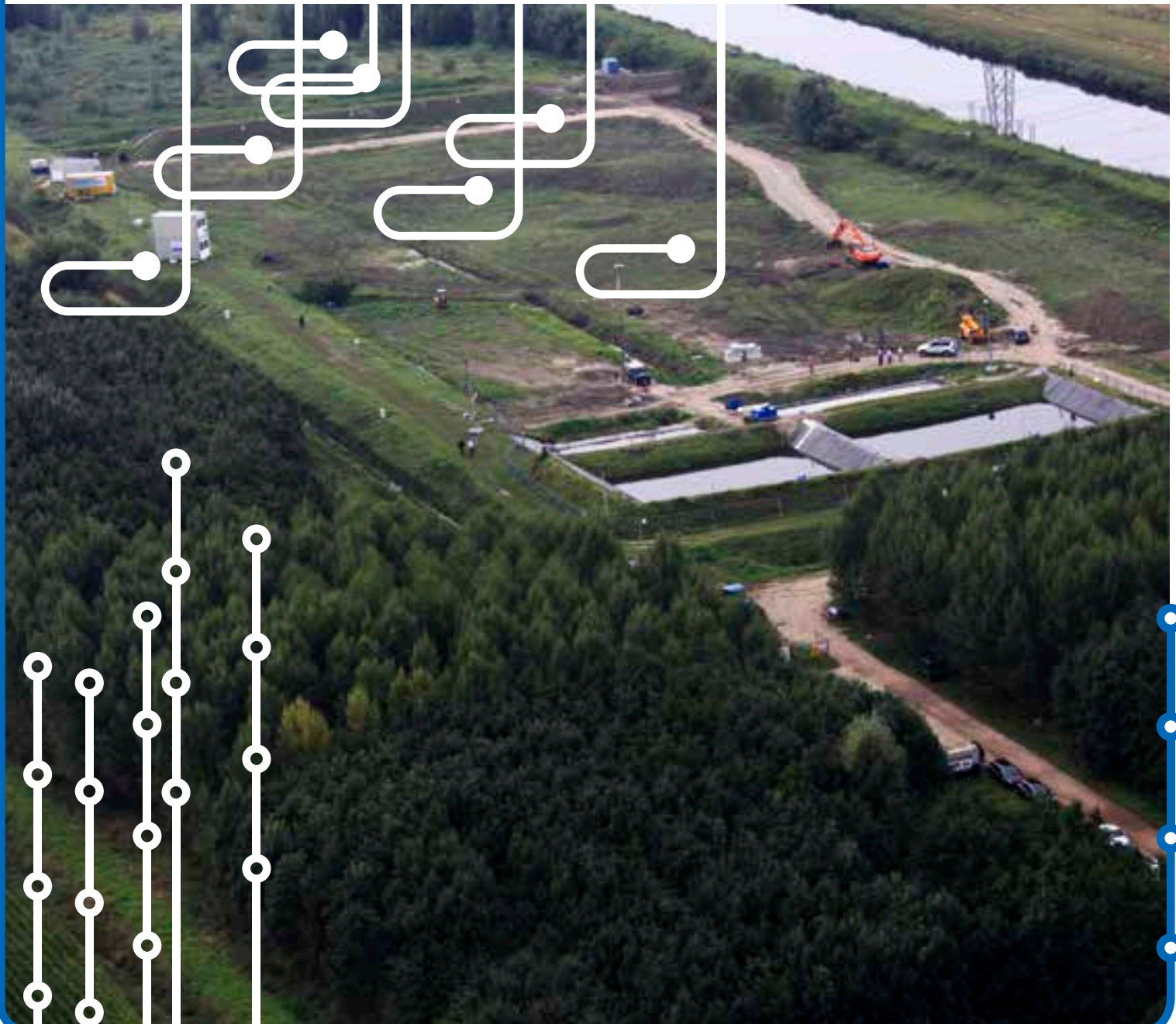
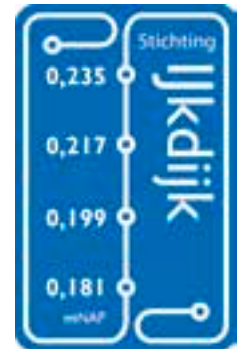
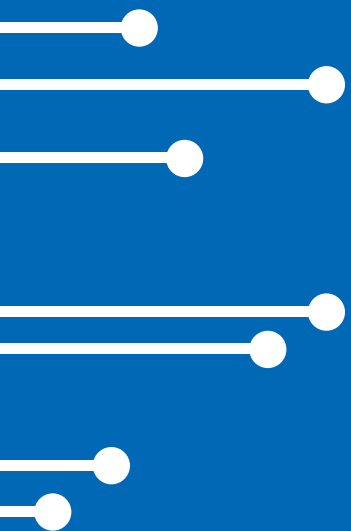


# Dijkmonitoring: beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen

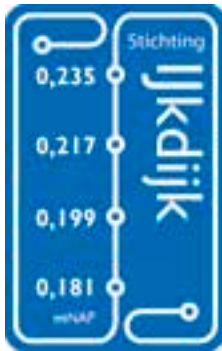
Eindrapport All-in-one Sensor Validatie Test





# **Dijkmonitoring: beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen**

**Eindrapport All-in-one Sensor Validatie Test**



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

Auteurs: ing. G. de Vries, Deltares  
drs. ing. C.K.E. ter Brake, STOWA  
ing. H. de Bruijn, Deltares  
dr. ir. A.R. Koelewijn, Deltares  
ing. H. van Lottum, Deltares  
ir. ing. E.A.F. Langius, TNO  
ing. W.S. Zomer MSc., Stichting IJkdijk

Beoordelingscommissie: F.A. van den Berg, Waterschap Rivierenland / ENW  
drs. ing. C.K.E. ter Brake, STOWA  
ing. H. de Bruijn, Deltares  
dr. ir. A.R. Koelewijn, Deltares  
prof. dr. R. Meijer, TNO / Universiteit van Amsterdam  
ing. R. van Putten, Waternet  
ing. G. de Vries, Deltares  
ing. W.S. Zomer MSc., Stichting IJkdijk

Vormgeving: mariette jongen vormgeving

Foto omslag: Koos Boertjens

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

© 2013 STOWA/Stichting IJkdijk, Amersfoort

Rapportnummer: 2013-09

ISBN: 978.90.5773.592.9

# Dijkmonitoring: beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen

Eindrapport All-in-one Sensor Validatie Test

Auteurs

**ing. G. de Vries** *Deltares*

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

**ing. H. de Bruijn** *Deltares*

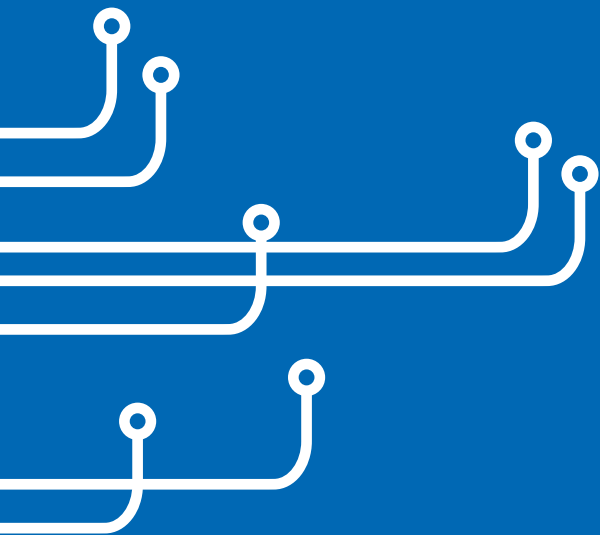
**dr. ir. A.R. Koelewijn** *Deltares*

**ing. H. van Lottum** *Deltares*

**ir. ing. E.A.F. Langius** *TNO*

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

*maart 2013*



## Voorwoord

Stichting IJkdijk heeft met haar partners in 2012 op de IJkdijklocatie de All-in-one Sensor Validatie Test (AIO SVT) uitgevoerd. Een IJkdijkproject waarin drie proefdijken op meerdere faalmechanismen konden bezwijken en de deelnemende bedrijven voorspellingen konden doen over de ontwikkelingen van de sterkte van de proefdijken en het moment van falen. Dit project maakt onderdeel uit van het IJkdijk ontwikkelprogramma, waarin een algemeen toepasbare monitoringssystemen voor waterkeringen wordt ontwikkeld.

De AIO SVT was het grootste en meest gecompliceerde validatie-experiment van het IJkdijk ontwikkelprogramma. In het project testten Stichting IJkdijk en vijftien Nederlandse bedrijven de voorspellende waarde van meettechnieken en visualisatiesystemen voor dijken.

De ongekend grote schaal van de uitgevoerde proeven stelde alle deelnemers voor grote uitdagingen in organisatorisch en technisch opzicht. Met de bezwijking van de laatste proefdijk op 9 september 2012 werd geconcludeerd dat alle proeven succesvol waren verlopen.

De behaalde resultaten mogen er zijn:

- In alle stadia hebben meettechnieken de faalmechanismen kunnen volgen;
- De visualisatie partijen hebben meettechnieken gecombineerd en geanalyseerd waardoor waardevolle informatie werd verkregen over de ontwikkelingen in de sterkte van de proefdijken.

De All-in-one Sensor Validatie Test is, net als het macrostabiliteitsexperiment en de pipingexperimenten, een zeer belangrijke volgende stap in de ontwikkeling van algemeen toepasbare monitoringssystemen voor waterkeringen. Met de in de AIO SVT behaalde resultaten wordt dijkbeheerders een nieuw handvat gereikt om het lifecycle management van dijken, waaronder ook versterkingswerkzaamheden, te kunnen optimaliseren. Om uiteindelijk tot een succesvolle toepassing te komen, blijft intensieve samenwerking tussen overheid, kennisinstellingen en bedrijfsleven van groot belang. Deze zijn samengevoegd in de Stichting IJkdijk die deze zogenaamde "gouden driehoek" faciliteert.

Namens Stichting IJkdijk wens ik u veel succes met het oppakken van de bewezen innovaties in voorbereiding of uitvoering van versterkingswerkzaamheden en in uw dagelijkse beheerpraktijk.

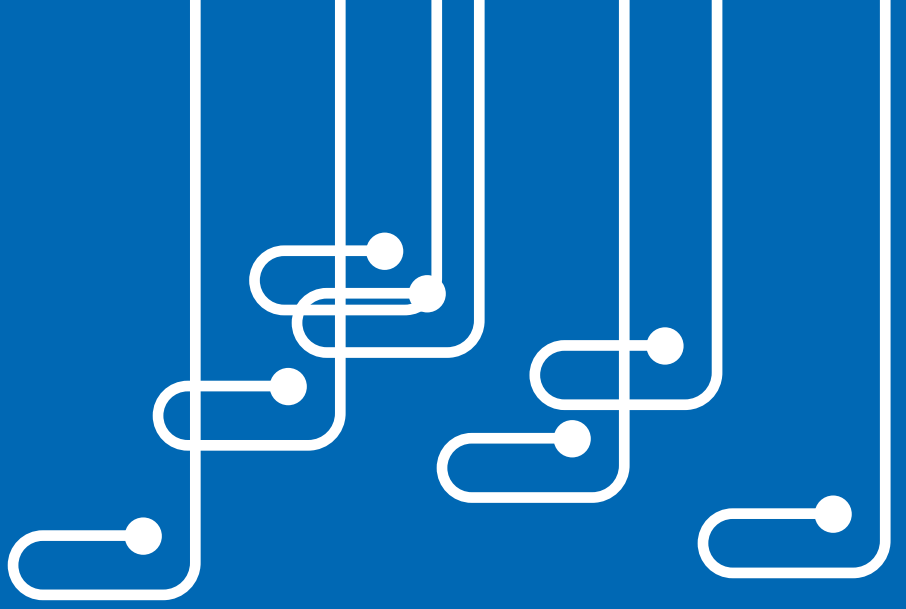
**ir. H. van 't Land**  
*Voorzitter Stichting IJkdijk*

# Inhoudsopgave

<b>Voorwoord</b>	<b>5</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>Summary</b>	<b>11</b>
<b>Leeswijzer en kader</b>	<b>13</b>
<b>Deel 1 Inleiding en uitvoering experiment</b>	<b>15</b>
1.1 Inleiding	15
1.1.1 Achtergrond	15
1.1.2 Aanleiding	15
1.1.3 Doelstelling	16
1.1.4 Onderzoeksvragen	16
1.1.5 Deelnemers	17
1.1.6 Locatie	17
1.1.7 Globale opzet experiment	18
1.2 Opzet en uitvoering proeven	18
1.2.1 Bouw en ontwerp	18
1.2.2 Data-acquisitie	19
1.2.3 Uitvoering proeven	22
1.3 Analyse proeven	28
1.3.1 Analyse proef Oostdijk	28
1.3.2 Analyse proef Westdijk	31
1.3.3 Analyse proef Zuiddijk	33
<b>Deel 2 Toegepaste meettechnieken en visualisatiesystemen</b>	<b>37</b>
2.1 Meettechnieken	37
2.1.1 TenCate/Inventec	37
2.1.2 StabiAlert	37
2.1.3 MetaSensing	38
2.1.4 Koenders	38
2.1.5 ITC	39
2.1.6 InTech	40
2.1.7 Empec	41
2.1.8 Volker Wessels Telecom/Landustrie	42
2.1.9 Alert Solutions	43
2.2 Visualisatiesystemen	44
2.2.1 Siemens	44
2.2.2 Fugro/Nelen & Schuurmans	44
2.2.3 AGT International	46



<b>Deel 3</b>	<b>Beoordeling</b>	<b>47</b>
3.1	Onafhankelijke beoordelingscommissie	47
3.2	Beoordelingskader	47
	3.2.1 Opzet	47
	3.2.2 Criteria meettechnieken	48
	3.2.3 Criteria visualisatiesystemen	50
	3.2.4 Overige criteria	51
3.3	Beoordeling	51
	3.3.1 Beoordeling meettechnieken	52
	3.3.2 Beoordeling visualisatiesystemen	82
3.4	Samenvatting resultaten	89
<b>Deel 4</b>	<b>Discussie</b>	<b>93</b>
4.1	Context	93
4.2	Toepassingsgebied	93
4.3	Afweging inzet meettechnieken en visualisatiesystemen	94
<b>Deel 5</b>	<b>Conclusie en eindresultaat</b>	<b>95</b>
5.1	Inleiding	95
5.2	Bezwijken proefdijken	95
5.3	Meettechnieken	95
5.4	Visualisatiesystemen	96
5.5	Full service dijkmonitoringsystemen	96
<b>Deel 6</b>	<b>Toekomstvisie</b>	<b>97</b>
<b>Referenties</b>		<b>99</b>
<b>Bijlage</b>		<b>101</b>
<b>Dankbetuiging</b>		<b>103</b>



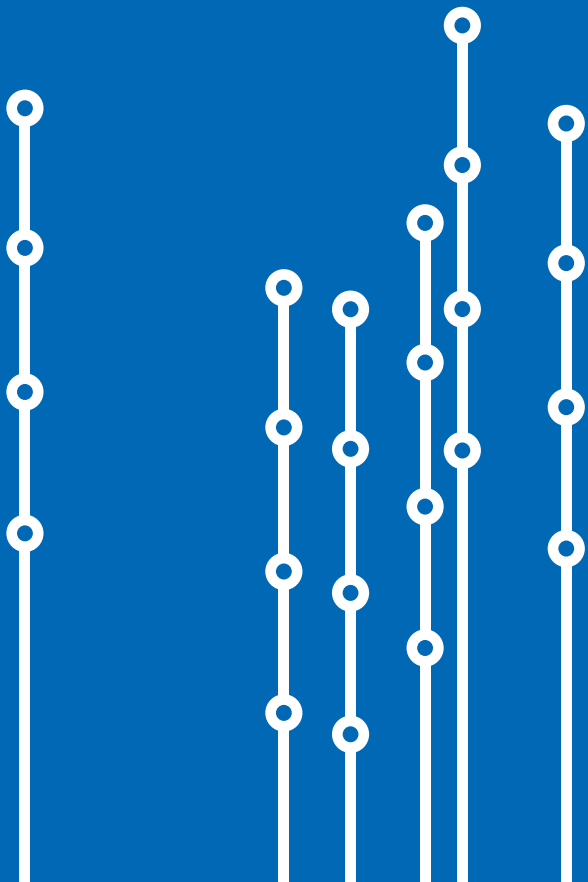
## Samenvatting

Stichting IJkdijk wenst met de uitvoering van het experiment All-in-one Sensor Validatie Test meer inzicht te krijgen in de functionaliteit en prestaties van dijkmonitoringssystemen. Door dijken te monitoren krijgen dijkbeheerders meer inzicht in wat er in en om de dijk gebeurt. Ook kunnen realtime voorspellingen worden gedaan ten aanzien van de sterkte van de dijk aan de hand van innovatieve dijkmonitoringssystemen. In een experimentele setting is de functionaliteit van het realtime volgen en voorspellen van dijksterkte aangetoond. Daarnaast bestond er de wens om dijkmonitoringssystemen te waarderen en te vergelijken. Belangrijke onderdelen van een dijkmonitoringsysteem zijn meettechnieken en visualisatiesystemen. Negen meettechnieken en drie visualisatiesystemen zijn gewaardeerd. Om tot een gevalideerde waardering te komen is een beoordelingskader opgesteld. Het beoordelingskader bestond uit een set relevante criteria voor meettechnieken en visualisatiesystemen.

Voor het waarderen van de meettechnieken en visualisatiesystemen is een experiment ontworpen. De basis voor het experiment bestond uit drie proefdijken gebouwd op schaal 1:1. Twee proefdijken waren in opbouw gelijk: klei-/zand dijk op een zandondergrond. De andere proefdijk bestond uit zand met een kleidek op een slappe ondergrond. De gebouwde proefdijken waren in opbouw representatief voor situaties die in de praktijk voorkomen. In en om de proefdijken werden meettechnieken geïnstalleerd. Meetpartijen bepaalden zelf, afhankelijk van de mogelijkheden van hun meettechnieken, in welke proefdijk(en) zij hun meettechnieken installeerden. De proefdijken werden gedurende één week kunstmatig belast. In deze periode konden zij bezwijken op een van de volgende faalmechanismen: piping, macro-instabiliteit, micro-instabiliteit en erosie ten gevolge van overlopen.

Voor de participerende bedrijven was onbekend wanneer en op welke faalmechanisme de proefdijken zouden bezwijken. Gedurende de proeven werd data verzameld over onder andere waterspanning, temperatuur en inclinatie. Data werd in verschillende formaten (getallen, kaarten en foto's) over het aangelegde netwerk gedistribueerd naar een database. Data-acquisitie vond plaats door het AnySense Connect systeem. Visualisatiepartijen haalden data uit deze database, integreerden en presenteerden deze data en deden aan de hand van waarnemingen en berekeningen voorspellingen over wanneer een bepaald faalmechanisme kon optreden. De proefleiding verzamelde de voorspellingen, welke gebruikt zouden worden bij de uiteindelijke beoordeling. Daarbij bleek dat integratie van meettechnieken, een data-verwerkingssysteem en visualisatiesystemen tot de beste voorspelling van de dijksterkte leidde.

Na het experiment zijn aan de hand van het opgestelde beoordelingskader door een onafhankelijke beoordelingscommissie, bestaande uit personen met verschillende expertises binnen het vakgebied, waarderingen toegekend aan de specificaties van de meettechnieken en de visualisatiesystemen. Dijkbeheerders worden met deze waarderingen voorzien van een overzicht van de prestaties van verschillende meettechnieken en visualisatiesystemen binnen de All-in-one Sensor Validatie Test. Daarmee zijn zij in staat te bepalen welke meettechniek of visualisatiesysteem het beste past bij hun eigen praktijksituatie en specifieke wensen.



## Summary

With the experiment All-in-one Sensor Validation Test the IJkdijk Foundation wishes to gain more insight into the functionality and performance of levee monitoring systems. By monitoring levees dike managers gain more insight into what is happening in and around the levee. This also allows making real-time predictions with regard to the strength of the levee on the basis of innovative dike monitoring systems. In an experimental setting, the functionality of the real-time tracking and predicting of levee strength was demonstrated. In addition, there was the desire to value and compare levee monitoring systems. Key components of monitoring systems are measurement techniques and visualization systems. Nine measurement techniques and three visualization systems are reviewed. In order to get a validated review system an assessment framework was prepared. The assessment framework consisted of a set of relevant criteria for measurement and visualization systems.

To value the measurement and visualization systems an experiment was designed. The basis for the experiment consisted of three test levees, scale 1:1. Two test levees were similar in structure: a clay-/sand levee on a sand surface. The other test levee consisted of sand with a clay cover on weak subsoil. The construction of the test levees was comparable with levees in practice. In and around the test levees measurement techniques were installed. Project participants determined, depending on the capabilities of their measurement techniques, in which test levee(s) they installed their measurement techniques. The test levees were loaded in an artificially way during one week. In this week the test levees could fail in one of the following failure mechanisms: piping, micro-instability, macro-instability and erosion due to overtopping.

For participants it was unknown when and which failure mechanism the test levees would fail. During the experiments, data was collected on amongst others water pressures, temperature and inclination. Data (numerical, maps en photos) were collected and transported to a database using the purpose build network. Data acquisition took place through the AnySense Connect system. Visualization parties took data from this database and presented these data and made on the basis of observations and calculations, predictions about when a certain failure mechanism could occur. The predictions made by the participants during the experiment were collected by the test supervisors and used for the final assessment. It appeared that integration of measurement techniques, analysis models and visualization systems led to the best prediction of the dike strength.

After the experiment, according to the assessment framework, the measurement and visualization systems were assessed and validated by an evaluation committee consisting of people with different expertise within the field of levee management. Levee managers are provided with an overview of the performance of different measurement techniques and visualization systems within the All-in-one Sensor Validation Test. With this overview one is able to determine which measurement technique or visualization system suits best their own practical situation and specific needs.

0,181  
mNAP

0,235 0,199

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

0,217 0,199

0,199 0,181  
0,181 mNAP

0,199 0,181  
0,181 mNAP

0,181  
mNAP

## Leeswijzer en kader

Dit rapport is geschreven voor dijkbeheerders en is bedoeld meer inzicht te geven in de functionaliteit en prestaties van dijkmonitoringsystemen. Het rapport biedt de dijkbeheerder enerzijds inzicht in de werking van een dijkmonitoringsysteem en bijbehorende elementen. Anderzijds kan het rapport de dijkbeheerder helpen bij de opbouw van een dijkmonitoringsysteem.

Het rapport geeft inzicht in de uitvoering van de All-in-one Sensor Validatie Test, uitgevoerd in 2012 en 2013. Deel 1 van het rapport gaat in op het experiment. In deel 1.1 wordt aandacht besteed aan de ontwikkeling van dijkmonitoring in Nederland en de rol van Stichting IJkdijk hierin. Daaruit volgen aanleiding en doelstelling en onderzoeksvragen van het experiment. Deel 1.2 beschrijft de bouw van de proefdijken en de opzet van de proeven. Deel 1.3 de gebeurtenissen tijdens de proeven. Deel 2 van het rapport geeft een overzicht van de deelnemers in het experiment, wat er wordt gemeten en welke monitoringsstrategie wordt gehanteerd. De prestaties van de deelnemers zijn beschreven in deel 3, de beoordeling, evenals het ontwikkelde beoordelingskader. De discussie in deel 4 geeft de beperkingen van het onderzoek weer, wat de nodige kaders geeft voor de conclusies in deel 5. Tenslotte wordt in deel 6 een toekomstblik voor de ontwikkeling van dijkmonitoring beschreven.

In het experiment zijn meettechnieken en visualisatiesystemen voor verschillende situaties besproken en geëvalueerd. De toepassingen zijn beoordeeld op verschillende criteria. De meetstrategie en het meetplan bepalen uiteindelijk welke criteria belangrijk moeten worden geacht bij het kiezen voor een meettechniek of visualisatiesysteem. Bij deze afweging, op basis van de in dit onderzoek behaalde resultaten, moet het volgende in overweging worden genomen:

- De criteria en waarderingen zijn per meettechniek en visualisatiesysteem in een samenvattende tabel weergegeven. De diverse criteria met bijbehorende waardering geven een totaalbeeld van de inzet van de meettechniek of het visualisatiesysteem.
- Belangrijk is te vermelden dat een “totaalwaardering” niet aan de orde is bij de beoordeling. Een meettechniek of visualisatiesysteem kan hoger gewaardeerd op het ene criterium en lager op het andere. Afhankelijk van de vraag die achter de inzet van een meettechniek of visualisatiesysteem ligt, is de dijkbeheerder dan in staat een meettechniek of visualisatiesysteem te kiezen dat voldoet aan de bijbehorende eisen. Dit zal per situatie verschillen.
- Daarnaast moet vermeld worden dat de criteria, definities en de waardering een raamwerk betreffen. Het heeft niet de potentie om tot een waardering te komen waarbij interpretatie geen rol speelt (dat is ook niet mogelijk en daarvoor is de onafhankelijke beoordelingscommissie). Met andere woorden: de waarderingen zijn een interpretatie van de commissie waarbij het raamwerk als hulpmiddel is gebruikt en de denkwijze weergeeft.
- Bij de beoordeling is uitgegaan van de toegepaste meettechnieken en visualisatiesystemen en de resultaten die zijn behaald binnen de drie proeven van de All-in-one Sensor Validatie Test.
- In de samenvattende tabellen worden de meetpartijen en visualisatiepartijen genoemd en niet de specifieke ingezette meettechniek of het visualisatiesysteem. De beoordeling betreft wel deze specifieke meettechniek of visualisatiesysteem. Deze specifieke informatie wordt gegeven in deel 2 en de bijlage van de rapportage.
- Voor diverse meettechnieken en visualisatiesystemen zijn aanpassingen of verbeteringen op bepaalde criteria eenvoudig realiseerbaar. Selectie puur op basis van de “beste waardering” wordt daarom afgeraden, hoewel een betere waardering natuurlijk wel een indicatie vormt van bewezen kwaliteiten.





# Deel 1 Inleiding

## 1.1 Inleiding

### 1.1.1 Achtergrond

Stichting IJkdijk werkt met haar partners aan de ontwikkeling van algemeen toepasbare monitoringssystemen voor waterkeringen. De ontwikkeling is vastgelegd in het IJkdijk ontwikkelprogramma, dat bestaat uit vier stappen:

#### 1 Validatie-experimenten

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

#### 2 LiveDijk projecten

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

#### 3 LiveDijk XL

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

#### 4 Dijk Data Service Centrum

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

Stichting IJkdijk heeft in 2008 en 2009 twee validatie-experimenten uitgevoerd. Deze validatie-experimenten richtten zich op het toetsen van de toepasbaarheid van meet- en monitoringstechnieken in dijken die gevoelig waren voor de specifieke faalmechanismen macro-instabiliteit (Weijers, Elbersen, Koelewijn & Pals, 2009) en piping (Koelewijn, Pals, Sas & Zomer, 2010). Geconcludeerd werd dat met behulp van monitoringstechnieken verzakkingen van de dijk (macro-instabiliteit) en ontwikkelingen in waterspanningen in en onder de dijk konden worden gemonitord. Inmiddels worden de beproefde technieken toegepast in verschillende LiveDijken in Nederland en is Stichting IJkdijk gestart met de ontwikkeling van het Dijk Data Service Centrum (DDSC) om alle data afkomstig van de technieken op te slaan.

### 1.1.2 Aanleiding

#### 1.1.2.1 Functionaliteit van dijkmonitoring

In de IJkdijk validatie-experimenten macro-instabiliteit en piping is aangetoond dat ontwikkelingen in de dijk met monitoringsinstrumenten realtime te volgen zijn (Weijers et al, 2009; Koelewijn et al, 2010). Met behulp van aanvullende berekeningen is de sterkte van de dijk gedurende de proef op basis van de veelal handmatig ingevoerde actuele meetdata bepaald. De experimenten werden uitgevoerd met twee doelstellingen. Een doelstelling met betrekking tot monitoringssystemen en een validatie doelstelling met betrekking het faalmechanisme.

Hiervoor werden proefdijken gebouwd die telkens volgens één specifiek faalmechanisme tot bezwijken werden gebracht. De opgezette meetstrategie had tot doel dat ene specifieke faalmechanisme te monitoren. In de praktijk is een dijk echter gevoelig voor meerdere faalmechanismen. Monitoringssystemen en vooral de toegepaste monitoringstrategie zouden daarom in staat moeten kunnen zijn om meerdere faalmechanismen te kunnen detecteren en monitoren.

Een nieuwe dimensie in dijkmonitoring is het voorspellen van dijksterkte (realtime), zodat adequaat gereageerd kan worden op veranderende waterstanden en daardoor eventueel toenemende risico's op dijkfalen. Het beheersen van risico's tot een vastgesteld acceptabel niveau is namelijk waar het geheel van water- of dijkveiligheid eigenlijk over gaat. Hoewel de veronderstelling bestaat dat monitoringssystemen in staat zijn om meerdere faalmechanismen in verschillende dijktypen te monitoren en daarbij een tijdige en betrouwbare waarschuwing te kunnen geven bij kans op bezwijken, is dit nog nooit aangetoond.

