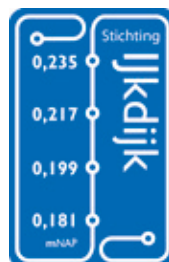


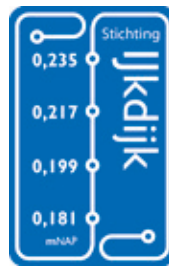
Stresstest Leendert de Boerspolder

Leren van belasten door monitoring met innovatieve meettechnieken



Stresstest Leendert de Boerspolder

Leren van belasten door monitoring met innovatieve meettechnieken



Een project van stichting FloodControl IJkdijk in samenwerking met het Nederlandse bedrijfsleven en kennisinstellingen. Dit project is mede mogelijk gemaakt en mede gefinancierd door STOWA.

Auteurs: ir. J.M. van Stokkum, STOWA / FloodControl IJkdijk
drs. ing. C.K.E. ter Brake, STOWA / FloodControl IJkdijk
ir. C.J.M. Vermeulen, FloodControl IJkdijk
dr. ir. A.R. Koelewijn, Deltares
ing. W.S. Zomer MSc, FloodControl IJkdijk

Met tekstuele bijdragen van Miramap, TU Delft, StabiAlert, HKV en Intech

Vormgeving: mariëtte jongen vormgeving

Uitgave: Amersfoort: STOWA/Stichting FloodControl IJkdijk

Rapportnummer 2016-W-01

Referentie: Stokkum, van, J.M., Brake, ter, C.K.E., Vermeulen, C.J.M., Koelewijn, A.R., Zomer, W.S. (2016) Stresstest Leendert de Boerspolder. Amersfoort: STOWA/Stichting FloodControl IJkdijk, Rapport 2016-W-01.

Trefwoorden:

Stresstest, innovatieve metingen, bewezen sterkte, monitoring, bezwijkproef, macrostabiliteit, veenkade, FloodControl IJkdijk, Leendert de Boerspolder

© 2016 FloodControl IJkdijk/STOWA

Stresstest Leendert de Boerspolder

Leren van belasten door monitoring met innovatieve meettechnieken

Auteurs

ir. J.M. van Stokkum *STOWA / FloodControl IJkdijk*

drs. ing. C.K.E. ter Brake *STOWA / FloodControl IJkdijk*

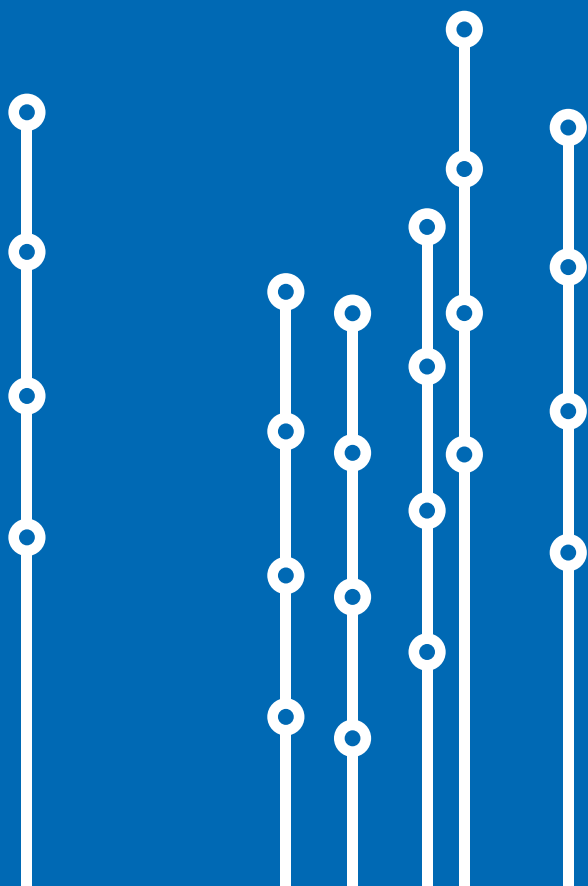
ir. C.J.M. Vermeulen *FloodControl IJkdijk*

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

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

september 2016





Voorwoord

STOWA startte samen met Rijnland, Stichting FloodControl IJkdijk en diverse andere partners begin 2014 de voorbereidingen voor een grote dijkbezwijkproef in de Leendert de Boerspolder. De proef betrof het laten bezwijken van een kleidijk op ondergrond van diverse bodemmateriële, waaronder veen. In de proef zijn diverse innovatieve monitoringssystemen toegepast.

Daarnaast is gewerkt aan het de realisatie van het stresstest-concept waarmee een kader voor belastingproeven van in werking zijnde dijken wordt geschetst om meer inzicht te krijgen in de berekende en in de praktijk aangetoonde sterkte.

Het project vormde de volgende stap in de serie bezwijkexperimenten die in 2007 zijn gestart in het kader van de IJkdijk-programma's. Grootschalige (*large scale*, soms ook *full scale*) bezwijkexperimenten werden gezien als logische vervolgstap op de *small scale* en *medium scale* experimenten. Sinds de laatste bezwijkproef met een grootschalige proefdijk, de All in One Sensor Validatie Test, was er de wens om gevalideerde meetsystemen toe te passen op echte dijken, dijken met waterkerende functie die deze al dan niet zouden verliezen. De dijk van de Leendert de Boerspolder betrof zo'n dijk.

Deze dijk had voor vele eeuwen water gekeerd, maatgevende belastingen meegemaakt, was verhoogd, beheerd, onderhouden, kortom jarenlang in gebruik geweest. De invloed die dit heeft op de bodem, ondergrond en algemene fysieke gesteldheid van de dijk levert een nog veel complexere situatie op dan de zorgvuldig geconditioneerde grootschalige bezwijkdijken.

Tijdens het experiment is praktijkervaring opgedaan met het toepassen van de meetsystemen in continue monitoring van een falende, bestaande dijk. De resultaten van het experiment laten zien dat de toegepaste monitoringstechnieken, al dan niet in gecombineerde vorm, in staat zijn geweest kennis te genereren over de gebeurtenissen in het dijklichaam.

De grootste uitdaging ligt nog steeds in de stap van gevalideerde innovaties naar toepassing in de praktijk. Voor het kunnen valoriseren van de in de afgelopen jaren ontwikkelde kennis, kunde en technieken is en blijft intensieve samenwerking tussen de partners van de gouden driehoek nodig. Een leidende rol hiervoor is echter weggelegd voor de dijkbeheerders want zonder hun actieve steun, inbreng en wens om tot toepassing over te gaan vindt valorisatie niet plaats.

Daarom dagen wij u nogmaals uit om bewezen innovaties in úw praktijk toe te passen zodat ook u hiervan profiteert!

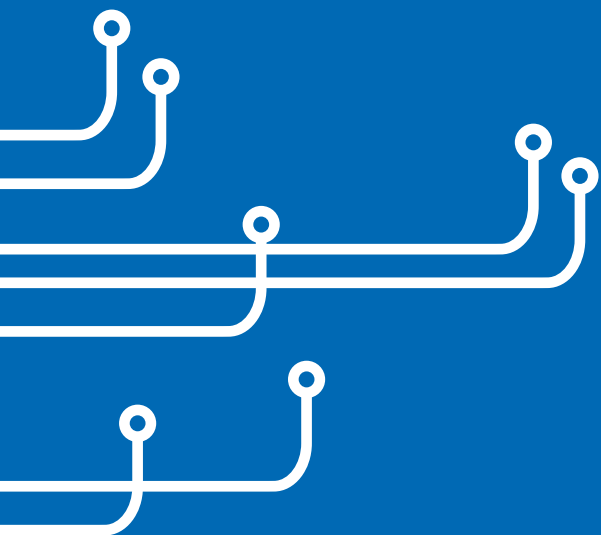
ir. H.H.G. Dijk
Waarnemend voorzitter
FloodControl IJkdijk

ing. W.S. Zomer MSc
Directeur
FloodControl IJkdijk

Inhoudsopgave

Voorwoord	5
Samenvatting	9
Summary	11
Leeswijzer	13
1 Inleiding	15
1.1 Achtergrond	15
1.2 Aanleiding	15
1.3 Stresstest waterkeringen	16
1.3.1 Waarom een stresstest voor waterkeringen?	16
1.3.2 Wat houdt de stresstest in?	17
1.3.3 Stresstest als onderdeel van een bezwijkproef	18
1.4 Doel- en vraagstelling	18
1.5 Deelnemers	18
2 Bezwijkproef Leendert de Boerspolder	19
2.1 Locatie	19
2.2 Belasting	19
2.2.1 Ontwerp	19
2.2.2 Logboek	20
2.3 Meet- en monitoringsprogramma	21
2.3.1 Reguliere monitoring	21
2.3.2 Innovatieve monitoring	22
3 Toegepaste monitoringstechnieken	25
3.1 Fotogrammetrie	25
3.1.1 Inleiding	25
3.1.2 Techniek	25
3.1.3 Strategie	25
3.2 Tiltsensor	27
3.2.1 Inleiding	27
3.2.2 Techniek	27
3.2.3 Strategie	27
3.3 3D-laserscanning	28
3.3.1 Inleiding	28
3.3.2 Techniek	28
3.3.3 Meetstrategie	28
3.4 Infrarood	28
3.4.1 Inleiding	28
3.4.2 Techniek	28
3.4.3 Meetstrategie	28
3.5 Passieve microgolfradiometrie	29
3.5.1 Inleiding	29
3.5.2 Techniek	29
3.5.3 Meetstrategie	29

3.6	Dashboard	30
3.6.1	Inleiding	30
3.6.2	Beschrijving systeem	30
3.6.3	Informatievoorziening	31
4	Resultaten en analyse	33
4.1	Fotogrammetrie	33
4.1.1	Resultaten	33
4.1.2	Interpretatie	37
4.1.3	Evaluatie	39
4.2	Tiltensor	39
4.2.1	Resultaten	39
4.2.2	Interpretatie	43
4.2.3	Evaluatie	44
4.3	3D-laserscanning	44
4.3.1	Resultaten	44
4.3.2	Interpretatie	45
4.3.3	Evaluatie	45
4.4	Infrarood	46
4.4.1	Resultaten	46
4.4.2	Interpretatie	46
4.4.3	Evaluatie	46
4.5	Passieve microgolfradiometrie	46
4.5.1	Resultaten	46
4.5.2	Interpretatie	48
4.5.3	Evaluatie	51
4.6	Dashboard	52
4.6.1	Resultaten	52
4.6.2	Analyse	53
4.6.3	Bruikbaarheid	53
5	Conclusies	55
5.1	Monitoren	55
5.1.1	Fotogrammetrie	55
5.1.2	Tiltensor	55
5.1.3	3D-laserscanning	55
5.1.4	Infraroodcamera	55
5.1.5	Passieve microgolfradiometrie	56
5.1.6	Visualisatie	56
5.2	Actuele dijksterkte en voorspellende waarde	56
	Referenties	57



Samenvatting

Op woensdag 14 oktober 2015 om 06:25 uur kwam er met het falen van de dijk als gevolg van macro-instabiliteit een succesvol eind aan de Bezwijkproef Leendert de Boerspolder. De opzet van deze bezwijkproef waarin de belasting op de dijk stap voor stap werd opgevoerd, bood de ideale mogelijkheid voor een separaat project onder de vlag van FloodControl IJkdijk. In dit parallel uitgevoerde project, aangeduid als 'Stresstest Leendert de Boerspolder', is ervaring opgedaan met het concept van een stresstest voor waterkeringen. Daarnaast konden innovatieve monitoringstechnieken worden beproefd.

Stresstesten worden toegepast om systemen te toetsen met een zware belasting zonder dat dit resulteert in falen van het systeem. Een stresstest voor waterkeringen geeft inzicht in het gedrag van een kering bij extreme belastingen. Een stresstest geeft niet alleen inzicht in het gedrag van de beproefde waterkering zelf, maar resultaten kunnen ook gebruikt worden bij vergelijkbare dijktrajecten. Daarnaast kunnen de resultaten van stresstesten worden gebruikt in crisisbeheersing doordat beheers- en noodmaatregelen effectiever kunnen worden ingezet.

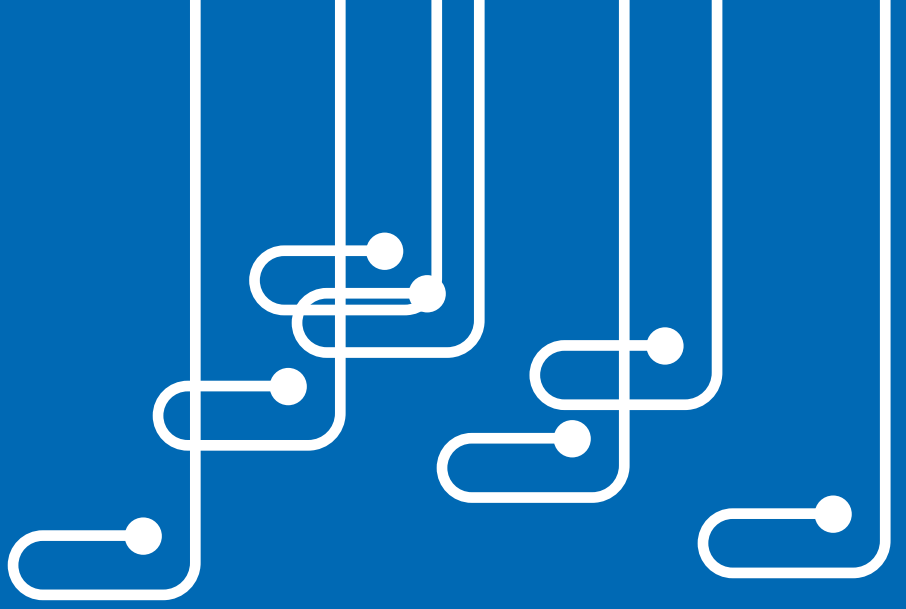
Naast het opdoen van ervaring met het concept stresstest, zijn in de stresstest Leendert de Boerspolder innovatieve monitoringstechnieken beproefd op de meerwaarde bij het voorspellen van mogelijk dijkfalen:

1. De TU Delft heeft met *fotogrammetrie* vervormingen gemeten.
2. StabiAlert heeft met een tilsensor bewegingen en trillingen gemeten.
3. Intech heeft met 3D-Laserscanning vervormingen gemeten.
4. Intech heeft met een infraroodcamera warmte-uitstraling gemeten als indicatie voor uitredend vocht.
5. Miramap heeft met passieve microgolf radiometrie stralingstemperatuur als indicatie voor bodemvochtveranderingen gemeten.

Tijdens de stresstest Leendert de Boerspolder konden de meetresultaten via internet op een visualisatiedashboard worden gevolgd. Het dashboard is geschikt om tijdens de proef snel een overzicht van de stand van zaken te krijgen.

Hoewel de verschillende innovatieve monitoringstechnieken elk over een eigen functionaliteit beschikken, is duidelijk dat de technieken, al dan niet in gecombineerde vorm, in staat zijn geweest kennis te genereren over de gebeurtenissen in het dijklichaam. De beweging kon real-time worden gevolgd, al waren er bij deze proef voor fotogrammetrie (nabewerking) en de 3D-laserscan (meetfrequentie) praktische beperkingen. Veranderingen in de freatische lijn konden indirect worden aangetoond middels variaties in bodemvocht.

Het is in deze stresstest niet mogelijk gebleken om een meetwaarde van gemeten parameters te kwantificeren als een waarde voor dijksterkte. Grenswaarden zoals onder- en bovengrenzen voor dijksterkte konden evenmin worden gegeven. Met de meettechnieken kon dus niet vroegtijdig het dijkfalen worden voorspeld. Daarvoor zijn meer en langere meetreeksen van de meettechnieken noodzakelijk. Aanbevolen wordt daarom meer ervaring op te doen met deze technieken in stresstesten om de potentie ervan beter te benutten.



Summary

On Wednesday, October 14th the failure test Leendert de Boerspolder came successfully to an end as the dike failed due to macro-instability at 06:25h. The design of this failure test, in which the loading was increased step by step, offered the opportunity for the realisation of a second separate project under responsibility of FloodControl IJkdijk. This project, called 'stress test Leendert de Boerspolder' is executed simultaneously with the failure test. The goal was to obtain experience with the concept of stress tests for water retaining structures. Secondly it was possible to test innovative monitoring techniques.

Stress tests are applied to test systems by heavily loading them without this resulting in failure of the system. A stress test applied to a water retaining structure provides insight in the behaviour of the structure during extreme loading. A stress test does not only provide insight in the subjected structure but results can also be extrapolated to comparable structures. Furthermore, stress test results can be used in crisis management as emergency measures can be used more effectively.

Next to the experience with the concept of stress tests, the stress test Leendert de Boerspolder is used to test the added value of innovative monitoring techniques for prediction of possible dike failure:

1. The TU Delft has used photogrammetry to measure deformations.
2. StabiAlert has measured movements and vibrations with a sensitive tilt sensor.
3. Intech has used 3D-laserscanning to measure deformations.
4. Intech has measured radiation with an infrared camera.
5. Miramap used passive microwave radiometry to measure radiation temperature as indication of soil moisture changes.

A visualisation dashboard made it possible to follow the measurement results during the test via internet. This dashboard is developed to get an overview of the situation quickly during the test.

Although all applied techniques have their own functionality, it is become clear that the techniques, whether combined or not, have been able to generate knowledge about what happened within the dike during the test. Deformation could be followed real time, however for this test there were regarding photogrammetry (post processing) and 3D-laserscanning (measurement frequency) also practical limitations. Changes in the phreatic line could be shown indirectly by interpretation of soil moisture variations.

Within this stress test it was not possible to quantify a value of the measured parameters as a proxy for the strength of the dike. The measurement techniques could therefore not be used to predict dike failure early. To make this possible more and longer measurement series are required. It is therefore recommended to gain more experience with application of the techniques in stress tests to be better able to use the potential of it.



Leeswijzer

Het voorliggende rapport bevat de beschrijving van de stresstest Leendert de Boerspolder van Stichting FloodControl IJkdijk. De stresstest is een afzonderlijk onderzoek met specifieke eigen doelstellingen dat parallel aan de bezwijkproef Leendert de Boerspolder is uitgevoerd. Het rapport is opgedeeld in 6 hoofdstukken.

Het eerste hoofdstuk beschrijft de achtergrond en de aanleiding van het onderzoek en er wordt ingegaan op het concept van de stresstest en de rol die de innovatieve technieken daarin (kunnen) vervullen.

In hoofdstuk 2 volgt de beschrijving van de bezwijkproef Leendert de Boerspolder inclusief de locatie, het ontwerp van het experiment, de monitoring en het verloop van het experiment. De onderzochte technieken en de gevolgde werkwijze worden behandeld in hoofdstuk 3. Per meettechniek of visualisatiesysteem is de techniek alsmede de strategie opgenomen. In hoofdstuk 4 wordt per techniek ingegaan op de behaalde resultaten die tevens in dit hoofdstuk afzonderlijk worden geëvalueerd.

Hoofdstuk 5 bevat de conclusies van dit onderzoek waarin antwoord wordt gegeven op de hoofdvraag van het experiment en waarin aanbevelingen worden gedaan met betrekking tot de toepassing van innovatieve technieken bij het monitoren van waterkeringen en het bepalen van bewezen sterkte.

0,181
mNAP

0,235 0,199

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

0,217 0,199

99 0,181
81 mNAP

NAP
0,181
mNAP

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Stichting FloodControl IJkdijk werkt aan de ontwikkeling van kennis en technologieën om beter, sneller en kosten-besparend de veiligheidsnormen van (Nederlandse) waterkeringen te behalen en te bewaken: 'Safety as a service'. Door FloodControl IJkdijk worden projecten gerealiseerd en ontwikkelingen gestart die bijdragen aan betrouwbare, beschikbare en complete waterveiligheidsinformatie. Dit is in lijn met het Tweede IJkdijk Ontwikkelprogramma. Dat programma bestaat uit vier stappen:

1. Validatie-experimenten

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

2. LiveDijk projecten

Toepassen van gevalideerde meetsystemen in de beheerpraktijk van dijkbeheerders.

3. LiveDijk XL

Opschaling van LiveDijk projecten waarin tientallen kilometers dijk worden gemonitord.

4. Dijk Data Service Centrum

Platform voor de opslag en analyse van meetdata van dijken en waterkeringen in een landelijke database. Het gaat zowel om de opslag van real-time als van historische meetdata.

Stichting IJkdijk heeft in 2008, 2009, 2012 en 2014 verschillende validatie-experimenten uitgevoerd. Deze validatie-experimenten waren gericht op het toetsen van de toepasbaarheid van meet- en monitoringstechnieken in dijken die gevoelig waren voor de faalmechanismen macro-instabiliteit [Weijers, Elbersen, Koelewijn & Pals, 2009], piping [Koelewijn, Pals, Sas & Zomer, 2010], combinaties van micro-instabiliteit, piping en macro-instabiliteit [de Vries, ter Brake, Langius, van Lottum, Koelewijn & Zomer, 2013] en zettingsvloeiing [van den Ham, Mastbergen, Koelewijn, ter Brake & Zomer, 2015]. Geconcludeerd werd dat met behulp van monitoringstechnieken het afschuiven van de dijk en ontwikkelingen in waterspanningen in en onder de dijk en het talud konden worden gemonitord en daarmee de faalmechanismen realtime te volgen waren. In 2012 werd aangetoond dat het faalmechanisme waarop een dijk bezwijkt, piping, macro-instabiliteit, micro-instabiliteit of erosie als gevolg van overlopen, bovendien te voorspellen is met behulp van monitoringssystemen [de Vries, ter Brake, Langius, van Lottum, Koelewijn & Zomer, 2013]. Beproefde monitoringssystemen werden en worden in de praktijk toegepast in de LiveDijken Eemshaven, Utrecht, De Veenderij, Noorderzijlvest, Ameland en Willemspolder. Data van deze monitoringssystemen wordt op een uniforme manier opgeslagen in het Dijk Data Service Centrum. Deze ontwikkelingen leiden naar verwachting tot internationaal vermarktbare dijkmonitoringssystemen ("smart levees") en tot verbetering en vernieuwing van het Nederlandse dijkbeheer. Het ontwikkelprogramma wordt dan ook gesteund door zowel het Ministerie van Economische Zaken als het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.

1.2 Aanleiding

De Leendert de Boerspolder was tot voor kort ingericht als veenweidegebied. Uit de in 2012 afgeronde toetsing bleek dat de waterkering rond de polder niet meer aan de eisen voldeed [Huisman, 2012]. Daarnaast was het poldergemaal aan vernieuwing toe en lag er in breder verband een opgave voor het Hoogheemraadschap van Rijnland om over meer bergingscapaciteit te beschikken. Het Hoogheemraadschap van Rijnland heeft daarom besloten om de polder onder water te zetten. Hierbij is het idee ontstaan de ontpoldering te koppelen aan een bezwijkproef. In een bezwijkproef wordt de kade onder gecontroleerde omstandigheden tot bezwijken gebracht. Daardoor kon de sterkte van deze kleidijk op veen bepaald worden.

