



Rijkswaterstaat  
*Ministerie van Verkeer en Waterstaat*

# Macrostabieliteit IJkdijk: Sensor- en meettechnologie

Water. Wegen. Werken. Rijkswaterstaat.

## **Macrostabiliteit IJkdijk: Sensor- en meettechnologie**

Samenwerking tussen Rijkswaterstaat, Stichting IJkdijk en Bedrijfsleven

Datum 1 september 2009  
Status Afgerond  
ISBN: 978.90.5773.432.8  
VIW: 2009-19

Resultaten Macrostabiliteitsexperiment 2008  
Sensor- en meettechnologie in de IJkdijk

Eindredactie: ir. J. Weijers, RWS Waterdienst; G.T. Elbersen, RWS Dienst Verkeer en Scheepvaart; dr. ir. A.R. Koelewijn, Deltares; dr. N. Pals, TNO

## Inhoud

### Voorwoord 8

### Samenvatting 10

### Summary 12

#### 1. Inleiding 15

- 1.1 Doelstelling 15
- 1.2 Afbakening en uitgangspunten 16
- 1.3 Het faalmechanisme macrostabiliteit 16

#### 2. Beoordelingskader meetsystemen 19

- 2.1 Inleiding 19
- 2.2 Waarom meten? 19
- 2.3 Wat meten? 20
- 2.4 Waar meten? 20
- 2.5 Wanneer meten? 20
- 2.6 In welke mate meten? 20
- 2.7 Beoordelingskader 20
- 2.8 Verdere overwegingen 21

#### 3. Het macrostabiliteitsexperiment 23

- 3.1 Opzet van het macrostabiliteitsexperiment 23
- 3.2 Ontwerp van de Stabiliteitsdijk 23
- 3.3 De bouw van de macrostabiliteitsdijk 28
- 3.4 Deltares referentiemonitoring 31
- 3.5 ICT-Infrastructuur (TNO) 31
- 3.6 Afstemming met beheerpraktijk 34

#### 4. Uitvoering van het experiment 35

- 4.1 Geplande uitvoering 35
- 4.2 Vertaling van de proeffasen naar de praktijk 37
- 4.3 Daadwerkelijke uitvoering 38
- 4.4 Afwijkingen en onverwachte gebeurtenissen 43

#### 5. Resultaten van de deelexperimenten 47

- 5.1 Deelexperiment Alert Solutions: GeoBeads 47
- 5.2 Deelexperiment Intech: Thermografische metingen 49
- 5.3 Deelexperiment Dike Survey: Optische detectie in de IJkdijk 49
- 5.4 Deelexperiment Flood Control 2015: Robuuste Sensornetwerken 49
- 5.5 Deelexperiment GTC Kappelmeyer: Vezeloptische temperatuurmetingen 49
- 5.6 Deelexperiment Hansje Brinker: Vormverandering: terrestrische laserscanning 49
- 5.7 Deelexperiment Koenders Industrie: Slimme Dijkmonitoringsysteem 49
- 5.8 Deelexperiment Luisterbuis VWT / Landustrie / TNO 49
- 5.9 Deelexperiment RPS-BCC / IFCO: IS-Systeem en de IJkdijk 49
- 5.10 Deelexperiment Inventec B.V. / Ten Cate 49
- 5.11 Referentiemonitoring Deltares 49

<b>6. Conclusies en discussie</b>	<b>49</b>
6.1 Conclusies per gemeten parameter	49
6.2 Discussiepunten	49
6.3 Overall conclusies	49
<b>7. Toekomstblik</b>	<b>49</b>
<b>Dankbetuiging</b>	<b>49</b>

Eén foto zegt meer dan 1000 woorden...



De IJkdijk intact



De doorgebroken IJkdijk

## Voorwoord

... en twee foto's zeggen meer dan tweeduizend woorden.

Daarom kan ons voorwoord kort zijn.

In 2008 is door Stichting IJkdijk en Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart - Innovatie Test Centrum, een stabiele dijk gebouwd. Een dijk om speciaal en onder gecontroleerde omstandigheden weer te laten bezwijken volgens het mechanisme *macroinstabiliteit*.

Hierbij is door 13 verschillende bedrijven een grote verscheidenheid innovatieve meet- en waarnemingsmethoden ingezet, om alle gebeurtenissen in en om de dijk vast te leggen.

Op de foto's is te zien dat het bezwijken gelukt is. Maar ook het monitoren van wat er voor en tijdens dat bezwijken in de dijk plaats vond is goed gelukt; de sensor- en meetapparatuur hebben veel bruikbare data opgeleverd.

Na de proef is begonnen met het bewerken en interpreteren van de data. De tussenresultaten werden in december 2008 gepresenteerd in het LEF Future Center van Rijkswaterstaat in Utrecht tijdens het congres "Dijkinspectie: later is allang begonnen".

Voor u ligt nu het eindrapport van het Macrostabiliteitsexperiment, met daarin conclusies en aanbevelingen. Deze kunnen al op korte termijn leiden tot handvatten voor de toepassing van de technologie in en om dijken en kades.

Om uiteindelijk te komen tot een algemeen toepasbaar monitoringssysteem voor waterkeringen, zijn nog meer validatie-experimenten (zoals het macrostabiliteitsexperiment) noodzakelijk. Ook is een koppeling aan een analysesysteem/rekentehniek noodzakelijk om een predictie van de stabiliteit op basis van de meetdata te realiseren. Om dit te realiseren is een samenwerking tussen kennisinstituten, overheid en bedrijfsleven van groot belang, zoals tot uitdrukking is gekomen in de samenwerkingsovereenkomst tussen het Rijkswaterstaat Innovatie Test Centrum en de Stichting IJkdijk.

Dit rapport vormt de weergave van de resultaten van deze zeer goed verlopen samenwerking en vormt de start van de ontwikkeling van een algemeen toepasbaar monitoringssysteem: de ontwikkeling van "de dijk van de toekomst".

Wij gaan ervan uit dat u, net als wij, met veel genoegen het behaalde resultaat bestudeert en wensen de hier beproefde technologie een goede toekomst toe.

drs. G.J.A. Al  
Hoofdingenieur-Directeur Rijkswaterstaat  
Dienst Verkeer en Scheepvaart

ir. H. van 't Land  
Voorzitter Stichting IJkdijk

## **Samenvatting**

In de tweede helft van 2008 is door Stichting IJkdijk en Rijkswaterstaat Innovatie Test Centrum, ressorterend onder de Dienst Verkeer en Scheepvaart, het macrostabiliteitsexperiment uitgevoerd. Dit validatie-experiment vormt de eerste stap voor de verwezenlijking van de doelstellingen van Stichting IJkdijk.

De doelstelling van Stichting IJkdijk valt samen te vatten als het ontwikkelen van bouwstenen voor een algemeen toepasbaar monitoringssysteem voor waterkeringen dat inzicht geeft in de actuele sterkte van waterkeringen en ontwikkelingen hierin. Hiervoor is het testen van sensoren en het ontwikkelen van daaraan gekoppelde modellen die inzicht geven in de actuele en verwachte sterkten van belang.

Het doel van het macrostabiliteitsexperiment is het bepalen of gebruik van meet- en sensortechnieken een aanvulling vormt op de reguliere visuele inspectie voor het tijdig detecteren van grootschalige (in de dijk en de ondergrond) stabiliteitsproblemen van waterkeringen. Hiervoor is een Stabiliteitsdijk gebouwd en uitgerust met een grote verscheidenheid aan meetapparatuur. De Stabiliteitsdijk is vervolgens gecontroleerd tot bezwijken gebracht waarbij de geïnstalleerde meetapparatuur de optredende processen in en aan de dijk heeft gemeten.

Uit de analyse van de meetresultaten is geconcludeerd dat beweging en deformatie van de dijk parameters zijn die reeds voor het bezwijken van de dijk al indicatief zijn voor zwakke plekken. Deformatie trad reeds 42 uur voor het uiteindelijke bezwijken op, en was ook gelokaliseerd op de plek van het uiteindelijke bezwijken. De overige gemeten parameters lijken voor macrostabiliteit een indicatie te hebben gegeven van de optredende ontwikkelingen die hebben geleid tot het bezwijken van de dijk.

De resultaten van het gehele macrostabiliteitsexperiment laten zien dat de toegepaste sensoren elkaar ondersteunen in de metingen naar het vroegtijdig optreden van verzakking van de dijk. Hoewel de resultaten erg hoopvol zijn, moet wel worden bedacht dat de metingen zijn uitgevoerd aan een dijk onder gecontroleerde omstandigheden die op een afgesproken manier tot bezwijken is gebracht. Het bezwijken is daarbij in een hoog tempo geforceerd. Deze snelheid heeft in ieder geval twee gevolgen. De meetresultaten waren goed uit de ruis te halen omdat ze in korte tijd grote effecten lieten zien. Bovendien is het waarschijnlijk dat de voorspellende waarde mogelijk wordt onderschat. De processen lopen in normale dijken langzamer dan bij de IJkdijk is gerealiseerd. Met dit in het achterhoofd kan toch worden geconcludeerd dat een aantal sensorsystemen verrassend goed hebben gepresteerd en in voorkomende gevallen een aanvulling kunnen vormen op visuele inspecties.

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 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. Pilotprojecten waarbij sensorsystemen in de beheerpraktijk van waterbeheerders worden toegepast zullen een belangrijke rol innemen in de voorgestane ontwikkeling.

De ontwikkeling van dergelijke systemen kan niet worden gebaseerd op het macrostabiliteitsexperiment alleen. Het zal gepaard moeten gaan met verdergaande validatie van sensortechnologie voor alle faalmechanismen met daarbij ook een koppeling met rekenmodellen. Het doel is om uiteindelijk een voor alle type waterkeringen algemeen toepasbaar monitorings- en prognosesysteem te ontwikkelen. Hierbij dient de kennis die wordt opgedaan te worden gebruikt van projecten zoals LiveDijk (digitaal gemonitorde, gediagnosticeerde/geprognoseerde sterkte van dijken) die op korte termijn worden gerealiseerd.

In Nederland wordt het merendeel van de bouwwerkzaamheden aan dijken uitgevoerd in het kader van dijkversterkingen. Er is relatief weinig nieuwbouw. De vraag dient zich al gauw aan of alle waterkeringen in Nederland uitgerust zouden moeten worden met een monitoringssysteem. Het antwoord hierop is voorlopig in ieder geval niet. De meetsystemen die zijn beproefd zijn mogelijk deels niet te installeren in een bestaande dijk, terwijl de criteria waarbinnen de meetdata als veilig kunnen worden beschouwd ook nog niet helder zijn. De meeste waterkeringen voldoen voor het merendeel van de faalmechanismen aan de gestelde normen. Aanvullende informatie is in dit geval dan niet nodig. Er zijn echter keringen en omstandigheden die wel vragen om aanvullende monitoring. Juist voor deze locaties kunnen monitoringssystemen van grote aanvullende waarde zijn op traditionele inspectietechnieken,

=====  
De Stichting IJkdijk wordt gevormd door TNO, Deltares, NOM, STOWA en IDL. De deelnemende partijen aan het macrostabiliteitsexperiment zijn Rijkswaterstaat Innovatie Test Centrum van de Dienst Verkeer en Scheepvaart, Alert Solutions BV, Intech Dike Security Systems, DikeSurvey VOF, het Flood Control 2015-consortium (waaronder IBM Nederland), GTC Kappelmeijer GMBH, Hansje Brinker Dijkmonitoring, Koenders Instruments BV, het Luisterbuis-consortium (bestaande uit TNO, Landustrie Sneek BV en Volker Wessels Telecom Infra BV), RPS-BCC BV/IFCO en Inventec BV/Ten Cate.



## Summary

The macro-stability experiment was carried out in the second half of 2008 by the IJkdijk Foundation and the RWS Innovation Test Centre of the Centre for Transport and Navigation. This validation experiment is the first step in the realisation of the IJkdijk Foundation's objectives.

The aim of the IJkdijk Foundation is the development of building blocks for a generally-applicable monitoring system for water-retaining structures that gives insight into the current strength of, and developments in, these structures. The testing of sensors and development of the related calculation models for dike stability are important steps in obtaining information about current and expected strengths.

The aim of the macro-stability experiment is to determine whether the use of measuring and sensor technologies supplements standard visual inspections to enable the timely detection of large-scale stability problems in water-retaining structures (in both the dike and subsoil). To this end, a so-called 'Stability Dike' was built and equipped with a wide range of measuring equipment. The Stability Dike was subsequently brought to the stage of collapse, under controlled conditions, while the equipment measured the processes taking place inside and on the dike.

Analysis of the results measured led to the conclusion that movement and deformation of the dike are parameters that are already indicative of weak spots in the dike before it collapses. Deformation took place as early as 42 hours prior to the ultimate collapse, and was also located at the site where the collapse occurred. The other parameters measured seemed to give an indication of developments in terms of macro-stability taking place that led to the collapse of the dike.

The results of the macro-stability experiment as a whole show that the sensors used support one another in terms of measuring subsiding of the dike at an early stage. Although the results are very promising, it must be borne in mind that these measurements were taken in a dike that was brought to a state of collapse under controlled conditions in an agreed manner. The collapse of the dike was induced at a rapid tempo. This speed had at least two consequences. The measurement results could easily be distinguished from the noise as they showed substantial effects in a short time. More over, it is probable that the predictive value of the measurements was underestimated. In reality the processes are slower than those realised in the IJkdijk experiment so the actual lead-time may be longer than what was observed. Even bearing this in mind, it can be concluded that a number of sensor systems performed surprisingly well and could be used to supplement visual inspections.

The development of systems that, together with forecasting models, can determine current strengths, will take place in the coming years. To this end IJkdijk Foundation cooperates with RWS, the Flood Control 2015 program, the Flood Information and Warning System (FLIWAS), the business community and knowledge institutes. Links are also being realised with developments relating to current policy such as the Veerman/Delta Committee and (draft) National Water Plan. Pilot projects in which sensor systems are used in the daily practice of management of water-retaining structures will play an important role in the envisaged developments.

The development of such systems cannot be based on the macro-stability experiment alone. It will have to be accompanied by more far-reaching validation of sensor technology for all the relevant failure mechanisms involved, along with links to calculation models. The objective is ultimately to develop a generally-applicable monitoring and forecasting system that can be used for all types of water-retaining structures. The knowledge acquired from projects such as LiveDijk (digitally monitored, diagnosed/forecasted strengths of dikes) that are being realised in the short term, is to be used here.

In the Netherlands, the bulk of the construction activities carried out on dikes concerns improvements. There is relatively little new construction. The question will soon arise as to whether all water-retaining structures in the Netherlands should be equipped with a monitoring system. For the moment at least, the answer to this question is, 'No'. Most water-retaining structures meet the standards laid down for the majority of failure mechanisms. In this case, additional information is not necessary. There are, however, water-retaining structures and conditions that do require supplementary monitoring. Monitoring systems may be a very useful supplement to traditional inspection techniques for these cases in particular.

=====  
The IJkdijk Foundation is made up of the Dutch Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Deltares, the Investment and Development Company for the North Netherlands (NOM), Foundation for Applied Water Research (STOWA) and IDL Sensor Solutions. The parties participating in the macro-stability experiment are RWS Innovation Test Centre of the Centre for Transport and Navigation, Alert Solutions BV, Intech Dike Security Systems, DikeSurvey VOF, the Flood Control 2015 consortium (including IBM Nederland), GTC Kappelmeijer GmbH, Hansje Brinker Dijkmonitoring, Koenders Instruments BV, the Luisterbuis consortium (comprising TNO, Landustrie Sneek BV and Volker Wessels Telecom Infra BV), RPS-BCC BV/IFCO and Inventec BV/Ten Cate.



## **1. Inleiding**

Dit document bevat een beschrijving van het macrostabiliteitsexperiment dat in het kader van de IJkdijk is uitgevoerd in het najaar van 2008, 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 Innovatie Test Centrum, ressorterend onder de Dienst Verkeer en Scheepvaart.

In hoofdstuk 1 wordt kort het doel van het macrostabiliteitsexperiment en het betreffende faalmechanisme besproken. Hoofdstuk 2 gaat in op het beoordelingskader voor de meetsystemen. In hoofdstuk 3 worden de opzet van het experiment en het ontwerp van de stabiliteitsdijk beschreven. Hoofdstuk 4 behandelt de uitvoering van het experiment. In hoofdstuk 5 worden de deelexperimenten van de deelnemende bedrijven besproken, inclusief de belangrijkste meetresultaten. Ook de referentiemonitoring komt hierin aan de orde. Vervolgens worden in hoofdstuk 6 de conclusies gepresenteerd, samen met enige discussiepunten en aanbevelingen en vindt in hoofdstuk 7 een doorkijk naar de toekomst plaats. Tenslotte volgt een dankbetuiging aan allen die het macrostabiliteitsexperiment mogelijk hebben gemaakt.

### 1.1 Doelstelling

De doelstelling van Stichting IJkdijk is het ontwikkelen van bouwstenen voor een realtime monitoring systeem dat algemeen toepasbaar is voor waterkeringen en inzicht geeft in de actuele sterkte en ontwikkelingen hierin van waterkeringen. 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 over de ontwikkeling van de sterkte.

De eerste stap die hiervoor door Stichting IJkdijk en partners is gezet is de realisatie van het macrostabiliteitsexperiment. Het experiment is gericht, zo zegt het al, op het faalmechanisme macrostabiliteit.

Het doel van het macrostabiliteitsexperiment is na te gaan of gebruik van meet- en sensortechnieken een aanvulling vormt op de reguliere visuele inspectie voor het tijdig detecteren van grootschalige stabiliteitsproblemen van waterkeringen. Met grootschalig wordt bedoeld dat zowel in het dijklichaam als in de ondergrond bezwijken optreedt.

Het aanleggen, belasten en laten bezwijken van de Stabiliteitsdijk geeft aan de betrokkenen de gelegenheid diverse soorten meetapparatuur uit te testen. De betrokkenen hebben ieder de specifieke bedrijfsrelevante experimenten opgezet, waarbij zij in de stabiliteitsdijk de gelegenheid krijgen de deelexperimenten uit te voeren. Hierbij is het belangrijk dat de experimenten leiden tot de ontwikkeling van een monitoringssysteem voor waterkeringen dat toepasbaar is in de beheerpraktijk.

### 1.2 Afbakening en uitgangspunten

De primaire afbakening van dit project binnen de IJkdijk is het faalmechanisme macrostabiliteit. Daarnaast is het macrostabiliteitsexperiment duidelijk begrensd in de tijd door de planning van het experiment. Het aangelegde dijkvak wordt aangezet tot bezwijken, hetgeen het einde van het experiment markeert. De deelnemers die gebruikmaken van de Stabiliteitsdijk voor hun experimenten worden aangezet om zich te richten op de vraagkant van het waterkeringbeheer, zijnde de kant van waterschappen en Rijkswaterstaat. Dit uitgangspunt wordt gehanteerd om de waarde van de Stabiliteitsdijk voor de ontwikkeling van een bruikbaar monitoringstool voor waterbeheerders te vergroten.

#### **1.2.1 Definitie geslaagde proef**

Het doel van de proef is na te gaan in hoeverre met moderne meet- en sensortechnieken het faalmechanisme macroinstabiliteit binnenwaarts vroegtijdig kan worden gedetecteerd en daarmee een aanvulling kan vormen op visuele inspecties. Voorwaarde hierbij is dat de testdijk bezwijkt volgens het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts. Het opwekken van het faalmechanisme kent vele onzekerheden. Deze onzekerheden zijn globaal weergegeven in de volgende paragraaf en meer specifiek in het complete projectplan macrostabiliteitsexperiment.

Bij een geslaagde proef is een afschuiving opgetreden volgens een glijvlak dat zowel door het dijklichaam als door de ondergrond loopt. Als het opgetreden glijvlak alleen door het dijklichaam verloopt, is het bezwijkmechanisme macrostabiliteit niet opgetreden en daarmee is de proef als zodanig niet geslaagd. De grootte van de vervormingen die optreden bij het afschuiven bepalen het succes van de proef. Bij kleine vervormingen kan niet gesteld worden dat bezwijken van het dijklichaam is opgetreden. Voor de proef was gesteld dat macro-instabiliteit is opgetreden indien ergens langs het glijvlak de vervormingen minimaal 20 cm zijn.

#### **1.2.2 Potentiële risico's**

Het opwekken van het faalmechanisme macrostabiliteit kent vele onzekerheden. Het ontwerp en de uitvoering van de proeven was dan ook zodanig dat deze risico's werden geminimaliseerd. De volgende onzekerheden waren onderkend:

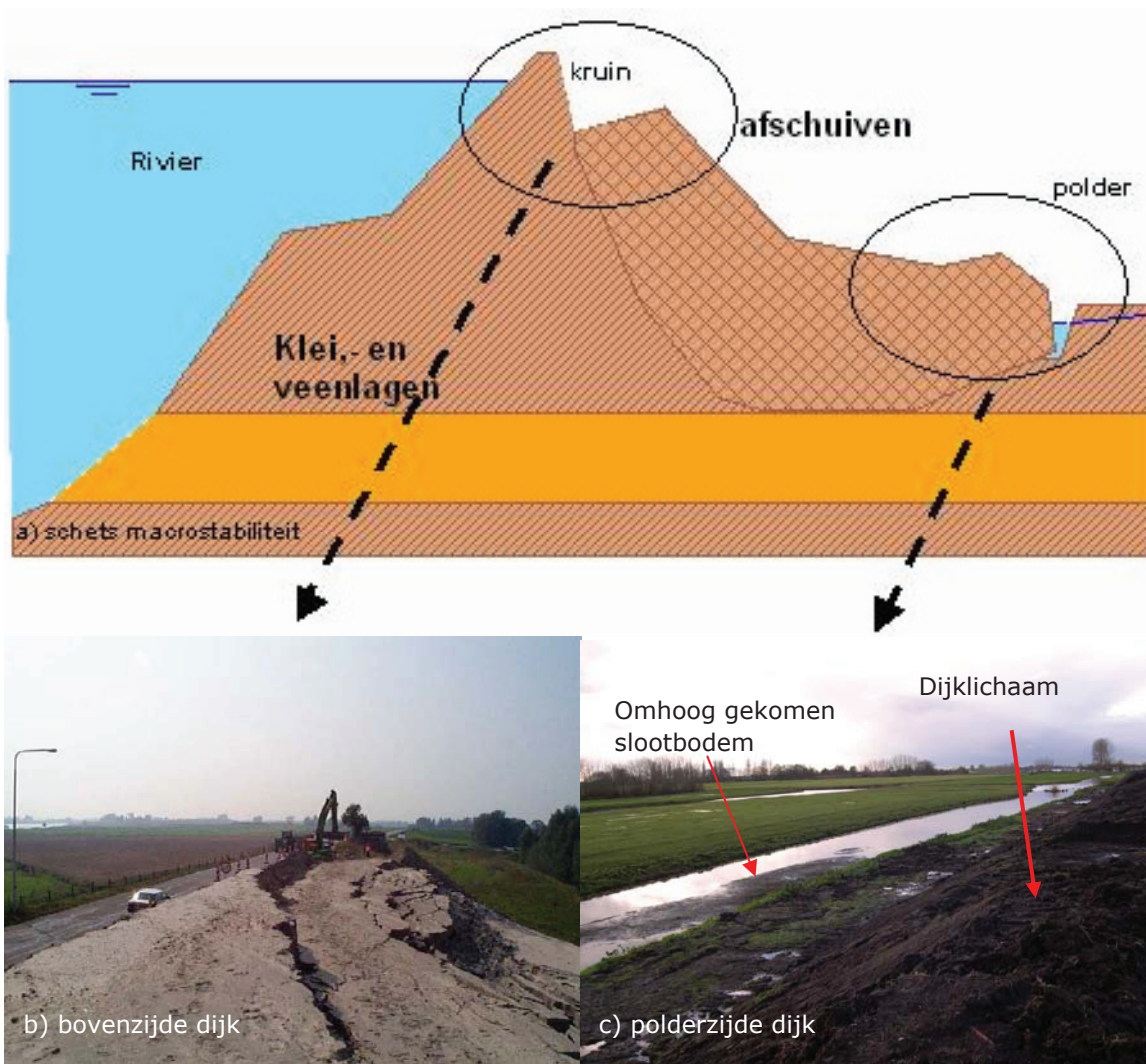
- Het optreden van een ander bezwijkmechanisme dan macrostabiliteit
- Het optreden van buitenwaartse instabiliteit in plaats van de binnenwaartse instabiliteit.
- Geen bezwijken tijdens het uitvoeren van de proef
- Het bezwijken van de berm / slootrand in plaats van het dijklichaam
- Het vroegtijdig bezwijken, voor aanvang van de proef, van het dijklichaam

In het ontwerp en uitvoering van de proef is getracht deze onzekerheden zoveel mogelijk uit te sluiten.

### 1.3 Het faalmechanisme macrostabiliteit

Bij het faalmechanisme macrostabiliteit is sprake van een grootschalig stabiliteitsprobleem. Hierbij bezwijkt niet alleen het dijklichaam, maar ook de grondlagen onder de dijk. Figuur 1.1 laat dit faalmechanismen in drie afbeeldingen zien.

De moot grond die bij macro-instabiliteit in beweging komt kan worden vereenvoudigd tot een cirkelvormige moot grond. Op de kruin van de dijk, de bovenzijde van de cirkelvormige moot grond ontstaat een diepe scheur. Aan de polderzijde van deze scheur verzakt de kruin. Tegelijkertijd zal er aan de onderzijde van de cirkelvormige moot grond vervorming waarneembaar zijn. Indien aan de polderzijde van de dijk een bermsloot aanwezig is, zal deze dicht worden gedrukt of zal de slootbodem omhoog komen. Indien er geen bermsloot aanwezig is zal het maaiveld worden opgedrukt. Figuur 1.1b en 1.1c laten foto's zien van opgetreden schadegevallen.



Figuur 1.1 Het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts schematische weergave; b) vervormingen aan de bovenzijde van de dijk; c) vervormingen aan de polderzijde van de dijk



## 2. Beoordelingskader meetsystemen

### 2.1 Inleiding

Voor de beoordeling van de 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 stakeholder(s).

Voor deze rapportage is gekozen voor: '*de relevantie voor een Nederlandse dijkbeheerder* (Rijkswaterstaat, Waterschap of Hoogheemraadschap)'.

Andere uitgangspunten waarbij meer aandacht wordt geschonken aan bijvoorbeeld exportmogelijkheden, bedrijfseconomische aspecten of instrumenttechnische onderdelen leiden ten dele tot andere vragen, die buiten het hier gekozen kader vallen.

Voor het hier geschetste kader is gebruik gemaakt van de 'HerMes monitoringsfilosofie', die rond de eeuwwisseling in enkele proefprojecten ontwikkeld is door GeoDelft en TNO Bouw en sindsdien met succes toegepast. Hierin staat de beantwoording centraal van de vragen waarom, wat, waar, wanneer en in welke mate meten. Voor dit beoordelingskader is een aangepaste versie gemaakt, omdat het hier 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 beheerderspraktijk, via de Klankbordgroep Dijkinspecties van de STOWA.

### 2.2 Waarom meten?

Bedacht moet worden dat meten geen doel op zich is. Het is 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 een meetresultaat 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 niet aan de hand? Het beantwoorden van deze vraag wordt vaak op rekenmodelresultaten gebaseerd. Daarom is de koppeling aan rekentechnieken van belang. Ieder instrument dat wordt ingezet zal daarom moeten bijdragen aan het beantwoorden van tenminste één monitoringsvraag. Als de meting geen vraag kan beantwoorden, dan is deze zinloos en kan het instrument beter achterwege worden gelaten. 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.

Een experiment als de macrostabiliteitsproef is ongebruikelijk, maar ook daarbij geldt dat elk instrument aanvullende waarde moet hebben en een monitoringsvraag moet beantwoorden.



### 2.3 Wat meten?

Metingen zouden kennis moeten opleveren over maatgevende faalmechanismen en eventueel over andere zaken die voor het beheer en onderhoud relevant zijn. Kennis over maatgevende faalmechanismen kan overigens ook verkregen worden wanneer dit falen helemaal niet aan de orde is, zo kunnen metingen van de fluctuaties in de grondwaterstand in de loop van het jaar, onder gebruikelijke omstandigheden, in veel gevallen zinvolle informatie geven over de grondwaterstand waar bij maatgevende omstandigheden op gerekend moet worden zodat er bij de toetsing een kleinere onzekerheidsmarge kan worden aangehouden, wat soms sterk van invloed is op het berekende veiligheidsniveau.

### 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 bijvoorbeeld: zandbanen in de ondergrond, te verwachten faalmechanismen of een wiel ter plaatse van een voormalige dijkdoorbraak.

### 2.5 Wanneer meten?

Met welke frequente 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 (overigens leidt het beantwoorden van deze vragen vaak tot aanpassing van het monitorings- en instrumentatieplan).

### 2.6 In welke mate meten?

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. Ook is het mogelijk om dezelfde grootte met verschillende methoden te meten. Toepassen van redundantie vergroot de betrouwbaarheid, al wordt het hierdoor ook mogelijk dat verschillen worden gemeten die moeilijk te verklaren zijn.

### 2.7 Beoordelingskader

Concreet moeten voor elk instrument, of groep van instrumenten, de volgende vragen beantwoord zien te 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 discrepanties 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?

- o Was dit een goede plaats, of (eventueel met de achteraf beschikbare wijsheid) was een andere locatie beter geweest?
- Wanneer is gemeten?
  - o Wanneer is begonnen, wanneer gestopt?
    - Is er een betrouwbare nulmeting?
    - Is er lang genoeg doorgemeten?
  - o Met welke frequentie is er gemeten?
    - Was dit voldoende of eigenlijk zelfs teveel, leidend tot een irrelevante stroom van data
    - Zijn er mogelijkheden gezien om de frequentie aan te passen aan de meetwaarden?
- In welke mate is er gemeten?
  - o Is dezelfde meting met verschillende methoden uitgevoerd?
  - o In hoeverre zijn metingen meervoudig uitgevoerd?
    - Was dat in het licht van potentiële uitval of onnauwkeurigheid van instrumenten terecht?
  - o In hoeverre zijn instrumenten daadwerkelijk uitgevallen?
    - Wanneer is dat gebeurd?
    - Is daardoor essentiële informatie gemist?

Voor de omvang van deze rapportage zou het te ver voeren om dit expliciet te rapporteren. Dit is dan ook achterwege gelaten, maar het kan geen kwaad om deze vragen al lezend in het achterhoofd te houden.

### 2.8 Verdere overwegingen

Voor monitoring is het verder van belang in hoeverre de data verwerkt kan worden en hoe snel dat kan gebeuren, opdat er tijdig relevante beslissingen kunnen worden genomen. In hoeverre is het mogelijk om de metingen *realtime* te verwerken?

Bij vergelijking van metingen met andere metingen is het zinvol onderscheid te maken tussen de referentiemonitoring en data van derden. Dit onderscheid is ten eerste zinvol omdat de referentiedata een openbaar karakter heeft en daarom door een ieder gebruikt en gepubliceerd mag worden, terwijl data van derden volgens de geldende contractvoorwaarden alleen met instemming van de betreffende participant openbaar gemaakt mag worden. Ten tweede is de referentiedata verkregen met instrumenten die zich al eerder bewezen hebben en waarvan de betrouwbaarheid bekend is, terwijl dat voor de andere data niet vanzelfsprekend het geval is (in meerdere gevallen overigens wel).

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 gewone praktijksituatie voorgestaan wordt bij een bestaande dijk, bij een grootschalige dijkversterking en bij een nieuwe dijk. In hoeverre kan de andere wijze van aanbrengen van invloed zijn geweest op de metingen en hoe realistisch is de voorgestelde wijze van aanbrengen?



### 3. Het macrostabiliteitsexperiment

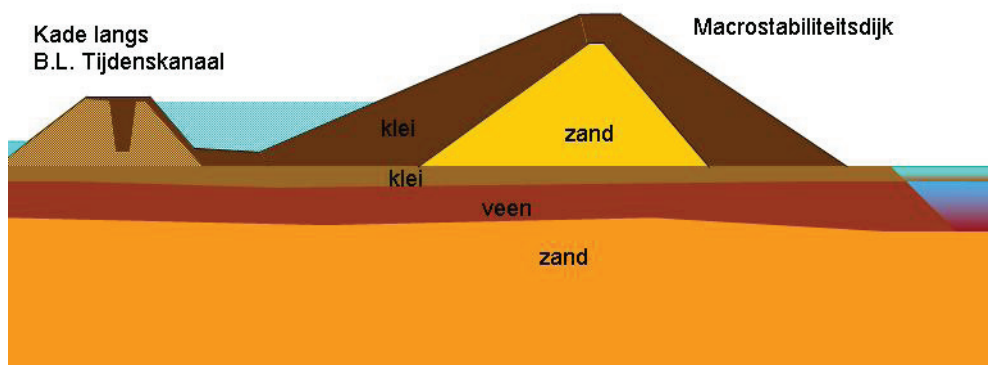
#### 3.1 Opzet van het macrostabiliteitsexperiment

Om de experimenten op het gebied van het faalmechanisme macrostabiliteit uit te voeren is de zogenaamde stabiliteitsdijk aangelegd. De Stichting IJkdijk was verantwoordelijk voor de realisatie van het experiment. De verschillende deelnemende partners in de Stichting hebben de deelontwerpen uitgevoerd die horen bij hun expertisegebied. Het dijkontwerp en de opzet van het gehele experiment zijn uitgewerkt door Deltares. De ICT infrastructuur is ontwikkeld door TNO-ICT. De STOWA was verantwoordelijk voor de afstemming van het experiment en de resultaten met de beheerpraktijk van de waterschappen en Rijkswaterstaat. Er zijn verschillende soorten *in-situ* meettechnieken getest. De afzonderlijke meettechnieken worden echter in hoofdstuk 5 beschreven. In dit hoofdstuk volgt een globale beschrijving van het ontwerp en de bouw van de Stabiliteitsdijk.