Mede op voorspraak van de klankbordgroep "Inspectietechnieken voor dijken" van STOWA, is daarom deze IJkdijk All-in-one Sensor Validatie Test (AIO SVT) opgestart.

### 1.1.2.2 Objectieve vergelijking van dijkmonitoringssystemen

Om toepassing van dijkmonitoring in de praktijk te bevorderen is het noodzakelijk de dijkbeheerder handvatten te bieden bij de keuze van toepassing van deze dijkmonitoringssystemen. Een heldere uiteenzetting van de (gevalideerde) toepassingsmogelijkheden van elk dijkmonitoringssysteem met daarbij de specifieke voor en nadelen van de diverse dijkmonitoringssystemen is daarbij noodzakelijk. Momenteel zijn er nog onvoldoende handvatten om de verschillende dijkmonitoringssystemen op een objectieve manier met elkaar te vergelijken op basis van de toepassing. Onder dijkbeheerders, maar ook onder aanbieders van meettechnieken en visualisatiesystemen, heerst de behoefte aan een manier om inzicht te krijgen in de functionaliteit en prestaties van verschillende dijkmonitoringssystemen.

### 1.1.3 Doelstelling

Op basis van het voorgaande is het doel van de All-in-one Sensor Validatie Test:

*Verkrijgen van inzicht in de functionaliteit en prestaties van “full service” dijkmonitoringssystemen. Hierbij wordt expliciet ingegaan op het realtime voorspellen van de dijksterkte ten aanzien van meerdere faalmechanismen.*

Bij eerdere proeven uitgevoerd op de IJkdijklocatie was er een gecombineerde doelstelling. Daarbij werden ook belangrijke kennisleemtes opgepakt ten aanzien van de specifieke faalmechanismen. In dit experiment wordt nadrukkelijk alleen gekeken naar de full service dijkmonitoringssystemen en daarbij wordt er dus niet expliciet inhoudelijk onderzoek gedaan naar de diverse faalmechanismen.

Een full service dijkmonitoringssysteem is een systeem dat de dijkbeheerder helpt om te weten wat er in de dijk gebeurt of gaat gebeuren met betrekking tot de dijksterkte. Full service geeft aan dat het systeem alle elementen bevat die daarvoor nodig zijn.

In dit onderzoek onderscheiden we achtereenvolgens meettechnieken, data-verwerkingssystemen en visualisatiesystemen. Meettechnieken bestaan uit sensoren (geplaatst in, op of onder de dijk, aan de oppervlakte, of op afstand) die verschillende parameters meten die iets zeggen over het gedrag van de dijk (bijvoorbeeld vervormingen, temperatuur, waterdrukken, elektrische geleidbaarheid). De meettechnieken genereren data en voorzien de data-verwerkingssystemen van input. Data-verwerkingssystemen regelen het traject van dataverzameling, -transport, -opslag, omrekening naar ingenieursgrootheden en het opnieuw beschikbaar stellen van bewerkte data. Visualisatiesystemen zorgen voor de vertaalslag van data naar informatie voor de dijkbeheerder en zorgen ervoor dat zijn informatievraag op de gewenste manier beantwoord wordt.

Om inzicht te krijgen in de functionaliteit en prestaties van full service dijkmonitoringssystemen zijn deze binnen dit onderzoek aan een beoordeling onderworpen door een onafhankelijke beoordelingscommissie. Om tot een juiste beoordeling te komen, zijn de verschillende elementen van een full service dijkmonitoringssysteem apart beoordeeld. Omdat in dit stadium van de innovatie er nog geen integratie van de verschillende elementen (meettechnieken, data-verwerkingssystemen en visualisatiesystemen) is bereikt, worden deze binnen dit onderzoek apart in beeld gebracht. Data-verwerkingssystemen worden in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

Het bestaande systeem AnySense Connect van TNO is ingezet als data-verwerkingssysteem en heeft haar functionaliteit reeds bewezen. Dit onderzoek richt zich op meettechnieken en visualisatiesystemen.

### 1.1.4 Onderzoeksvragen

Om de functionaliteit van meettechnieken en visualisatiesystemen te kunnen beoordelen zal hiervoor een beoordelingskader moeten worden opgesteld. Dit beoordelingskader bestaat uit een aantal relevante criteria welke zijn gekozen met het volgende beeld:

- 1 Op basis van welke relevante criteria kan de prestatie van meettechnieken worden beoordeeld?
- 2 Op basis van welke relevante criteria kan de prestatie van visualisatiesystemen worden beoordeeld?

Vervolgens zal er een uitspraak gedaan moeten worden over de prestaties van de meettechnieken en de visualisatiesystemen en zullen zij onderworpen worden aan het beoordelingskader:

3 *Wat is de beoordeling van de, in dit experiment beproefde, meettechnieken?*

4 *Wat is de beoordeling van de, in dit experiment beproefde, visualisatiesystemen?*

#### 1.1.5 Deelnemers

Er hebben elf meetpartijen en vier visualisatiepartijen deelgenomen aan het experiment.

Meettechnieken:

- TenCate en Inventec;
- StabiAlert;
- MetaSensing;
- Koenders;
- ITC;
- InTech;
- Empec;
- Volker Wessels Telecom en Landustrie;
- Alert Solutions.

Visualisatiesystemen:

- AGT International;
- Siemens;
- Fugro en Nelen & Schuurmans.

#### 1.1.6 Locatie

Net als de voorgaande experimenten vond dit experiment plaats op de IJkdijk locatie nabij Bad Nieuwe schans.



Luchtfoto IJkdijk locatie

### 1.1.7 Globale opzet experiment

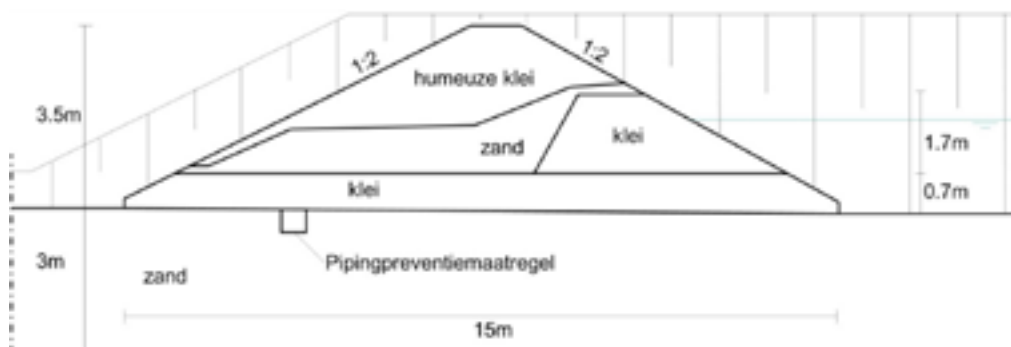
De basis voor het experiment bestond uit drie proefdijken: de Oostdijk, de Westdijk en de Zuiddijk. De Oost- en Westdijk kenden een vergelijkbare opbouw met een klei-/zanddijk op een zandondergrond. De Zuiddijk betrof een zanddijk met kleidek op een slappe ondergrond. In en om de proefdijken werden meettechnieken geïnstalleerd. Meetpartijen bepaalden zelf, afhankelijk van de mogelijkheden van hun meettechnieken, in welke proefdijk(en) zij installeerden. Vervolgens werden de proefdijken belast. De Oost- en Westdijk in één week en de Zuiddijk in één week. Gedurende deze proeven zijn gegevens verzameld door de meetpartijen en gedistribueerd over het aangelegde netwerk. Data-acquisitie vond plaats door AnySense Connect. Visualisatiepartijen haalden data uit deze database en presenteerden deze data en deden aan de hand van waarnemingen en berekeningen voorspellingen over waar en wanneer een bepaald faalmechanisme op kon treden.

## 1.2 Opzet en uitvoering proeven

### 1.2.1 Bouw en ontwerp

#### 1.2.1.1 Oostdijk en Westdijk

Voor de Oost- en Westdijk is de pipingfaciliteit gebruikt die in 2009 al is gebruikt voor het validatie-experiment piping. In grote lijnen is hetzelfde ontwerp aangehouden, maar de eigenlijke proefdijk is wat zwakker gemaakt en er is een maatregel tegen piping genomen, om één op één herhaling van de proeven uit 2009 te vermijden. De Oostdijk en de Westdijk, zo genoemd naar de relatieve positie op de proeflocatie, waren in veel opzichten vergelijkbaar. Beide proefdijken waren 3,5m hoog, 15m lang en 15m breed aan de basis. Een doorsnede is weergegeven in onderstaande figuur.



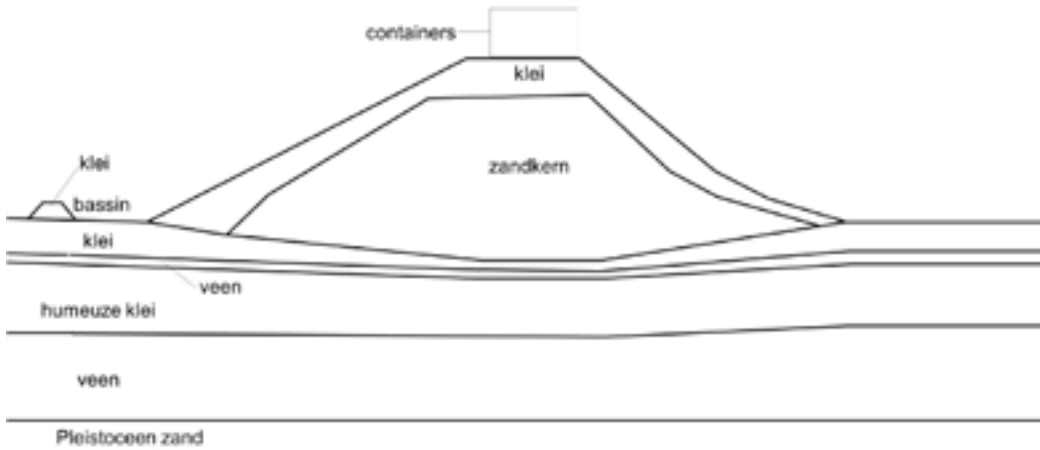
*Dwarsdoorsnede Oost- en Westdijk*

Beide proefdijken zijn gebouwd in mei en juni 2012. Het onderste deel van elke proefdijk bestond uit een 0,7m dikke goed verdichte kleilaag, met daarop een 1,7m hoge kleikade aan de bovenstroomse zijde, met daarachter een zandkern en een afdekking van humeuze klei. Onder elke proefdijk lag een 3m dikke laag uniform zand, met daaronder een folie om het geheel te scheiden van de ondergrond. Onder de Oostdijk had het zand een mediane korreldiameter  $d_{50}$  van 0,180mm en een uniformiteitscoëfficiënt  $U=d_{60}/d_{10}$  van 1,73. Onder de Westdijk was een  $d_{50}$  van 0,296mm aanwezig met  $U=1,69$ . Het bovenstroomse reservoir was verder omsloten door een 3,7m hoge ringdijk. Het volume van het reservoir bedroeg ongeveer 2000m<sup>3</sup>.

Volgens het ontwerp was bezwijken mogelijk ten gevolge van piping, micro-instabiliteit van de zandkern en/of erosie ten gevolge van overlopen. Bij de proeven in 2009 zijn homogene kleidijken gebruikt en trad bezwijken op bij een verval van 1,75m tot 2,3m. Om andere bezwijkvormen dan piping beter mogelijk te maken is in beide proefdijken een piping preventiemaatregel toegepast. In de Oostdijk was dat een filter van grof zand (korreldiameter 1 mm tot 2 mm) en in de Westdijk een regelbare drainagebuis (DMC-systeem). In beide proefdijken is de maatregel geplaatst op een kwart van de kwelweglengte vanaf de benedenstroomse teen. In de Westdijk is bovendien een DMC-systeem geplaatst in de zandkern, direct achter de kleikade, om ook het faalmechanisme micro-instabiliteit van de zandkern te kunnen beïnvloeden.

### 1.2.1.2 Zuiddijk

De Zuiddijk is ontworpen om te bezwijken op de faalmechanismen macro-instabiliteit en/of micro-instabiliteit door afdrukken van de kleibekleding. Deze proefdijk is gebouwd op een 4,5m dik slappe-lagenpakket bestaande uit veen en klei. De proefdijk is gebouwd van 13 tot en met 26 juni 2012. Bij voltooiing was de proefdijk 4m hoog en op kruinniveau 50m lang, met een kruinbreedte van 3m en taluds van 1:1,5. De dijk kern bestond uit zand, afgedekt met een 0,5m dikke kleilaag. Voor aanvang van de proef was een zetting van ongeveer 1m opgetreden. Onderstaande figuur toont een dwarsdoorsnede van de proefdijk op dat moment.

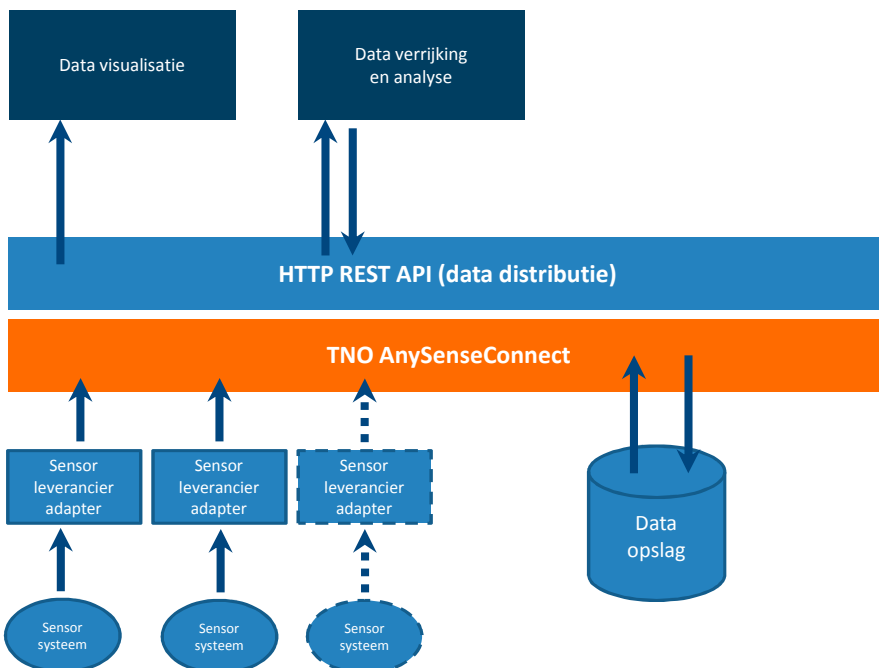


Dwarsdoorsnede Zuiddijk bij aanvang proef

## 1.2.2 Data-acquisitie

### 1.2.2.1 AnysenseConnect

De data-acquisitie is geregeld door AnySenseConnect. Dit is een door TNO ontwikkeld software platform voor het verzamelen en distribueren van sensordata in multisensor omgevingen. Sensordata kunnen door meerdere sensor-systemen tegelijkertijd worden aangeboden en afgenomen worden voor visualisatie en bewerking. Onderstaande figuur geeft de architectuur van AnySenseConnect in hoofdlijnen weer.



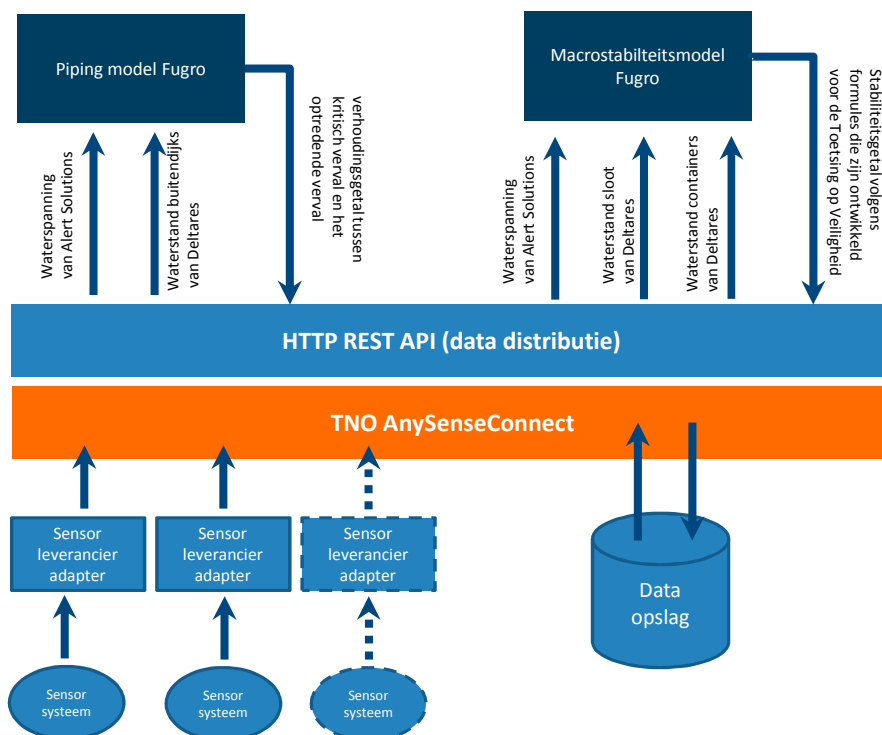
Architectuur AnySenseConnect

### 1.2.2.2 Data distributie

Tijdens het experiment kon data van alle sensorsystemen realtime opgevraagd worden uit AnySenseConnect middels een HTTP REST Interface. Deze interface geeft de mogelijkheid om op te vragen welke sensorsystemen er beschikbaar zijn per proef. Van deze sensoren kan vervolgens de locatie, meeteenheid, sensortype en uiteraard de gemeten data opgevraagd worden.

### 1.2.2.3 Gekoppelde modellen

Fugro heeft voor de experimenten modellen voor piping en macro-instabiliteit geïmplementeerd. Deze modellen werden gevoed door data uit AnySenseConnect. De resultaten van deze modellen (stabiliteitswaarde voor macro-instabiliteit en de verhouding tussen kritisch verval en het optredende verval voor piping) werden als virtuele sensorwaarden weer opgenomen in AnySenseConnect. Hierdoor konden de deelnemers de modeluitkomsten als parameter in de visualisaties verwerken. Tijdens het experiment is door de Deltares proefleiding handmatig het verloop van de proeven in een logboek ingevoerd. Daarvoor is een webinterface ter beschikking gesteld waarbij zij deze gegevens konden invoeren. De logboekteksten werden op de achtergrond als 'tekst-sensor' opgeslagen in AnySenseConnect. De visualisatiepartijen konden op deze manier de ingevoerde teksten als parameter koppelen in hun visualisaties.

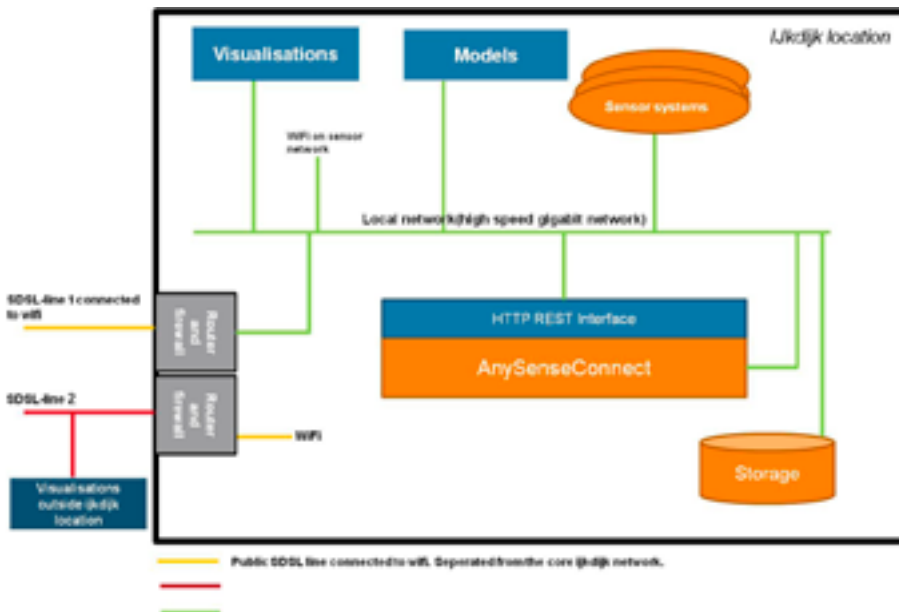


*Koppeling van modellen en terugvoer van modeluitkomsten via AnySenseConnect*

### 1.2.2.4 Hardware opzet

In het experiment zijn alle systemen voor data-acquisitie op de locatie zelf geïnstalleerd. De internetverbindingen op locatie bleken onvoldoende bandbreedte te hebben om de data rechtstreeks naar TNO Groningen te kunnen transporteren. Er is daarom gekozen om AnySenseConnect op het lokale, bekabelde, netwerk te installeren, om voldoende netwerkcapaciteit voor de aanleverende en deelnemers te kunnen garanderen. Op de locatie is een bekabeld en draadloos netwerk geïnstalleerd. De twee netwerken zijn gescheiden. Eén netwerk waar alle sensorsystemen op aangesloten werden zodat deze rechtstreeks met AnySenseConnect konden communiceren via een gigabit netwerk. Het tweede netwerk was bedoeld om op locatie te kunnen beschikken over een gewone internetverbinding. Deze internetverbinding is gebruikt om regelmatige back-up van de data naar het datacenter te kunnen sturen en om de deelnemers tijdens de opbouw en de uitvoeringen van de proeven te kunnen voorzien van een internetverbinding.



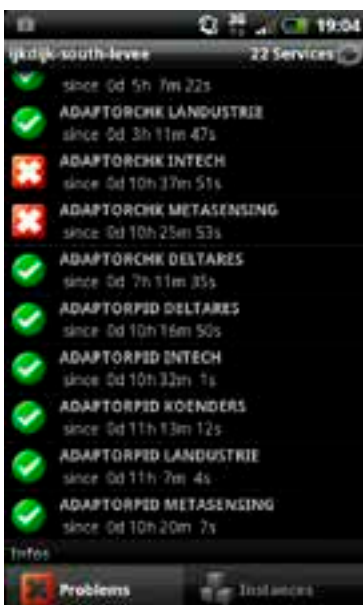


*Inrichting IJkdijk netwerk op locatie Nieuweschans*

### 1.2.2.5      **Stelsel monitoring**

Aan AnySenseConnect is tijdens het experiment een monitoringssysteem gekoppeld dat de werking van de verschillende sensor systemen en AnySenseConnect onderdelen permanent in de gaten hield. Alarmering van afwijkingen werden gegeven via een email en een smartphone app zodat tijdig ingegrepen kon worden bij acute en potentiële problemen. Permanent werd onder andere gemonitord:

- Levert het sensor systeem data binnen de gestelde sample frequentie?
- Is de aangeleverde sensordata succesvol opgeslagen?
- Blijft de systeembelasting van de AnySenseConnect machines in orde?
- Zijn de systemen die op het netwerk zijn aangesloten bereikbaar (middels een 'ping'-commando op het statische IP-adres)?
- Blijft de beschikbare harddiskruimte onder de 80% van de totale capaciteit?
- Lukt het om contact te leggen met de back-up machines?



*IJkdijk sensorwerk via een smartphone app*

### 1.2.3 Uitvoering proeven

#### 1.2.3.1 Succesfactoren en definitie geslaagde proeven

Voorafgaand aan de uitvoering van de proeven is een definitie opgesteld t.a.v. een geslaagde proef. In de paragraaf analyse wordt beschreven of wel of niet aan deze succesfactoren is voldaan.

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

Om na te gaan of en in hoeverre meettechnieken en visualisatiesystemen van tevoren het bezwijken van de proefdijken kunnen voorspellen geldt de voorwaarde dat voor de Oost- en Westdijk, alsmede de Zuiddijk, daarvoor ook daadwerkelijk moeten bezwijken middels een al dan niet gecombineerd faalmechanisme zoals vooraf aangegeven is.

Voor de Zuiddijk geldt dat deze moet bezwijken conform het faalmechanisme macro-instabiliteit binnenwaarts en/of micro-instabiliteit door afdrukken van de kleibekleding. Bij een geslaagde proef is er een afschuiving opgetreden volgens een glijvlak dat zowel door het dijklichaam als door de ondergrond loopt, aan de noordzijde van de proefdijk. Als het opgetreden glijvlak alleen door het dijklichaam loopt, is het bezwijkmechanisme macro-instabiliteit niet opgetreden en daarmee is de proef als zodanig niet geslaagd, tenzij er sprake is van het faalmechanisme micro-instabiliteit door afdrukken van de kleibekleding, waarvoor vereist is dat het onderste deel van de qua omvang relatief bescheiden afschuiving zich beneden de grondwaterstand in de zandkern bevindt.

De grootte van de vervormingen die optreden bij het afschuiven bepalen het succes van de proef. Bij kleine vervormingen kan niet gesteld worden dat bezwijken van het dijklichaam is opgetreden. Voor de proef wordt gesteld dat macro-instabiliteit is opgetreden indien ergens langs het gewenste glijvlak de vervormingen minimaal 20 cm zijn. Bij micro-instabiliteit door afdrukken van de kleibekleding is lekkage met uitstroming van zand uit de kern vereist.

De proef is dus geslaagd indien na het aanbrengen van de belasting een glijvlak optreedt dat zowel door het dijklichaam als door de ondergrond gaat waarbij de vervormingen langs het glijvlak minimaal 20 cm zijn of lekkage met meestromen van zand uit de kern optreedt.

Voor de Oost- en de Westdijk geldt dat deze moet bezwijken conform het faalmechanisme piping (afhankelijk van de werking van de piping preventiemaatregelen), micro-instabiliteit van de zandkern of erosie ten gevolge van overlopen.

Voor het faalmechanisme piping gelden de volgende kritieke succesfactoren:

- Er dient als gevolg van progressieve erosie een spoelgat onder de proefdijk te ontstaan met een diameter van circa 0,5m, waarbij het debiet over de bak met meer dan een factor 10 toeneemt. Gewenst, maar niet noodzakelijk is dat als gevolg daarvan de proefdijk in het spoelgat zakt en er daadwerkelijk deformaties zichtbaar zijn op kruinniveau van de proefdijk.
- De wateraanvoer moet zodanig zijn dat progressieve erosie kan optreden, zodat een doorgaande pijp kan ontstaan.
- Minimaal dienen twee verschillende soorten zand te worden beproefd (verschillende  $d_{70}$  en uniformiteit) en dienen predicties van karakteristieke gradiënten te worden uitgevoerd.

Indien het faalmechanisme piping niet tot bezwijken leidt dan moet er duidelijkheid zijn over de bijdrage van de piping preventiemaatregelen daaraan. Bovendien moet de proefdijk dan bezwijken door het faalmechanisme micro-instabiliteit (overlopen van de zandkern met tot gevolg verweking van de zandkern), zichtbaar door uitvloeien van de binnenteen over een afstand van tenminste 0,5m en leidend tot een zichtbare daling van de kruin of door bresvorming ten gevolge van overlopen van de kruin.



### 1.2.3.2 Draaiboek: geplande uitvoering

Ten behoeve van de uitvoering van de proeven is voorafgaand aan de uitvoering nagedacht over het verloop van de proeven en de te nemen stappen.

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

In het vooraf opgestelde en destijds alleen intern binnen Deltares verspreide draaiboek (de Vries, 2012) is het volgende opgenomen over de uitvoering van de proeven.

#### *Beschrijving uitvoering proef Oost- en Westdijk*

De belasting op de Oost- en Westdijk bestaat geheel uit hydraulische belasting vanuit het bovenstroomse reservoir, dat met gefilterd water vanuit het kanaal gevuld wordt door middel van een pompsysteem. Hiermee kan overigens slechts één reservoir tegelijk worden gevuld. De belastingstappen houden verband met de verschillende faalmechanismen die bij deze proefdijken gewenst worden geacht. De proef loopt uiterlijk tot maandagmiddag 17.00 uur (27 augustus).

