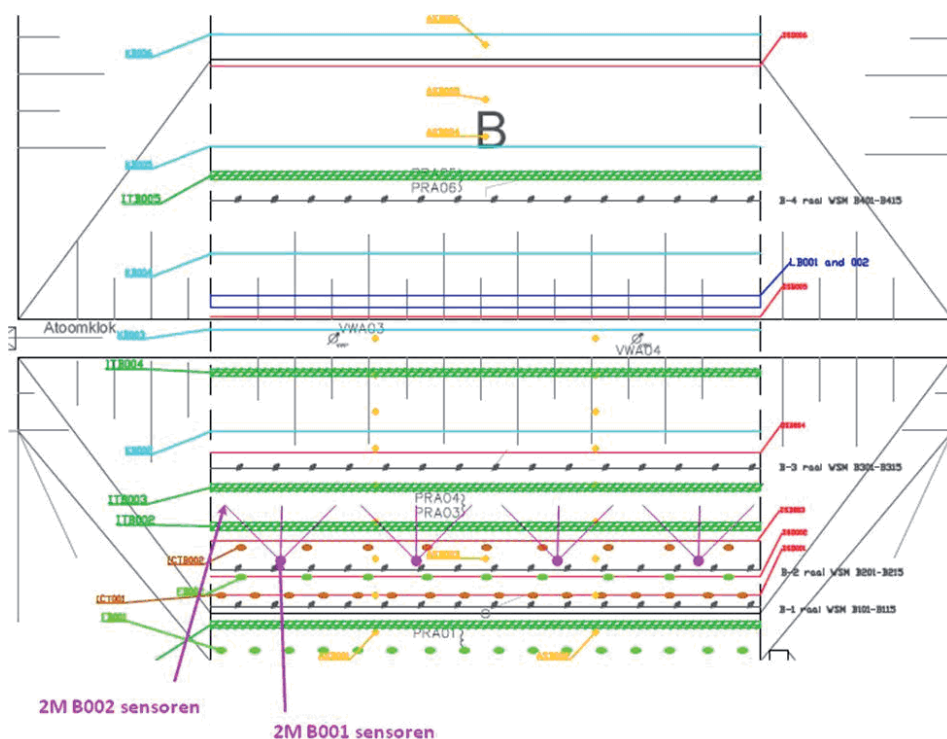
In bovenstaande grafiek is weergegeven hoe de capaciteit toeneemt als functie van de hoeveelheid water. Bij dit experiment, die in het 2M laboratorium is uitgevoerd, is met vaste tijdsintervallen een druppel water in een bak met zand gedruppeld. Na ongeveer een half uur wordt het zand dat binnen het bereik van de sensor licht vochtig. Na ongeveer 3 uur is het gebied rond de sensor vochtig geworden.

Systeem en sensor aansturing

Voor de aansturing en uitlezing van de sensoren wordt gebruik gemaakt van een microprocessor. Deze microchip controleert de volgorde van de instructies en geeft deze door aan de verdeelpunten en de sensoren. De aansturing wordt gedaan via een gestandaardiseerd communicatie protocol: I2C. De microprocessor is geplaatst op het main-board. Elke sensor heeft zijn eigen adres en dit adres is gekoppeld aan de positie van de sensor in de dijk. Op deze wijze kan direct gezien worden waar in de dijk zich eventuele veranderingen voordoen. De sensoren in de dijk zijn ongeveer 1,5 meter uit elkaar geplaatst.

5.9.3 Instrumentatie

In het schema hieronder, Figuur 5.9.7, is weergegeven waar en hoe de sensoren in de dijk geplaatst zijn.



Figuur 5.9.7 Layout van het sensor systeem op de IJkdijk locatie (De sensoren van 2M Sensors zijn paars van kleur)

De 2M Sensoren zijn aangegeven met de codes 2M B001 en 2M B002. De 2M B001s zijn de multiplexers (met daarin ook een sensor) en de 2M B002s zijn de sensoren waarbij er 3 per multiplexer doos zijn aangesloten. 2M Sensors heeft alleen aan experiment 4 deelgenomen. Bij dit experiment zijn er in totaal 16 sensoren in de dijk op de IJkdijksite geplaatst. De sensoren zijn getest nadat ze in de dijk zijn geplaatst en hebben op dat oment normaal gefunctioneerd. Nadat de sensoren geïnstalleerd zijn is de dijk verder afgebouwd.

Stichting

IJkdijk



Figuur 5.9.8 Voorbereiding en plaatsing van de sensoren

5.9.4 Verloop van het experiment

2M Sensors heeft een aantal dagen na de plaatsing opnieuw een bezoek aan de site gebracht om enige instellingen van het sensorsysteem te wijzigen. Bij controle bleek dat de sensoren niet meer functioneerden.

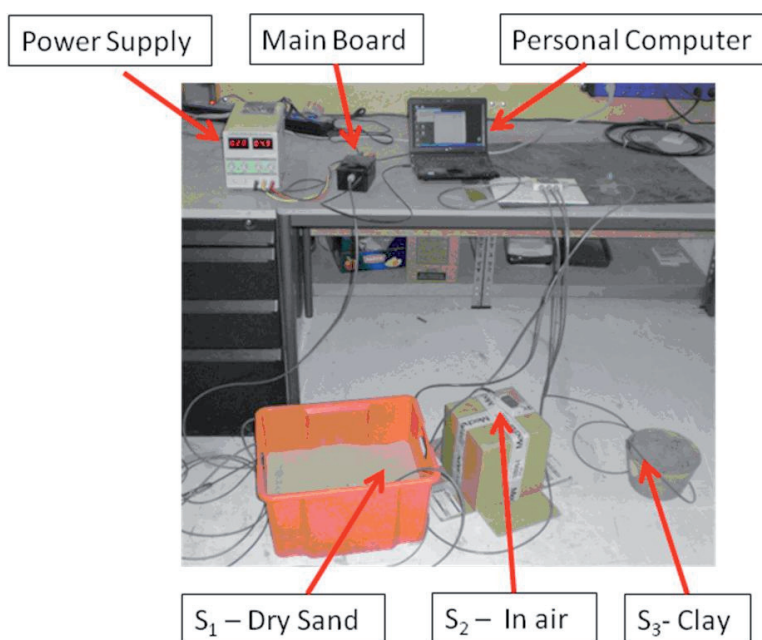
Na de controle is een uitgebreide analyse uitgevoerd en zijn een aantal eerdere testen herhaald. Uit de analyse blijkt dat er geen sprake is van enige schadelijke invloed van water. Meerdere devices en connectoren zijn de hele week in water ondergedompeld geweest maar tonen geen uitval van het signaal.

5.9.5 Meetresultaten

Tijdens het experiment is geen data verzameld als gevolg van bovengenoemde problemen.