Vanaf 2010 wordt er gewerkt aan onderzoek naar de stabiliteit van dijken op een ondergrond met veen, maar het is nog niet mogelijk om de ontwikkelde kennis toe te passen. De sectie Geotechniek van de TU Delft wilde de geplande inundatie van de Leendert de Boerspolder aangrijpen om een bezwijkproef uit te voeren en de resultaten te gebruiken in het lopende onderzoek naar de sterkte van een kleidijk op veen bij extreme belasting. De bezwijkproef is door de TU Delft samen met Deltares, STOWA en het Hoogheemraadschap van Rijnland uitgevoerd. Het project wordt aangeduid met 'Bezwijkproef Leendert de Boerspolder'.

De bezwijkproef Leendert de Boerspolder, was voor FloodControl IJkdijk aanleiding om mee te liften en parallel een eigen onderzoek op te starten. De opzet van de bezwijkproef waarin stap voor stap de belasting van de dijk wordt opgevoerd bood een ideale mogelijkheid om ervaring op te doen met het concept van een stresstest voor waterkeringen. Daarnaast konden innovatieve monitoringstechnieken worden beproefd. Dit parallelle project onder de vlag van FloodControl IJkdijk wordt aangeduid met 'Stresstest Leendert de Boerspolder'.

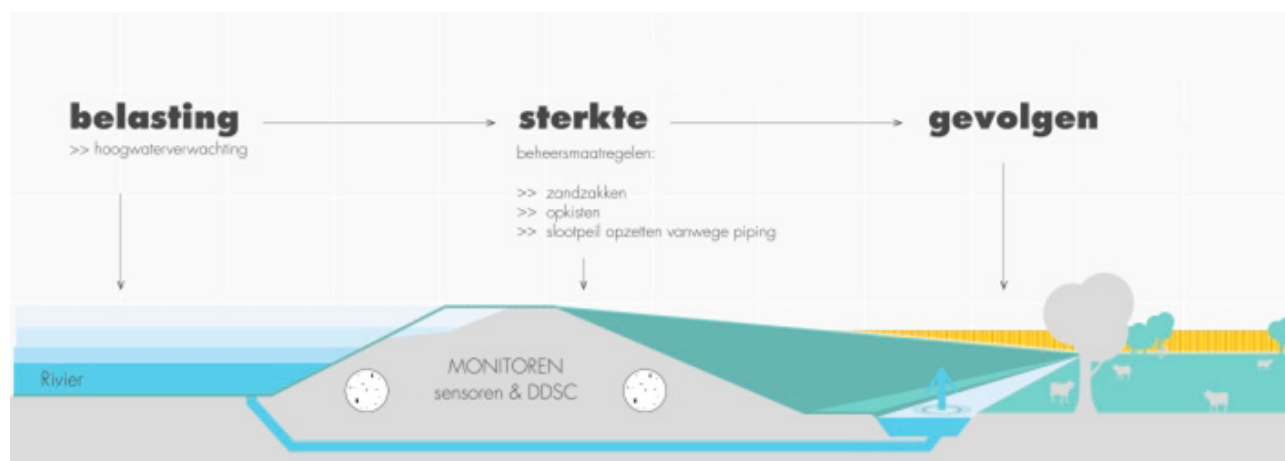
1.3 Stresstest waterkeringen

Stresstesten worden toegepast om systemen te toetsen met een zware belasting zonder dat dit resulteert in falen van het systeem. In de informatietechnologie worden stresstesten toegepast om de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van websites of rekencentra te toetsen. Andere bekende toepassingsgebieden van stresstesten zijn kerncentrales (naar aanleiding van de aardbeving en tsunami in Japan, 2011) en de financiële sector waar banken stresstesten uitvoeren op verschillende economische (doem)scenario's.

1.3.1 Waarom een stresstest voor waterkeringen?

De kennis over de sterkte van waterkeringen onder maatgevende omstandigheden is beperkt. Deels is dit omdat er weinig gedocumenteerde ervaring is van dijken die falen, maar vooral door de onzekerheden, zoals heterogeniteit van de kering en de ondergrond, belastingen op de kering en klimaatverandering. Bij dijkontwerp en -versterkingen worden daarom in het belang van de waterveiligheid conservatieve aannamen gedaan. Dijkversterkingen zijn kostbare projecten en hebben naast economische ook ecologische en maatschappelijke consequenties (bijvoorbeeld ruimtebeslag en grondonteigeningen). In verband met klimaatverandering en nieuwe, strengere normeringen stellen we steeds hogere eisen aan onze dijken.

Een stresstest kan worden toegepast om meer inzicht te krijgen in het gedrag van een kering bij extreme belastingen. De stresstest geeft niet alleen inzicht in het gedrag van de beproefde waterkering zelf, maar resultaten kunnen ook gebruikt worden bij vergelijkbare dijktrajecten. Daarnaast kunnen de resultaten van stresstesten ook worden gebruikt in crisisbeheersing doordat beheers- en noodmaatregelen effectiever kunnen worden ingezet (Figuur 1). Een stresstest kan worden toegepast voor zowel primaire keringen als regionale keringen.



Figuur 1 Schematische overzicht context stresstest

Heterogeniteit van de waterkeringen en beperkingen in de opzet van de stresstest maken absolute uitspraken over de dijksterkte niet mogelijk, maar de stresstest levert wel kennis over het gedrag in extreme omstandigheden. Net als in de financiële sector (of bij kerncentrales of de informatietechnologie) garandeert een stresstest geen absolute veiligheid, maar draagt deze bij aan het vertrouwen dat veiligheid in vergelijkbare extreme situaties ook geborgd is.

In de komende jaren worden er veel dijken versterkt of verlegd in het kader van het hoogwaterbeschermingsprogramma en worden er polders aan de natuur teruggegeven. Dit biedt mogelijkheden om onze kennis van - en het vertrouwen in onze waterkeringen te vergroten. Door op een systematische wijze meer stresstesten uit te voeren

bouwen we kennis op over dijken en faalmechanismen én ontstaat er een solide gegevensgrondslag. Op basis hiervan zijn we in staat beter te schematiseren én kunnen we de ontwerp- en beoordelingsregels voor de dijken verbeteren. Zo kan doelgericht en efficiënt in de veiligheid worden geïnvesteerd.

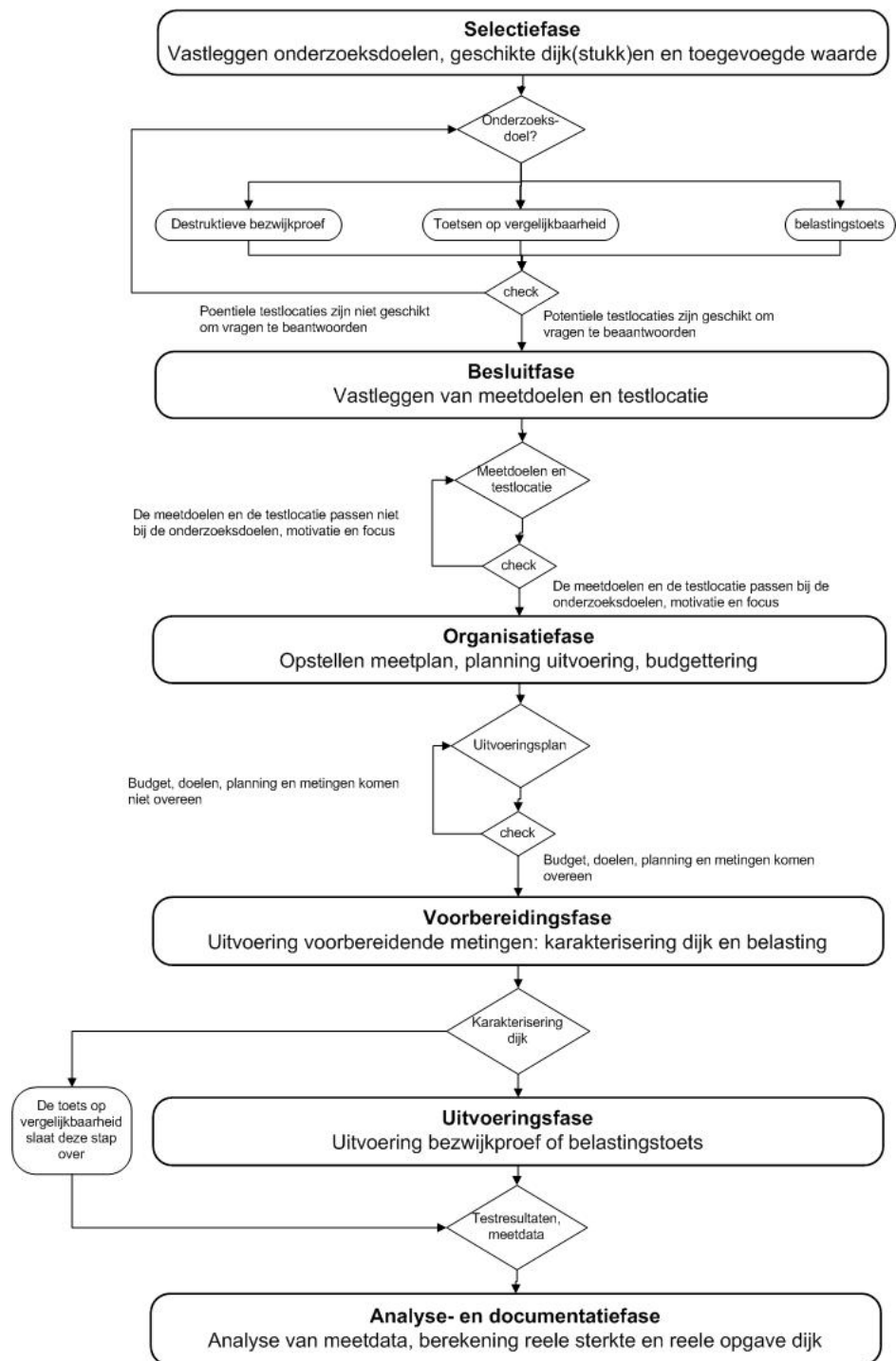
1.3.2 Wat houdt de stresstest in?

De activiteiten in een stresstest zijn afhankelijk van de vragen waarop de stresstest een antwoord moet geven.

Elke stresstest begint met een analyse van de kering waarbij zowel de sterkte- als ook de belastingkant van de dijk in beeld wordt gebracht. Ook wordt gekeken naar beschikbare data over de kering. Op basis hiervan wordt een keuze gemaakt voor het dijkvak en de faalmechanismen (bijvoorbeeld golfoverslag, piping, macrostabiliteit) die beproefd zullen worden. Hierin worden ook factoren meegenomen zoals veiligheid, doorvoerbaarheid en representativiteit van de locatie voor de stresstest.

Aansluitend wordt de stresstest georganiseerd. Dit levert een uitvoeringsplan voor de stresstest, waarin organisatie, techniek en omgeving wordt uitgewerkt, gebudgetteerd en gepland.

In de uitvoering van de stresstest wordt de belasting op de waterkering verhoogd met een bepaalde veilig geachte marge tot aan bezwijken. De resultaten van de stresstest worden getoetst aan de, vooraf geformuleerde, verwachtingen van de dijksterkte. Vervolgens kunnen de consequenties van de stresstest voor de versterkingsopgave (of de beheermaatregelen) worden bepaald en geëxtrapoleerd naar vergelijkbare waterkeringen. In Figuur 2 is een stroomschema met de verschillende stappen weergegeven.



Figuur 2

Stroomdiagram fasering stresstest

1.3.3 Stresstest als onderdeel van een bezwijkproef

Bij een dijk die in functie is en in functie moet blijven, dient bij het onderzoeken van sterkte het bereiken van de ultieme sterkte vermeden te worden. Bij het belasten dient daartoe een veilige marge tot aan bezwijken in acht genomen te worden. Dit vanwege de grote gevolgen van bezwijken. Bezwijktesten zijn een ideale gelegenheid om ervaring op te doen met het concept van stresstesten zonder de kwalijke gevolgen. De stresstest stopt op het moment dat het niveau van belasting zodanig is dat bezwijking aanstaande is. Door het gedrag van een kering nauwkeurig te volgen tot het moment van bezwijken wordt ervaring opgedaan met het realiseren van noodzakelijke veiligheidsmarges in de belasting bij het uitvoeren van stresstesten (op grote schaal).

1.4 Doel- en vraagstelling

De doelstelling voor de stresstest Leendert de Boerspolder is tweeledig.

1. *Ervaring opdoen met het concept stresstest waterkeringen door middel van de bezwijkproef Leendert de Boerspolder.*
2. *Toepassen en evalueren van meet- en evaluatietechnieken voor het monitoren van waterkeringen bij extreme belastingen.*

Parameters die samenhangen met de sterkte van waterkeringen zijn onder andere de positie van de freatische lijn en beweging van de dijk. Beide zaken kunnen op verschillende manieren bemeten worden. De stresstest moet inzicht geven in hoeverre de technieken kunnen bijdragen in het vroegtijdig signaleren van mogelijk dijkfalen. De hoofdvraag met betrekking tot de innovatieve meettechnieken is in welke mate de monitoring kan bijdragen aan het verklaren en voorspellen van het bezwijken van de kering.

Deze rapportage richt zich op het onderzoekstraject van de stresstest Leendert De Boerspolder van FloodControl IJkdijk.

1.5 Deelnemers

Aan de stresstest, het project van FloodControl IJkdijk, hebben vier meetpartijen en een visualisatiepartij deelgenomen.

Meettechnieken:

- TU Delft
- StabiAlert
- InTech;
- Miramap;

Visualisatietechniek:

- HKV Lijn in water

2 Bezwijkproef Leendert de Boerspolder

2.1 Locatie

De Leendert de Boerspolder bevond zich in de uiterste noord-oosthoek van het Kagerplassengebied, aan de zuidzijde van de Haarlemmermeerpolder. De polder was ongeveer 6 hectare groot.

In de lente van 2015 vond het grootste deel van de herinrichting plaats, die uiteindelijk moet resulteren in een omringde waterplas die in open verbinding staat met de waterplas ten zuidoosten ervan, de Hanepoel.



Figuur 3 Leendert de Boerspolder in zomer 2015, na uitvoering grootste deel van de herinrichtingswerkzaamheden, gezien in noordoostelijke richting

In Figuur 3 is het resultaat van de herinrichting medio zomer 2015 te zien. De locatie van de bezwijkproef wordt afgeschermd door een tijdelijke compartimenteringsdijk waardoor een droogliggend driehoekig perceel van ruim 100 meter (langs polderdijk) bij 60 meter (loodrecht hierop) is ontstaan.

2.2 Belasting

2.2.1 Ontwerp

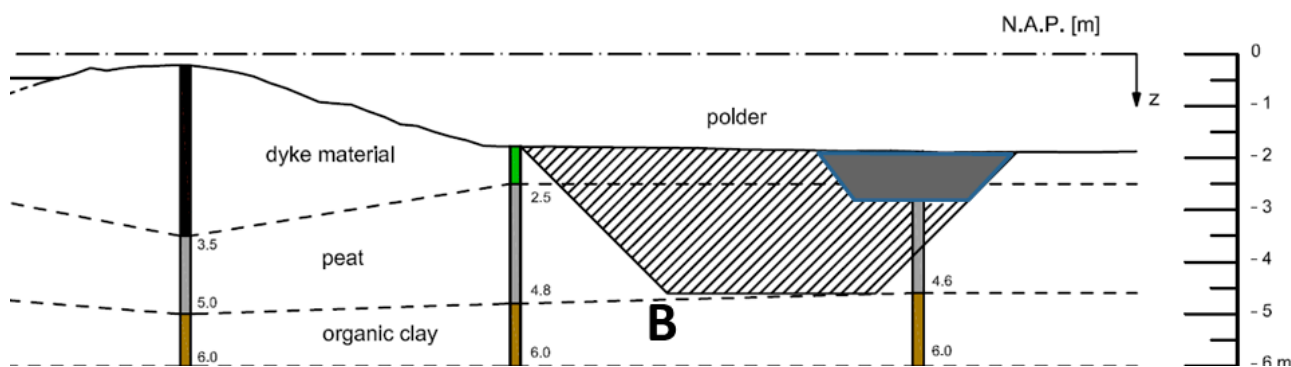
De bezwijkproef is opgezet om een binnenwaartse afschuiving van de proefdijk te genereren. De belasting op de dijk is opgevoerd tot deze faalde als gevolg van macro-instabiliteit.

De kering kon om praktische redenen niet worden belast door het verhogen van de boezemwaterstand aan de buitenzijde. Daarom is gekozen om alleen de kering te vernatten en achter de kering te ontgraven, wat vergeleken kan worden met een sloot dicht achter de dijk. Om de sterkte van het veen onder de dijk en bij de teen te benutten in de eerste fase van de proef, werd de ontgraving aangevangen op enige afstand van de teen en werd pas in een later stadium direct bij de teen ontgraven. De volgorde van ontgraven langs de dijk was erop gericht de dijk in het

midden te laten bezwijken. Het uitgangspunt van het ontwerp van de bezwijkproef [Koelewijn, 2015] was om de belasting zo snel mogelijk in de buurt van het kritische niveau te brengen en deze vervolgens in relatief kleine stappen toe te laten nemen. Na bezwijken werd de proef inclusief alle waarnemingen voortgezet totdat de proefpolder volgelopen was.

Gedurende de eerste proefweek vond alleen vernatting van het binnentalud plaats. Als gevolg van infiltratie steeg hierdoor de freatische lijn tot vrijwel aan het oppervlak. Om het talud zo snel mogelijk nat te maken is ervoor gekozen vanaf bovenaf zoveel water over de kruin te laten stromen dat de stroming over het talud tenminste nét de teen zou bereiken.

Na een week vond een eerste ontgraving plaats. Dit gebeurde binnen het aangewezen ontgravingsgebied, eerst op maximale afstand van de dijk (zie Figuur 4). Tijdens de ontgraving werd het polderpeil voor het grootste deel gehandhaafd en werd de vernatting van het binnentalud gecontinueerd. Gedurende ruim een etmaal is de waterstand in de ontgraving tijdelijk verlaagd, om de respons van het systeem daarop te kunnen bepalen.



Figuur 4 Indicatie van de eerste ontgraving en maximale ontgraving

Na nog een week werd verder ontgraven waarbij de omvang direct afhankelijk was van de respons op de eerste 2 fasen. In de vierde proefweek werd de frequentie van belastingverhoging opgevoerd naar dagelijkse stappen. Verdere belastingverhoging vond plaats door middel van verdere ontgraving, verlaging van het waterpeil in de ontgraving en daarbij nog steeds extreme vernatting vanaf de binnenkruinlijn. Bezwijken moest hiermee binnen uiterlijk vier weken worden bereikt.

2.2.2 Logboek

De bezwijkproef is maandag 21 september gestart waarna op woensdag 14 oktober de dijk bezweek. In de volgende tabel zijn de belangrijkste gebeurtenissen tijdens de proef samengevat:

Datum	Tijd	Periode (UTC)
Maandag 21 september		Start Bezwijkproef
	15:25 uur	Vernatten van het binnentalud.
Maandag 28 september		Aanbrengen ontgraving van 2 meter diepte, taluds 1:1 en een bovenbreedte van 5 meter, met de insteek aan de dijkzijde op 5 meter vanuit de teen.
Woensdag 30 september		Verlagen van de waterstand in de ontgraving met ongeveer 1 meter.
Donderdag 1 oktober		Verhogen van de waterstand in de ontgraving tot het maaiveldniveau.
Maandag 5 oktober		Verbreden ontgraving richting dijk met behoud van de diepte van 2 meter, een talud van 1:2, met insteek op 1 meter vanaf de teen van de dijk.

Datum	Tijd	Periode (UTC)
Woensdag 7 oktober		Verlagen van de waterstand in de ontgraving met ongeveer 1 meter en observatie van sterk oplopende vervormingen in de zuidelijke hellingmeetbuis in de teen, op anderhalve meter diepte.
Donderdag 8 oktober		Verhogen van de waterstand in de ontgraving tot het maaiveldniveau.
Maandag 12 oktober		Versteilen van de helling van ontgraving aan de kant van de proefdijk tot 1:1 en verdiepen van de ontgraving tot 2,5 meter.
Woensdag 14 oktober	00:38 uur	Aanzetten van de pomp om de ontgraving gedeeltelijk leeg te pompen, in drie stappen van telkens een halve meter waterstandsverlaging met steeds 30 minuten wachttijd tussendoor.
	05:42 uur	Observatie van veel luchtbellens aan het wateroppervlak in het noordelijke deel van de ontgraving, vooral aan de polderzijde (NB: het zuidelijke deel kon niet goed geobserveerd worden).
	06:06 uur	Stopzetten van de pomp en even later (6:19) de observatie van grote vervormingssnelheden in de hellingmeetbuizen.
	06:25 uur	Bezwijken van de dijk als gevolg van macrostabiliteit van het middengedeelte van de proefdijk, uiteindelijke bresvorming over een lengte van circa 28 meter.

2.3 Meet- en monitoringsprogramma

In het meet- en monitoringsprogramma van de bezwijkproef is onderscheid gemaakt in 'reguliere monitoring', dat is de monitoring ten behoeve van de bezwijkproef en 'innovatieve monitoring', dat is de aanvullende monitoring die FloodControl IJkdijk parallel en onafhankelijk aan de bezwijkproef heeft laten uitvoeren. In het 'innovatieve monitoringsprogramma' is onderzocht hoe de innovatie meetmethoden in de praktijk presteren.

Eind augustus 2014 is, ter voorbereiding op de bezwijkproef, veldonderzoek verricht op de beoogde proeflocatie. Het onderzoek omvatte 18 gewone sonderingen, 1 T-bar sondering (die mislukt is), 6 pulsboringen met ongeroerde monsternamen, 3 handboringen, de plaatsing van vier peilbuizen en de plaatsing van een volautomatische hellingmeetbuis. Op het verzamelde materiaal is tevens regulier laboratoriumonderzoek uitgevoerd. Dit betrof eentrapsgewone CU-traxiaalproeven, direct simple shear proeven en k0-CRS proeven.