#### 3.2 Ontwerp van de Stabiliteitsdijk

##### **3.2.1 Voorlopig ontwerp en tussentijdse veldproef**

Van april 2006 tot aan het najaar van 2007 is met enige onderbrekingen gewerkt aan het voorlopig ontwerp van de stabiliteitsdijk. Dit is getoond in figuur 3.1: een 7 meter hoge dijk met een kern van zand en een bekleding van klei, die na constructie tot bezwijken gebracht kon worden door het in fasen uitgraven van een bermsloot tot op de Pleistocene zandlaag, het leegpompen van die sloot en het vullen van de zandkern met water.



Figuur 3.1 Voorlopig ontwerp stabiliteitsdijk (november 2007)

Bij de risicoanalyse van dit voorlopige ontwerp kwamen enkele onzekerheden nadrukkelijk naar voren. De belangrijkste hiervan waren de sterkte-eigenschappen en de doorlatendheid van de veenlaag in de ondergrond. Uit het laboratoriumonderzoek op monsters uit de desbetreffende veenlaag kwam een (verticale) doorlatendheid van  $1,7 \times 10^{-10}$  m/s, wat ongebruikelijk laag is. Verder werd uit triaxiaalproeven een cohesie gevonden van 12 kPa, bij een effectieve inwendige wrijvingshoek van 31 graden. Dit wijst op een betrekkelijk stevig materiaal. Waarnemingen in het veld (wegzakken van materieel en mensen) gaven echter aan dat de doorlatendheid betrekkelijk groot moest zijn en de sterkte juist laag.

Hierbij moet worden opgemerkt dat het ontwerp van een proefdijk, met name voor het faalmechanisme macro-instabiliteit, een grote tegenstrijdigheid kent. De dijk moet namelijk tot bezwijken worden gebracht door een afschuiving met een glijvlak dat mede door het slappe-lagenpakket in de ondergrond gaat. Maar voordat het zover is, moet dezelfde dijk eerst worden gebouwd. Een veilige benadering bij de bouw van de dijk – accepteren dat de dijk en/of de ondergrond eventueel sterker zijn dan het uitgangspunt van het ontwerp – leidt tot een ‘onveilige’ benadering voor de eigenlijke proef. Dan móet de dijk immers onderuit gaan, waarbij een onverhoopt hogere sterkte er juist toe kan leiden dat bezwijken niet optreedt en de proef dus mislukt.

De consequenties van de onzekerheden over de veenlaag leidden tot het volgende probleem: een onverhoopt lage sterkte in combinatie met de gevonden waarde voor doorlatendheid zou betekenen dat de dijk in meerdere fasen gebouwd moest worden vanwege de opbouw van wateroverspanningen in de ondergrond. Bezwijken zou dan vrij makkelijk zijn te realiseren – als dat al niet te vroeg zou optreden. De interpretatie van de meetresultaten zou echter wel vrij lastig kunnen worden. Aan de andere kant zou de gevonden sterkte in combinatie met een meer gebruikelijke doorlatendheidswaarde (zeker tien tot honderd keer zo groot) nopen tot een zo snel mogelijke bouw, direct gevolgd door de proefneming, waarbij het nog maar de vraag zou zijn of een bezwijksituatie gerealiseerd kon worden met de ter beschikking staande middelen.

Om dit probleem op te lossen is besloten om een kleinere veldproef uit te voeren, waaruit meer zekerheid zou volgen over het gedrag van het veen op grotere schaal.

Om te voorkomen dat deze kleinere proef de stabiliteitsproef zou beïnvloeden, is een locatie gezocht op enige afstand van de bouwlocatie van de grote dijk. In december 2007 is hier een tiental traditionele waterspanningsmeters geplaatst. Begin januari 2008 zijn hier bovendien een zettingsmeetslang en twee exemplaren van een nieuw type hellingmeetbuis – gebruikmakend van MEMS – geplaatst: één verticaal (zoals gebruikelijk) om horizontale verplaatsingen te meten, en één horizontaal om verticale verplaatsingen te meten. Vervolgens zijn acht containers geplaatst in twee rijen van vier. Deze containers zijn gevuld met water, waarna een week lang het consolidatieverloop is gemeten. Al vrij snel was de buis van de zettingsmeetslang te veel vervormd om hiermee nog metingen te kunnen verrichten. Het nieuwe systeem daarentegen functioneerde vlekkeloos en mat 30 tot 100 millimeter zetting. Vervolgens zijn de containers geleegd, waarbij deze weer voor ongeveer de helft terugveerden.

Daarna begon de eigenlijke bezwijkproef. Vlak voor één van de rijen containers is daartoe een bijna 3 meter diepe greppel gegraven tot aan de bovenkant van de dieper gelegen veenlaag. Aanvankelijk was het de bedoeling om tot aan de daaronder gelegen zandlaag te graven, maar daar is van afgezien toen de graafmachine dreigde weg te zakken – een indicatie dat de sterkte van de ondergrond inderdaad tegenviel.

Daarna zijn de containers opnieuw tot aan de rand toe gevuld. Aanvankelijk gebeurde er niets, maar na een half uur braken kleine brokken klei af bij de teen van de greppel, doordat het veen op de bodem opzij geperst werd. Toevallig gebeurde dit juist bij de horizontaal geplaatste hellingmeetbuis. Binnen drie minuten trad vervolgens grootschaliger bezwijken op, zie figuur 3.2.



Figuur 3.2 Bezijken tijdens de tussentijdse proef

Later, na het verwijderen van de containers, is de locatie opnieuw drooggezet en is na enig graven het glijvlak in de ondergrond teruggevonden.

Uit de analyse van deze tussentijdse proef is gebleken dat de sterkte van de veenlaag het meest overeenkomt met de resultaten van de zogenaamde Direct Simple Shear-proeven, waarvoor een inwendige wrijvingshoek van 34 graden is gevonden bij verwaarlozing van de cohesie. Verder bleek de doorlatendheid ongeveer een factor duizend hoger te liggen dan uit het laboratoriumonderzoek was gevolgd.

De conclusie die hieruit volgde is dat de wateroverspanningen tijdens de bouw van de macrostabiliteitsdijk binnen enkele weken gedissipeerd zouden zijn. Aan de ene kant betekende dit dat de bouw niet tussentijds stilgelegd hoefde te worden en dat de analyse van de proefresultaten niet al te zeer bemoeilijkt zou worden door de beperkte consolidatiegraad in de ondergrond. Aan de andere kant zouden de wateroverspanningen uit de bouwfase geen wezenlijke bijdrage aan het bezwijken van de dijk kunnen leveren, waardoor dit lastiger te bewerkstelligen zou zijn. Dat er in deze kleinere veldproef bezwijken was opgetreden gaf echter goede moed te veronderstellen dat ook bij de grote proef daadwerkelijk bezwijken zal optreden.

Op basis van de resultaten van de tussentijdse veldproef is het ontwerp van de stabiliteitsdijk op een aantal punten aangepast. Zo is onder meer één rij containers als variabele bovenbelasting toegevoegd.

Meer in het algemeen is uit deze proef te concluderen dat dergelijke kleinere veldproeven een effectief middel kunnen zijn om onzekerheden over de ondergrond aanmerkelijk te verkleinen.

### **3.2.2 Opbouw dijklichaam**

#### Grondopbouw op de locatie

In het geotechnisch uitgangspuntenrapport zijn de uitgevoerde boringen en sonderingen gepresenteerd. Tevens is van het terrein een geotechnisch lengteprofiel opgesteld. Uit het geotechnisch lengteprofiel blijkt dat de dikte van het slappe lagen pakket varieert van 1,50 m tot 2,85 m. De dikte van het slappe-lagenpakket heeft een grote invloed op de weerstand tegen macro-instabiliteit van de dijk.

Voor het ontwerp van de proef is getracht de werkelijke stabiliteit zo dicht mogelijk te benaderen. In tegenstelling tot een conventioneel ontwerp werden dan ook verwachtingswaarden van de grondeigenschappen toegepast in plaats van rekenwaarden.

#### Algemene beschrijving

Het dijklichaam is opgebouwd uit een zandkern met een afdekkende kleilaag daaroverheen. Het talud is aan de binnenzijde (de gewenste bezwijkzijde) zeer steil gekozen, namelijk 1:1,5. Aan de buitenzijde is gekozen voor een taludhelling van 1:2,5. Tijdens de proef moest de zandkern kunnen worden gevuld met water. Dit was een van de belangrijkste beschikbare sturingsmechanismen tijdens de proef. Het doel van het vullen van de zandkern met water is tweeledig. Enerzijds heeft het als gevolg het verhogen van het gewicht van het dijklichaam en daarmee het verhogen van het aandrijvend moment in de stabiliteitsbeschouwing. Anderzijds heeft het vullen van de zandkern tot gevolg dat in de zandkern de korrelspanning iets wordt verlaagd en daarmee de sterkte van de zandkern iets afneemt. Drie potentiële risico's werden vooraf onderkend: 1) verweken van de zandkern, waardoor het dijklichaam zou kunnen uitvloeien, 2) het afdrukken van de kleilaag door de verhoogde waterstand in het dijklichaam, 3) lekkage door de kleilaag heen, wat zou kunnen gebeuren bij onvoldoende verdichting van deze kleilaag tijdens de bouw. Bij meevoering van zand uit de kern zou de proef gestaakt moeten worden, zodat adequate verdichting van de kleibekleding van groot belang was. In het ontwerp werd rekening gehouden met deze risico's.

#### Zandkern

Voor de stabiliteitsdijk werd de minimaal benodigde relatieve dichtheid van de zandkern van het dijklichaam bepaald waarbij verwacht mocht worden dat verweking ten gevolge waarvan instabiliteit van het dijklichaam ontstaat niet zou kunnen optreden. De zandkern werd naar deze berekeningen aangelegd.

#### Kleiafdekking

De zandkern diende volgens het ontwerp te worden afgedekt met een kleilaag. Deze kleilaag diende voldoende stabiel te zijn om het afdrukken van de kleilaag te voorkomen. Het ontwerp van de dikte van de kleilaag werd in twee stappen uitgevoerd. Als eerste is met behulp van een analytische rekenmethode, ontwikkeld onder auspiciën van de TAW, de dikte van de kleilaag vastgesteld. Vervolgens werd het ontwerp gecontroleerd met behulp van eindige-elementenberekeningen (Plaxis). Met behulp van de eindige-elementenberekeningen werd tevens een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

### Dimensionering

Uit een voorstudie was gebleken dat het buitentalud maximaal een helling van 1:1,5 diende te hebben om de proef succesvol te kunnen uitvoeren. Uit deze voorstudie bleek tevens dat de kruinhoogte van de zandkern mv + 5,0 m diende te zijn. Om de waterdruk te kunnen weerstaan is een dikke kleilaag nodig. Om deze dikte te kunnen realiseren is er voor gekozen de dikte van de kleilaag te laten verlopen over de hoogte. Dus aan de bovenzijde is de dikte kleiner dan aan de onderzijde. Dit betekent dat de helling van de zandkern afwijkt van de buitentaludhelling.

Een dwarsdoorsnede van het definitieve ontwerp van de stabiliteitsdijk, inclusief de uiteindelijk aangebrachte instrumentatie, is getoond in figuur 3.3.



Figuur 3.3 Dwarsdoorsnede definitieve ontwerp stabiliteitsdijk inclusief instrumentatie

### 3.2.3 Vulsysteem zandkern

Voor het vullen van de zandkern is een systeem ontworpen bestaande uit een werkvloer van zand (1,0 m dik) op het maaiveld, waarop drains (om een gelijkmatige drukverdeling mogelijk te maken) werden geplaatst op een volkomen vlakke ondergrond. De drains werden in de lengterichting van de dijk aangebracht aan elke langs zijde (ca 3 m uit de afdeklaag). Een zevende drain is als natte Luisterbuis geplaatst in een zandkoffer in het oorspronkelijke maaiveld, aansluitend op de zandkern van de dijk en recht onder de binnenkruinlijn. Om te voorkomen dat de lucht niet uit de poriën zou kunnen ontsnappen tijdens het vullen van de zandkern zijn bovendien twee ontluchtingsbuizen bovenin de dijk aangebracht. Net als de infiltratiebuizen zijn dit 'gewone' geribbelde, geperforeerde buizen met kokosomhulling, met een interne diameter van 160 millimeter, zoals deze ook in de landbouw worden toegepast. Het gehele vulsysteem is aangegeven in figuur 3.3.

### 3.2.4 Compartimenteringsdijken

Tijdens de proef moest de ruimte tussen de kanaaldijk en proefdijk kunnen worden gevuld met water. Dit was nodig om ondiepe glijvlakken aan de buitenzijde van de proefdijk te voorkomen. Daarnaast geeft water aan de buitenzijde de proef een realistische aanblik. Hiervoor waren twee compartimenteringsdijken nodig. Deze dijken verbonden de proefdijk met de kanaaldijk en vormden daarmee de begrenzing van het gebied dat onder water werd gezet.

Langs de compartimenteringsdijk en de kanaaldijk diende een folie te worden aangebracht om te voorkomen dat er water de kanaaldijk in zou stromen, waardoor deze zou verzadigen en eventueel zou kunnen bezwijken, hetgeen uiteraard ongewenst was.



Overigens was in de stabiliteitsberekeningen ter controle van de kanaaldijk wel uitgegaan van een verhoogde freatische lijn, waarmee een extra zekerheid was ingebouwd. De compartimenteringsdijken zijn ontworpen met een kruinbreedte van 1 meter en een taludhelling van 1:2.

### 3.3 De bouw van de macrostabiliteitsdijk

Op basis van het hier beschreven ontwerp is een bestek opgesteld. In mei 2008 werd een aanbestedingstraject ingezet, waarop werd ingeschreven door een drietal aannemers. Uiteindelijk werd de opdracht gegund aan de financieel gunstigste aanbieder. In het aanbestedingstraject werd steeds benadrukt dat het hier eerder ging om de bouw van een gecompliceerde proefopstelling dan om het aanleggen van een "simpele dijk". Het was namelijk de bedoeling om tijdens de bouw, gaandeweg alle meetsystemen en de bijbehorende bekabeling in de dijk op te nemen, zie ook figuur 3.3.

Voor het inbouwen werd een gedetailleerd draaiboek opgesteld, waarin precies de volgorde van, en de manier waarop de systemen moesten worden ingebouwd, stond beschreven. Begin augustus werd gestart met de bouw van de dijk. In figuur 3.4 is de voortgang na een kleine twee weken te zien. Let op de beide instrumentatieraaien dwars op het werk.



Figuur 3.4 Aanleg van de stabiliteitsdijk, halverwege augustus 2008

Aangezien de voortgang van de bouw sterk afhankelijk was van de weersomstandigheden moesten de deelnemers in bepaalde perioden op afgroep beschikbaar zijn om te assisteren bij de inbouw van hun meetsystemen. Half september was de dijk af en werden alle meetsystemen aangesloten op de data-infrastructuur en uitgetest, zie ook figuur 3.5. Parallel hieraan werden op de dijk

nog twee rijen containers geplaatst om zo nodig de stabiliteitsdijk extra te kunnen belasten door ze te vullen met water. Ook werd de kanaaldijk bekleed met vijverfolie om het doorweken van de kanaaldijk met water te voorkomen.



Figuur 3.5 Aansluiten van instrumentatie bovenop de dijk, halverwege september 2008

In onderstaande tabel zijn de verschillende gebeurtenissen in meer detail opgenomen.

<b>Datum</b>	<b>Actie</b>
25-27 sept. 2007	Aanbrengen instrumentatie Dike Survey met horizontale boring
24 -25 juni 2008	Uitvoering aanvullend grondonderzoek/installatie referentie monitoring Deltares
23-25 juli	Plaatsen instrumenten RPS-BCC/IFCO door Fugro
4 augustus	Start permanente aanwezigheid op bouwlocatie en voorbereidende werkzaamheden zoals installeren bouwkeet
4 augustus	Installatie GeoBeads, Alert Solutions
8 augustus	Start werkzaamheden aannemer, aanleg rijbaan met parkeerplaatsen
11 augustus	Aanleg natte Luisterbuis; Start aanvoer zand en klei Cutteren grasmat ter plaatse van de proefdijk
12 augustus	Ten Cate / Inventec: eerste strip aangebracht Bezwijkmechanisme (drainagebuizen) aangebracht GTC Kappelmeyer: eerste kabel aangebracht
18/19 augustus	Instrumentatie Koenders aangebracht
20 augustus	Controleren instrumenten Dike Survey
21 augustus	Ten Cate / Inventec: tweede strip aangebracht; Bussen steken kleibekleding; Dijk ongeveer 1,75m hoog

25 augustus	GTC Kappelmeyer: tweede kabel uitgelegd
26 augustus	Aanvoer wals om kleibekleding te verdichten; Dijk ongeveer 2,00m hoog; Instrumenten die door kleibekleding gaat worden afgedicht met kleikorrels
1 september	Inmeten profielen i.v.m stabiliteitsberekeningen dijk 3,00m hoog; Profileren bekleding
4 september	Installatie GeoBeads; GTC Kappelmeyer derde kabel; Dijk ongeveer 3,50m hoog
5 September	Inmeten profielen i.v.m stabiliteits berekeningen
8 september	Aanvoer kraan met lange giek
9 September	Inmeten profielen i.v.m stabiliteits berekeningen; Inmeten hellingmeetbuizen; Dijk ongeveer 4.00m hoog
11 september	Inmeten profielen i.v.m stabiliteitsberekeningen; Zand en klei op NAP + 3,50 m (dijk 4,50m hoog)
12 september	Installatie droge Luisterbuis
15 september	Installatie GeoBeads; Dijk 5,00m hoog; Installatie Ten Cate / Inventec: derde strip
16 september	Installatie DikeSurvey in kruin
16 t/m 18 september	Aanbrengen folie buitentalud (zwembad)
18 september	Aanbrengen Ten Cate / Inventec: vierde strip, op de berm van het binnentalud Dijk op hoogte
16 en 17 september	Bouw compartimenteringsdijken
19 september	Aanbrengen onderste rij containers
22 t/m 24 september	Plaatsen container t.b.v. referentiemonitoring camera's Deltares Installatie SAAF's (referentiehellingmeetbuizen); Aansluiten instrumentatie RPS-BCC/IFCO, Koenders, Ten Cate / Inventec, Luisterbuis consortium en Hansje Brinker
23 september	Plaatsen verlichting; Aanbrengen tweede rij containers
22 t/m 24 september	Installatie UPS
25 september	Start proef

Tabel 3.1 Chronologisch overzicht aanleg stabiliteitsdijk inclusief instrumentatie

### 3.4 Deltares referentiemonitoring

Behalve de meetsystemen van de deelnemende bedrijven is door Deltares een aantal systemen voor referentiemonitoring geïnstalleerd. Dit diende primair ter vergroting van de kennis omtrent het gedrag van waterkeringen met betrekking tot het betreffende faalmechanisme en ter begeleiding/aansturing van de proef zelf. Daarnaast was het een referentie voor de ijking van instrumenten van de deelnemers en tot slot konden er eventuele ongewenste ontwikkelingen (andere faalmechanismen dan macro-instabiliteit) worden gemonitord.

De referentiemonitoring werd opgezet conform de in Delft Cluster ontwikkelde HerMes monitoringsfilosofie. De referentiemonitoring was afgestemd op de volgende onderdelen:

- bewakingsmonitoring: om het optreden van ongewenste mechanismen tijdig te detecteren (inclusief dreigend falen van de kanaaldijk);
- signaleringsmonitoring: om de omstandigheden waaronder de proef wordt uitgevoerd goed te kennen en deze aan te kunnen sturen;
- mechanismemonitoring: om het gewenste mechanisme (in dit geval macro-instabiliteit) adequaat te kunnen meten.

Hiertoe bestond de referentiemonitoring uit:

- 14 peilbuizen,
- 18 waterspanningsmeters,
- 12 vochtmeters,
- 140 oppervlakte-vervormingsmeetpunten,
- 3 zakbaken,
- 3 hellingmeetbuizen,
- 14 aandachtsgebieden voor visuele inspecties,
- 4 camera's.

### 3.5 ICT-Infrastructuur (TNO)

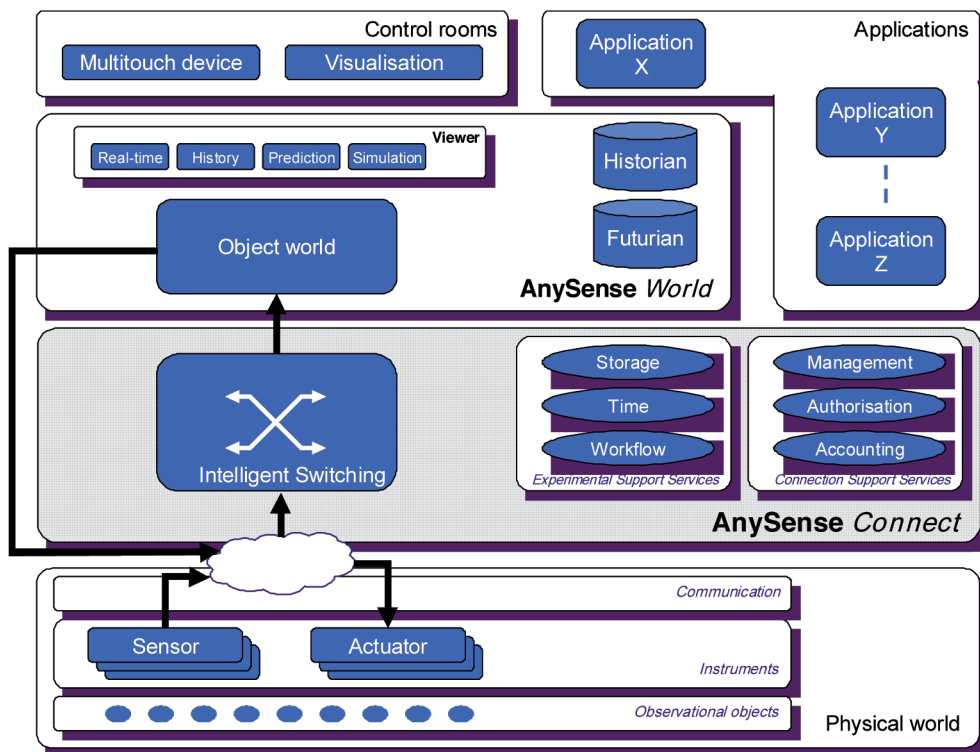
TNO ontwikkelde in de afgelopen jaren een visie over het opslaan, verwerken en ontsluiten van grote hoeveelheden sensordata uit uiteenlopende sensorsystemen. Een deel van deze visie is voor de macrostabiliteitsexperimenten geïmplementeerd in een dataverzamelingsplatform, genaamd *AnySenseConnect*.

AnySenseConnect is onderdeel van TNO's totale visie op grootschalige sensornetwerken, dit is weergegeven in Figuur 5.1. AnySenseConnect heeft drie belangrijke hoofdfuncties:

1. het informatie technisch aansluiten van fysieke sensoren en actuatoren (sensorleveranciers).
2. het veilig en robuust opslaan van sensorinformatie
3. het ontsluiten van sensorinformatie naar afnemers

Bij het macrostabiliteitsexperiment lag de focus op hoofdfunctie 1 en 2. Bij een vervolgonderzoek zal de focus liggen op hoofdfunctie 3.

De naam AnySenseConnect heeft dus betrekking op aansluiten van sensorsystemen aan de onderkant en het weer verspreiden van de informatie aan naar verbindingen aan de bovenkant van het systeem. Het systeem is als het ware als een 'zandloper' opgebouwd (zie figuur 5.3).

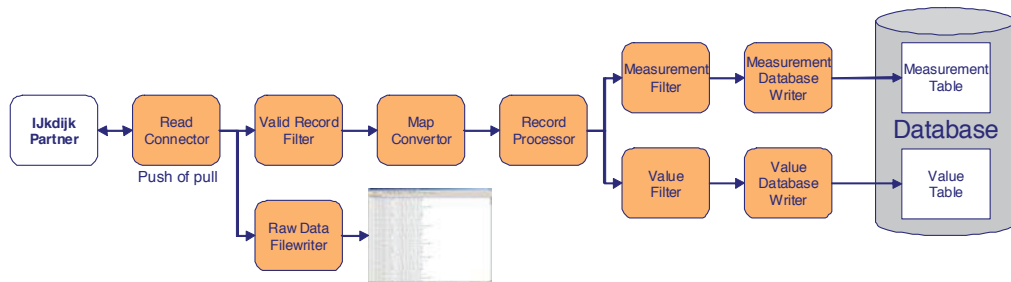


Figuur 5.1 AnySense architectuur met AnySenseConnect als onderdeel hiervan (grijs gearceerd)

### Informatietechnisch aansluiten van fysieke sensoren

Dit onderdeel van het AnySenseConnect platform gaat over het verbinden van de sensorsystemen en het verwerken van de data in de AnySense database. Er is een generiek datamodel ontwikkeld om sensorsdata uit zeer uiteenlopende sensorsystemen te kunnen opslaan.

Hoewel er in de wereld van sensorsystemen gewerkt wordt aan standaardisatie van sensorinformatie zijn er nog maar weinig sensorsystemen die aan die standaarden voldoen (denk aan bijvoorbeeld SWE, SensorML, TransducerML, OGS, GEOSS). Bij het ontwerp van AnySenseConnect is daarom rekening gehouden met een grote diversiteit aan dataaanlevering door de deelnemende partijen. Voor elke partij wordt een klein stukje maatwerk ontwikkeld om zijn sensorsysteem aan te kunnen sluiten. Deze aansluiting wordt gerealiseerd met de OpenSource ontwikkeling "OpenAdapter". Met OpenAdapter kunnen aansluitingen op maat geconfigureerd worden i.p.v. dat geprogrammeerd hoeft te worden.



Figuur 5.2 Adapter voor aansluiting ijkdijk participant

In figuur 5.2 is de opbouw van een adapter te zien. De data die binnenkomt van een IJkdijk partner ondergaat een aantal controles op juistheid van het afgesproken formaat en wordt vervolgens naar het generiek datamodel van het AnySenseConnect platform. Naast dat de data genormaliseerd wordt de ruwe data zoals deze oorspronkelijk werd aangeboden ook opgeslagen. In de toekomst zal er gewerkt worden aan een breder ondersteuning van sensorsystemen en informatiestandaarden en zal de configuratie van adapters verder ontwikkeld worden zodat partners in de toekomst hun eigen aansluiting kunnen configureren zonder dat daar kennis van het platform voor vereist is.

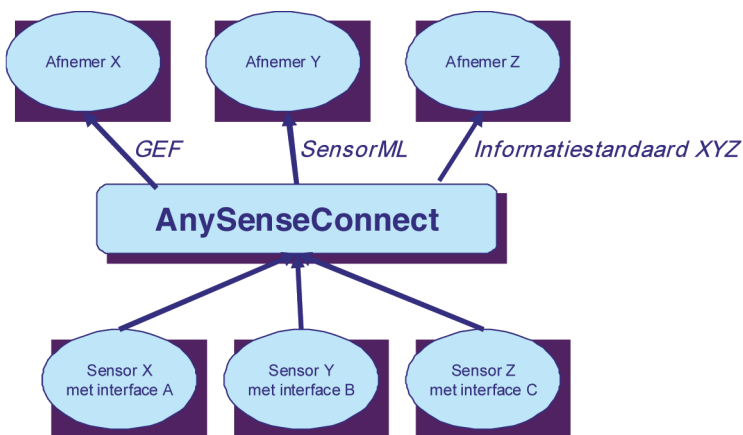
### Veilig en robuust opslaan van sensorinformatie

De experimenten die worden uitgevoerd kunnen niet eenvoudig worden herhaald. Het platform mag dus niet zo maar 'onderuit gaan'. Dit betekent dat er redundantie moet worden aanbracht, zodat systemen elkaars functie kunnen overnemen. Ook zal er een lage Mean Time Between Repair moeten zijn: na het optreden van een storing, moet het systeem snel kunnen worden gerepareerd. Daarnaast is een hoge Mean Time Between Failure erg gewenst. In het systeem is derhalve op diverse lagen redundantie aangebracht, in zowel hard- als software.

### Ontsluiten van sensorinformatie naar afnemers

Voor de Macrostabieleitsproef is gekozen voor locale dataopslag omdat de bandbreedte van de satellietverbinding veel te gering was. Daarvoor werd gebruik gemaakt van Hard Disks in een RAID (Redundant Array of Independent Disks) opstelling (mirror en stripe). Het RAID mechanisme zorgt voor behoud van gegevens bij disk uitval door data dubbel weg te schrijven naar verschillende harde schijven. In totaal was 5,4 TerraByte aan netto schijfruimte beschikbaar (5400 Gigabyte). De meetgegevens werden opgeslagen in oorspronkelijke vorm (zoals ze binnenkomen) én verwerkt in de database. Na afloop van de proef werden de gegevens van alle deelnemers beschikbaar gesteld in GEF format.

Zoals eerder gezegd zal de verdere ontwikkeling van het AnySenseConnect platform vooral gefocust worden rondom het ontsluiten van sensordata naar andere partijen. Sensorsystemen worden aan de onderkant van de zandloper volgens verschillende methodieken aangesloten, aan de bovenkant van het systeem kunnen de sensorwaardes weer uit het systeem gehaald worden door geïnteresseerde partijen (fig. 5.3).



Figuur 5.3 Ontsluiting van sensorinformatie volgens het 'zandloper' model

Het is de bedoeling dat afnemers kunnen kiezen via welke informatiestandaard zij de sensorinformatie willen afnemen (o.a. GEF, SensorML, e.d.) en op welke manier zij deze gegevens aangeleverd willen hebben.

### 3.6 Afstemming met beheerpraktijk

Eén van de functies van de Stichting IJkdijk is het organiseren van afstemming tussen de technologie van de diverse sensorontwikkelaars en deelnemende bedrijven enerzijds en de beheerpraktijk van waterschappen en Rijkswaterstaat anderzijds. Dit is essentieel voor de ontwikkeling van een bruikbaar sensorsysteem voor het monitoren van de staat van waterkeringen. In het project vertegenwoordigt STOWA de belangen van de waterbeheerders en organiseert afstemming tussen de opzet van het experiment en experimentresultaten met de beheerpraktijk door middel van klankbordgroepbijeenkomsten.

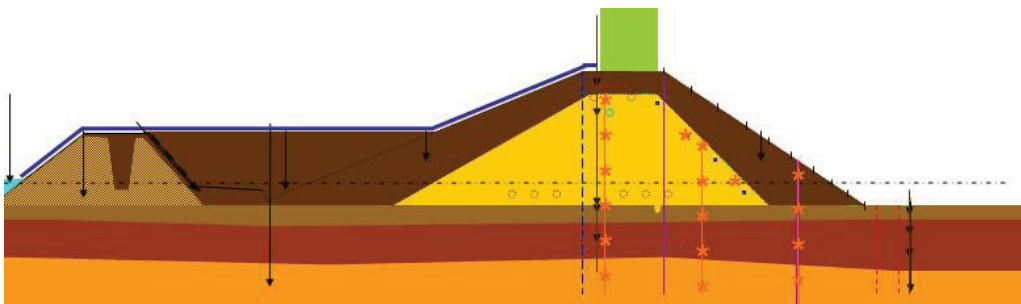
De klankbordgroep, bestaande uit vertegenwoordigers van waterschappen, Rijkswaterstaat en provincies, is al in de voorbereidingsfase van het macrostabiliteitsexperiment bijeenkomen om de experimentopzet te beoordelen en advies te geven over de uitvoering van het experiment. Tevens is de klankbordgroep na het experiment bijeengekomen om de voorlopige conclusies te beoordelen en de bruikbaarheid van de resultaten te bespreken. Bij deze bijeenkomst zijn nog geen algemene conclusies getrokken, wel ontstond het beeld dat er aan de ene kant wezenlijke en voor de beheerders relevante vooruitgang is geboekt ten aanzien van de ontwikkeling van sensortechnieken, maar dat er aan de andere kant nog op veel onderdelen ontwikkeling nodig is voordat er sprake is van monitoringssystemen die in de praktijk geïntegreerd zijn.

## 4. Uitvoering van het experiment

### 4.1 Geplande uitvoering

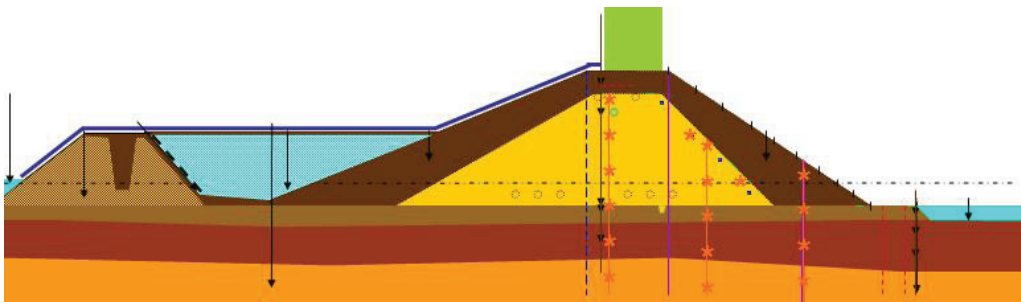
De hierna volgende tekst in deze paragraaf is voor aanvang van de proef gemaakt en bewust in de toekomstige tijd gelaten.