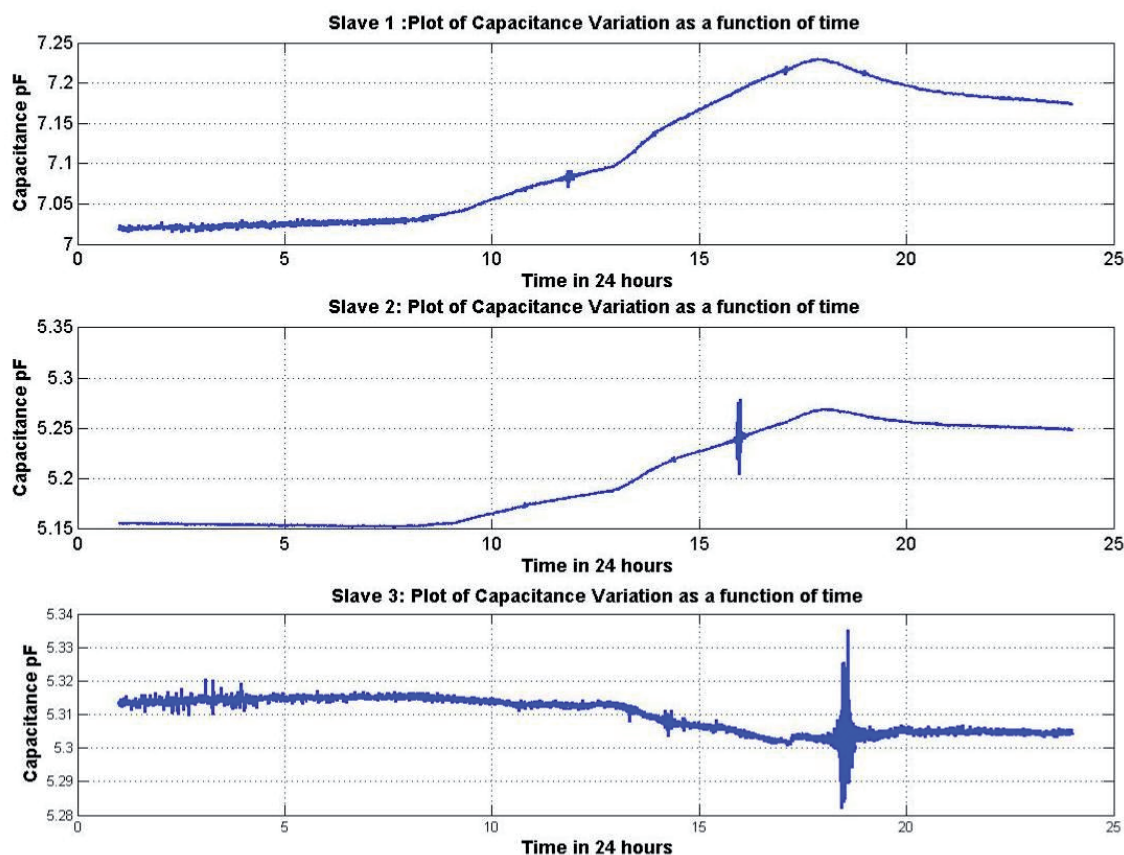
Voor, maar ook na het IJKdijk experiment, zijn in het 2M Sensors laboratorium uitgebreid testen gedaan met de sensoren zowel in een droge als in een natte grond. Na de experimenten zijn de sensoren op duurproef gezet en ook hier zijn weer de meetomstandigheden gevarieerd.

In onderstaande figuur is de meetopstelling weergegeven met de onderdelen zoals hiervoor is beschreven. In dit geval is Sensor 1 (S1) geplaatst in droog zand, Sensor 2 (S2) in lucht en Sensor 3 (S3) in klei.



Figuur 5.9.11 De meetopstelling in het 2M Sensors laboratorium

Om de reproduceerbaarheid van de sensormetingen te verifiëren zijn er gedurende 3 maanden metingen gedaan. Het systeem is continue operationeel geweest zonder enige probleem. In Figuur 5.9.12 is een kleine doorsnede weergegeven met metingen verzameld over een periode van 24 uur. Deze metingen hebben met name tot doel om de betrouwbaarheid en stabiliteit van het meetsysteem te onderzoeken.



Figuur 5.9.12 De experimentele resultaten van Sensor 1 (Slave1), Sensor 2 (Slave 2) en Sensor 3 (Slave 3)

5.9.6 Conclusies en aanbevelingen

Het meetsysteem dat speciaal voor dit project is ontwikkeld heeft bewezen dat het de verwachte functionaliteit kan uitvoeren, namelijk het meten op afstand van veranderingen in de waterhuishouding in verschillende grondsoorten. De verificatie heeft met name in het 2M lab plaatsgevonden. Metingen direct na de installatie hebben laten zien dat het systeem ook in een dijk kan werken.

Het feit dat er een beschadiging van het sensorsysteem is opgetreden bij de installatie leert dat daar meer aandacht aan moet worden geschonken. Verder is alleen maar aan experiment 4 deelgenomen. Deelname aan ook het eerste experiment zou de mogelijkheid hebben gegeven nog aanpassingen in de constructie te doen.