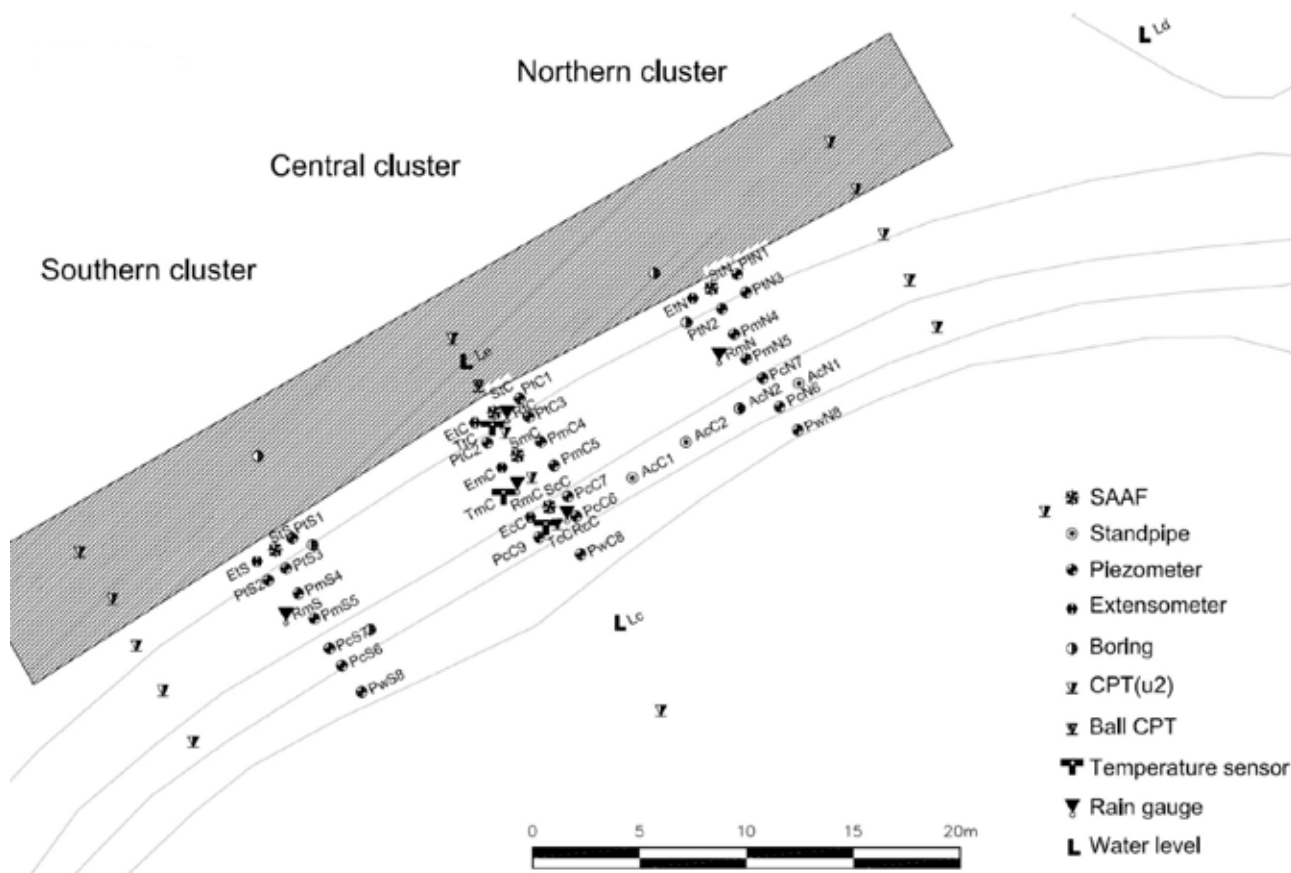
Voor de locaties en details van het grondonderzoek wordt verwezen naar de rapportage 'Ontwerp bezwijkproef Leendert de Boerspolder' [Koelewijn, 2015].

2.3.1 Reguliere monitoring

In het kader van de bezwijkproef zijn verschillende reguliere meetsystemen aangebracht. Deze monitoring maakt het mogelijk de proef goed aan te sturen en het proces naar het falen toe en het falen zelf nauwkeurig te meten. Op basis van de reguliere monitoring wordt het bezwijken van de kering geanalyseerd. Deze reguliere monitoring wordt ten behoeve van de doelstellingen van de stresstest ook gebruikt als referentiemonitoring voor de innovatieve technieken.

De reguliere monitoring richtte zich vooral op waterspanningen en vervormingen. Om ook kleine afschuivingen waar te kunnen nemen zijn drie (vrijwel identieke) raaien/clusters van instrumenten op 12 meter uit elkaar geplaatst.

Met in totaal 25 waterspanningsmeters (geplaatst in augustus 2015) zijn de waterspanningen op karakteristieke punten in de dwarsdoorsneden gemeten. De dwarsdoorsneden leveren gezamenlijk een totaalbeeld over het gehele proefvak. Binnen één dwarsdoorsnede is onderscheid gemaakt tussen metingen onder de kruin, metingen onder het buitentalud, metingen onder de teen van de dijk, metingen onder het binnentalud en metingen in het achterland. Zie Figuur 5 voor een overzicht. De meetfrequentie bedroeg minimaal eens per 10 seconden.



Figuur 5 Bovenaanzicht proeflocatie met monitoringsinstallaties

Naast de waterspanningen zijn de waterpeilen in boezem, sloot en ontgraving bemeten.

Met betrekking tot vervormingen zijn in augustus 2015 vijf inclinometers aangebracht die vanaf de diepliggende zandlaag iedere 30,48 cm (1 voet) de plaatselijke helling hebben gemeten. Hiermee is een volledig vervormingsprofiel over de hoogte verkregen. Daarnaast zijn vijf sets extensometers aangebracht. Met deze instrumenten zijn de verticale vervormingen gemeten daar waar de inclinometers tekortschoten. Tot slot zijn camerabeelden ingewonnen vanaf posities nabij de compartimenteringsdijk.

Gedurende de bezwijkproef is de kering continu gemonitord. Naast uitgebreide monitoring door middel van instrumentatie was aanwezigheid in het veld geboden voor visuele inspectie omdat anders mogelijk niet alle relevante processen waargenomen hadden kunnen worden.

Voor details van de reguliere monitoring wordt verwezen naar de rapportage 'Ontwerp bezwijkproef Leendert de Boerspolder' [Koelewijn, 2015].

2.3.2 Innovatieve monitoring

De ontwikkeling van parameters die in belangrijke mate van invloed worden geacht op de sterkte van de dijk tijdens de proef werd gemeten met vijf innovatieve monitoringstechnieken van verschillende participanten:

1. Fotogrammetrie

De TU Delft heeft camera's geplaatst waarmee vervormingen van het dijklichaam konden worden gemeten.

2. Tiltsensor

StabiAlert heeft een pijp met een uiterst gevoelige hellingmeter geplaatst direct naast de centrale meetraai waarmee vervorming en beweging van de dijk werden gemeten.

3. 3D-Laserscanning

Intech heeft een 3D-laserscanner op een mast nabij de compartimenteringsdijk geplaatst waarmee vervorming van de dijk werd gemeten.

4. Infrarood

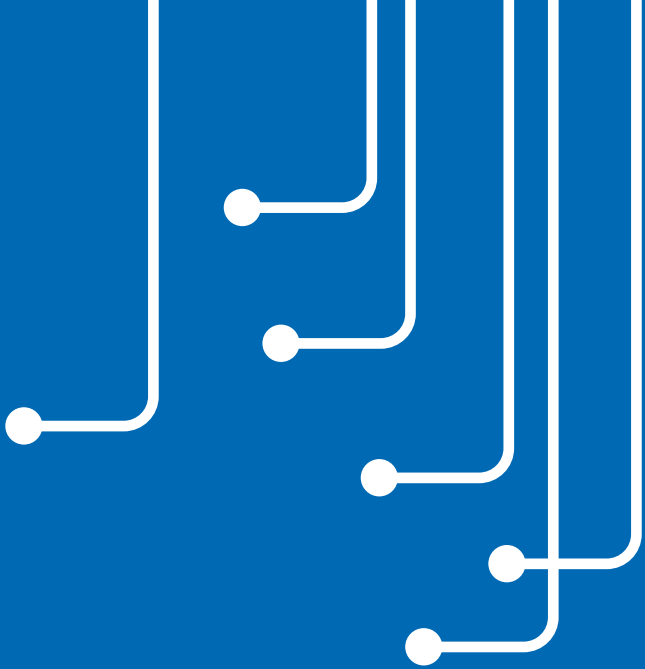
Intech heeft op de mast ook een infraroodcamera geplaatst waarmee de uitstraling van de dijk werd gemeten.

5. Passieve microgolf radiometrie

Miramax heeft vanaf een mast een microgolfmeter op het centrale deel van de dijk gericht waarmee de stralings-temperatuur werd gemeten.

Alle meetgegevens zijn verzameld in het dijk data service centrum (DDSC). Om deze informatie ook voor niet-specialistische gebruikers te kunnen ontsluiten en binnen de context van de bezwijkproef te visualiseren is door HKV heeft een dashboard ontwikkeld. Dit is een webapplicatie waarbij geïnteresseerden met een standaard webbrowser de meetresultaten konden bekijken.

Een beschrijving van deze technieken en de toegepaste meetstrategieën wordt gegeven in het volgende hoofdstuk (hoofdstuk 3).



3 Toegepaste monitoringstechnieken

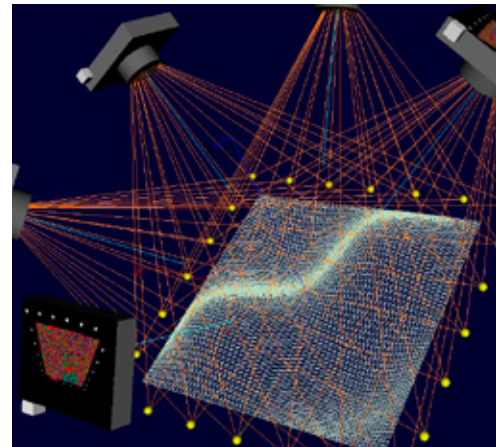
3.1 Fotogrammetrie

3.1.1 Inleiding

De TU Delft heeft aan de stresstest deelgenomen met de toepassing van fotogrammetrie. Fotogrammetrische methoden kunnen in principe worden toegepast in elk situatie waarbij het te meten object fotografisch kan worden opgenomen. Instabiliteit van camera's en relatieve beweging van het object als geheel t.o.v. de camera's compliceren de procedures.

3.1.2 Techniek

Fotogrammetrie is een methode voor het verkrijgen van precieze metingen en driedimensionale coördinaten van een object. Een fotogrammetrische meting maakt een digitale of grafische driedimensionale reconstructie van een object op basis van twee of meer foto's van dat object (zie Figuur 6). Camera's observeren een aantal zogeheten markers die star bevestigd zijn aan het oppervlak van het object, zodanig dat deformatie van het oppervlak resulteert in een corresponderende verplaatsing van de markers. Om 3D metingen te kunnen uitvoeren moet elke marker zichtbaar zijn voor tenminste twee camera's. De vorm en afmeting van de markers, in combinatie met de resolutie van de camera en kwaliteit van kalibratie, hebben invloed op de accuraatheid en precisie van het eindresultaat. Voor toepassing van fotogrammetrie in dijkmonitoring is geen commercieel softwarepakket beschikbaar.

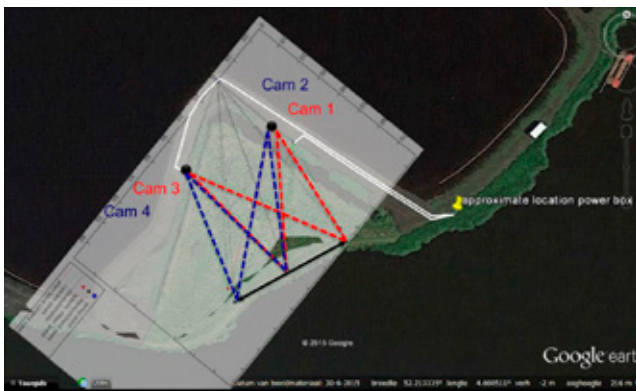


Figuur 6 Schematische weergave van de fotogrammetrie techniek

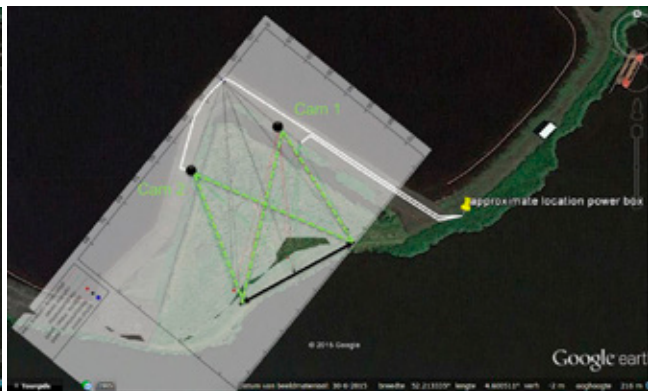
3.1.3 Strategie

In de stresstest zijn fotogrammetrische metingen gebruikt om oppervlaktevervormingen van de dijk in drie dimensies te monitoren. De meetopzet is ontworpen om zowel kleine deformaties te kunnen meten als gevolg van vernatting en gecontroleerde ontgravingen, alsook grote bewegingen gedurende de bezwijking. De monitoring is over een lengte van 50 meter van de dijk opgezet en voor 24 uur per dag. Waargenomen verschillen in afbeeldingscoördinaten van terreinpunten (markers) zijn vertaald in terreindeformaties. De exacte berekeningen hiervoor zijn specifiek voor dit project ontwikkeld.

Er zijn twee parallelle systemen van camera's gebruikt. Bij het eerste, een vier-camerasysteem, werd door elke camera een halve dijksectie opgenomen (Figuur 7). Bij het tweede, een twee-camerasysteem, werd door elke camera de hele dijksectie opgenomen (Figuur 8).



Figuur 7
Opgenomen gebieden van camera's van systeem 1



Figuur 8
Opgenomen gebieden van camera's van systeem 2

Het eerste systeem maakt gebruik van Basler Ace camera's en vier LED constructielampen voor de verlichting (Figuur 9). Het tweede systeem maakt gebruik van Canon 750D camera's met ingebouwde flits (Figuur 10).



Model	Basler ace Series
Pixels	2592x1944
Sensor	1/2.5", CMOS
Lens Focal length	8 mm
Image saving rate	1 frame per 5 minutes
Data transfer	Ethernet cable

Figuur 9 Meetopstelling en systeemspecificaties (camera + opslag) van systeem 1

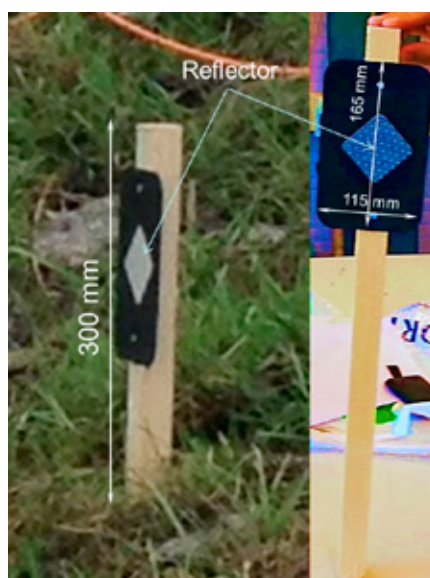
Met duale cameraobservaties kunnen meetfouten mogelijk worden uitgemiddeld, maar fouten kunnen in sommige gevallen ook optellen. De specifieke setup en kalibratie bij deze proef was erop gericht een precisie van tenminste 10 mm in de resultaten te realiseren.

De camera's zijn bevestigd op twee palen op enkele meters boven het maaiveld. Het waterniveau na doorbraak was hiermee lager dan de positie van de camera's. De opstelling van de palen t.o.v. de te monitoren dijk zorgden grofweg voor een vierkant terrein.

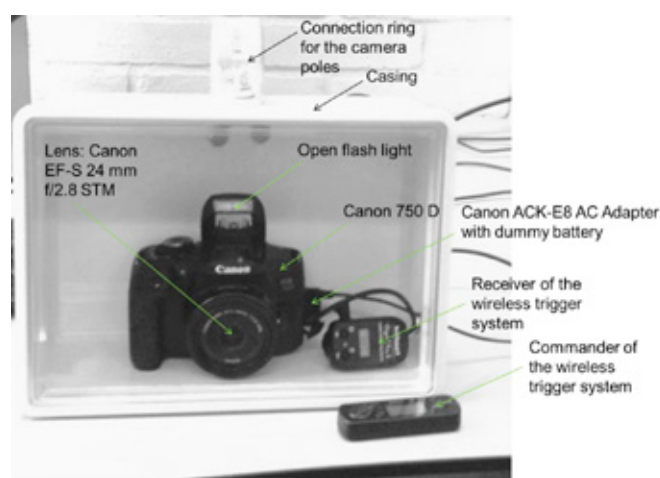
Om te voorkomen dat bij directe observatie van het dijklichaam vooral de groei van gras en het effect van het weer gemonitord zou worden, is gebruik gemaakt van markers die in het dijklichaam zijn verankerd. In dit project is gekozen voor markers met platte plaatjes en reflectoren. Deze zijn zo hoog geplaatst dat de wind minimale invloed had, maar deze tegelijk niet werden geblokkeerd door gras (zie Figuur 11).

De cameraposities zijn niet volledig stijf vanwege terreinvormingen, wind- en temperatuureffecten. Daarom was voor elke meting een systeemkalibratie met externe oriëntatie nodig. De bewegingen van de punten boven de zes inclinometers konden worden beschouwd als bekend ten opzichte van een vast punt en zijn daarom gebruikt voor kalibratie van de metingen.

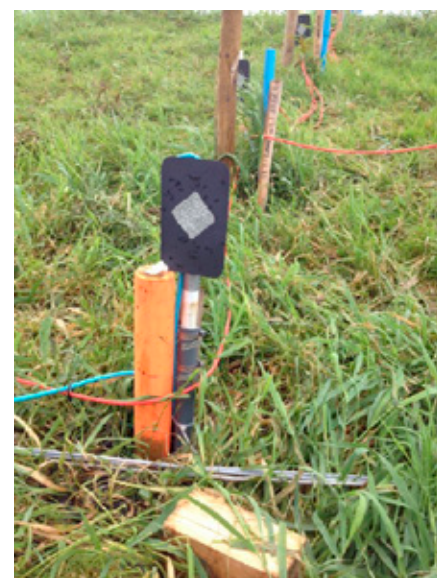
De exacte beginpositie van de camera's en 52 geïnstalleerde markeringspunten is gemeten met een total station, drie dagen voor aanvang van de proef. Deze meting is gebruikt als nulmeting voor de deformatieberekeningen.



Figuur 11 Toegepaste marker



Figuur 10 Hoofdcomponenten van tweede camerasysteem



Figuur 12 Marker bevestigd aan inclinometer

3.2 Tiltsensor

3.2.1 Inleiding

StabiAlert heeft aan de stresstest deelgenomen met een systeem dat verzakking, vervorming, hoekverandering en trilling van de dijk registreert en vastlegt in een centrale database.

3.2.2 Techniek

De techniek is een gecombineerde schaderegistratie- en trillingsmeter. De sensoren voldoen aan de SBR 2010 richtlijnen. De sensoren registreren hoekveranderingen op een frequentie van 100 Hz en trillingen op een frequentie van 400 Hz.

De hoekverandering, ofwel tilt, wordt gemeten door middel van een gevoelige tiltsensor. De sensoren zijn op een stijf lichaam gemonteerd dat in de dijk is geplaatst. Aan het uiteinde van dit lichaam (aan de bovenzijde) zijn zogeheten inclinokasten met de tiltsensoren gemonteerd. Hiermee wordt de exacte hoek ten opzichte van het lokale zwaarteveld gemeten. Deze hoek wordt met een nauwkeurigheid van 1/24000ste graad bepaald. Elke inclinokast bevat naast de eigenlijke sensor een kleine computer welke de sensor uitleest en de gegevens voorbereidt voor verzending naar een datacentrum.

Het is mogelijk meerdere tiltsensoren op verschillende locaties in het dijklichaam te plaatsen. Hiermee kan via een 3D-animatie een algemeen beeld van het object of van een groter gebied worden verkregen. Vanuit de 3D-animatie kan worden ingezoomd op elke afzonderlijke sensor.

3.2.3 Strategie

De techniek wordt bij verschillende dijkbewakings-/monitoringsprojecten ingezet en is eerder toegepast bij de All-in-one sensorvalidatietest van de IJkdijk in 2012 [de Vries, ter Brake, Langius, van Lottum, Koelewijn & Zomer, 2013] en ter bewaking van de Lauwersmeerdijk ten tijde van de calamiteit met het Vierhuizergat kort daarna. In de stresstest is deze techniek toegepast om de toepassing in dijkbewaking te valideren, in dit geval van een bestaande veendijk. De verwachting was dat met de techniek inwendige vervormingen van het dijklichaam in kwalitatieve zin continu inzichtelijk zijn en dat mogelijk bezwijken vroegtijdig gesignaleerd kan worden.



Figuur 13 Meetsysteem zoals aangebracht in de dijkhelling

Bij de Leendert de Boerspolder is gebruik gemaakt van één gevoelige tiltsensor. Deze is bij de centrale raai in de helling van het binnentalud geplaatst. Als stijf lichaam is een standaard 48 millimeter dikwandige steigerpijp met een lengte van 60 cm gebruikt. De sensoren, dataprocessing en stroomvoorziening zijn in één homogene IP68+ behuizing geïntegreerd. De sensor is net onder maaiveld aangebracht (Figuur 13).

Van de steigerpijp is de exacte hoek ten opzichte van het lokale zwaarteveld in zowel de lengterichting als de dwarsrichting bepaald.

Van elk meetinterval van vijf seconden zijn kengetallen voor tilt en trilling gemaakt. De gemiddelde tilt over het meetinterval geeft inzicht in de mate van tilt. De maximale tilt over het meetinterval geeft inzicht in de mate van trillingen.

3.3 3D-laserscanning

3.3.1 Inleiding

Intech Dike Security Systems BV heeft aan de stresstest deelgenomen met een infraroodcamera (zie volgende paragraaf) en een 3D-laserscanner. Met 3D-laserscanning wordt de positie van een object vastgelegd.

3.3.2 Techniek

De Trimbel TX5 3D-laserscanner meet de afstand tot een groot aantal punten op het dijklichaam. Dit resulteert per scan in een puntenwolk die de positie van het dijklichaam aangeeft. De meetfrequentie bedraagt maximaal een scan per uur.

3.3.3 Meetstrategie

Vanaf de mast zijn vlakdekkende 3D-laserscans gemaakt. Er zijn gemiddeld vier scans per etmaal uitgevoerd. Door opeenvolgende opnamen van de 3D laserscanner met elkaar te vergelijken wordt beweging van de dijk waargenomen en kan het deformatieproces worden gevolgd. Voor het bepalen van deformatie was speciale software benodigd waarmee de puntenwolk van een scan wordt vergeleken met een voorgaande scan. De nauwkeurigheid van de deformatie is afhankelijk van de afstand. In dit geval is de onnauwkeurigheid minder dan 2 cm. Deformaties worden gevisualiseerd met behulp van kleuren.