Voordat de proef begint zal een enkele rij van telkens twee lege containers bovenop de kruin van de proefdijk worden geplaatst, zoals aangegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1. Configuratie van de proefdijk voor aanvang van de proef, inclusief een enkele rij van telkens twee lege containers op de kruin (fase 0).

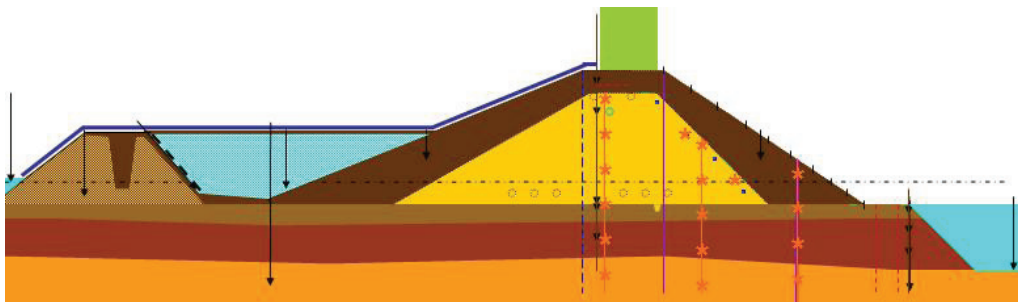
De proef zal beginnen met het vullen van het bassin tussen de proefdijk en de kanaaldijk, en, tegelijkertijd, de ontgraving van een 1 meter diepe en 5 meter brede greppel met hellingen 1:1 voor de proefdijk langs, zie figuur 4.2. Het ontgraven gebeurt vanuit het midden en duurt enkele uren, net als het vullen van het bassin.



Figuur 4.2. Fase 1 van de proef: vullen van het bassin en ontgraving van een 1 meter diepe, 5 meter brede greppel.

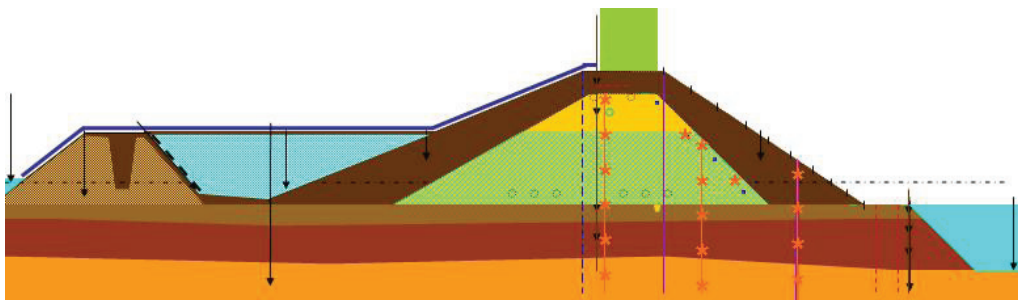
De tweede fase van de proef begint de volgende dag, 's ochtends vroeg, bij voorkeur tussen 7 en 8 uur, zodat de werktijden zoveel mogelijk aansluiten bij de gebruikelijke aannemerstijden – deze fase zal waarschijnlijk 7 tot 10 uur kosten. In deze fase zal de bodem van de greppel verder worden verdiept, tot aan de bovenkant van de zandlaag (op variërende diepte). De greppel zal ook worden verbreed, terwijl de zijanten onder een helling van 1:1 zullen blijven.





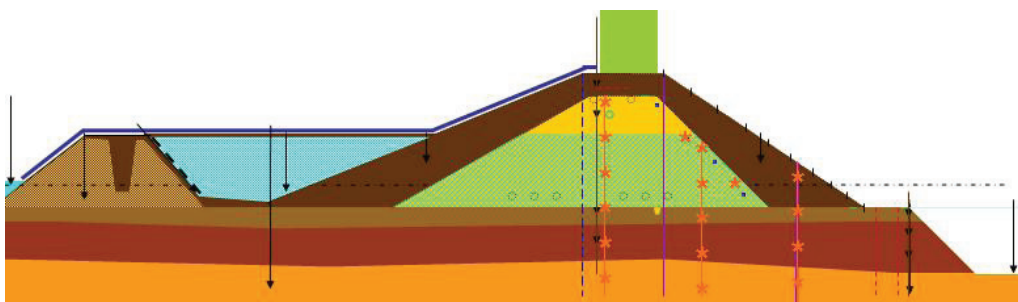
Figuur 4.3. Fase 2 van de proef: verdere ontgraving van de greppel tot aan de bovenzijde van de zandlaag (op variërende diepte).

Vervolgens zal de zandkern in de dijk worden gevuld tot  $\frac{2}{3}$  van de hoogte van deze zandkern, zie figuur 4.4, gebruikmakend van het drainagesysteem in de dijk. Als de ontgraving van fase 2 gereed is voor 5 uur 's middags op de tweede dag, dan zal deze fase direct aansluitend starten. Anders zal er niet begonnen worden aan deze fase voor de derde dag, rond 7 uur 's ochtends. 's Nachts zal het vullen worden gestaakt, waarbij de grondwaterstand in de dijk wel op hetzelfde niveau zal worden gehouden (binnen een variatie van ten hoogste 0,2 meter).



Figuur 4.4. Fase 3 van de proef: vullen van de zandkern in de dijk met water tot  $\frac{2}{3}$  van de hoogte.

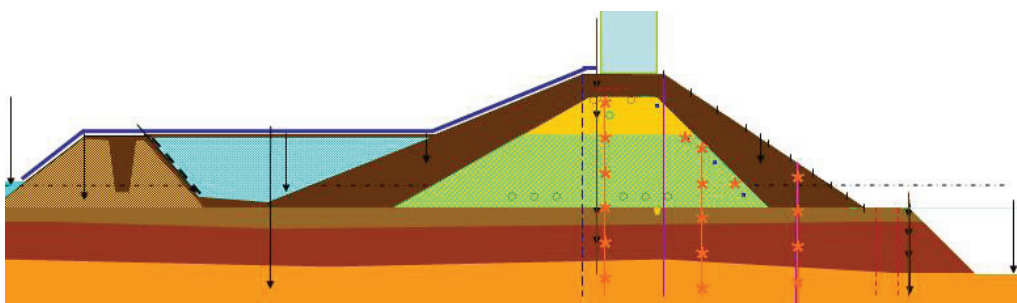
Fase 4 bestaat uit het leegmalen van de greppel, zie figuur 4.5. Deze zal tijdens het ontgraven en in de periode daarna namelijk hoogstwaarschijnlijk gevuld zijn geraakt met water vanuit de zandlaag. Als het zand onderin de sloot gaat lopen moet er een peil worden ingesteld waarbij het zand op de bodem min of meer stabiel blijft liggen.



Figuur 4.5. Fase 4 van de proef: leegmalen van de greppel.

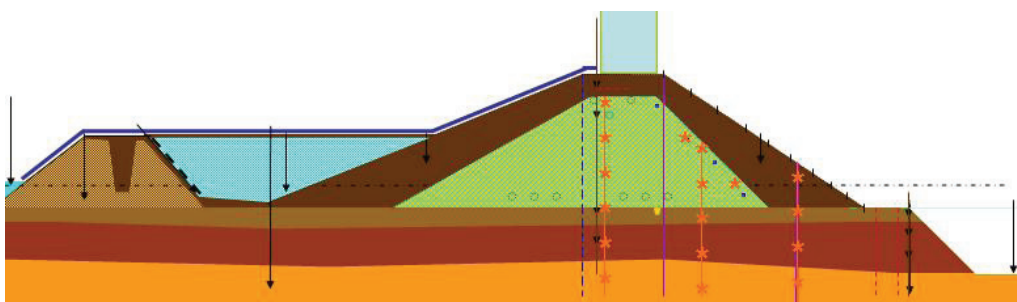
Direct na het leegmalen van de sloot zullen de containers worden gevuld (fase 5, zie figuur 4.6). Deze situatie zal tenminste enkele uren gehandhaafd blijven. Ook hier zal niet mee worden begonnen na 5 uur 's middags.

Wanneer het vullen gestart is voor de onderste containers, dan zal dit ook worden afgemaakt. Hetzelfde geldt voor de bovenste containers. Pas tijdens de uitvoering van de proef zal door de proefleiding worden besloten hoe snel de containers achter elkaar worden gevuld (wel of geen pauze tussen het vullen van de onderste en bovenste rij).



Figuur 4.6. Fase 5 van de proef: vullen van de containers.

De laatste fase van de proef betreft het vullen van de zandkern tot de bovenkant van het zand, zie figuur 4.7. Dit zal zeker niet eerder dan op de vierde dag van de proef gebeuren. Hierna resten de echte noodmaatregelen, zoals het ondanks zandmeevoerende wellen leegmalen van de sloot en het verder vullen van de dijk. Na uiterlijk 7 etmalen zal de proef worden gestaakt.



Figuur 4.7. Fase 6 van de proef: volledig vullen van de zandkern met water.

#### 4.2 Vertaling van de proeffasen naar de praktijk

Bij de voorgestelde proeffasen kan gemakkelijk de vraag opkomen in hoeverre dit nog verband houdt met een echte dijk zoals die in de praktijk belast kan worden. Voor iedere belastingverhogende maatregel zal hierna worden toegelicht hoe dit naar de praktijksituatie vertaald kan worden.

**Vullen van het buitendijkse bassin:** dit is vergelijkbaar met een hogere buitenwaterstand en behoeft geen nadere toelichting.

**Graven van een sloot aan de binnendijkse zijde:** dit zal in de praktijk zelden voorkomen en dan nog alleen in gecontroleerde situaties, waarbij bezwijken van de dijk praktisch uitgesloten kan worden geacht. Dit is daarom een ongewone situatie voor één dijk op één locatie. Er zijn echter wel vele dijkstrekkings te vinden verspreid over Nederland waarin over een wat grotere lengte min of meer hetzelfde dijklichaam aanwezig is, met min of meer dezelfde ondergrond, maar met ten dele geen teensloot, ten dele een kleine sloot aan de binnenzijde en ten dele een wat grotere watergang nabij de teen van de dijk.

De fasen waarin de sloot gegraven en uitgediept wordt kan zodoende worden beschouwd als het 'verschuiven' van de dijk van een situatie zonder teensloot, via een situatie met een kleine sloot naar een situatie met een wat grotere watergang nabij de binnenteen.

**Ontwateren van de sloot:** variatie van het slootpeil komt zeker voor, al is het per situatie verschillend of een peilverlaging een verlaging of een verhoging van het veiligheidsniveau tot gevolg heeft.

**Vullen van de zandkern:** dit betreft feitelijk het verhogen van de grondwaterstand in de dijk, hetgeen bij slechte/geblokkeerde drainage in combinatie met hevige neerslag en/of een hoge buitenwaterstand als zeer realistisch moet worden geacht.

**Containers op de kruin:** deze zijn te vergelijken met een verkeersbelasting, bijvoorbeeld een rij zware vrachtwagens met zand of klei op weg naar een calamiteit verderop langs de dijk.

Kortom: de verschillende proefstappen kunnen goed worden vertaald naar de praktijkomstandigheden.

#### 4.3 Daadwerkelijke uitvoering

De proef is in grote lijnen uitgevoerd zoals gepland, waarbij bezwijken optrad in fase 3, het vullen van de zandkern. De fasen 4, 5 en 6 zijn niet uitgevoerd.

##### **4.3.1 Fase 1**

Op donderdag 25 september 2008 werd gestart met de uitvoering van de proef. Vanaf 's ochtends 6:30 uur zijn de controles op het data-acquisitie systeem uitgevoerd. Om 9:41 uur werd begonnen met het vullen van de berging aan de buitenzijde van de proefdijk, zie figuur 4.8.



Figuur 4.8 Vullen van het bassin aan de buitenzijde van de proefdijk.

Aan de binnenzijde werd om 10:50 uur gestart met de ontgraving, zie figuur 4.9. De ontgraving werd op 1,5 à 2 m uit de teen van het dijklichaam uitgevoerd. De ontgraving werd tot een diepte van ca 1 m over de volle dijk lengte uitgevoerd. De breedte van de ontgraving was ca 3 m.



Figuur 4.9 Ondiepe ontgraving

In de loop van de dag ontstonden er problemen met verweking van het binnentalud van de compartimenteringsdijken. Dit is nader toegelicht in paragraaf 4.4.

De ontgraving is, toen deze bijna gereed was, onderbroken rond 15:30 uur vanwege de problemen met de compartimenteringsdijken. Rond 17:30 uur waren deze opgelost en rond 18:00 uur was de ontgraving van fase 1 gereed.

#### **4.3.2 Fase 2**

De dag begon met dichte mist. Omdat bij het verder uitdiepen van de ontgraving kans op bezwijken ontstond is er gewacht tot de mist optrok. Het criterium voor de start van de nieuwe proeffase was dat de proefdijk vanuit de controleruimte zichtbaar moest zijn, dit impliceert een zicht van ongeveer 150 meter. Om ca 11:00 uur was dit het geval. Er is toen begonnen aan het verder uitdiepen en verbreden van de ontgraving, fase 2 van de proef, zie figuur 4.10. Er is met twee hydraulische kranen vanuit het midden van de proefdijk naar de beide uiteinden toegewerkt.



Figuur 4.10 Ontgraving tot aan de zandlaag.

De bodembreedte van de ontgraving is na afloop van de proef opgemeten. Deze was ca 6 m. Aan de zuidzijde was sloot iets smaller, aflopend naar een breedte van 5 m. De diepte van de ontgraving varieerde van NAP -2.16m tot NAP -4.03 m met een gemiddelde diepte van NAP -3.18 m. Het talud van de ontgraving was aan de zijde van de proefdijk steil opgezet, ca 1:1. Aan de andere zijde was de helling ca 1:2.

#### **4.3.3 Fase 3**

Ook zaterdag 27 september begon met dichte mist en ook op deze dag is er gewacht met de start van de volgende fase totdat de proefdijk vanuit de controleruimte zichtbaar was. Het vullen van de zandkern is gestart om 12:07 uur.

Het vullen van de zandkern is gestart vanuit de onderste Luisterbuis. De onderste Luisterbuis is onder het oorspronkelijke maaiveld gelegd. Het vulsysteem lag in de zandkern op enige decimeters van het oorspronkelijke maaiveld. Nadat het waterniveau in de zandkern hoger kwam dan het niveau van het vulsysteem is via het vulsysteem geïnfiltrerd. Het infiltreren via het vulsysteem startte om 14:25 uur. De aangebrachte druk was 7 mwk, met een bijbehorend debiet van 110 m<sup>3</sup>/uur. Om 14:45 uur is het vullen via de Luisterbuis gestopt.

De drukhoogte in de peilbuizen liep snel op. Om 15:00 uur is het infiltreren gestopt, waarna een nivellering van de stijghoogte in de peilbuizen volgde. Om 15:41 uur is het infiltreren hervat met een debiet van 110 m<sup>3</sup>/uur onder een druk van 5 mwk, tot aan 15:58 uur, toen zijn de pompen opnieuw stopgezet vanwege de grote onderlinge verschillen tussen de peilbuizen in de zandkern.

Om 16:02 uur trad de afschuiving op. Figuren 4.11 en 4.12 geven een impressie van de opgetreden afschuiving. Slechts kort, enkele minuten voordat de afschuiving optrad waren de verplaatsingen visueel waarneembaar. Het tijdstip van 16:02 uur is gekozen als het tijdstip waarop de afschuiving optrad. De keuze is gebaseerd op de waterspanningsmeters die in of rond het glijvlak zijn geplaatst. Op dit tijdstip vertonen deze waterspanningsmeters een scherpe sprong, waarna ze uitvallen.



Figuur 4.11 Tijdens de afschuiving.



Figuur 4.12 Proefdijk na afschuiving.

#### 4.3.4 Afronding

Na het optreden van de afschuiving is ca 1 uur gewacht op eventuele vervolgebeurtenissen. Na dit uur is besloten de proef te beëindigen. Er deden zich geen vervolgebeurtenissen voor terwijl de waterspanningen in de kanaaldijk bleven toenemen en scheurvorming in de kanaaldijk was geconstateerd. Tevens was de meeste instrumentatie reeds uitgevallen.

Om 17:05 uur zijn de afsluiters van het vulsysteem geopend zodat het nog resterende water uit de zandkern kon stromen. Nadat de waterdruk voldoende was afgenomen om afdrukken van kleilaag aan het buitentalud van het dijklichaam te voorkomen is gestart met het legen van het waterbassin, om 18:00 uur.

In de beide daaropvolgende nachten en op zondag 28 september zijn de inspecties van de kanaaldijk gecontinueerd tot maandagochtend 7:30 uur. Er zijn geen bijzondere zaken waargenomen.

Op maandag 29 en dinsdag 30 september zijn de containers van de proefdijk verwijderd. Op woensdag 1 oktober is een proefsleuf gegraven voor het beschrijven van het glijvlak. Op 7 oktober zijn sonderingen door de proefdijk uitgevoerd.

#### 4.4 Afwijkingen en onverwachte gebeurtenissen

Vooraf aan de uitvoering van de proef zijn een ontwerp en een draaiboek opgesteld. Deze zijn in de bijlagen opgenomen. Hier worden de belangrijkste afwijkingen ten opzichte van het draaiboek en onverwachte gebeurtenissen besproken. Gedurende de proef is overigens zoals gepland elk uur een visuele inspectie uitgevoerd van zowel de proefdijk als de kanaaldijk en alle zaken die de uitvoering van de proef zouden kunnen beïnvloeden. Tijdens het vullen van de zandkern is de frequentie van de visuele inspecties verhoogd naar eenmaal per half uur.

##### **4.4.1 Lekkage folie**

Op het binnentalud van de kanaaldijk en compartimenteringsdijken was een folie aangebracht. De folie had tot doel verhoging van de waterspanningen in de kanaaldijk te voorkomen. Hiermee werd de kans dat de kanaaldijk zou afschuiven verkleind. Direct na / tijdens het vullen van de ruimte tussen de compartimenteringsdijken met water werd een toename in waterspanning in het dijklichaam gemeten, zie figuren 5.11.2 en 5.11.3 verderop in deze rapportage.

De toename van waterspanning in de kanaaldijk ondanks de aanwezigheid van de folie kan worden verklaard door het ontbreken van lassen tussen de individuele stroken. De naden tussen de foliestroken bleven openstaan waardoor ondanks de overlap water de kanaaldijk kon vullen. Tijdens het vullen van de ruimte tussen de compartimenteringsdijken dreef het folie lokaal op als gevolg van lucht die onder de folie aanwezig was. Nadat is geconstateerd dat de waterspanningen in de kanaaldijk opliepen en dat daarmee de afdichtende werking van de folie minimaal was, is besloten de opdrijvende delen van de folie lek te prikken. Hierdoor kon de lucht ontsnappen en zonk de folie weer op de bodem. Zo werd voorkomen dat de folie door het opdrijven van het dijklichaam zou worden afgetrokken

##### **4.4.3 Waterspanning en ontwikkeling scheurvorming in kanaaldijk**

Zoals hierboven aangegeven trad er een duidelijke toename van waterspanning in de kanaaldijk op. Dit gebeurde ook aan de kanaalzijde van de kanaaldijk. Opvallend is dat na het legen van het waterbassin er geen directe verlaging van de waterspanning in de kanaaldijk op lijkt te treden, zie eveneens figuren 5.11.2 en 5.11.3.

Zowel aan de noordzijde als aan de zuidzijde trad in de loop van donderdag water uit het binnentalud van de compartimenteringsdijk en later ook uit binnenberm van de kanaaldijk. Waarschijnlijk trad dit water in de kanaaldijk ter hoogte van het waterbassin in en liep door de berm, mogelijk over het grensvlak tussen het oude maaiveld en de recent uitgevoerde bermverzwaring tot enkele meters ten noorden en ten zuiden van de proeflocatie. Er was hier verzuimd om de toplaag met gras te verwijderen, terwijl dat bij de proefdijk wel was gedaan. Hier trad het water uit. Aan de noordzijde was niet geheel duidelijk welk deel van het kwelwater via de kanaaldijk stroomde en welk deel door de compartimenteringsdijk sijpelde. Aan de zuidzijde trad tot op betrekkelijk grote afstand van de proefdijk, 10 tot 20 m, water uit de kanaaldijk.

In de loop van zaterdagmiddag werden kleine scheuren aan de binnenkruinlijn van de kanaaldijk zichtbaar. Deze kleine scheuren waren ontstaan na het vullen van het waterbassin. Deze scheuren waren vooral aan de zuidzijde van de proeflocatie aanwezig.



Op basis van deze scheuren en de toename van de waterspanning in de kanaaldijk werd instabiliteit van het binnentalud van de kanaaldijk vermoed. Na afloop van de proef en het legen van het waterbassin zijn deze kleine scheuren nog tot maandagochtend 29 september 7:30 uur gemonitord. Na legen van het waterbassin is geen toename van de scheurvorming waargenomen. Ook is er geen hoogteverschil over de scheuren waargenomen. Wel namen de waterspanningen in het dijklichaam van de kanaaldijk nog enige tijd toe.

Verwacht wordt dat er ondanks de kleine scheuren en waterspanningen in de kanaaldijk geen relevante vervormingen in de kanaaldijk zich hebben voorgedaan. Wel is de stabiliteit van de kanaaldijk een aandachtspunt bij vervolgprouwen.

#### **4.4.3 Verweking binnentalud noordelijke compartimenteringsdijk**

De compartimenteringsdijken waren aan de binnenzijde afgewerkt met 1 m dikke kleilaag. Daarnaast was over een deel van de compartimenteringsdijken folie gelegd. Dit was echter niet voldoende om te voorkomen dat water vanuit het bassin door de compartimenteringsdijk stroomde. Ook kwam er water op een lager niveau uit de ondergrond opwellen. De eerste problemen werden aangetroffen op donderdag rond 11:24 uur. In de loop van de proef was aan de noordzijde niet helemaal duidelijk welk deel van het water uit of onder de compartimenteringsdijk door stroomde en welk deel via de kanaaldijk ter plaatse uitstroomde.

Voor een goede afvoer van het water is een greppel gegraven die het water afvoerde via de Noord-Zuidslot. Vanuit deze sloot werd het water met enige regelmaat over de omringdijk gepompt.

Het uitstromende water had ook enige erosie tot gevolg. Om verdere problemen te voorkomen is hier in de loop van vrijdag, de tweede dag van de proef, een zandlaag onder een flauw talud aangebracht. Door het flauwe talud werd het zandtransport beperkt. Indien nodig kon in een later stadium dit zand weer worden aangevuld als er te veel zandtransport was opgetreden. Op deze wijze werd voorkomen dat onderliggend materiaal zou weg-eroderen. Een extra aanvulling is later niet meer nodig geweest. Enige tijd na het aanbrengen verweekte de zandlaag door het opwellende water en was deze niet meer beloopbaar.

#### **4.4.4 Verweking binnentalud zuidelijke compartimenteringsdijk**

Aan de zuidzijde werden vanaf donderdag 13:00 uur problemen met uitstromend water uit het binnentalud van de compartimenteringsdijk geconstateerd. De problemen waren aanvankelijk aan de zuidzijde ernstiger dan aan de noordzijde. Na afronding van de bouw van de proefdijk was nog klei over. Deze klei is aan de zuidzijde tegen de compartimenteringsdijk aangebracht. Er was voldoende klei aanwezig om voldoende tegenwicht te creëren om afdrukken van de aangebrachte klei te voorkomen. Ook was de klei voldoende ondoorlatend om verdere problemen te voorkomen.

#### **4.4.5 Niet vollopen van sloot**

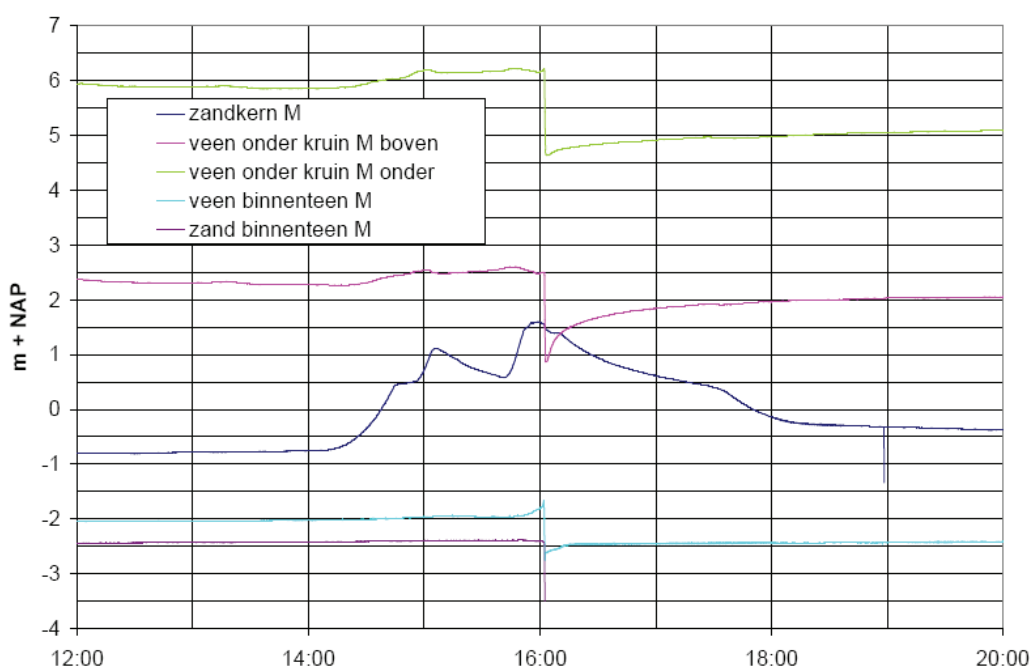
Aan de binnenzijde van de proefdijk werd op vrijdag de sloot verder uitgegraven, fase 3 in de proef. De sloot is toen tot op de zandlaag gegraven. Vooraf werd verwacht dat er een dusdanige toestroom van water uit de zandlaag zou zijn, dat deze zich in korte tijd zou vullen. Dit is niet gebeurd. Figuur 5.11.7 toont dat de waterstand in de ontgraving slechts geleidelijk toeneemt.

De maximale toename van de waterstand bedroeg ca 1 m. Dit is aanzienlijk lager dan op basis van de vooraf gemeten stijghoogte in de zandlaag mocht worden verwacht. De geringe toestroom van water kan worden verklaard door de aanwezige Allerrød laag, zie bijlage G van bijlage 'Deltares deel 6' voor nadere details.

De toestroom van water uit de veenlaag, dus uit het sloottalud, was zeer gering. Ook de aanwezige drainagebuizen transporteerden nagenoeg geen water naar de ontgraving. Uitzondering was een korte periode bij aanvang van het vullen van de zandkern.

#### 4.4.6 Aanwezigheid drainagebuizen

In de ondergrond waren drainagebuizen aanwezig. De gebakken drainagebuizen en de plastic drainagebuizen dateerden nog uit de tijd dat het gebied een agrarische bestemming had. Deze drainage is niet in het ontwerp van de proef betrokken. Bij het graven van de sloot werden deze doorgraven. De drainage transporteerde geen water naar de ontgraving. Uitzondering hierop was de zuidelijke helft van de proefdijk, waar tijdens de aanvang van het vullen van de zandkern gedurende een korte periode water uit de drainagebuizen kwam. De waterspanningsreactie op het openen van de buizen is zichtbaar in figuur 4.13. De waterspanning in de veenlaag neemt af tijdens het vullen van de zandkern. Vanaf ca 14:30 lopen de waterspanningen weer op. Vanaf dit moment kwam er ook geen water meer uit de drainagebuizen.



Figuur 4.13 Enkele waterspanningsmetingen in de middenraai



## 5. Resultaten van de dealexperimenten

In totaal zijn er tien dealexperimenten uitgevoerd in de Stabiliteitsdijk. De Stichting IJkdijk heeft gezorgd voor de opzet en aanleg van de Stabiliteitsdijk, waarin de verschillende bedrijven de gelegenheid kregen hun sensorsystemen te installeren. In het macrostabiliteitsexperiment is een grote diversiteit aan sensoren toegepast. In dit hoofdstuk presenteren de deelnemende bedrijven aan het macrostabiliteitsexperiment wat voor systeem zij hebben toegepast en wat de resultaten waren van de metingen tijdens het experiment.

### 5.1 Dealexperiment Alert Solutions: GeoBeads

Auteur: Erik Peters (Alert Solutions)

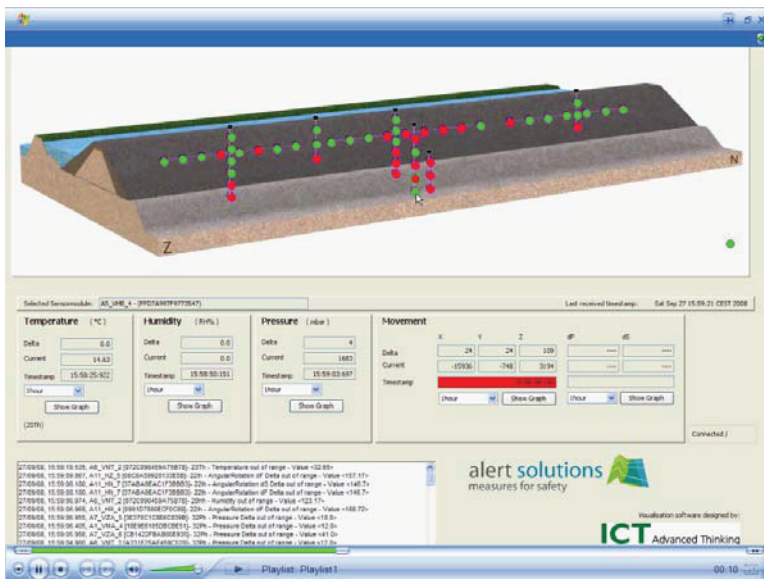
#### 5.1.1 Instrumentatie

GeoBeads is een meetnetwerk opgebouwd uit een (groot)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. Deze metingen kunnen real-time worden verzonden en worden ingezien op een live dashboard.

GeoBeads is een eigen productontwikkeling van het in Delft gevestigde Alert Solutions BV.



Figuur 5.1.1 Doorsnede van een GeoBeads sensormodule zoals toegepast in het meetnetwerk voor het IJkdijk Macrostabiliteitsexperiment met daarin sensoren voor waterspanning, temperatuur, beweging en vochtgehalte.



Figuur 5.1.2 Beeld van het live dashboard ongeveer 20 minuten voor het bezwijken van de dijk. Rode locaties hebben vooraf ingestelde grenswaarden overschreden. Drukopbouw door volpompen van de zandkern leidt tot rood signaal in alle lager gelegen sensormodules. Beweging van de dijk geeft rood van hoog tot laag in het midden van het dijkvak.

Elke sensormodule in de proefdijk bevatte de volgende sensoren:

Sensor Naam	Parameter	Eenheid	Bereik	Opmerking
32P	Waterspanning	mbar = cm H <sub>2</sub> O	0 - 2500	10mbar = 1 kPa
23T	Temperatuur	graden Celsius	0 - 100	
20T	Temperatuur	graden Celsius	-40 - 150	
20H	Vochtgehalte	%	0 - 100	experimenteel
22I	Inclinatie	graden	-90 - 90	t.o.v. loodrecht
22O	Versnelling	genormeerd	-32768 - 32768	16384 = 1g

Daarnaast was één sensormodule ter referentie in de meetkeet geplaatst met als hoofddoel om de buitenluchtdruk te registreren zodat de waterspanningen in de dijk hiervoor gecompenseerd kunnen worden. Deze meetkeet sensormodule bevatte de volgende sensoren:

Sensor Naam	Parameter	Eenheid	Bereik	Opmerking
30P	Waterspanning	mbar	0 - 1000	10mbar = 1 kPa
20T	Temperatuur	graden Celsius	-40 - 150	
20H	Vochtgehalte	RH%	0 - 100	
22I	Inclinatie	graden	-90 - 90	t.o.v. loodrecht
22O	Versnelling	genormeerd	-32768 - 32768	16384 = 1g

De output van de sensormodules zijn dataregels die direct de gewenste grootte en eenheid leveren, inclusief waar van toepassing temperatuurcompensatie. De meetfrequentie van elke sensor binnen elke sensormodule was ingesteld op 1 keer per minuut. Totaal leverde het sensornetwerk 296 verschillende dataregels per minuut.