Stichting

IJkdijk

5.10 Referentiemonitoring Deltares

Auteurs: André Koelewijn m.m.v. Vera van Beek, Han Knoeff en Huub de Bruijn

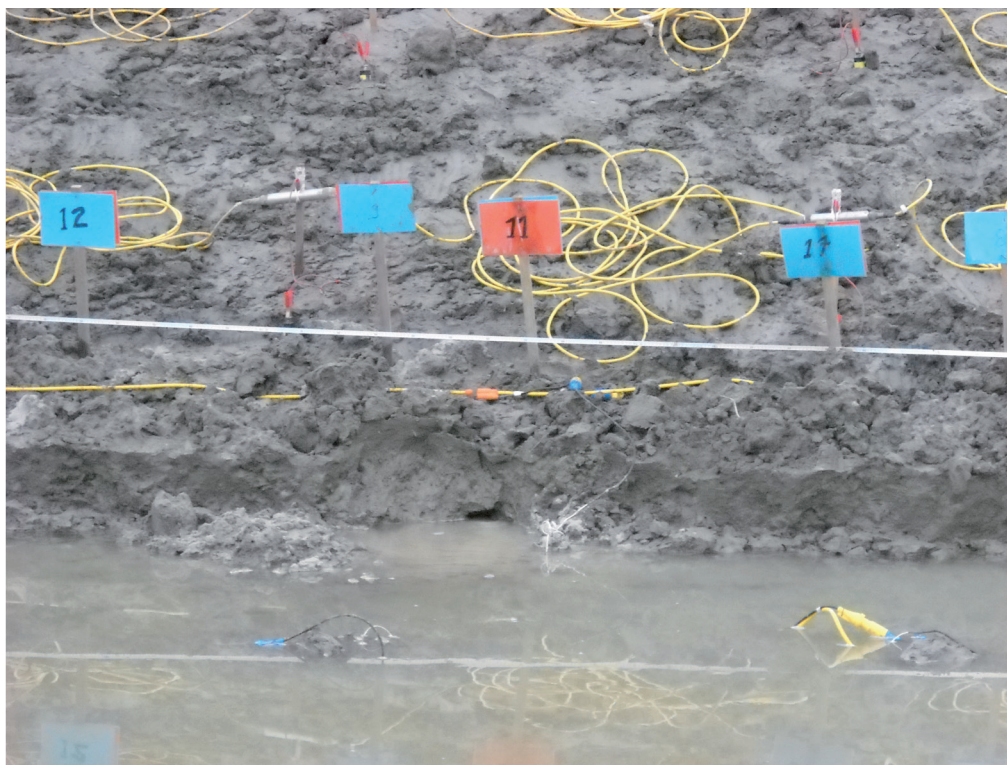
5.10.1 Instrumentatie en meetresultaten

De referentiemonitoring van Deltares bestond primair uit:

- visuele inspecties
- waterspanningsmetingen op het grensvlak klei/zand, onder de dijk, aan de bovenzijde van het zandpakket
- waterspanningsmetingen op 1 en 2 meter diepte in het zandpakket, in de middenlijn op drie posities onder de dijk
- debietmetingen

In aanvulling hierop behoorde formeel ook een deel van de monitoring door de participanten tot de referentiemonitoring, zoals de temperatuurmetingen met glasvezel door Ten Cate tijdens experiment 2 en 3, maar dat is in de vorige paragrafen al beschreven.

De visuele inspecties werden uitgevoerd om de sensormetingen te ondersteunen en om alle gebeurtenissen te registreren die zich zouden voordoen waar de sensoren niet op toegerust waren. Een voorbeeld van een dergelijke situatie is de tunnelvorming boven een wel door in beperkte mate instorten van het kleiïge dijkmateriaal, zie Figuur 5.10.1.



Figuur 5.10.1 Tunnelvorming ter plaatse van een zandmeevoerende wel

Om deze inspecties te kunnen uitvoeren nabij de teen van de dijk zonder de wellen te verstoren en zonder (groot) gevaar voor de persoonlijke veiligheid werd gebruik gemaakt van een hoogwerker zoals die doorgaans door glazenwassers gebruikt wordt, zie Figuur 5.10.2.



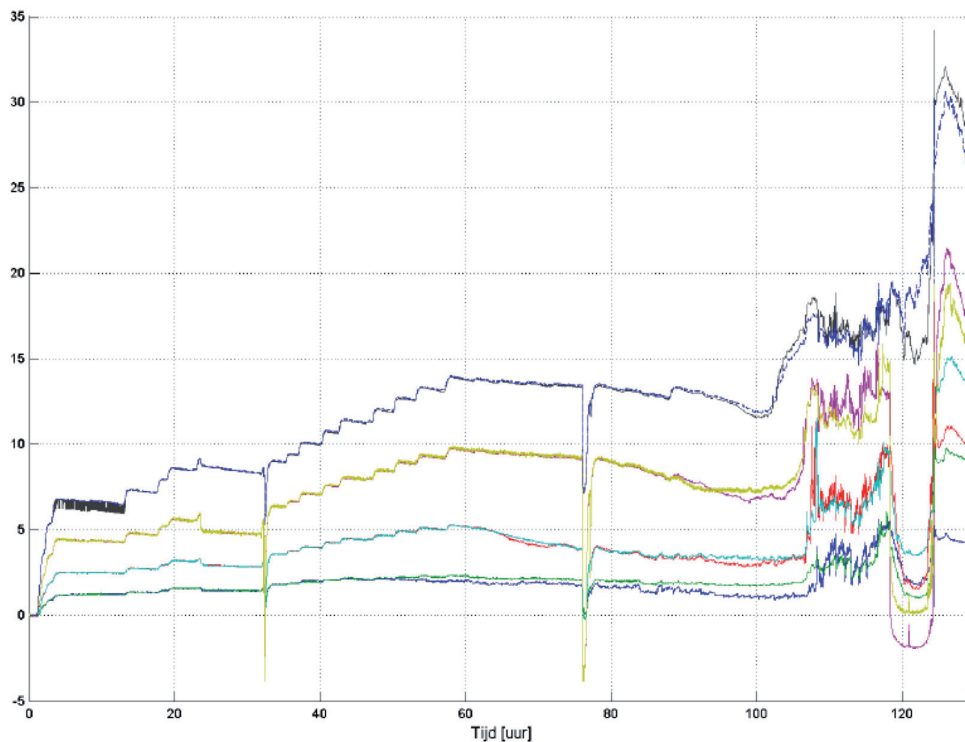
Figuur 5.10.2 Hoogwerker ter ondersteuning van de visuele inspecties

De waterspanningsmeters op het grensvlak van klei en zand werden op zorgvuldige wijze zo nauwkeurig mogelijk op dit grensvlak gelegd, zie Figuur 5.10.3. In een aantal gevallen heeft het streven deze instrumenten niet in de zandlaag te laten uitsteken ertoe geleid dat ze in de klei zaten en daardoor alleen vertraagd maten. Met name bij experiment 2 heeft dit tot betrekkelijk veel uitval van instrumenten geleid (circa 30%).



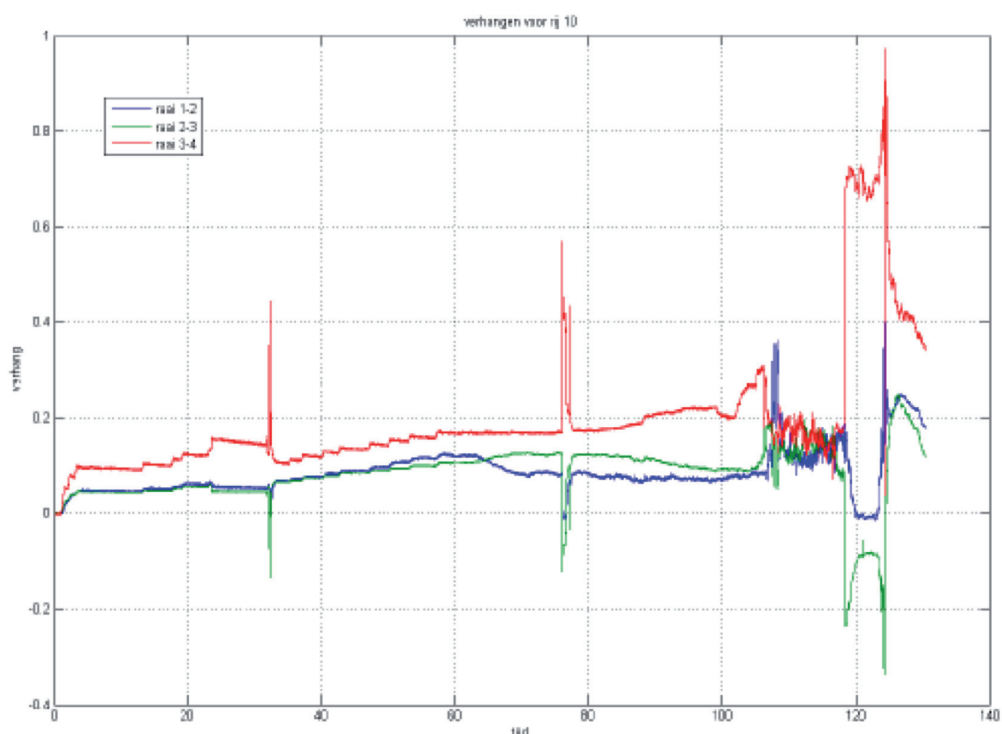
Figuur 5.10.3 Raaien waterspanningsmeters voor experiment 2, ingepakt in kleibroodjes gelegd op het geprepareerde zandbed (onder water)