- Fase 1: Initialisatie (dinsdag 21 augustus)
  - 1a. Vul elk reservoir, te beginnen bij de Oostdijk, tot een verval van 0,50m (het gaat hier om het verval, dus verschil buitenwaterstand met binnenwaterstand) gebruikmakend van de volle pompcapaciteit van 120 m<sup>3</sup>/uur.
  - 1b. Wacht totdat het uitstroomdebiet benedenstrooms vrijwel een evenwicht heeft bereikt, bepaal daaruit de bulk-doorlatendheid van het zandpakket.
  - 1c. Verhoog het verval verder tot 1,00m.
  - 1d. Wacht opnieuw tot het uitstroomdebiet benedenstrooms vrijwel een evenwicht heeft bereikt, bepaal daaruit weer de bulk-doorlatendheid van het zandpakket.
- Fase 2: Niet-kritisch verval voor piping (woensdag 22 augustus)
  - 2a. Verhoog het verval met 0,20m.
  - 2b. Wacht tenminste 1 uur, voer visuele inspecties uit aan de benedenstroomse zijde op wellen en zandtransport, controleer de referentie-waterspanningsmetingen op tekenen van piping (relatieve drukdaling). Wanneer dit optreedt, wacht dan af tot een evenwicht is opgetreden en eventueel zandtransport gestopt is.
  - 2c. Herhaal vanaf stap 2a totdat een verval van 1,80m bereikt is (dit verval was in 2009 nog niet kritisch).
- Fase 3: Kritisch verval voor piping zonder piping preventiemaatregelen (in principe bij de Westdijk mee starten op donderdag 23 augustus, bij de Oostdijk pas op vrijdag 24 augustus)
  - 3a. Verhoog het verval met 0,10m.
  - 3b. Wacht tenminste 1 uur, voer visuele inspecties uit aan de benedenstroomse zijde op wellen en zandtransport, controleer de referentie-waterspanningsmetingen op tekenen van piping (relatieve drukdaling). Wanneer dit optreedt, wacht dan af tot een evenwicht is opgetreden en eventueel zandtransport gestopt is.
  - 3c. Herhaal vanaf stap 3a totdat een verval van 2,20m bereikt is (in 2009 was dit verval, of een iets kleiner verval, telkens fataal).
- Fase 4: Micro-instabiliteit van de zandkern
  - 4a. Verhoog het verval met 0,10m.
  - 4b. Wacht tenminste 2 uur, voer visuele inspecties uit aan de benedenstroomse zijde op wellen, zandtransport en vervloeiing, controleer de referentie-waterspanningsmetingen op tekenen van piping (relatieve drukdaling) en het freatisch vlak in de proefdijk. Wanneer tekenen van falen optreden, wacht dan af tot een evenwicht is opgetreden en eventueel zandtransport gestopt is.
  - 4c. Herhaal vanaf stap 4a totdat een verval van 3,30m bereikt is.

- Fase 5: Overlopen
  - Op de zesde dag van de proeven (zondag 26 augustus) zal één van de proefdijken tot bezwijken worden gebracht - tenzij beide proefdijken al bezweken zijn. Als beide proefdijken nog intact zijn, dan wordt de Oostdijk het eerst tot bezwijken gebracht. Dit omdat de Westdijk beter controleerbaar is door middel van het DMC-systeem. Het laten bezwijken van twee proefdijken op één dag wordt indien mogelijk vermeden, omdat het goed vastleggen van een bezwijksituatie veel aandacht en energie vergt.
  - 5a. Verhoging van het reservoirpeil van de te bezwijken proefdijk met behulp van de maximale pompcapaciteit. Dit wordt voortgezet totdat de bres gestabiliseerd is.
  - 5b. Indien de Westdijk nog niet bezweken is, wordt deze uiterlijk op de zevende dag van de proef tot bezwijken gebracht volgens de procedure van stap 5a.

Een indicatie van het tijdsverloop is als volgt. Met ochtend wordt vanaf 8 uur 's ochtends bedoeld. Fase 1 duurt minimaal 24 uur. Fase 2 start op woensdagochtend en duurt ook minimaal 24 uur (voor de Westdijk). De Westdijk start donderdagochtend en de Oostdijk start op vrijdagochtend met fase 3. Fase 5 moet uiterlijk maandag om 17.00 uur zijn afgerond.

Overige algemene opmerkingen zijn:

- Het reservoirpeil zal gehandhaafd worden op 0,02m tot 0,05m nauwkeurig.
- Ingrijpende toenames van de belasting waarvan verwacht mag worden dat deze tot significante veranderingen aanleiding geven zullen niet worden toegepast tussen drie uur voor zonsondergang en zonsopgang, om de kans op bezwijken in het donker te verkleinen.
- Om een slecht-gedefinieerd "verval over de pipe" te vermijden, zal het zand rond de wel verwijderd worden zodra het wateroppervlak genaderd wordt. Om praktische redenen zal dit worden voortgezet totdat het ruimingsproces van de eerste pipe de meest bovenstroomse rij van de referentiemonitoring heeft bereikt op 11,25m vanaf de benedenstroomse rand van de proefdijk (dit blijkt uit een onevenredige verhoging van de waterspanningen ter plaatse). De hoeveelheid zand (aantal scheppen) moet worden bijgehouden.
- Onder de Westdijk zal de onderste DMC-buis worden geopend zodra de eerste pipe de referentiemonitoring op 4,0m vanaf de benedenstroomse rand van de proefdijk heeft bereikt (dit blijkt uit een onevenredige verlaging van de waterspanningen ter plaatse). Dit gebeurt waarschijnlijk tijdens fase 3 of fase 4.
- In de Westdijk zal de bovenste DMC-buis worden geopend zodra er significant transport van materiaal optreedt ten gevolge van de kwelstroom door de proefdijk heen. Dit gebeurt waarschijnlijk in de loop van fase 4.
- Indien na fase 4 de proefdijk nog niet is bezweken wordt de onderste DMC-buis dichtgezet.
- In de Oostdijk zijn diverse meettechnieken aangebracht die met elkaar zouden kunnen interfereren. Wanneer interferentie optreedt, zullen de versturende meettechnieken afwisselend gedurende een korte periode geactiveerd worden (zo lang als nodig, maximaal een kwartier per techniek bij iedere (sub) stap) en verder uitgeschakeld zijn. Er zal minimaal één meting plaatsvinden bij elk reservoirpeil. Bij bezwijken zal voorrang worden gegeven aan het meten met de niet-versturende technieken.
- In principe mogen personen nog over de proefdijk lopen tot 2m verval (met name van belang voor grondradar), tenzij de proefleiding gegronde reden heeft (op basis van inspectie of monitoring) om dat niet toe te staan.

#### *Beschrijving uitvoering proef Zuiddijk*

Om het dijklichaam gecontroleerd tot bezwijken te brengen is een aantal acties nodig waarmee het dijklichaam en ondergrond dusdanig wordt verzwakt dat bezwijken optreedt. In het ontwerp zijn drie opties opgenomen (in willekeurige volgorde). De eerste is het verzwaken van het dijklichaam tijdens de proef. Dit kan worden bewerkstelligd door het dijklichaam op te bouwen uit een zandkern met een kleiafdekking. Tijdens de uitvoering van het experiment kan de zandkern worden gevuld met water. Hierdoor neemt het gewicht van het dijklichaam toe, waarmee de belasting op de ondergrond toeneemt en de stabiliteit wordt verlaagd. De tweede optie is het graven van een sloot en het verlagen van het slootpeil. Hierdoor wordt de weerstand tegen afschuiven aan de teen verkleind en daarmee de stabiliteit verlaagd. De derde is het vullen van de containers, waarmee een verkeersbelasting wordt gesimuleerd.

Het volgende stappenplan wordt gehanteerd tijdens de uitvoering van de proef (chronologisch):

- 1 Langzaam vullen van de zandkern tot een hoogte van het freatisch vlak in de zandkern op 0,5m boven het actuele niveau van de teen van de proefdijk aan de noordzijde (gemiddelde nemen van oost- en westraai) - tenzij er lekkage optreedt. In dat geval de zandkern niet verder vullen, maar meteen doorgaan met het vullen van het bassin aan de zuidzijde (stap 2).
- 2 Vullen van het bassin aan de zuidzijde. In principe zes uur nadat het vullen van de zandkern is afgerond, maar bij lekkage zo snel mogelijk.
- 3 Dag 2: graven van een sloot aan de noordkant met een diepte van 1m, een bodembreedte van aanvankelijk 2m, daarna verder verbreden tot een bodembreedte van 4m. In langrichting van de proefdijk net zo ver ontgraven als aangegeven is op de bestekstekening (de sloot is langer dan de proefdijk zelf).
- 4 Ochtend van dag 3: bepaal aan de hand van de vervormingssnelheid van de hellingmeetbuizen (SAAF's) hoe verder te gaan. Wanneer de vervormingssnelheid niet afneemt, dan nog een dag wachten, anders doorgaan met stap 5. Als de volgende ochtend (dat is op dag 4) de vervormingssnelheid nog niet afgenomen is, dan nóg een dag wachten en vervolgens (op dag 5) verder met stap 7 (geen verdere ontgraving dus).
- 5 Verder ontgraven van de sloot tot een diepte van 2m (dit is op dag 3, 4 of 5) en een bodembreedte van 6m.
- 6 De volgende ochtend aan de hand van de vervormingssnelheid van de hellingmeetbuizen hoe verder te gaan. Wanneer de vervormingssnelheid niet afneemt, dan nog een dag wachten en daarna verder met stap 7, anders meteen doorgaan met stap 7.
- 7 Vullen van de containers tot in totaal 1,0m waterhoogte in de containers in stappen van 0,25m met telkens één uur wachttijd na het vullen (dag 5 of dag 6, ongeacht de voorgeschiedenis). Tijdens de proef bepalen hoeveel water in de containers gezet wordt, dit kan ook meer of minder worden.
- 8 De volgende ochtend de zandkern rustig vullen tot in totaal 1,5m boven het niveau van de noordelijke teen bij aanvang van de proef (dus peil met 1,0m verhogen). Tijdens de proef bepalen hoeveel water in de containers gezet wordt, dit kan ook meer of minder worden.
- 9 De volgende ochtend al vroeg de sloot leegpompen (deze is niet actief gevuld tijdens of na ontgraven, maar er zal wel water instromen of invallen).
- 10 Vervolgens de containers vullen (niet laten overstromen).
- 11 Tenslotte de zandkern langzaam helemaal vullen (bovenmatige luchtdruk vermijden) totdat bezwijken optreedt: hetzij in de vorm van macro-instabiliteit, hetzij door micro-instabiliteit door afdrukken van de kleibekleding (theoretisch is dat bij een waterhoogte van rond de 2m).

Wanneer aanvankelijk slechts een kleine afschuiving is opgetreden zal de proef worden voortgezet totdat dit niet meer uitvoerbaar is (uit praktische overwegingen danwel omwille van de persoonlijke veiligheid). Dit kan leiden tot het overslaan van stappen uit het voorgaande stappenplan.

#### 1.2.3.3 Daadwerkelijke uitvoering

De voorgaande paragraaf geeft aan hoe de geplande uitvoering van het experiment is opgezet. Gedurende de proeven is er afgeweken van het draaiboek. Het daadwerkelijke verloop wordt navolgend beschreven.

De proefleiding van Deltares heeft gedurende de proeven alle deelnemers geïnformeerd over eventuele volgende fasen in de belasting van de proefdijken en andere bijzonderheden. Deze informatie was niet heel gedetailleerd en

bevatte evenmin verwachtingen van de proefleiding omtrent het bezwijken. Hiervoor is gekozen omdat door de meet- en visualisatiepartijen voorspellingen moesten worden gedaan en ingediend. Deze informatievoorziening is door iedereen binnen het experiment gevolgd via AnySenseConnect.

#### *Verloop proef Oostdijk*

De proef is gestart op dinsdag 21 augustus om 15:20 uur (fase 1 volgens het draaiboek). In eerste instantie is tot een verval van 50 cm gepompt.

Woensdag 22 augustus is rond 3 uur 's nachts verder opgehoogd naar een verval van 1m. Rond 6 uur 's ochtends werden scheuren aan de bovenzijde van het binnentalud geconstateerd. Nadat rond 9 uur 's morgens een stabiel uitstroomdebiet gemeten werd, is er verder opgehoogd in stappen van 20 cm (fase 2 volgens het draaiboek). Vanwege de toenemende scheurvorming is dit trager uitgevoerd dan oorspronkelijk voorzien was.

Op vrijdag 24 augustus is in de loop van de ochtend het verval van 1,80m gepasseerd.

Op zaterdag 25 augustus rond 10 uur 's morgens is bij een verval van rond 2,30m besloten om de westelijke proefdijk zo mogelijk die dag nog tot bezwijken te brengen en de oostelijke proefdijk –voor zover dat te beïnvloeden was– pas later te laten bezwijken. Deze beslissing is genomen omdat het gedrag van de westelijke proefdijk sterk beïnvloed werd door de geactiveerde DMC-buizen (die toen gesloten werden), terwijl het langer doormeten aan de oostelijke proefdijk –zonder zo'n actief drainagesysteem– een grotere meerwaarde heeft voor de metingen. Het verval is in meerdere stappen verhoogd tot 2,62m aan het einde van de dag.

Op zondag 26 augustus is het verval in de loop van de nacht verhoogd tot 3,1m aan het begin van de ochtend. Op maandag 27 augustus was het verval 's morgens vroeg 3,3m. Daarna is verder opgehoogd tot een verval van bijna 3,5m. Om half tien 's ochtends begon de kruin nabij de oostzijde zichtbaar te verzakken en bijna een uur later brak de proefdijk door.

#### *Verloop proef Westdijk*

De proef is gestart op dinsdag 21 augustus om 16:30 uur (fase 1 volgens het draaiboek). In eerste instantie is tot een verval van 50 cm gepompt.

Woensdag 22 augustus is rond 4 uur 's nachts verder opgehoogd naar een verval van 1m. Hierna werden flinke scheuren in de kruin geconstateerd. Nadat rond 9 uur 's ochtends een stabiel uitstroomdebiet gemeten werd, is er verder opgehoogd in stappen van 20 cm (fase 2 volgens het draaiboek). Vanwege de toenemende scheurvorming rond de kruin is dit trager uitgevoerd dan oorspronkelijk voorzien was.

Op donderdag 23 augustus, aan het einde van de dag, is het verval van 1,80m gepasseerd.

Op vrijdag 24 augustus is bij een verval van 1,87m rond 8 uur 's morgens de bovenste DMC-buis geopend. Even na 11 uur 's morgens is bij een verval van 2,00m de onderste DMC-buis geopend. Aan het einde van de middag is het verval verder verhoogd tot rond 2,10m.

Op zaterdag 25 augustus rond 10 uur 's morgens is bij een verval van rond 2,30m besloten om de westelijke proefdijk zo mogelijk die dag nog tot bezwijken te brengen door het DMC-systeem te sluiten (beide buizen dicht) en de oostelijke proefdijk –voor zover dat te beïnvloeden was– pas later te laten bezwijken. Deze beslissing is genomen omdat het gedrag van de westelijke proefdijk sterk beïnvloed werd door de geactiveerde DMC-buizen (die toen gesloten werden), terwijl het langer doormeten aan de oostelijke proefdijk –zonder zo'n actief drainagesysteem– een grotere meerwaarde heeft voor de metingen. Het verval is in stappen van ongeveer 20 cm verhoogd tot een maximale waarde van ongeveer 3,23m aan het einde van de middag.

In de loop van de nacht van 25 op 26 augustus is aan de oostzijde van de proefdijk een voortgaande afschuiving geconstateerd. Het bovenstroomse peil is in deze periode niet meer bijgehouden.

Op zondag 26 augustus is om 7:30 uur 's ochtends de pomp aangezet om het bovenstroomse peil te handhaven en allereerst terug te brengen op het oorspronkelijke peil. Bij een lager peil begon de verzakte proefdijk aan de oostzijde echter al over te lopen en om 8:24 's ochtends is de proefdijk doorgebroken.

#### *Verloop proef Zuiddijk*

Dag 1: 3 september 2012. Stap 1, de start van de proef was om 12:30 uur. Conform het draaiboek is gestart met het vol laten lopen van de kern van de proefdijk met water vanuit de buffercontainer. Stap 2 is gestart om 16:00 uur (parallel aan het vullen van de kern) en gestopt op 21:45 uur (stop vullen bassin).

Dag 2: 4 september 2012. Stap 1 is gestopt op 00:38 uur omdat er veel lekkages zichtbaar werden in de teen van de proefdijk, bij de ingang van de infiltratiebuis en bij de DMC-buis. In verband met deze natte plekken in de teen van de proefdijk is besloten te stoppen met vullen. Stap 3 is gestart om 11:22 uur waarbij eerst een 0,5m diepe sloot met een bodembreedte van 2m is gegraven. Om 13:05 uur is stap 3 voor de helft afgemaakt door de sloot te verdiepen tot 1m met een bodembreedte van 4m. Omdat het water rustig vanuit het veen toe begon te stromen naar de sloot en er geen onverwacht grote toename van de horizontale deformaties zichtbaar was, is de sloot om 15:00 uur conform stappenplan verbreed tot 4m op de bodem.

Dag 3: 5 september 2012. Om 10:00 uur begonnen met het verdiepen van de sloot tot 1,5m diepte en een bodembreedte van 4m. Om 15:00 uur wordt de sloot verder uitgegraven tot 2,0m diepte en een bodembreedte van 4m. In afwijking van het draaiboek is de sloot niet verder verbreed. Dit vanwege duidelijke signalen dat de slootbodembodem iets aan het opbarsten was, wat in deze fase van de proef niet gewenst was. Als gevolg van het opbarsten zou de waterstand in de sloot snel toenemen en niet eenvoudig meer te verlagen zijn. Besloten is om deze stap niet verder af te maken. De signalen van het opbarsten zijn gedurende de nacht beter zichtbaar geworden.

Dag 4: 6 september 2012. Om 8:00 uur geprobeerd om stap 1 weer op te pakken en langzaam de kern te vullen met water. De waterdruk in de kern was aardig teruggelopen. Doordat er vermoedelijk lucht in de leiding zat leidde het vullen direct tot een aanzienlijk toename van de horizontale deformatie. Op basis hiervan is besloten de kraan om 8:10 uur weer dicht te draaien en de reactie daarvan op deze horizontale deformaties af te wachten. Deze stabiliseerde weer op basis waarvan is besloten om vanaf 10:00 uur weer langzaam de kern te gaan vullen met water en te proberen op het niveau te komen wat bij stap 1 is voorgeschreven. Om 12:00 uur is de eerste test met de DMC-buis gedaan om te kijken of de kwelplekken minder zouden worden. Er is gestopt met het langzaam vullen van de kern om 18:00 uur en begonnen met vullen van de containers met 0,35m water (stap 7 van het draaiboek). Om 23:00 zijn de containers gevuld tot 0,50m water (stap 7).

Dag 5: 7 september 2012. Om 04:47 uur zijn de containers gevuld tot 0,75m water. Om 08:01 uur zijn de containers gevuld tot 1,00m water zodat stap 7 is afgerond. Omdat er geen verontrustende gevolgen zichtbaar waren van het vullen van de containers op zowel de waterspanningen als de horizontale deformatie is verder gegaan met het vullen van de kern (stap 8) om 9:42 uur. Om 9:30 uur is de DMC-buis open gezet. Om 15:30 uur is de DMC-buis harder gaan pompen om te kijken of het effect op de waterdruk in het zand zichtbaar was. Om 15:55 uur is duidelijk dit effect zichtbaar geworden. Om maar niet het water te blijven rondpompen is vervolgens de DMC-buis dicht gezet. Om 17:00 uur is gestart met het vullen van de containers tot 1,25m.

Dag 6: 8 september 2012. Om 00:42 uur zijn de containers gevuld tot 1,5m. In verband met lekkage uit meerdere containers besloten om even niet verder te vullen dan 1,5m. De containers zakten toen al wat scheef. Wel verder gegaan met verder vullen van de kern (stap 8). Om 08:14 uur is het vullen van de kern van de proefdijk versneld door de buffercontainer op een constant hoog niveau te houden waardoor de kern sneller is gaan vullen.

Om 08:47 uur is begonnen met het leegpompen van de sloot (stap 9). Om 9:20 uur zijn de containers 2,3,4, en 5 afgevuuld tot 1,75m. De containers 1 en 6 zijn niet verder gevuld omdat de containers al erg scheef stonden en water lekten. Om 12:00 uur nam de snelheid van de toename van de horizontale deformatie langzaam weer iets af. Dit kwam omdat de waterdruk in de kern steeg en het drukverschil minder groot werd. Besloten is om de kern geforceerd te vullen.

Vanaf 13:00 uur is begonnen met het omzetten van de vulleiding. De leiding die eerst op de buffercontainer stond om de kern onder vrij verval te vullen is rechtstreeks op de vulleiding van de kern van de proefdijk gezet. Na een uur is duidelijk zichtbaar geworden dat het talud begon uit te buiken. Om 14:28 uur is het sloottalud open gescheurd en stroomde water uit de kern van proefdijk.

#### 1.2.3.4 Voorspellingen

De visualisatiepartijen en meetpartijen hebben tijdens het experiment aan de hand van hun meettechniek of visualisatiesysteem voorspellingen over de gesteldheid van de proefdijken ingediend.

Van iedere partij werd verwacht binnen 24 uur na de start van de proef een eerste voorspelling in te dienen. Vervolgens is gevraagd minimaal iedere 24 uur de volgende voorspelling in te dienen, die vanzelfsprekend ook gelijk aan de eerdere voorspelling kon zijn, of een voorspelling die is bijgesteld en/of aangepast. De ingediende voorspellingen konden gedurende de uitvoering van de proef alleen door de proefleiding worden bekeken.

De (aangepaste) voorspellingen ten aanzien van het bezwijken van de proefdijken moesten aan een aantal voorwaarden voldoen. Iedere voorspelling bevatte (voor zowel de Oostdijk als de Westdijk en in de latere proefweek de Zuiddijk):

- Indiener (deelnemer en naam);
- Tijdstip (tijd en datum);
- De betreffende proefdijk (Oostdijk, Westdijk of Zuiddijk);
- Voorspelling tijdstip bezwijken (datum, tijd, range);
- Indicatie/beschrijving faalmechanisme bezwijken (zo gedetailleerd mogelijk) met:
  - Type en signaal (bijvoorbeeld hoeveel kruindaling, hor. verplaatsing, is er sprake van opbarsten etc.);
  - Locatie (in geometrie);
  - Inschatting van de ernst;
- Basis van gebruikte data (meetdata, visuele waarnemingen, visualisatiedata, enz.);
- De (gecombineerde) parameters waarop de voorspelling wordt gebaseerd;
- De meettechnieken waarop de voorspelling wordt gebaseerd;
- De locatie van de meettechnieken (naam en/of coördinaten) waarop de voorspelling wordt gebaseerd;
- Plaatjes van de visualisatie (gebruikte grafieken, meetwaarden);
- Eventuele overige gegevens die de indiener ter ondersteuning mee wil geven.

## 1.3 Analyse proeven

### 1.3.1 Analyse proef Oostdijk

#### 1.3.1.1 Samenvatting

De proef met de Oostdijk is gestart op dinsdag 21 augustus 2012 om 15:20 uur lokale tijd ( $t=-3,37$  uur vanwege een noodzakelijke reset na enkele uren). Bezwijken door micro-instabiliteit van de zandkern vond plaats op de zevende dag van de proef, op maandag 27 augustus om 10:18 uur ( $t=135,50$  uur, dus 138,87 uur na de start). Dit was vooraf gezien één van de gewenste faalmechanismen. Andere faalmechanismen die een rol hebben gespeeld in deze proef zijn verdichting van de proefdijk tijdens de eerste hydraulische belasting en piping (zandmeevoerende welen) in de zandlaag onder de proefdijk.

#### 1.3.1.2 Betrouwbaarheid van de instrumenten (referentiemonitoring)

*Niveaus van bovenstroomse en benedenstroomse bassin:* De dag voor de proef zijn de peilen op hetzelfde niveau gebracht. Dit is gecontroleerd met DGPS-metingen. Kort voor de proef startte is dit opnieuw zo gecontroleerd, en met klassieke waterpasmetingen. De nauwkeurigheid van de peilen wordt daarom op 1 cm geschat, met dien verstande dat op  $t=65,18$  uur een verschil van 14 cm is ontdekt tussen beide peilen, waarvoor in het logboek vóór dat tijdstip overigens niet gecorrigeerd is.

*Debiet:* Voor het benedenstroomse debiet dient de slecht functionerende automatische debietmeter niet te worden vertrouwd. De metingen met behulp van een emmer van 12,5 liter en een stopwatch worden verondersteld een on-



nauwkeurigheid te hebben van maximaal 10%. Opgemerkt wordt dat regenbuien een significante invloed hebben, zoals het effect van de onweersbui rond  $t=3$  uur, met een totale regenval van 13,8mm, op het peil in beide bassins en dus ook op de afvoer.

*Waterspanningsmeters op de overgang zand/klei onder de proefdijk:* Waterspanningsmeters O215, O404 en O412 vertonen een vertraagde reactie en waren ook nog niet in evenwicht toen al deze instrumenten op nul werden gezet aan het begin van de proef. Dit hangt vermoedelijk samen met klei voor de filter. Het gedrag van alle andere instrumenten is in overeenstemming met de overige waarnemingen tijdens de proef, hoewel soms merkwaardige kleine dalingen of verhogingen optraden, net als bij de proeven van drie jaar geleden. Dit lijkt met het instrument samen te hangen.

*Waterspanningsmeters in de zandkern:* Deze instrumenten vertonen allemaal gedrag dat als redelijk en betrouwbaar kan worden getypeerd, zij het dat ook hier dezelfde merkwaardige kleine dalingen of verhogingen optreden.

### 1.3.1.3 Verdichting bij vullen reservoir

Er trad scheurvorming op in de proefdijk langs beide randen van de kruin, met name aan de benedenstroomse zijde. Dit werd geconstateerd vanaf  $t=11,3$  uur toen het waterniveau in het bovenstroomse bassin nog ruimschoots lager was dan de bovenkant van de kleikade. In de loop van de tijd groeiden de scheuren. Vanaf  $t=16$  uur begonnen de waterspanningen in de zandkern nabij de bovenstroomse kant, vlak achter de kleikade, op te lopen. Bij de scheurvorming ontwikkelde zich ook een hoogteverschil, vooral zichtbaar bij de benedenstroomse kruinlijn: de bovenstroomse zijde kwam in de loop van de tijd lager te liggen.

Een verklaring van deze waarnemingen is dat het water vanuit het bovenstroomse bassin toch een weg kon vinden door de kleikade die het meest bovenstroomse deel van de proefdijk vormde (tot een hoogte van circa 2,4m boven de zandlaag, terwijl de kruin van de proefdijk op ongeveer 3,5m boven de zandlaag lag). De zandkern werd nat door stroming door de kleikade, vooral op de overgang tussen de goed verdichte kleilaag en de minder verdichte klei. Deze vernatting kan (beperkte) verdichting van het meest bovenstrooms gelegen deel van de zandkern hebben veroorzaakt, evenals verdichting van het natte deel van de kleikade. Deze verdichting leidde tot vervormingen, die weer leidden tot de waargenomen scheuren en ongelijke verzakking. Tegelijk hebben deze scheuren dit vernattings- en verdichtingsproces van de zandkern en de kleikade versterkt.

### 1.3.1.4 Micro-instabiliteit van de zandkern

De waterdrukken in de zandkern liepen geleidelijk aan op, wat gedurende de eerste drie dagen van de proef echter niet leidde tot een duidelijke verzakking van de proefdijk of uitstroming van water. Op vrijdag 24 augustus werd 's avonds achterloosheid geconstateerd aan de westzijde, bij het folie ( $t=73,4$  uur). In de daaropvolgende 36 uur veranderde er weinig. Pas na de doorbraak van de Westdijk op zondagochtend 26 augustus ( $t=109,7$  uur) werden nieuwe veranderingen aan het talud geconstateerd: scheurvorming aan de westzijde van de proefdijk.

Zondagmiddag 26 augustus ( $t=116,6$  uur) werd geconstateerd dat er water uit het talud stroomde op circa 1m hoogte, ook zakte het benedenstroomse talud uit.

Op maandag 27 augustus bedroeg het verval over de proefdijk 's morgens vroeg ongeveer 3,3m. In de loop van de nacht was er niet veel gebeurd. Daarna is het verval verder verhoogd tot bijna 3,5m. Dit was om 9:10 uur bereikt ( $t=134,28$  uur). Om 9:30 uur ( $t=134,80$  uur) begon de kruin nabij de oostzijde zichtbaar te verzakken en begon water zichtbaar door de scheuren heen te stromen dat zich verzamelde op de verzakte kruin en naar beneden liep. Om 10:18 uur ( $t=135,50$  uur) had deze verzakking ertoe geleid dat het eerste water over de rand van de verzakte bovenstroomse kruinlijn heen begon te stromen. De eerdere doorstroming van water had al tot een aanzienlijke verzakking en uitbuiking van het benedenstroomse talud aan de oostzijde geleid. Om 10:24 uur ( $t=135,60$  uur) spoelde het water door twee grote scheuren heen en om 10:28 uur ( $t=135,73$  uur) was er een duidelijke bres in de proefdijk, die zich verdiepte en verbreedde totdat het bovenstroomse reservoir praktisch leeg was.