De data uit het systeem werd geleverd in comma separated tekstregels (.csv format) met de volgende velden:

Unieke sensormodule ID, sensornaam, meeteenheid, status (1=goed), datum, tijd (hh:mm:ss,msec), aantal datavelden in de regel, dataformat, metingen, eind controlekarakter (=0)

Een voorbeeld van dataregels uit één van de sensormodules levert bijvoorbeeld het volgende:

```
1A7A9B0D0FE5BD,32Ph,mbar,1,27-09-2008,14:18:56.729,1,u16,1149,0
1A7A9B0D0FE5BD,20hh,RH%,1,27-09-2008,14:19:00.096,1,f,98.48,0
1A7A9B0D0FE5BD,22Ih,dFds,1,27-09-2008,14:19:11.943,2,f,-9.07,12.48,0
1A7A9B0D0FE5BD,23Th,C,1,27-09-2008,14:19:12.253,1,f,16.89,0
1A7A9B0D0FE5BD,20Th,C,1,27-09-2008,14:19:29.927,1,f,17.06,0
1A7A9B0D0FE5BD,22Oh,XYZ,1,27-09-2008,14:19:42.450,3,s16,-15522,3437,2487,0
```

Hieruit lezen we bijvoorbeeld dat sensormodule met ID 1A7A9B0D0FE5BD (was geplaatst op middenraai, zwembadzijde kruin, overgang klei - maaiveld / zandkern) op zaterdag 27 september om 14:19 een waterdruk waarnam van 1149 mbar (~1,5 meter waterkolom), een temperatuur van 17 graden Celsius, een helling van 9 graden achterwaarts en 12,5 graden zijwaarts, bij een vochtgehalte van 98,5%. In de centrale IJkdijk database verzorgd door TNO-ICT is elke combinatie van GeoBeads sensormodule ID en sensornaam (bijv. 32Ph) als unieke sensor opgeslagen. Dit betekent in totaal 296 verschillende sensoren in het GeoBeads netwerk in de IJkdijk voor het macrostabiliteitsexperiment.

### 5.1.2 Installatie

De 50 GeoBeads sensormodules waren in 9 ketens onderverdeeld. Elke gehele keten kon geplaatst worden in een enkele installatieslag.

Zes ketens zijn verticaal geplaatst. Elke verticale keten is aangebracht middels een handboring tot gewenste diepte. De boorgaten van 70mm doorsnede zijn afgevuld met het uit de boring verkregen aanwezige grondmateriaal, rekening houdend met de laagopbouw ter plekke.

De ketens die uitkwamen op de kruin van de dijk zijn middels handboring aangebracht nadat de zandkern op volledige hoogte was gebouwd.

De ketens die uitkomen in het binnentalud waren reeds aangebracht in het maaiveld, voor de start van de bouw. De resterende lengte van deze ketens boven het maaiveld is met de opbouw van de dijk mee naar boven geleid.

Alle verticale modules zijn min of meer loodrecht geplaatst. De draaiing om de eigen as was bij plaatsing in het geval van dit experiment willekeurig.



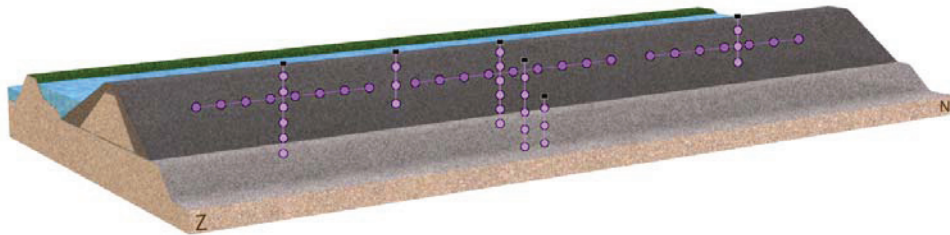
Figuur 5.1.3 a) Installatie en Foto 1b) directe uitlezing van verticale ketens.

De drie horizontale ketens met in totaal 24 sensormodules over 80 meter lengte zijn uitgerold op de zandkern nabij het kleidek van het binnentalud op het moment dat de bouw van de dijk tot de benodigde hoogte (3,5 m boven maaiveld) was gevorderd. De 24 modules in deze ketens zijn allen horizontaal geplaatst in dezelfde oriëntatie om de eigen as.



Figuur 5.1.4 Positioneren van horizontale ketens.

Beschreven installatie van GeoBeads leverde de volgende configuratie van 50 meetlocaties in de dijk:



Figuur 5.1.5 Drie-dimensionaal overzicht van de plaatsing van GeoBeads sensormodules in de Macrostabieleitsdijk. Iedere bol staat voor één sensormodule die gelijktijdig de verschillende parameters waarneemt.

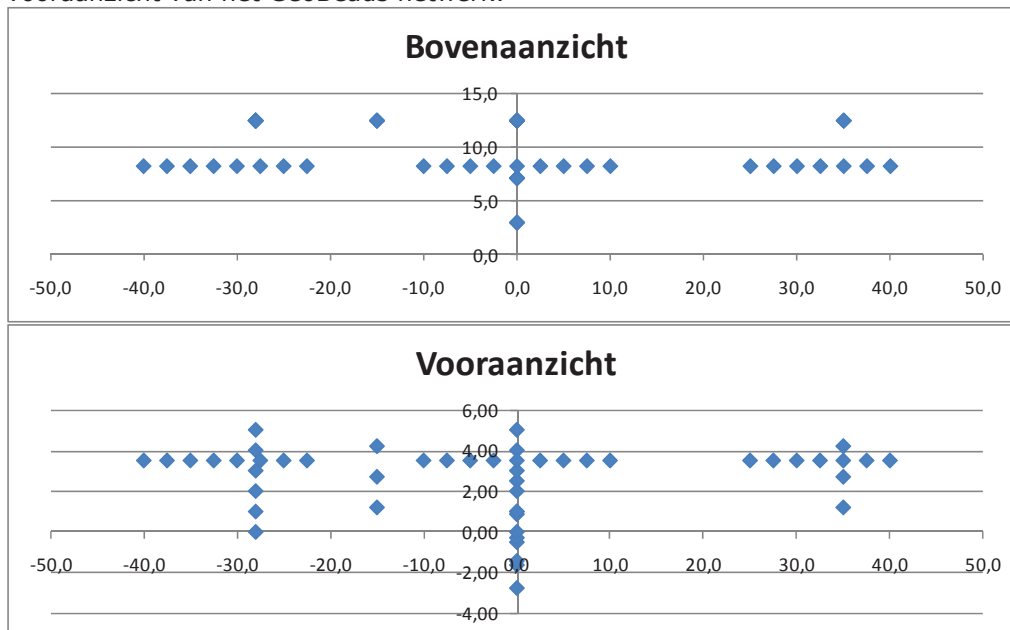
De locatie van elke sensormodule is in onderstaand coördinatenstelsel vastgelegd:

coördinaat	richting	oorsprong	positief	negatief
X	dwaars op dijk	X=0 is teen van dijk binnentalud	west (dijk in)	oost (achterland in)
Y	lengterichting dijk	Y=0 is midden raai	noord	zuid
Z	hoogte	Z=0 is maaiveld ten tijde installatie	omhoog	omlaag



SensorModID	KetenNaam	SensorModNaam	X [m]	Y [m]	Z[m]	Plaatsing	Bodem
DBF20B997C7E707E	A0001MEM	A1_VNA_1	12,4	35,0	4,20	Vert_Nraai_achterkruin	Zandkern
12BC28C5B9725E59	A0001MEM	A1_VNA_2	12,4	35,0	2,70	Vert_Nraai_achterkruin	Zandkern
2737BE355B80891B	A0001MEM	A1_VNA_3	12,4	35,0	1,20	Vert_Nraai_achterkruin	Zandkern
2DB0148513CE106F	A0005MEM	A5_VMB_1	7,1	0,0	2,50	Vert_Mraai_binnentalud	Zandkern
CCD8A73BBFA43997	A0005MEM	A5_VMB_2	7,1	0,0	1,00	Vert_Mraai_binnentalud	Zandkern
7EB10F75C4B2D584	A0005MEM	A5_VMB_3	7,1	0,0	-0,50	Vert_Mraai_binnentalud	Klei maaveld
FFD7A997F9773547	A0005MEM	A5_VMB_4	7,1	0,0	-1,62	Vert_Mraai_binnentalud	Veen
FD37B7E46DA6FED9	A0005MEM	A5_VMB_5	7,1	0,0	-2,75	Vert_Mraai_binnentalud	Heistoecen
BB9A56D6B5E351FE	A0006MEM	A6_VMT_1	3,0	0,0	0,87	Vert_Mraai_teen	Kleidek
072C098459A75B78	A0006MEM	A6_VMT_2	3,0	0,0	-0,28	Vert_Mraai_teen	Klei maaveld
A331E25AF459C520	A0006MEM	A6_VMT_3	3,0	0,0	-1,42	Vert_Mraai_teen	Veen
D8F9EB7CCC2C3490	A0004MEM	A4_VMA_1	12,4	0,0	5,00	Vert_Mraai_achterkruin	Zandkern
B89FF9FD3EBF91E9	A0004MEM	A4_VMA_2	12,4	0,0	4,00	Vert_Mraai_achterkruin	Zandkern
3EBDC44F6BB35F67	A0004MEM	A4_VMA_3	12,4	0,0	3,00	Vert_Mraai_achterkruin	Zandkern
18E9E105DCCBCE51	A0004MEM	A4_VMA_4	12,4	0,0	2,00	Vert_Mraai_achterkruin	Zandkern
2D1DBE43FF962B90	A0004MEM	A4_VMA_5	12,4	0,0	1,00	Vert_Mraai_achterkruin	Zandkern
1A7A9B0D0FEBE5BD	A0004MEM	A4_VMA_6	12,4	0,0	0,00	Vert_Mraai_achterkruin	Klei maaveld
A664975E8F51454A	A0008MEM	A8_VMZ_1	12,4	-15,0	4,20	Vert_M-Z_achterkruin	Zandkern
0227F24FC0A00D09	A0008MEM	A8_VMZ_2	12,4	-15,0	2,70	Vert_M-Z_achterkruin	Zandkern
CC06DE77E6393FED	A0008MEM	A8_VMZ_3	12,4	-15,0	1,20	Vert_M-Z_achterkruin	Zandkern
41CD0FB3AD5BCF8	A0007MEM	A7_VZA_1	12,4	-28,0	5,00	Vert_Zraai_achterkruin	Zandkern
7E4AF60367F530E7	A0007MEM	A7_VZA_2	12,4	-28,0	4,00	Vert_Zraai_achterkruin	Zandkern
A34C2C07A41A170E	A0007MEM	A7_VZA_3	12,4	-28,0	3,00	Vert_Zraai_achterkruin	Zandkern
CF34D1073DCD0ED0	A0007MEM	A7_VZA_4	12,4	-28,0	2,00	Vert_Zraai_achterkruin	Zandkern
3E370C1C8E6C839B	A0007MEM	A7_VZA_5	12,4	-28,0	1,00	Vert_Zraai_achterkruin	Zandkern
CB1422FBA80E935	A0007MEM	A7_VZA_6	12,4	-28,0	0,00	Vert_Zraai_achterkruin	Klei maaveld
3ADB12B91B1FF884	A0011MEM_N	A11_HN_1	8,2	40,0	3,50	Hori_Noord_binnentalud	Zandkern
D97109512D3E3963	A0011MEM_N	A11_HN_2	8,2	37,5	3,50	Hori_Noord_binnentalud	Zandkern
87BD BAA690926E8E	A0011MEM_N	A11_HN_3	8,2	35,0	3,50	Hori_Noord_binnentalud	Zandkern
7287266B0FB8ECFD	A0011MEM_N	A11_HN_4	8,2	32,5	3,50	Hori_Noord_binnentalud	Zandkern
9C9148ED0C879490	A0011MEM_N	A11_HN_5	8,2	30,0	3,50	Hori_Noord_binnentalud	Zandkern
F6A633EE6A575848	A0011MEM_N	A11_HN_6	8,2	27,5	3,50	Hori_Noord_binnentalud	Zandkern
37ABA9EAC1F3BBB3	A0011MEM_N	A11_HN_7	8,2	25,0	3,50	Hori_Noord_binnentalud	Zandkern
C71443DD986EEA75	A0011MEM_M	A11_HM_1	8,2	10,0	3,50	Hori_Midden_binnentalud	Zandkern
8FCA351C778CE3EC	A0011MEM_M	A11_HM_2	8,2	7,5	3,50	Hori_Midden_binnentalud	Zandkern
927FDEB0A7711E90	A0011MEM_M	A11_HM_3	8,2	5,0	3,50	Hori_Midden_binnentalud	Zandkern
0991D7880ECF0C89	A0011MEM_M	A11_HM_4	8,2	2,5	3,50	Hori_Midden_binnentalud	Zandkern
A8064CA19DE5A63A	A0011MEM_M	A11_HM_5	8,2	0,0	3,50	Hori_Midden_binnentalud	Zandkern
0E4198B3C6BC3568	A0011MEM_M	A11_HM_6	8,2	-2,5	3,50	Hori_Midden_binnentalud	Zandkern
34105803E15F6A56	A0011MEM_M	A11_HM_7	8,2	-5,0	3,50	Hori_Midden_binnentalud	Zandkern
F754196B994EB86E	A0011MEM_M	A11_HM_8	8,2	-7,5	3,50	Hori_Midden_binnentalud	Zandkern
45CA8D88953269DC	A0011MEM_M	A11_HM_9	8,2	-10,0	3,50	Hori_Midden_binnentalud	Zandkern
47B72BDDA5E2BC82	A0011MEM_Z	A11_HZ_1	8,2	-22,5	3,50	Hori_Zuid_binnentalud	Zandkern
8F260859F8D4AE27	A0011MEM_Z	A11_HZ_2	8,2	-25,0	3,50	Hori_Zuid_binnentalud	Zandkern
2875EB97D9E15217	A0011MEM_Z	A11_HZ_3	8,2	-27,5	3,50	Hori_Zuid_binnentalud	Zandkern
F6B33988681D4229	A0011MEM_Z	A11_HZ_4	8,2	-30,0	3,50	Hori_Zuid_binnentalud	Zandkern
08C8A59920133E5B	A0011MEM_Z	A11_HZ_5	8,2	-32,5	3,50	Hori_Zuid_binnentalud	Zandkern
2702C6D0EF8A5897	A0011MEM_Z	A11_HZ_6	8,2	-35,0	3,50	Hori_Zuid_binnentalud	Zandkern
31973BB4DE5940FC	A0011MEM_Z	A11_HZ_7	8,2	-37,5	3,50	Hori_Zuid_binnentalud	Zandkern
1950F5281F5CA4B8	A0011MEM_Z	A11_HZ_8	8,2	-40,0	3,50	Hori_Zuid_binnentalud	Zandkern
8FD1D8E761365258	A1000MEM	A1000_AIR	Meetkeet				Lucht

Uitgezet in twee dimensionale vlakken, geeft dit het volgende boven- en vooraanzicht van het GeoBeads netwerk:



Figuur 5.1.6 Boven- en vooraanzicht (vanuit achterland) van de plaatsing van GeoBeads sensormodules. Hierbij is het maaiveld en de teen van de dijk bij de middenraai als oorsprong gekozen.

### Uitvoering

Er hebben zich naar ons weten geen bijzonderheden voorgedaan tijdens de uitvoering van het experiment, die de meetresultaten van de GeoBeads negatief hebben beïnvloed.

Het gehele meetstelsel heeft gedraaid en data geleverd aan de centrale database gedurende:

- 23/09/2008 van 17:15 tot 18:56 uur (testrun)
- 24/09/2008 16:59 uur tot 28/09/2008 11:21 uur (uitvoering experiment)

In de nacht van 25/09 op 26/09 is er gedurende enkele korte periodes (~30-40 minuten) geen data binnengekomen (mogelijk stroomuitval?). De verbinding met de databases (eigen en TNO) is daarna hersteld, waarna het stelsel weer data wegschreef. Na deze periodes in die nacht hebben zich geen soortgelijke incidenten meer voorgedaan.

De ketens A0004MEM, A0005MEM, A0006MEM en A0011MEM, allen nabij de middenraai, zijn gedurende de bezwijking op 27 september 2008 vlak na 16:02 uur uitgevallen, vermoedelijk vanwege een kabelbreuk door de grote verplaatsing van de grondmassa binnen de glijcirkel. De opbouw naar de bezwijking hebben deze ketens volledig kunnen waarnemen.

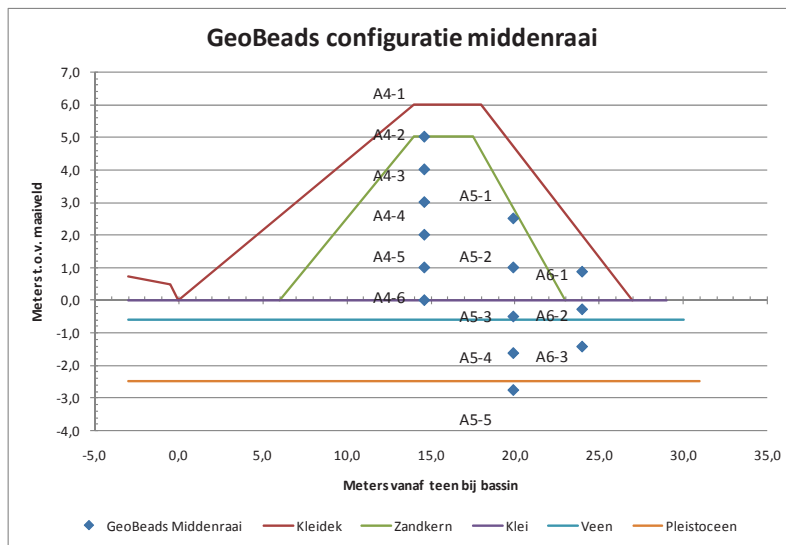
De overige ketens hebben ook daarna continu gefunctioneerd totdat het stelsel actief is uitgeschakeld op zondag 28 september om 11:21 uur.

Gezien de zeer experimentele aard van de vochtsensoren, verdienen de metingen van deze sensoren uitgebreide nadere analyse. In het kader van de hierna volgende meetresultaten, zijn deze sensoren daarom ook buiten beschouwing gelaten. De metingen van de vochtsensoren kunnen ook niet als referentie worden genomen door externe partijen.

### 5.1.3 Meetresultaten

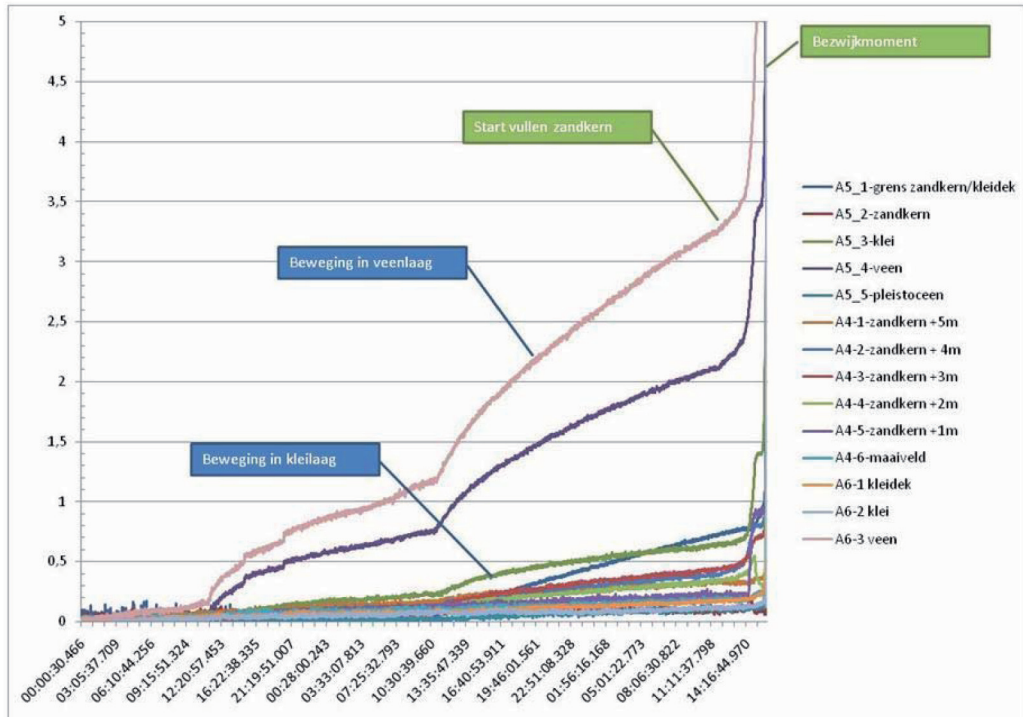
Het GeoBeads sensornetwerk heeft gedurende het experiment meer dan 1,2 miljoen dataregels vergaard. In deze paragraaf bieden wij u een selectie van de meetresultaten. Met deze selectie geven we een beeld van de observaties en inzichten die middels dit systeem op het gedrag van dijken geboden kunnen worden. De vergaarde data en mogelijke analyses zijn vele malen uitgebreider dan hier beschreven kunnen worden. Dit is onderwerp van voortdurende analyse en studie bij Alert Solutions BV.

We richten ons in deze rapportage in eerste instantie op de metingen uit de verticale ketens in de middenraai, daar waar de uiteindelijke bezwijking ook heeft plaatsgevonden.



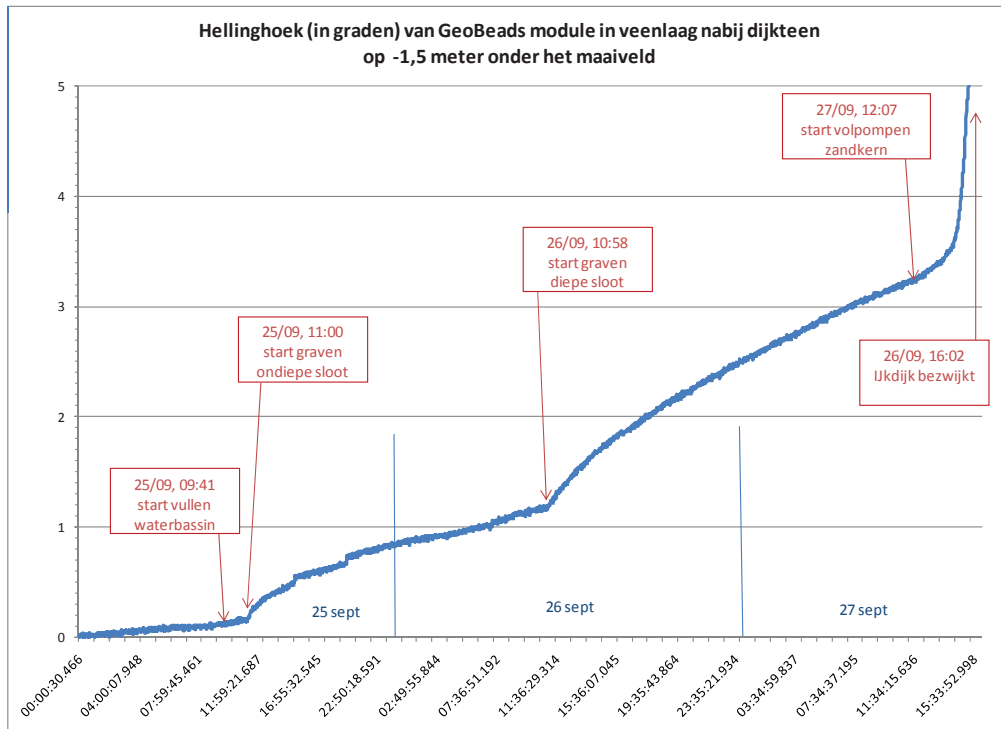
Figuur 5.1.7 Configuratie GeoBeads in middenraai.

Vraag is of een aanloop naar bezwijken vroegtijdig kon worden waargenomen. Daarvoor kijken we eerst naar de bewegings- en waterspanningmetingen los van elkaar. Volgens gaan we de verschillende metingen naast elkaar zetten om het begrip van de ontwikkelingen te vergroten. We starten met de waargenomen bewegingen in de vorm van veranderingen in hellinghoek van de geplaatste modules.



Figuur 5.1.8 Hoekverdraaiing van de GeoBeads sensormodules in verschillende grondlagen in de middelste meetraai van de dijk. Horizontale as is tijd van donderdag 25/09/08 0:00 uur t/m bezwijken op zaterdag 27/09/08 16:02 uur. Verticale as geeft totale verandering van de hellinghoek in graden t.o.v. de startpositie weer.

In figuur 5.1.8 is te zien dat er gedurende het gehele experiment beweging in de dijk en onderliggende lagen heeft plaatsgevonden. Met name in de veenlaag onder de dijk vond dit vroegtijdig plaats. De beweging is op bepaalde momenten ook versneld, waarneembaar door knikken en steile gedeeltes in de grafiek. Om de aanleiding van deze versnellingen te achterhalen zijn de evenementen (verzwakkingsmaatregelen) van de proefuitvoering op de tijd-as geplaatst, zoals in figuur 5.1.9 is weergegeven voor een sensormodule in de veenlaag.



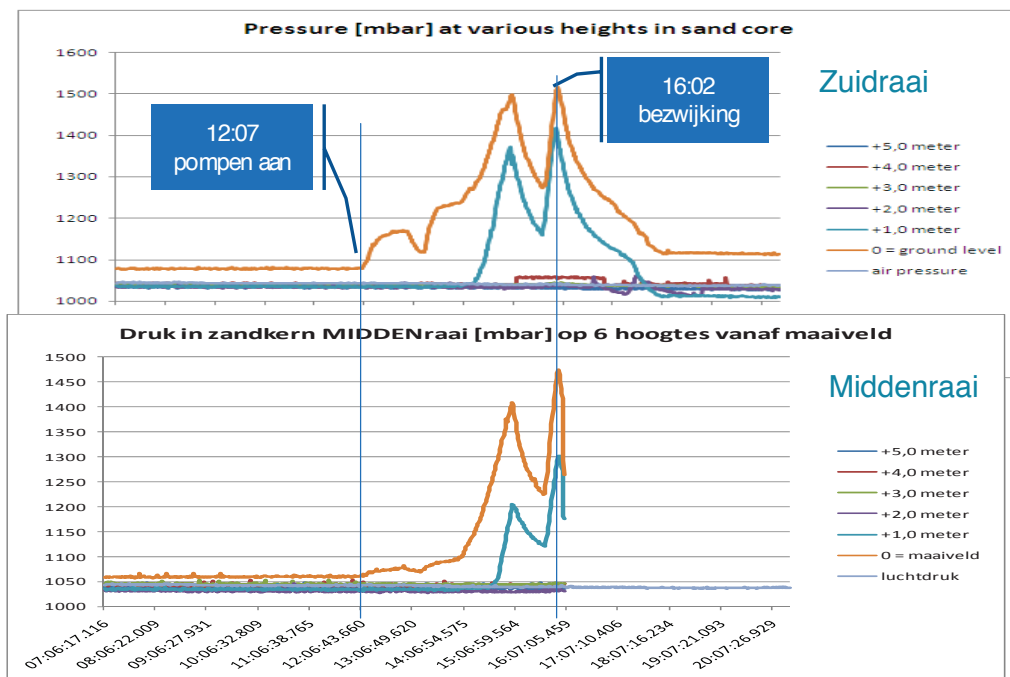
Figuur 5.1.9 Verandering in hellinghoek van GeoBeads sensormodule geplaatst in de veenlaag onder de dijk op 3 meter afstand van de binnenteen.

Versnellingen zijn duidelijk gecorreleerd aan ontgraven van de sloot en het vullen van de zandkern. Op donderdag 25 september werd aan de teen van het binnentalud een ondiepe sloot tot 1 meter diepte gegraven. Op vrijdag 26 september werd deze sloot uitgediept tot op de Pleistocene zandlaag op gemiddeld 2,5 meter diepte. Op zaterdag 27 september werd rond het middaguur gestart met het volpompen van de zandkern van het dijklichaam met water.

Het is duidelijk waarneembaar dat het ontgraven van de sloot (in twee stappen) heeft geleid tot versnelde beweging in de veenlaag. Dit is in lijn met de beoogde verzwakking van de dijk en het ontstaan van instabiliteit vanuit het slappe lagen pakket onder de dijk.

Verder stellen we ook vast dat de beweging zich nog niet gestabiliseerd had (of teruggevallen was naar het niveau van voor de start van het experiment), voordat een volgende fase in het verzwakken van de dijk werd ingezet. Dit is met name aan de orde na het ontgraven van de diepe sloot en voor het starten met vullen van de zandkern.

De laatste verzwakkingsmaatregel voor het bezwijken van de dijk was het volpompen van de zandkern van de proefdijk met water uit het kanaal. We observeren het effect hiervan duidelijk in figuur 5.1.8 in de vorm van een scherpe versnelling in beweging in de dijk. We zien ook dat vanaf dat moment alle verschillende grondlagen op elke positie in deze beweging gaan 'meedoen'. Om te achterhalen hoe de krachten die deze beweging hebben veroorzaakt tot stand zijn gekomen kijken we naar de waterspanning die de sensormodules gemeten hebben op locaties in de zandkern.



Figuur 5.1.10 Waterspanning (druk, 1 mbar = 1cm water) in de zandkern van de proefdijk bij de zuidraai (inlaat pompinstallatie) en middenraai.

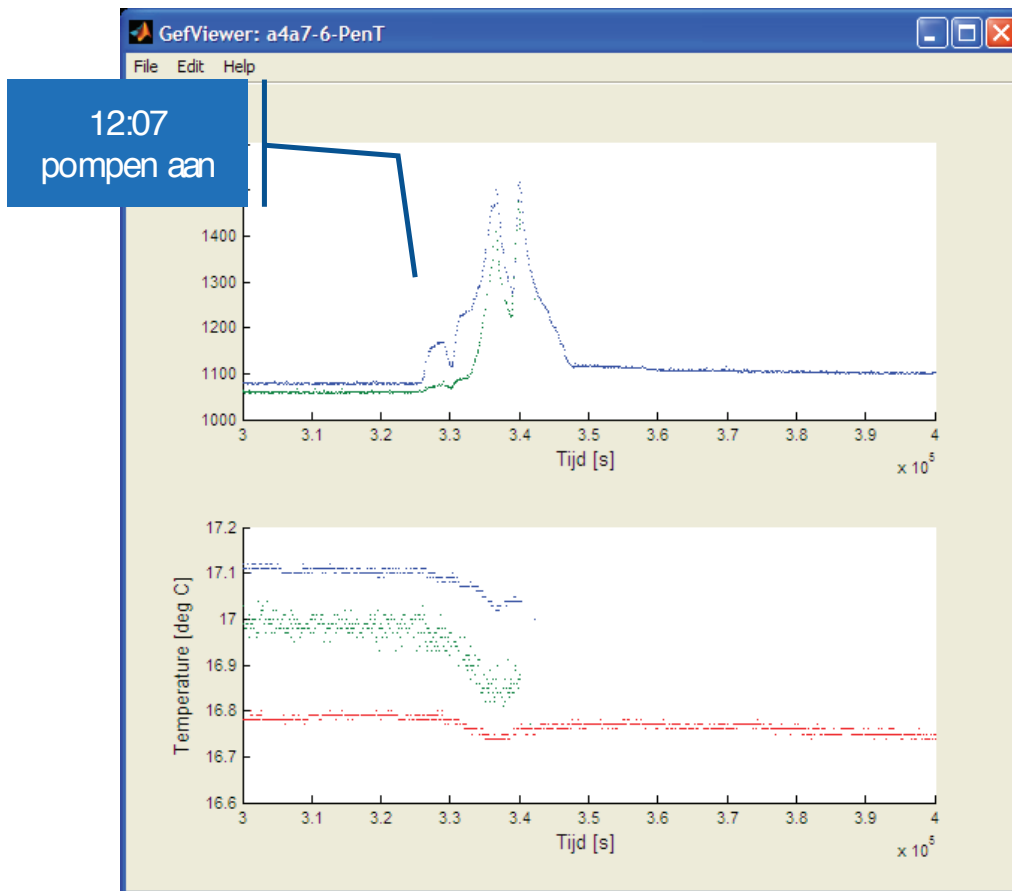
We zien direct na aanzetten van de pompen een drukopbouw bij de zuidraai onderin de zandkern (op het grensvlak van maaiveld en zandkern). We zien in het verloop van de druk op die sensorlocatie ook duidelijk de verschillende opeenvolging van pompen aan (stijgen van druk) en pompen uit (dalen van druk) tot het moment van bezwijken, waarna de pompen worden uitgeschakeld.

De snellere daling van druk na het bezwijkmoment in de middenraai duidt op het openbarsten van de grond waardoor de aanwezige overdruk daar snel vereffend is. Verder observeren we dat er ondanks de hoge opgebouwde overdruk (0,4 bar = 4 meter water) geen grote stijghoogte van het water in de zandkern is gerealiseerd. Naast de sensoren op het maaiveld laten namelijk alleen de sensoren op 1 meter hoogte na verloop van tijd ook een druktoename zien. De daarboven ingebouwde sensoren blijven gedurende het gehele experiment gelijk lopen met de buitenluchtdruk, waarmee duidelijk wordt dat het ingepompte water die hoogten in de dijk niet bereikt.

De opgebouwde waterdruk was dus beperkt tot een relatief dunne onderlaag van de zandkern. De doorlatendheid van het zand was blijkaar niet voldoende om het aangeboden volume van water te verspreiden op een snelheid zodanig dat de overdruk enkel uit stijghoogte zou bestaan.