3.4 Infrarood

3.4.1 Inleiding

Intech Dike Security Systems BV heeft aan de stresstest deelgenomen met een infraroodcamera en een 3D-laserscanner (zie vorige paragraaf). Met een infraroodcamera wordt op afstand de uitstraling van infrarood gemeten.

3.4.2 Techniek

De infraroodtechniek meet op afstand de uitstraling van infrarood van de waterkering. Bij het meten wordt gebruik gemaakt van een speciaal ontwikkelde infraroodsensor met bijbehorende software. De sensor beschikt over ongeveer 300.000 meetpunten waarmee met een nauwkeurigheid van 0.05 graden Celsius de temperatuur aan het dijkoppervlak wordt bepaald. De maximale meetfrequentie bedraagt 50 keer per seconde.

3.4.3 Meetstrategie

Vanaf de mast zijn vlakdekkende infraroodbeelden van het dijklichaam opgenomen. De temperatuurverschillen die hiermee worden gedetecteerd geven een indicatie van water nabij het oppervlak van de dijk. Hiermee kunnen eventuele locaties van overmatig kwel en/of overloop worden gemeten. Deze strategie is ook toegepast tijdens de All-In-One sensor validatieproeven van de Stichting IJkdijk [de Vries, ter Brake, Langius, van Lottum, Koelewijn & Zomer, 2013].

Elke meting geeft een beeld van de temperatuurverschillen en locaties van water op het moment van meting. Door in de tijd te meten wordt de mogelijke toename van kwel en/of overloop gemonitord. De meetfrequentie is inge-

steld op 4 metingen per uur. Vanaf 12 oktober 2015 is de meetfrequentie verhoogd naar één meting per minuut om snelle veranderingen (bij bezwijken van de dijk) te kunnen vastleggen.

3.5 Passieve microgolfradiometrie

3.5.1 Inleiding

Mirapmap heeft aan de stresstest deelgenomen met de toepassing van passieve microgolf-radiometrie. Mirapmap heeft deze oorspronkelijk vanuit satellieten toegepaste technologie doorontwikkeld tot een sensor die vanaf de grond inzetbaar is (MIRA scanner).

3.5.2 Techniek

Met passieve microgolfradiometrie wordt de energie (stralingstemperatuur) die de aarde uitstraalt gemeten in het microgolvenbereik. De metingen worden uitgedrukt in stralingstemperaturen, die een functie zijn van de emissiviteit en de temperatuur van de ondergrond. De emissiviteit is afhankelijk van het materiaal van de ondergrond en de bodemvochtcondities van grofweg de eerste meter grond.

Voorheen zijn MIRA scanners door Mirapmap altijd dynamisch (mobiel) ingezet. Door de locatie van de meting te koppelen aan het meetresultaat kan al rijdend een gebiedsdekkend beeld met een resolutie van 1 meter worden verkregen.

3.5.3 Meetstrategie

Gedurende vier weken is de scanner op een specifiek gebied van het dijklichaam gericht. De scanner is op een afstand van ongeveer 40 meter van het dijklichaam gepositioneerd en bevond zich op ongeveer 3 meter hoogte ten opzichte van maaiveld (Figuur 14). In deze opstelling wordt de stralingstemperatuur van het dijklichaam gemeten en vertaald naar bodemvochtveranderingen. Bodemvochtveranderingen tot ongeveer een meter diepte zijn van invloed op de meetresultaten.

Uitgangspunt is dat de hoeveelheid bodemvocht correleert met de waterspanning en daarmee een indicator is voor de positie van de freatische lijn in het dijklichaam. De verwachting is dat met deze techniek variaties in bodemvocht in de dijk nauwkeurig gevolgd kunnen worden en hiermee het moment waarop verzadiging van de dijk optreedt. Het moment van verzadiging is in de meethypothese van Mirapmap gehanteerd als een indicatie van het moment van falen.



Figuur 14 Links: locatie van de sensor. Rechts: meetopstelling op de stellage

De scanner heeft eenmaal per minuut de stralingstemperatuur van het bemeten dijkvak gemeten. De ruwe data is live doorgestuurd naar het DDSC.

3.6 Dashboard

3.6.1 Inleiding

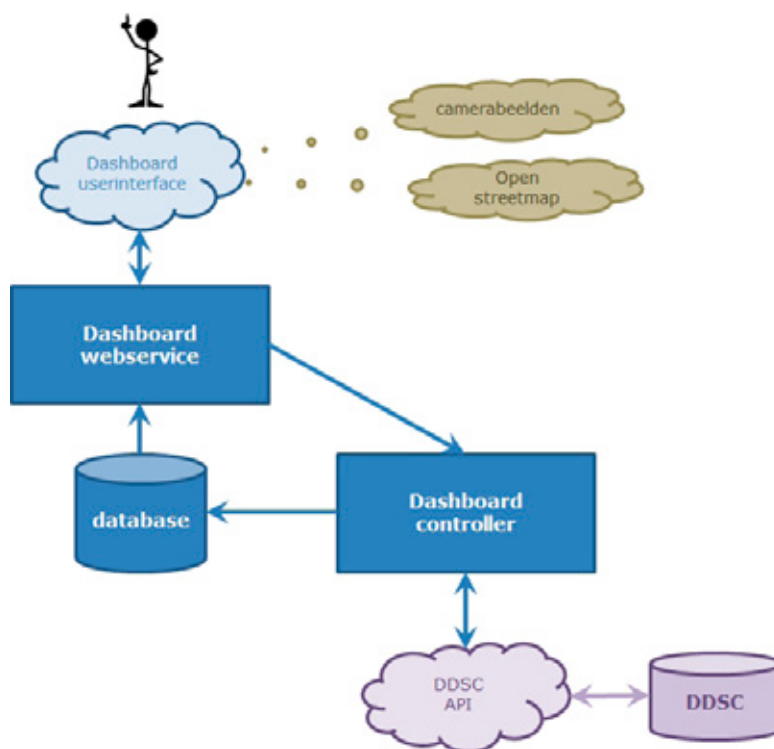
HKV heeft aan de stresstest deelgenomen met het demonstratieproject “Dashboard Leendert de Boerspolder”. De realisatie van het dashboard had tot doel monitoringsdata live te visualiseren en te ontsluiten via internet zodat een actueel beeld van de toestand van de kering kon worden getoond.

3.6.2 Beschrijving systeem

In het dashboard zijn alle beschikbare metingen in één gebruikersinterface ontsloten. Het dashboard is een webapplicatie waarmee informatie van de verschillende meetsystemen wordt gecombineerd en gevisualiseerd. Het dashboard is aanvullend op de bestaande databronnen en systemen. Onderliggende databronnen en systemen zijn niet afhankelijk van het dashboard. Andersom is dit wel geval: als een onderliggend systeem of databron in storing is, zijn de resultaten daarvan niet beschikbaar op het dashboard.

De belangrijkste informatiebron van het dashboard is het DDSC. Specifiek de meetreeksen die in de naam de aanduiding van de Leendert de Boerspolder hebben opgenomen worden door het dashboard geïdentificeerd. Dit betekent dat alleen de meetgegevens die door de monitoringspartijen zijn geüpload naar het DDSC en van het juiste label waren voorzien gepresenteerd konden worden. De meetreeksen werden aangevuld met de camerabeelden die via internet beschikbaar zijn gesteld (dit betrof de bewakingscamera van Bou-Watch).

De architectuur van het dashboard is weergegeven in Figuur 15. De front-end, bestaande uit de Dashboard userinterface en -webserivce, is de interactie met de gebruiker. Dit is een website die met standaard browsers (zoals Internet Explorer, Chrome en Firefox) is te gebruiken. De back-end zorgt dat de informatie wordt opgevraagd bij de databases (zoals DDSC) en op de juiste wijze verzameld en ontsloten wordt.



Figuur 15 Architectuurplaatje van Dashboard Leendert de Boerspolder

De Dashboard userinterface biedt de gebruiker een vaste structuur waarin de informatie van de bezwijkproef Leendert de Boerspolder wordt gepresenteerd. De informatie op de website (Dashboard userinterface) wordt óf met een vaste frequentie geactualiseerd, óf op basis van een trigger vanuit de back-end. De front-end heeft een (internet-) koppeling met open databronnen zoals camerabeelden die via internet beschikbaar zijn (bewakingscamera Bou-Watch) en kaartmateriaal van Open Streetmap. Achtergronden bij het project en referenties naar betrokken organisaties zijn als statische tekstbestanden en/of figuren opgenomen.

De back-end verzorgt het ontsluiten van de juiste data en toelevering daarvan aan de userinterface. Centraal in de back-end is de Dashboard Controller. Dit is een proces op een Windows-server dat de informatie uit de verschillende databronnen inwint (in dit geval uit het DDSC). Alle data wordt opgeslagen in een lokale database waaruit de Dashboard webservice informatie haalt voor de userinterface.

De Dashboard Controller bevraagt met een vaste frequentie het DDSC, waarbij steeds de informatie over de afgelopen 8 uur wordt opgevraagd. Deze informatie wordt opgeslagen in de database. De Controller maakt hierbij gebruik van de DDSC API om de informatie uit het DDSC te lezen.

De database bevat de actuele meetdata die in de front-end ontsloten worden. Dit omvat actuele monitoringsdata, achtergrondinformatie (tekst), plaatjes & logo's en helpteksten.

Gekozen is om in het dashboard geen autorisatie op te nemen. Achter de schermen is wel een autorisatie gehanteerd om toegang te verkrijgen tot de database van het DDSC. De gebruiker kan het Dashboard Leendert de Boerspolder gebruiken zonder in te loggen.

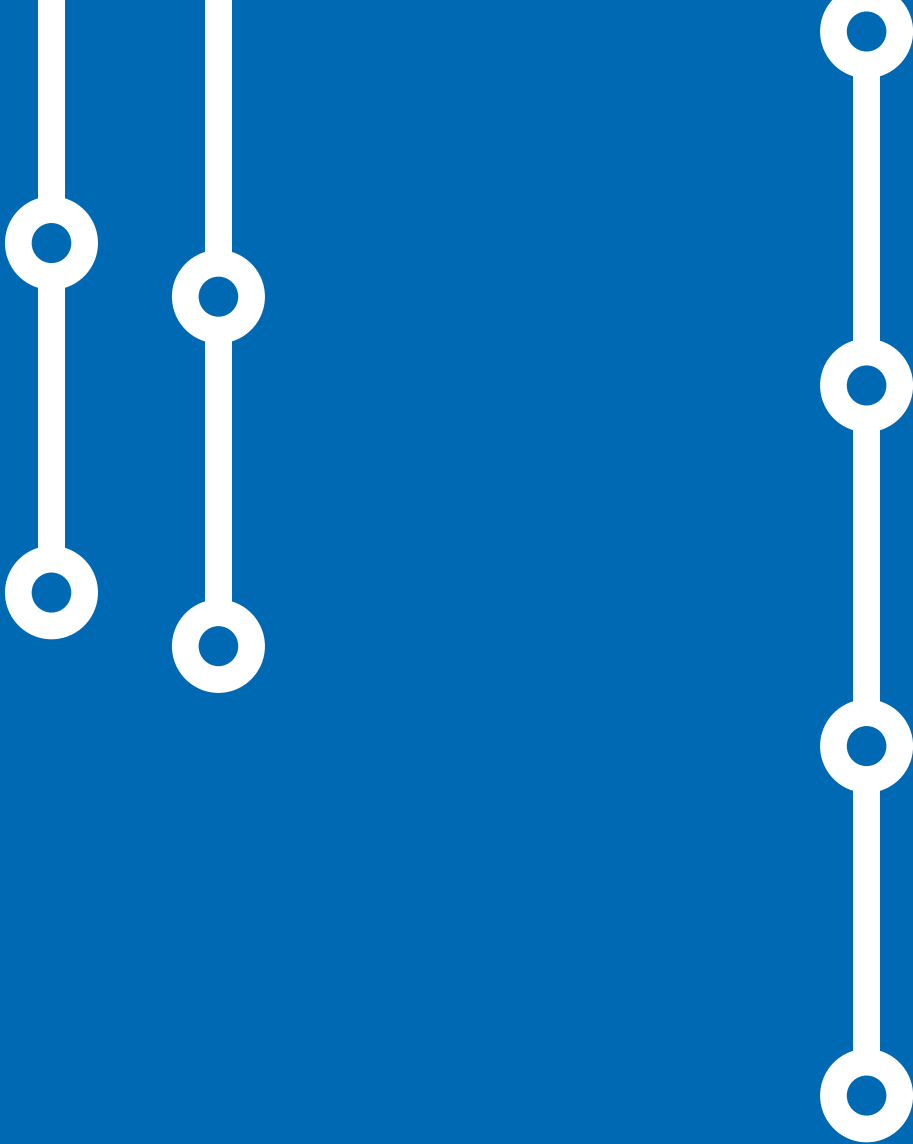
Het dashboard is geschikt voor standaardbrowsers (Internet Explorer, Firefox en Chrome). Andere browsers worden niet ondersteund.

3.6.3 Informatievoorziening

Op het dashboard is te zien welke actuele observaties en meetwaarden er beschikbaar zijn. Deze informatie wordt aangevuld met beelden van de webcam op de dijk en ondersteund met algemene informatie.

Een dashboard dient als hulpmiddel bij het duiden van veelal technische informatie en ter ondersteuning bij het monitoren van een project of object waarbij de informatie uit verschillende bronnen moet worden gecombineerd in één overzicht.

Het Dashboard Leendert de Boerspolder is gebaseerd op de meetgegevens die via het DDSC beschikbaar worden gesteld. De informatie van het Dashboard Leendert de Boerspolder is bedoeld om de toestand van de kering tijdens de stresstest te monitoren, niet om de meetgegevens te analyseren.



4 Resultaten en analyse

4.1 Fotogrammetrie

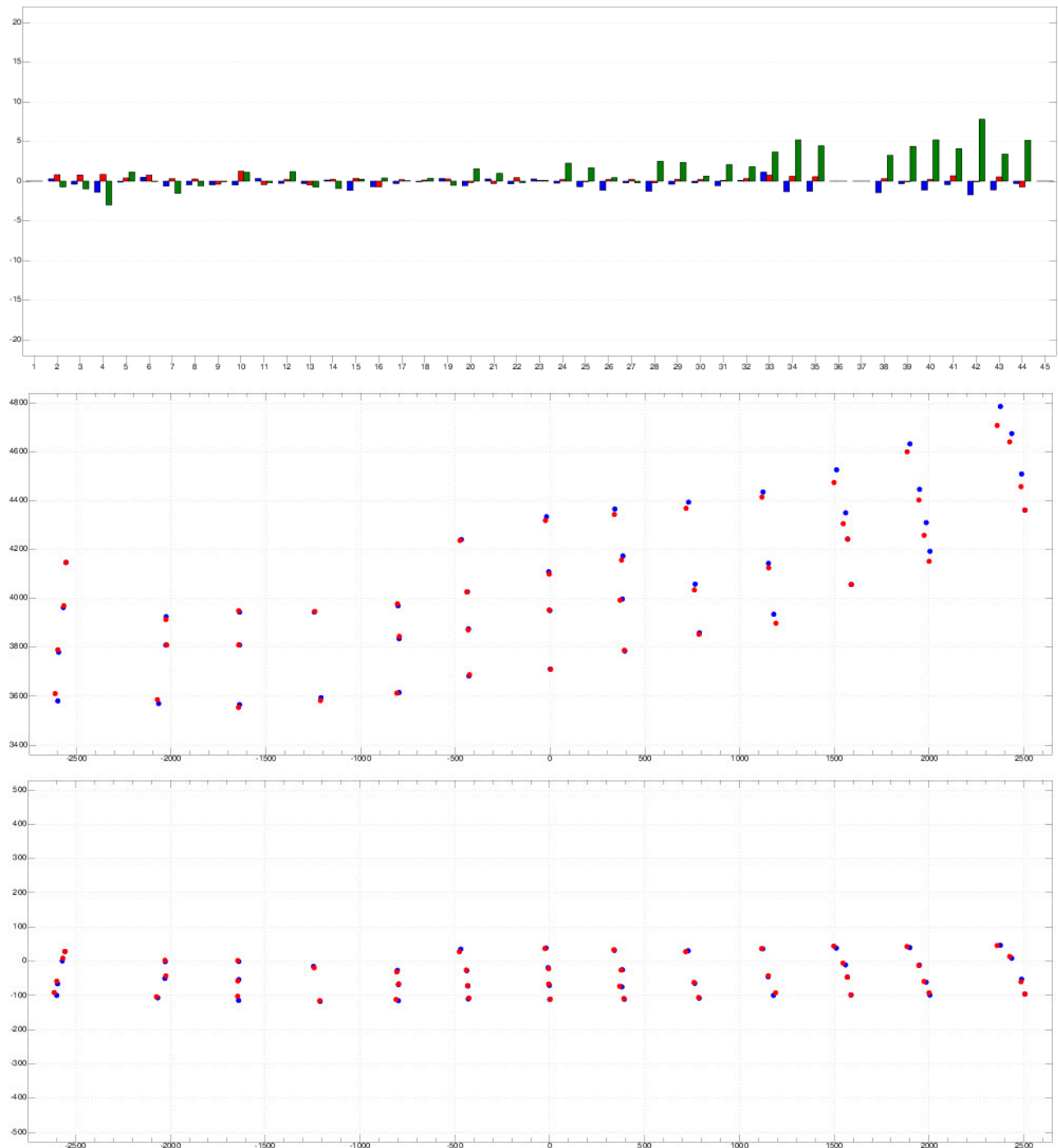
4.1.1 Resultaten

Systeem 1 – vier-camerasysteem

Met het vier-camerasysteem zijn in totaal 7118 opnames gemaakt in twee periodes: van 25 september t/m 2 oktober en van 11 t/m 14 oktober. In de tussenliggende periode was het systeem buiten gebruik ten gevolge van het doorbranden van de camera's op 2 oktober. Door synchronisatieproblemen waren niet alle opnames bruikbaar: er zijn 1601 tijdstippen waarop alle vier camera's tegelijk een opname gemaakt hebben, zodat (in theorie) 1601 3D reconstructies van de markeringspunten gemaakt zouden kunnen worden.

Tijdens de ontgravingen zijn de opnames om verschillende redenen verstoord. Vanaf 11 oktober zijn de nachtopnames van een van de camera's systematisch onderbelicht, zodat er geen markeringspunten zichtbaar zijn. Ten gevolge van de onvoldoende verlichting is het voor de opnames bij nacht niet mogelijk gebleken de markeringspunten op een betrouwbare wijze automatisch te herkennen. Daarom is er veel tijd en moeite geïnvesteerd in nieuwe herkenning algoritmes. Uiteindelijk is het mogelijk gebleken de punten in de nachtopnames automatisch te herkennen. Voor opnames bij daglicht was een alternatieve werkwijze nodig, die bestond uit het handmatig aanwijzen van de markeringspunten.

Figuur 16 en Figuur 17 tonen resultaten die met respectievelijk de handmatige en de automatische aanwijsprocedure bereikt zijn. De getoonde situaties zijn opgenomen op 28 september 13:30 uur en op 30 september 01:30 uur. De staafdiagrammen geven de verplaatsingen weer van de reflectoren in drie richtingen ten opzichte van de nulmeting op 20 september. In de tevens getoonde boven- en vooraanzichten geven blauwe stippen de posities aan van de markeringspunten in de nulmeting op 20 september. De rode stippen komen uit de fotogrammetrische 3D reconstructies. Voor de duidelijkheid zijn de verschillen tussen de rode en blauwe stippen met een factor 10 vergroot.

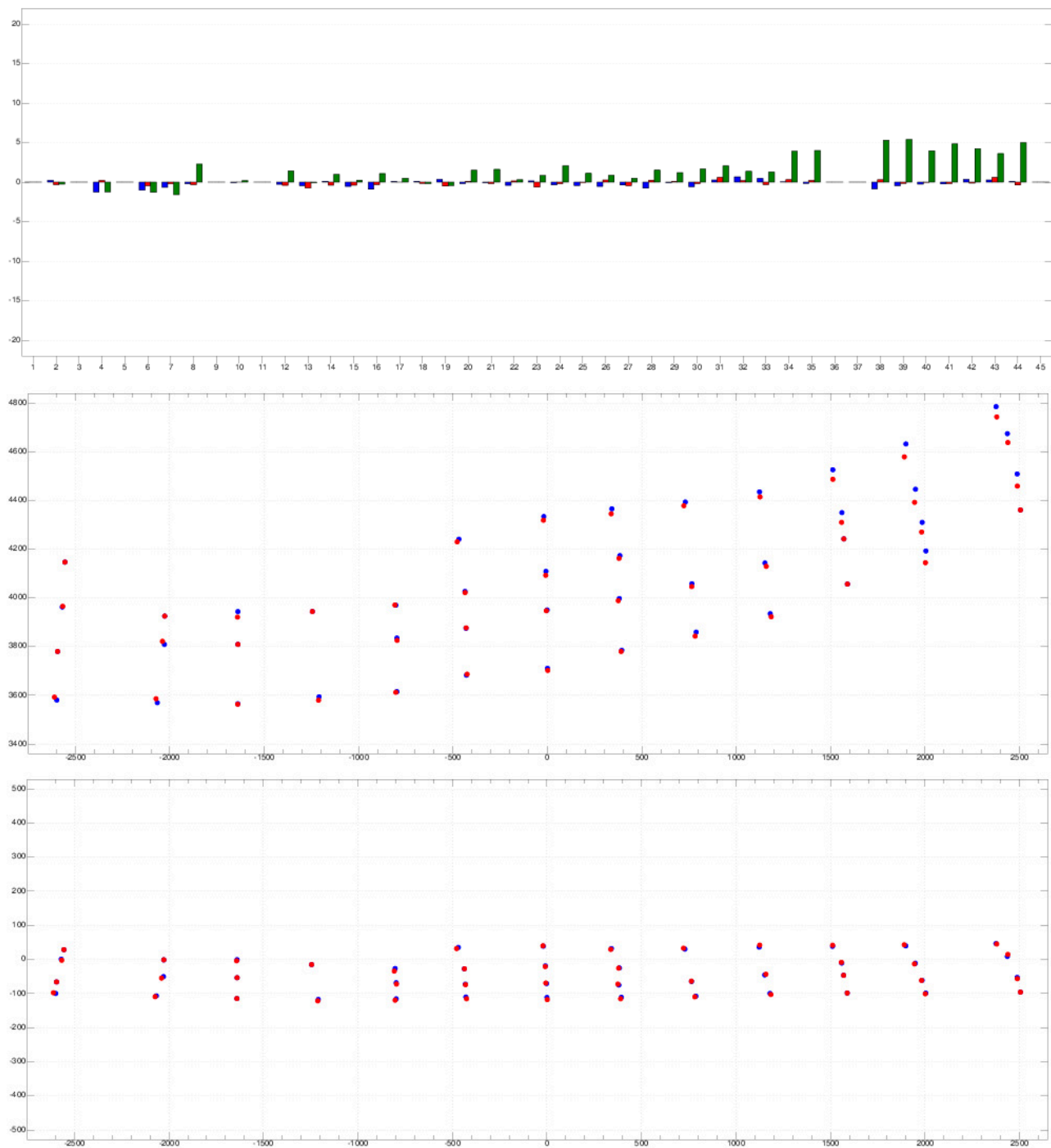


Figuur 16 Verplaatsingen van markeringspunten op 28 september. De opnames zijn gemaakt bij daglicht (13:30 uur) en de reflectoren zijn handmatig aangewezen in de beelden.