### 1.3.1.5 Piping

De eerste wel werd na een kleine twee dagen bij de benedenstroomse teen ontdekt bij een verval van 1,60m over de proefdijk ( $t=16,6$  uur). Pas ruim een etmaal later, bij een verval van 2,02m, veranderde deze wel van alleen

watervoerend in zandmeevoerend; piping dus ( $t=46,4$  uur). Inmiddels waren er ook vijf andere wellen ontstaan. Tot aan het einde van de regelmatige waarnemingen op zondagochtend 26 augustus ( $t=107,6$  uur) werden in totaal 7 wellen geconstateerd, waarvan er drie zandmeevoerend zijn geworden. Na de doorbraak van de Westdijk werden waarnemingen bemoeilijkt door het uit de Westdijk meegevoerde zand aan de westzijde van het oostelijke benedenstroomse bassin en ook uit veiligheidsoverwegingen werd om  $t=113,2$  uur besloten om de detailwaarnemingen te staken.

De aanwezigheid van piping is terug te vinden in de metingen van meerdere waterspanningsmeters in zowel de eerste als de tweede meetraai vanaf de benedenstroomse rand (op respectievelijk 0,9m en 2,5m vanaf de benedenstroomse teen). Deze meetraaien bevonden zich benedenstrooms van de in deze proefdijk toegepaste piping preventiemaatregel: een grof-zand-koffer (grof zand met een korrelgrootte tussen 1 en 2 mm met de juiste filtereigenschappen ter onderbreking van de erosie in de kwelweg) op 3,2m vanaf de benedenstroomse teen. Bovenstrooms hiervan kon in de waterspanningsmeters op 4,0m en 11,3m vanaf de benedenstroomse teen geen teken van kanaalvorming worden onderscheiden.

#### 1.3.1.6 Bereiken doelstelling

De vooraf geformuleerde doelstelling van deze proef was dat deze moest bezwijken door één van de faalmechanismen piping (afhankelijk van de werking van de piping preventiemaatregelen), micro-instabiliteit van de zandkern of erosie ten gevolge van overlopen. Er is micro-instabiliteit van de zandkern opgetreden die een dusdanige verzakking van de kruin tot gevolg had dat de kruin zodanig verzakte dat deze ging overlopen op maandagochtend 27 augustus om 10:18 uur ( $t=135,5$  uur).



*Bezwijken Oostdijk*



## 1.3.2 Analyse proef Westdijk

### 1.3.2.1 Samenvatting

De proef met de Westdijk is gestart op dinsdag 21 augustus 2012 om 16:30 uur lokale tijd ( $t=0$ ). Bezwijken door micro-instabiliteit van de zandkern vond plaats op de zesde dag van de proef, op zondag 26 augustus om 8:24 uur ( $t=111,9$  uur). Dit was vooraf gezien één van de gewenste faalmechanismen. Andere faalmechanismen die een rol hebben gespeeld in deze proef zijn verdichting van de proefdijk tijdens de eerste hydraulische belasting en piping (zandmeevoerende wellen) in de zandlaag onder de proefdijk.

### 1.3.2.2 Betrouwbaarheid van de instrumenten (referentiemonitoring)

*Niveaus van bovenstroomse en benedenstroomse bassin:* De dag voor de proef zijn de peilen op hetzelfde niveau gebracht. Dit is gecontroleerd met DGPS-metingen. Kort voor de proef startte is dit opnieuw zo gecontroleerd, en met klassieke waterpasmetingen. Deze peilen kunnen daarom tot op 1 cm betrouwbaar worden geacht.

*Debiet:* Voor het benedenstroomse debiet dient de slecht functionerende automatische debietmeter niet te worden vertrouwd. De metingen met behulp van een emmer van 12,5 liter en een stopwatch worden verondersteld een onnauwkeurigheid te hebben van maximaal 10%. Opgemerkt wordt dat regenbuien een significante invloed hebben, zoals het effect van de onweersbui op de eerste avond, met een totale regenval van 13,8 mm, op het peil in beide bassins en dus ook op de afvoer.

*Waterspanningsmeters op de overgang zand/klei onder de proefdijk:* Waterspanningsmeters O109 en O203 tonen afwijkend gedrag ruim voordat enig teken van wellen is gesignaleerd: de waarden van deze instrumenten zijn significant lager. Kijkend naar het globale verloop, dat overigens goed vergelijkbaar is met de andere instrumenten, kan een verklaring zijn dat deze beide instrumenten in benedenstroomse richting verplaatst zijn na installatie, bijvoorbeeld tijdens het plaatsen van de onderste kleilaag. Het gedrag van alle andere instrumenten is in overeenstemming met de overige waarnemingen tijdens de proef, hoewel soms merkwaardige kleine dalingen of verhogingen optraden, net als bij de proeven van drie jaar geleden. Dit lijkt met het instrument samen te hangen.

*Waterspanningsmeters in de zandkern:* Deze instrumenten vertonen allemaal gedrag dat als redelijk en betrouwbaar kan worden getypeerd.

### 1.3.2.3 Verdichting bij vullen reservoir

Er trad scheurvorming op in de proefdijk langs beide taluds en op de kruin toen het waterniveau in het bovenstroomse bassin nog ruimschoots lager was dan de bovenkant van de kleikade. De eerste scheuren werden genoteerd op  $t=13,9$  uur. In de loop van de tijd groeiden de scheuren. Na bijna een dag begonnen de waterspanningen in de zandkern nabij de bovenstroomse kant, vlak achter de kleikade, op te lopen. Dit gebeurde aanvankelijk alleen in het midden en aan de oostzijde (vanaf  $t=21$  uur), enkele uren later ook aan de westzijde (vanaf  $t=24$  uur). Deze vertraagde reactie aan de westzijde kan niet worden verklaard uit een verschil in aanbrenghoogte; die kant van de zandkern werd eenvoudigweg pas later bereikt door het instromende water. Een belangrijke waarneming in dit verband betreft de ontwikkeling van een hoogteverschil aan weerszijden van de scheuren op de kruin: de bovenstroomse zijde kwam in de loop van de tijd lager te liggen.

Een verklaring van deze waarnemingen is dat het water vanuit het bovenstroomse bassin toch een weg kon vinden door de kleikade die het meest bovenstroomse deel van de proefdijk vormde (tot een hoogte van circa 2,4m boven de zandlaag, terwijl de kruin van de proefdijk op ongeveer 3,5m boven de zandlaag lag). De zandkern werd nat door stroming door de kleikade, vooral op de overgang tussen de goed verdichte kleilaag en de minder verdichte klei. Deze vernatting kan (beperkte) verdichting van de het meest bovenstrooms gelegen deel van de zandkern hebben veroorzaakt, evenals verdichting van het natte deel van de kleikade. Deze verdichting leidde tot vervormingen, die weer leidden tot de waargenomen scheuren en ongelijke verzakking. Tegelijk hebben deze scheuren dit vernatting- en verdichtingsproces van de zandkern en de kleikade versterkt.

Na ruim 2,5 dagen, op  $t=63,3$  uur, is de bovenste DMC-buis geopend, hetgeen het vullen van de zandkern beslist vertraagd heeft. Interne overloop doordat het waterpeil in het bovenstroomse bassin boven de bovenkant van de kleikade kwam trad pas op vanaf  $t=86$  uur.

#### 1.3.2.4 Micro-instabiliteit van de zandkern

Na het sluiten van de bovenste DMC-buis om  $t=94,0$  uur liepen de waterspanningen in de zandkern sterk op. Vanaf  $t=97,6$  uur, dus iets meer dan vier dagen na het begin van de proef leidden de hogere waterspanningen in het natte deel van de zandkern tot gedeeltelijk verlies van de schuifsterkte, met enige afschuiving van het benedenstroomse talud. Tijdens de daaropvolgende nacht namen de vervormingen toe terwijl het waterniveau in het bovenstroomse bassin langzaam daalde. De vervormingen concentreerden zich aan de oostzijde van de proefdijk. Hier ging uitstroming van zand en klei met water op het talud aan vooraf. De volgende ochtend is het bovenstroomse bassin bijgevuld vanaf  $t=111,0$  uur met een snelle reactie van de waterspanningsmeters in de zandkern tot gevolg. Voordat het eerder bereikte niveau van 3,43m boven de zandlaag werd bereikt in het bassin, leidde de doorgaande en versnelde vervorming van het benedenstroomse talud en de kruin tot een dusdanige kruindaling dat overloop en bresvorming optraden bij een niveau van 3,38m op enkele meters ten westen van de oostkant van de proefdijk op  $t=111,9$  uur. Als gevolg hiervan liep het reservoir binnen 10 minuten leeg. Dit gebeurde op zondag 26 augustus, een kleine 5 dagen na het begin van de proef.

#### 1.3.2.5 Piping

De eerste tekenen van zandtransport als gevolg van kwel werden al opgemerkt om  $t=21,5$  uur, bij een verval over de proefdijk van 1,15m. Toch werden aanvankelijk slechts sporen van zand gezien. Pas na de verhoging van het verval tot 1,56m werd de eerste echte wel ontdekt, om  $t=45$  uur. Na verdere verhoging van het verval tot 1,79m werden om  $t=51$  uur in de eerste meetraai, op 0,9m vanaf de teen, tekenen van piping gezien bovenstrooms van de wellen bij de teen. Enkele uren later werd de tweede meetraai op 2,5m vanaf de teen gepasseerd, om  $t=55,5$  uur. Passage van de derde meetraai, op 4,3m vanaf de teen en daarmee bovenstrooms van de DMC-buis die op 3,7m vanaf de teen lag, trad mogelijk op om  $t=57,5$  uur, enkele uren voordat deze DMC-buis werd geopend, maar dit is onzeker. In de meest bovenstroomse meetraai op 11,2m vanaf de benedenstroomse teen zijn geen tekenen van piping te zien.

Het openen van de onderste DMC-buis, in verscheidene stappen vanaf  $t=66,7$  uur, had een duidelijk effect op de waterspanningen onder de proefdijk. Het openen van de buis had vrijwel direct effect op de wellenactiviteit: er werd geen zand meer meegevoerd. Om  $t=89,6$  uur, enkele uren nadat intern overlopen van de kleikade optrad, is om veiligheidsredenen besloten om de wellen niet meer van nabij te inspecteren. Na het sluiten van de DMC-buis om  $t=94$  uur liepen de waterspanningen weer op en traden er opnieuw zandmeevoerende wellen op. Zowel de waterspanningsmetingen als het beschikbare beeldmateriaal tonen echter duidelijk aan dat de dijkdoorbraak niet veroorzaakt werd door piping.

#### 1.3.2.6 Bereiken doelstelling

De vooraf geformuleerde doelstelling van deze proef was dat deze moest bezwijken door één van de faalmechanismen piping (afhankelijk van de werking van de piping preventiemaatregelen), micro-instabiliteit van de zandkern of erosie ten gevolge van overlopen. Er is micro-instabiliteit van de zandkern opgetreden die een dusdanige verzakking van de kruin tot gevolg had dat de kruin zodanig verzakte dat deze ging overlopen op zondagochtend 26 augustus om 8:24 uur ( $t=111,9$  uur).



Bezwijken Westdijk

### 1.3.3 Analyse proef Zuiddijk

#### 1.3.3.1 Samenvatting

De proef met de Zuiddijk is gestart op maandag 3 september 2012 om 12:12 uur lokale tijd 's middags ( $t=0$ ). Bezwijken door macro-instabiliteit vond plaats op de zesde dag van de proef, op zaterdag 8 september om 14:27 uur ( $t=122,26$  uur). Dit was vooraf gezien één van de twee gewenste faalmechanismen. Met de referentiemonitoring is een goed beeld van het verloop van de proef te krijgen. De proef is aanvankelijk volgens het draaiboek uitgevoerd, later waren enige aanpassingen noodzakelijk.

#### 1.3.3.2 Aanleg van de proefdijk en rustperiode

De proefdijk is van 13 t/m 26 juni 2012 gebouwd op de IJkdijk proeflocatie in Booneschans, Oost-Groningen, met een lengte bovenaan van 50m en een hoogte van 4,0m bij voltooiing. De proefdijk is aangelegd ten zuiden van de eerdere proeflocaties op een klei- en veenpakket van bij elkaar zo'n 4,5m dikte. Bij aanvang van de proef, op maandag 3 september, was de ondergrond min of meer uitgeconsolideerd en was een zetting opgetreden van 0,85m (oostraai) tot ongeveer 1m (westraai).

Ruim een week voordat de proef met deze proefdijk begon, op zondag 26 augustus, brak een andere proefdijk door, de Westdijk. Hierdoor kwam het proefterrein tot aan de teen van de Zuiddijk blank te staan. Dit is terug te vinden in de metingen van de meeste ondiep geplaatste waterspanningsmeters.

#### 1.3.3.3 Betrouwbaarheid instrumenten (referentiemonitoring)

Voor een goede registratie van de bouw, de consolidatie en het proefverloop zijn in, onder en naast de proefdijk bij elkaar 26 waterspanningsmeters geplaatst en twee hellingmeetbuizen. Tot eind augustus zijn daar nog 8 waterspanningsmeters voor niveaumetingen en vier hellingmeetbuizen aan toegevoegd. Op één hellingmeetbuis na

heeft deze instrumentatie naar behoren gefunctioneerd, ook tijdens de proef. Deze analyse is gebaseerd op deze referentiemonitoring.

### 1.3.3.2 Verloop van de proef vóór bezwijken

De proef is op maandag 3 september om 12:12 uur 's middags gestart. Conform het draaiboek is gestart met het vullen van de zandkern door daar langzaam water in te laten tot 0,5m boven het niveau van de teen (stap 1). Op  $t=12,60$  uur is dit gestaakt vanwege ernstige vernatting van de teen van de proefdijk zodra het niveau van de teen van de proefdijk gepasseerd was. Dat er gemakkelijk lekkage kon optreden is logisch gelet op de reactie van de ondiepe waterspanningsmeters op de eerdere hogere waterstand buiten de proefdijk.

Het vullen van het bassin aan de zuidzijde van de proefdijk (stap 2) is van  $t=1,90$  uur tot  $t=9,55$  uur uitgevoerd. Om dit op peil te houden is dit daarna enkele malen bijgevuld.

Op de tweede dag van de proef is in een drietal fasen een sloot van 1m diep en een bodembreedte van 4m gegraven aan de noordzijde van de proefdijk (stap 3). Eerst 0,5m diep en 2m breed van  $t=23,17$  uur tot  $t=24,05$  uur, daarna 1,0m diep en 2m breed van  $t=24,88$  uur tot  $t=26,30$  uur en vervolgens tot 4m breed van  $t=26,80$  uur tot  $t=28,30$  uur.

Op de derde dag van de proef waren de vervormingssnelheden dusdanig klein dat verder afwachten (stap 4 van het draaiboek) niet nodig was. Zodoende is de sloot verder verdiept en verbreed (stap 5). Eerst is de sloot een 0,5m verdiept bij een bodembreedte van 4m (van  $t=45,80$  uur tot  $t=47,30$  uur), daarna is de sloot nog eens 0,5m verder verdiept tot een totale bodemdpte van 2m beneden maaiveld, bij een bodembreedte van 4m (van  $t=49,80$  uur tot  $t=52,55$  uur). Het draaiboek voorzag voor deze stap in een verdere verbreding tot een bodembreedte van 6m, maar hier is van afgezien vanwege signalen dat de slootbodem gevaar liep op te barsten (scheuren in de bodem en toenemende instroom van water).

Op de vierde dag van de proef is er opnieuw water in de zandkern gelaten, eerst om  $t=67,63$  uur. Mogelijk is hierbij eerst lucht (uit de leiding) toegevoerd, wat tot een markante drukverhoging heeft geleid. Er trad ook een versnelde verzakking en horizontale deformatie op, zodra die geconstateerd werd is het inlaten van water zo snel mogelijk gestopt, hetgeen gebeurde om  $t=67,97$  uur. Enkele minuten daarvoor bleek het dijklichaam echter al tot rust gekomen, afhankelijk van het instrument (en dus van de positie) tussen  $t=67,88$  uur en  $t=67,93$  uur.

Om  $t=69,83$  uur is het vullen hervat, waarbij ook met de DMC-buis water vanuit de teen werd afgelaten. De invloed van de DMC-buis is echter niet duidelijk terug te vinden in de metingen. Dit kwam omdat op verzoek van de proefleiding het onttrekkingsdebiet dermate laag stond ingesteld dat niet voortdurend water werd afgelaten. Vanaf  $t=76,85$  uur zijn ook de containers gevuld, eerst met circa 0,25m. Dit is binnen een half uur gebeurd. Daarna is met tussenpozen van telkens enkele uren (gemiddeld 7 uur) in zes stappen het peil in de containers verder opgehoogd tot circa 1,75m (bereikt op  $t=117,65$  uur), behalve in de beide buitenste containers omdat deze lager waren. Vanaf  $t=99,30$  uur is het debiet van de DMC-buis vergroot, waardoor de onttrekking van water nu wel zichtbaar werd op de waterspanningsmeters. Op  $t=102,80$  uur is de DMC-buis gesloten. Op de zesde dag van de proef, op zaterdag 8 september, is de vulsnelheid van de zandkern verhoogd door het waterdruk in de vulcontainer voortdurend hoog te houden en is begonnen met het leegpompen van de sloot, wat erg langzaam ging. Op basis van het debiet van de pomp had de waterstand ruim twee maal zo snel moeten dalen, vermoedelijk nam de kwel toe naarmate de waterstand afnam. Dit proces verliep overigens niet-lineair. De horizontale deformaties versnelden bij iedere belastingverhoging, om vervolgens geleidelijk weer te vertragen.

### 1.3.3.3 Bezwijken van de proefdijk

Omdat het vullen van de proefdijk door het afnemende verval geleidelijk steeds langzamer ging en het volledig droogzetten van de sloot nog erg lang zou gaan duren is besloten om de zandkern wat sneller te vullen door de pomp rechtstreeks aan te sluiten op de vulleiding. Dit was op  $t=121,69$  uur gerealiseerd, waarbij er voor is gezorgd dat de vulleiding volledig gevuld bleef met water. Dit leidde opnieuw tot een versnelling van de vervormingen. Om  $t=122,00$  uur werd de maximale druk in de zandkern bereikt en namen de vervormingen steeds sneller toe, het



meest in het midden, iets minder aan de oostzijde en nog een fractie minder aan de westzijde. Om  $t=122,18$  uur werden de vervormingen met het blote oog zichtbaar door een uitbuiking van het sloottalud, die zich om  $t=122,25$  uur concentreerde in een zone iets westelijk van het midden. Hier brak in dezelfde minuut, om  $t=122,26$  uur (zaterdagmiddag 14:27 uur), ook het sloottalud in stukken, waarna een iets oppervlakkiger glijvlak optrad en de waterdruk in de zandkern snel afnam. Enkele minuten later kwam de afschuiving op het oog tot rust, hoewel tot ruim een half uur later de vervormingen nog wat toenamen.

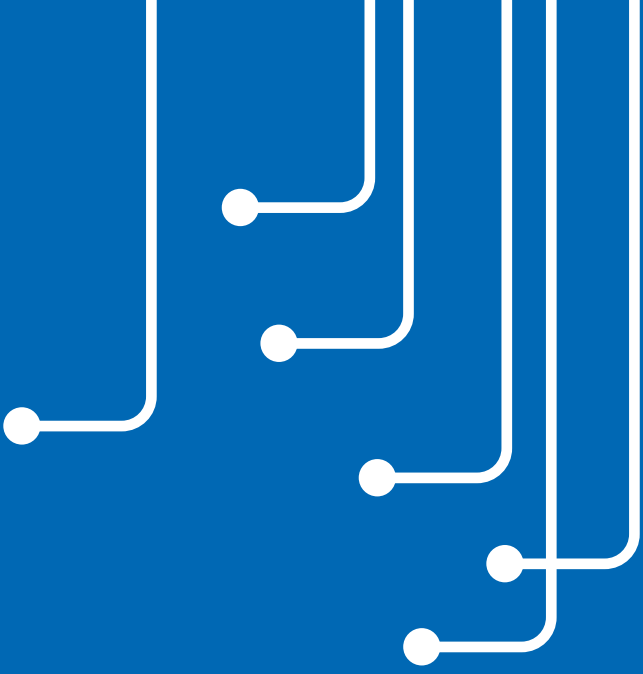
Het is niet waarschijnlijk dat de lekkage vanuit de containers (eerst vooral aan de oostzijde, later vooral ter plaatse van de uiteindelijke afschuiving) heeft bijgedragen tot de afschuiving. De lekkage was ogenschijnlijk aanzienlijk, maar het totale volume water was gering. De invloed is ook niet terug te vinden in de waterspanningsmetingen die wèl reageerden op de doorbraak van de Westdijk en, eerder nog, op neerslag.

#### 1.3.3.4 Bereiken doelstelling

De vooraf geformuleerde doelstelling van deze proef was dat deze moest bezwijken door het faalmechanisme macro-instabiliteit binnenwaarts met een minimale vervorming van 20 cm langs het gewenste glijvlak en/of micro-instabiliteit door afdrukken van de kleibekleding. Er is binnenwaartse macro-instabiliteit opgetreden, waarbij het gestelde vervormingscriterium volgens de metingen met de hellingmeetbuis in het midden van de proefdijk, aan de teen, werd bereikt op zaterdagmiddag 8 september om 14:13 uur ( $t=122,02$  uur).



Bezwijken Zuiddijk



## Deel 2 Toegepaste meettechnieken en visualisatiesystemen

### 2.1 Meettechnieken

#### 2.1.1 TenCate/Inventec

##### 2.1.1.1 Inleiding

TenCate Geosynthetics en Inventec BV hebben gezamenlijk deelgenomen aan het experiment met de toepassing van de TenCate GeoDetect®. De partijen hebben samengewerkt met eDF en GeophyConsult op het gebied van gegevensacquisitie en analyse.

##### 2.1.1.2 Techniek

Vezeloptica wordt in structurele bewakingsystemen voor civieltechnische toepassingen al vele jaren algemeen gebruikt. TenCate GeoDetect® bestaat uit geotextiel met geïntegreerde optische kabels. Het geotextiel wordt in de dijk ingebracht. Met behulp van een uitleesunit meten de optische kabels rek en temperatuur. Indien er deformatie optreedt in de dijk, beweegt het geotextiel als het ware mee en rekt de kabel uit. De golflengte van het teruggekaatste licht verschuift en er wordt deformatie gemeten. Temperatuur wordt gemeten door de naastgelegen kabel. Over de lengte van de kabel wordt op meerdere plaatsen gemeten. Door het meten van temperatuurverschillen kunnen waterstromen worden gedetecteerd.

##### 2.1.1.3 Meetstrategie

###### *Oost- en Westdijk*

De drainage eigenschappen van het geotextiel zorgen ervoor dat waterstromingen in de dijk zich langs het geotextiel bewegen. Door inzicht in deformatie en waterstromen kan het systeem inzicht verschaffen in het optreden van piping. Voor de beide proefdijken werden stroken geotextiel op 8 plaatsen in de lengterichting van de proefdijk aangelegd. Drie stroken aan het buitentalud (boven elkaar) en vijf stroken op de scheiding tussen zand en kleilaag (naast elkaar). De stroken waren onderling aangesloten per proefdijk, dus de Oost- en Westdijk werden afzonderlijk aangesloten. De optische kabels in het geotextiel werden met behulp van een optische verlengkabel aangesloten op de uitleesunit.

###### *Zuiddijk*

In de Zuiddijk werden de stroken geotextiel in lussen door het hele dijklichaam geplaatst. Dit gebeurde op drie niveaus boven elkaar. Elk niveau kende zijn eigen structuur van stroken die in de lengterichting en dwars geplaatst werden. Ook in de Zuiddijk waren de optische kabels onderling verbonden en aangesloten op een uitleesunit. In tegenstelling tot de Oost- en Westdijk, werd in de Zuiddijk alleen deformatie en geen temperatuur gemeten.

#### 2.1.2 StabiAlert

##### 2.1.2.1 Inleiding

StabiAlert levert een systeem dat verzakking, vervorming, hoekverandering en trilling van alle denkbare objecten registreert. De verzamelde data wordt via internet naar een database verstuurd en de historie van alle bewegingen vastgelegd. De klant kan waar dan ook ter wereld realtime meekijken naar de status van een object.

##### 2.1.2.2 Techniek

Door middel van een gevoelige tilsensor wordt beweging ofwel inclinatie gemeten. De sensoren worden op een stijve pijp gemonteerd, die in het dijklichaam is geplaatst. Aan de uitstekende 60 cm van de pijp zijn de zogenoemde inclinokasten met de tilsensoren gemonteerd. Van elke steigerpijp wordt de exacte hoek ten opzichte van het lokale zwaarteveld gemeten. Deze hoek wordt 30 keer per seconde gemeten met een nauwkeurigheid van een 1/24000ste graad. Elke inclinokast bevat naast de eigenlijke sensor een kleine computer welke de sensor uitleest en de gegevens voorbereid voor verzending naar de centrale servers op een datacentrum.

### 2.1.2.3 Meetstrategie

#### *Oost- en Westdijk*

Niet gemeten.

#### *Zuiddijk*

Er is een meetraster op de proefdijk uitgezet van zes delen. In elk deel is een steigerpijp geïnstalleerd. Daarvoor zijn standaard 48 millimeter dikwandige steigerpijpen gebruikt. Drie pijpen een meter uit de kruin, aan beide zijden. De onderlinge afstand bedroeg 16,66m. Elke pijp met een lengte van 5,60m is met behulp van een eenvoudige grondverzetkraan 5m in het talud gedrukt. De computers in de inclinokasten lezen de sensoren 30 keer per seconde uit. Elke 5 seconden worden zes kengetallen over de twee richtingen van dit meetinterval opgestuurd. Dit betreffen de gemiddelde hoek, de maximale hoek en de minimale hoek. De combinatie van de onderlinge afstanden van het raster met de gemeten hoeken levert een vectormodel van de actuele vorm van de proefdijk. Elke inclinokast kan de metingen van meerdere weken lokaal opslaan. Bij uitval van de verbinding met het datacentrum blijven de metingen dus bestaan. Bij herstel van de verbinding sturen de kasten de achterstallige data alsnog naar de centrale server(s). Deze opstelling is de resultante van een balans tussen evenredige sensor verdeling, beschikbare budgetten en een vertegenwoordiging van een mogelijk reële marktprijs.

## 2.1.3 MetaSensing

### 2.1.3.1 Inleiding

MetaSensing levert diensten met remote sensing apparatuur. In dit experiment wordt gemeten met de Fast Ground Based Synthetic Aperture Radar (FastGBSAR).

### 2.1.3.2 Techniek

De FastGBSAR is een instrument dat tweedimensionale kaarten kan produceren op basis van radartechnologie. Om deze kaarten te produceren, worden drie basistechnieken gebruikt: FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave), SAR (Synthetic Aperture Radar) en interferometrie. Deformatie wordt aangetoond door het reproduceren van de tweedimensionale kaarten. Door een herhalingstijd van 5 seconden kan deformatie worden aangetoond in de tijd. Dankzij zijn microwave signalen, kan de radar efficiënt werken tijdens dag- en nachtsituaties en door mist en wolken dringen.

### 2.1.3.3 Meetstrategie

#### *Oost- en Westdijk*

De Oostdijk is niet gemeten, de Westdijk wel. De radar is opgesteld aan de binnenzijde van de proefdijk. De opstelling bestond uit twee betonnen blokken met daarop een rail waarover het instrument horizontaal kon wegen.

#### *Zuiddijk*

De radar is hier wederom aan de binnenzijde van de proefdijk geplaatst. Echter niet recht voor de dijk, maar schuin vanaf de linker zijde.

## 2.1.4 Koenders

### 2.1.4.1 Inleiding

Koenders is een leverancier van sensoren, instrumentatie en meetnetten in onder andere de geotechniek. Door deelname in voorgaande IJkdijk experimenten is getracht sensortechniek geschikt te maken voor toepassing in dijkmonitoring om daarmee optredende faalmechanismen te detecteren.

### 2.1.4.2 Techniek

Koenders Instruments maakt gebruik van de SDT (Smart Dike Tube). Deze probe heeft verschillende geïntegreerde sensoren. De behuizing zorgt ervoor dat de SDT zowel horizontaal als verticaal in een dijkvak ingebracht kan worden.



De SDT meet:

- Deformatie (X, Y en Z);
- Waterspanning;
- Temperatuur;
- Rek.

#### 2.1.4.3 Meetstrategie

##### *Oost- en Westdijk*

In de Oost- en Westdijk is gebruik gemaakt van verticaal geplaatste SDT's. Voor deze proeven is de SDT uitgerust met de volgende sensoren:

- Temperatuur via glasvezel;
- Rek via glasvezel.

##### *Zuiddijk*

In de Zuiddijk is naast verticaal geplaatste SDT's ook met horizontaal geplaatste glasvezel rek gemeten. Voor deze proef is de SDT uitgerust met de volgende sensoren:

- Temperatuur via glasvezel;
- Rek via glasvezel.

#### 2.1.5 ITC

##### 2.1.5.1 Inleiding

ITC heeft in het experiment weerstandsmetingen uitgevoerd op de Oostdijk om te testen of deze methode geschikt is om kleine veranderingen in vochtgehalte in een dijk als gevolg van lekkage tijdig waar te nemen.