#### 5.1.4 Correlaties

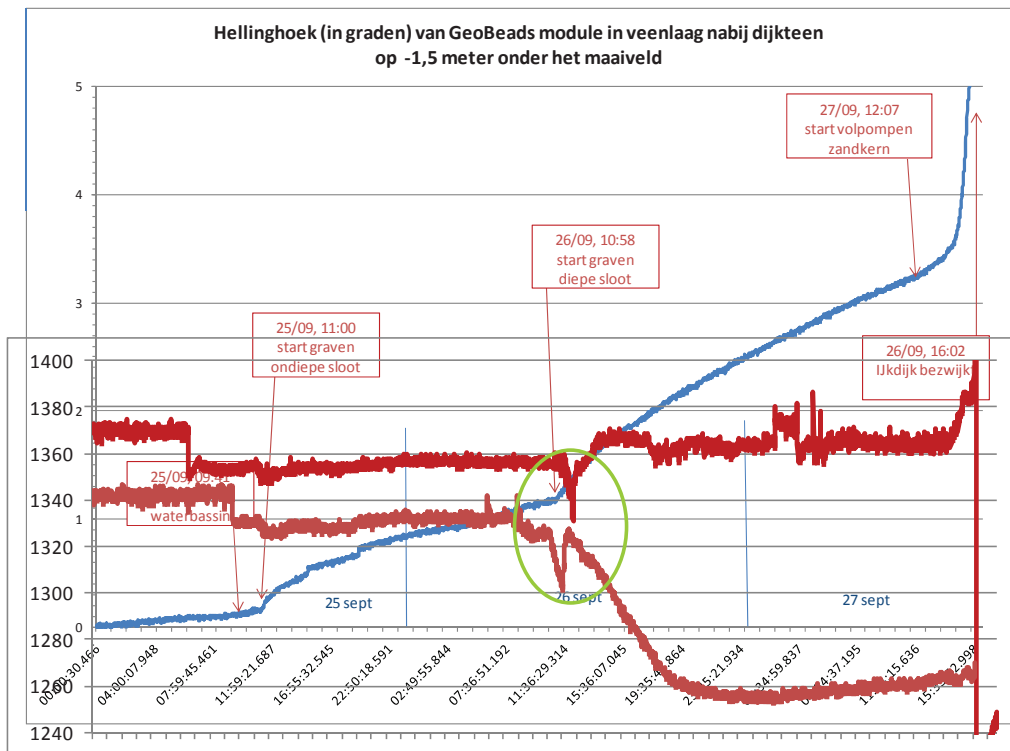
Eén van de unieke elementen van de GeoBeads sensormodules is het feit dat verschillende relevante parameters op dezelfde meetpunten worden waargenomen. Dit biedt de kans tot het bestuderen van correlaties tussen de verschillende metingen, zoals bijvoorbeeld waterspanning, temperatuur en beweging. Zo kunnen we op basis van deze correlaties bekijken of de verhoogde waterdruk in de zandkern inderdaad het gevolg is van het inpompen van water. Daarvoor kijken we naar de temperatuurmetingen in combinatie met de drukmetingen.



Figuur 5.1.11 Boven de waterspanning in de zandkern gedurende het vullen en bezwijken van de dijk. Onder de temperatuur onderin de zandkern op enkele locaties.

In bovenstaande grafieken is te zien dat de drukverhoging samenvalt met een temperatuurverlaging in de zandkern. Deze temperatuurverlaging is duidelijk van grotere orde dan de achtergrondvariatie en meetruis en kan dan ook worden toegeschreven aan instromend water. Uit de correlatie tussen de waterdruk- en temperatuurmetingen kunnen we derhalve waarnemen dat de drukopbouw wordt veroorzaakt door toestroming van water en niet(alleen) door (de-)compressie van grondlagen.

Ook de correlatie tussen de waterspanning en beweging levert interessante resultaten op. In onderstaande grafieken zijn beide weergegeven voor sensoren geplaatst in grondlagen onder de dijk.



Figuur 5.1.12 Hellinghoek (blauw) en waterspanning (donkerrood) van een sensormodule in de veenlaag onder de dijk. Aangevuld met waterspanning (donkerroze) van een nabijgelegen sensor in de pleistocene zandlaag.

We registreren dat een versnelling van de beweging samenvalt met een snelle waterspanning verlaging. Een verklaring zou het wegstromen van water kunnen zijn op het moment van verschuiving van het grondpakket. Vanuit de wetenschap dat deze veranderingen plaatsvinden op het moment dat de diepe sloot ontgraven wordt, is dit een plausible verklaring. De afname van de druk in de grafiek weergegeven Pleistocene zandlaag en veenlaag wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het uittreden van 'opgesloten' water onder relatief hoge druk. Deze initiële hoge druk is tot stand gekomen door het aangebrachte gewicht van de gebouwde proefdijk en de resulterende compressie van het slappe veenlagen pakket.

We zien verder dat de waterspanning in de Pleistocene zandlaag blijvend is verlaagd na graven van de diepe sloot. Deze zandlaag staat vanaf dat moment dan ook in 'open' verbinding met de sloot. In de veenlaag herstelt de waterspanning zich echter weer tot zelfs iets boven het eerdere drukniveau. Het water in de veenlaag nabij de weergegeven sensormodule is waarschijnlijk na enige uitstroming weer opgesloten door inzakken van het veen. We zien dat de verhoogde druk in deze laag zich daarna handhaaft tot het moment van bezwijken.

Op het moment van bezwijken zien we een scherpe daling. De sensor is met de veenlaag mee het achterland ingeduwd. Bij het bezwijken is de veenlaag opengebusten waardoor op dat moment ook daar de overdruk kon verdwijnen. Voorgaande laat zien dat op basis van de metingen, ook wanneer men geen zicht zou hebben op de verzwakkingsmaatregelen die zijn genomen, uitspraken zijn te doen over de fenomenen die zich in de dijk voltrekken. Daarbij zouden snelheden van groundbeweging, temperatuurdaling en hoogten van waterdruk inzicht kunnen leveren voor het maken van onderscheid tussen stabiele en kritische situaties.



De vraag blijft daarbij of de tijdens de proef snel opgebouwde kracht in de onderste laag van de zandkern voldoende representatief is voor de omstandigheden zoals die zich een dergelijke dijk zouden voordoen tijdens een langdurige hoogwater periode, waarbij het dijklichaam over langere tijd langzaam zou verzadigen met water.

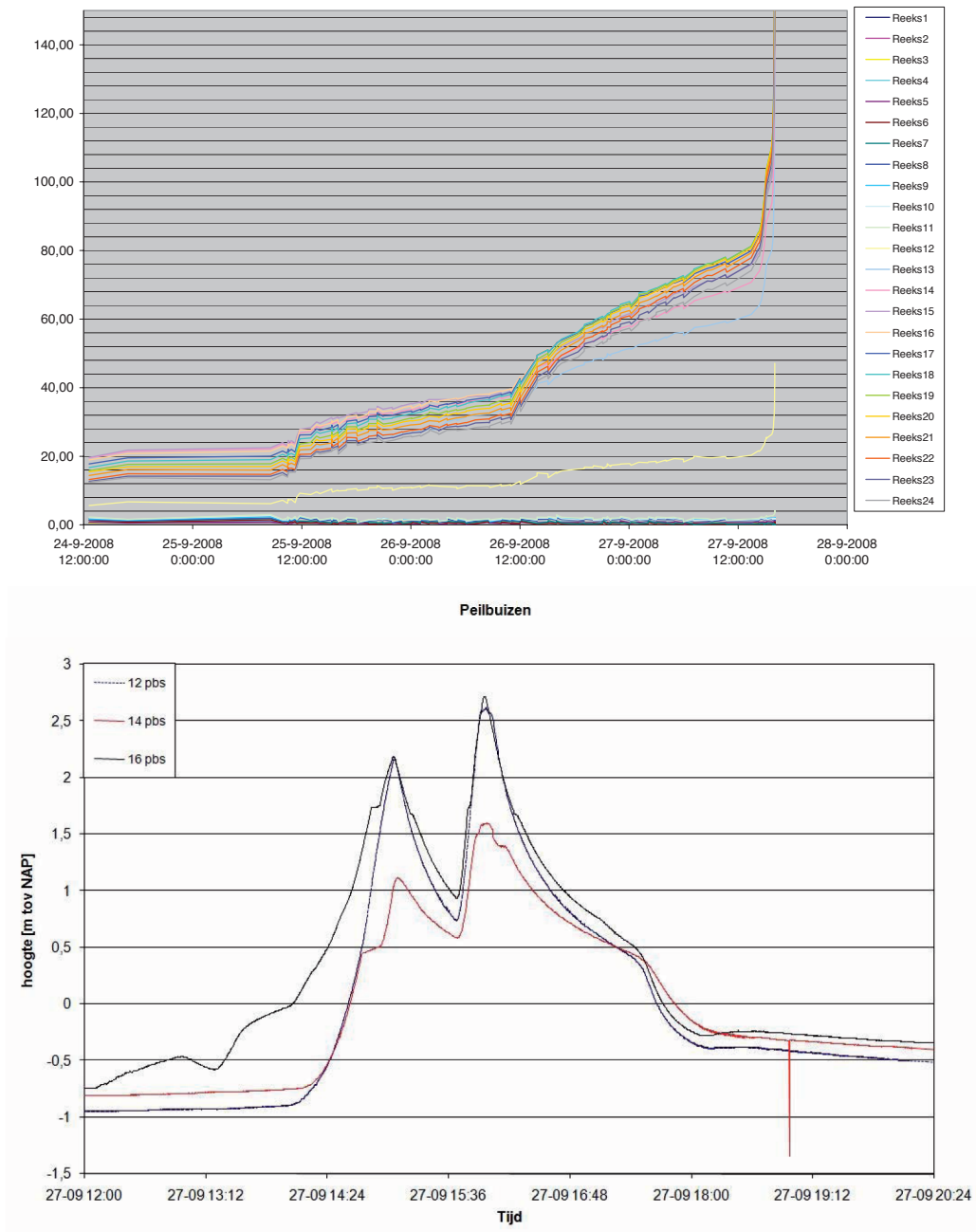
### **5.1.5 Conclusies**

Het GeoBeads sensornetwerk heeft zich een betrouwbaar meetsysteem getoond. Gedurende de gehele experimentperiode zijn gelijktijdig de metingen van een groot aantal meetlocaties verschillende en parameters met een hoge meetfrequentie vergaard.

Met inzet van het GeoBeads sensornetwerk hebben wij vroegtijdig de aanloop naar het bezwijken kunnen waarnemen. De mate en locatie van ontstane beweging kon nauwkeurig, continu en real-time gevolgd worden.

De invloed op de proefdijk van de verschillende handelingen in het experiment zijn door inzet van verschillende parameters goed te reconstrueren en te beoordelen. Ondanks dat in dit experiment versneld een bezwijking tot stand is gebracht, denken wij dat er op basis van de waarnemingen een goede aanzet te maken is in het vaststellen van kritische situaties voor dijken ten aanzien van het bezwijkmechanisme macrostabiliteit. Daarbij kijken wij met name naar de informatie die kan worden verkregen uit onderzoek naar de samenhang tussen de ontwikkelingen in de waterspanning, beweging en temperatuur.

### 5.1.6 Vergelijking met referentiemonitoring



Figuur 5.1.13 Vergelijkbare referentie monitoringsmetingen

Bovenstaande grafieken tonen referentiemonitoring verricht door Deltares. In de linkergrafiek zien we de hellinghoek gemeten in een hellingmeetbuis op enkele meters afstand van een GeoBeads keten. Het verloop gedurende de experimentperiode vertoont zeer sterk gelijkend gedrag als de eerder gepresenteerde waarnemingen op basis van GeoBeads.

Ook de referentie waterspanningsmeters vertonen vergelijkbare metingen als de GeoBeads sensormodules, zoals bijvoorbeeld te zien is tijdens het vullen van de zandkern, weergegeven in de rechtergrafiek.

#### **5.1.7 Nadere analyse**

De verzamelde data biedt een schat aan informatie voor verdere analyse. Eén van de analyse mogelijkheden is de ontwikkeling van aangepaste of nieuwe modellen die op basis van de beschikbare data voorspellingen kunnen geven over grondstabiliteit. Vanaf februari zullen wij in samenwerking met de faculteit EWI van de TU Delft een master student begeleiden om de verzamelde data vanuit deze invalshoek te analyseren.

Tevens staan wij open om de data te delen met derden, wanneer deze interesse hebben om nader onderzoek naar het faalmechanisme macro-instabiliteit uit te voeren.

Ondermeer door dit soort trajecten wil Alert Solutions BV structureel blijven investeren in het ontwikkelen van kennis rondom faalmechanismen en het werken aan methoden en technieken om deze mechanismen vroegtijdig op te sporen.

## 5.2 Deelexperiment Intech: Thermografische metingen

Auteur: Onne Rösingh (Intech)

### **5.2.1. Beschrijving meetmethode**

IDS systems meet met speciale thermografische camera's de uitgestraalde (infrarood)warmteverschillen van waterkeringen. De warmteverschillen worden omgezet in een temperatuursverschillen, die deze camera's kunnen waarnemen tot ca. 85 milli-Kelvin nauwkeurig. Daarnaast kunnen de camera's vervormingen van een dijklichaam waarnemen. De "sensordichtheid" van de camera's bedraagt ongeveer 1 meting per vlak van 6 X 6 cm. Dit komt voor het gehele dijkoppervlak overeen met ongeveer 75.000 meetpunten die 25 keer per seconden een waarneming registreren.

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

Iedere waterkering of dijk laat onder normale omstandigheden water door. Indien een dijk door extreme omstandigheden wordt overbelast, zal deze meer water doorlaten dan normaal. Hierdoor zal het dijkoppervlak van temperatuur veranderen. Door het vaststellen van het patroon van temperatuursverandering en vervorming van het dijklichaam wordt een herkenningsmodel voor bezwijkmechanismen ontwikkeld.

Het doel van deze proef is:

- 1) het vaststellen van het temperatuursverloop als gevolg van het bezwijkmechanisme,
- 2) het vaststellen van vervorming van het dijklichaam.



### 5.2.2. Instrumentatie en installatie

Bij de proefopstelling voor het macrostabiliteit experiment is gebruik gemaakt van drie verschillende camera's die geplaatst zijn op een hiervoor speciaal ingericht voertuig met telescoopmast. Één van de camera's is voorzien van een thermisch beeld en een optisch (daylight) beeld.



5.2.2 installatie camera's telescoopmast



5.2.3 geïnstalleerde computers in voertuig

Het voertuig is voorzien van een stabilisatiesysteem om een zo stabiel mogelijk beeld te verkrijgen. Daarnaast is het voertuig uitgerust met speciale hardware om de camera's te bedienen en de data te registreren. 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.



Camera 3

camera 2

camera 1

camera 4

De camera's zijn geplaatst op een telescoopmast. De meethoogte van de camera's bedroeg 10,61 meter + NAP en de afstand tot de dijk 74 meter.

In onderstaande tabel zijn de specificaties van de camera's weergegeven

Camera nummer	Type camera	Lens / zoom	Thermische gevoeligheid	Video compressie	Functie in experiment
1	Thermovision PTZ 35-140	35x140 mm	65 mK	digital video compressie mpeg4	thermische detail opname van onderkant van de dijk dmv step and share
2	Thermovision PTZ 50 MS	26x optical zoom	Optische camera (daylight)	digital video compressie mpeg4	Optisch beeld kleuren video overzicht van de dijk met daglicht dmv step and share
3	Thermovision PTZ 50 MS	50 mm	85 mK	digital video compressie mpeg4	thermisch video overzicht van de gehele dijk dmv step and share
4	Thermovision SR50	50 mm	85 mK	digital video compressie mpeg4	Vaste thermische camera gericht op midden van de dijk

Specificaties hardware:

- 2 x 19 inch pc voor GV met 2x 400 GB int. harde schijf,
- 2x500 GB ext. harde schijf,
- nDVR, int. Cabeling Photon board,
- HSDPA UMTS router.

### 5.2.3. Meetresultaten

*Omstandigheden die de meetresultaten hebben beïnvloed;*

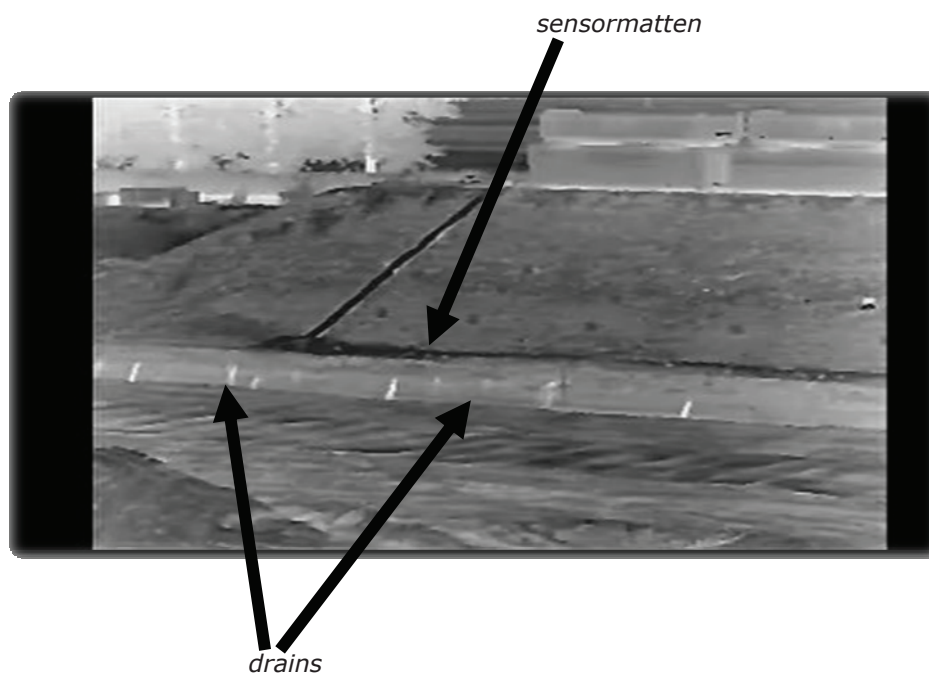
Tijdens de proef hebben zich de volgende omstandigheden voorgedaan die de meetresultaten en de betrouwbaarheid hiervan hebben beïnvloed:

*Storing meetsysteem*

Op 24 september om 21:00 (nog voor de start van de proef) is de hoofd voedingskabel losgeraakt en is het systeem over gegaan om de noodstroomvoorziening. Op 25 september om 9:00 uur is geconstateerd dat het systeem in storing stond. Om 10:00 uur was het systeem weer opgestart. Op 26 september om 10:00 uur bleek dat door de eerder stroomuitval de automatische positie van step and share van de camera's ontregeld is geraakt. Op 26 september om 11:45 zijn deze weer terug gezet in juiste positie.

*Andere sensoren*

De in de dijk aangebrachte sensoren verstoren in beperkte mate de thermische beelden. Bijvoorbeeld de glasvezelmat van Inventec / TenCate is in onze beelden duidelijk zichtbaar en heeft invloed op de gemeten infrarood intensiteit. Op onderstaand thermisch beeld zijn deze sensoren goed zichtbaar.

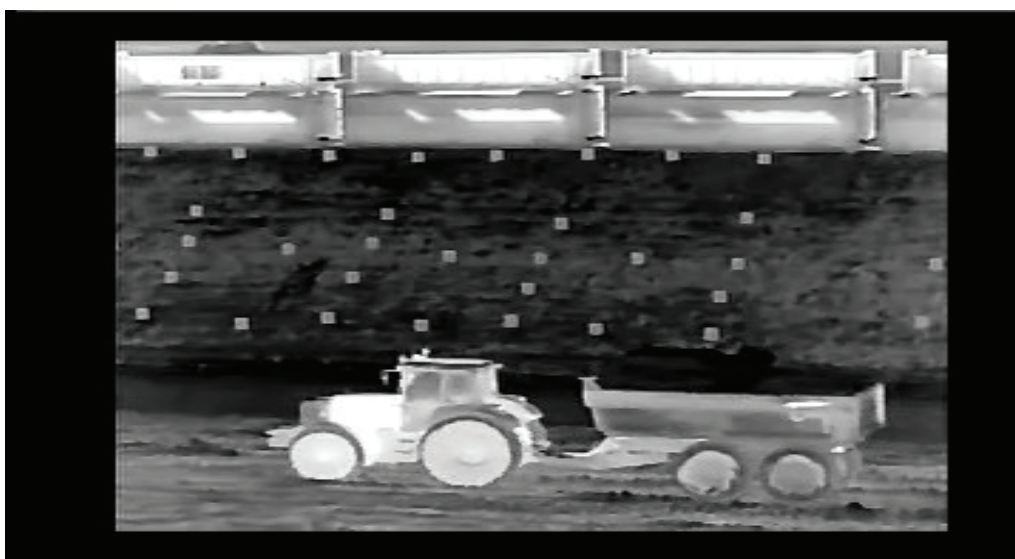


### *Oud drainage systeem*

Na het graven van de sloot bleek dat in het oorspronkelijke maaiveld nog een oud drainagesysteem aanwezig was. Op bovenstaande foto is duidelijk uitstromend water vanuit het drainagesysteem zichtbaar.

### *Rijdend materieel*

Voor het versnellen van het bezwijken van de dijk is een sloot gegraven aan de teen van de dijk. Hiervoor zijn verschillende grondverzet machines ingezet. De warmte uitstraling van het materieel verstoort het thermisch beeld.



### *Mist*

Dichte mist heeft een duidelijk negatieve invloed op de betrouwbaarheid van de metingen. Bij dichte mist, zoals tijdens deze proef, zijn betrouwbare metingen met thermische camera's niet mogelijk.

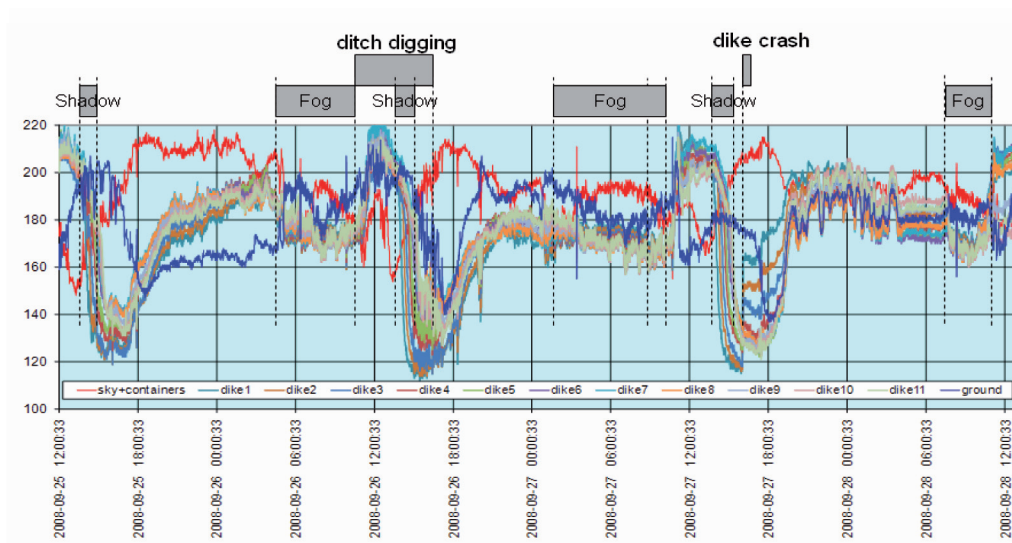
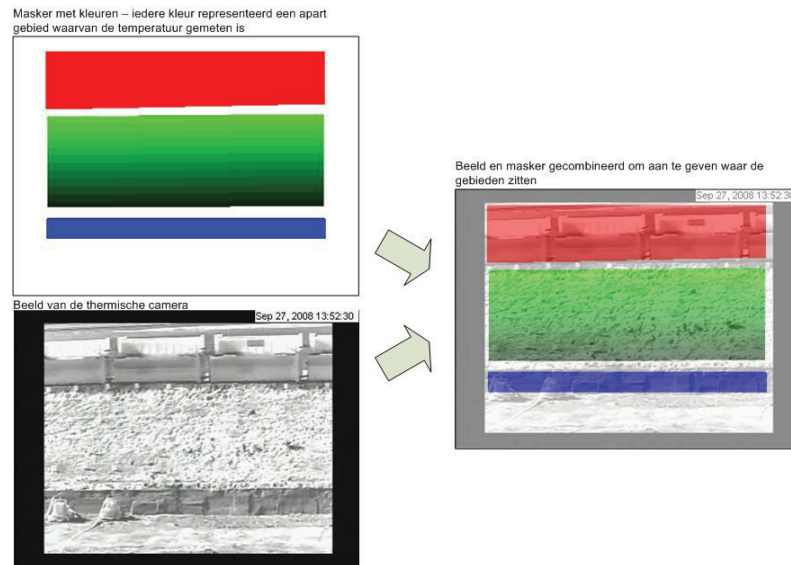
Echter uit statistieken blijkt dat de frequentie en duur van (dichte) mist periodes zeer beperkt zijn (percentage op het totaal aantal uren per jaar bedraagt naar verwachting < 2%). Daarnaast komt mist bij extreme weerssituaties zoals storm niet of nauwelijks voor.



## 5.2.4. Analyse

### 5.2.4.1 Temperatuursverandering

Voor de analyse van de beelden is in eerste instantie de intensiteit van infrarood van camera 4 verwerkt in een grafiek. Hiervoor is de dijk in horizontale segmenten opgedeeld.

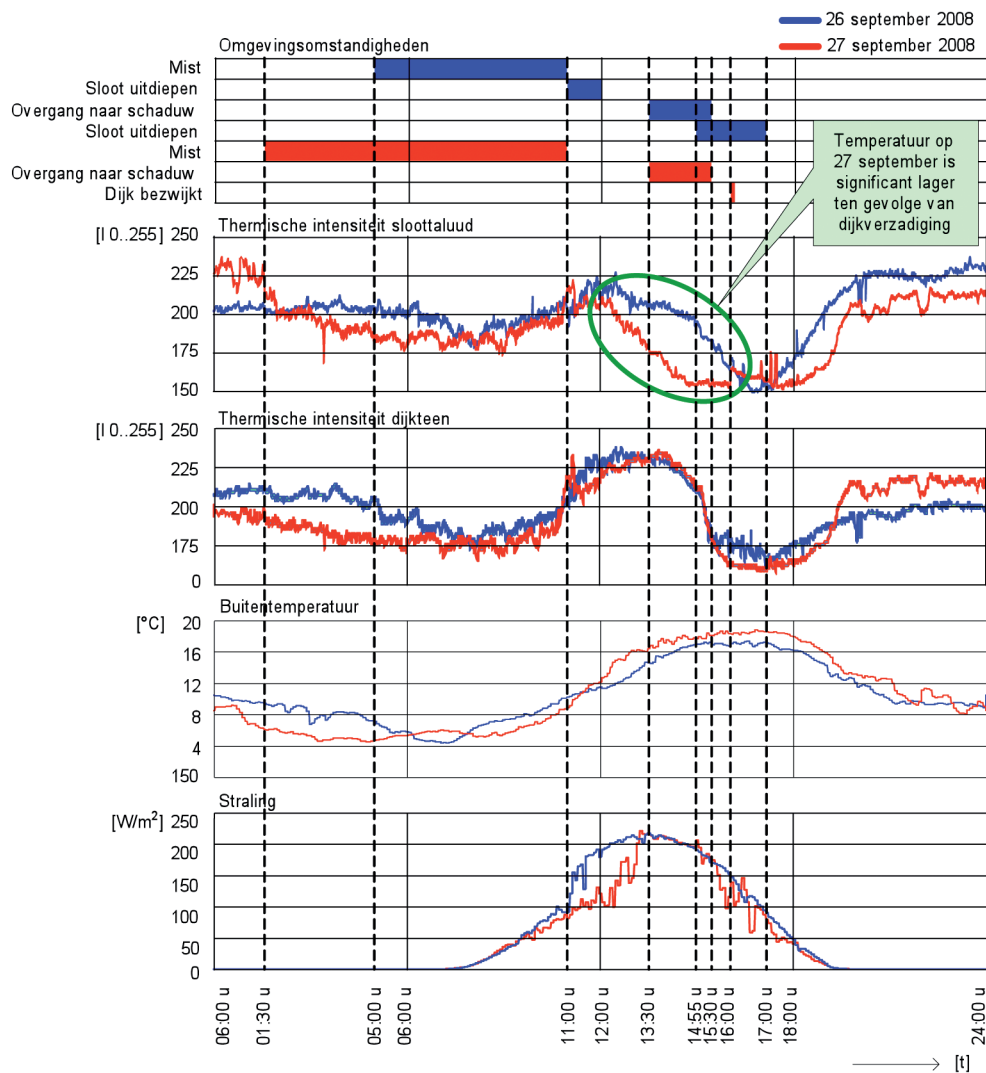


In bovenstaande grafiek is duidelijk te zien dat klimaatfactoren zoals mist, schaduw en de buitentemperatuur een duidelijke invloed hebben op de gemeten intensiteit van infrarood.

Om een beter beeld te krijgen van temperatuursverandering als gevolg van het bezwijkmechanisme zijn een aantal bewerkingen uitgevoerd. Heibij is gebruikt gemaakt van gegevens van het weerstation (Koenders instruments)

- 1) Voor het beperken van de invloed van klimatologische omstandigheden is de buitentemperatuur verdisconteerd in de intensiteit van infrarood.
- 2) Voor het beperken van warmte-uitstraling van materieel is een model ontwikkeld die aan de hand van herkenningpatronen bewegende objecten automatisch detecteert en verwijdert.

Deze bewerkingen levert het onderstaande resultaat op:



Temperatuursverandering als gevolg van het "bezwijkmechanisme" kunnen alleen ontstaan na het starten van het vullen van de zandkern. Op 27 september om 12:07 is gestart met het vullen van de zandkern. Temperatuursverandering van voor deze tijd worden niet veroorzaakt door het bezwijkmechanismen.

In de grafiek is een vergelijking gemaakt tussen de uitstraling van infrarood op 26 september als "referentiemeting" en 27 september de dag van het bezwijken. Uit de grafiek blijkt dat de intensiteit van infrarood in het sloot talud op de 27<sup>e</sup> vanaf globaal 12:10 significant afneemt ten opzichte van de 26<sup>e</sup>. Deze trend wordt niet gevonden in de teen van de dijk (eerste halve meter van het dijk talud). Conclusie is dan ook dat deze trend alleen kan zijn veroorzaakt door het vullen van de zandkern met water (en niet door externe invloeden van buitenaf, immers dan had deze trend ook zichtbaar moeten zijn in de eerste halve meter van het dijk talud).

Dit resultaat is vergeleken met de metingen van de camera's 1 en 2, echter door softwarematige problemen kon er geen goede analyses plaatsvinden. Hierdoor kunnen deze beelden helaas (nog) niet worden gebruikt voor bevestiging van de gevonden trend van camera 3. Verdere analyse van de metingen van camera 1 en 2 zullen binnenkort plaatsvinden. In verband hiermee is onderzocht of deze trend kan worden bevestigd door sensoren in de dijk (stijghoogte / temperatuur).

Voor een juiste interpretatie en analyse van de temperatuursverandering in de dijk als gevolg van het faalmechanisme is door ons het algehele verloop van de proef onderzocht.

Gebleken is dat de proef veel sneller is verlopen dan aanvankelijk werd gedacht. Verwacht werd dat door het geleidelijk vullen van de zandkern de druk op de ondergrond geleidelijk zou worden opgevoerd. Getracht is aan de hand van de gemeten stijghoogten in peilbuizen te bepalen tot welke hoogte de zandkern met water is gevuld.

Op 27 september om 12:07 is gestart met het vullen van de zandkern. Om 16:02 is de dijk bezweken. De hoeveelheid ingebracht water in deze periode bedroeg 126,3 m<sup>3</sup>.

Een deel van dit ingebrachte water is via het drainagesysteem weer afgevoerd naar de sloot. De gemeten stijghoogten van het water in peilbuis 14 loopt in deze periode op van ca. - 0,81 m t.o.v. NAP tot +1,59 m t.o.v. NAP (stijghoogte van water in de dijk toegenomen tot globaal +2,5 meter t.o.v. onderkant dijk). Echter uit de meetresultaten blijkt dat de gemeten stijghoogten in de peilbuizen deels beïnvloedt worden door de "overdruk" van het ingebrachte water. Tijdens het vullen van de zandkern is de pomp van het bezwijkmechanisme twee maal uit gezet.

De stijghoogte in de peilbuizen neemt hierna direct af, echter neutraliseert niet voordat de pompen weer worden aangezet. Hierdoor is het niet mogelijk om aan de hand van de gemeten stijghoogten de "werkelijke vullingsgraad" van de zandkern te bepalen. Opmerkelijk is dat op het moment van bezwijken van de dijk een zeer beperkte hoeveelheid water vrijkomt.

Onze verwachting is dat de werkelijke stijghoogte van het water in de dijk veel lager ligt dan in de peilbuizen is gemeten. Op onderstaande foto is te zien dat tijdens het bezwijken van de dijk een zeer beperkte hoeveelheid water vrijkomt.



Ook aan de hand van gemeten temperatuur in de dijk is gezocht naar bevestiging van de afname van temperatuur in het sloottalud. In de GeoBeads is een zeer beperkte temperatuursdaling terug te vinden vlak voor het moment van bezwijken.

De GeoBeads zijn echter niet in het dijkoppervlak gesitueerd en nemen hierdoor het verschil in temperatuur van het dijkoppervlak en de het ingebrachte water niet waar. Daarnaast dient te worden opgemerkt dat "de sensordichtheid en meetintensiteit" van thermische camera's veel hoger is dan van de geplaatste sensoren in de dijk. Het bovenstaande verklaard mogelijk waarom de GeoBeads een beperkte temperatuursafwijking weergeven.