Boven: Verplaatsingen van de punten in de lengterichting (blauw), hoogte (rood) en diepte loodrecht op de dijk (groen) afzonderlijk in cm.

Midden: Bovenaanzicht met nulmeting (blauw) en fotogrammetrische meting (rood).

Onder: Vooraanzicht met nulmeting (blauw) en fotogrammetrische meting (rood).



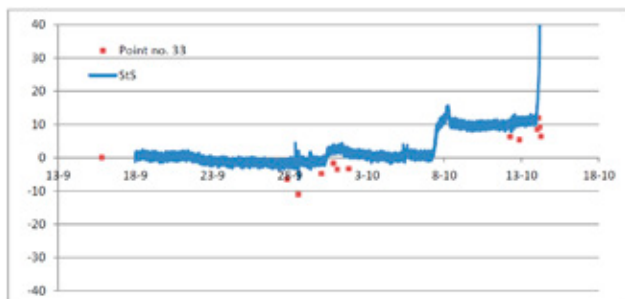
Figuur 17 Verplaatsingen van markeringspunten op 30 september. De verplaatsingen zijn bepaald met automatisch gedetecteerde reflectoren in nachtopnames (01:30 uur).

Boven Verplaatsingen van de punten in de lengterichting (blauw), hoogte (rood) en diepte loodrecht op de dijk (groen) afzonderlijk in cm.

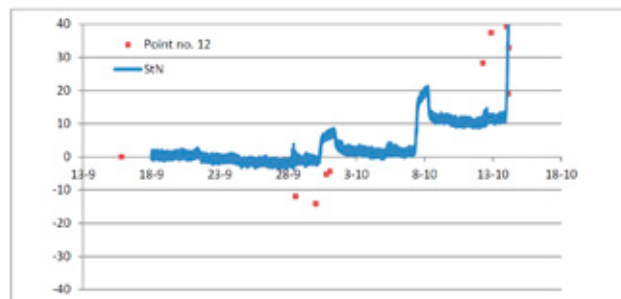
Midden Bovenaanzicht met nulmeting (blauw) en fotogrammetrische meting (rood).

Onder Vooraanzicht met nulmeting (blauw) en fotogrammetrische meting (rood).

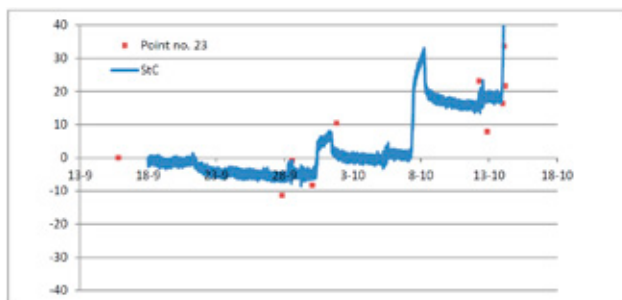
De beschikbare fotogrammetrische resultaten van de reflectoren die zich het dichtst bij de inclinometers bevonden (33, 23, 20 en 12) zijn in onderstaande figuren afgebeeld. De bewegingen van de inclinometers (StS, StC, ScC en StN), gedurende de hele periode van het onderzoek, zijn ter referentie in dezelfde figuren weergegeven.



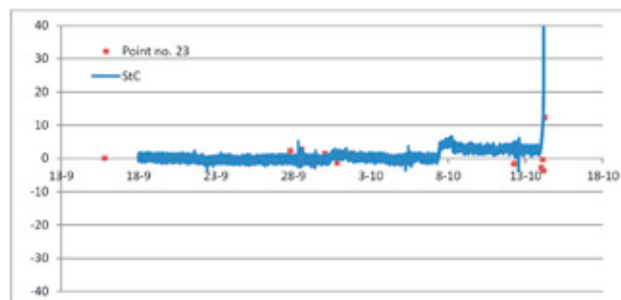
Figuur 18
Vergelijking van de oppervlaktebewegingen langs de as van de dijk (in zuidelijke richting) tussen punt 33 en inclinometer StS



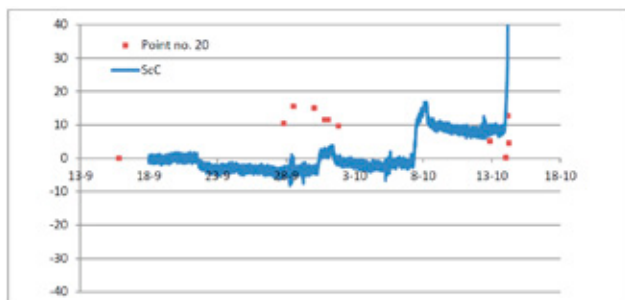
Figuur 19
Vergelijking van de oppervlaktebewegingen langs de as van de dijk (in zuidelijke richting) tussen punt 12 en inclinometer StN



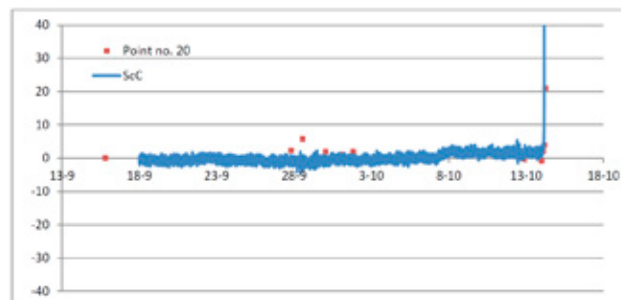
Figuur 20
Vergelijking van de oppervlaktebewegingen langs de as van de dijk (in zuidelijke richting) tussen punt 23 en inclinometer StC



Figuur 21
Vergelijking van de oppervlaktebewegingen loodrecht op de as van de dijk (in westelijke richting) tussen punt 23 en inclinometer StC



Figuur 22
Vergelijking van de oppervlaktebewegingen langs de as van de dijk (in zuidelijke richting) tussen punt 20 en inclinometer ScC



Figuur 23
Vergelijking van de oppervlaktebewegingen loodrecht op de as van de dijk (in westelijke richting) tussen punt 33 en inclinometer StS

Systeem 2 – twee-camerasysteem

Met het twee-camerasysteem zijn opnames gemaakt van 11 t/m 14 oktober. Door een beperkte openingshoek is er een selectie gemaakt van ca. 40m dijk lengte die met de camera's in beeld kon worden gebracht. De ingebouwde flitsers in de camera's zorgden voor een lichtopbrengst die net voldoende was om de markeringspunten automatisch te kunnen identificeren.

Door een onopgehelderde oorzaak functioneerde een van de camera's uitsluitend overdag terwijl de andere camera voortdurend beelden heeft opgeslagen. Daardoor zijn er respectievelijk 1644 en 3795 opnames gemaakt door de twee camera's.

De reconstructie is uitgevoerd voor een zeer korte periode met als doel de meetruis te bepalen (zie volgende paragraaf). Daarvoor is gebruik gemaakt van perioden met weinig beweging. Er zijn geen reconstructies gemaakt voor andere perioden, waardoor geen uitspraken gedaan kunnen worden over de bruikbaarheid van het twee-camera-systeem voor het bepalen van beweging.

4.1.2 Interpretatie

Systeem 1

De resultaten in Figuur 16 en Figuur 17 geven een indruk van de bereikte meetnauwkeurigheid (ruis) op plaatsen waar nog geen deformatie heeft plaatsgevonden. Uit de gegevens van de inclinometers blijkt dat er op 28 en 30 september al wel deformatie is opgetreden in de orde van een halve centimeter.

Aan de Noordzijde (links) en in het midden van het gemeten dijksegment zijn de gemeten verschillen met maximaal 10mm klein. Maar aan de Zuidzijde nemen de verschillen toe tot ca. 40mm. De richting van de beweging is overeenkomstig de verwachtingen: naar beneden en in de richting van de polder. Deze trend wordt in het uiteindelijke resultaat ook gegeven door de inclinometers, maar is qua timing wel verschillend van de waarnemingen door de inclinometers.

Uit de 1601 tijdstippen die met systeem 1 zijn opgenomen is een selectie gemaakt van nader te bestuderen tijdstippen (binnen de beperkingen van de beschikbare opnames). Vanuit de kleine selectie van tijdstippen die behandeld zijn/konden worden, is toch duidelijk een trend in de bewegingen van de markeringspunten over de tijd te onderscheiden. Deze trend is qua richting in overeenstemming met de bewegingen van de inclinometers. De amplitude van de fotogrammetrisch bepaalde bewegingen was doorgaans groter dan van de inclinometers. Na de herstart met nieuwe camera's wordt de beweging echter vaker onderschat ten opzichte van de inclinometers. Er zijn ook een aantal grove afwijking tussen fotogrammetrische meting en inclinometers geconstateerd.

Verschillen kunnen mogelijk verklaard worden door een lagere nauwkeurigheid van het fotogrammetrie systeem veroorzaakt door, verschil in belichting, windbelasting op de reflectiepunten dan wel op de cameramasten. De grootste discrepantie is te zien tussen de data van reflectiepunt 20 en de inclinometer ScC in de zuidelijke richting, een mogelijke verklaring hiervoor is dat mogelijk de koppeling tussen het reflectiepunt 20 en de dijk niet goed was.

Systeem 2

Van de beschikbare resultaten worden in Figuur 24, Figuur 25 en Figuur 26 verschillen getoond tussen de coördinaten van telkens twee reconstructies rond het middaguur op zondag 11-10-2015, toen er geen activiteiten plaatsvonden (zie §2.2.2 [Logboek]). Deze reconstructies zouden vrijwel identiek moeten zijn vanwege het korte tijdsinterval ertussen. Maar de drie patronen zijn helemaal anders, wat aangeeft dat het hier zuivere meetruis betreft. Deze is het grootst in de diepterichting (groen) met een maximum van 10mm. De verschillen in langsrichting (blauw) en hoogte (rood) zijn kleiner dan 4 mm. Voor deze korte periode kan de daadwerkelijke deformatie dan ook niet bepaald worden.



Figuur 24 Verschillen in X (blauw), Y (rood) en Z (groen) tussen coördinaten 43 markeringspunten na 50 min (epoche 1 - 11)



Figuur 25 Verschillen in X (blauw), Y (rood) en Z (groen) tussen coördinaten van 43 markeringspunten na 50 min (epoche 2 - 12)



Figuur 26 Verschillen in X (blauw), Y (rood) en Z (groen) tussen coördinaten van 43 markeringspunten na 50 min (epoche 3 - 13)

4.1.3 Evaluatie

De uitvoering van het project was uitdagend, maar is in potentie geschikt voor afschuiven van dijklichamen. Het is echter extreem arbeidsintensief om de code voor het bepalen van (gekalibreerde) vervormingen te programmeren. Hiervoor is geen standaardcode beschikbaar waardoor maatwerk nodig was.

Bij 24-uurs monitoring is degelijke verlichting 's nachts noodzakelijk. Tijdens het experiment is tegen veel problemen aangelopen, met name op het gebied van verlichting, instabiliteit van de camera en stroomuitval. Deze uitdagingen hadden veel invloed op de kwaliteit van de resultaten.

Ten gevolge van de onvoldoende verlichting in systeem 1 is het met name in de opnames bij daglicht niet mogelijk gebleken de markeringspunten op een betrouwbare wijze automatisch te herkennen. De markeringspunten zijn daarom handmatig aangewezen. Dit is een zeer arbeidsintensief proces en mogelijk een aanvullende bron van onnauwkeurigheid.

Een ander belangrijk gevolg van onvoldoende verlichting is een verslechterde signaal-ruisverhouding. Hierdoor was de automatische sub-pixel positiebepaling van de punten zowel in nachtopnames als overdag niet meer zinvol. Dit omdat zowel de betrouwbaarheid van de procedure als de nauwkeurigheid van het resultaat sterk te wensen overliet. Daardoor zijn de nauwkeurigheden van de 3D reconstructies minder goed dan voorzien.

De beslissing om het tweede systeem te installeren werd in een laat stadium genomen, nadat de verlichtingsproblemen met systeem 1 onoplosbaar bleken. Helaas was er hierdoor weinig tijd om een behuizing te construeren die voldoende stevig, transparant en waterdicht was. Met name op het eerste punt schoot de uiteindelijke oplossing tekort, waardoor de camera's niet erg stabiel gemonteerd konden worden. Vooral bij harde wind bewogen ze vrij sterk, waardoor het "tracken" van de markeringspunten een uitdaging werd, omdat deze zich telkens op andere plekken in het beeld bevonden. Ook moest het oriënteringsproces bij elk tijdstip opnieuw gedaan worden.

4.2 Tiltsensor

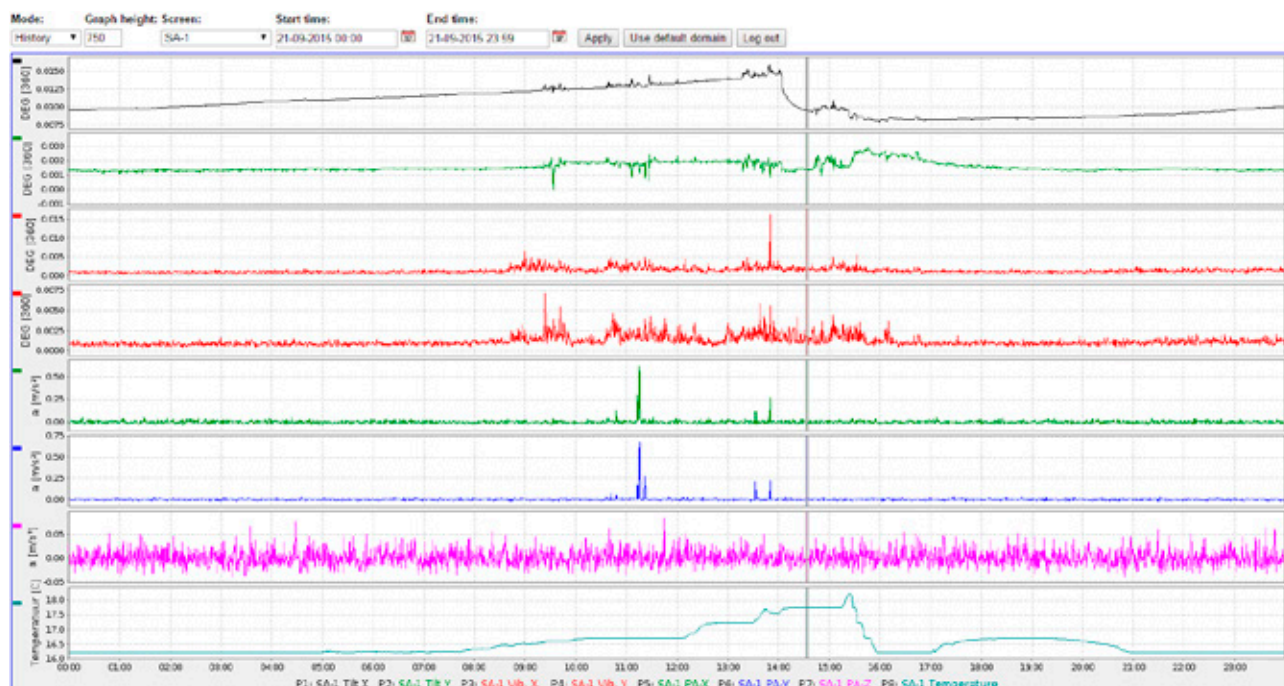
4.2.1 Resultaten

Gedurende de gehele proef heeft monitoring plaatsgevonden waarmee continue meetreeksen voor tilt en trillingen zijn verkregen. De resultaten worden weergegeven in verschillende figuren die bestaan uit 8 grafieken. Die grafieken hebben van boven naar onder de volgende betekenis (van boven naar beneden in de figuur):

1. Stand in dwarsrichting van de dijk (x-richting). De grafiek vertoont een stijgende lijn als de bovenkant van de pijp richting de boezem gaat, of de onderkant van de pijp richting de polder en vice versa.
2. Stand in langsrichting van de dijk (y-richting). De grafiek vertoont een stijgende lijn als de bovenkant van de pijp beweegt in zuidwestelijke richting, of de onderkant van de pijp in noordoostelijke richting en vice versa
3. Trilling in dwarsrichting van de dijk (x-richting). Dit zijn de maximaal doorlopen bogen in de dwarsrichting van de dijk.
4. Trilling in langsrichting van de dijk (y-richting). Dit zijn de maximaal doorlopen bogen in de langsrichting van de dijk.
5. Versnelling in dwarsrichting (x-richting)
6. Versnelling in langsrichting (y-richting)
7. Versnelling in verticale richting (z-richting)
8. Temperatuur

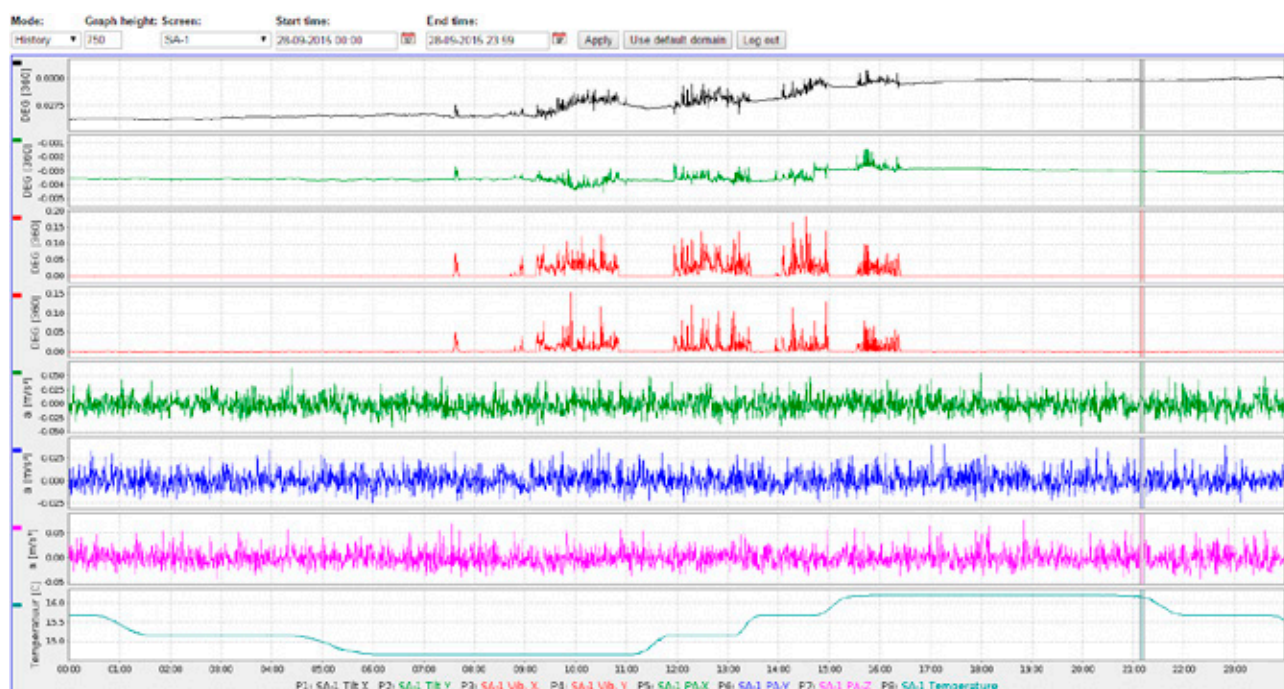
Voor het detecteren van de bewegingen 'zetten' en 'splijten' zijn tenminste twee sensoren nodig (in een dwarsdoorsnede). Deze bewegingen konden met de gebruikte proefopstelling zodoende niet worden beoordeeld.

In Figuur 27 zijn de meetresultaten van maandag 21 september weergegeven. Rond 14:00 uur daalt in een uur de x-tilt van ongeveer 0.015 tot 0.010. In de periode tot 27 september wordt na deze daling een stijgende trend waargenomen in de x-tilt: van 0.01 op 21 september tot ongeveer 0.03 aan het eind van 27 september. In dezelfde periode wordt een daling in de y-tilt van 0.025 graad waargenomen.



Figuur 27 Waarnemingen op maandag 21 september

Op maandag 28 september (Figuur 28) zijn vier perioden met veel trillingen waar te nemen. Deze hangen samen met de ontgravingsactiviteiten van de graafmachine (met tussendoor koffie- en lunchpauzes). Er is nauwelijks verandering in y-tilt en een stijging van enkele duizendste graden in x-tilt. Dit beeld herhaalt zich op voor 29 september (Figuur 29). Op deze dag zijn twee perioden met veel trillingen te onderscheiden, deze hangen samen met het omscheppen van uitgegraven materiaal naar achteren (inclusief een pauze).