In Figuur 5.10.4 zijn metingen van deze waterspanningsmeters weergegeven tijdens experiment 4. De gekozen instrumenten bevonden zich nabij het uiteindelijke kanaal waarlangs bezwijken plaatsvond. De stapsgewijze toename van het verval is hierin duidelijk te zien, evenals de acties met de Luisterbuis. Ook is, van benedenstrooms naar bovenstrooms (van lijnen met lagere drukken naar lijnen met hogere drukken) te zien dat er op een gegeven moment een lichte afname van de waterspanningen optreedt, op het moment dat het kanaal passeert. Later trad een hogere waarde op, dit geen bovendien nogal schokkerig. Dit is de ruimingsfase, de schokken houden verband met de diverse 'oplevingen' (zie paragraaf 4.2.2 voor een uitleg van deze term).



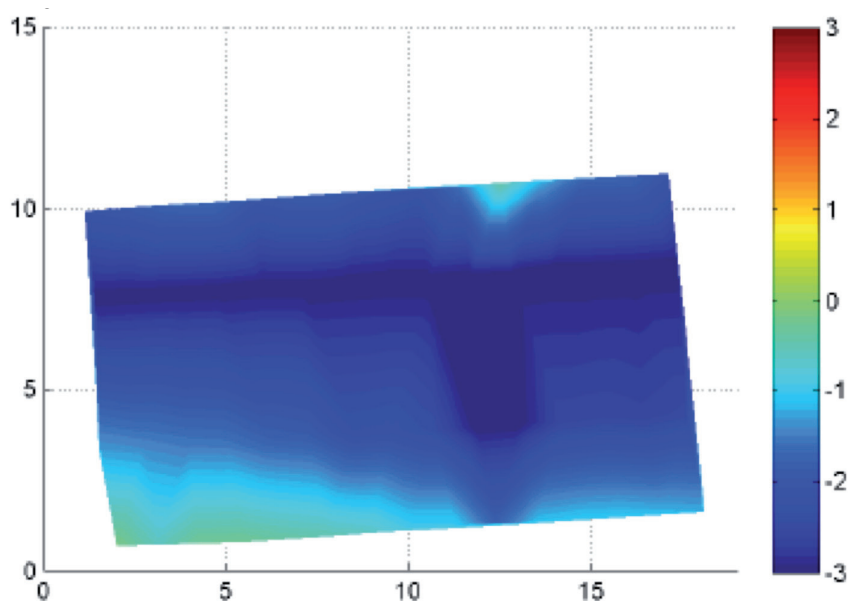
Figuur 5.10.4 Waterspanningsmetingen tijdens experiment 4 nabij de uiteindelijke zone van bezwijken

Het moment van passeren van het kanaal is duidelijker terug te vinden in de verhanglijnen, zie Figuur 5.10.5. Hierin is bijvoorbeeld te zien dat na 65 uur de blauwe lijn daalt; dan is het kanaal de eerste waterspanningsmeters voorbij, maar de tweede nog niet. Dat gebeurt pas na ongeveer 85 uur (afname van de groene lijn).



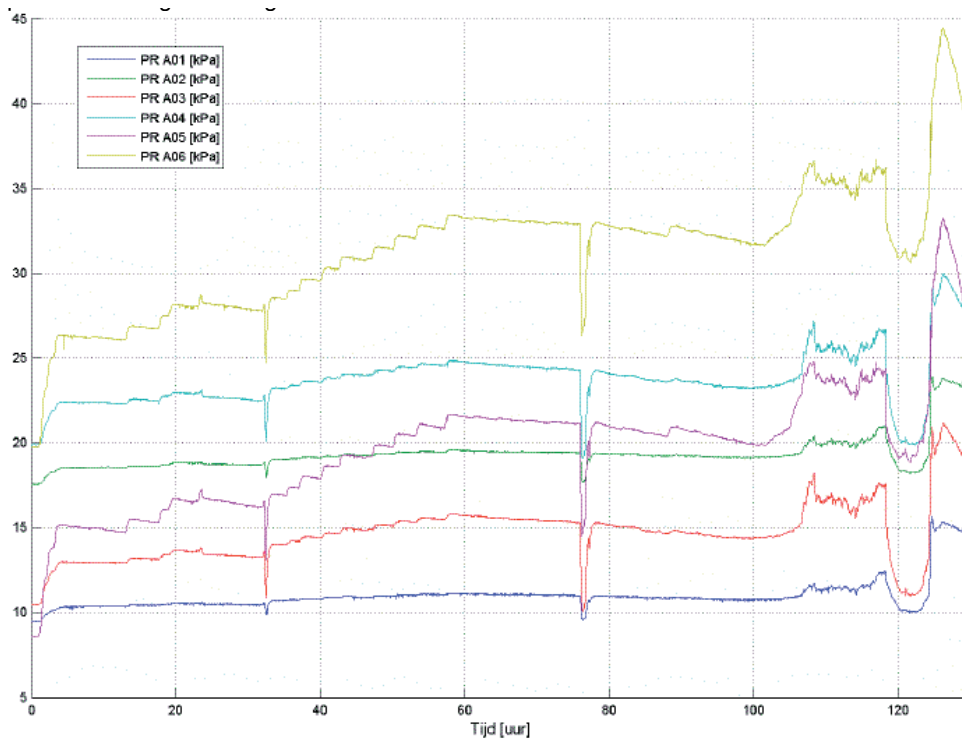
Figuur 5.10.5 Verhagen tijdens experiment 4 voor de waterspanningsmetingen nabij de doorbraaklocatie

Vergroting van het inzicht kan ook verkregen worden door de waterspanningsmetingen uit te zetten in contourplots waarin het verloop vergeleken wordt met het geïdealiseerde lineaire verloop dat zich instelt wanneer er geen stromingsconcentratie in pipes voordoet en er bijvoorbeeld ook geen intreedweerstand ten gevolge van slib op de bodem van het bovenstrooms kanaal optreedt. Dergelijke plots zijn ten dele al tijdens de experimenten gemaakt. Een voorbeeld is gegeven in Figuur 5.10.6, waarin te zien is dat de verhoging van de waterspanningen bovenstrooms ten gevolge van de ruimingsfase is begonnen. Dit is te zien door deze figuur te vergelijken met de gegevens in Figuur 4.13.