Voor het vaststellen van een betrouwbaar herkenningspatroon voor toepassing van de IDS-sensortechniek voor dijkbewaking zal een relatie moeten worden gevonden tussen temperatuursverloop van het dijkoppervlak, de toename stijghoogte in de dijk en toename waterspanning in onderliggende slappe lagen. Gezien het bovenstaande wordt het maken van een betrouwbaar herkenningspatroon aan de hand van de resultaten van deze proef nog nader onderzocht.

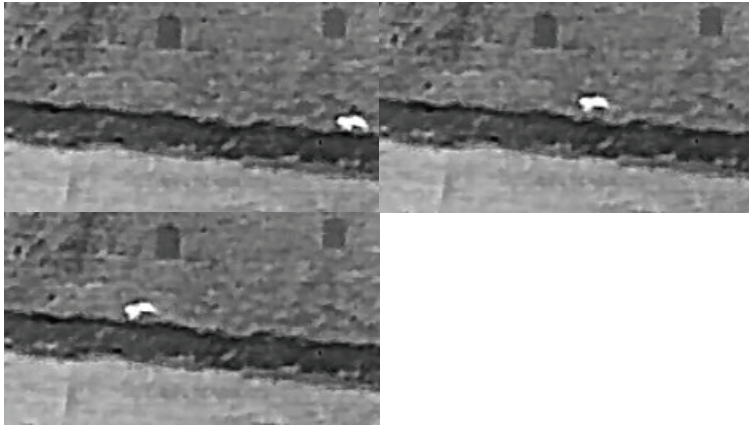
#### **5.2.4.2 Vervorming**

Door de camera's wordt duidelijke vervorming van het dijklichaam waargenomen echter door de draaibeweging van de camera's 1 en 2 wordt de stabiliteit van de opstelling beïnvloed (trillingen). De nauwkeurigheid van deze camera's bleek onvoldoende om vervorming van het dijklichaam in millimeters te kunnen vaststellen.

Met een "vaste" camera opstelling, een lens met een grotere focale afstand kan vervorming zelfs op kilometers afstand nauwkeurig worden bepaald. De kosten van deze camera's zijn echter aanmerkelijk hoger en daardoor niet aangekocht voor het doen van dit experiment.

#### **5.2.4.3 Overige waarnemingen**

Naast temperatuur en vervorming zijn ook "knaagdieren" op de dijk geconstateerd. Op onderstaande foto's is duidelijk te zien hoe een haas zich 's avonds zich op de dijk vermaakt:



Naast het vaststellen van temperatuursverandering en vervorming als gevolg van bezwijkmechanismen kan het systeem worden gecombineerd voor muskus- en beverrattenbestrijding. De hollen van muskusratten en beverratten kunnen automatisch worden gedetecteerd. Tevens zijn kansen te behalen door het systeem bijvoorbeeld te combineren voor ondersteuning in kustbewaking en vaarwegbeheer.

#### **5.2.5. Conclusies**

Door camera 4 is een duidelijke afname van temperatuur in het sloottalud waargenomen als gevolg van het bezwijkmechanisme (het vullen van de zandkern met water). Deze trend wordt waargenomen direct vanaf het moment van vullen van de zandkern.

Door de relatief hoge snelheid en korte duur van de proef is deze trend waar te nemen globaal vier uur voor het bezwijken van de dijk. In een werkelijke situatie (bij een stabiele dijk die door extreem hoog water wordt overbelast) zal deze periode eerder zijn (verwachting 1 á 2 dagen).

Door softwarematige problemen kon deze trend (nog) niet worden bevestigd door de andere camera's.

Deze trend wordt niet bevestigd door de temperatuursensoren in de dijk. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door het verschil tussen de locatie van meten (in en op de dijk) en het verschil in sensordichtheid/mmeetintensiteit die bij thermische camera's veel hoger is dan die van de overige temperatuursensoren in de dijk.

De betrouwbaarheid van deze waarneming zou zijn toegenomen indien het bezwijken van de dijk geleidelijker had plaatsgevonden.

Vervorming is duidelijk waargenomen. Voor een nauwkeurige bepaling van het aantal millimeters vervorming is een meer geavanceerdere camera en een "vaste" opstelling noodzakelijk.

### 5.3 Deelexperiment Dike Survey: Optische detectie in de IJkdijk

Auteurs: ing. W.M. Hauptmeijer, ing. M. Th. van Kelegom (Dike Survey)

#### **5.3.1. 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.

#### **5.3.2. Doelstelling bij deelname aan de macrostabiliteitsproef**

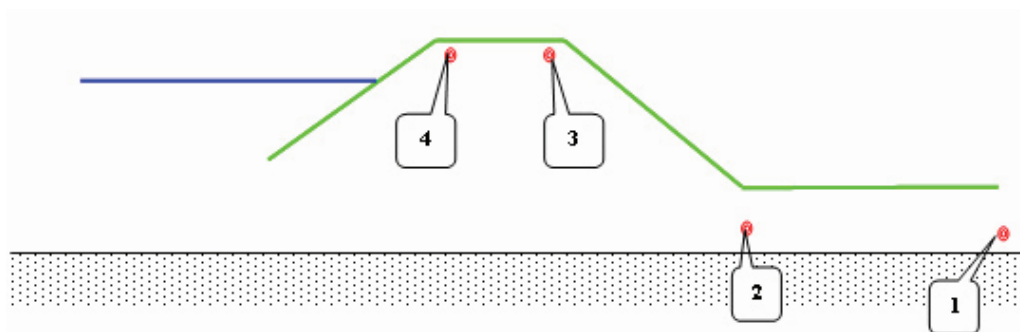
Deelname aan de IJkdijk is uitgevoerd vanuit een tweetal gezichtspunten. Enerzijds vanuit het object, de (ijk)dijk en anderzijds vanuit de optiek van de beheerder. Hierbij is gebruik gemaakt van beschikbare literatuur, workshop (11-04-2006), cursus "Veiligheid Nederland in Kaart" en gesprekken met dijkbeheerders.

#### **De (IJK)dijk**

Op basis van genoemde bronnen hebben wij geconcludeerd dat er in alle gevallen sprake is van een beschadiging van het dijklichaam met als gevolg een lichte, matige of grote verschuiving van (delen van) het dijklichaam of het achterland. Voor de beheerder is het van belang dat bewegingen in een dijklichaam tijdig worden gesignaleerd, zodat hij voldoende tijd heeft om de geëigende maatregelen te treffen.

Ten aanzien van de mogelijke bewegingen zijn er gezien in het dwarsprofiel van een dijklichaam een viertal potentiële locaties die gevoelig zijn voor (onbedoelde) bewegingen. Het betreft:

1. het opbollen van het achterland al dan niet in combinatie met piping
2. het afschuiven van de teen van de dijk aan de landzijde;
3. het optreden van scheuren in de binnenkruin van de dijk met daarop volgend afschuiving van het talud;
4. het optreden van scheuren in de buitenkruin van de dijk met daarop volgend afschuiving van het talud bij forse daling van de waterspiegel.



De sensor- en communicatietechniek die wij gebruikt hebben heeft zich op de aspecten 2, 3 en 4 geconcentreerd. In alle gevallen is er sprake van enige beweging en/of trilling in het dijklichaam en/of de ondergrond. Hierbij is enerzijds de verkregen data beschikbaar gesteld voor de doelen van de IJkdijk (monitoring) en anderzijds gebruikt als pilot voor het opzetten van een dijkbewakingsstelsel ter ondersteuning van de taken van de dijkbeheerder.

### **De dijkbeheerder**

Bij de monitoring van dijken is het van belang dat de systematiek van monitoring wordt afgestemd op de draaiboeken, calamiteitenplannen en hoogwaterwaarschuwingssystematiek van de dijkbeheerders. Alhoewel er op dit gebied nog geen uniformiteit is in Nederland, kan wel gesteld worden dat alle dijkbeheerders beschikken over een ruimte die als meldkamer dienst doet (kan doen). Dit betekent dat dijken gemonitord worden vanuit een locatie bij de desbetreffende dijkbeheerder. Bovendien maken de dijkbeheerders ter voorbereiding op hoogwater en bij calamiteiten gebruik van topografische kaarten. Dit betekent dat het van belang is de monitoring op deze werkwijze van de beheerder af te stemmen. Gelet op de verantwoordelijkheid van de dijkbeheerder moet het systeem, indien gewenst, door de beheerder kunnen worden gereset. Dit betekent dat de communicatie tussen het detectiesysteem in de dijk en de beheerder in twee richtingen moet kunnen worden uitgevoerd. Naast het afgeven van een visueel signaal is er bij de beheerder ook behoefte dat het systeem, naar keuze, tegelijkertijd met het visuele signaal een geluidssignaal afgeeft. Niet in de laatste plaats zijn dijkbeheerders geïnteresseerd in een kosteneffectief systeem.

### **Doelstelling**

Gegeven de bovenstaande problematiek is voor de pilot van de macrostabiliteitsproef de volgende driedelige doelstelling geformuleerd:

*De IJkdijk geeft inzicht in het functioneren van het detectiesysteem van DikeSurvey/Lightspeed met het doel:*

- *bewegingen en trillingen in de dijk en/of ondergrond te kunnen monitoren;*
- *bewegingen en trillingen in de dijk en/of ondergrond tijdig te signaleren, deze signalen door te geven aan de meldkamer, de signalen in een topografische omgeving kenbaar te maken in beeld en geluid, afgestemd op het draaiboek van de dijkbeheerder;*
- *inzicht te leveren in de kosteneffectiviteit van het systeem dat wordt ingezet.*

Cruciaal in de werkwijze van DikeSurvey / Lightspeed is de verkenning van het onbekende. Wij leveren een systeem dat metingen verricht op destructiegevoelige plaatsen in het dijklichaam, maar wij kennen de uitkomsten niet. Het is geen dichtgetimmerd product, maar veeleer een zelflerend instrument.

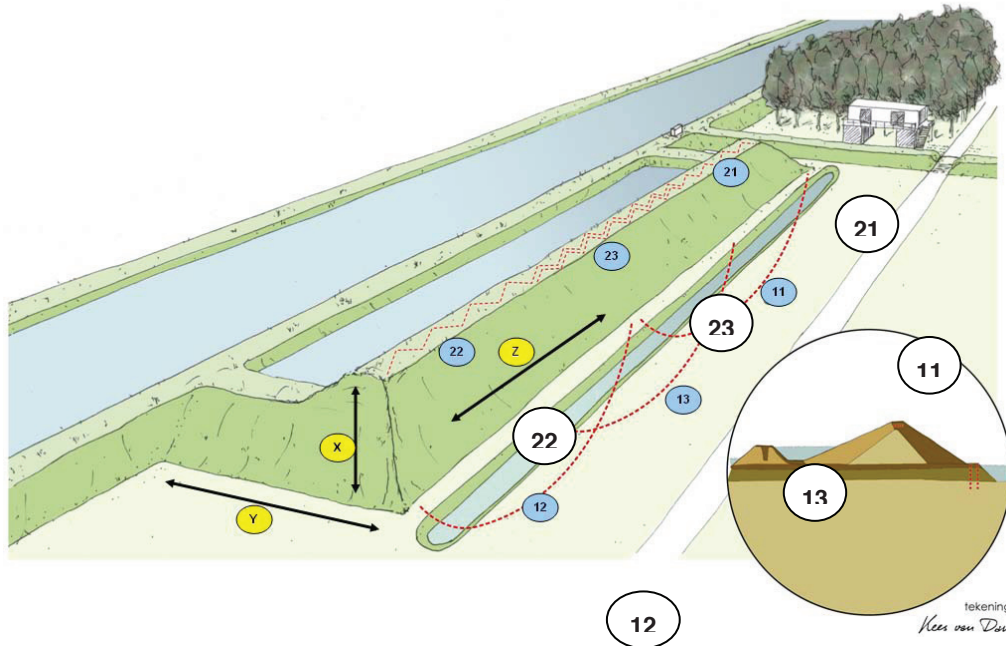
### **5.3.3. Instrumentatie**

#### **Systematiek**

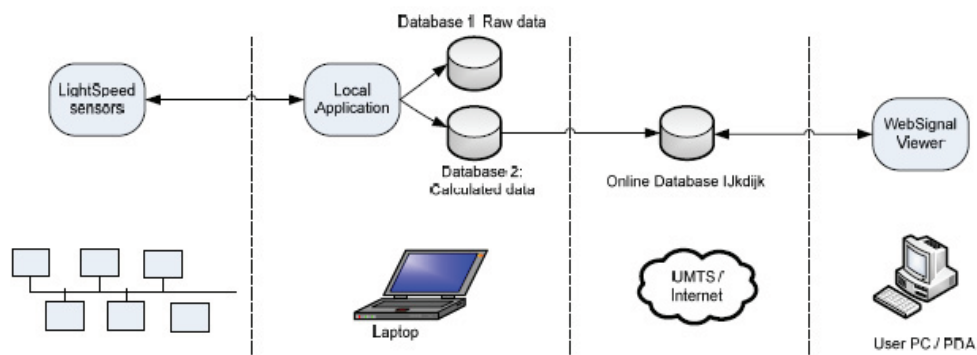
Met betrekking tot de IJkdijk heeft DikeSurvey een compleet pakket ingezet voor het monitoren en detecteren van bewegingen in en rond dijklichamen. Voor toepassing bij de macrostabiliteitsproef bestond het product van DikeSurvey/Lightspeed uit 6 detectiekabels, 6 detectie-units, een laptop in de controlekamer van Deltares, een GPRS/UMTS-box voor de verbinding met onze server en een Webapplicatie die, vooruitlopend op de nieuwe Europese INSPIRE-richtlijnen, is afgeleid van de Sensor Web Enablement (SWE) standaarden (zie figuur 2).

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 kabel als sensor.

Er wordt licht door de kabel (de optische geleider) gestuurd. Aan het eind wordt het licht ontvangen en vergeleken met het signaal dat aan het begin is verstuurd. Bij mechanische vervorming van de kabel vindt detectie plaats.



Figuur 1 Plaats van de detectiekabels in de bodem (kabels 11 t/m 13) en in de kruin van de dijk (kabels 21 t/m 23) en de verplaatsingsrichtingen X, Y en Z



Figuur 2 Technisch concept (bron: RealDetection)



### 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 de experimenten is in de detectie-units het lichtsignaal ca. 2000 à 3000 keer per seconde gescand en opgeslagen. Vanuit de detectie-units is ca. 2 à 3 keer per seconde de relatieve beweging van de detectiekabel als ruwe data opgeslagen in de laptop in database 1. Vanuit database 1 zijn de ruwe signalen gefilterd, waarbij 5 grootheden één keer per ca. 10 seconde zijn opgeslagen in database 2. De signalen uit database 2 zijn via een vaste verbinding in de controlekamer aangeboden aan TNO. Er is echter nog steeds sprake van ruwe data die nog verder geanalyseerde en geïnterpreteerd moet worden
- de detectiekabels en -units 11 t/m 13 zijn in werking gesteld op 25 juni 2008 waarbij de gegevens continu zijn geregistreerd t/m 27 september 2008 16.02 u;
- de detectiekabels en -units 21 t/m 23 zijn in werking gesteld op 23 september 2008 waarbij de gegevens continu zijn geregistreerd t/m 27 september 2008 16.02 u.
- per kabel zijn in database 2 vijf grootheden vastgelegd, te weten:
  - verplaatsing in de x-richting in mm;
  - verplaatsing in de y-richting in mm;
  - verplaatsing in de z-richting in mm;
  - frequentie in Hz;
  - amplitude in stappen van 0 t/m 255 (voor de ruwe data).

### Te detecteren fenomenen

De aangeboden sensortechniek heeft zich in eerste instantie 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 geregistreerd.

#### 5.3.4. Installatie

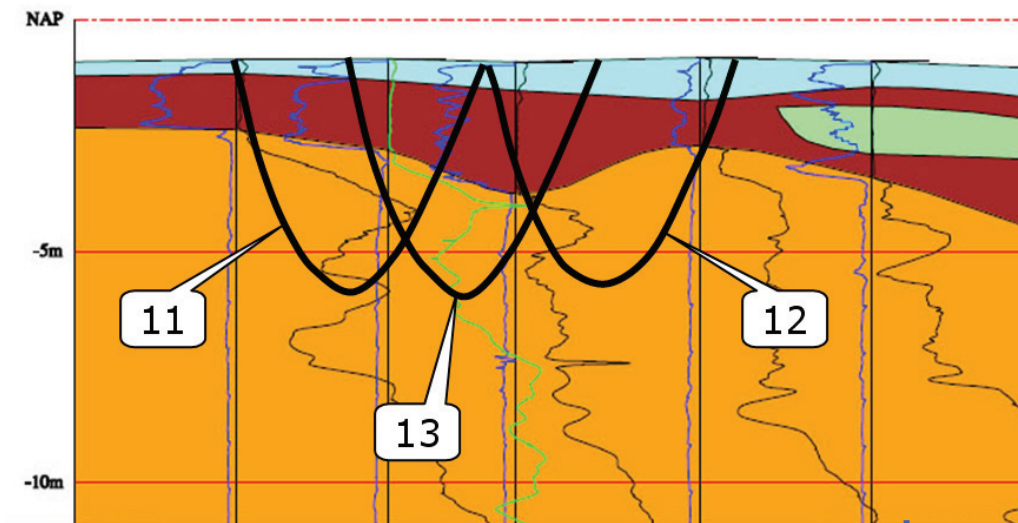
Voor de uitvoering van het monitorings- en bewakingsstelsel zijn de volgende onderdelen geïnstalleerd:

- a. detectiekabels: de drie detectiekabels in de bodem (nrs. 11 t/m 13) zijn aangebracht middels de techniek van gestuurd boren (zie foto in figuur 3 en schets in figuur 4) in de periode van 25 t/m 27 september 2007. De exacte plaats van de kabels in de bodem is vastgelegd op revisietekeningen. De detectiekabels in de kruin van de dijk (nrs. 21 t/m 23) zijn handmatig aangebracht tijdens de bouw van de IJkdijk op dinsdag 16 september 2008. Deze kabels zijn over een breedte van 2 m in het horizontale vlak in een zigzag lijn aangebracht waarbij de hoek t.o.v. de lengterichting van de IJkdijk 45° bedroeg (zie foto in figuur 5);
- b. per kabel is een detectie-unit aangebracht; totaal 6 units;
- c. in het controlecentrum is één laptop met GPRS/UMTS-box geplaatst. Via een vaste verbinding is de data overgedragen aan de computers van TNO en via de communicatiebox is de data via een draadloze verbinding overgezonden naar de server van DikeSurvey;
- d. op de server van DikeSurvey draaide een webapplicatie waarbij het proces en het bezwijken van de IJkdijk vanaf 24 september 2008 voor geautoriseerde personen on-line was te volgen.

De innovatieve detectiekabels en detectie-unit zijn geleverd door Lightspeed Systems. De webapplicatie is gebouwd door Real Detection. De gestuurde boring is uitgevoerd door de firma Van Gelder.



Figuur 3 Boorinstallatie voor het inbrengen van de detectiekabels 11 t/m 13



Figuur 4 Positie van de detectiekabels 11 t/m 13 in de bodem



Figuur 5 Handmatige installatie van de detectiekabels 21 t/m 23 in de kruin van de dijk

### **5.3.5. Meetresultaten Functioneren van de systematiek**

- Geconstateerd kan worden dat alle apparatuur gedurende de gehele proef optimaal heeft gefunctioneerd;
- Geconstateerd kan worden dat met name de detectiekabels 11 t/m 13, die reeds één jaar in de bodem zaten, goed hebben gefunctioneerd;
- Er is een schat aan informatie verkregen. Deze rapportage wordt gezien als een tussentijds verslag. Verder analyse en interpretatie van de verkregen data vraagt nog de nodige tijd.

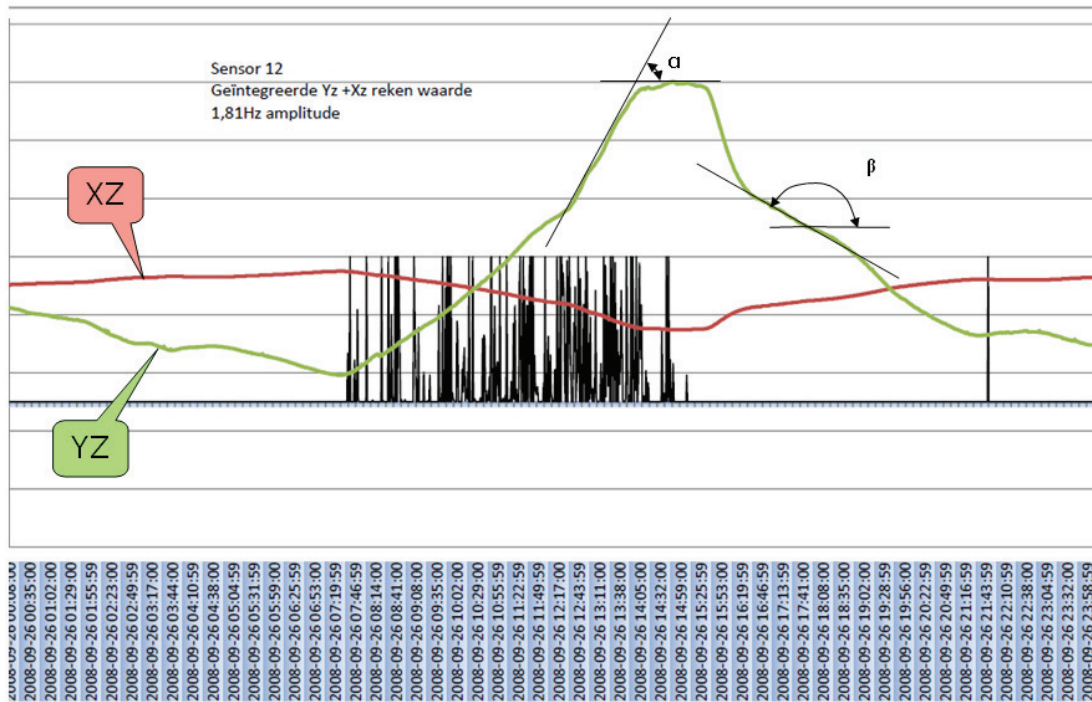
### **Meetresultaten**

Er zijn meetresultaten beschikbaar van de modules 11 t/m 13 over de periode van 16 t/m 27 september 2008. Dit betekent dat er gemeten is gedurende de laatste fase van de bouw van de IJkdijk van 16 t/m 24 september en gedurende de uitvoering van de macrostabiliteitsproef van 25 t/m 27 september 2008. Van de modules 21 t/m 23 zijn meetresultaten beschikbaar van 24 t/m 27 september.

### **Toelichting op de grafieken**

In de grafieken is met een rode lijn de verticale verplaatsing (XZ) weergegeven en met een groene lijn de horizontale verplaatsing haaks op de lengte-as van de IJkdijk (YZ). Op de Y-as van de grafieken is de eenheid van verplaatsing weergegeven

waarbij geldt dat 100 eenheden overeenkomen met ca. 50 mm. Verder is in de grafiek de amplitude weergegeven van de frequentie van 1,81 Hz (zwarte lijn). De hellingshoeken ( $\alpha$  en  $\beta$ ) van de opgaande resp. neergaande YZ-lijn zijn voor de interpretatie van de verplaatsingen van belang. De grootte van deze hellinghoeken zijn van invloed op de berekening van de verplaatsingen. Op de X-as van de grafieken is de datum en tijd vermeld. In onderstaande grafiek in figuur 6 wordt het bovenstaande geïllustreerd.



Figuur 6 Toelichting op de gepresenteerde gegevens

Metingen zijn uitgevoerd met behulp van de kabels 11 t/m 13 die reeds in de bodem aanwezig waren en de kabels 21 t/m 23 die op 16 september in de kruin van de IJkdijk zijn aangebracht en vanaf 23 september actief zijn gaan meten.

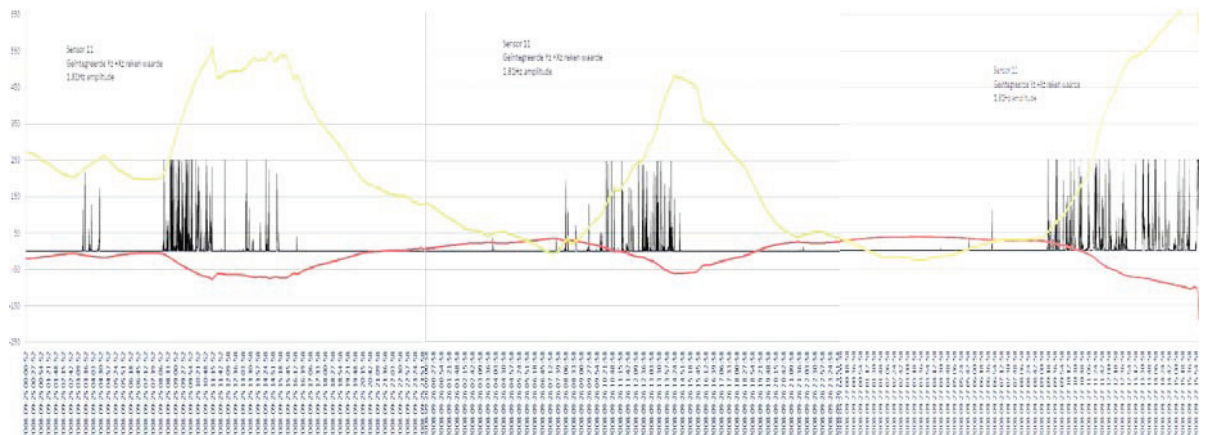
Hieronder worden per sensor de meetresultaten weergegeven over de periode van het experiment (25 t/m 27 september 2008). Voor een meer gedetailleerde weergave van de grafieken zijn in bijlage 1 de meetresultaten per sensor per dag opgenomen.

### Sensoren 11, 12 en 13

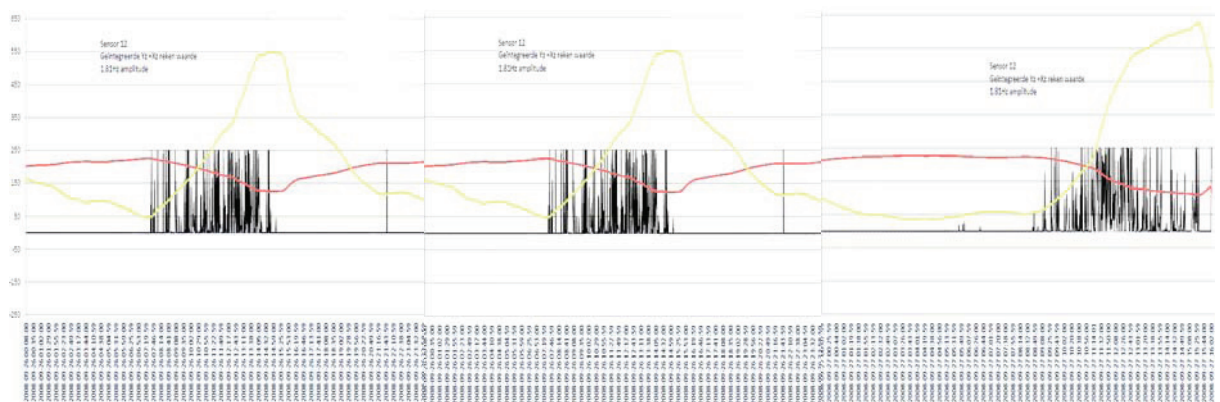
De sensoren 11, 12 en 13 in de bodem van de IJkdijk geven zowel in horizontale als in verticale richting verplaatsingen te zien. In de grafieken is duidelijk waar te nemen wanneer een specifiek onderdeel van het experiment wordt uitgevoerd, zoals het vullen van het bassin op 25 september, het graven en verdiepen van de sloot op 25 en 26 september en het vullen van de zandkern op 27 september. Opmerkelijk zijn de details van de metingen zoals het registreren van bewegingen in de bodem in de nachtelijke uren, waarin er geen bouw- of experimentele activiteiten gaande zijn. Vermoedelijk zijn dit bewegingen in het dijklichaam en de bodem als gevolg van het consolidatieproces. Verder is het opmerkelijk dat voorafgaand en tijdens bewegingen van het dijklichaam of de bodem de amplitude van de frequentie van

1,81 Hz fors toeneemt. In de grafieken is daarom de amplitude van deze frequentie weergegeven.

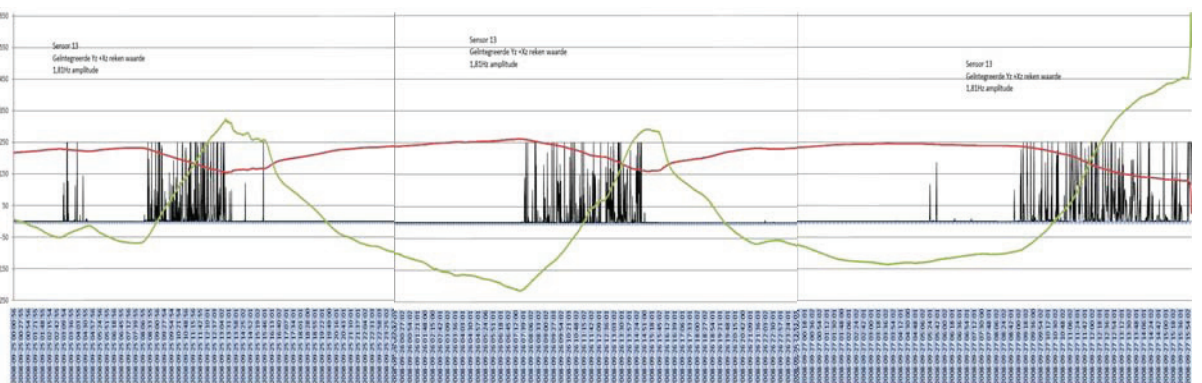
Als de grafieken van bijvoorbeeld de 2<sup>e</sup> dag (26 september) in detail worden bestudeerd kan zelfs worden vastgesteld wanneer de lunchpauze wordt gehouden. Op de 3<sup>e</sup> dag van de macrostabiliteitsproef is er sprake van een trendbreuk in de grafieken die rond 13.30 u valt waar te nemen.



Figuur 7 Meetresultaten sensor 11



Figuur 8 Meetresultaten sensor 12

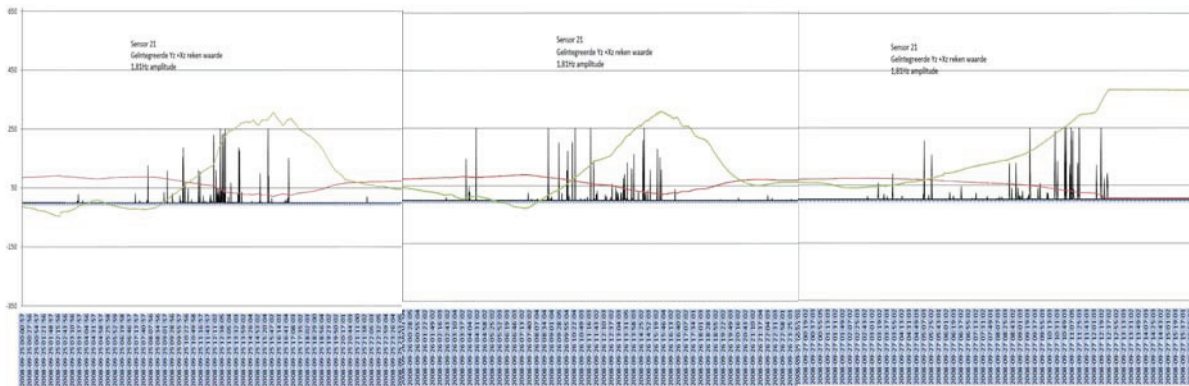


Figuur 10 Meetresultaten sensor 13

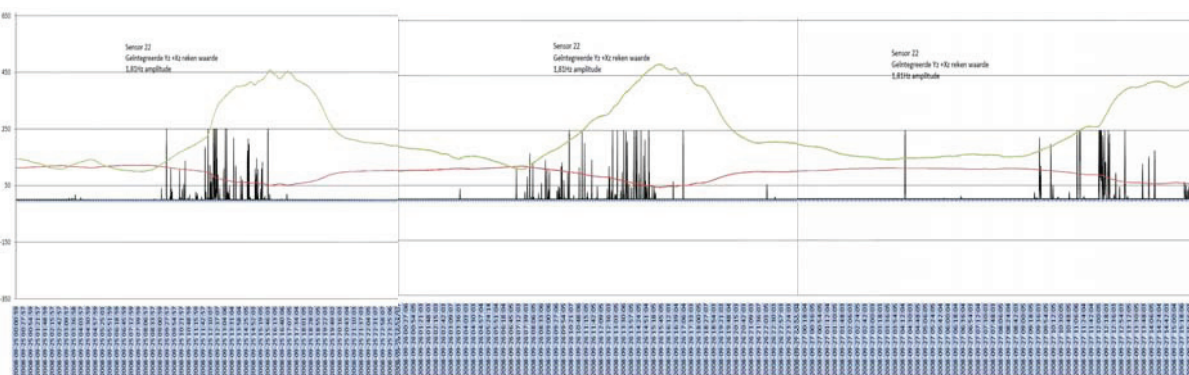
### Sensoren 21, 22 en 23

De sensoren in de kruin van de IJkdijk laten bij een frequentie van 1,81 Hz bij bewegingen en trillingen een duidelijke uitslag van de amplitude zien. Deze uitslag is bij de sensoren 21 en 22 minder heftig dan bij de sensoren in de bodem. Sensor 23, midden in de kruin van de IJkdijk, laat ook intensieve uitslagen van de amplitude zien.