##### 2.1.5.2 Techniek

De weerstandsmeter die is gebruikt in dit experiment is een STING R1 weerstandsmeter met SWIFT box van Advanced Geosciences Inc. De weerstandsmeter stuurt een elektrische stroom naar twee elektroden, waarna het potentiaalverschil in de dijk gemeten wordt tussen twee andere elektroden. De SWIFT box, aangestuurd door een computer (ook op afstand), kan dit proces automatiseren door meerdere elektroden afzonderlijk aan en uit te schakelen. Hierdoor kunnen meerdere elektroden op de dijk geïnstalleerd worden, die vervolgens gedurende één meting allemaal gebruikt worden om de weerstand te meten. Het resultaat is een dwarsdoorsnede van de dijk met weerstandswaarden (meeteenheid Ohm-meter,  $\Omega$ m). Door de metingen frequent te herhalen kunnen veranderingen van de weerstand door de tijd gevisualiseerd worden. De elektroden zijn via kabels met de STING verbonden. Ze zijn gemonteerd op metalen pinnen die ongeveer 20 cm in de dijk gestoken zijn.

##### 2.1.5.3 Meetstrategie

##### *Oost- en Westdijk*

De Westdijk is niet gemeten, de Oostdijk wel. Weerstandsmetingen geven een indicatie van de variatie in de elektrische weerstand in de ondergrond, die afhankelijk is van materiaaleigenschappen als porositeit en vochtgehalte. De voornaamste veranderingen door de tijd worden veroorzaakt door een veranderend vochtgehalte. Aangezien de bulkeigenschappen van de ondergrond gelijk blijven, kan door meerdere metingen te doen in de tijd deze variatie in vochtgehalte gemeten worden. In de proef zijn twee rijen van 14 elektroden geïnstalleerd. De keuze voor 14 elektroden op twee rijen is gebaseerd op de breedte van de proefdijk en de tijd voor één meting. Bij het gebruik van meer elektroden duurt het langer voor één meting is gedaan. Bij deze 14 elektroden duurde één meting 37 minuten, waardoor ieder uur een nieuwe meting gedaan kon worden, en er daarnaast nog tijd over was voor andere deelnemers om metingen te doen als de weerstandsmeter uit stond. Door de elektroden in twee parallelle rijen neer te zetten kan een 3D beeld van de dijk verkregen worden. De afstand tussen de elektroden bedroeg 1,5m, de afstand tussen de twee rijen 1m, gemeten over de schuine zijde van de dijk. 14 Elektroden met onderlinge afstand van 1,5m bereiken theoretisch een maximale diepte van 4,14m. Voor een zo groot mogelijk bereik in diepte en om

zo ver mogelijk richting de waterkant te meten is besloten de bovenste elektroden op ongeveer 1,5m onder de kruin van de dijk te plaatsen met de tweede rij ongeveer een 0,5m daaronder.

*Zuiddijk*

Niet deelgenomen.

## 2.1.6 InTech

### 2.1.6.1 Inleiding

InTech Dike Security Systems BV heeft een remote sensing techniek ontwikkeld om de kans van doorbraak van waterkeringen vroegtijdig te kunnen detecteren.

### 2.1.6.2 Techniek

InTech maakt gebruik van een infraroodcamera. Deze techniek berust op het op afstand meten van de uitstraling van infrarood van de waterkering met hoge resolutie. Daarmee kunnen temperatuurverschillen worden gedetecteerd.



*Meetopstelling InTech*

### 2.1.6.3 Meetstrategie

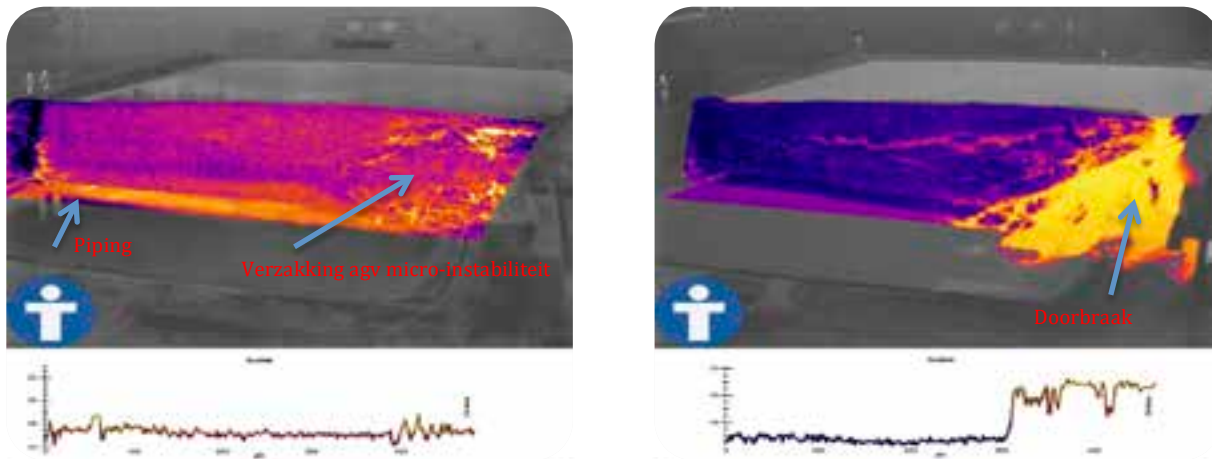
*Oost- en Westdijk*

Voor het experiment is gebruik gemaakt van een door InTech ontwikkeld meetvoertuig. Op het meetvoertuig is een telescoopmast van 12m bevestigd waarop de twee temperatuur gekalibreerde infrarood sensor systemen zijn bevestigd. Het voertuig is mobiel en kan op een gewenste plaats voor de proefdijk worden geplaatst. De speciale infrarood sensoren beschikken ieder over ongeveer 300.000 meetpunten waarmee op 0,05 graad nauwkeurig de temperatuur aan het dijkoppervlak wordt bepaald. Op basis van het temperatuurverval door de proefdijk heen

(verschil in temperatuur water bovenstrooms, kern van de proefdijk en uittredend water benedenstrooms), wordt de fase waarin bijvoorbeeld piping zich bevindt bepaald. Softwarematig kunnen zowel puntmetingen-, lijnmetingen- en oppervlakte metingen realtime worden bepaald.

#### Zuiddijk

Idem als de Oost- en Westdijk.



#### Visualisatie resultaat

### 2.1.7 Empec

#### 2.1.7.1 Inleiding

Empec Survey ontwikkelt een integraal systeem waarbij grondradars, video, warmte camera's, weerstandsmeting en laserscan kunnen worden gebruikt als een relatief snelle manier om een dijk in te meten en waterstromen binnen een dijk te kunnen waarnemen. Het systeem is mobiel en kan met relatief grote snelheid tussen de 60 en 80 km/uur over een dijk worden verplaatst. Op deze manier kan in een korte tijd een groot gebied worden onderzocht. In dit experiment is gebruik gemaakt van grondradar.

#### 2.1.7.2 Techniek

De antenne van de grondradar is voorzien van een zender en ontvanger. De zender zendt een radio signaal in de orde van grootte van 100 Mhz in de grond. Dit signaal wordt teruggekaatst door voorwerpen, of aardlagen die verschillen van de laag die er boven ligt. De mate van terugkaatsing wordt bepaald door de di-elektrische constante van het materiaal. Als twee verschillende materialen een zelfde constante hebben zal men deze niet kunnen waarnemen. Het teruggekaatste signaal wordt ontvangen door de ontvanger en werkt in de logger tot een visueel beeld. De tijd in nano seconden die het signaal aflegt wordt geregistreerd. De diepte wordt dus weergegeven in een tijd. Als de grondsnelheid, in m/ $\mu$ s, is bepaald kan dus pas de diepte in meters worden uitgerekend. De software op de logger is in staat om de gemiddelde grondsnelheid te bepalen. Deze wordt gebruikt voor de interpretatie van de diepte. De penetratiediepte van het signaal is afhankelijk van de signaalfrequentie, signaaldemping van de grond en de elektrische weerstand van de grond.

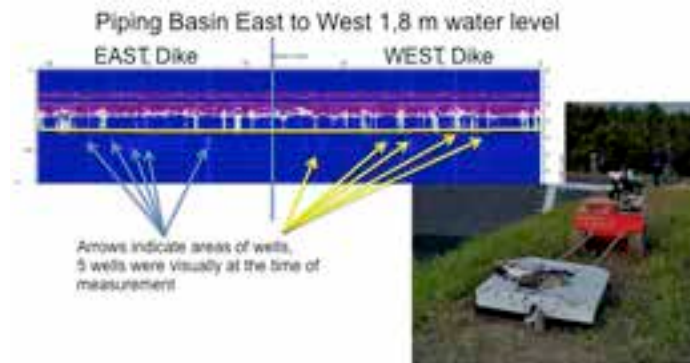
#### 2.1.7.3 Meetstrategie

##### Oost- en Westdijk

De grondradar werd over de proefdijk gereden. Het systeem bestond uit een op afstand bediend voertuigje met een aanhangertje waarop het radar was gemonteerd. De aanlooptijd, de opbouw, kalibratie van het gebruikte systeem bedroeg ongeveer 20 tot 30 min.

### Zuiddijk

Niet deelgenomen



*Meettechniek en visualisatie resultaat*

## 2.1.8 Volker Wessels Telecom/Landustrie

### 2.1.8.1 Inleiding

Volker Wessels Telecom en Landustrie ontwikkelden samen het Dijk Monitoring- en Conditioneringssysteem (DMC). Het systeem monitort en conditioneert wanneer grenswaarden bereikt zijn.

### 2.1.8.2 Techniek

Het DMC-systeem geeft door middel van glasvezel sensoren, geplaatst in een horizontale filterbuis in een dijk, informatie over de conditie van de dijk. Dit gebeurt door middel van het meten van de waterspanning en de watertemperatuur van het dijklichaam. Als de indicatoren aanleiding geven om in te grijpen treedt het systeem in werking en zorgt een pomp, opgenomen in de filterbuis, voor de afvoer van water. Hierdoor neemt de stabiliteit van het dijklichaam weer toe. Het DCM-systeem zorgt naast realtime monitoring voor ingrijpen bij hoge waterspanningen en afwijkende temperaturen.

### 2.1.8.3 Meetstrategie

#### *Oost- en Westdijk*

De Oostdijk is niet gemeten, de Westdijk wel. Het DMC-systeem is aangebracht in de Westdijk. In een bestaande dijk wordt het DMC-systeem aangebracht middels een horizontaal gestuurde boring. De zogenaamde HDDW (Horizontaal Directional Drilled Wells). Om economische redenen is het niet haalbaar geweest om te installeren middels een HDDW bij de Westdijk. In deze proef is tijdens de opbouw van de proefdijk een vergelijkbaar filter aangebracht. Over de lengterichting zijn twee filterbuizen geplaatst. Eén in het zandpakket. Eén in het dijklichaam. De filterbuis heeft een vaste filterzandomstorting om wegspoelen van het filterzand als gevolg van vergevorderde piping te voorkomen. Indien tijdens de proef een faalmechanisme optreedt of gaat optreden, zal het systeem proberen het falen te voorkomen door de conditioneringsfunctionaliteit aan te zetten.

#### *Zuiddijk*

Over de lengterichting van de proefdijk is in de zandkern een filterbuis geplaatst. In de zandkern is vooral waterspanning relevant. Temperatuursensoren zijn hier achterwege gelaten. Indien de waterspanning te hoog wordt, zal de conditioneringsfunctionaliteit de freatische lijn in de proefdijk verlagen. Nadat het DMC-systeem in werking is gezet, zal het worden gestopt om verdere belasting van de proefdijk mogelijk te maken.



## 2.1.9 Alert Solutions

### 2.1.9.1 Inleiding

Alert Solutions BV ontwikkelt en levert sensor netwerken voor continue monitoring van infrastructurele werken. Monitoringsystemen functioneren onder de naam GeoBeads®. Alert Solutions is sinds de start betrokken bij de experimenten van de Stichting IJkdijk en heeft in dit experiment deel genomen om de prestaties van Geobeads® te tonen.

### 2.1.9.2 Techniek

Alert Solutions heeft waterspanningsmeters en multisensormodules toegepast. Er zijn twee types waterspanningsmeters ingezet, de ACE-250 en VCP-250. Deze twee types zijn elektronisch identiek, maar verschillen qua behuizing. De multisensormodules meten naast waterspanning ook temperatuur en inclinatie (de hoek van de sensor ten opzichte van het verticale zwaartekrachtveld). De instrumenten worden met standaard sondermateriael in onder meer dijken aangebracht.



*Plaatsing multi-sensormodules door mini sondeerrups*



*GeoBeads® multi-sensormodule met sondeerpunt*

### 2.1.9.3 Meetstrategie

#### *Oost- en Westdijk*

In de Oost- en Westdijk zijn waterspanningsmeters geplaatst. In geval van piping of zandmeevoerende wellen ontstaan kanaaltjes onder de dijk die het water afvoeren uit het dijklichaam en waarin zand mee kan spoelen. Volgens de theorie van het faalmechanisme piping ontstaan de kanaaltjes bij de teen van de dijk aan de uitstroomzijde (binnenteen) en groeien deze door uitspoeling van zand onder de dijk verder naar de rivierzijde. Daar waar de kanaaltjes groeien, zal dit zich manifesteren als daling van de lokale waterspanning. Door de waterspanningen continu te meten wordt zichtbaar wanneer de waterdrukken scherpe dalingen laten zien, wat dan kan wijzen op het ontstaan van piping. Waterspanningsmeters zijn in twee rijen evenwijdig aan de teen van de proefdijk op de overgang van zand naar klei geplaatst. Voor deze configuratie is gekozen omdat juist op het grensvlak tussen klei en zand het ontstaan van piping wordt verwacht. Bij het ontstaan van piping zullen de kanalen groeien vanuit de binnenteen van de dijk naar de kern van de proefdijk toe. Om die ontwikkeling te volgen worden twee rijen van opnemers achter elkaar geplaatst. Zodra een pipingkanaal de eerste rij sensoren bereikt zal daar de waterspanning afnemen (vereffening met benedenstrooms), terwijl het verhang tussen beide rijen (verschil in waterspanning) hiermee juist toeneemt. Zodra het pipingkanaal verder groeit tot de tweede rij opnemers zal ook daar de waterspanning dalen en daarmee het verhang tussen beide rijen ook.

### Zuiddijk

In de Zuiddijk zijn multisensor-modules geplaatst in twee dwarsraaien. De modules meten gelijktijdig waterspanning, temperatuur en inclinatie. De Zuiddijk is zo geconstrueerd dat het optreden van macro-instabiliteit of micro-instabiliteit verwacht kan worden. Om deze faalmechanismen te kunnen waarnemen zijn de sensoren op die locaties geïnstalleerd waar potentiële problemen zich het eerst kunnen manifesteren. Dat betekent sensoren aan de binnenteen van de proefdijk in alle relevante grondlagen (diepe pleistocene zandlaag, het veen en klei) voor het monitoren van macro-instabiliteit. Daarnaast een module in de teen van het dijklichaam om micro-instabiliteit te kunnen monitoren. Per raai zijn vier sensormodules geïnstalleerd. Elke module bestaat uit drie sensorelementen voor het meten van de verschillende parameters. In totaal dus 24 sensoren.

## 2.2 Visualisatiesystemen

### 2.2.1 Siemens

#### 2.2.1.1 Inleiding

Siemens neemt in het experiment deel met het Siemens Dijkmonitoringssysteem. Daarbij maakten zij gebruik van de geotechnische kennis van HR Wallingford. De basis voor het systeem is het datamanagementsysteem WinCC Open Architecture (WinCC OA). WinCC OA is een SCADA systeem voor grootschalige automatiseringstoepassingen, met name voor gedistribueerde systemen, bijvoorbeeld infrastructuren.

#### 2.2.1.2 Beschrijving systeem

WinCC OA werkt met een input voor data en een visualisatiemodule. Input voor dit systeem was de AnySenseConnect database en modellen voor artificiële intelligentie. Sensorwaarden werden geïmporteerd uit AnySenseConnect en opgeslagen in WinCC. Deze waarden vormden de input van de artificiële intelligentie modellen, die door berekeningen voorspellingen genereerden.

#### 2.2.1.3 Informatievoorziening

Een gebruikersinterface zorgde ervoor dat data vertaald werd naar bruikbare informatie als:

- Visualisering van data (zoals diagrammen of beelden);
- Dijkoverzichten;
- Weergave van dijkdoorsnedes;
- Voorspellingschema's;
- Alarm event window;
- Integratie van Google maps;
- Twitter visualisering;
- Webcam beelden.

### 2.2.2 Fugro/Nelen & Schuurmans

#### 2.2.2.1 Inleiding

Fugro Geoservices en Nelen & Schuurmans hebben in het experiment hun ontwikkelde Levee-Portal toegepast. Het doel van het Levee-Portal is het accuraat weergeven van informatie met betrekking tot de staat van de verschillende dijklichamen gedurende de experimenten. Dit ambitieniveau is geënt op een hoger doel: een systeem dat ondersteuning kan bieden bij de beoordeling van veiligheidssituaties gedurende hoog water. Nadrukkelijk is gekozen om een visualisatie-platform toe te passen dat voor verschillende gebruikers een eigen interface biedt. Achter het Levee-Portal draaide het datamanagement systeem GeODin. Dit systeem is geschikt voor grootschalig geografisch ontsluiten en analyseren van geotechnische data. Het toepassen van dit systeem maakte het mogelijk om zowel monitoringdata te analyseren als dijksterktemodelering toe te passen. Zo werd niet enkel monitoringdata gevisualiseerd, maar ook de dijksterkte realtime in het Levee-Portal gepresenteerd.

### 2.2.2.2 Beschrijving systeem

Het importeren van data gebeurde in twee stappen. Als eerste importeerde Fugro de data vanuit de AnySenseConnect database in hun bestaande GeODin database. De GeODin database werd door Lizard van Nelen & Schuurmans gebruikt om de data te importeren. In het Levee-Portal werd de data vervolgens gepresenteerd. Er zijn een vijftal functionaliteiten te onderscheiden:

- De realtime weergave van sensordata;
- Realtime weergave van de dijksterkte;
- Een intelligente interface voor data interpretatie;
- Een digitale adviseur (expert judgement ter ondersteuning van beslissingen);
- De weergave van mogelijke gevolgen van een dijkdoorbraak voor het achterliggende gebied (door de modellering van de te verwachten overstroming).

Daarnaast werd ondersteunende informatie gepresenteerd en bood het Levee-Portal communicatiemogelijkheden via afgeschermden kanalen en sociale media (Twitter).

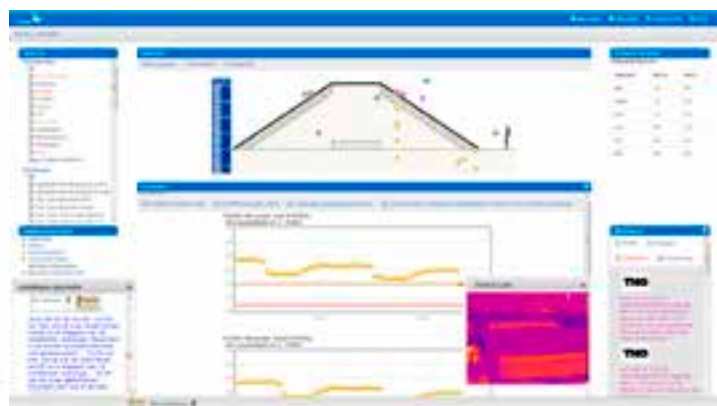
### 2.2.2.3 Informatievoorziening

Het Levee-Portal heeft gedurende de experimenten monitoringsdata gevisualiseerd op basis van verschillende methoden. Deze methoden waren afgestemd op de gebruiker middels een drietal toegangsschermen. De schermen waren elk ingericht voor een speciale doelgroep: bestuurders, dijkbeheerders, specialisten, ingenieurs en sensor leveranciers. De eerste twee schermen visualiseerden de waterkering middels een bovenaanzicht, een vooraanzicht en dwarsdoorsneden. Het portal bevatte ook een interface waarin individuele sensoren geselecteerd konden worden via een overzichtskaart (Google Maps) met lagenfunctie. Het scherm gericht op de bestuurders liet de staat van de waterkering zien aan de hand van kleurcoderingen. Op deze wijze werd de urgentie van de situatie weergegeven. De kleurcoderingen stonden in relatie tot de actuele dijksterkte. De betreffende proefdijken waren verdeeld in een aantal segmenten. Op deze wijze kon ook de locatie van "de zwakke plek" in beeld worden gebracht. Een groene kleur stond voor een situatie waar de veiligheid niet in het geding was. Een oranje kleur werd getoond wanneer de stabiliteitsfactor en/of de veiligheidsfactoren een waarde van 1,5 of kleiner hadden. Een rode kleur werd getoond wanneer deze indicatoren een waarde hadden van 1,1 of minder.

De visualisatie voor specialisten bestond uit indicatoren met betrekking tot de verschillende faalmechanismen in tabelvorm, grafiekvorm en de kleurcodering van de dijksecties. Daarnaast konden verschillende grafieken met elkaar vergeleken worden. Zo konden de waterspanningen in relatie tot vervormingen worden bekeken. Ook waren de remote-sensing technieken oproepbaar. In het leveranciersscherm was het mogelijk per sensor grafieken op te roepen, wanneer tijdreeksen beschikbaar waren. Daarnaast kon de ruwe data worden bekeken.



Weergave visualisatiesysteem



## 2.2.3 AGT International

### 2.2.3.1 Inleiding

AGT International is bezig met het ontwikkelen van een oplossing die waterschappen een uitvoerig overzicht van hun totale watermanagement biedt. Eén van de doelen van de Flood Management Oplossing van AGT International is het doen van voorspellingen, maar ook het bieden van de mogelijkheid om voorbereidingen te treffen voor een potentiële dijkdoorbraak, alsmede om prioriteiten te stellen voorafgaand en tijdens een crisis.

### 2.2.3.2 Beschrijving systeem

De fysieke opbouw van het systeem bestond uit een server en een cliënt. De van AnySenseConnect ontvangen gegevens worden verwerkt door de DSS (Decision Support System) Sensor Manager van AGT International, die de database en de status van de sensoren bijwerkt. Op de cliënt draaide de AGT International DSS Client App, de belangrijkste interface voor de gebruikers, die visualisatie van de sensorgegevens geeft.

### 2.2.3.3 Informatievoorziening

De DSS van AGT International levert gebruikers een Unified Situational Awareness Picture (USAP) door de toestand van het systeem op een kaart te visualiseren. In realtime wordt de dijkstatus op een kaart gevisualiseerd met verschillende kleuren: groen betekent stabiel, geel oranje en rood als de stabiliteit achteruitgaat. Een pop-up venster en een alarm zullen automatisch verschijnen bij achteruitgang van de stabiliteit. De dijkstabiliteit waarden die werden gebruikt waren 2 (normaal), 1 (laag), 0,8 (hoog) en 0,5 (kritiek). Het alarm werd geconfigureerd om te worden geactiveerd wanneer de dijkstabiliteit onder 0,5 valt. Een pop-up venster en een alarm verschijnen automatisch bij achteruitgang van de stabiliteit. Het systeem biedt ook de mogelijkheid om verschillende afbeeldingen als onderlaag te selecteren, bijvoorbeeld de as-built" tekening of de "Google maps-satellietfoto".



## Deel 3 Beoordeling

### 3.1 Onafhankelijke beoordelingscommissie

In het experiment is een onafhankelijke beoordelingscommissie samen gesteld. De commissie heeft een beoordelingskader opgesteld en de meettechnieken en visualisatiesystemen hierop beoordeeld. De commissie is samengesteld uit wetenschappers, ingenieurs en specialisten afkomstig uit de vakgebieden waterkering beheer, geotechniek, telecommunicatie, ICT, waterveiligheid en dijkmonitoring.

De onafhankelijke commissie die de beoordeling heeft uitgevoerd bestaat uit de volgende leden:

- F.A. van den Berg, Waterschap Rivierenland / ENW;
- drs. ing. C.K.E. ter Brake, STOWA;
- ing. H. de Bruijn, Deltares;
- dr. ir. A.R. Koelewijn, Deltares;
- prof. dr. R. Meijer, TNO / Universiteit van Amsterdam;
- ing. R. van Putten, Waternet;
- ing. G. de Vries, Deltares;
- ing. W.S. Zomer MSc., Stichting IJkdijk.

### 3.2 Beoordelingskader

#### 3.2.1 Opzet

Om tot een beoordeling te komen van de meettechnieken en visualisatiesystemen is een beoordelingskader opgesteld. In dit beoordelingskader zijn relevante criteria verzameld.

In de bestaande literatuur worden een aantal onderdelen aangestipt die van belang zijn bij het maken van een afweging voor meettechnieken. Hierbij gaat het om nauwkeurigheid, inspectiefrequentie en mogelijke toepasbaarheid (Moser & Zomer, 2006). Ook binnen de bestaande literatuur aangaande de meet- en regelsector is een aantal adviezen te vinden. Kwalitatieve criteria uit deze sectoren zullen veelal overeenkomen met de voorwaarden waaraan een meettechniek moet voldoen als het gaat om dijkmonitoring. De mate waarin een verschijnsel kan worden gedetecteerd, de benodigde tijd om een verschijnsel te detecteren worden genoemd als belangrijke criteria (Alipoor & Hadinejad, 2011).

Met aanvullingen op deze bestaande literatuur zijn de volgende criteria opgesteld:

- Meettechnieken:
  - Nauwkeurigheid;
  - Reikwijdte;
  - Metingdichtheid;
  - Meetfrequentie;
  - Mate van redundantie;
  - Robuustheid;
  - Aanlooptijd;
  - Informatieverwerkingstijd;
  - Interpretatie;
  - Voorspelling faalmechanisme;
- Visualisatiesystemen:
  - Combineren meettechnieken;
  - Functionaliteiten en informatievoorziening;
  - Helderheid uitspraken;
  - Voorspelling faalmechanisme.

Per criterium is een waardering aangegeven met een waarderingsschaal van A tot E. Daarbij is per criterium en per waarde een vaste definitie gehanteerd. Deze definities worden in de navolgende paragraaf uiteengezet.

De criteria en waarderingen zijn per meettechniek en visualisatiesysteem in een samenvattende tabel weergegeven. De diverse criteria met bijbehorende waardering geven een totaalbeeld van de inzet van de meettechniek of het visualisatiesysteem.

Belangrijk is te vermelden dat een “totaalwaardering” niet aan de orde is bij de beoordeling. Een meettechniek of visualisatiesysteem kan hoger gewaardeerd op het ene criterium en lager op het andere. Afhankelijk van de vraag die achter de inzet van een meettechniek of visualisatiesysteem ligt, is de dijkbeheerder dan in staat een meettechniek of visualisatiesysteem te kiezen dat voldoet aan de bijbehorende eisen. Dit zal per situatie verschillen.

Daarnaast moet vermeld worden dat de criteria, definities en de waardering een raamwerk betreffen. Het heeft niet de potentie om tot een waardering te komen waarbij interpretatie geen rol speelt (dat is ook niet mogelijk en daarvoor is de onafhankelijke beoordelingscommissie). Met andere woorden: de waarderingen zijn een interpretatie van de commissie waarbij het raamwerk als hulpmiddel is gebruikt en de denkwijze weergeeft.

Bij de beoordeling is uitgegaan van de resultaten die zijn behaald binnen de drie proeven van de All-in-one Sensor Validatie Test.

In de samenvattende tabellen worden de meetpartijen en visualisatiepartijen genoemd en niet de specifieke ingezette meettechniek of het visualisatiesysteem. De beoordeling betreft wel deze specifieke meettechniek of visualisatiesysteem. Deze specifieke informatie wordt gegeven in deel 2 en de bijlage van de rapportage.

### 3.2.2 Criteria meettechnieken

#### 3.2.2.1 Nauwkeurigheid

De precisie van de meettechniek uitgedrukt in de gemeten eenheid, is de nauwkeurigheid van de meettechniek in relatie tot het meetdoel. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Waardering A is voor dit criterium niet haalbaar, enige onnauwkeurigheid is inherent aan meten
- B Hoge nauwkeurigheid van het instrument
- C Matige nauwkeurigheid
- D Het systeem moet geijkt worden met een andere meting
- E Niet nauwkeurig genoeg om bruikbaar te zijn voor de betreffende parameter

#### 3.2.2.2 Reikwijdte

De reikwijdte is de grootte van een gebied dat met één meting bemeten kan worden. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Volume meting van het dijklichaam (driedimensionale meting)
- B Oppervlaktemeting (tweedimensionale meting)
- C Lijnmeting
- D Puntmeting
- E Nietszeggend

#### 3.2.2.3 Metingdichtheid

Het aantal punten waarop metingen worden uitgevoerd, gedeeld door een lengte- of oppervlakte-eenheid van één sensor. Voor puntmetingen is de metingdichtheid gelijk aan de reikwijdte. Voor overige metingen is het erg specifiek afhankelijk van de gekozen meetstrategie en daardoor niet generiek te kwalificeren.