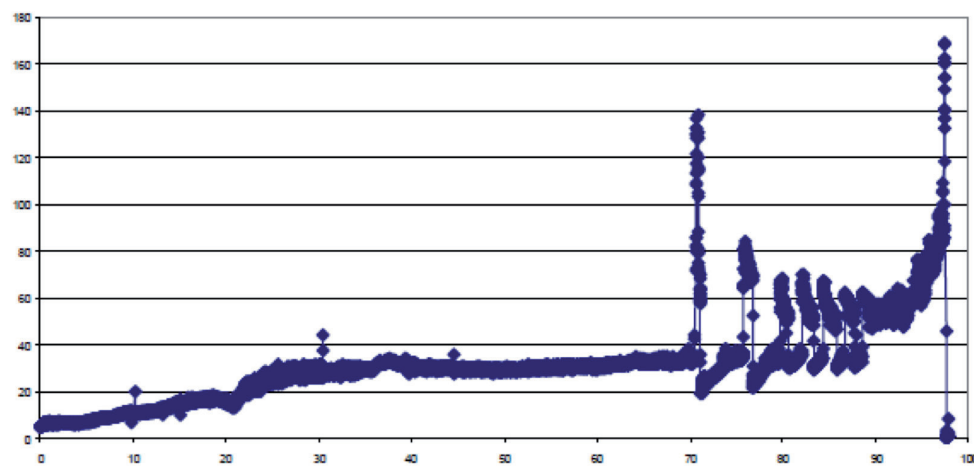
Figuur 5.10.6 Contourplot van de waterspanningen tijdens experiment 4 op $t=103$ uur na de start, de lichtblauwe vlek rechtsboven geeft onmiskenbaar aan dat de ruimingsfase is gestart

De waterspanningsmetingen dieper in de zandlaag tijdens experiment 4 zijn weergegeven in Figuur 5.10.7. De Luisterbuis-acties zijn ook hierin weer duidelijk terug te vinden; zij het duidelijker in de metingen op 1 meter diepte dan in de metingen op 2 meter diepte. Hetzelfde geldt voor de detectie van kanaalvorming; hoewel sterk verzwakt is ook dit tot op 2 meter diepte terug te vinden in de metingen. Dit levert de belangrijke conclusie dat metingen aan het pipingproces tot op enige afstand van de kanaaltjes nog mogelijk zijn, al is het gevaarlijk om uit deze (tamelijk ideale) proefomstandigheden algemene conclusies zoals een harde afstandsmaat af te leiden.



Figuur 5.10.7 Waterspanningsmetingen dieper in de zandlaag tijdens experiment 4

Tenslotte behoren de debietmetingen tot de referentiemonitoring onder de verantwoordelijkheid van Deltares. Een weergave van deze metingen tijdens experiment 1 is te vinden in Figuur 5.10.8. De schokken van de 'oplevingen' zijn hierin duidelijk te zien. De eerdere piekjes, na 10, 30 en 44 uur, hangen samen met handmatige calibraties met een emmer.



Figuur 5.10.8 Debietmetingen tijdens experiment 1

6 Conclusies en discussie

Onderstaand volgen de belangrijkste conclusies uit de pipingexperimenten. Zoals reeds in Hoofdstuk 2 werd gezegd voert het te ver om het gehele beoordelingskader voor alle tien meetsystemen uit te werken, maar is het goed om dit kader bij het lezen in gedachten te hebben. De hoofdpunten die in paragraaf 2.7 worden genoemd zijn: 1) waarom is het instrument ingezet? 2) Wat had gemeten moeten worden? 3) Waar is het instrument ingezet? 4) Wanneer is gemeten? 5) In welke mate is er gemeten?

Allereerst volgt een korte beschouwing over het pipingproces, gevolgd door een korte beschouwing over de data-verwerking. Vervolgens worden de belangrijkste conclusies uit de deelexperimenten besproken en tot slot worden enkele algemene conclusies getrokken met betrekking tot de meetsystemen en een monitoringssysteem voor het faalmechanisme piping.

6.1 Conclusies met betrekking tot het pipingproces

De volgende conclusies zijn te trekken, gerelateerd aan het voortschrijden van het pipingproces:

- De eerste en belangrijkste conclusie is dat het mogelijk is om in een *full scale* experiment het pipingproces onder gecontroleerde omstandigheden te laten plaatsvinden en te volgen. Voor een uitgebreide analyse van het proces en de validatie van de rekenregels wordt verwezen naar de rapportage van Rijkswaterstaat SBW, omdat deze buiten de scope van dit project vallen. Hier wordt volstaan met een korte beschrijving van de waargenomen verschijnselen.
- De eerste waarnemingen van erosie-activiteit bestaan uit 'zandsporen', plekken waar geen zandtransport zichtbaar is, maar waar wel zand is afgezet. Deze zandsporen duiden mogelijk op de aanwezigheid van kanaaltjes, maar in ieder geval op concentratie van lekstroming. Zandsporen zijn aanwezig over de gehele breedte van de dijk.
- Bij grotere verhangen, enkele decimeters onder het kritieke verhang, worden 'schone' wellen waargenomen: wellen die geen zand meevoeren.
- Voordat zandtransport wordt waargenomen dalen de waterspanningen in benedenstroomse raaien, hetgeen duidt op kanaalvorming.
- Bij experiment 2 ontstaat, enkele decimeters onder het kritieke verhang, en zandmeevoerende wel. Bij experiment 4 gebeurt dit één decimeter onder het kritieke verhang. Bij experiment 1 en 3 ontstaan er meerdere langs de teen van de dijk.
- Als eenmaal zandmeevoerende wellen ontstaan, neemt het totale zandtransport niet meer af. Langzaam groeit de pipe in bovenstroomse richting.
- Het debiet neemt nauwelijks toe bij pipevorming.
- Uit de waterspanningen kan afgeleid worden waar het kanaal zich bevindt. Nadat het kanaal de bovenstroomse zijde bereikt, start het ruimproces: het vergroten van het kanaal van de bovenstroomse zijde naar de benedenstroomse zijde. Dit is in de waterspanning te zien als een sterke verhoging van de waterspanning.
- Het bereiken van de benedenstroomse zijde resulteert in een forse toename van het zandtransport en het debiet.
- Er treden scheuren op in de dijk. Aan de bovenstroomse zijde zakt de dijk in en uiteindelijk bezwijkt de dijk.