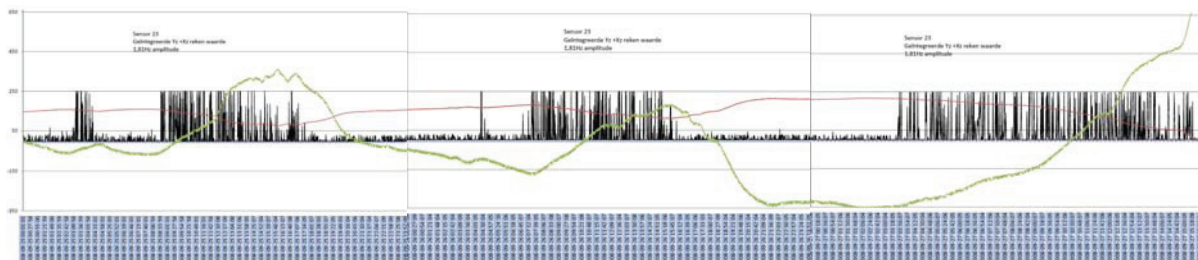
Opmerkelijk is de registratie van het aan- en uitzetten van de pompen op de 3<sup>e</sup> dag van het experiment. Dit wordt geregistreerd door sensor 22 aan de zuidkant van de kruin van de dijk. In de grafiek is tussen 12.00 en 16.00 u. dit effect weergegeven in de vorm van flauwe "kamelenbulten". Dit betekent dat het pompen van water in de dijk, bij de kruin leidt tot kleine opwaartse verplaatsingen, ondanks het feit dat deze sensoren niet in aanraking zijn geweest met het ingepompte water.



Figuur 11 Meetresultaten sensor 21



Figuur 12 Meetresultaten sensor 22



Figuur 13 Meetresultaten sensor 23

### 5.3.6 Conclusies

Op grond van de uitgevoerde berekeningen en analyses kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- het gebruikte sensorsysteem van DikeSurvey/Lightspeed is een voor het dijklichaam niet destructieve meetmethode;
- het systeem omvat meer dan alleen sensoren. Er is sprake van het prototype van een compleet monitoringssysteem vanaf de sensoren via het internet tot aan de potentiële eindgebruiker, waar deze zich ook maar bevindt;
- bij alle metingen is geconstateerd dat trillingen in de bodem zich het best manifesteren bij een frequentie met een bandbreedte van 0,3-2,18 Hz. Om deze reden wordt op dit moment de frequentie van 1,81 Hz als representatief geacht om trillingen in de bodem te registreren. Wij noemen dat de grondtoon;
- opmerkelijk is dat bewegingen in de bodem worden ingeleid door een toename van de amplitude van de frequentie van 1,81 Hz (de grondtoon);
- gedurende de periode van het experiment tot vlak voor het moment van bezwijken wordt een verticale verplaatsing van de IJkdijk van ca. 500-700 mm geregistreerd;
- gedurende de periode van het experiment tot vlak voor het moment van bezwijken wordt een horizontale verplaatsing van de IJkdijk (haaks op de dijk) van ca. 1000-1200 mm geregistreerd;
- over de gehele meetperiode wordt een uitdijende en terugverende verplaatsing gemeten van ca. 20-30 mm gemeten. Wij noemen dat het "ademen" van de IJkdijk. Mogelijk is er een relatie met de schommelingen van dag- en nachttemperatuur;
- als fenomenen die kunnen dienen als een "early-warning-system" worden aangemerkt:
  - het toenemen van de amplitude van de grondtoon voorafgaand aan een beweging in de bodem;
  - de trendbreuk in de golfbewegingen van de metingen op de 3<sup>e</sup> dag van het experiment (27 september 2008) om ca. 13.30 u;
  - de gevoeligheid van het meetsysteem door het registreren van mm verplaatsing.

### 5.3.7 Tot slot

De eerste metingen zijn door ons gestart op 25 juni 2008. Er is vanaf die datum continu ruwe data opgeslagen in de modules 11 t/m 13 tot aan het moment van bezwijken van de IJkdijk. Dit betekent dat er meetdata beschikbaar is waarbij onderscheid kan worden gemaakt in drie perioden, te weten:

- Periode 1: dit is de periode van 25 juni t/m 4 augustus 2008, waarin sprake is van een relatieve rust op het bouwterrein.
- Periode 2: dit is de periode van 4 augustus t/m 24 september 2008. In deze periode is de IJkdijk gebouwd.

- Periode 3: dit is de periode van 25 september t/m 27 september 2008. In deze drie dagen is het experiment van de macrostabiliteitsproef uitgevoerd. Met name analyse van de meetdata over periode 2 (bouw van de IJkdijk) kan nog interessante informatie opleveren over de opgetreden zettingen. Deze bewerkingen zullen in een later stadium worden uitgevoerd.



#### 5.4 Deelexperiment Flood Control 2015: Robuuste Sensornetwerken

Auteurs: Mike van der Werf, Rogier Westerhoff (Deltares)

##### **5.4.1. Inleiding**

Om de projectdoelen in het Flood Control 2015 Proof of Concept Robuuste sensornetwerken te ondersteunen met een case-study is er gekozen om mee te draaien in de Macrostabiliiteitsproef. Voornaamste doel was om te kijken naar de grote verschillen tussen de sensoren wat betreft:

- aansturing / drivers
- datatransport
- datastandaarden
- communicatie
- meetprincipe

Om zodoende dichter te komen bij het oplossen van nu spelende problemen, zoals

- connectiviteit
- informatie overdracht
- real time overdracht naar meerdere instanties
- koppeling met andere sensor(system)en
- koppeling met modellen en andere bronnen
- etc.

##### **5.4.2. Data acquisitie**

In totaal zijn voor deze pilotstudie negen sensoren in de IJkdijk geplaatst, verdeeld over drie locaties. Dit betekent dat er per locatie drie typen sensoren zijn geplaatst:

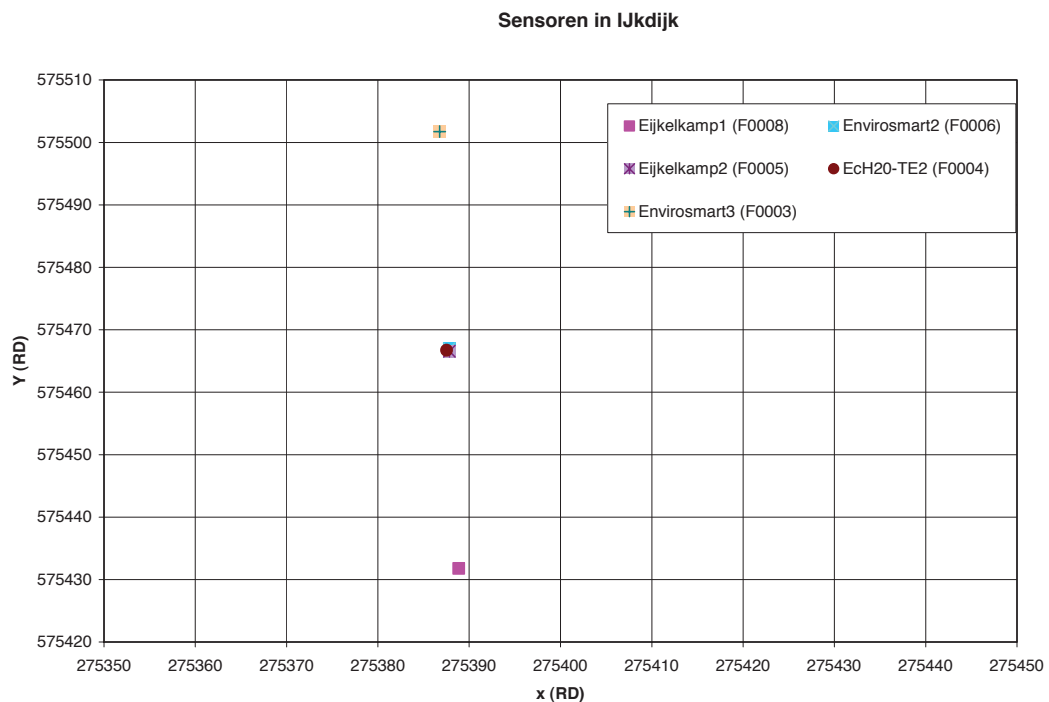
- ECH2O-TE sensor, welke conductiviteit, bodemvocht en temperatuur meet
- E-soil MCT, welke conductiviteit, bodemvocht en temperatuur meet
- EnviroSmart, welke conductiviteit en bodemvocht meet, op vier verschillende dieptes.

De verdere specificaties en verslaglegging over deze sensoren zijn te vinden in Bijlage 1. De coördinaten van de sensor zijn weergegeven in Tabel 1. De vier sensoren die tijdens de meetproef zijn uitgevallen of zijn gestopt met meten, zijn in deze tabel in rood weergegeven en worden niet verder behandeld in dit verslag. Omdat de EnviroSmart op vier dieptes meet, zijn deze sensoren op de vier meetdieptes weergegeven.

Met alle werkende sensoren is real time gemeten van 24 september 20:02 tot aan 29 september 12:04. De locaties van de sensoren (ook in Tabel 1 weergegeven) zijn geplot in Figuur 1. De resultaten van deze metingen waren te zien op de website <http://anysense.ict.tno.nl/cgi-bin/anysense/main.cgi>. Deze website blijft ook na dit project in de lucht om als showcase van het project te dienen.

Sensornaam	Naam Macrostab proef	X (RD)	Y (RD)	Z maaiveld m + NAP	Diepte sensor tov maaiveld	opmerking
EnviroSMART1	F0009	575431,6	275389,2	3,80	-1,0 / -1,5 / -2,0 / -2,4	Stukgegaan
E-soil MCT1	F0008	575431,8	275388,9	3,80	-1,6	
EcH20-TE1	F0007	575431,3	275389,0	3,84	-1,2	Stukgegaan
EnviroSMART2	F0006	575467,0	275387,8	3,75	-1,3 / -1,8 / -2,3 / -2,7	
E-soil MCT2	F0005	575466,6	275387,8	3,76	-1,1	
EcH20-TE2	F0004	575466,7	275387,5	3,69	-1,1	
EnviroSMART3	F0003	575501,7	275386,8	3,71	-1,7 / -2,2 / -2,7 / -3,1	
E-soil MCT3	F0002	575501,8	275386,6	3,67	-1,3	Stukgegaan
EcH20-TE3	F0001	575502,0	275386,6	3,67	-1,3	Stukgegaan

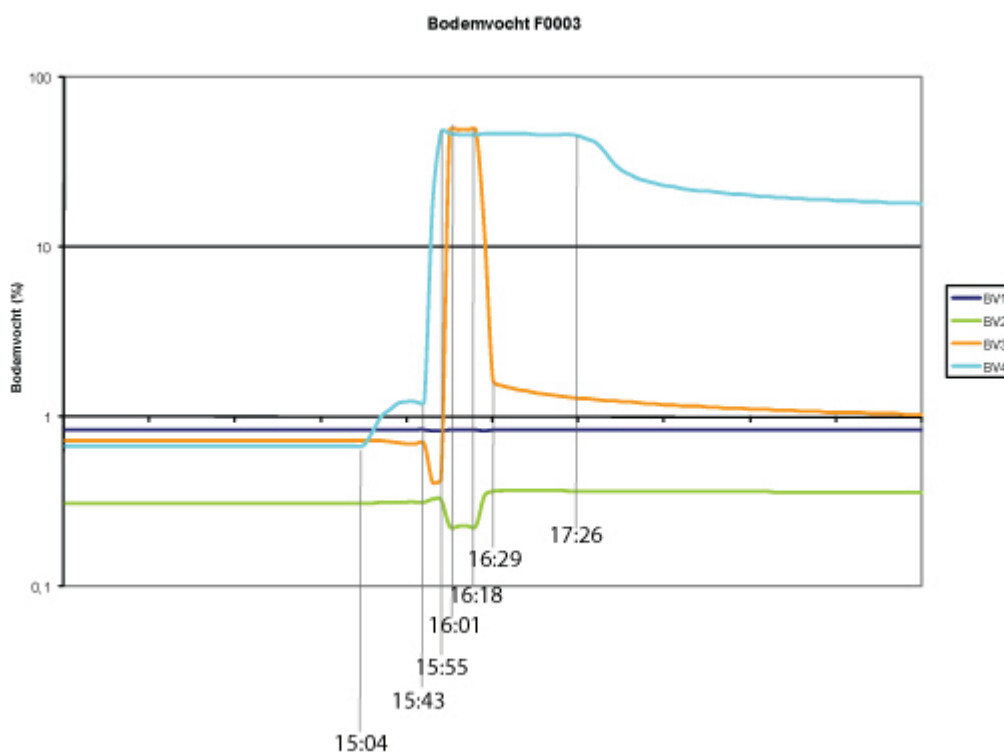
Tabel 1 Coördinaten sensor



Figuur 1 Locaties van de sensoren die gebruikt worden voor verdere analyse

Zoals bekend verondersteld is het moment van bezwijken van de proef zaterdag 27 september om 16:02. We kijken naar de meest interessante resultaten, deze zijn de meest noordelijk gelegen sensor, EnviroSMART3 (F0003), zie Figuur 2. Hierbij is alleen de gemeten bodemvocht weergegeven. Bij deze sensor zijn de gemeten verschillen het grootst. De diepst gelegen sensor, op 3,1 m onder het maaiveld, toont een uur voor het bezwijken een opvallende verhoging van bodemvocht. Ook nog voor het bezwijken zijn in alle sensor patronen veranderingen in bodemvocht waar te nemen. Deze zijn wel op elke diepte verschillend. Opvallend genoeg zijn er in de noordelijke sensor veel meer verschillen waar te nemen dan in de middelste en zuidelijke sensoren (hiervan zijn geen figuren getoond). De middelste sensor

(F0006) – waar de dijk is bezweken – toont slechts minieme verschillen in bodemvocht vlak voor bezwijken. In hoeverre dit verschil afhankelijk is van opbouw, drainage, pompgegevens is nog niet bekend.



Figuur 2 Resultaten van de meest noordelijk gelegen sensor (EnviroSmart3 / F0003)

### 5.4.3. Interpretatie

Interpretatie volgt pas als alle data compleet is en het liefst in samenwerking met andere partners in de IJkdijk, zodat meerdere sensor resultaten, pompgegevens, drainagegegevens, etc. bij elkaar kunnen worden gelegd.

### 5.4.4 Specificaties Sensoren

Voor de test op de IJkdijk zijn drie types sensoren uitgezocht.

#### **e + Soil MCT sensor / logger van Eijkelkamp ( optisch)**

Range temp.	-20 / 80C
temp.	0.01 C
Accuracy temp.	+/- 0,5 C
Electrical Conductivity	0 to 5 mS/cm
Resolution EC	0.01 mS/cm
Accuracy EC	+/- 5%
Frequency	20MHz
Range soil moister	0/100%
Resolution moister	0.01%
Accuracy moister	+/- 2.5%
Output	USB
Calibration	User defined

#### **ECH20-TE van Decagon ( digitaal )**

Temp. Range	-40 / + 50 C
Resolution temp.	0.1 C
Electrical Conductivity	0 to 15 dS/m ( Solution )
Resolution EC	0.01 dS/m
Accuracy EC	+/- 10%
Frequency	70MHz
Range soil moister	
Resolution moister	
Accuracy moister	
Output	RS 323
Calibration:	User defined

#### **EnviroSMART TriSCAN van Koenders Instrument bv ( digitaal )**

Range temp.	
temp.	
Accuracy temp.	
Electrical Conductivity	
Resolution EC	
Accuracy EC	
Frequency	
Range soil moister	
Resolution moister	
Accuracy moister	
Output	RS 485
Calibration	User defined

#### **5.4.5 Opmerkingen over communicatie van de verschillende sensoren e + Soil MCT**

De sensor logger wordt middels een glasvezelkabel (maximale overdrachtslengte: enkele honderden meters) en een verloopkabel aan een USB port direct aan de computer aangesloten. Communicatie met de sensor is mogelijk middels software van de fabrikant.

De sensor is robuust in RVS uitgevoerd. Door de combinatie sensor/logger is het mogelijk om data tijdelijk op te slaan. Dit kan bij stroomuitval voordelig zijn. De sensor wordt gevoed met een batterij met beperkte levensduur van  $\pm 10$  jaar. Door gebruik te maken van een glasvezelaansluiting is het niet mogelijk om verlengkabels op maat in te korten. Connectoren zijn niet in het veld te plaatsen en bij eventuele beschadiging van de kabel is deze niet in het veld te repareren. De connector is zeer grof uitgevoerd ( 44mm) waardoor deze niet door een normale doorvoerwartel past. Contacten zijn erg kwetsbaar en eigenlijk niet geschikt voor in het veld. Het protocol is niet openbaar waardoor uitsluitend de software van de fabrikant gebruikt kan worden. Uitlezen gebeurt handmatig per sensor. Door te kiezen voor een USB aansluiting is het maximale aantal sensoren afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid USB poorten op de computer.

### **ECH20-TE**

Sensor wordt met een Audio connector aan een Datalogger ( maximaal 5 sensoren) aangesloten. De logger communiceert middels een RS 232 verbinding ( maximale overdrachtslengte 16 meter ) met de computer. Communicatie middels open protocol.

Zeer flexibele aansluiting die gemakkelijk te verlengen is. Communicatie is slechts middels een omweg mogelijk: communicatiebox is beschikbaar maar heeft een beperkt aantal (5) aansluitingen. Verder werkt de box met een RS232 verbinding waardoor communicatie op langere afstand niet mogelijk is. Dit kan eventueel met een virtuele seriële port, in ons geval een Moxa Nport DE-311, opgelost worden. Verder is de sensor door zijn constructie kwetsbaar.

### **EniviroSmart**

Sensor wordt rechtstreeks aan een RS 485 ( maximale overdrachtslengte 1600 meter ) aangesloten. Middels een RS 485 / 232 converter op de computer aan te sluiten. Communicatie middels het modbus protocol.

Zeer flexibele sensor. Door zijn flexibele constructie is de sensor aan te passen aan de wensen van de gebruiker. In een buis kan op verschillende dieptes gelijktijdig gemeten worden. Communicatie middels en RS485 verbinding geeft veel vrijheid in aantallen( 200+) en maximale afstand ( min. 1600meter). Kalibreren in het veld is mogelijk maar door gevoeligheid van stof en vocht niet gemakkelijk. Het aansturen van de sensor met het modbus protocol is niet even gemakkelijk, mede door onvolkomenheden in de handleiding, maar geeft uiteindelijk veel vrijheid in gebruik. De ondersteuning van de fabrikant is zeer goed maar gezien het tijdverschil met Australië niet altijd even snel. De sensor heeft een voeding van  $\pm 12$  nodig wat extra bekabeling vereist maar door het lage stroomverbruik in een kabel met de datalijn onder te brengen.

## 5.5 Deelexperiment GTC Kappelmeyer: Vezeloptische temperatuurmetingen

Auteurs: Jurgen Dornstadter, Inge Lafeber (GTC Kappelmeyer)

### **5.5.1. Methode van de vezeloptische temperatuurmetingen**

#### **5.5.1.1. Beschrijving van de vezeloptische temperatuurmetingen**

De technologie van gedistribueerde vezeloptische detectie geeft de mogelijkheid de omgevingstemperatuur langs enkele kilometers lange vezeloptische kabels continu en met hoge nauwkeurigheid te meten. Vergeleken met de conventionele meetmethode beschikt deze techniek over een veel hogere informatiedichtheid, en verbetert aldus de evaluatie van de temperatuur distributie in grote waterkeringen. De methode is gebaseerd op het feit dat de optische eigenschappen van het vezel van de omgevingstemperatuur afhankelijk zijn. Een ver ontwikkelde techniek, welke gebruikt werd voor energieverzorgingsbedrijven, ter analyse en evaluatie van veranderingen in kenmerken d.m.v. betrouwbare temperatuurverdelingen langs het vezel.

Een lichtbron (laser) stuurt een gedefinieerd optisch signaal door het vezelkabel, en wordt dan langs de gehele traject gereflecteerd. De gereflecteerd optische impuls heeft een lage intensiteit en wordt gewoonlijk Rayleigh-licht genoemd. Dit Rayleigh-licht gaat samen met een ander veel lager verstrooiingseffect, het Raman-licht. Deze kan weer onderverdeeld worden in een Stokes en Anti-Stokes gedeelte. De intensiteit en frequentieverschuiving van deze zijn afhankelijk van de temperatuur op het reflectiepunt (Gilmore, 1991). Een hoog ontwikkelde frequentieanalyse zorgt voor een nauwkeurige temperatuurbepaling op dit punt. Met behulp van de vertragingstijd van de terugverstrooiing en de materiaalspecifieke lichtsnelheid kan de positie van de reflectiepunten vastgesteld worden.

In de waterbouw heeft deze techniek een groot toepassingsgebied, omdat de eisen aan structuurmetingen zeer hoog zijn. Gedistribueerde vezeloptische temperatuurmetingen kunnen ook ter lokalisatie van kwel in dijken, als ook ter bepaling van temperatuurverdelingen in ongewapend beton ingezet worden. Deze vezeloptische kabels bestaan meestal uit een kern met minstens 2 vezels, en van een mechanische draagader in een huls. Wanneer extra koperdraad in het kabel geïntegreerd is, wordt het kabel als hybridisch kabel beschreven. Voor het gebruik in stuwconstructies worden temperatuur meetkabels van 10 mm in doorsnede gebruikt. Deze kabels hebben een grote mechanische sterkte en zijn geschikt voor de condities op bouwterreinen. De vezels in het kabel worden aangesloten aan de laser. De metingen kunnen continu oftewel in tijdintervallen uitgevoerd worden.

#### **Kweldetectie door middel van gedistribueerde vezeloptische temperatuurmeting**

Een van de belangrijkste planningscriteria is het vermijden van hydrodynamische deformaties (suffosie, erosie) gedurende de dijkconstructie. Interne erosie in dijken wordt normaliter door kwel veroorzaakt. Het lokaliseren van de kwel is een van de meest geavanceerde taken van de dijkbewaking. Gedistribueerde vezeloptische temperatuurmetingen zijn het meest geschikt hiervoor (Aufleger et al., 1997) door de hoge informatiedichtheid. Er zijn twee meetmethodes (Aufleger, 1998, 2000):

##### **- "Gradiënt methode"**

Met behulp van een vezeloptisch meetsysteem wordt de absolute temperatuurverdeling langs het optische vezel vastgesteld. Een van de belangrijkste voorwaarden voor het gebruik van de gradiënt methode is een temperatuurverschil tussen het water in het reservoir en het dijk materiaal. Om dit te garanderen moet

er genoeg afstand bestaan tussen het vezeloptische kabel en het water in het reservoir, waardoor er een overeenstemmend temperatuurverschil over een langdurige tijd in een jaarlijks verloop ontstaat. De kwel wordt ontdekt door een significante daling van de temperatuurgradiënt tussen het water en de bodemtemperatuur. De ideale positie van dit meetsysteem is daarom aan de droge kant van het dichtstelsel.

#### **- Heat-pulse methode**

Met een verdere ontwikkeling van de boven beschreven methode is het mogelijk om metingen uit te voeren wanneer de water temperatuur en de bodemtemperatuur niet veel verschillen (Heat pulse methode – Patent DE 198 25 500). Met deze methode wordt elektrische stroom door de metalen kabelafscherming, of een geïntegreerde elektrische geleider (koperdraad) gestuurd en het vezeloptische kabel verwarmd. De temperatuurstijging in de omgeving van het kabel is afhankelijk van thermische capaciteit en thermische geleidbaarheid van het omgevingsmateriaal. Gedurende de kwel wordt de slechte thermische geleidbaarheid door het advectieve warmtetransport opgeheven. Hierdoor ontstaan duidelijke temperatuurafwijkingen in de gebieden van kwel.

Met behulp van deze methode wordt de toepassing van de vezeloptische temperatuurmeting aanzienlijk vergroot. Met de beschreven procedure kan vrijwel elk dichtstelsel ondanks temperatuurverschillen gedurende de seizoenen geverifieerd worden. De ruimtelijke afstand – of andere manieren van vertraging van warmtetransport – tussen het vezeloptische kabel en het water is niet langer noodzakelijk.

Een verdere toepassingsmogelijkheid voor deze methode zijn temperatuurmetingen van de hydratatiewarmte van ongewapend beton. Het voordeel tegenover andere conventionele meetmethodes is de mogelijkheid langs een lijn te meten. De hydratatiewarmte in beton is belangrijk (bv. gedurende de constructie van dammen) om thermale spanningen en daaruit resulterende scheuren te lokaliseren. Met behulp van de vezeloptische temperatuurmetingen is het mogelijk de temperatuurverdelingen in het beton gedurende het uitharden op vele duizenden punten gelijktijdig te meten. Verder is het mogelijk plaatselijke thermische parameters zoals thermische geleidbaarheid en thermische capaciteit vast te stellen. Gedurende de laatste 5 jaar van vezeloptische temperatuurmetingen zijn 30 dammen en dijken getoetst.

#### **5.5.1.2. Beschrijving van het geïnstalleerde vezeloptische meetsysteem**

De metingen zijn met een OTS 40P laserunit uitgevoerd.

#### **5.5.1.3. Gegevensvastlegging en opslag**

De gegevens van het meetapparaat werden in de meetkeet opgeslagen. Het meetinterval bedroeg meest 2,5 minuten, de plaatselijke resolutie 0,5 m. In de meetkeet vonden de eerste grafische analyses plaats, de centrale databeveiliging in ASCII-formaat op de centrale IJkdijk-processor.

#### **5.5.1.4. Plaatsing van de meetkabels in de dijk**

Met de opbouw van de testdijk zijn de vezeloptische kabels continu in vier horizontale, boven elkaar liggende lussen gelegd. Deze kabels zijn hybride kabels met vier optische vezels en vier koperen leidingen. Er bevinden zich metermarkeringen op het kabel om de exacte positie van het kabel gedurende het leggen vast te kunnen stellen. In de afbeeldingen 1 tot 3 worden de verschillende fasen tijdens de bouw van de dijk weergegeven. In de afbeeldingen 4 en 5 zijn

naast de sonderingen ook het verloop van het vezeloptische kabel schematisch weergegeven.



Afbeelding 1 Laagste positie van het vezeloptische kabel in de dijk.



Afbeelding 2 Vezeloptische kabel gedurende het leggen. Een einde van het kabel is samen met de kabelmof op de kabeltrommel gerold, aan het andere gereeds gelegde kabeleinde is ook een kabelmof gemonteerd

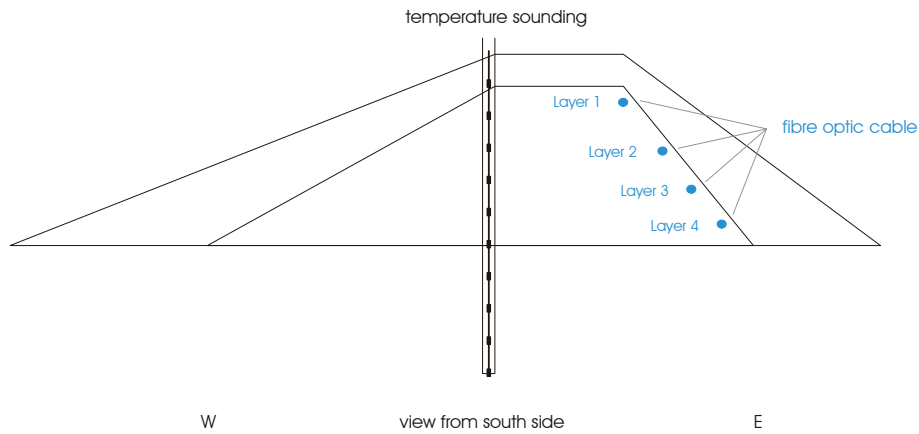




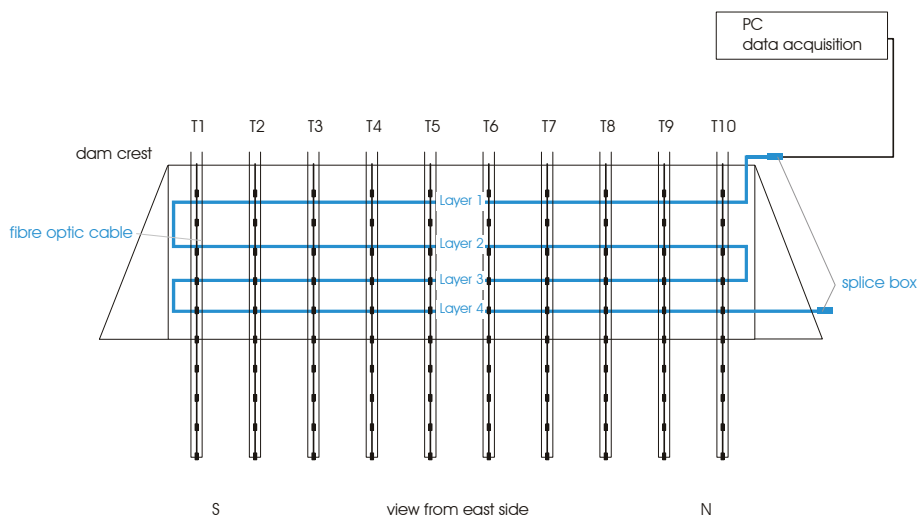
Afbeelding 3 Vezeloptisch kabel gedurende het leggen. Het kabel werd in de zandkern (rechts in beeld) bij de overgang naar de kleilaag aan het dijktalud (links van het geotextiel) gelegd.

De beiden met moffen beveiligde einden van het kabel zijn niet in de grond gebracht en waren van de oppervlakte toegankelijk. In een van de moffen zijn de twee van de vier optische vezels met elkaar versmolten, in de tweede zijn de verbindingsleidingen naar het meetapparaat in de meetkeet aangesloten. In deze mof is ook de stroomvoorziening voor het verwarmen van het vezeloptische kabel aangesloten.

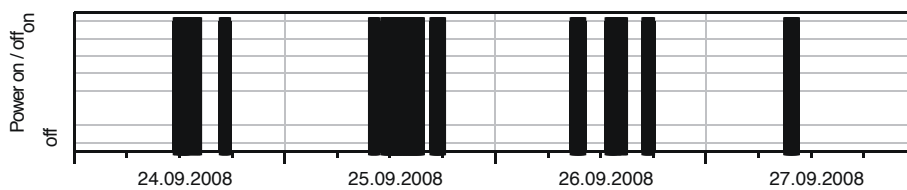
Voor het verwarmen van het vezeloptische kabel stond een noodstroomaggregaat ter beschikking. Na het aansluiten van de elektrische leiding aan het koperdraad en het starten van het aggregaat was de stroomvoorziening ca. 24A bij 230V, en de verwarmingscapaciteit 10 w/m. In overeenkomst met de projectcoördinatoren kon het noodstroomaggregaat slechts gedurende 1 uur 's morgens en 's avonds gestart worden, de 25<sup>ste</sup> en 26<sup>ste</sup> September ook 's middags. Op de afbeelding 6 zijn de verwarmingstijden schematisch weergegeven.



Afbeelding 4 Schematische doorsnede door de testdijk met positie van het vezeloptische kabel en de temperatuursonderingen.



Afbeelding 5 Schematische langsdoorsnede door de testdijk met positie van het vezeloptische kabel en de temperatuursonderingen.



Afbeelding 6 Schematische weergave van de verwarmingstijden

## **5.5.2. De temperatuursonderingsmethode**

### **5.5.2.1. Meetmethode**

GTC heeft een meettechniek ontwikkelt waarmee temperatuurmetingen in waterkeringen tot dieptes van meer dan 30 m mogelijk zijn. Holle aan elkaar te schroeven buizen met een kleine doorsnede (buitendiameter 22 mm) worden in de grond geheid. Vervolgens wordt een ketting van temperatuursensoren in de buizen geschoven. De temperatuursensoren met temperatuurafhankelijke weerstanden zijn gelijkmatig (meestal met 1 m intervallen) geplaatst, en met een elektrisch kabel aangesloten. Na de thermische adaptatietijd kan de grondtemperatuur in verschillende dieptes gemeten worden. Wanneer de temperatuurmetingen afgesloten zijn, kunnen de temperatuurafwijkingen aan het kwelgebied gerelateerd worden. Aldus kunnen verticale en horizontale grenzen van de kwel door deze methode gedetecteerd worden.

Enige jaren ervaring met deze meettechniek wijst uit, dat vele technische en milieugerelateerde vragen met weinig technische en financiële middelen beantwoord kunnen worden. Dit is een in Duitsland geoctrooieerde techniek (Pat.-No. DE4127646).

### **5.5.2.2. Gegevensvastlegging en opslag**

De van de logger geregistreerde data werd in de meetkeet opgeslagen. Het meetinterval bedroeg meestal 3 minuten. De eerste grafische analyses vonden ook in de meetkeet plaats, de centrale databeveiliging in ASCII-formaat op de centrale IJkdijk-processor.

### **5.5.2.3. Meettechniek IJkdijk - project**

Na de opbouw van de dijk werden op de 18. en 19.09.2008 10 sonderingen loodrecht tot op 10 m diepte in de dijk geheid. De laterale afstand tussen de sondering bedroeg 10 m (Afbeelding 7). De sonderingen werden aan de waterkant op de kruin van de dijk geplaatst. In de afbeeldingen 4 en 5 zijn de sonderingen schematisch weergegeven.