#### 3.2.2.4 Meetfrequentie

Het aantal metingen dat per tijdseenheid kan worden uitgevoerd. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Eenmaal per 15 seconden of vaker
- B Eenmaal per minuut
- C Eenmaal per uur
- D Eenmaal per dag
- E Eén meting per meerdere dagen

### 3.2.2.5 Mate van redundantie

Redundantie is het meermalen voorkomen van systeemonderdelen, die onafhankelijk van elkaar functioneren. Zo kan een apparaat zijn uitgevoerd met meervoudig aanwezige onderdelen, zodat het geheel goed blijft functioneren wanneer één of meer onderdelen defect raken of verloren gaan. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Meervoudig uitgevoerd en back-up mogelijkheid van data
- B Meervoudig uitgevoerd
- C Enkelvoudig uitgevoerd met back-up mogelijkheid van data
- D Enkelvoudig uitgevoerd
- E Enkelvoudig uitgevoerd, en meetsysteem blijkt (ten dele) niet te functioneren

### 3.2.2.6 Robuustheid

Robuustheid is de mate waarin veranderingen in de omgeving kunnen worden weerstaan met minimale schade, verandering of verlies van waarde. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Er is rekening gehouden met alle mogelijke vormen van uitval en er is een oplossing voorhanden
- B Weinig omstandigheden denkbaar die invloed hebben op het functioneren
- C Techniek heeft stabiel gefunctioneerd onder gegeven omstandigheden
- D Veel moeite met veldomstandigheden
- E Kan niet omgaan met veldomstandigheden

### 3.2.2.7 Aanlooptijd

De tijdsduur die nodig is om de techniek operationeel te maken. Dit omvat de installatietijd en de tijdsduur die nodig is om de monitoringstechniek de eerste meting uit te laten voeren. Maar ook de kalibratietijd, de tijdsduur die nodig is om de meettechniek in te laten instellen op "normale" omstandigheden. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Onmiddellijk inzetbaar
- B Binnen enkele uren operationeel
- C Binnen enkele dagen operationeel
- D Binnen een week operationeel
- E Binnen minimaal een maand operationeel

### 3.2.2.8 Informatieverwerkingstijd

Na het meten van de parameters moet de informatie worden verwerkt. De tijd tussen het moment van meten en het moment dat de data in geschikte vorm aanwezig is, is hier de definitie van informatieverwerkingstijd. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Begrijpelijke data is realtime beschikbaar
- B Begrijpelijke data is met een korte vertraging van enkele minuten beschikbaar
- C Er is nog een bewerkingsslag noodzakelijk voordat begrijpelijke data beschikbaar is
- D Er is nog een bewerkingsslag van 0.5 tot 2 dagen noodzakelijk voordat begrijpelijke data beschikbaar is
- E Er zijn meerdere dagen nodig om tot begrijpelijke data te komen

### 3.2.2.9 Interpretatie

Het criterium interpretatie wordt bepaald door de mate waarmee de aangeboden data kan worden vertaald naar bruikbare informatie (bijvoorbeeld informatie over de sterkte – één of meerdere faalmechanismen – resultaat is een directe of indirecte parameter). De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Direct interpreteerbare gemeten grootheden en deze kunnen worden vergeleken met meerdere technieken
- B Gemeten grootheden zijn (vrijwel) direct interpreteerbaar
- C Interpreteerbaar zonder expert
- D Levert gegevens, maar vergt expert om iets mee te kunnen
- E Onduidelijk

### 3.2.2.10 Voorspelling faalmechanisme

Voorspelling faalmechanisme geeft aan in hoeverre een faalmechanisme vooraf kan worden voorspeld met de techniek. In de waardering zijn onder andere het tijdstip en het type faalmechanisme van belang. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Het juiste faalmechanisme wordt voorspeld op het juiste tijdstip
- B Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is en een volledig beeld weergeeft
- C Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is, maar niet het volledige beeld wordt weergegeven
- D Er wordt wel iets relevant (achteraf) geïdentificeerd maar is onvoldoende specifiek gemaakt
- E Geen voorspelling of niet aangetoond

## 3.2.3 Criteria visualisatiesystemen

### 3.2.3.1 Combineren meettechnieken

Het gaat hierbij om de mogelijkheid verschillende meettechnieken te koppelen en een totaal beeld te geven. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Volumebeeld (meerdere metingen tot een driedimensionale weergave van de situatie in de tijd)
- B Raaien (meerdere metingen tot dwarsdoorsneden)
- C Tijd (meerdere metingen in de tijd)
- D Multi-scalair (meerdere metingen)
- E Scalair (één meting)

### 3.2.3.2 Functionaliteiten en informatievoorziening

Het gaat hierbij om de helderheid van de informatievoorziening, de mogelijkheden die het systeem biedt voor de gebruiker en visualisaties. De manier waarop het systeem de informatie aan bied kan via verschillende functionaliteiten. Daarbij wordt toegespitst op vijf kernfunctionaliteit - plotten van grafieken van meetdata - weergave van dijksterkte (eenvoudige dijksterktemodellering) – virtual dike modellering (geavanceerde dijksterktemodellering) - gebruik van data driven models - informatie over besluitvorming. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A 5 Kernfunctionaliteiten
- B 4 Kernfunctionaliteiten
- C 3 Kernfunctionaliteiten
- D 2 Kernfunctionaliteiten
- E 1 Kernfunctionaliteit

### 3.2.3.3 Helderheid uitspraken

Het criterium helderheid uitspraken betreft het geven van informatie aan de hand van uitspraken over de toestand van de dijk op basis van het systeem. Daarbij wordt toegespitst op vijf niveaus – informatie op het niveau van een bestuurder – een manager – een dijkbeheerder – een expert – een ingenieur. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A 5 Niveaus
- B 4 Niveaus
- C 3 Niveaus
- D 2 Niveaus
- E 1 Niveau

### 3.2.3.4 Voorspelling faalmechanisme

Voorspelling faalmechanisme geeft aan in hoeverre een faalmechanisme vooraf kan worden voorspeld met de techniek. Onder andere het tijdstip en het type faalmechanisme zijn hierbij van belang. De waardering is als volgt gedefinieerd:

- A Het juiste faalmechanisme wordt voorspeld op het juiste tijdstip
- B Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is en een volledig beeld weergeeft
- C Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is, maar niet het volledige beeld wordt weergegeven
- D Er wordt wel iets relevant (achteraf) geïdentificeerd, maar is onvoldoende specifiek gemaakt
- E Geen voorspelling of niet aangetoond

### 3.2.4 Overige criteria

Voor het DMC-systeem van Volker Wessels Telecom en Landustrie geldt dat dit een maatregel betreft met als onderdeel een meettechniek. De criteria zoals deze opgezet zijn voor meettechnieken gelden ook voor het DMC-systeem, maar er zijn twee uitzonderingen:

- Het criterium voorspellende waarde is niet van toepassing;
- In plaats daarvan is er een criterium toegevoegd, effectiviteit van de maatregel.

### 3.3 Beoordeling

Er hebben in totaal drie proeven plaatsgevonden, waarin de meetpartijen en visualisatiepartijen deel konden nemen. Voor elke proef (indien deelgenomen) hebben de meet- en visualisatie partijen een rapportage aangeleverd (zie de bijlage). Deze rapportage bestond uit drie delen. Deel A: het factueel report over de meettechniek of het visualisatiesysteem. Delen B en C: een weergave van de prestatie van de meettechniek of het visualisatiesysteem. Op basis van deze rapportages zijn de meettechnieken en visualisatiesystemen beoordeeld op vooraf vastgestelde criteria. Tijdens een bijeenkomst van de commissie zijn de individuele beoordelingen besproken en bediscussieerd. Uiteindelijk is er per meettechniek en per visualisatiesysteem voor ieder criterium een gezamenlijke beoordeling gegeven. De gepresenteerde resultaten worden door de gehele commissie gedeeld. De beoordeling is gebaseerd op de resultaten en deelname van de volgende partijen:

- TenCate en Inventec - meettechniek - Zuiddijk, Westdijk en Oostdijk;
- StabiAlert - meettechniek – Zuiddijk;
- MetaSensing – meettechniek – Zuiddijk en Westdijk;
- Koenders – meettechniek – Zuiddijk, Westdijk en Oostdijk;
- ITC – meettechniek – Oostdijk;
- InTech – meettechniek – Zuiddijk, Westdijk en Oostdijk;
- Empec – meettechniek – Westdijk en Oostdijk;
- Volker Wessels Telecom en Landustrie – meettechniek / maatregel – Zuiddijk en Oostdijk;
- Alert Solutions – meettechniek – Zuiddijk, Westdijk en Oostdijk;
- Siemens – visualisatiesysteem – Zuiddijk, Westdijk en Oostdijk;
- Fugro en Nelen & Schuurmans – visualisatiesysteem – Zuiddijk, Westdijk en Oostdijk;
- AGT International – visualisatiesysteem – Zuiddijk, Westdijk en Oostdijk.

### 3.3.1 Beoordeling meettechnieken

#### 3.3.1.1 TenCate en Inventec

Het beoordeelde document is: "Rapport van de metingen verricht met het TenCate GeoDetect systeem op de zuid-dijk, 30 november 2012". Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering TENCATE EN INVENTEC	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid		X			
Reikwijdte			X		
Metingdichtheid	X				
Meetfrequentie			X		
Mate van redundantie		X			
Robuustheid				X	
Aanlooptijd				X	
Informatieverwerkingstijd				X	
Interpretatie				X	
Voorspelling faalmechanisme			X		

#### Nauwkeurigheid

Gerapporteerd:

Zuid: pagina 5, minimale rekken van 0.01% kunnen worden gemeten, bij een zeer nauwkeurige ruimtelijke resolutie van 0,5m tot 1,0m.

West en oost: pagina 5, temperatuur kan op 0,1 graden nauwkeurig worden gemeten met de juiste software

Zuid: pagina 24, ook een toelichting over de nauwkeurigheid.

West en oost: pagina 18, ook een toelichting over de nauwkeurigheid.

#### Afweging en opmerkingen:

De visualisatie van de data geeft een range weer waaruit waarden tot op halve graden nauwkeurig te zien zijn, niet op 0,1 graden nauwkeurig. De nauwkeurigheid is voldoende om het temperatuurbeeld in de proefdijk goed te kunnen volgen. Overigens is temperatuur alleen gemeten in de Oost- en Westdijk. Als het gaat over de rekken, is de nauwkeurigheid voldoende.

#### Waardering:

B

#### Reikwijdte

Gerapporteerd:

Zuid: pagina 24. Een totale lengte van 660 strekkende meter is geïnstalleerd op 3 niveaus.

Oost en west: pagina 19. Een totale lengte van 220m sensoren is geïnstalleerd om de 5 parallel liggende stroken op het bodemoppervlak en op de 3 niveaus aan het benedenstroomse talud.

#### Afweging en opmerkingen:

Het is een lijnmeting. Het is een systeem wat over grote lengtes (kilometers) kan worden toegepast. Dit kan voor zowel rek als temperatuur.

#### Waardering:

C

## Metingdichtheid

### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 24. De ruimtelijke resolutie komt overeen met een meting iedere 40 cm over de optische vezel. Er zijn dus ongeveer 1600 meetwaarden per meting geregistreerd.

Oost en west: pagina 19. De ruimtelijke resolutie komt overeen met een meting iedere 40 cm over de optische vezel voor de rekmeting en een meting iedere meter voor temperatuur. Er zijn dus 500 rek meetwaarden en 220 temperatuur meetwaarden per meting geregistreerd.

### Afweging en opmerkingen:

Voldoende voor de toepassing. Doet meerdere lijnmetingen in de proefdijk op verschillende niveaus.

### Waardering:

A

## Meetfrequentie

### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 24. Een meting per uur.

Oost en west: pagina 30. Een meting per uur.

### Afweging en opmerkingen:

De meetfrequentie kan afhankelijk van de meetdoelstelling ingesteld worden. In dit geval is de frequentie wat laag gekozen. Het zou mooi zijn geweest wanneer bijvoorbeeld na de eerste zichtbare deformaties de frequentie omhoog was gegaan.

### Waardering:

C

## Mate van redundantie

### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 24. De dubbeling van de optische vezels voor rek en temperatuurmetingen biedt de mogelijkheid bij beschadiging van een van de aanwezige vezels de tweede vezel als reserve te gebruiken.

Oost en west: pagina 30.

Zuid: pagina 22. Er wordt aangegeven dat door de hoge initiële rek bij installatie 1 van de optische vezels is gebroken. De tweede optische vezel vertoonde ook aanzienlijke signaal transmissie verliezen, maar kon nog wel gebruikt worden.

Oost en west: pagina 21. Op 25 augustus is het reksignaal in de avond verloren gegaan. Dit ten gevolge van een breuk in de glasvezel door verplaatsing van het mangat waarin de optische vezels samenkomen.

### Afweging en opmerkingen:

Er is een reserve optische vezel aanwezig. Wel blijkt dat het mangat een zwakke schakel is. Hoge deformaties leiden ook tot mogelijke breuken. Omgang met back-up systemen van data is onduidelijk. Ook is er voeding nodig op locatie. Daarnaast een computer en uitleesunit. Deze uitleesunit is kostbaar en niet altijd voorhanden. Wel is het systeem meervoudig uitgevoerd.

### Waardering:

B

## Robuustheid

### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 25. Rekmeting geeft direct inzicht op de grondbewegingen. Er is geen kalibratie nodig en elektromagnetische invloed.

Oost en west: pagina 30. Lucht en watertemperaturen waren bekend en zijn nodig om de gegevens te analyseren. Idem als zuid.



*Afweging en opmerkingen:*

Er zijn een aantal breuken opgetreden gedurende en voor de proef. Indien dit het geval is, dan is een oplossing het uitgraven van de mat. Dit is niet gewenst. Verder heeft zwaar materiaal ook een forse invloed op de werking van het systeem. De flexibiliteit is niet heel groot, sensoren zitten in de ondergrond.

*Waardering:*

D

**Aanlooptijd***Gerapporteerd:*

Zuid: pagina 25. Installatie is circa een dag. Bij een dijk van enkele kilometers onder normale omstandigheden kan ongeveer een kilometer per dag geïnstalleerd worden.

Oost en west: pagina 30. Idem als zuid.

*Afweging en opmerkingen:*

Een kilometer per dag lijkt wat veel zeker wanneer het in een bestaande situatie moet worden ingegraven. Dit is best arbeidsintensief en verdient grote aandacht. Ook over het na verdichten van sleuven moet worden nagedacht. Zodra het systeem is aangesloten, wordt gelijk gemeten. De metingen zijn direct beschikbaar en hebben insteltijd nodig als het gaat om het nazakken van de sleuven waarin de mat gelegd is.

*Waardering:*

D

**Informatieverwerkingstijd***Gerapporteerd:*

Zuid: pagina 25. Gegevens zijn direct beschikbaar. Voor gegevens interpretatie is een overdrachtbestand nodig, dat kan na een uur na de meting worden gedaan. Data mapping kan binnen 3 of 4 uur na de meting plaatsvinden.

Oost en west: pagina 30. Idem.

*Afweging en opmerkingen:*

Er is nog een bewerkingsslag nodig voordat de metingen te interpreteren zijn. Presenteren van realtime data is niet mogelijk. Binnen 3 tot 4 uur na de metingen kunnen contourplots worden weergegeven wordt er gesteld.

*Waardering:*

D

**Interpretatie***Gerapporteerd:*

Zuid: pagina 8 en verder (gaat om de gepresenteerde figuren)

Oost en west: pagina 8 en verder (gaat om de gepresenteerde figuren)

*Afweging en opmerkingen:*

De contourplots geven een duidelijk beeld, wel is een goede toelichting over de assen noodzakelijk. Soms is de gebruikte legenda en zijn de kleuren daarin wat verwarrend, echter wanneer daar op gewezen wordt is het leesbaar. De plaatjes suggereren een oppervlaktescan over de hele proefdijk, echter is dit een vertaling tussen de meetpunten. Dit kan een verkeerd en ander beeld opleveren. De techniek geeft een beeld van de deformatie en temperatuur. Dit zijn belangrijke parameters wanneer het gaat over informatie rondom de sterkte van de dijk.

*Waardering:*

D

## Voorspelling faalmechanisme

### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 25 en bijlage 1.

Oost en west: pagina 30 en bijlage 1.

### Afweging en opmerkingen:

Bij de Oostdijk en Westdijk wordt alleen gefocust op piping, terwijl ook micro-instabiliteit een rol heeft gespeeld.

Gebeurtenissen zijn wel omschreven. Voor de Zuiddijk ligt de focus erg op het buitentalud, verschuift later in de tijd naar het binnentalud. De locatie van de deformatie is op 7 september voorspeld.

### Waardering:

C

### 3.3.1.2 StabiAlert

Het beoordeelde document is: "Resultaten en initiële berekeningen Sensor Validatie Test, 17 juli 2012 – 08 september 2012. Jeroen Kleef, 27 november 2012". Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering STABIALERT	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid			X		
Reikwijdte			X		
Metingdichtheid		X			
Meetfrequentie	X				
Mate van redundantie			X		
Robuustheid		X			
Aanlooptijd			X		
Informatieverwerkingstijd	X				
Interpretatie		X			
Voorspelling faalmechanisme				X	

#### Nauwkeurigheid

##### Gerapporteerd:

Pagina 5, de hoek ten opzichte van het lokaal zwaartekrachtsveld wordt 30 keer per seconde gemeten met een nauwkeurigheid van 1/24000ste graad. Bijlage 1 gaat verder in op het proces te komen tot deze nauwkeurigheid.

##### Afweging en opmerkingen:

De nauwkeurigheid is erg hoog van de techniek, wellicht hoger dan noodzakelijk. Hierbij is echter wel een grote kanttekening te plaatsen. De meetsensoren staan gemonteerd op in totaal 6 in de proefdijk gedrukte steigerpijpen (diameter 48 mm). De helling of verdraaiing wordt alleen aan de bovenzijde van de stijgerpijp gemeten waarbij wordt verondersteld dat de steigerpijp zelf niet vervormd. De steigerpijpen zijn ruim 5,6m lang waardoor de "stijfheid" van de buis relatief klein is ten opzichte van de lengte. Dit maakt dat de key assumption waarmee gesteld wordt dat de helling die bovenin gemeten wordt rechtlijnig vertaald kan worden over de steigerpijp onjuist is. De metingen worden uitgevoerd met een referentiepunt in het proefveld. Alleen de nauwkeurigheid van de sensor zegt nog niets over de nauwkeurigheid van het systeem.

##### Waardering:

C

#### Reikwijdte

##### Gerapporteerd:

Pagina 5, er is een meetraster gekozen van 6 delen samengesteld waarbij elk meetlichaam een regio van de proefdijk vertegenwoordigt.

##### Afweging en opmerkingen:

Het is een lijnmeting, waarbij goed nagedacht moet worden over de monitoringsstrategie en locatie van de plaatsing. De metingen worden uitgevoerd over een bepaalde diepte (de lengte van de steigerpijp). Daarmee kan geen specifiek gedrag worden toegekend aan afzonderlijke grondlagen. Er wordt alleen een hoekverdraaiing aan de bovenkant gemeten, met een referentiepunt in dit geval gekozen aan de onderkant van de stijgerpijp. Er is geen garantie dat dit referentiepunt ook daadwerkelijk stil ligt en dat de stijgerpijpen stijf en recht blijven (dus geen doorbuiging vertonen).

*Waardering:*

C

### Metingdichtheid

*Gerapporteerd:*

Zie pagina 5.

*Afweging en opmerkingen:*

Er wordt gemeten op 6 punten in de proefdijk. Dat de doorvertaling wordt gemaakt door StabiAlert over de diepte van de stijgerpijp, levert extra informatie op (waardoor het lijkt meerdere meetpunten te hebben bij 1 opstelling). Wanneer er wordt gekeken naar de doorvertaling die wordt gemaakt op basis van deze 6 punten, dan levert dat wel een goed beeld op van het proefverloop. Dit gaat met name over trends en niet over absolute getallen.

*Waardering:*

B

### Meetfrequentie

*Gerapporteerd:*

Pagina 6, de computers in de inclinokasten lezen de sensoren 30 keer per seconde uit. Elke 5 seconden worden zes kerngetallen over de twee richtingen van dit meetinterval opgestuurd.

*Afweging en opmerkingen:*

Voldoende en kan flexibel ingesteld worden afhankelijk van het meetdoel.

*Waardering:*

A

### Mate van redundantie

*Gerapporteerd:*

Pagina 6, de inclinokast kan de metingen van meerdere weken lokaal opslaan. Bij uitval van de verbinding met het datacentrum blijven de metingen bestaan.

*Afweging en opmerkingen:*

Wanneer een sensor echt uitvalt, ontbreekt toch een relatief groot deel van het object dat gemeten wordt. Bijvoorbeeld wanneer StabiAlert sensornummer 2 uitvalt, kan bijna geen interpretatie meer worden gegeven van de voorkant van de proefdijk. De meetsensor zit wel aan de bovenkant van de proefdijk, dus bij uitval is het relatief eenvoudig deze te herplaatsen.

*Waardering:*

C

### Robuustheid

*Gerapporteerd:*

Niet specifiek over gerapporteerd.

*Afweging en opmerkingen:*

De kracht zit erin dat je er goed bij kan omdat de sensoren bovengronds zijn geplaatst. Dit maakt het ook kwetsbaar voor vandalisme (aantasting door verkeer, dieren, mensen, storm etc.). Wel is het zo dat het een meting betreft waarin specifieke aandacht en tijd moet worden besteed om de achtergrondsituatie in kaart te brengen (trillingen, achtergrondruis, kabels en leidingen, zettingen etc.).

*Waardering:*

B

### Aanlooptijd

#### *Gerapporteerd:*

Pagina 8, om het verschil tussen natuurlijke vervorming en abnormale vervorming vast te kunnen stellen is Stabi-Alert zo vroeg mogelijk begonnen met meten. Pagina 15 geeft aan dat er geen sluitend resultaat is met betrekking tot de mate van vertraging van de natuurlijke bodemdaling. Op pagina 3 wordt aangegeven dat natuurlijke zetting een eerste orde proces is en dat de controle periode van 44 dagen te kort is geweest om de specifieke eerste orde eigenschappen van dit proces te bepalen.

#### *Afweging en opmerkingen:*

De tijdsduur die nodig is om de eerste orde eigenschappen in kaart te brengen en achtergronden te specificeren is lang. Omdat de techniek zo gevoelig is, kun je dit meten. Dit maakt wel dat bij analyse van de data, dit in kaart moet worden gebracht zodat je de inclinometingen echt kunt relateren aan de gebeurtenissen in de dijk.

#### *Waardering:*

C

### Informatieverwerkingstijd

#### *Gerapporteerd:*

Pagina 7, er is sprake van near realtime web based dashboard. Elke 5 seconden wordt de nieuwste data verstuurd naar de centrale welke deze binnen enkele tienden van seconden verwerkt en beschikbaar stelt. In dit kader is de term near realtime gebruikt.

#### *Afweging en opmerkingen:*

Voldoende en klopt.

#### *Waardering:*

A

### Interpretatie

#### *Gerapporteerd:*

Vanaf pagina 8 zijn de resultaten gepresenteerd per stap.

#### *Afweging en opmerkingen:*

De analyse die wordt uitgevoerd op de beschikbare data geeft aan dat de proefdijk beweegt en dat ook de stappen kunnen worden gevolgd. De data zegt alleen wat over de totale beweging van de proefdijk. Een directe relatie naar beweging over de diepte, verschillende grondlagen of (signalen) van faalmechanismen zijn niet direct te leggen. De figuren zijn goed te interpreteren.

#### *Waardering:*

B

### Voorspelling faalmechanisme

#### *Gerapporteerd:*

Op pagina 50 wordt ingegaan op de voorspelling. Hierin wordt aangegeven dat er beperkte kennis is door StabiAlert van de gedragingen van dijken. In bijlage 2 wordt ingegaan op hoe alarmgrenzen ingesteld kunnen worden.

#### *Afweging en opmerkingen:*

Het proefverloop kan worden gevolgd (door een analyse achteraf). Binnen dit project is niet aangetoond dat er ook een voorspellende waarde kan worden gegeven.

#### *Waardering:*

D

### 3.3.1.3 MetaSensing

Het beoordeelde document is: "IJKdijk Eindrapport AIO-SVT Westdijk experiment, MetaSensing 30-11-2012 en IJKdijk Eindrapport AIO-SVT Zuiddijk experiment, MetaSensing 30-11-2012". Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering METASENSING	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid		X			
Reikwijdte		X			
Metingdichtheid		X			
Meetfrequentie	X				
Mate van redundantie				X	
Robuustheid				X	
Aanlooptijd		X			
Informatieverwerkingstijd			X		
Interpretatie				X	
Voorspelling faalmechanisme					X

#### Nauwkeurigheid

##### Gerapporteerd:

West: pagina 4. De reflectiviteit bepaalt hoofdzakelijk de haalbare nauwkeurigheid. Met goede reflecterende objecten is een nauwkeurigheid van 0.01 mm mogelijk op korte afstanden. Voor lange afstanden (enkele honderden meters) is de maximale nauwkeurigheid ongeveer 0,1 mm en voor enkele kilometers 1 mm.

Zuid: pagina 4. Idem.

##### Afweging en opmerkingen:

De nauwkeurigheid hangt af van de reflectiviteit. Dit is wel een onzekere factor. Verder is de nauwkeurigheid die wordt gegeven voor de mate van verplaatsingen voldoende.

##### Waardering:

B

#### Reikwijdte

##### Gerapporteerd:

West: pagina 5. Een bereik voor de Westdijk van 26m en voor de Zuiddijk 50 m.

Zuid: pagina 5. Idem.

##### Afweging en opmerkingen:

Er kan een fors oppervlak in kaart worden gebracht. Het is wel zo dat daarvoor wel een open "vlakte" aanwezig moet zijn. Niet iedere locatie bij een dijk is daarvoor geschikt.

##### Waardering:

B

#### Metingdichtheid

##### Gerapporteerd:

West en Zuid: pagina 4. In de afbeelding wordt de pixel grootte weergegeven. Dit is 0,75m bij 5.4 mrad.

##### Afweging en opmerkingen:

Ruim voldoende voor het meetdoel.

*Waardering:*

B

#### Meetfrequentie

*Gerapporteerd:*

West en Zuid: pagina 4. Interval van 1 min en is verhoogd bij een kritische periode naar 12 sec.

*Afweging en opmerkingen:*

Interval is voldoende, zeker ook wanneer er tussentijds geschakeld kan worden.

*Waardering:*

A

#### Mate van redundantie

*Gerapporteerd:*

Niets over terug te vinden in de rapportage.

*Afweging en opmerkingen:*

Niet binnen dit project aangetoond. De meetopstelling, zoals de sensor, de computer en de opstelling en de rapportage geven geen beeld over het eventueel voorkomen van meerdere systeemonderdelen.

*Waardering:*

D

#### Robuustheid

*Gerapporteerd:*

Zuid: pagina 4, 6 en 7 en west pagina 4, 6, 7 en 8. Ruis van de omgeving, de atmosfeer, de wind en regen is van invloed op de meting. Veranderingen in de luchtvochtigheid hebben invloed op de microgolven. Gras bedekte hellingen zijn ook moeilijke situaties voor radar instrumenten. Vegetatie bewegend in de wind ook. De meetopstelling is ook erg kwetsbaar. Het moet een vaste opstelling zijn (nu opgelost met betonblokken). Daarnaast moet het een beschermde locatie zijn met name voor regen. Metingen werden tijdelijk verstoord door kranen. Vanwege de reflectie veroorzaakt dit ruis.

*Afweging en opmerkingen:*

Veel externe factoren zijn van invloed op het meetsysteem.

*Waardering:*

D

#### Aanlooptijd

*Gerapporteerd:*

Niets over terug te vinden in de rapportage.

*Afweging en opmerkingen:*

Indien noodzakelijk moeten vaste prisma's op de dijk worden gezet. De metingen zelf hebben geen kalibratietijd nodig. De installatietijd is ook niet groot (orde dag).

*Waardering:*

B



## Informatieverwerkingstijd

### Gerapporteerd:

West en zuid: pagina 15. Tijdens het experiment werden de meetresultaten in bijna realtime geproduceerd. Quasi realtime werden de beelden in een duidelijk leesbaar formaat geproduceerd.

### Afweging en opmerkingen:

De data vereist een behoorlijke bewerkingsslag voordat het interpreteerbaar wordt. Onduidelijk is of de plaatjes ingezoomd op de pixels quasi realtime kunnen worden geïnterpreteerd.

### Waardering:

C

## Interpretatie

### Gerapporteerd:

West: de figuren vanaf pagina 10.