6.2 Conclusies met betrekking tot de dataverwerking

- Het platform voor de dataverwerking (AnySenseConnect) heeft tijdens de pipingexperimenten goed gefunctioneerd als verzamel- en distributie-punt voor sensordata van uiteenlopende bronnen. Voor de vier pipingexperimenten zijn ruim 10 verschillende sensorsystemen aangesloten met in totaal enkele duizenden sensoren. De data is realtime gedistribueerd naar de deelnemers en ter backup naar de TNO vestiging in Groningen verstuurd. Tijdens de experimenten keken ruim 50 gebruikers mee op het dashboard naar het verloop van de experimenten en waren in staat hun eigen view op de sensordata te definiëren in de vorm van grafieken.
- In experiment 1 zijn ruim 81 miljoen sensormetingen opgeslagen, experiment 4 heeft een kleine 25 miljoen metingen opgeleverd. Dit verschil komt met name door het terugbrengen van de sample rate van een aantal sensorsystemen. Er is een kleine 3 Terrabyte aan streaming data verzameld (video en geluid). De videodata kan gebruikt worden om de meetdata van sensoren, die vooral intern in de dijk hebben gemeten, te vergelijken met externe gebeurtenissen. Externe gebeurtenissen kunnen b.v. scheuren in het dijklichaam zijn of ingrepen door de proefleiding (verhoging waterstand of het wegscheppen van zand uit de wellen).

6.3 Conclusies uit de deelexperimenten

Alert Solutions heeft met hun "Geobeads" voor het meten van waterspanning en temperatuur deelgenomen aan experiment 1 en 4.

- De GeoBeads waterspanningsmetingen en temperatuurmetingen – met de daarin tijdens de experimenten naar voren komende veranderingen en fluctuaties – zijn goede indicatoren voor het ontstaan van pipingkanalen. De metingen geven een beeld dat vergelijkbaar is met de referentiemetingen.
- De afstand tussen de meetpunten was ca 1,5 m. Het lijkt er op dat deze afstand voor het detecteren van piping groter mag, wanneer er sprake is van een doorlopende uniforme zandlaag in horizontale richting.
- Meetresultaten op verschillende diepten ten opzichte van de zand-klei overgang (0cm, 20cm en 100cm) geven vergelijkbare resultaten, met dien verstande dat temperatuur op grotere diepte geen duidelijke correlatie meer heeft met het pipingproces.

Dike Survey heeft met optische detectiekabels voor trillingen en bewegingen deelgenomen aan experiment 1 en 4.

- Er worden duidelijk bewegingen in het zand- en kleipakket geregistreerd; waarbij geconstateerd is dat (net als bij het Macrostabieliteitsexperiment) verplaatsingen een sensor worden ingeleid door een toename van de amplitude van de frequentie van 1,81 Hz;
- Er zijn aanwijzingen dat de ontwikkeling van pipes zich manifesteert in het frequentiebereik tussen 4 en 7 Hz. Uit nader onderzoek (Fourieranalyse) moet blijken of een maatgevende trilling in de frequentieband van 4-7 Hz kan worden berekend.
- Bij beide experimenten zijn in het zand tussen de detectiekabels bewegingen geregistreerd met een voortplantingssnelheid van ca. 4 - 10 mm/s (experiment 1) of ca 3 - 4 mm/s (experiment 2). Dit komt overeen met een snelheid van 10 a 30m per uur.
- Gedurende het verloop van de beide experimenten is gebleken dat de stabiliteit van de proefdijken geleidelijk afnam.

Fugro heeft bij experiment 4 gemeten aan self potentials, door waterstroming spontaan optredende elektrische velden.

- De SP methode is een makkelijk te installeren methode die je overal aan de voet van dijklichamen en dammen kan plaatsen.
- Het eerste optreden van een relatief grote anomalie in het *self potential* vond op zaterdag 5 december om 10:30 uur plaats. Het bezwijken van de dam vond rond 14:45 uur op die zaterdag plaats.
- Het verschil tussen het optreden van de relatief grote SP anomalie en het bezwijken van de dijk is ca. 4 uur en 15 minuten.

GTC Kappelmeyer heeft met een vezeloptisch temperatuurmeetsysteem deelgenomen aan experiment 1 en 4.

- Het vezeloptische lekdetectie systeem geeft al bij de start van het vullen van het bassin, veranderingen van de verzadiging van de bodem rond de kabels aan. De posities van de kwelkanalen worden correct gedetecteerd, waarbij het systeem kwalitatief onderscheid van de ernst van de verzadiging kan aangeven.
- Een kwantitatieve evaluatie van de kwel is mogelijk door het vaststellen van de thermische geleiding langs de kabel. Dit kan worden uitgevoerd met behulp van een variatie van de door GTC Kappelmeyer ontwikkelde EGRT-methode.

Intech heeft metingen gedaan met remote sensing van infraroodstraling in alle vier de experimenten.

- Het verloop van het pipingproces is met name met de gemodificeerde "high resolution camera" met ca 330.0000 meetpunten zeer goed te volgen.
- De wellen zijn bij alle vier de experimenten in een vroeg stadium te herkennen. Zandmeevoerende wellen geven een duidelijk temperatuurverandering aan het dijkoppervlak cq het benedenstrooms bassin.
- Het kwelwater wordt in eerste instantie opgewarmd in het warmere dijklichaam. Naarmate de snelheid van het water in de zandmeevoerende wellen toeneemt kan het minder warmte van het dijklichaam kan opnemen en neemt de temperatuur van het uitstromende water af.
- Het tijdspad tussen detectie van zandmeevoerende wellen en doorbraak varieert tussen 45 uur en 102 uur. Aan de hand van nadere analyse moet duidelijk worden waar deze variatie door wordt veroorzaakt.

ITC heeft aan self potentials gemeten in experiment 2, 3 en 4.

- Uit een nul-meting blijkt dat een dijk in 'rust' een ander signaal geeft dan een dijk waar water tegen aangezet wordt en waar erosieprocessen optreden die uiteindelijk leiden tot ondergraving van het dijklichaam.
- Een indicatie dat er iets afwijkends aan de hand is, is zichtbaar vanaf 8 uur voor de werkelijke dijkdoorbraak. Dit is duidelijk zichtbaar in alle elektroden die binnen 10 meter van de zwakke plek staan.

Het Luisterbuis consortium (Landustrie, Volker Wessels Telecom, TNO) hebben in een drainagebuis gemeten aan waterspanning, temperatuur en akoestiek. Daarnaast is de hypothese getoetst of het afvoeren van water met deze buis het pipingproces kan stoppen.

- Het blijkt inderdaad mogelijk om het pipingproces door het afvoeren van relatief geringe hoeveelheden water geheel tot stilstand te brengen. Zelfs als de pipe geheel is doorgebroken kan een aanzienlijke reductie van de snelheid van het pipingproces worden gerealiseerd.
- De waterspanningen en de temperatuur in de buis geven een vergelijkbaar beeld met de sensoren van andere participanten.
- Uit een analyse van de akoestische metingen kon geen correlatie met het pipingproces worden vastgesteld.