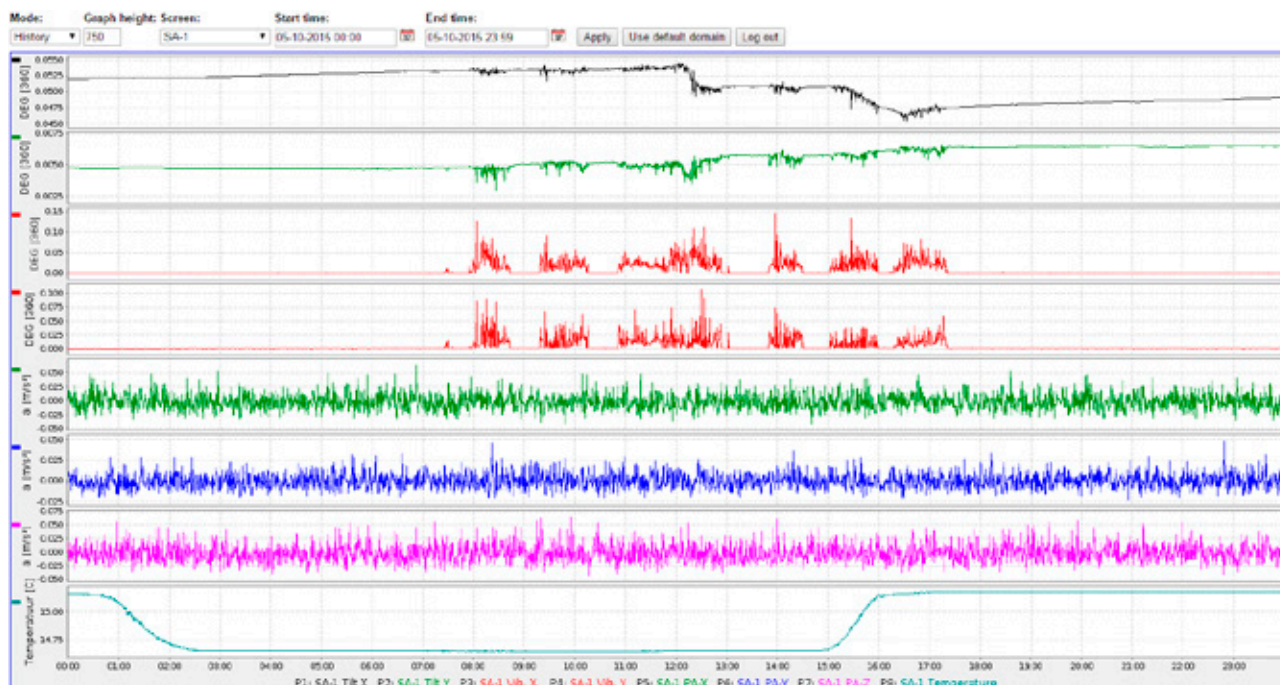


Figuur 28 Waarnemingen op maandag 28 september



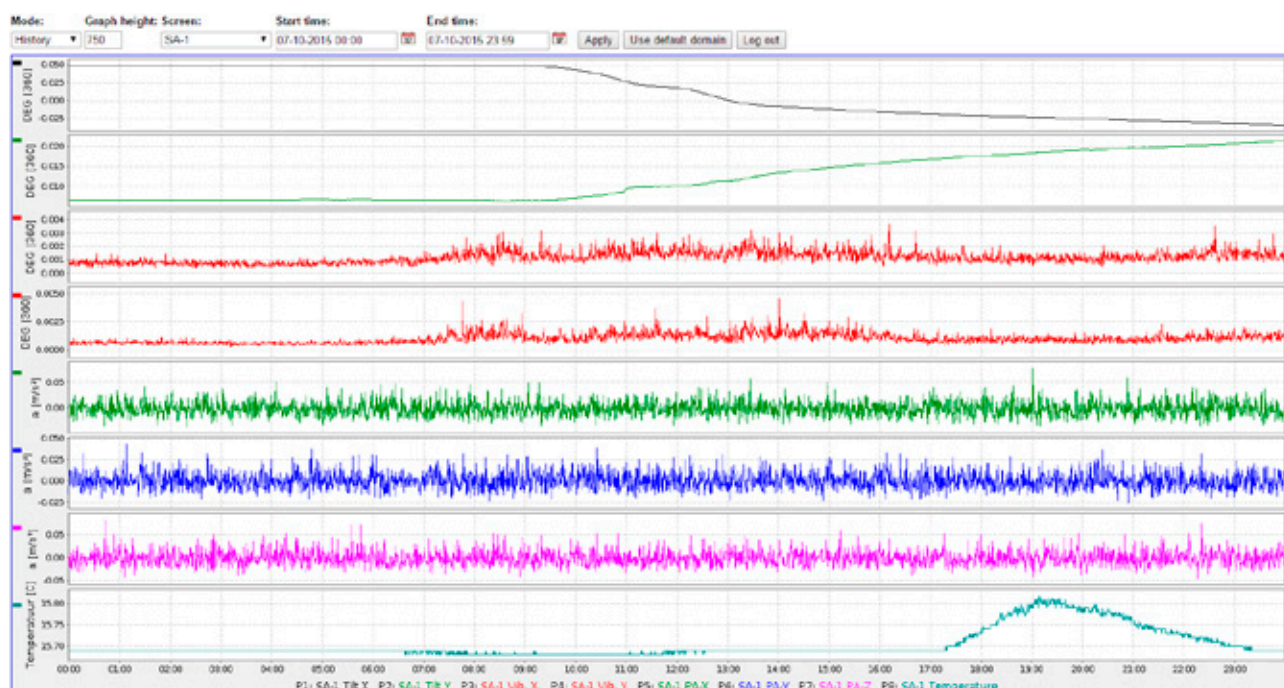
Figuur 29 Waarnemingen op dinsdag 29 september

Op maandag 5 oktober (Figuur 30) zijn verschillende perioden van trillingen waargenomen. De stijgende trend in x-tilt wordt door twee dalingen (0.055 naar 0.50 naar 0.045) onderbroken. De y-tilt blijft licht stijgen richting 0.0075.



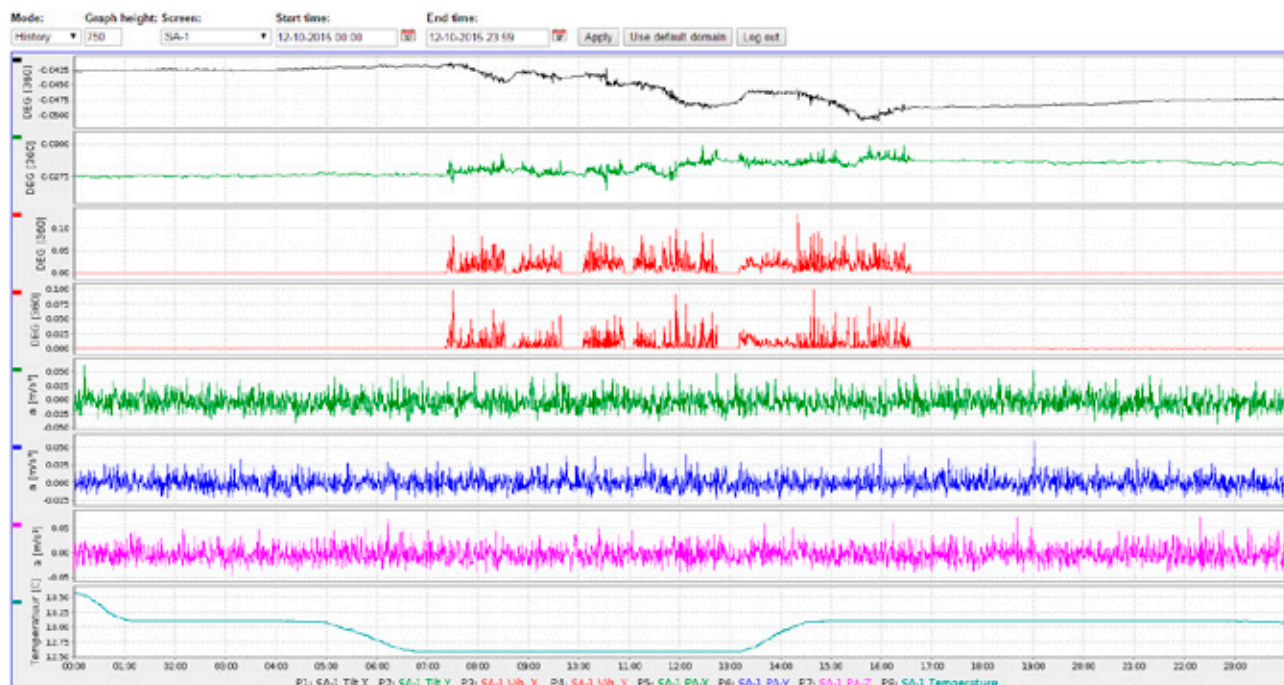
Figuur 30 Meetresultaten van maandag 5 oktober

Vanaf 10 uur op woensdag 7 oktober (Figuur 31) zet de x-tilt een daling in van 0.05 tot ongeveer -0.10 op donderdag 8 oktober om 11 uur (deels buiten de figuur). Daarna is deze constant. In dezelfde periode stijgt de y-tilt van 0.01 naar 0.04.



Figuur 31 Meetresultaten van woensdag 7 oktober

In Figuur 32 zijn de meetresultaten van maandag 12 oktober weergegeven. Van 07:00 tot 16:00 uur worden trillingen waargenomen. Dit gaat gepaard met een daling in x-tilt van -0.04 tot -0.05. De y-tilt laat geen wezenlijke stijging of daling zien.



Figuur 32 Meetresultaten van maandag 12 oktober

Figuur 33 geeft de meetresultaten op de dag van doorbraak weer. De x-tilt heeft een dalende trend. Van ongeveer -0.05 omstreeks 0:00 uur tot -0.2 omstreeks 6:15 uur. Tussen 6:15 uur en het moment dat de metingen worden afgebroken (6:39 uur) stijgt de x-tilt weer tot het niveau -0.1. De y-tilt is tot 5:45 uur constant en stijgt daarna snel tot ongeveer 0.25 omstreeks 6:39 uur.



Figuur 33 Meetresultaten op woensdag 14 oktober tussen 00:00 uur en 07:00 uur.

4.2.2 Interpretatie

De belangrijke gebeurtenissen tijdens de proef, namelijk vernatten en ontgraven, bieden een aantal referenties voor de vervormingen die zijn geconstateerd. Ten behoeve van de interpretatie worden verschillende soorten bewegingen onderscheiden met de volgende omschrijvingen:

- Bewegingen dwars op de dijk:
 1. Afglijden – De voet van de dijk verplaatst zich t.o.v. van de kruin richting de polder
 2. Vallen – De kruin van de dijk verplaatst zich t.o.v. de voet richting de polder.
- Bewegingen in de lengte van de dijk:
 3. Schranken naar links – Kijkend in de richting van het water beweegt de kruin naar links t.o.v. de voet van de dijk.
 4. Schranken naar rechts – kijkend in de richting van het water beweegt de kruin naar rechts t.o.v. de voet van de dijk.

De interpretatie met betrekking tot punt 1 'afglijden' en punt 2 'vallen' zijn bij gebruik van 1 sensor, mogelijk door analyse van de meetresultaten en kennis van de activiteiten en gebeurtenissen tijdens de proef.

Op maandag 21 september is de opstart van de werkzaamheden vanaf 08:30 duidelijk te zien in de waargenomen trillingen. Vanaf 14:00 uur is er getest en water over de dijk gevoerd, waardoor het gewicht toenam en de dijk is gaan vallen. Vanaf 15:05 uur is veel water over de dijk gevoerd gedurende ongeveer een kwartier. Kennelijk heeft dit water om 15:25 de te sensor bereikt gezien de sterke temperatuurdaling op dat moment.

Op maandag 28 september is de proef voortgezet met de eerste ontgraving. De vier ontgravingsmomenten zijn duidelijk terug te zien in de data (Figuur 28). De ontgraving heeft een afglijdende trend van enkele 1000ste graden tot gevolg. Er is geen significante schrankbeweging.

De meetdata laat op 29 september perioden met trillingen zien. Dit is te herleiden tot de activiteiten die in die periode rond de dijk zijn uitgevoerd.

De waterstandsverlaging in de ochtend van 30 september resulteert in afglijden en schranken naar rechts. Het vullen van de ontgraving tot maaiveld de volgende ochtend doet het afglijdende effect teniet. Deze twee opvolgende

processen duiden erop dat hier sprake is van (voornamelijk) elastische vervorming – zo ongeveer in de maximale mate waarin je dat bij grond mag verwachten.

Op maandag 5 oktober is er verder ontgraven. De bovengrondse verplaatsing van de ontgraven grond is duidelijk waarneembaar in de (trillings)data. Als gevolg van de ontgraving maakt het dijklichaam een vallende beweging. De waterstandsverlaging in de ochtend van 7 oktober heeft een duidelijk vallende beweging tot gevolg. Ook resulteert de verlaging in een naar rechts schrankende beweging. In tegenstelling tot bij de eerdere aanvulling is het effect van de eerder verlaging nu echter blijvend. Het aanvullen tot maaiveld heeft nagenoeg geen invloed op de dijk. Het verdiepen en steiler maken van de ontgraving op 12 oktober heeft een marginaal vallend effect tot gevolg. Het leegpompen van de ontgraving vanaf woensdag 14 oktober 0:38 uur heeft tot gevolg dat de dijk langzaam maar gestaag onderuit zakt in de x-richting. Deze beweging heeft om 5:18 uur het alarm laten afgaan dat was ingesteld als de x-tilt beneden de -0.1 graad zou komen. In het laatste half uur voor bezwijken komt het vallend effect in de x-richting in een versnelling. Tevens treedt er dan fors schranken naar rechts op.

Vanaf 6:15 uur gaat de vallende beweging over in een afglijdende beweging. Het schranken naar rechts loopt op tot 0.25 graden. Dit duidt erop dat de sensor vlak voor bezwijken voorover is getrokken in zuidwestelijke richting. De dijk bezwijkt omstreeks 6:22 uur. De sensor meet nog door tot 6:37 uur, waarna de stroom uitvalt.

4.2.3 Evaluatie

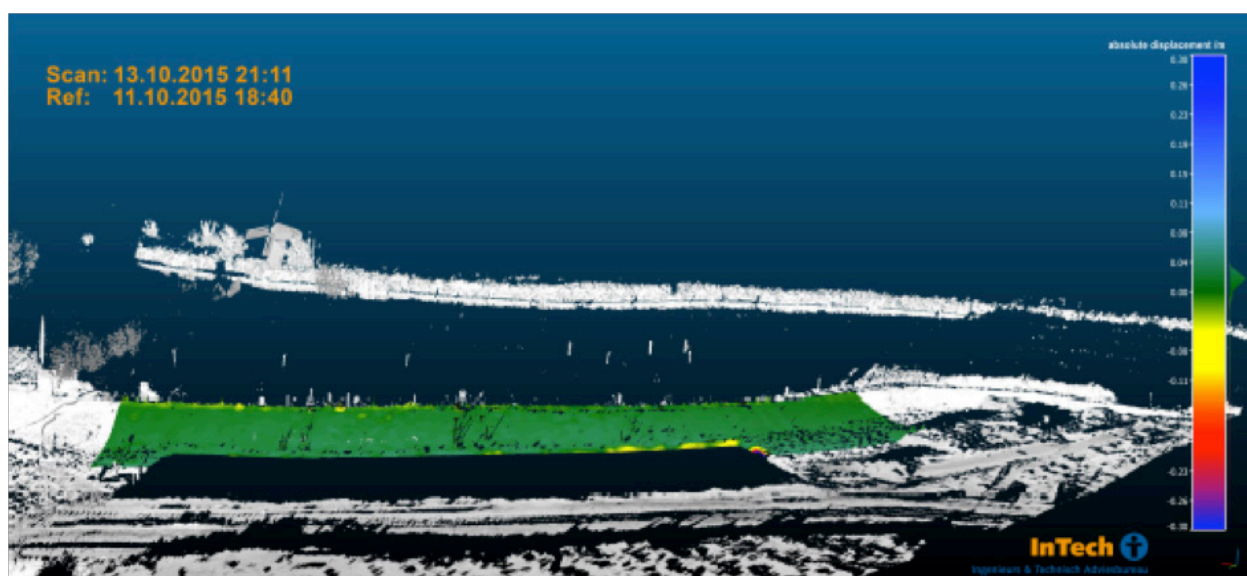
Er is geen onregelmatig gedrag van de sensor gesignaleerd. De dataflow was constant en consistent. De gegevens konden via de website van StabiAlert live worden gevolgd. Na afloop is alle data opgeslagen in het DDSC.

Door tenminste twee sensoren in een dwarsdoorsnede te plaatsen hadden ook de bewegingen 'zetten' en 'splijten' gemeten kunnen worden.

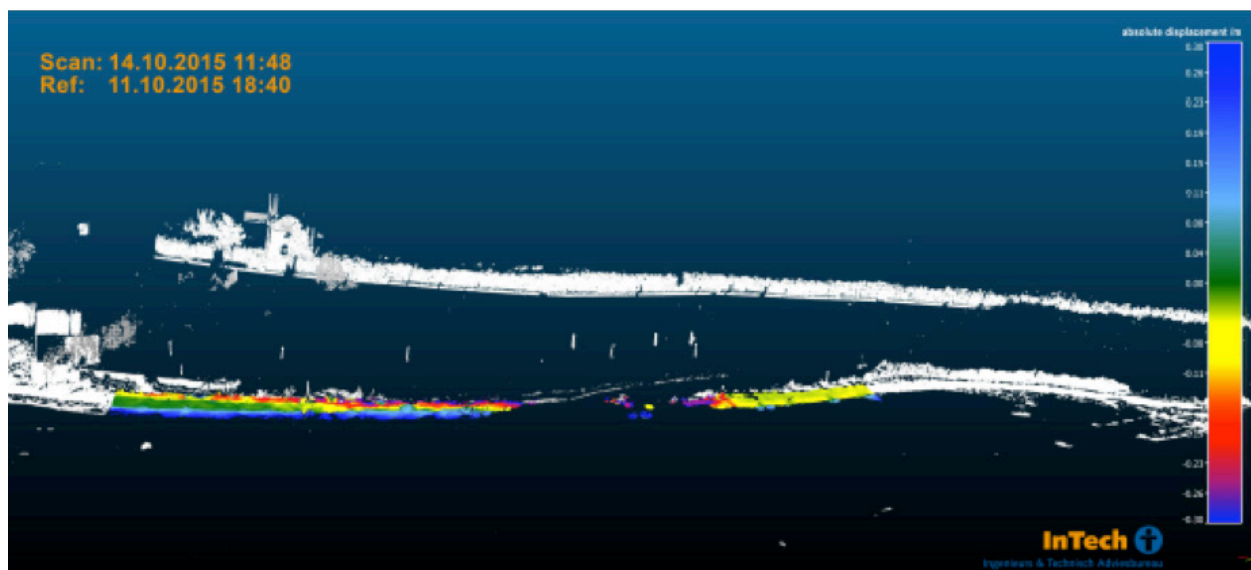
4.3 3D-laserscanning

4.3.1 Resultaten

Gedurende de bezwijkproef zijn 80 laserscans uitgevoerd. De resultaten van de 3D-laserscan brengen de deformatie gedurende de gehele proef in beeld. De maximaal gemeten deformatie bedroeg 80 mm en werd gemeten aan de westzijde van de dijk. In Figuur 34 en Figuur 35 zijn respectievelijk 3D-laserscans van (9 uur) voor de dijkdoorbraak en (5 uur na) de dijkdoorbraak weergegeven.



Figuur 34 Resultaat van een 3D-laserscan gemeten op de avond voor de dijkdoorbraak



Figuur 35 Resultaat van een 3D-laserscan gemeten op de ochtend na de dijkdoorbraak

4.3.2 Interpretatie

Het verloop van deformatie gedurende de bezwijkproef kan worden gevolgd met de resultaten van de 3D-laserscan. De maximale deformatie is gemeten op de vooravond van de doorbraak (laatste scan voor doorbraak) aan de westzijde van de dijk. Op de locatie waar de maximale verzakking werd waargenomen, vond de volgende ochtend ook de doorbraak plaats.

Analyse van de resultaten laat zien dat de deformatiemetingen worden beïnvloed door het (onregelmatige) groeipatroon van de grasbekleding.

4.3.3 Evaluatie

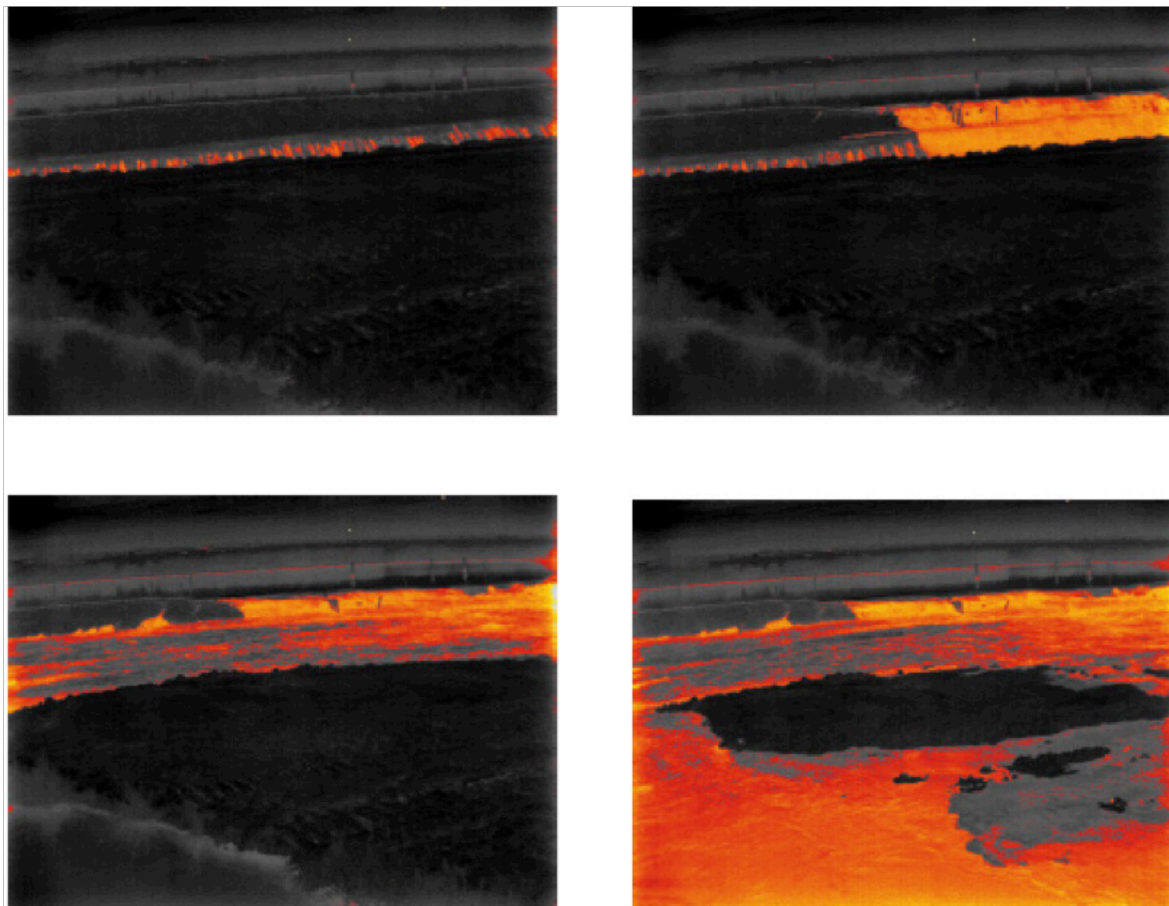
Het systeem heeft goed gefunctioneerd. Op momenten dat de voeding van de stroomvoorziening uitviel, trad de noodstroomvoorziening automatisch in werking. Uit de meetresultaten van het systeem zijn geen bijzonderheden tijdens de proef waargenomen.

Het instellen van een automatisch scaninterval voor de 3D-laserscanner was niet mogelijk. Daarom zijn de metingen iedere keer op afstand opgestart, waardoor de laatste scan van voor de doorbraak toen betrekkelijk lang geleden was.

4.4 Infrarood

4.4.1 Resultaten

In de periode van 19 september tot en met 14 oktober zijn er 6212 temperatuuroopnamen gemaakt met de infraroodcamera. In Figuur 36 zijn de temperatuurmetingen vlak voor en tijdens de doorbraak weergegeven.