Zuid: de figuren vanaf pagina 9.

### Afweging en opmerkingen:

De visualisaties zijn goed leesbaar. Vooral het kunnen inzoomen op de pixels en het aangeven van bewegingsnelheid is relevant. Deze techniek zegt alleen iets over verplaatsingen in absolute zin. De richting van de verplaatsing wordt niet weergegeven. Verplaatsing geeft natuurlijk wel enige informatie over de sterkte en het gedrag van de dijk, alleen dit is wel gericht op het oppervlakte aan de buitenkant. De deformaties van MetaSensing aan de westkant van de Zuiddijk kunnen niet verklaard worden met de referentiemonitoring.

### Waardering:

D

## Voorspelling faalmechanisme

### Gerapporteerd:

Er zijn geen voorspellingen ingediend.

### Afweging en opmerkingen:

Een voorspellende waarde is niet binnen dit project aangetoond. Tevens is de inschatting, gezien de resultaten en analyse achteraf, dat deze er niet is voor de betreffende techniek.

### Waardering:

E

### 3.3.1.4 Koenders

De beoordeelde documenten zijn "Evaluatie rapport All in One Sensor validatie Test, Oost en Westdijk, V\_1.3\_30-11-2012", "Evaluatie rapport All in One Sensor validatie Test, Zuiddijk, V\_1.2\_15102012", "Evaluatie rapport All in One Sensor validatie Test, Oost en Westdijk, V\_1.4\_21122012" en "Evaluatie rapport All in One Sensor validatie Test, Zuiddijk, V\_1.4\_21122012".

De informatie onder de kopjes gerapporteerd bij de toelichting verwijzen naar de paginanummering van versie 1.2 en 1.3. De afweging en opmerkingen zijn wel aangepast naar aanleiding van de versies 1.4 en zijn dus gebaseerd op de laatste rapportage.

Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering KOENDERS	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid			X		
Reikwijdte			X		
Metingdichtheid		X			
Meetfrequentie		X			
Mate van redundantie				X	
Robuustheid			X		
Aanlooptijd			X		
Informatieverwerkingstijd		X			
Interpretatie				X	
Voorspelling faalmechanisme					X

#### Nauwkeurigheid

##### Gerapporteerd:

Zuid, oost en west: pagina 3,4 en 5. De instrumenten zijn na een handboring in het boorgat geplaatst. De temperatuur via de glasvezel is +/- 1 %, de rek via glasvezel +/- 0.5%.

##### Afweging en opmerkingen:

Temperatuur is lastig in te schatten, er wordt over een percentage gepraat. Doorgaans wordt dit in graden uitgedrukt. Voor wat betreft de rek is dit onnauwkeuriger als andere al bestaande systemen die rek meten.

##### Waardering:

C

#### Reikwijdte

##### Gerapporteerd:

Oost, west en zuid, pagina 3 en 4. De SDT kan zowel horizontaal als verticaal worden ingebracht. De figuur geeft de opbouw van de module weer.

##### Afweging en opmerkingen:

Het is een glasvezeltechniek die gecombineerd kan worden met puntmetingen. Je kunt wel meerdere punten meten over de diepte en dus ook in de verschillende grondlagen. Het is een lijnmeting.

##### Waardering:

C

### Metingdichtheid

#### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 6. Er worden op 6 dieptes de parameters rek en temperatuur gemeten. Voor de horizontale streng geldt dat er 30 sensormodules gemeten worden.

Oost en west: pagina 6. Er worden over 6 punten de parameters rek en temperatuur gemeten.

#### Afweging en opmerkingen:

Voldoende voor het meetdoel.

#### Waardering:

B

### Meetfrequentie

#### Gerapporteerd:

Zuid, oost en west: pagina 5. De sensoren zijn ontworpen om statisch te meten (meetinterval tussen 1 minuut tot 1/24 uur).

#### Afweging en opmerkingen:

Voldoende voor het meetdoel.

#### Waardering:

B

### Mate van redundantie

#### Gerapporteerd:

Zuid, oost en west: pagina 4 en 7. Twee verschillende meetprincipes die onafhankelijk naast elkaar opereren ontstaat redundantie. Onder de \* staat de uitval van de instrumenten genoemd.

#### Afweging en opmerkingen:

De uitval van data is groot met name in de Zuidijk. Soms komt het door een breuk in de koppeling, zo wordt gesteld. Het is een systeem dat in de ondergrond wordt geplaatst, dus niet makkelijk te vervangen.

#### Waardering:

D

### Robuustheid

#### Gerapporteerd:

Niet specifiek gerapporteerd.

#### Afweging en opmerkingen:

Het is een techniek die in de dijk zelf wordt ingebracht. De inbrengmethode, afhangen in een voorgeboord gat, is van invloed op de meetresultaten. Dat maakt de flexibiliteit klein. Het is wel zo dat veranderingen in de omgeving weinig invloed hebben op de techniek. Er zijn verder weinig veranderingen in de omgeving, die schade of verlies van waarde kunnen veroorzaken. Er is stroom nodig en er wordt niet ingegaan op back-up systemen.

#### Waardering:

C

### Aanlooptijd

#### Gerapporteerd:

Niet specifiek gerapporteerd.

*Afweging en opmerkingen:*

Er is geen kalibratietijd nodig. De installatietijd hangt af van de diepte van plaatsing. Voor het aanbrengen van het systeem horizontaal wordt een langere installatietijd verwacht.

*Waardering:*

C

*Informatieverwerkingstijd**Gerapporteerd:*

Niet specifiek gerapporteerd.

*Afweging en opmerkingen:*

Data is met een korte vertraging van enkele minuten beschikbaar gesteld tijdens de proeven.

*Waardering:*

B

*Interpretatie**Gerapporteerd:*

Zuid: de grafieken resultaten gepresenteerd vanaf bladzijde 9.

Oost en west: de grafieken vanaf pagina 8.

*Afweging en opmerkingen:*

De analyse die is uitgevoerd op de data is matig. De voorbeeldfiguur gepresenteerd op pagina 9 van zuid is een figuur die je gepresenteerd wilt zien met echte gemeten data. Tijdens dit experiment is geen gebruik gemaakt van alle functionaliteiten van het instrument, alleen temperatuur en rek. Er wordt gesteld (pagina 15, oost en west) dat binnen 3 uur na de gebeurtenis de probes reageren op externe activiteiten (dat is laat). Daarnaast laten de grafieken zien dat de rek/compressie vergelijking niet altijd opgaat en klopt. Details van gebeurtenissen zijn niet weergegeven. In potentie geven alle parameters gezamenlijk een mooi beeld van de sterkte van de dijk, om bovengenoemde redenen is dit niet concreet aangetoond.

*Waardering:*

D

*Voorspelling faalmechanisme**Gerapporteerd:*

Oost en west: pagina 16, zuid pagina 21. Er zijn geen voorspellingen ingediend.

*Afweging en opmerkingen:*

Binnen dit project is dit niet aangetoond. Wel is het zo dat in potentie wel veel informatie kan worden verschaft over verschillende faalmechanismen (omdat alle parameters gezamenlijk een mooi beeld van de sterkte van de dijk kunnen weergeven). Echter, zoals onder interpretatie al is aangegeven, geeft de data op dit moment onvoldoende houvast.

*Waardering:*

E

### 3.3.1.5 ITC

Het beoordeelde document is: "IJKdijk all in one sensorvalidatietest, weerstandsmetingen op de Oostdijk ITC". Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering ITC	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid			X		
Reikwijdte			X		
Metingdichtheid		X			
Meetfrequentie			X		
Mate van redundantie				X	
Robuustheid					X
Aanlooptijd		X			
Informatieverwerkingstijd				X	
Interpretatie		X			
Voorspelling faalmechanisme				X	

#### Nauwkeurigheid

*Gerapporteerd:*

Pagina 6, de relatieve standaarddeviatie varieerde van 1,75 tot 10,90 % van het gemiddelde. Pagina 16, er is geen standaard voor wat een acceptabele variatie is in weerstandswaarden. Wel kan de variatie in de nulsituatie meege-  
nomen worden in een betrouwbaarheidsanalyse van de proefresultaten.

*Afweging en opmerkingen:*

De techniek zet niet in op absolute waarden, maar op veranderingen in de tijd. In dat licht is de nauwkeurigheid voldoende en gaat het met name om zichtbare trends. Het is inderdaad lastig te duiden wat een acceptabele waarde is. De hoogste standaard deviatie is gemeten aan de randen. Dat kan te maken hebben met de proefopzet, in de praktijk zal dit niet zo zijn.

*Waardering:*

C

#### Reikwijdte

*Gerapporteerd:*

Pagina 2, de elektroden zijn via kabels met de STING verbonden. Ze zijn gemonteerd op metalen pinnen die ongeveer 20 cm in de proefdijk gestoken zijn. Pagina 3, 14 elektroden met een onderlinge afstand van 1,5m bereiken theoretisch een maximale diepte van 4,14m. De afstand tussen de elektroden bedroeg 1,5m.

*Afweging en opmerkingen:*

Het betreft een lijnmeting (meerdere elektrodes nodig voor een meting op 1 punt). Vooraf moet goed worden nagedacht over de monitoringsstrategie en locatie van de plaatsing. Over de diepte hebben de elektroden een goed bereik in dit geval. Er moeten in dit geval 2 raaien van 14 elektroden ingezet worden om over een relatief kleine oppervlakte (niet de diepte maar lengte keer breedte) een beeld te krijgen.

*Waardering:*

C

#### Metingdichtheid

*Gerapporteerd:*

Zie onder reikwijdte.

*Afweging en opmerkingen:*

Het is een lijnmeting (wel meerdere elektrodes nodig voor een meting op 1 punt). Metingdichtheid is goed gekozen t.a.v. de meetstrategie.

*Waardering:*

B

**Meetfrequentie**

*Gerapporteerd:*

Pagina 2, er zijn 2 rijen van 14 elektroden geplaatst. Bij 14 elektroden (1 rij) duurde 1 meting 37 minuten, waardoor ieder uur een nieuwe meting gedaan kon worden.

*Afweging en opmerkingen:*

De duur van de metingen is lang en afhankelijk van het aantal elektroden. Ieder uur een nieuwe meting kan, maar tijdens calamiteitensituaties zijn wellicht meer metingen nodig en dus een hogere meetfrequentie.

*Waardering:*

C

**Mate van redundantie**

*Gerapporteerd:*

Pagina 4, gedurende de proef is op 24 en 25 augustus niet gemeten vanwege een probleem met de batterij. Pagina 5, de zwakke schakel in de meetopstelling bleek de laptop en de batterijconnectors te zijn. Pagina 3, er is een acculader aanwezig (voor het geval de elektriciteit zou uitvallen).

*Afweging en opmerkingen:*

Er is wel veel uitval van meetdata geweest, door de gerapporteerde oorzaken.

*Waardering:*

D

**Robuustheid**

*Gerapporteerd:*

Pagina 4, op 16, 17 en 19 augustus waren er problemen met oververhitting van de apparatuur vanwege de warmte die dagen. Pagina 3, de metalen dozen stonden onder een parasol en zijn afgedekt met wit plastic om de hitte en regen buiten te houden. Pagina 2, de elektroden zijn via kabels met de STING verbonden. Ze zijn gemonteerd op metalen pinnen die ongeveer 20 cm in de proefdijk gestoken zijn. Op pagina 16 worden een aantal mogelijke oorzaken genoemd van variaties in de metingen, zoals geen optimaal contact tussen de elektroden bijvoorbeeld door droogte, groeiende vegetatie op de dijk.

*Afweging en opmerkingen:*

Het bovenstaande gerapporteerde wordt beaamd. De kabels liggen over het oppervlakte van de dijk, en zijn erg gevoelig voor vandalisme, schade door dieren, etc.

*Waardering:*

E

**Aanlooptijd**

*Gerapporteerd:*

Er dient een nulmeting uitgevoerd te worden, pagina 4. Pagina 3, afgezien van het installeren van de elektroden, wat ongeveer een uur kostte, heeft het instrument geen aanlooptijd. De metingen kunnen direct beginnen na installatie.

*Afweging en opmerkingen:*

De plaatsing van de instrumenten is erg snel mogelijk. Er dient wel een nulmeting te worden uitgevoerd, maar dat kan eenvoudig en snel.

*Waardering:*

B

**Informatieverwerkingstijd**

*Gerapporteerd:*

Pagina 3, de output van het instrument is een tekstbestand met voor iedere combinatie van elektroden een weerstandsmeting. Om van dit bestand een dwarsdoorsnede van de dijk te maken, moet eerst een inversie gemaakt worden. Dit kost een paar minuten per meting, afhankelijk van hoeveel elektroden geïnstalleerd zijn. Dit werd eenmaal per dag gedaan van de tot dan toe verzamelde data.

*Afweging en opmerkingen:*

Eenmaal per dag zijn interpreteerbare metingen doorgegeven. De data heeft nog een vertaalslag nodig.

*Waardering:*

D

**Interpretatie**

*Gerapporteerd:*

Pagina 7, de gepresenteerde figuren en resultaten.

*Afweging en opmerkingen:*

De afbeeldingen geven een goed interpreteerbaar overzicht. De resultaten en conclusies die worden gegeven zijn bruikbaar en kloppen. Helaas is een deel van de data niet beschikbaar. Een weerstandsprofiel (doorvertaald naar een vochtprofiel) van de dijk niet alleen van het oppervlakte, maar ook over de diepte is erg zinvol en te relateren aan de sterkte van de dijk. Zwakke plekken kunnen worden geïdentificeerd. Daarnaast is het een parameter dat voor diverse faalmechanismen zinvolle informatie oplevert. Meerdere beelden zijn nodig om veranderingen te kunnen waarnemen.

*Waardering:*

B

**Voorspelling faalmechanisme**

*Gerapporteerd:*

Pagina 21, of deze veranderingen ook leiden tot een dijkdoorbraak kan op basis van de informatie die nu beschikbaar is niet gezegd worden.

*Afweging en opmerkingen:*

Er zijn geen voorspellingen ingediend. Het proefverloop kan worden gevolgd (door een analyse achteraf). Binnen dit project is niet aangetoond dat er ook een voorspellende waarde kan worden gegeven.

*Waardering:*

D



### 3.3.1.6 InTech

Het beoordeelde document is: "AIO SVT, West en Oostdijk, Intech dike security systems, versie v02 d.d. 30 november 2012 en AIO SVT, Zuiddijk, Intech dike security systems, versie v02 d.d. 30 november 2012". Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering INTECH	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid		X			
Reikwijdte		X			
Metingdichtheid		X			
Meetfrequentie	X				
Mate van redundantie	X				
Robuustheid		X			
Aanlooptijd	X				
Informatieverwerkingstijd			X		
Interpretatie			X		
Voorspelling faalmechanisme					X

#### Nauwkeurigheid

*Gerapporteerd:*

West en oost: pagina 4. De tabel geeft de nauwkeurigheid van de camera's weer.

Zuid: pagina 4. De tabel geeft de nauwkeurigheid van de gebruikte camera weer.

*Afweging en opmerkingen:*

De nauwkeurigheid en resolutie zijn voldoende, zeker voor wat betreft het meetdoel en de parameter die wordt gemeten.

*Waardering:*

B

#### Reikwijdte

*Gerapporteerd:*

Hier wordt niet direct op ingegaan in de rapportages.

*Afweging en opmerkingen:*

Het is een mobiele opstelling, die een fors dijkoppervlak in kaart kan brengen. Het is wel zo dat daarvoor wel een open "vlakke" aanwezig moet zijn. Niet iedere locatie bij een dijk is daarvoor geschikt.

*Waardering:*

B

#### Metingdichtheid

*Gerapporteerd:*

West, oost en zuid: pagina 4 en 5. Daar is de resolutie in de tabel gerapporteerd.

*Afweging en opmerkingen:*

Voldoende voor het meetdoel.

*Waardering:*

B

### Meetfrequentie

#### Gerapporteerd:

Oost en west: pagina 5. Er is 1 meting per minuut uitgevoerd en gedurende het experiment is de frequentie opgevoerd naar 1 meting per seconde.

Zuid: pagina 5. De frequentie van de metingen is tijdens de experimenten verhoogd van 1 meting per minuut tot 6 metingen per minuut in de laatste perioden van het experiment.

#### Afweging en opmerkingen:

Frequentie is voldoende en goed dat het in de loop van het experiment aangepast is.

#### Waardering:

A

### Mate van redundantie

#### Gerapporteerd:

Oost, west en zuid: pagina 5. Ondanks de stroomuitval op locatie heeft de ingebouwde noodstroom voorziening de stroom voor het meetstelsel overgenomen.

#### Afweging en opmerkingen:

Het betreft een techniek die self supporting is. Stroom, camera's data opslag etc. gebeurt in de wagen. De camera is dubbel uitgevoerd en er zijn back-up mogelijkheden van de data.

#### Waardering:

A

### Robuustheid

#### Gerapporteerd:

West en oost: pagina 4. Het is een mobiele meetopstelling. Het voertuig is verder voorzien van een stabiliteitssysteem en eigen stroomvoorziening.

Zuid: pagina 5, de infrarood sensor is iets verschoven ten opzichte van de lens, waardoor de rechterzijde van de beelden minder scherp is.

#### Afweging en opmerkingen:

Het is een mobiele opstelling die snel en gemakkelijk kan worden verplaatst. Bovendien is er een stabiliteitssysteem aanwezig dat zorgt voor een stabiel systeem. Weersomstandigheden zijn wel degelijk van invloed, met name mist. Wel dient er altijd een juiste locatie gevonden te worden om het meetvak goed in kaart te kunnen brengen. Dit moet een veilige locatie zijn, zeker tijdens calamiteitsituaties.

#### Waardering:

B

### Aanlooptijd

#### Gerapporteerd:

Hier wordt niet specifiek op ingegaan in de rapportages

#### Afweging en opmerkingen:

Het is een mobiele opstelling die zelfvoorzienend is. Bovendien kan er gelijk gemeten worden, en hoeft het systeem niet eerst in te stellen.

#### Waardering:

A

### Informatieverwerkingstijd

#### *Gerapporteerd:*

West en oost: pagina 4. De data is realtime verwerkbaar door een draadloos communicatiesysteem. Op pagina 5 staat aangegeven dat na afloop van ieder experiment de meetdata bewerkt is middels speciale software om het faalmechanisme beter te kunnen visualiseren en herkennen.

#### *Afweging en opmerkingen:*

Ondanks dat er gesteld wordt dat het een realtime systeem betreft, is er wel een bewerkingslag nodig om het faalmechanisme beter in kaart te brengen.

#### *Waardering:*

C

### Interpretatie

#### *Gerapporteerd:*

West en oost: pagina 11. Er wordt gesteld dat op basis van temperatuursverandering de uittredende stroomsnelheid nauwkeurig kan worden bepaald. Voor beide rapportages worden bij de resultaten en de analyse de resultaten gepresenteerd in afbeeldingen.

#### *Afweging en opmerkingen:*

De afbeeldingen zijn eenvoudig te lezen, de grafiekjes van de temperatuur onderaan de teen zijn een goede toevoeging. Het beeld geeft een mooie weergave van de temperatuur (en daarmee het verdrogen en/of vernatten) van de buitenkant van de proefdijk. Echter, details van de faalmechanismen kunnen niet helemaal worden gezien. Zo kunnen wel wellen in beeld worden gebracht, maar niet het onderscheidt worden gemaakt tussen watervoerend of zandmeevoerend. De vraag is in hoeverre dit systeem cruciale signalen opmerkt die niet met visuele inspecties ook zouden worden gezien.

#### *Waardering:*

C

### Voorspelling faalmechanisme

#### *Gerapporteerd:*

Zuid: pagina 9. Een nauwkeurige voorspelling van een doorbraak op macro-instabiliteit kan op basis van deze remote sensing methode nog niet. Pagina 10, voor de Zuiddijk is geen betrouwbare voorspelling gedaan.

Oost en west: pagina 12. Voor de oostdijk is enkel een informele voorspelling gedaan. Alleen officiële ingediende voorspellingen worden meegewogen. Voor de Westdijk zijn wel voorspellingen ingediend, zie ook de bijlage.

#### *Afweging en opmerkingen:*

Voor piping is er enig voorspellend vermogen, maar moet de kracht nog altijd gevonden worden door deze techniek in te zetten met andere technieken. Voor de overige faalmechanismen die zijn getest (met name macro-instabiliteit) heeft deze techniek geen voorspellende waarde, zoals door InTech zelf ook wordt aangegeven.

#### *Waardering:*

E

### 3.3.1.7 Empec

Het beoordeelde document is: "Grond Radar Onderzoek, All In One validatie onderzoek IJkdijk, Sectie A, B en C, Datum 28 november 2012". Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering EMPEC	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid			X		
Reikwijdte		X			
Metingdichtheid		X			
Meetfrequentie			X		
Mate van redundantie				X	
Robuustheid		X			
Aanlooptijd		X			
Informatieverwerkingstijd				X	
Interpretatie				X	
Voorspelling faalmechanisme				X	

#### Nauwkeurigheid

##### Gerapporteerd:

Pagina 8 en 9 deel A. Bij natte klei en lagen met een hoog zoutgehalte geeft de grootste beperkingen voor het gebruik van de grondradar. Als twee materialen eenzelfde constante hebben kan dat niet worden waargenomen. Pagina 6 deel B staat dat de grondsnelheid gedurende de proef afliep.

##### Afweging en opmerkingen:

De nauwkeurigheid van het systeem wordt afgeijkt op de grondsnelheid. De verschillende parameters die van invloed zijn op de nauwkeurigheid van het systeem zijn heel duidelijk benoemd. De nauwkeurigheid van de grondsnelheid wordt bepaald met een methode +/- 2%. De grondsnelheid is deels gebaseerd op ervaring en empirie en is af te ijken op harde reflectoren.

##### Waardering:

C

#### Reikwijdte

##### Gerapporteerd:

Op pagina 5 deel A. De penetratie diepte is voldoende gebleken op de testlocatie. Bij dijken met een andere opbouw kan de penetratie diepte, zelfs bij gebruik van een 100Mhz radar, onvoldoende blijken vanwege klei. Metingen zijn uitsluitend op de kruin uitgevoerd in verband met de beperkingen van de testopstelling. Pagina 9 deel B. Grondstructuren kunnen tot ongeveer 10m diepte gezien worden.

##### Afweging en opmerkingen:

De reikwijdte is wel erg afhankelijk van de grondopbouw. Bij natte klei en lagen met een hoog zoutgehalte geeft de grootste beperkingen voor het gebruik van de grondradar. Bij de proef is aangetoond dat door de aanwezige klei laag geen beperkingen zijn opgetreden. De metingen geven een continu beeld tweedimensionaal.

##### Waardering:

B

### Metingdichtheid

#### Gerapporteerd:

Door de radar over de kruin te trekken in dit geval met een snelheid van 3 km/uur wordt een continu beeld van de ondergrond gevormd over een strookbreedte gelijk aan het wagentje. Het continue radar reflectie beeld geeft een dwarsdoorsnede van de dijk tot een diepte van in dit geval 10m.

#### Afweging en opmerkingen:

Het is een continu beeld dat wordt weergegeven.

#### Waardering:

B

### Meetfrequentie

#### Gerapporteerd:

Pagina 5 deel A. metingen zijn telkens verricht vlak voordat het waterniveau in het bassin werd verhoogd naar een volgend niveau.

#### Afweging en opmerkingen:

De meting geeft een continu beeld als het gaat om de lengterichting, maar een discontinu beeld in de tijd (momentopname). De metingen worden niet continu in de tijd uitgevoerd maar per meetronde die min of meer handmatig wordt uitgevoerd door de radar over de dijk heen te rijden.

#### Waardering:

C

### Mate van redundantie

#### Gerapporteerd:

Pagina 6 deel A. Hierin wordt aangegeven dat Empec een integraal systeem heeft ontwikkeld. Pagina 4 deel A wordt gesteld dat gegevens direct worden opgeslagen op de datalogger. Er kan gemeten worden met verschillende frequenties. Deze kunnen afzonderlijk worden toegepast.

#### Afweging en opmerkingen:

Het systeem is enkelvoudig uitgevoerd. In de proef is alleen de grondradar getest. Het integrale systeem biedt wel mogelijkheden.

#### Waardering:

D

### Robuustheid

#### Gerapporteerd:

Pagina 6, deel A. Het systeem is mobiel en kan met relatief grote snelheid over een dijk worden verplaatst.

#### Afweging en opmerkingen:

Er kan snel geschakeld worden wanneer de situatie dat verlangt. Het is een mobiel in te zetten techniek, waarbij de dijk wel fysiek moet worden betreden. Wanneer er een veiligheidsrisico dreigt, is de toegepaste techniek niet meer inzetbaar. Metingen vinden bovengronds plaats. Metingen bij de teen en het talud bleken tijdens het experiment niet mogelijk, vanwege de begaanbaarheid.

#### Waardering:

B

### Aanlooptijd

#### Gerapporteerd:

Pagina 6 deel A. De aanlooptijd, de opbouw, kalibratie van het systeem op de IJkdijk bedroeg ongeveer 20 tot 30 minuten. De resultaten van de meting zijn na ongeveer 20 minuten beschikbaar. Zie pagina 4 deel A.

#### Afweging en opmerkingen:

De meettechniek is zeer flexibel. Er hoeft niets in de dijk te worden geplaatst. Ook heeft de techniek geen grote instelperiode nodig. Referentieonderzoek is noodzakelijk om de grondsnelheid te bepalen, maar dit kan ook achteraf. Belangrijk wel is om de referentiemeting te hebben t.a.v. de analyse, zonder die meting wordt de insteltijd niet gehaald en is interpretatie moeilijk.

#### Waardering:

B

### Informatieverwerkingstijd

#### Gerapporteerd:

Pagina 4 deel A en pagina 5 deel B. De resultaten van de meting zijn na ongeveer 20 minuten beschikbaar. De duur van de analyse is onafhankelijk van de lengte van de metingen. De eerste analyse wordt tijdens de meting zelf uitgevoerd. Dit geeft direct resultaat, zonder dat er filters zijn toegepast. Tijdens de metingen bleek dat het moeilijk was een uitspraak te doen naar aanleiding van de ruwe data.

#### Afweging en opmerkingen:

De data worden niet realtime gepresenteerd. Er is nog een bewerkingslag over de data nodig.

#### Waardering:

D

### Interpretatie

#### Gerapporteerd:

Deel B van de rapportage geeft de figuren weer van de resultaten van de metingen.

#### Afweging en opmerkingen:

De zwart wit figuren zijn lastig te interpreteren, de kleurenfiguren geven een duidelijker beeld. Soms is het lastig te achterhalen wanneer bepaalde beelden of trends wel als wellen worden gemarkeerd, en wanneer niet. Dit is onduidelijk en cruciaal. De afbeeldingen geven wel een duidelijke weergave over de diepte en lengterichting van de dijk. Ook zijn veranderingen in de tijd waarneembaar.

#### Waardering:

D

### Voorspelling faalmechanisme

#### Gerapporteerd:

In deel C hoofdstuk 1 geeft Empec aan dat het geven van een voorspelling een pure gok was omdat de kennis omtrent geotechniek, faalmechanisme en relatie tussen metingen en falen ontbreekt. De voorspellingen van de watervoerende wellen zijn in hun oordeel redelijk correct gebleken (deel C hoofdstuk 1.1).

#### Afweging en opmerkingen:

De techniek is ingezet op de kruin van de proefdijk waarbij is gemeten tot en met 23 augustus 2012. Op dit tijdstip waren over beide bakken 12 wellen zichtbaar. Dit waren nog watervoerende wellen die nog geen zand meenamen. Van deze 12 wellen waren 7 stofwolkjes van zand zichtbaar en 5 wellen met alleen opwellend water. In geen van de wellen is op dat moment al zandtransport waargenomen. Deze signalen passen bij het beginstadium van piping. Eigenlijk is dit stap 0 in het pipingproces, de kanaaltjes groeien nog niet terug vanaf de binnenteen naar de buiten-

teen. De signalen manifesteren zich eigenlijk alleen aan de teen van de dijk in de vorm van een zichtbare opkomende kwelstroom.

Uit alle pipingproeven die zijn uitgevoerd op small, mediumscale en full-scale worden op dat moment nog geen veranderingen waargenomen anders dan in de teen van de dijk. Midden onder de dijk, zoals hier bij de kruin gebeurt dan nog niks met het zand. Het korrelcontact is op die locatie onder de dijk nog volledig intact.

Vanuit de pipingtheorie is deze zeer vroege detectie van signalen niet goed te verklaren. Feit is wel dat er duidelijk veranderingen in de tijd worden waargenomen op de aansluiting van de kleidijk op de zandlaag. Er wordt onderstreept dat het geen voorspellende waarde heeft, voor de interpretatie naderhand gelden de eerder genoemde opmerkingen.