Ten Cate / Inventec hebben rek- en temperatuurmetingen gedaan in alle vier de experimenten met optische glasvezels en GeoDetect weefsel waarin eveneens optische glasvezels waren opgenomen

- Het ontstaan van pipes kan met behulp van de temperatuurmetingen worden aangetoond, waarbij piping eerder wordt waargenomen naarmate de kabels dichterbij het niveau waar piping verwacht wordt, namelijk op het zand/klei grensvlak.
- Monitoring van de ruwe temperatuurdata resulteert in een waarschuwing dat er een waterstroming optreedt ongeveer 2 dagen voordat de dijk bezwijkt.
- Analyse van de temperatuurdata met het EDF model vervroegt de detectie tot 2 tot 5 dagen vóór bezwijking doordat het mogelijk is de regressie van het pipingkanaal van de benedenstroomse naar de bovenstroomse kant van de dijk te volgen.
- Rekmeting met alleen een optische kabel levert geen duidelijke informatie op over de locatie van erosiekanalen.
- Rekmeting met stroken GeoDetect® BR laat de locatie van erosiekanalen binnen dezelfde tijdsduur zien als bij meting van temperatuur.

Het bedrijf 2M heeft met zelf ontwikkelde sensoren die werken via capaciteitsmeting deelgenomen aan experiment 4. Dit heeft geen resultaten opgeleverd door technische problemen.

Deltares heeft in alle experimenten een aantal referentiemetingen uitgevoerd bestaand uit visuele inspecties, waterspanningsmetingen (op het zand/klei grensvlak en op 1 en 2 meter diepte) en debietmetingen.

- Met de waterspanningsmetingen kan het pipingproces prima worden gevolgd ook de locatie van de pipes kan redelijk nauwkeurig worden vastgesteld. Interessant daarbij is dat ook met de metingen op 1 en 2 meter diepte het proces nog redelijk kan worden gevolgd. Horizontaal kan het proces eveneens tot op een afstand van circa 2 meter nog redelijk goed worden gevolgd.

6.4 Conclusies met betrekking tot de meetsystemen

De algemene lijn uit de dealexperimenten is dat met de meeste meetsystemen het pipingproces goed kan worden gevolgd.

6.4.1 Waterspanningsmetingen

Op basis van meerdere waterspanningsmeters met in dwarsrichting op de dijk bekende onderlinge afstanden kan het pipingproces worden gevolgd vanaf het ontstaan van de eerste zandmeevoerende wel. Met behulp van FEWS kunnen de waterspanningsmetingen *real time* worden geanalyseerd en kan het proces worden gevolgd. Met de mogelijkheid om op basis van de waterspanningsmetingen ook de pipe-lengte uit te rekenen kan worden geanalyseerd hoe ver het proces inmiddels is gevorderd. Alle waterspanningsmetingen die zijn gedaan, zijn onderling goed vergelijkbaar en geven globaal dezelfde resultaten.

6.4.2 Temperatuur

De temperatuurmetingen die gedaan zijn door diverse partners geven een beeld dat vergelijkbaar is met dat van de waterspanningsmeters. Ook met deze systemen kan het ontstaan van zandmeevoerende wellen worden gedetecteerd en gevolgd. Het werken met infraroodcamera's kan plaatsvinden zonder dat er sensoren in de dijk geplaatst hoeven te worden.

6.4.3 Trillingen en beweging

Trillingen in het laagfrequente spectrum (1 – 10Hz) lijken gecorreleerd te zijn met het pipingproces. Ook zijn er bewegingen gemeten die kunnen wijzen op het ontstaan en groeien van pipes. Beide zaken worden op dit moment nog verder geanalyseerd. Metingen in het hogere spectrum leverden geen duidelijke resultaten op.

6.4.4 Self potentials

De metingen aan self potentials geven duidelijke indicaties dat er 4 tot 8 uur voor de doorbraak significante afwijkingen aan het spontane elektrische veld ontstaan. Dit wordt waargenomen door elektrodes die binnen een afstand van tien meter van de zwakke plek bevinden.

6.4.5 Capaciteit

De capaciteitsmetingen konden door technische problemen niet worden uitgevoerd, waardoor hierover geen conclusies mogelijk zijn.

6.5 Een monitoringssysteem voor het faalmechanisme piping

De resultaten van de pipingexperimenten en daarmee de validatie van de toepasbaarheid van sensoren hiervoor, vormen de basis voor een monitoringssysteem voor dit bezwijkmechanisme. Op basis van een raster van waterspanningsmeters kan het proces goed worden gevolgd. Hetzelfde geldt eigenlijk voor de meeste andere gehanteerde technieken. De indicaties dat er piping optreedt variëren bij deze experimenten van vijf dagen tot 4 uur voor de doorbraak, hetgeen mede afhankelijk is van de gebruikte meettechniek. Voor sommige meettechnieken wordt geclaimd dat verbeterde verwerkingstechnieken het moment waarop een onderbouwde waarschuwing kan worden gegeven vervroegd kan worden, tot aan het begin van pipe-vorming. Het is echter niet duidelijk wat de praktische waarde hiervan is.

Onder 'ideale' omstandigheden, zoals bij deze experimenten, zal het begin van pipe-vorming onder gelijkblijvend verval mogelijk onherroepelijk leiden tot een volledig doorgebroken pipe. Wanneer er geen instortingen plaatsvinden zal dit vervolgens leiden tot het falen van de dijk. Onder normale omstandigheden kan het erosieproces echter stoppen door veranderingen in waterstanden (binnendijs of buitendijs) of door een verhoogde weerstand tegen erosie doordat in de groeiende pipe ander dijkmateriaal wordt bereikt. Ook (nood)maatregelen gericht op onderbreking of verlenging van het (potentiële) erosiekanaal kunnen worden toegepast. Als het gaat om voorspellende waarde zal moeten worden onderzocht wanneer het erosieproces werkelijk onomkeerbaar wordt en of er indicatoren zijn voor deze fase in het erosieproces die door sensoren zijn waar te nemen.

Door een onderlinge vergelijking van functionaliteit en kosten van de verschillende systemen moet worden vastgesteld wat de beste en meest kosteneffectieve manier is om piping te monitoren. Andere overwegingen die daarbij meespelen zijn onder anderen de moeite die het kost om systemen te installeren en de mate waarin met eenzelfde systeem ook andere faalmechanismen zijn te detecteren, zoals macro-instabiliteit of erosie door golfoverslag. Vanuit de optiek van Stichting IJKdijk kan deze meta-analyse het best worden uitgevoerd als alle validatie-experimenten voor de verschillende faalmechanismen zijn afgerond en de gevalideerde technieken in een LiveDijk omgeving zijn gekoppeld aan nieuw te ontwikkelen rekenmodellen, ICT, etc. Dit wordt gezien als essentiële validatiestap naar een nog meer op een praktijksituatie lijkende omgeving.