Een meetleiding met 10 sensoren werd in elke sondering geschoven. De afstand van de sensoren onder elkaar bedroeg 1 m. De 10 meetleidingen zijn over het waterbassin naar de kanaaldijk gelegd en centraal samengevoegd (afbeelding 8 en 9). Hier was de mobiele 100-kanaal-datalogger geplaatst. De data werd over een RS232 leiding in de meetkeet opgehaald en opgeslagen.



Afbeelding 7 Heien van de meetbuizen (voorbeeldfoto)



Afbeelding 8 Verloop van de meetleidingen over het waterbassin naar de kanaaldijk.



Afbeelding 9 Centraal punt van de meetleidingen op de kanaaldijk

#### **5.5.2.4. Opbouw en testen**

De complete opbouw van de GTC installatie vond op de 18<sup>e</sup> en 19<sup>e</sup> September plaats. De 24<sup>e</sup> September zijn de meetinstrumenten getest.

#### **5.5.3. Analyse**

##### **5.5.3.1. Analyse vezeloptische kabels**

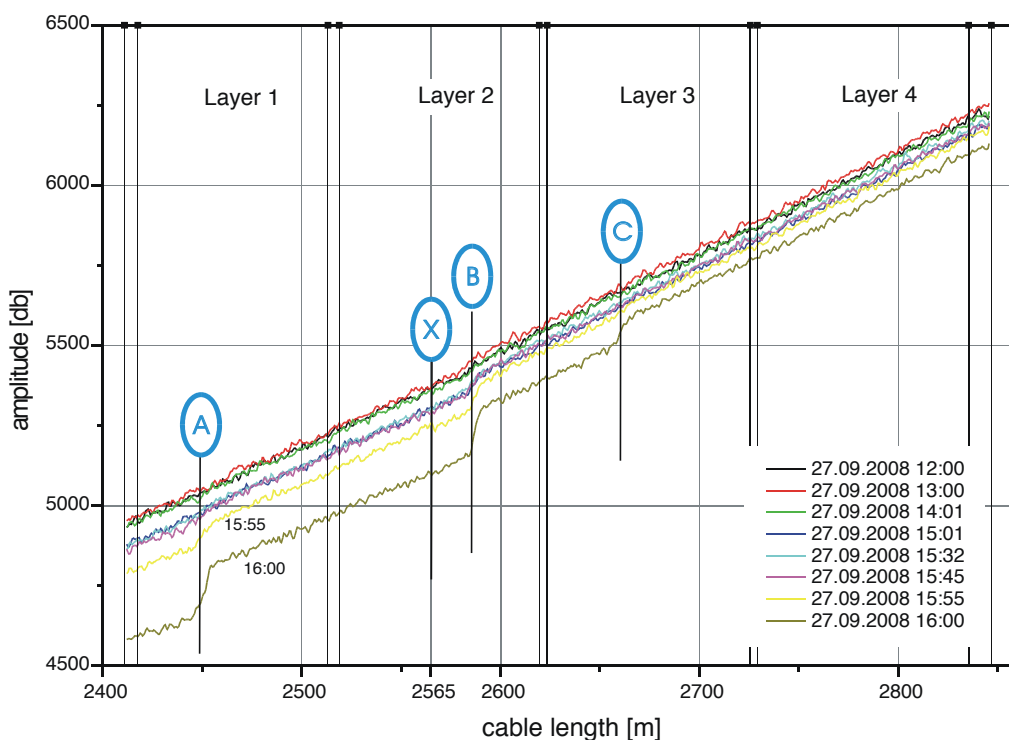
Gedurende de metingen in de optische vezels zijn temperatuurverdeling en de demping langs de vezels vrijwel continu geregistreerd (meetinterval: 2,5 minuten en plaatselijke resolutie: 0,5 m).

De demping bij vezeloptische kabels is het energieverlies van de lichtstraal, die tijdens het doorlopen van de vezel in vorm van verstrooiing en absorptie optreedt. Dempingsverlies treedt in het bijzonder op bij lasverbindingen, contacten of andere mechanische schades aan de vezels.

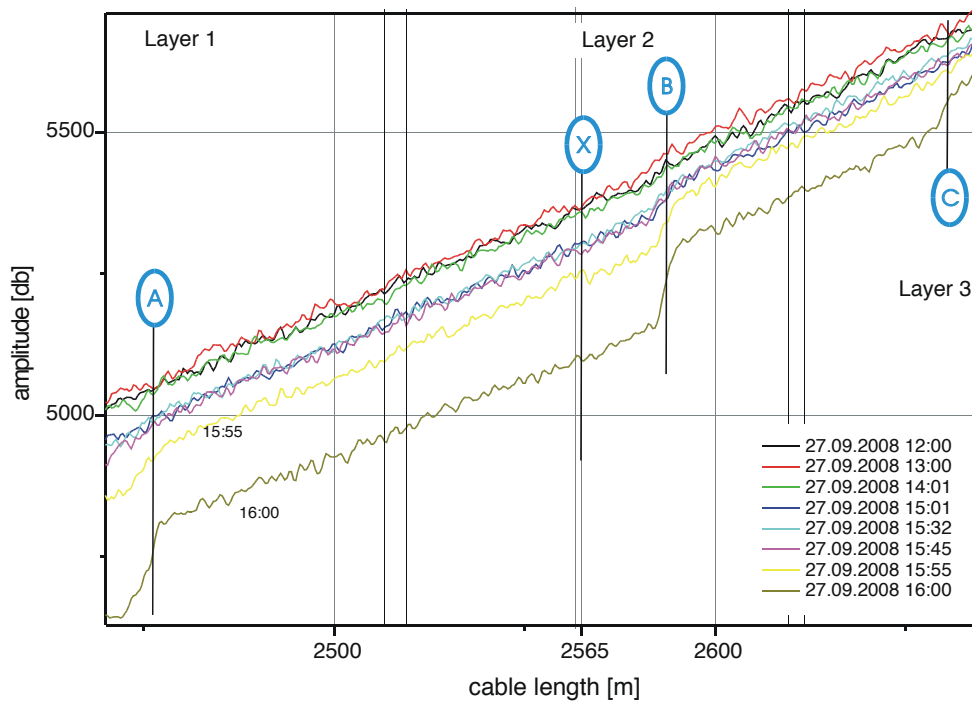
### Dempingsmetingen

Zoals boven genoemd, ontstaan dempingsverliezen door mechanische schades zoals buigen en strekken van vezels. Een gefixeerd en ingegraven kabel ondergaat veranderingen in de demping door bewegingen van de ondergrond. In het geval van de IJkdijk bezweek de dijk in het midden, aan de einden zijn geen bewegingen opgetreden. Hierdoor werd het vezeloptische kabel aan de zijdelingse einden gefixeerd en alleen de middelste secties van de lussen ondergingen een mechanische belasting bij het bezwijken.

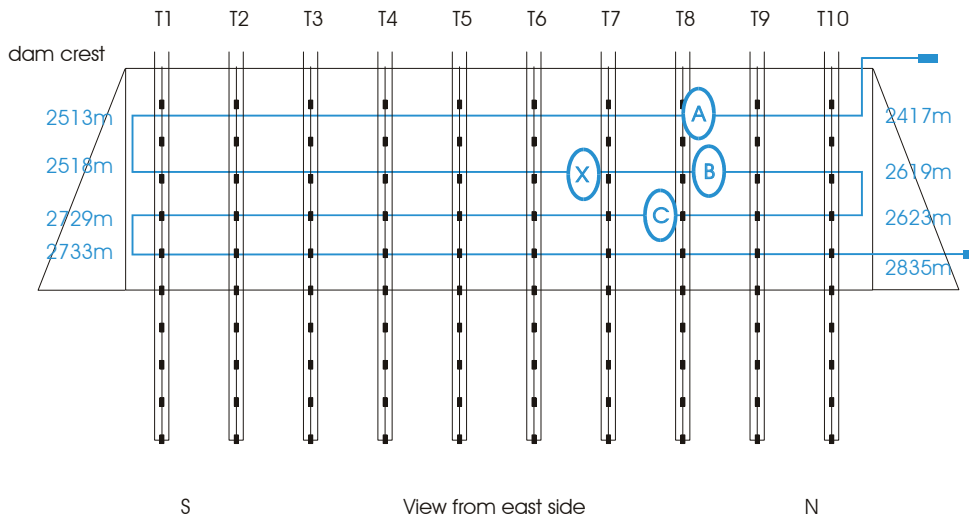
Op de afbeeldingen 10 en 11 is de demping over de gehele kabellengte voor de periode 27.09 12:00 uur tot 16:00 weergegeven. Voor het begin van het bezwijken van de dijk is de demping langs het kabel constant. Met het begin van de mechanische deformatie van het kabel neemt de demping snel toe. De veranderingen in het kabel zijn in de dempingsmetingen op de gekenmerkte posities (A tot C, X = positie van de breuk) weergegeven. De eerste keer deden ze zich voor om 14:30 uur bij punt C (layer 3) en stegen continu aan tot het bezwijken van de dijk. De laatste meting vond om 16:00 uur boven de breuk plaats. In de afbeelding 12 zijn de gemeten veranderingen schematisch in een lengtedoorsnede van de dijk weergegeven.



Afbeelding 10 Dempingsveranderingen langs het glasvezelkabel



Afbeelding 11 Dempingsveranderingen langs het glasvezelkabel (detail)

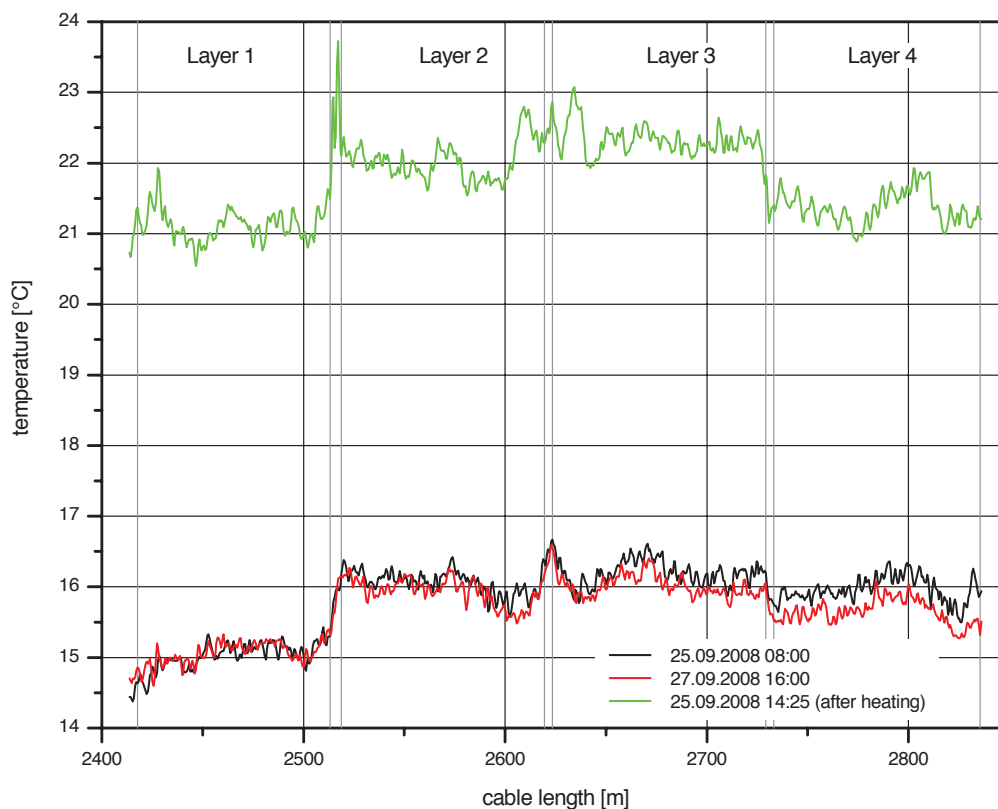


Afbeelding 12 Schematische tekening van de dempingsveranderingen langs het glasvezelkabel

### Temperatuurmetingen

De temperatuurmetingen langs het glasvezelkabel in de dijk zijn in afbeelding 13 weergegeven. Er zijn 3 metingen exemplarisch uitgekozen. De meting op de 25.09 om 06:00 uur is voor de verwarming, de meting dezelfde dag om 14:25 uur is tijdens de verwarming van het glasvezelkabel. In het vergelijk tussen deze twee metingen is de temperatuurstijging door de verwarming te herkennen.

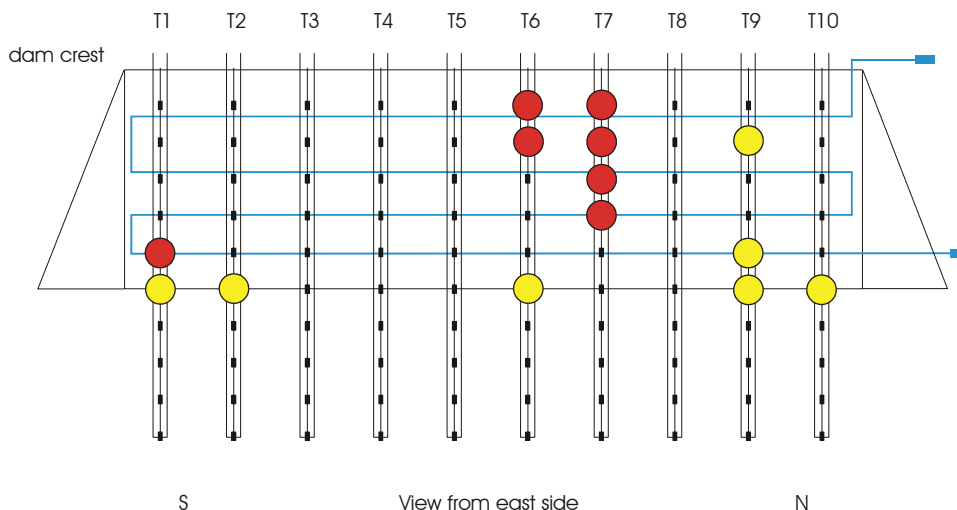
De meting op de 27.09 16:00 uur geeft een bijna gelijk verloop weer als de meting van de 25.09. om 06:00 uur. Er is geen verandering van de absolute temperatuur door kwel te herkennen. Tijdens het vullen van de zandkern heeft er geen verwarming van het glasvezelkabel plaatsgevonden. Hierdoor konden de verwachte opwarming van de ondergrond niet gemeten worden. Door de hoge warmtecapaciteit en grotere geleidingsvermogen van de warmte in vochtige of verzadigde bodems verwarmen zich deze door het opwarmen van het kabel minder als een droge bodem.



Afbeelding 13 Temperatuur en temperatuurveranderingen langs het glasvezelkabel

### 5.5.3.2. Analyse conventionele temperatuurmeting

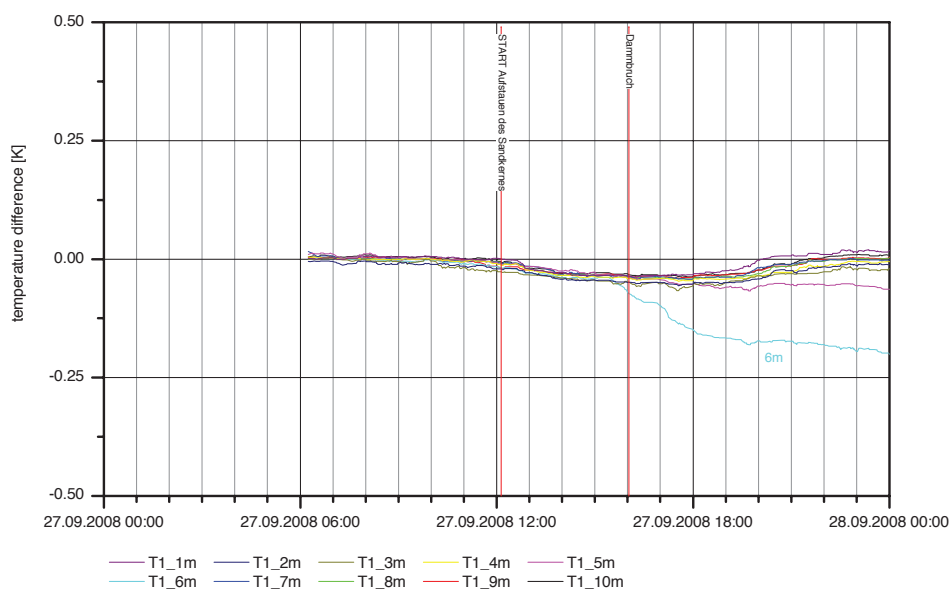
In de afbeelding 14 zijn de wezenlijke temperatuurveranderingen schematisch in een lengtedoorsnede van de dijk weergegeven. In de afbeeldingen 14 tot 24 zijn de gecalculerde temperatuurveranderingen in de sonderingen T1 tot T10 weergegeven. Gecalculerd zijn de veranderingen gerelateerd aan de metingen op 27.09 om 06:00 uur.



Afbeelding 14 Schematische afbeelding van de temperatuurveranderingen in de sonderingen.

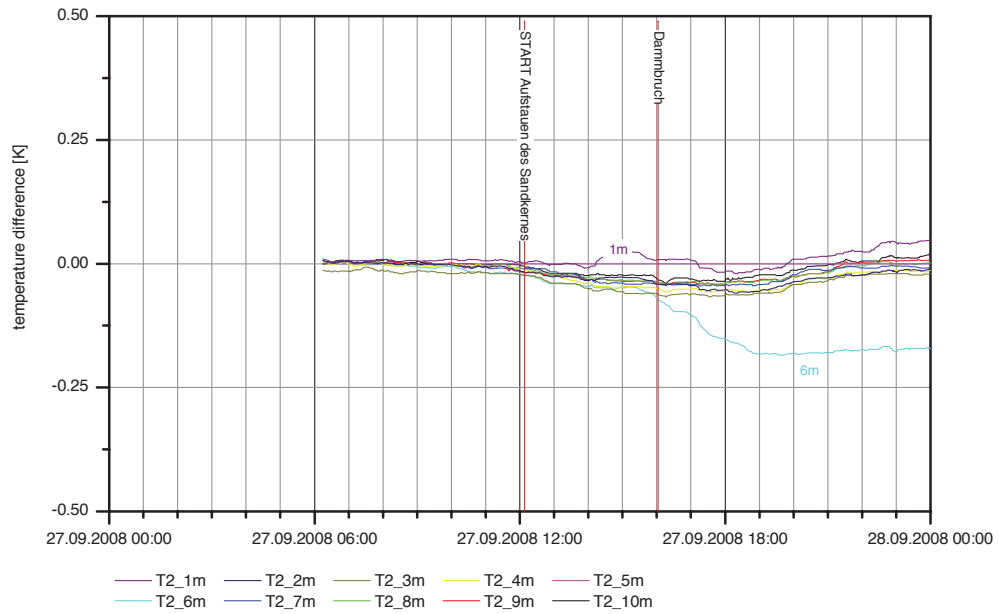
(gele cirkels:            Temperatuurveranderingen voor dijkdoorbraak)

(rode cirkels:            Temperatuurveranderingen na de dijkdoorbraak)

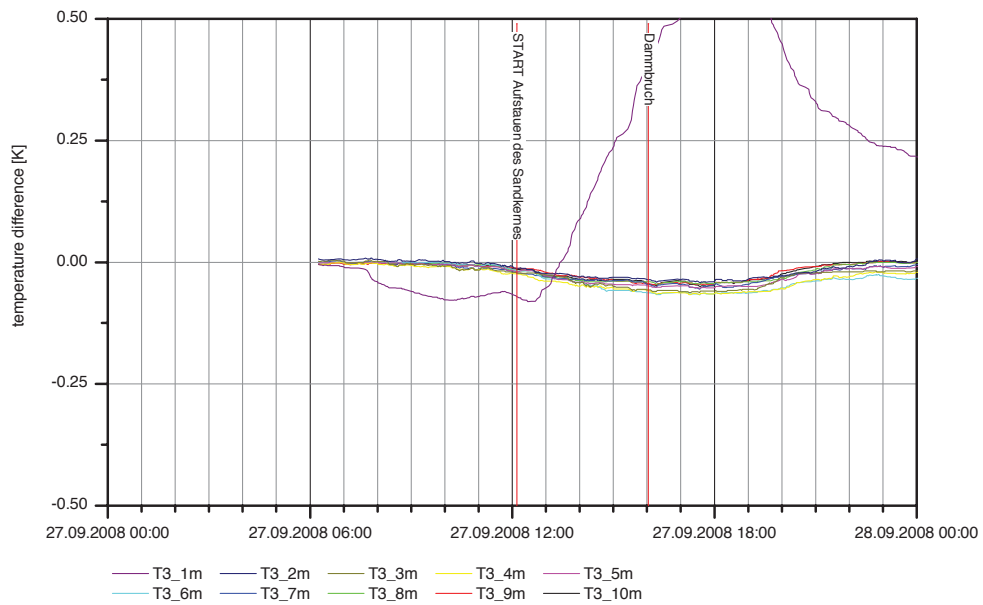


Afbeelding 15 Temperatuurverandering in de sondering T1

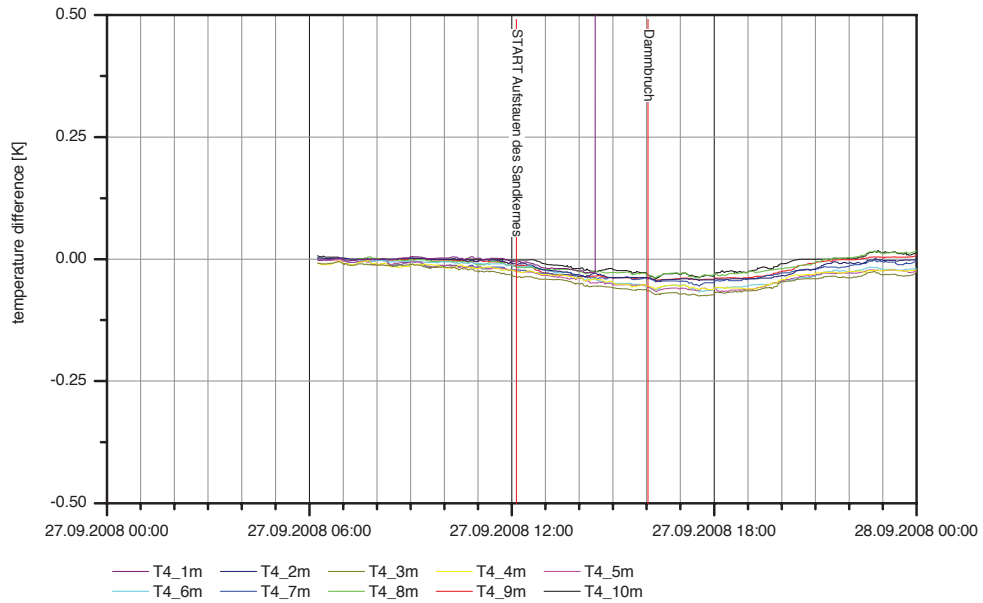




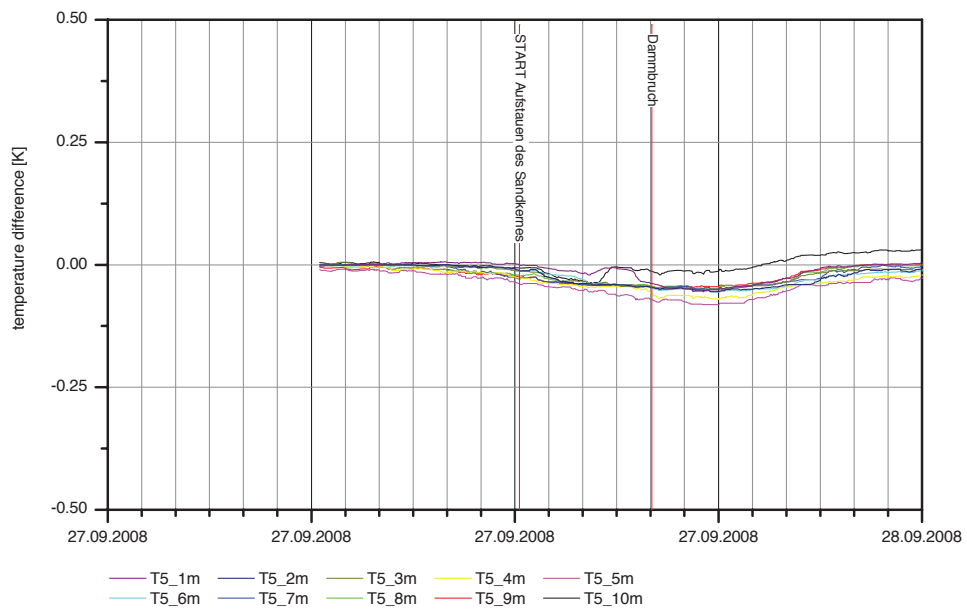
Afbeelding 16 Temperatuurverandering in de sondering T2



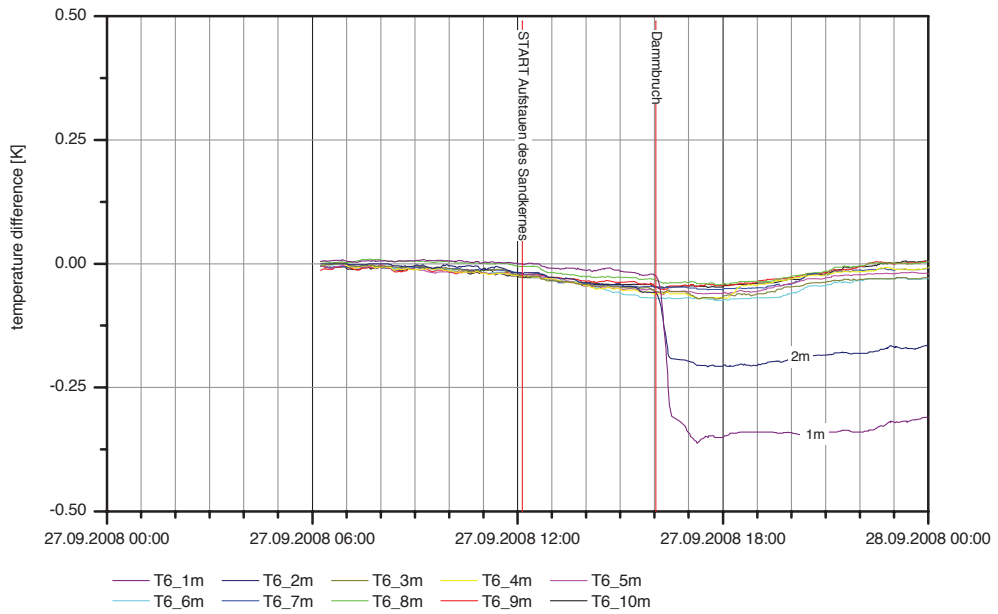
Afbeelding 17 Temperatuurverandering in de sondering T3



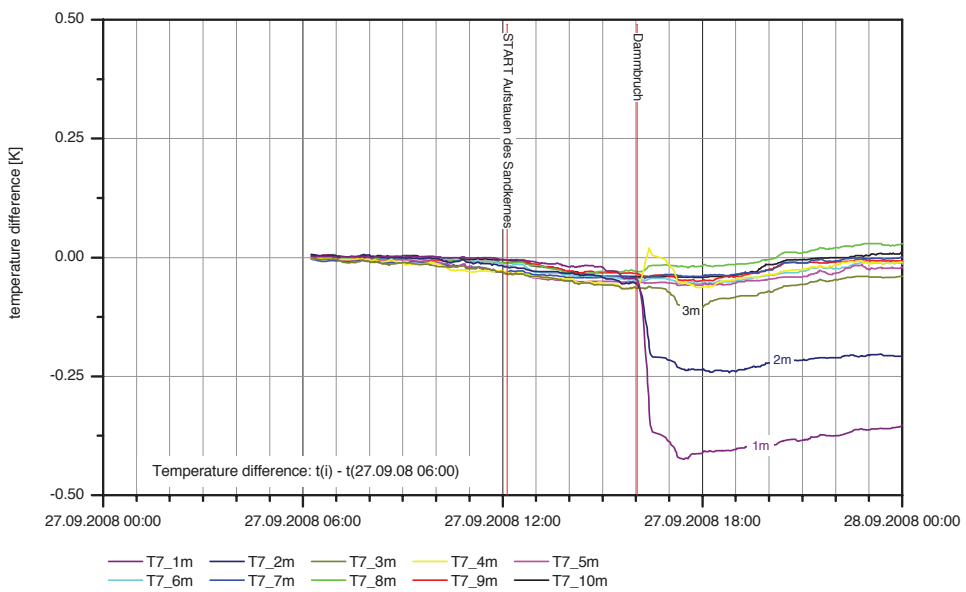
Afbeelding 18 Temperatuurverandering in de sondering T4



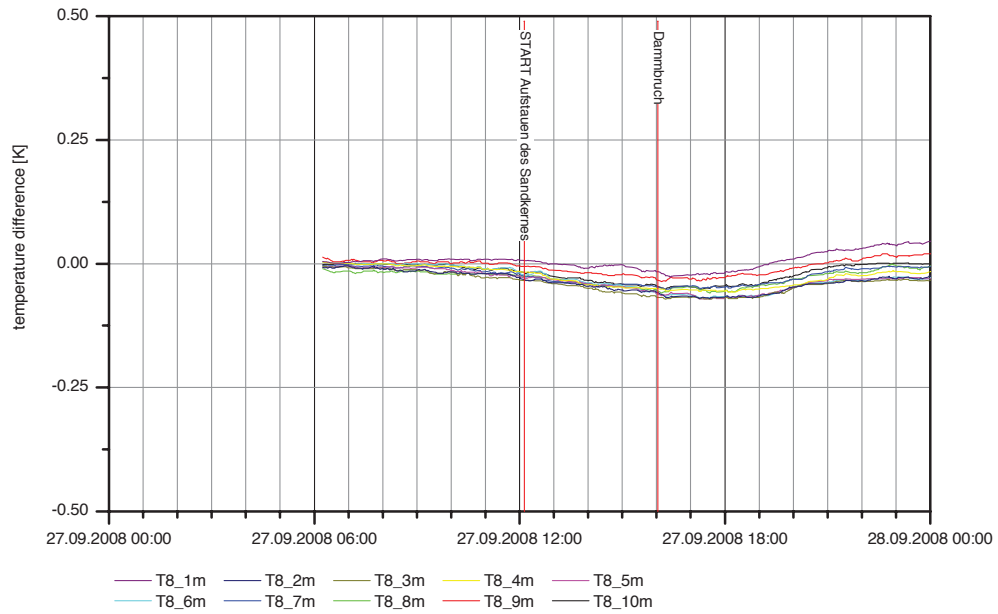
Afbeelding 19 Temperatuurverandering in de sondering T5



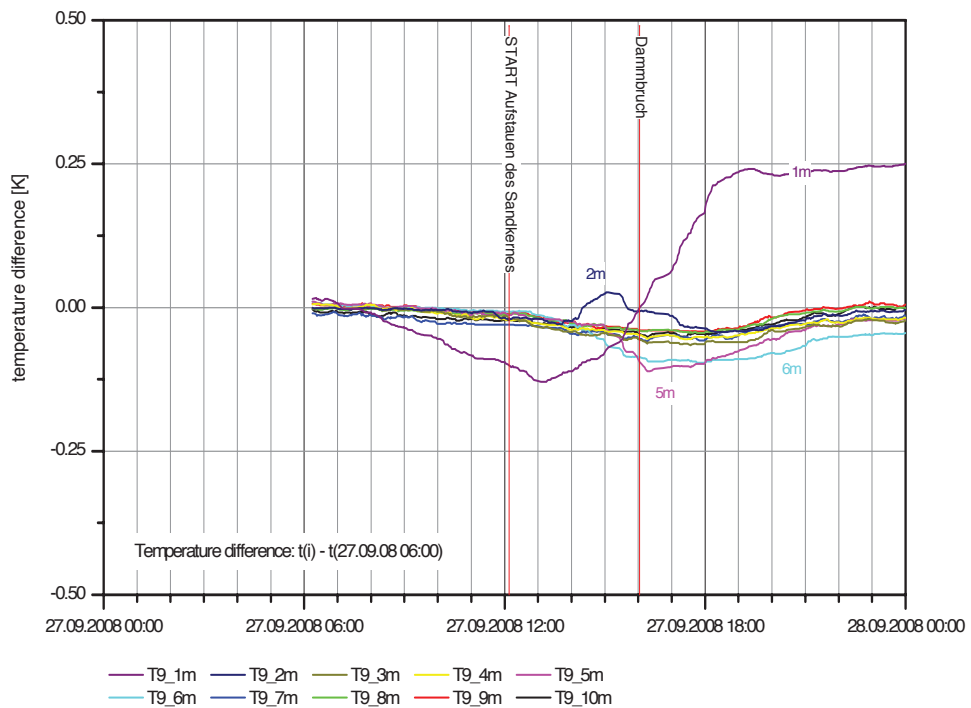
Afbeelding 20 Temperatuurverandering in de sondering T6



Afbeelding 21 Temperatuurverandering in de sondering T7



Afbeelding 22 Temperatuurverandering in de sondering T8



Afbeelding 23 Temperatuurverandering in de sondering T9