Figuur 36 Infraroodopnamen vlak voor en tijdens de dijkdoorbraak

4.4.2 Interpretatie

Bij het verlagen van het slootpeil vlak voor de doorbraak zijn kwelplekken duidelijk zichtbaar op de infraroodbeelden. Dit is echter geen 'trigger' voor het optredende faalmechanisme. De dijkdoorbraak is goed waar te nemen met de infraroodmetingen. Op het moment van doorbraak en na afschuiving is overloop waarneembaar in grote oranje vlekken. Daarnaast is de deformatie aan de westzijde van de dijk goed zichtbaar op de infraroodbeelden.

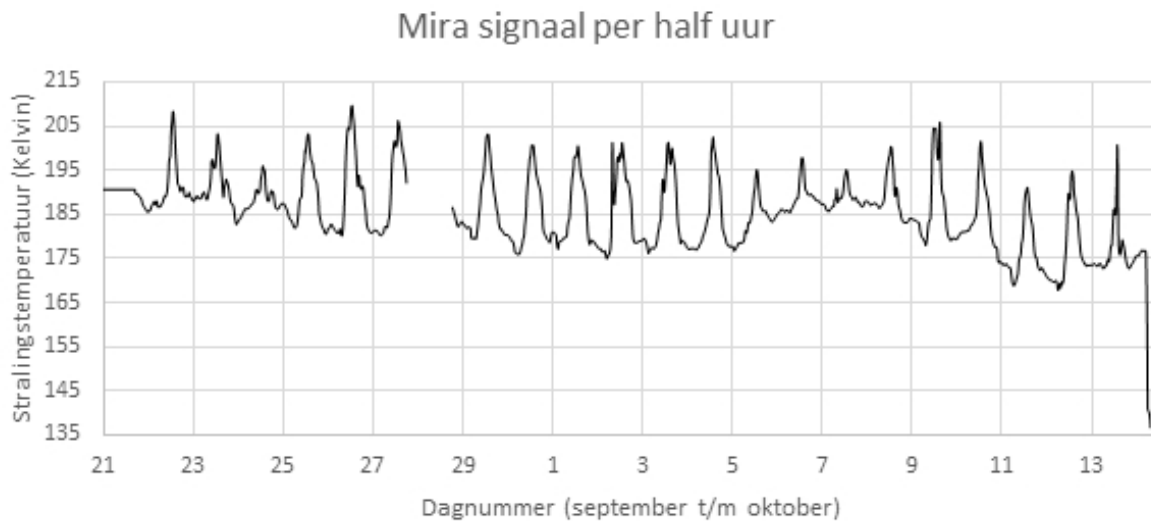
4.4.3 Evaluatie

Het systeem heeft gedurende de gehele proef goed gefunctioneerd. Op momenten dat de voeding van de stroomvoorziening uitviel, trad de noodstroomvoorziening automatisch in werking. Uit de meetresultaten van het systeem zijn geen bijzonderheden tijdens de proef waargenomen.

4.5 Passieve microgolfradiometrie

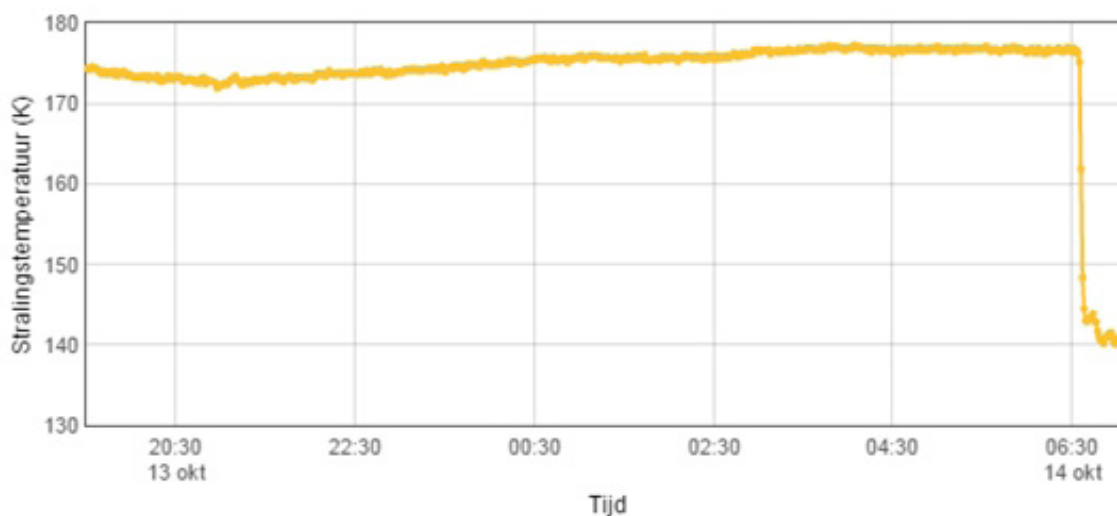
4.5.1 Resultaten

De complete serie van metingen, van 21 september t/m 14 oktober 2015, is weergegeven in Figuur 37. Een detail op de dag van de dijkdoorbraak is weergegeven in Figuur 38. Dit is de reeks zoals deze in het DDSC is weergegeven. De meetwaarden betreffen de gemiddelde gemeten stralingstemperatuur van het bemeten dijkoppervlak.



Figuur 37 Stralingstemperatuur uitgezet tegen de tijd gedurende de lengte van de bezwijkproef

In de data ontbreekt 28 september. Dit is het gevolg van problemen met de stroomtoevoer en de simkaart gedurende die dag.

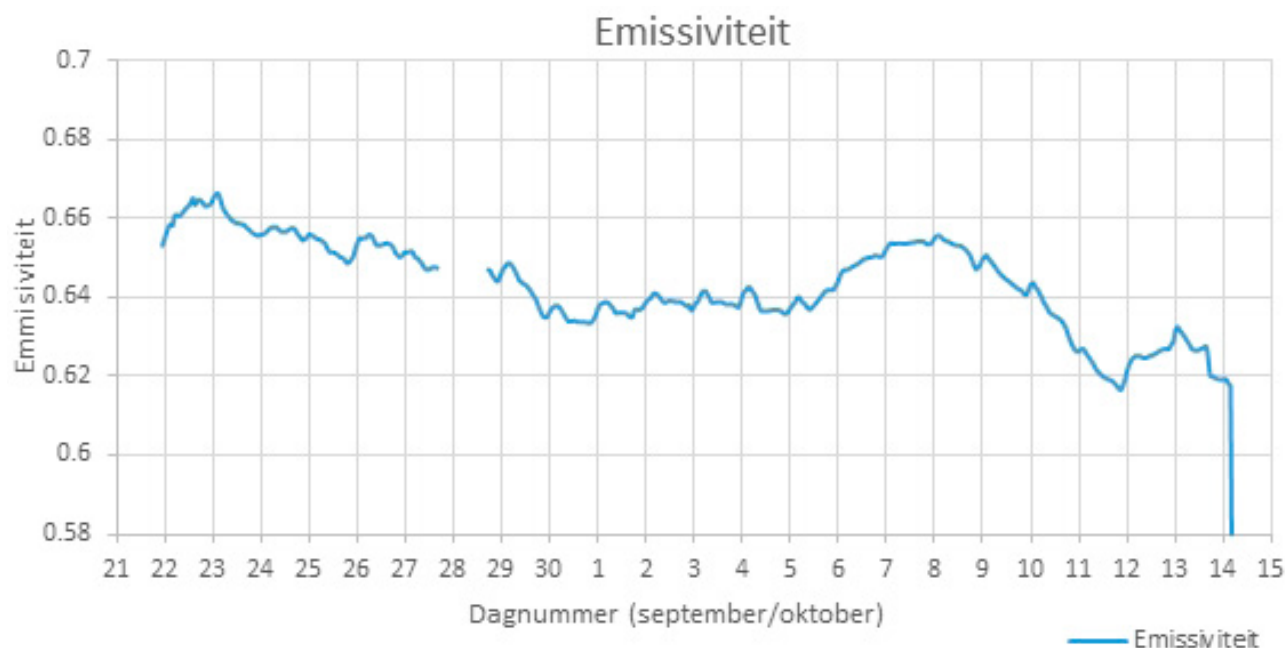


Figuur 38 Stralingstemperatuur in de uren vooraf en tijdens de dijkdoorbraak (zoals weergegeven in DDSC)

In de stralingstemperatuur is een dag- en nachtritme te herkennen. De (gemeten) stralingstemperatuur is het product van enerzijds de emissiviteit en anderzijds de temperatuur. Een deel van de variatie wordt daarom veroorzaakt door dagelijkse temperatuurschommelingen.

Alleen de emissiviteit is een indicatie voor bodemvochtvariaties. De emissiviteit wordt berekend met $\varepsilon = \frac{T_b}{T}$,

waarbij T_b de gemeten stralingstemperatuur is en T de temperatuur. Door de stralingstemperatuur en de temperatuur op elkaar te delen wordt de invloed van het dag- en nachtritme uit de data geëlimineerd. De uit de metingen ontleende emissiviteit is weergegeven in Figuur 39.



Figuur 39 Emissiviteit uitgezet tegen de tijd gedurende de duur van de bezwijkproef

4.5.2 Interpretatie

Gedurende de eerste week van de proef is de dijk verzadigd door middel van de vernattingsinstallatie. In de emissiviteit van de dijk is dit terug te zien in een dalende trend vanaf 23 september. Dit komt overeen met de verwachting omdat een dalende emissiviteit wijst op een toename in bodemvocht.

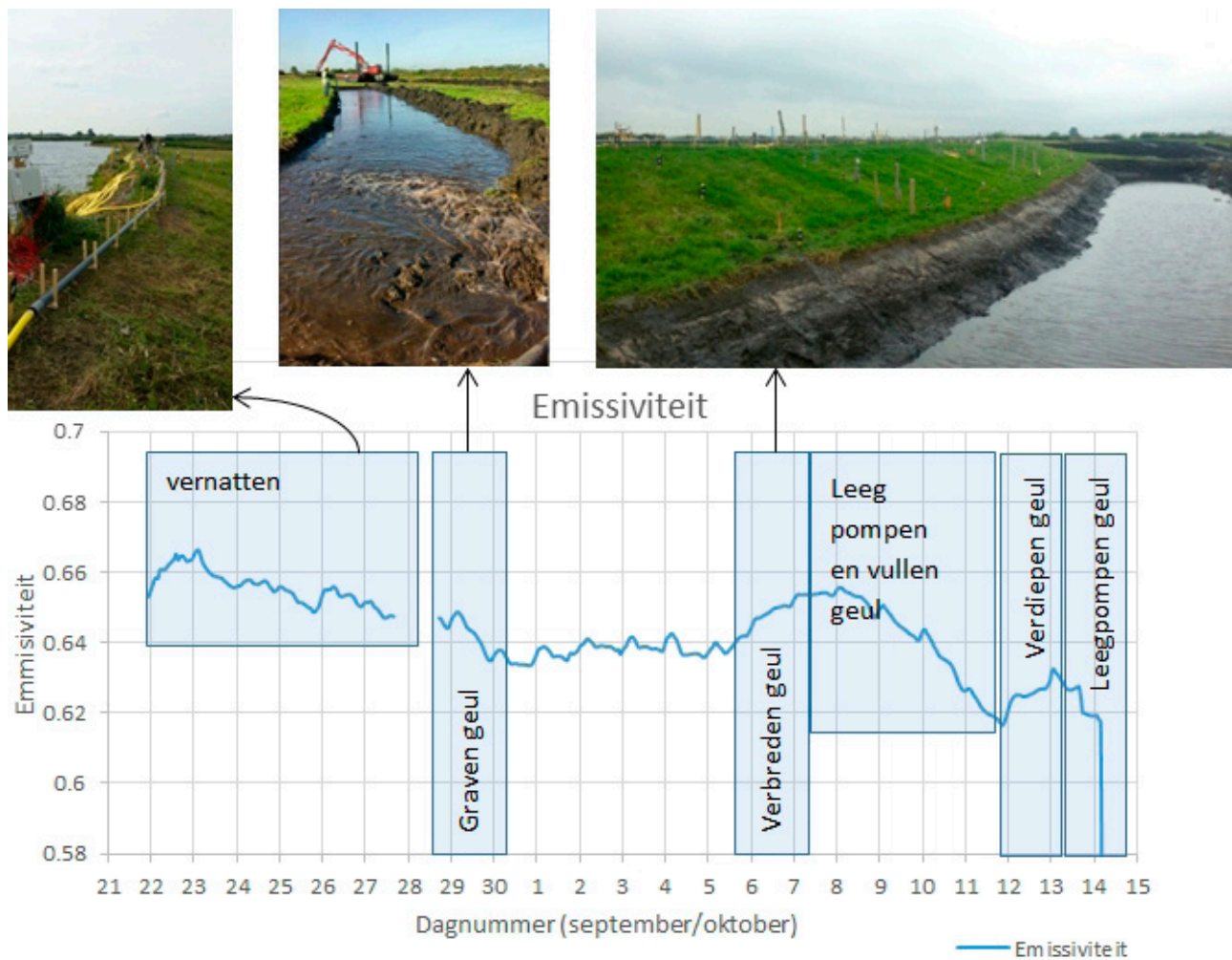
In week twee van de proef, startend op 28 september, is begonnen met het afgraven van de geul achter de dijk. Na het graven van de geul is de emissiviteit nog iets verder gedaald. Van 30 september tot en met 5 oktober is de emissiviteit stabiel gebleven op kleine schommelingen na.

In de derde week van de proef, startend op 5 oktober, is de geul achter de dijk verbreed. De emissiviteit van het dijklichaam steeg vanaf 5 oktober tot het niveau van 25 september. Een mogelijke verklaring hiervoor is het vochtverlies aan de geul. Vanaf het moment dat de ontgraving werd gevuld met water, op 8 oktober, is de emissiviteit gestaag gedaald. Deze daling heeft voortgeduurd tot 12 oktober.

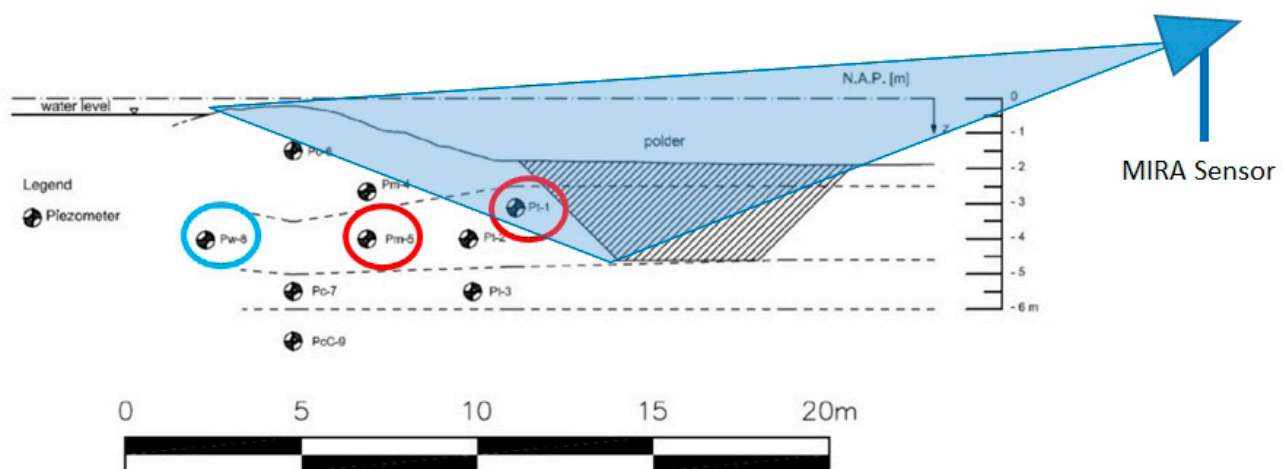
In de laatste week van de proef, startend op 12 oktober, is de geul achter de dijk verdiept in combinatie met verdere vernatting van het dijklichaam. In de emissiviteit is eerst een stijging gevolgd door een daling waarneembaar. De daling zet door tot het moment van doorbreken. De dijk brak door in de nacht van 14 oktober nadat het waterpeil in de ontgraving werd verlaagd.

Figuur 40 toont de emissiviteit ten opzichte van een aantal belangrijke proefmomenten zoals die hierboven zijn beschreven.

De resultaten van de MIRA scanner zijn vergeleken met waterspanningsmeters uit het reguliere monitoringsprogramma. In Figuur 41 is een schematische dwarsdoorsnede afgebeeld waarin de locaties van de waterspanningsmeters en de meetbundel van de MIRA-scanner zijn weergegeven.



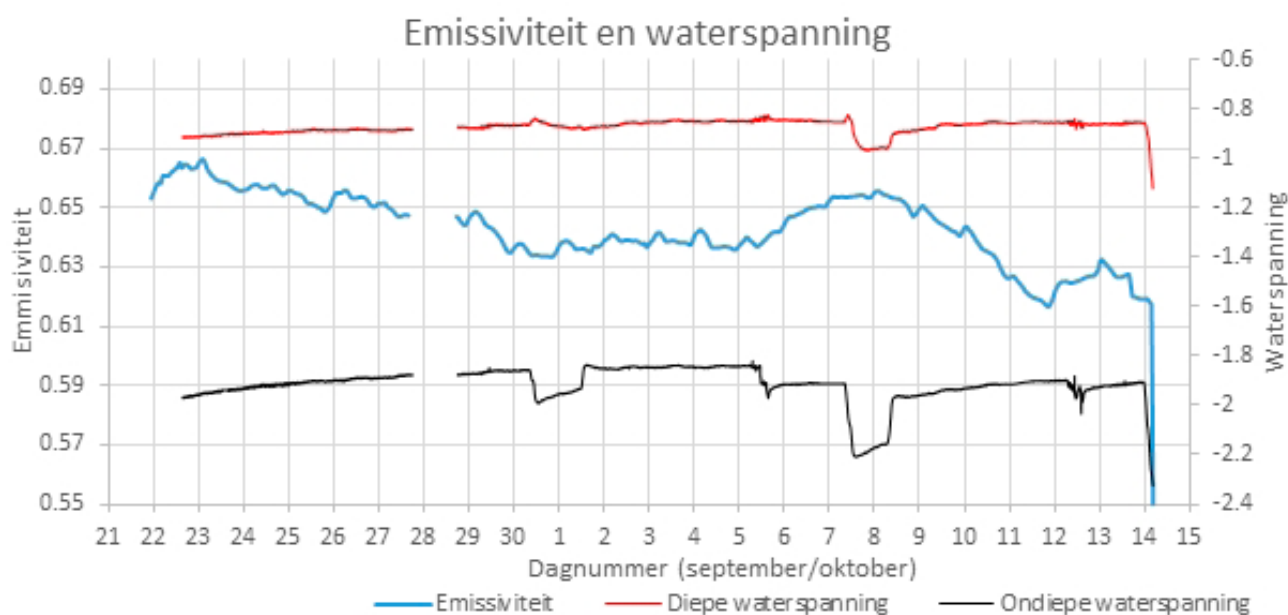
Figuur 40 Emissiviteit in relatie tot belangrijke gebeurtenissen van de proef (met leegpompen wordt hier bedoeld dat het waterpeil in de geul is verlaagd).



Figuur 41 Schematische weergave van de locatie van MIRA-scanner en de waterspanningsmeters

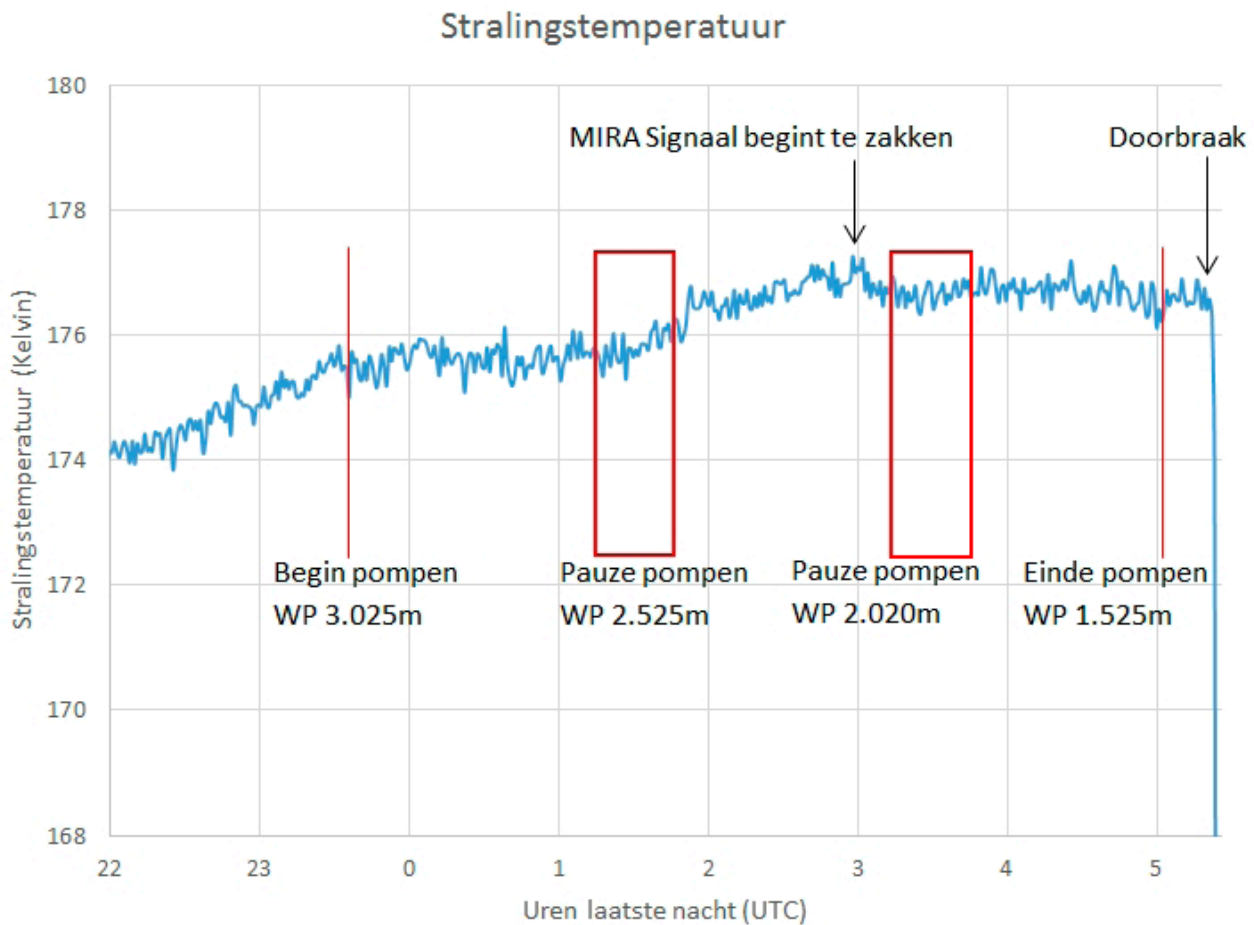
Figuur 42 toont de emissiviteit en de waterspanningen van Pm-5 (diepe waterspanning) en Pt-1 (ondiepe waterspanning) gedurende de hele projectduur. De vernatting in de eerste proefweek resulteert in een dalende emissiviteit en een oplopende druk in/ter plaatse van de diepe en de ondiepe waterspanningsmeters. Na het verlagen van het waterpeil in de ontgraving op 30 september wordt bij de ondiepe waterspanningsmeter een verlaagde druk waargenomen. Dit komt waarschijnlijk door de nabijheid van de waterspanningsmeter ten opzichte van de ontgraving. Bij het verlagen van het waterpeil met 1 meter werd de grondwaterstand tot op het niveau van de waterspanningsmeter gebracht. De kleine verhoogde druk van de diepere waterspanningsmeter is opvallend. Er lijken hier 2e-orde effecten (rond spanningsspreiding, consolidatie en kruip) een rol te spelen. Na het vullen van de geul op 1 oktober ontstaat een stabiele situatie waarbij de waterspanning nauwelijks fluctueert. Ook de emissiviteit blijft in die periode stabiel op kleine schommelingen na.