7 Toekomstblik

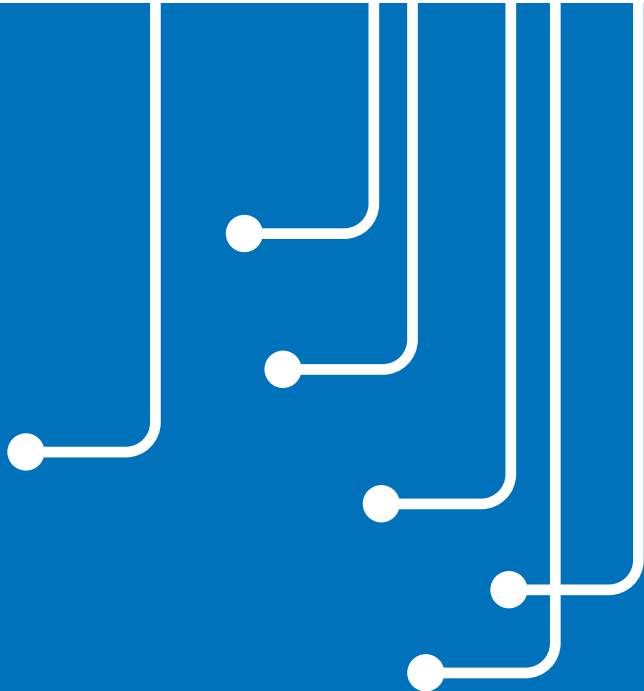
De resultaten van het Pipingexperiment laten zien dat de toegepaste sensoren in een vroegtijdig stadium grondwaterstromingen kunnen waarnemen en de ontwikkeling hiervan kunnen monitoren. De resultaten van het pipingexperiment bieden beheerders zicht op een belangrijk aanvullende instrument waarmee in de toekomst het pipingproces beter kan worden gemonitord.

Dijkmonitoring in de praktijk zal in de toekomst echter vrijwel zeker bestaan uit een combinatie van methoden waarbij visuele inspecties de basis vormen. Het ligt voor de hand om daarbij een getrapte benadering te kiezen door met behulp van remote sensingtechnieken (satelliet, airborne of terrestial) in te zoomen op verdachte plekken en daar, naast visuele inspectie, werken met in situ sensoren (in de dijk). Hierbij speelt de toetsing op veiligheid eveneens een belangrijke rol.

Een monitoringssysteem dat voor waterkeringen geschikt is, dient over een langere periode gegevens te verzamelen om het “normale” gedrag van waterkeringen te leren kennen. Indien het gedrag bij belasting van de kering afwijkt, kan samen met gegevens over bijvoorbeeld waterstanden, weersvoorspelling, verwachte golfbelasting, etc. een voorspelling worden gemaakt van de verwachte ontwikkeling van de actuele sterkte. Hiermee kan de beheerder voor waterkeringen waarvoor deze informatie noodzakelijk is, op tijd maatregelen treffen (versterking, evacuatie (verticaal, horizontaal), inzetten van bergingspolders, etc.) indien de prognoses hiertoe aanleiding geven.

De ontwikkeling van systemen die de actuele sterkte kunnen bepalen samen met prognostische modellen vindt in de komende jaren plaats. Hierbij wordt nauwe samenwerking nagestreefd met beheerders, Flood Control 2015, Urban Flood en FLIWAS, bedrijfsleven en kennisinstellingen. Tevens wordt hierbij aansluiting gerealiseerd bij ontwikkelingen in en bij het vigerend beleid zoals daar zijn onder andere de commissie Veerman/Deltacommissie en (ontwerp) Nationaal Waterplan. LiveDijk projecten waarbij sensorsystemen in de beheerpraktijk van waterbeheerders worden toegepast zullen een belangrijke rol innemen in de voorgestane ontwikkeling. De eerste stappen hierin worden gezet door het Hoogheemraadschap van Delfland in hun Vlaardingse kade en Waterschap Noorderzijlvest in de LiveDijk Eemshaven. De uitdaging in de LiveDijk projecten ligt in het koppelen van dijktechnologie en (nieuw te ontwikkelen) rekenmodellen, ICT en sensortechnologie.

De uit de verschillende LiveDijk projecten verkregen ervaringen en informatie worden opgeslagen in het door Stichting IJkdijk te ontwikkelen Dijk Data Service Centrum (DDSC). Beheerders, maar ook het bedrijfsleven, kunnen met de opgeslagen ervaringen trendanalyses uitvoeren op het gedrag van een dijk, gedragingen van dijken onderling vergelijken en uitspraken doen over de bewezen sterkte van dijken en type dijken. Hiermee wordt het inzicht in het gedrag van dijken vergroot wat bijdraagt aan een vergroting van de veiligheid; een beheerder kan immers, zo wordt verwacht, tijdig op een meer betrouwbare wijze problemen zien aankomen en hier op reageren.



Dankbetuiging

Het Pipingexperiment werd mogelijk met ondersteuning door het Samenwerkingsverband Noord Nederland.

DIT PROJECT WORDT MEDEGEFINANCIERD DOOR HET EUROPEES FONDS VOOR REGIONALE ONTWIKKELING EN DOOR HET MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN, PIEKEN IN DE DELTA.



Ministerie van Economische Zaken



Verder verleende een breed scala aan organisaties hun steun en betrokkenheid. Deze organisaties willen we hiervoor hartelijk bedanken.

Dit project werd mede mogelijk gemaakt door:

- Waterschap Hunze en Aa's
- Staatsbosbeheer
- Rijkswaterstaat, Waterdienst
- Flood Control 2015
- Gemeente Bellingwedde
- Gemeente Oldambt (voorheen Gemeente Reiderland)



Rijkswaterstaat
Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Ook bedanken we alle betrokkenen bij de inhoudelijk uitvoering van het project:

- Rijkswaterstaat Waterdienst, Programma Sterkte & Belastingen Waterkeringen
- De partners die de Stichting IJkdijk vormen:

- TNO
- Deltares
- NV NOM
- STOWA
- Stichting IDL
- Alert Solutions BV
- Intech Dike Security Systems
- DikeSurvey VOF
- ITC Enschede
- GTC Kappelmeyer GmbH
- Fugro
- Luisterbuis-consortium
(bestaande uit TNO, Landustrie Sneek BV en Volker Wessels Telecom Infra BV)
- Inventec BV/Ten Cate
- 2M Sensors



STICHTING
TOEGEPAST ONDERZOEK WATERBEHEER



Stichting
IJkdijk

Tenslotte gaat onze hartelijke dank uit naar de omwonenden van de IJkdijk-locatie.