De verbreding van de ontgraving op 5 oktober is vooral zichtbaar in de ondiepe waterspanningsmeter. De verlaging van de waterspanning wijst op een afname van vocht dicht bij het dijkoppervlak. Deze afname wordt ondersteund door de gemeten verhoging van de emissiviteit vanaf 5 oktober. Na het verlagen van het waterpeil in de ontgraving op 7 oktober en het vervolgens weer vullen daarvan op 8 oktober is de emissiviteit van het dijklichaam gestaag gedaald tot en met 11 oktober. Deze trend loopt synchroon met de oplopende druk in beide waterspanningsmeters. Het verdiepen van de ontgraving op 12 oktober resulteert in eenzelfde soort reactie in de ondiepe waterspanning en emissiviteit als bij de verbreding van de ontgraving op 5 oktober. De waterspanning maakt een sprong naar beneden en de emissiviteit vertoont een stijgende trend. Vanaf 13 oktober daalt de emissiviteit weer, wat in overeenstemming is met een toenemende waterspanning.



Figuur 42 Emissiviteit en waterspanningen

In de nacht van 14 oktober is het waterpeil in de ontgraving in drie fasen verlaagd. De dijk is vervolgens bezweken om 6:25 uur. De MIRA data tonen ten tijde van het verlagen van het waterpeil een geleidelijke toename in stralingstemperatuur. Vanaf 4:00 uur, toen de waterstand was teruggebracht, begon de stralingstemperatuur heel geleidelijk te zakken. De doorbraak is tenslotte duidelijk waarneembaar op het moment dat het signaal snel zakte. De data van de laatste uren voor de doorbraak is weergegeven in Figuur 43. Hierin is ook de pompactiviteit weergegeven.



Figuur 43 Ruwe stralingstemperatuurdata van laatste uren voor bezwijken

De stralingstemperatuur van de MIRA sensor is ook vergeleken met de gemeten waterspanningen van drie diep gelegen waterspanningsmeters. Hiervoor zijn de gegevens van 25 september gebruikt. Tussen de data van de MIRA-scanner en de waterspanningsmeters is een opvallend gelijke trend waarneembaar. Omdat de waterspanningsmeters duidelijk dieper liggen dan het bereik van de MIRA-scanner kan hiervoor niet direct een verklaring worden gegeven. Het lijkt erop dat de waterspanning dieper in de dijk ook wordt beïnvloed door een dag- en nachtritme in de temperatuur. Deze hypothese zal eventueel nader onderzocht moeten worden.

4.5.3 Evaluatie

De passieve microgolf radiometrie meet stralingstemperatuur uit het dijklichaam. Uit deze meetresultaten zijn daarna de bodemvochtveranderingen berekend.

Alle metingen, één per minuut, zijn direct live zichtbaar geweest in DDSC vanaf de start van de proef tot en met een uur na het bezwijken. Na het bezwijken heeft de scanner, op batterij, nog ruim een uur doorgemeten en is de data via de modem (ook op batterij) de data in DDSC blijven uploaden. Later is gebleken dat de data vanaf ongeveer 4:00 uur met een vertraging in DDSC zijn opgeslagen en weergegeven. Vóór 4:00 uur liepen de ruwe data en de DDSC data 1-op-1, maar daarna liep het verschil langzaam op tot 7 minuten op het moment van bezwijken. De data van de waterspanningsmeters en de temperatuursensoren zijn vanaf dat moment helemaal niet meer zichtbaar in DDSC. Er moet vanaf dat moment ergens een glitch hebben gezeten in DDSC. Voor de analyse van de laatste uren is daarom geen gebruik gemaakt van de data in DDSC, maar van de ruwe data.

4.6 Dashboard

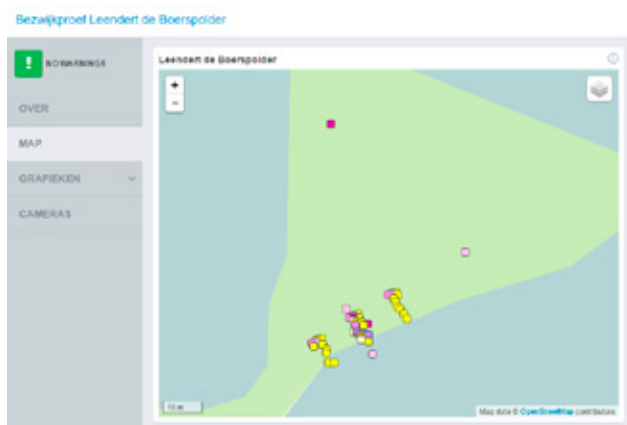
4.6.1 Resultaten

Met het succes van de bezwijkproef en dus het falen van de kering is de proef beëindigd en wordt er niet (meer) gemeten. Om het dashboard inhoud te geven zijn de meetgegevens van de laatste dag, tot 8:00 uur, in het huidige dashboard weergegeven. Het dashboard wordt ontsloten via <http://demo.hkv.nl/floodcontrolijklijk/bezwijkproefleendertdeboerspolder>.

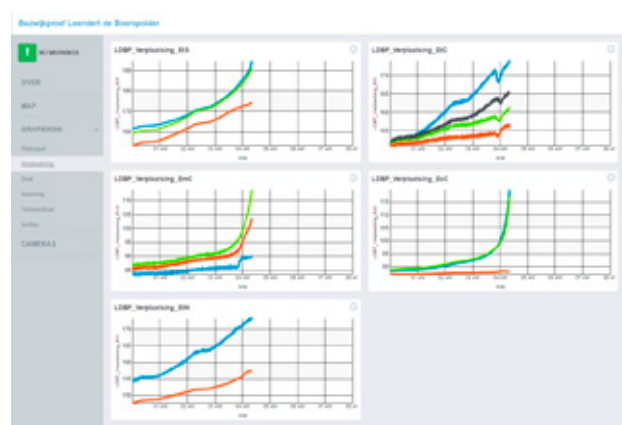
De gebruikersmogelijkheden (aangeduid met 'items') staan hieronder beschreven.

Item: Over

Dit item geeft achtergrondinformatie over het Dashboard Leendert De Boerspolder. Het geeft een kaart met de locatie van de polder en toelichtingen over de bezwijkproef, het Dashboard en de betrokken partijen in dit project (HKV, Stichting FloodControl IJkdijk en het Hoogheemraadschap van Rijnland).



Figuur 44 De map-functie van het dashboard



Figuur 45 De verplaatsingsmeetreeksen als voorbeeld van de grafiek-functie van het dashboard

Item: Map

De map-functie (Figuur 44) geeft de geografische locatie van alle meetlocaties (die in het DDSC zijn gedefinieerd).

Item: Grafieken

In het Dashboard zijn de volgende meetgegevens weergegeven: waterpeil, verplaatsing, druk, neerslag, temperatuur en inclinometingen. Per parameter zijn alle beschikbare metingen als tijdreeksen weergegeven (Figuur 45).

Item: Camera's

Onder camera's (zie Figuur 44) zijn de bewakingsbeelden van de bezwijkproef opgenomen.

4.6.2 Analyse

Tijdens de proef bevatte het dashboard niet alle metingen die werden uitgevoerd. Een deel van de data is pas na de proef in het DDSC gezet. Een ander deel werd niet real-time overgezet naar DDSC, maar enkele keren per dag. Hierdoor ontbraken een aantal meetsystemen en liep ook de visualisatie van sommige meetgegevens vertraging op. Er is periodiek een script gedraaid om nieuwe meetlocaties, beschikbaar in het DDSC, toe te voegen aan het dashboard. Nieuwe meetlocaties werden geïdentificeerd aan 'LDBP' in de naam van de meetreeksen. Identifiers van meetreeksen zonder deze string worden daardoor gemist. De meetpartijen van de Leendert de Boerspolder hebben niet consequent de string 'LDBP' in de naam van de meetreeksen gebruikt. Hierdoor ontbraken bepaalde meetlocaties (meetreeksen) in het Dashboard terwijl deze wel via het DDSC beschikbaar waren. De meetgegevens van de MIRA-scanner zijn om deze reden niet in het Dashboard opgenomen.

De data in het DDSC lijkt te zijn verschoven in de tijd. Op basis van de gegevens in het DDSC lijkt bezwijken op te treden om circa 4:20 uur. Echter de is dijk in werkelijkheid tussen 6:23 en 6:28 uur bezwijken. Het verschil van meer dan twee uur kan niet worden verklaard met de wijze waarop de (lokale) tijd is gedefinieerd (UTC/GMT). Omdat het Dashboard de gegevens weergeeft zoals deze in het DDSC beschikbaar zijn, bevat het Dashboard dus ook de in de tijd verschoven data. Zie ook §4.5.3 over de geleidelijk tot 7 minuten oplopende achterstand vanaf ongeveer 4 uur 's nachts (plaatselijke tijd).

In de Stresstest Leendert de Boerspolder was de belangrijkste doelstelling het toepassen en evalueren van meet- en evaluatietechnieken voor het monitoren van waterkeringen. Informatie over de nieuwe technieken en leveranciers had toegevoegd kunnen worden aan het dashboard, vergelijkbaar met de informatie over de proef zelf onder de tab 'INFO'.

4.6.3 Bruikbaarheid

Het dashboard is kort voor het begin van de bezwijkproef gerealiseerd, gelijktijdig met het installeren en testen van de meetsystemen. Hierdoor is vooral aandacht besteed aan de technische koppeling en was er geen tijd om de samenstelling van het dashboard te optimaliseren. Een verbeterpunt voor het dashboard is om in samenspraak met eindgebruikers het dashboard in te richten. Op basis van feedback kan de duiding van de informatie beter plaatsvinden en sluit het dashboard ook beter aan op de wensen van de gebruiker.

Zo zijn de namen van de meetreeksen uit het DDSC in het dashboard overgenomen. Idealiter wordt in het dashboard echter een minder technische omschrijving gehanteerd die ook toegankelijk is voor niet-specialisten. De beoogde gebruiker is gebaat bij een betere en meer transparantere naamgeving waaruit de meetlocatie en de gemeten parameter eenvoudig te ontleen zijn.

De ervaringen met het dashboard, met name rondom het bezwijken van de kering, leren ook dat de visualisatie van de grafieken star is. De gebruiker heeft geen mogelijkheden om de schaalverdeling aan te passen of om een exacte meetwaarde op te vragen. Daarnaast ontbrak de koppeling tussen een meetlocatie en grafiek. Aanvullend op de huidige functionaliteit is het gewenst dat grafieken kunnen worden opgevraagd vanuit de map-functie. Ook moet bij een grafiek de geografische locatie opgevraagd kunnen worden: naast de coördinaten ook visueel.

Op het dashboard werden de meetwaarden gepresenteerd in onderlinge samenhang. Het was echter voor de niet-deskundige gebruiker niet duidelijk of de weergegeven waarden een extreme situatie aangaven. Leerpunt hieruit is dat een korte uitleg over de gepresenteerde informatie, eventueel in combinatie met het vermelden van kritieke grenzen (of veranderingen in meetwaarde).

Doordat de focus heeft gelegen op het tijdig afronden van het dashboard is er weinig aandacht besteed aan communicatie rondom het dashboard. Hierdoor is het dashboard in de proef nauwelijks gebruikt. Tijdens het veldbezoek aan de bezwijkproef en in de nieuwsbrief van FloodControl IJkdijk is er over het dashboard gecommuniceerd, maar dat was in de laatste week van de proef toen de meeste betrokkenen zich al via andere wegen over de proef lieten informeren. Vlak na het begin van de bezwijkproef is het dashboard ook als Android App beschikbaar gesteld in de App-store. Hiermee was er ook een ontsluiting via mobiele telefoon. De app is weinig gebruikt, waarschijnlijk omdat er onvoldoende bekendheid aan was gegeven.



5 Conclusies

Parallel aan de bezwijkproef is onder de vlag van de Stichting FloodControl IJkdijk de stresstest Leendert de Boerspolder uitgevoerd. In dit project is ervaring opgedaan met het concept van een stresstest voor waterkeringen. In een stresstest wordt een waterkering extreem belast, waardoor kennis wordt opgedaan over gedrag van de kering in extreme omstandigheden. Daarnaast zijn in het project innovatieve monitoringstechnieken beproefd. Eerst wordt ingegaan op de afzonderlijke meettechnieken in relatie tot het meten van de variabelen beweging en freatische lijn. Vervolgens worden conclusies getrokken over de bijdrage van de technieken bij het bepalen van actuele dijksterkte en wordt ingegaan op de vraag in welke mate de innovatieve technieken een voorspellende waarde hebben in relatie tot mogelijk dijkfalen.

5.1 Monitoren

5.1.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie heeft de potentie om op afstand bewegingen van een dijklichaam nauwkeurig te meten. De meetresultaten geven aan de hand van beelden met een hoge resolutie opgetreden deformaties in zowel boven- als zij aanzicht. Dit geeft inzicht in het gedrag van de dijk als geheel.

De techniek is nog niet uitontwikkeld. Het functioneren van de techniek en de betrouwbaarheid van het resultaat worden nog sterk bepaald door externe factoren: zo is de beweging van de camera's van invloed op de nauwkeurigheid van het resultaat en kunnen 3D-reconstructies nog niet worden geautomatiseerd. Een beperking aan fotogrammetrie is dat voor nachtopnamen kunstlicht nodig is.

5.1.2 Tiltensor

Met de gevoelige tiltensortechniek worden inwendige vervormingen en trillingen van het dijklichaam met hoge frequentie geregistreerd. Het systeem registreert vervormingen in de richtingen langs de dijk en haaks op de dijk. De resultaten gedurende de looptijd van de proef laten zien dat de dijk reageert op uitgevoerde vernatting en ontgravingen. De aanloop naar bezwijken is in de resultaten terug te zien als sterk toenemende vervormingen.

De techniek meet nauwkeurig inwendige vervormingen en trillingen ter plaatse van de sensor. De meetresultaten geven echter geen direct inzicht in de beweging van de gehele dijk. Bewegingen waarbij de hoek van de sensor onveranderd blijft, worden met deze techniek niet geregistreerd. Bijvoorbeeld afschuivingen of verzakkingen van een geheel dijklichaam.

5.1.3 3D-laserscanning

In de stresstest is nogmaals bevestigd dat beweging van een dijklichaam met 3D-laserscanning nauwkeurig op afstand kan worden gemeten. Met de techniek wordt vlakdekkende deformatie in drie richtingen (xyz) bepaald zonder enige schade aan het dijklichaam. Bewegingen worden per richting in de ruimtelijke context gevisualiseerd met kleurpatronen.

In de visualisatie zijn twee momenten in één richting met elkaar vergeleken. Verdere interpretatie van de resultaten is noodzakelijk om inzicht te krijgen in het verloop van de beweging van de dijk in de tijd.

5.1.4 Infraroodcamera

Met infrarood worden vlakdekkende warmtebeelden gemeten. Hiermee kan (de locatie van) uitredend vocht worden gesignaleerd. Bij de stresstest is bij toename van de belasting verhoogde kwelactiviteit opgemerkt. Ook is overloop na falen van de dijk waarneembaar.

De techniek geeft geen inzicht in de parameters beweging en freatische lijn. Ook is er vanuit de infraroodbeelden geen kwantitatieve analyse mogelijk. Met het detecteren van uitredend vocht (kwel) geeft de techniek een indicatie van zwakke(re) plekken in de dijk voorafgaand aan het moment van falen, hetgeen wel degelijk bruikbare informatie vormt voor de bewaking van de dijkveiligheid.

5.1.5 Passieve microgolfradiometrie

Met passieve microgolfradiometrie kan op basis van stralingstemperatuur de emissiviteit van een dijklichaam continu in de tijd en op afstand worden gemeten. De emissiviteit is een maat voor bodemvocht. Door emissiviteit te monitoren kan een toe- of afname van bodemvocht worden vastgesteld.

Bij de stresstest lijken de variaties in emissiviteit te correleren met de gemeten variaties in waterspanning. De emissiviteit kan, in tegenstelling tot de waterspanning, niet-destructief en op afstand worden gemeten. De gemeten emissiviteit geeft echter geen directe informatie over de freatische lijn, maar alleen informatie over de trend. Met microgolfradiometrie kan het bodemvocht tot ongeveer een meter diepte worden gedetecteerd.

5.1.6 Visualisatie

Middels een visualisatiedashboard kon het verloop van een stresstest gevolgd. Een dashboard is geschikt voor niet-specialisten die geïnteresseerd zijn in het verloop van de proef. Voor beheerders/specialisten is een dashboard geschikt om snel een overzicht van de situatie te krijgen. Het dashboard zoals toegepast tijdens de stresstest heeft weinig/geen mogelijkheden voor analyse, maar is hiervoor ook niet bedoeld.

Omdat allerlei parameters overzichtelijk op één plek zijn gevisualiseerd, is het voor de gebruiker relatief gemakkelijk een koppeling tussen de verschillende parameters te leggen. Door verschillende databronnen te koppelen kan de actuele dijksterkte mogelijk beter/makkelijker worden beoordeeld.

5.2 Actuele dijksterkte en voorspellende waarde

Hoewel de verschillende innovatieve monitoringstechnieken elk over een eigen functionaliteit beschikken, is duidelijk dat de technieken, al dan niet in gecombineerde vorm, in staat zijn geweest kennis te genereren over de gebeurtenissen in het dijklichaam. De focus lag hierbij op de parameters beweging en freatische lijn. De beweging kon real-time worden gevolgd, al waren er bij deze proef voor fotogrammetrie (nabewerking) en de 3D-laserscan (meetfrequentie) praktische beperkingen. Veranderingen in de freatische lijn konden indirect worden aangetoond middels variaties in bodemvocht. Door middel van visualisatietechnieken kon deze data vanuit andere invalshoeken worden bekeken en geïnterpreteerd.

De conclusies in deze stresstest hebben echter ook beperkingen. Uit de meetresultaten volgen geen kwantitatieve uitspraken over de actuele dijksterkte. Het is in deze stresstest niet mogelijk gebleken om een meetwaarde van gemeten parameters te kwantificeren als een waarde voor dijksterkte. Grenswaarden zoals onder- en bovengrenzen voor dijksterkte konden evenmin worden gegeven. Vanuit dezelfde redenering gaat er daarnaast nog geen voorspellend vermogen uit van de meettechnieken. Eén stresstest is echter ook niet voldoende om dergelijke functionaliteiten te ontwikkelen. Daarvoor zijn meer en langere meetreeksen van de bovenstaande technieken noodzakelijk. Aan de hand van meerdere lange meetreeksen kunnen waarden aan gebeurtenissen worden gekoppeld en mogelijke trends worden ontdekt. Aan de hand daarvan wordt het wellicht wel mogelijk om grenswaarden te bepalen en gebeurtenissen te voorspellen. Er wordt zodoende aanbevolen meer ervaring op te doen met de innovatieve technieken in stresstesten om de potentie ervan beter te benutten.

Referenties

- Askarinejad, A., Gorte, B., van Leijen, F., Beus, E., Reudink, R. & Jommi, C. (2016). Fotogrammetrische monitoring van de Leendert de Boerspolder – eindrapport. TU Delft, februari 2016.
- Ham, van den, G.A., Mastbergen, D.R., Koelewijn, A.R., Brake, ter, C.K.E. & Zomer, W.S. (2015). Eindrapport Validatie-experiment Zettingsvloeiing, Meten aan Zettingsvloeiing. Amersfoort: STOWA/FloodControl IJkdijk.
- HKV (2016). Stresstest Leendert de Boerspolder – dashboard, eindrapport, februari 2016
- HKV (2016). Stresstest voor dijken - Ontwikkeling van het concept stresstest voor dijken aan het voorbeeld Leendert de Boerspolder, 2016
- Huisman (2012). Toetsrapport Kaspolder en Leendert de Boerspolder, Toetsen op veiligheid Kaspolder (OR-3.29) en Leendert de Boerspolder (OR-3.33), rapportage T&M-1033853-CH/pb revisie D1. De Bilt: Grontmij, 2012.
- InTech (2016). Kwel- en deformatie metingen middels Infrarood- en 3D Laser scan. Eindrapport, 2016.
- Koelewijn, A. (2015). Ontwerp bezwijkproef Leendert de Boerspolder. Document 1210215-000-GEO-0005, versie 2, 21 september 2015.
- Koelewijn, A., Pals, N., Sas, M. & Zomer, W. (2010). IJkdijk Piping experiment. Validatie van sensor- en meettechnologie voor detectie van optreden van piping in waterkeringen (2010-26 PIW). Groningen: Stichting IJkdijk.
- Miramap (2016). Rapport Miramap Leendert de Boerspolder, eindversie 8 februari 2016.
- StabiAlert (2016). Permanente tilt/versnelling monitoring. Verslag monitoring StabiAlert project Leendert de Boerspolder, 25 februari 2016.
- Vries, de, G., Brake, ter, C.K.E., Bruijn, de, H., Koelewijn, A.R., Langius, E.A.F., Lottum, van, H. & Zomer, W.S. (2013). Dijk-monitoring: beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen. Amersfoort: STOWA/Stichting IJkdijk.
- Weijers, J., Elbersen, G.T., Koelewijn, A.R. & Pals, N. (2009) Macrostabieleit IJkdijk: Sensor en meettechnologie (VIW 2009-19). Delft: Rijkswaterstaat.

Contact

Stichting FloodControl IJkdijk
Postbus 97 | 9350 AB Leek

E info@ijkdijk.nl
T 0594 55 50 50

www.floodcontrolijkdijk.nl

Stichting FloodControl IJkdijk
is gevestigd in Groningen