*Waardering:*

D



### 3.3.1.8 Volker Wessels Telecom en Landustrie

Het beoordeelde document is: "Resultaten DMC-systeem in AIO experiment 2012 Westdijk, auteur Harry Bos 5-10-2012". Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering DMC	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid		X			
Reikwijdte				X	
Metingdichtheid				X	
Meetfrequentie	X				
Mate van redundantie			X		
Robuustheid	X				
Aanlooptijd					X
Informatieverwerkingstijd	X				
Interpretatie			X		
Voorspelling faalmechanisme	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
Effectiviteit maatregel	X				

#### Nauwkeurigheid

Gerapporteerd:

Pagina 5, nauwkeurigheid van de druksensor is 0.05%. Pagina 6, nauwkeurigheid van de temperatuursensor is 0.1 graden Celsius.

Afweging en opmerkingen:

Voldoende voor het meetdoel.

Waardering:

B

#### Reikwijdte

Gerapporteerd:

Pagina 7, het DMC-systeem meet waterspanningen en temperatuur op 1 punt in een horizontale filterbuis in de dijk.

Afweging en opmerkingen:

Het is een puntmeting. Omdat het een open buis is, is een puntmeting voldoende. Het doel van het systeem is als maatregel ingezet te worden voor het voorkomen van faalmechanismen, waarbij monitoring een onderdeel is. Het hoofddoel van de DMC-buis is dus niet het monitoren van de dijk maar conditioneren. Daar is de meting voldoende voor. Wanneer de maatregel zou worden ingezet, dient er wel aanvullende monitoring plaats te vinden in de dijk.

Waardering:

D

#### Metingdichtheid

Gerapporteerd:

Idem als reikwijdte.

Afweging en opmerkingen:

Het is een puntmeting waarbij binnen 1 sensor 1 meting wordt uitgevoerd (wel voor verschillende parameters). Voor elke meettechniek die bestaat uit een puntmeting is de metingdichtheid gelijk aan de reikwijdte.

*Waardering:*

D

#### Meetfrequentie

*Gerapporteerd:*

Pagina 7, het is mogelijk om 1 meting per 2 seconde te doen. In dit experiment is de dataverwerking op 1 keer per 5 minuten weergegeven.

*Afweging en opmerkingen:*

Voldoende, het kan ook tussentijds worden bijgesteld.

*Waardering:*

A

#### Mate van redundantie

*Gerapporteerd:*

Het gehele systeem is enkelvoudig uitgevoerd (zie pagina 51 van de analyse). Tevens wordt op pagina 52 aangegeven als maatregel ter verbetering dat delen redundant uitgevoerd kunnen worden. Op pagina 9 wordt gesteld dat het systeem niet redundant is uitgevoerd (ook de metingen zijn enkelvoudig)

*Afweging en opmerkingen:*

Het systeem is enkelvoudig uitgevoerd met back-up mogelijkheid van data.

*Waardering:*

C

#### Robuustheid

*Gerapporteerd:*

Op pagina 51 in de bijlage, de faalkansanalyse, wordt uitgebreid ingegaan op dit punt. Een UPS is ingezet als maatregelen bij uitvallen van elektriciteit. Daarnaast zijn maatregelen opgenomen t.a.v. schade door aanrijding, diefstal en vandalisme. Op pagina 8 wordt ingegaan op het gebruikte materiaal. Pagina 9, er is een droogloopbeveiliging van de pomp opgenomen. De mechanische robuustheid van de sensor wordt verzekerd door een roestvrije beschermhuls. Daarnaast in het systeem ongevoelig voor straling, interferentie en inductie door bijvoorbeeld bliksem.

*Afweging en opmerkingen:*

Er zijn goede keuzes gemaakt ten aanzien van dit punt. Op alle onderdelen van het systeem is nagedacht over de robuustheid. Dit is zo belangrijk omdat het niet alleen een monitoringssysteem betreft, maar ook een maatregel/conditioneringssysteem.

*Waardering:*

A

#### Aanlooptijd

*Gerapporteerd:*

Pagina 11, het aanbrengen van een 150m DMC-systeem neemt ongeveer 5 werkdagen in beslag. Daarna kost en nog c.a. 5 dagen voor het afmonteren en in bedrijfsstelling. De metingen kunnen na installatie direct verricht (eerst moet wel de buis volstromen) worden en hebben een kleine kalibratietijd nodig.

*Afweging en opmerkingen:*

Wanneer er wordt gekeken naar de plaatsingstijd van de maatregel dan kan het systeem binnen een behoorlijke tijd operationeel worden gemaakt. Na het operationeel maken van de maatregel moet alleen de buis vollopen om

vervolgens te kunnen meten. Het is niet een systeem dat gedurende calamiteiten situaties snel ingezet kan worden / operationeel kan worden gemaakt.

*Waardering:*  
E

#### Informatieverwerkingstijd

*Gerapporteerd:*

Op pagina 4, het DMC-systeem zorgt voor realtime monitoring.

*Afweging en opmerkingen:*  
Realtime, voldoende.

*Waardering:*  
A

#### Interpretatie

*Gerapporteerd:*

Vanaf pagina 17 worden de grafieken getoond. Op pagina 11 wordt aangegeven dat middels een computer, tablet, mobiele telefoon het systeem kan worden bediend en uitgelezen.

*Afweging en opmerkingen:*

De data kan heel eenvoudig worden uitgelezen en is erg flexibel uitleesbaar. Zaken als (open)stand van kleppen, temperatuur en drukmetingen worden weergegeven. De gegevens zijn makkelijk uitleesbaar en de data worden eenvoudig aangeboden. Wanneer er wordt gekeken naar de monitoringskant van het systeem, dan geven de parameters informatie over de sterkte. Echter, moet bij toepassing van het systeem wel nog extra monitoring geplaatst worden om beslissingen te kunnen nemen ten aanzien van het wel en niet openzetten van de buis en de invloed daarvan op de sterkte. En het is een puntmeting. Heterogeniteit in de ondergrond is lastig weer te geven omdat gemeten wordt in een open buis.

*Waardering:*  
C

#### Voorspelling faalmechanisme

*Gerapporteerd:*

Pagina 12. Het DMC-systeem is niet ontwikkeld om het moment van falen te voorspellen. Het systeem treedt eerder in werking. Het moment waarop het systeem in werking treedt is op voorhand bepaald aan de hand van rekenmodellen op vastgesteld aan de hand van een monitoringsperiode.

*Afweging en opmerkingen:*

Omdat dit een maatregel betreft en geen voorspelsysteem, is dit een criterium waarop dit systeem niet beoordeeld dient te worden. Daarom is er een extra criteria toegevoegd, te weten effectiviteit van de maatregel. Er is aangetoond dat de maatregel inderdaad in staat is waterspanningen te verlagen in de proefdijk en deze stabiel te houden. De maatregel op een juiste manier ingezet. De freatische lijn kan worden gecontroleerd door middel van het systeem. Er moet wel in gedachte worden gehouden dat dit een relatief homogene situatie betreft en dat de praktijk weerbarstiger is. Het is een maatregel die op deze manier ingezet kan worden voor piping, micro- en macro-instabiliteit. Overige faalmechanismen zijn nog niet meegenomen/aangetoond.

*Waardering:*  
Niet van toepassing  
Effectiviteit maatregel: A

### 3.3.1.9 Alert Solutions

Het beoordeelde document is: "Rapportage AIO-SVT, Alert Solutions. West en Oostdijk piping en micro-instabiliteit proeven, versie 2.0 3-12-2012 en rapportage AIO-SVT, Alert Solutions. Zuiddijk macro- en micro-instabiliteit proeven, versie 2.0 3-12-2012". Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering ALERT SOLUTIONS	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid		X			
Reikwijdte				X	
Metingdichtheid				X	
Meetfrequentie		X			
Mate van redundantie			X		
Robuustheid		X			
Aanlooptijd				X	
Informatieverwerkingstijd	X				
Interpretatie		X			
Voorspelling faalmechanisme			X		

#### Nauwkeurigheid

##### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 7 en 14. De druksensoren hebben een nauwkeurigheid van 0.02 % over het volledige meetbereik. De temperatuursensoren hebben een nauwkeurigheid van 0,5 graad over het volledige meetbereik. De versnellingsopnemers (voor meting van de inclinatie) hebben gedurende de proefuitvoering een meetresolutie van beter dan 0.01 graad en een nauwkeurigheid beter dan 0.05 graad.

Oost en west: pagina 4 en 13. Idem als zuid.

##### Afweging en opmerkingen:

Onduidelijk is hoe de nauwkeurigheid bij de inclinometingen tot stand is gekomen. De test voor het bepalen van de nauwkeurigheid is +/- 2 graden.

##### Waardering:

B

#### Reikwijdte

##### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 14. Het zijn puntmetingen, ze nemen de lokaal aanwezige omstandigheden waar. De grootte van het gebied waarvoor de meetwaarde representatief is, hangt met een aantal factoren samen.

Oost en west: pagina 14. Idem.

##### Afweging en opmerkingen:

Het is goed dat bij de meetstrategie nagedacht wordt over de inzet van de techniek in relatie tot het faalmechanisme. Ook wordt nagedacht over lokale omstandigheden, die het aantal puntmetingen kan bepalen. Het blijven echter wel puntmetingen. Bijvoorbeeld voor het faalmechanisme piping, moeten een fors aantal puntmetingen worden gedaan om het proces te kunnen volgen. Ook wanneer een combinatie van faalmechanismen wordt verwacht, wordt de inzet van puntmetingen nog groter.

##### Waardering:

D

## Metingdichtheid

### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 15. Er zijn twee meetraaien aan sensoren geplaatst in de proefdijk op 20m onderlinge afstand. Elke raai omvat 4 sensormodules, verdeeld over de verschillende grondlagen.

Oost en west: pagina 14. In de Oostdijk is gekozen voor een configuratie met in elk van de twee rijen een sensor per 3m. In de Westdijk in elke rij een sensor per 6m.

### Afweging en opmerkingen:

Het is een puntmeting waarbij binnen 1 sensor 1 meting wordt uitgevoerd (wel voor verschillende parameters). Voor elke meettechniek die bestaat uit een puntmeting is de metingdichtheid gelijk aan de reikwijdte.

### Waardering:

D

## Meetfrequentie

### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 15. Metingen kunnen worden uitgevoerd tot 1 meting per 10 seconden. Gezien de duur van de proef en het ingeschatte verloop is gekozen voor een meetfrequentie van 1 meting per minuut.

Oost en west: pagina 14. Voor een deel van de sensoren is 1 meting per 1,5 minuut aangehouden, verder idem als zuid.

### Afweging en opmerkingen:

Voldoende.

### Waardering:

B

## Mate van redundantie

### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 15. Vier factoren worden genoemd die de mate van redundantie aangeven. Dit betreffen dichtheid van het meetnet, ontkoppelde signaal doorgifte, stroomvoorziening en data opslag en doorgifte.

Oost en west: pagina 14 en 15. Idem.

### Afweging en opmerkingen:

Uitval blijft een lokaal probleem. Echter, mist er dan dus wel data op dat lokale punt. Het is een techniek die in de dijk wordt geplaatst, het is niet makkelijk tussentijds vervangbaar. Alleen mogelijk door (her)plaatsing van een (nieuwe) Geobead. De proeven laten zien dat een enkele GeoBead voor enkele parameters kunnen uitvallen of onlogische waarden geven. De stroomvoorziening kan middels een accu. Data opslag en doorgifte is goed geregeld. Het wordt lokaal opgeslagen alsmede verstuurd naar een dataserver. Er wordt geen robuustheid in de dichtheid van het meetnet ingebouwd. Dit is wel iets wat moet worden gedaan gezien de resultaten. Er ontbreekt wel data gedurende de aanloop van de proef.

### Waardering:

C

## Robuustheid

### Gerapporteerd:

Zuid: pagina 15. Het monitoringssysteem heeft alle veranderingen gedurende de proefuitvoering tot en met de doorbraak van de dijk zonder schade ontstaan.

Oost en west: pagina 15. Idem.

*Afweging en opmerkingen:*

Het is een techniek die in de dijk zelf wordt ingebracht. Dat maakt de flexibiliteit klein. Het is wel zo dat veranderingen in de omgeving weinig invloed hebben op de techniek. Er zijn weinig veranderingen in de omgeving, die schade of verlies van waarde kunnen veroorzaken.

*Waardering:*

B

**Aanlooptijd**

*Gerapporteerd:*

Zuid: pagina 16. Installatie kan binnen een dag. Daarnaast wordt er een stabiliteitsperiode van 2 tot 3 dagen aangehouden.

Oost en west: pagina 15. Idem.

*Afweging en opmerkingen:*

Installatie kan inderdaad relatief snel. Over de stabiliteitsperiode die wordt aangegeven worden wat vraagtekens gesteld. Verwacht wordt dat voor de 3 parameters die gemeten worden toch wel een langere kalibratietijd nodig is. Bijvoorbeeld om de waterdrukken als gevolg van het inbrengen van de sensoren te laten weg stromen.

*Waardering:*

D

**Informatieverwerkingstijd**

*Gerapporteerd:*

Zuid: pagina 16. De informatie is direct beschikbaar. Pagina 17 geeft aan dat er ook een online datapanel is van Alert Solutions zelf.

Oost en west: pagina 15. Idem.

*Afweging en opmerkingen:*

Realtime metingen.

*Waardering:*

A

**Interpretatie**

*Gerapporteerd:*

Zuid: vanaf pagina 19 en alle grafieken die hierin worden gebruikt.

Oost en west: vanaf pagina 18.

*Afweging en opmerkingen:*

De informatie is direct vertaalbaar omdat het parameters en informatie betreft die direct te correleren zijn aan de sterkte van de dijk, voor meerdere faalmechanismen. De inclinometers zijn lastiger te vertalen (niet tot een absolute waarde te herleiden), echter de waterdrukken en temperatuurmetingen zijn makkelijker te vertalen. Er wordt voorbij gegaan aan de zettingen die de meetinstrumenten hebben ondergaan.

*Waardering:*

B

**Voorspelling faalmechanisme**

*Gerapporteerd:*

In de bijlage van zuid, west en oost zijn alle ingediende voorspellingen opgenomen.

*Afweging en opmerkingen:*

Alle stappen zijn te volgen in de proef, maar geven in het kader van het doen van voorspellingen net niet het complete beeld. Binnen dit project is door Alert Solutions niet volledig aangetoond dat er ook een voorspellende waarde aangegeven kan worden.

*Waardering:*

C





### 3.3.2 Beoordeling visualisatiesystemen

#### 3.3.2.1 Siemens

Het beoordeelde document is: "All in One Sensor Validatietest Eindrapport Siemens. Den Haag, München, 30 november 2012." Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering SIEMENS	A	B	C	D	E
Combineren meettechnieken		X			
Functionaliteiten en informatievoorziening		X			
Helderheid uitspraken	X				
Voorspelling faalmechanisme		X			

#### Combineren meettechnieken

##### Gerapporteerd:

Pagina 48. Door middel van slepen en loslaten van sensoren vanuit de dijkweergave kunnen trends worden gecombineerd met andere sensortrends. De verticale schaal is onafhankelijk manipuleerbaar en kan binnen de grafiek vergroten en verkleinen om tot een goed vergelijk te komen. De grafieken zijn georganiseerd in tabbladen. Iedere grafiek heeft een titel en ieder tabblad heeft een naam. Op pagina 50 wordt de tabel gegeven met gepresenteerde data. Figuur 33 op bladzijde 38 geeft een weergave van de combinatie van verschillende grafieken. Op pagina 37 staat ook een weergave van het dashboard.

##### Afweging en opmerkingen:

De manier waarop grafieken kunnen worden getoond en de functionaliteiten daarbij zijn van hoog niveau. Vergelijkingen kunnen eenvoudig worden gemaakt, er wordt nagedacht over parameters, schalen. Er worden geen appels met peren vergelijken. Er wordt duidelijk gestuurd op inhoud en niet alleen op het weergeven van "show" plaatjes. Uiteindelijk worden niet alle technieken gebruikt voor de afweging.

##### Waardering:

B

#### Functionaliteiten en informatievoorziening

##### Gerapporteerd:

Op pagina 9 wordt aangegeven aan welke functieblokken wordt bijgedragen. Pagina 36, het systeem biedt een displayfunctionaliteit, bevat configuraties voor filtermechanisme, navigatie en online trendvisualiseringen. Aanvullende schermen zijn mogelijk (pagina 38) met een scherm met alarmmeldingen, online hulp, diagnosescherm en voorspellingen. Op pagina 39 wordt getoond dat een dijkoverzicht weergegeven kan worden met signaallampen. Op pagina 42, berekende en voorspelde waarden kunnen worden geselecteerd. Pagina 43, webcams en sensorbeeldmateriaal kan worden weergegeven. Bovendien is het systeem gekoppeld aan diverse modellen die aangestuurd en weergegeven kunnen worden.

##### Afweging en opmerkingen:

De functionaliteiten zijn compleet en het is een duidelijk verhaal.

##### Waardering:

B

## Helderheid uitspraken

### Gerapporteerd:

Pagina 51. Siemens richtte zich op Finite Elements Models voor de berekeningen van de dijkstabiliteit en diverse intelligente methodes voor geautomatiseerde alarmmeldingen. Pagina 52, Er zijn voorspellingen gemaakt (voorafgaand aan de proef) door middel van eindige elementen methodes. Pagina 53 laat een plaatje zien van de uitkomsten. Er kan een verschil in virtuele (voorspelde gedrag) sensoren en werkelijke data getoond worden (pagina 53). Pagina 56, de tweede voorspelling werd gedaan tijdens het experiment en hield rekening met enkele wijzigingen in het proefverloop. Pagina 57, er is gebruik gemaakt van anomalie detectie. Op pagina 76 worden de conclusies genoemd ten aanzien van deze methode. Pagina 7 geeft aan dat vroege alarmmeldingen konden worden gedaan. De door de sensoren verstrekte informatie werd gebruikt om wiskundige modellen te verbeteren.

### Afweging en opmerkingen:

Er wordt op basis van de voorspellingen en de gemeten waarde van de sensorsystemen een uitspraak gedaan over de toestand van de proefdijk. Dit wordt gedaan met gefundeerde argumenten waar hoogstaande modellen voor zijn gebruikt. De door de sensoren verstrekte informatie werd gebruikt om wiskundige modellen te verbeteren. Daarentegen zijn visuele inspecties nauwelijks betrokken bij de uitspraken.

### Waardering:

A

## Voorspelling faalmechanisme

### Gerapporteerd:

Pagina 77, 78 en 79. In de tabellen wordt een samenvatting van de voorspellingen weergegeven. Pagina 76. Data gebaseerde methodes leveren informatie over abnormaal gedrag in een vroegtijdig stadium, maar zeggen niet veel over het tijdstip van een mogelijke dijkdoorbraak. Dit nadeel wordt gecompenseerd door de combinatie van fysieke modellen welke faalmechanismes kunnen simuleren. Door een beeld te vormen van de toekomstige toestand van de dijk kunnen dergelijke hybride modellen alarmeren en generen en het falen van dijken voorspellen. Op pagina 7 in de samenvatting worden de belangrijkste conclusies weergegeven.

### Afweging en opmerkingen:

De tabellen zoals gepresenteerd geven een eerlijk beeld. De onderbouwing bij de ingediende voorspellingen is van goede kwaliteit. Het is een "zelflerend" systeem, waarbij modellen ook verbeterd worden door de metingen. Naarmate de tijd verstrijkt neemt de nauwkeurigheid van de voorspellingen toe. Voor de Oost- en Westdijk wordt het falen binnen 7-8 uur van te voren gefundeerd voorspeld. Voor de Zuidijk klopte de voorspelling niet.

### Waardering:

B

### 3.3.2.2 Fugro en Nelen & Schuurmans

Het beoordeelde document is: "All in One sensor validation test, versie 3, 30 november 2012. Fugro en Nelen & Schuurmans". Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering FUGRO EN NELEN & SCHUURMANS	A	B	C	D	E
Combineren meettechnieken		X			
Functionaliteiten en informatievoorziening			X		
Helderheid uitspraken	X				
Voorspelling faalmechanisme		X			

#### Combineren meettechnieken

##### Gerapporteerd:

Pagina 5: de grafieken zijn interactief. Er kan worden ingezoomd op een periode door die met de muis te selecteren. Pagina 8, er is voor gekozen het standaard scherm met een beperkt aantal grafieken en tabellen weer te geven. Desgewenst konden alle beschikbare tijdreeksen worden opgeroepen.

##### Afweging en opmerkingen:

Grafieken kunnen allemaal sepeeraat worden weergegeven en diverse sensoren (met soms andere parameters) kunnen ook in een combinatiegrafiek geplot kunnen worden in raaien.

##### Waardering:

B

#### Functionaliteiten en informatievoorziening

##### Gerapporteerd:

Pagina 4, Er is een functionaliteit aanwezig waarin modelberekeningen op basis van de sensordata kan worden gemaakt. Er kan een alarmniveau mee worden gegeven. Pagina 8, expert knowledge is aan het systeem toegevoegd en wordt belangrijk gevonden. Pagina 18, er wordt ingegaan op de data interpretatie en beoordeling situatie. Naast de indicatoren t.a.v. de verschillende faalmechanismen waren andere observaties beschikbaar. Deze zijn gebruikt om een totaaloordeel te geven over de staat van het dijklichaam. Dit gebeurde door middel van correctiefactoren. Pagina 13, automatische berekeningen werden gemaakt op basis van de input van de waterspanningen van de DMC-buis en Alert Solutions. Pagina 15, wel zijn in de eerste dagen bij de bepaling van de factoren een aantal kinderziektes opgetreden. Pagina 17, om meetdata op een juiste wijze te interpreteren is meer informatie nodig dan alleen een tijdreeks met meetwaarden. Eigenschappen van de meettechniek, de exacte locatie en de meeteenheden zijn belangrijk. Pagina 17, de beschikbaar gestelde informatie stelde de visualisatiepartners niet in staat gedurende de proef data te valideren en te verifiëren.

##### Afweging en opmerkingen:

De informatie over eigenschappen van meettechnieken waren voorhanden. Het is handig dat de stabiliteit van de dijk uitgedrukt wordt in een stabiliteitsfactor. Dat geldt ook voor piping. Wat wel opvalt, is dat de uitspraken die zijn gedaan eigenlijk alleen gebaseerd zijn op de metingen van Alert Solutions en DMC-systeem, daar waar er een grote variëteit aan andere technieken ook aanwezig was. Goed is te zien dat visuele inspecties ook mee zijn genomen in de beoordeling en dat expert judgement onderdeel uitmaakt van het doen van uitspraken.

##### Waardering:

C

## Helderheid uitspraken

### Gerapporteerd:

Pagina 2. Er zijn vijf kernfunctionaliteiten te onderscheiden. Naast de technische specificaties is ook gekeken naar de gebruikersfunctionaliteit. Er kunnen alarmniveaus worden toegevoegd, zie pagina 5. Pagina 9, er is een mobiele oplossing aanwezig, middels een Ipad. Pagina 11, voor elke gebruikersgroep is er een aparte ingang binnen het levee portal.

### Afweging en opmerkingen:

De mogelijkheden die het systeem biedt ten aanzien van de gebruikers zijn groot. Er wordt laten zien dat hier goed over is nagedacht. Daarnaast ziet het portal er gebruiksvriendelijk uit, waarbij informatie op een eenvoudige manier wordt weergegeven. Gegevens kunnen snel worden gepresenteerd.

### Waardering:

A

## Voorspelling faalmechanisme

### Gerapporteerd:

Pagina 20 en 21, de tabellen. Verder zijn de voorspellingen aan de bijlage toegevoegd.

### Afweging en opmerkingen:

De voorspellingen van de Oostdijk laten zien dat naarmate de tijd vordert, de voorspellingen gedetailleerder en nauwkeuriger worden. Ook komt het faalmechanisme dat uiteindelijk leidt tot bezwijken juist in beeld na verloop van tijd. Op 25-8 is de juiste voorspelling gedaan ten aanzien van het moment van bezwijken.

Voor de Westdijk wordt met name piping voorspeld. Deze voorspellingen sluiten minder aan bij het uiteindelijke faalmechanisme en de doorbraak, maar het DMC-systeem had dan ook een grote invloed op het verloop van de proef.

Voor de Zuiddijk wordt het juiste faalmechanisme voorspeld, waarbij de voorspelling in de tijd aanscherpt en beter wordt.

Soms worden voorspellingen nog wel gedaan op grote hoofdlijnen, zonder specifieke gebeurtenissen te noemen. De locatie van bezwijken is niet meegenomen, terwijl dat op basis van de metingen wel kon worden voorspeld.

### Waardering:

B

### 3.3.2.3 AGT International

De beoordeelde documenten zijn “Definitieve rapportage AGT International betreffende de IJkdijk All-in-one Sensor Validation Test (AIO-SVT), versienummer 1.1, versiedatum 30 november 2012” en “Definitieve rapportage AGT International betreffende de IJkdijk IJkdijk All-in-one Sensor Validation Test (AIO-SVT), versienummer 2.1, versiedatum 3 januari 2013”.

De informatie onder de kopjes gerapporteerd bij de toelichting verwijzen naar de paginanummering van versie 1.1. De afweging en opmerkingen zijn wel aangepast naar aanleiding van versie 2.1. en zijn dus gebaseerd op de laatste rapportage.

Het resultaat wordt in onderstaande tabel samengevat. Een toelichting per criterium wordt navolgend gegeven.

Criterium/Waardering AGT INTERNATIONAL	A	B	C	D	E
Combineren meettechnieken		X			
Functionaliteiten en informatievoorziening				X	
Helderheid uitspraken					X
Voorspelling faalmechanisme				X	

#### Combineren meettechnieken

*Gerapporteerd:*

Pagina 9: de figuren. Daarnaast, een weergave van meetwaarden van diverse soorten sensoren in tijdreeksen. Visualisatie van onverwerkte gegevens en verwerkte gegevens. Heat map weergave van een aantal sensoren. Pagina 12, sommige grafieken zijn genormaliseerd weergegeven zonder eenheden. Dit is een gebruikersinstelling en afhankelijk van de voorkeur van de gebruiker.

*Afweging en opmerkingen:*

Het is handig dat diverse data van meettechnieken in één grafiek kunnen worden geplote. Van de heat map methode worden niet direct de voordelen gezien. Daarnaast worden een aantal figuren (waaronder ITC, MetaSensing en InTech) niet in het format van het visualisatiesysteem gepresenteerd.

*Waardering:*

B

#### Functionaliteiten en informatievoorziening

*Gerapporteerd:*

Pagina 3. De DSS van AGT maakt gebruik van een reeks geavanceerde wetenschappelijke en industriële modellen en draait veelvoudig scenario's om dijkstabiliteit te bepalen. Pagina 4, de data kan op bijna elk apparaattype opgevraagd worden. Pagina 6, er worden elke minuut nieuwe gegevens uit de gateway opgehaald. Pagina 7, op een kaart wordt gevisualiseerd met verschillende kleuren wat de dijkstatus is. Een pop up venster met alarm zullen automatisch verschijnen. Pagina 9 idem. Pagina 10, verschillende stabiliteitsmodellen wordt gecontroleerd en gevisualiseerd.

*Afweging en opmerkingen:*

Er is gebruik gemaakt van een stabiliteitsmodel van Fugro, maar van een geïntegreerd systeem en meerdere modellen is geen sprake. Daarnaast zijn ook niet de genoemde verschillende scenario's doorgerekend.

*Waardering:*

D

## Helderheid uitspraken

### Gerapporteerd:

Figuren vanaf pagina 26. Pagina 25, middels de visualisaties waren op een eenvoudige manier directe effecten van de activiteiten op de dijk waar te nemen, zoals stijging van het waterniveau. De consequentie hiervan was dat bepaalde afwijkingen zichtbaar werden.

### Afweging en opmerkingen:

Bij de analyse van de gebeurtenissen wordt wel gebruik gemaakt van alle aanwezige data van de verschillende meettechnieken. Er wordt weinig verband gelegd tussen wat er gemeten wordt en wat daarbij de status van de dijkveiligheid is. Verder wordt er een analyse gedaan, waarin op grote hoofdlijnen e.e.a. beschouwd wordt. Dit is weinig concreet. Ook bij het indienen van voorspelling wordt niet altijd een onderbouwing gegeven.

### Waardering:

E

## Voorspelling faalmechanisme

### Gerapporteerd:

Pagina 48. Samengevat kwam de voorspelling van AGT International over het verzwakkingsmechanisme en de plaats waar de proefdijk bezweek, gewoonlijk drie tot vier dagen voor de dijkverzwakking. De tabel op pagina 50 geeft een overzicht. Details worden weergegeven in de tabellen op pagina 52, 53 en 54.

### Afweging en opmerkingen:

De vertaling van de originele ingediende voorspellingen naar de tabel die wordt gepresenteerd in de conclusie op pagina 4 komt niet overeen.

De voorspellingen in deze tabel zijn onjuist. Voor de West- en de Oostdijk geldt dat pas op 25 en 26 augustus een uitspraak is gedaan over het moment van bezwijken. Daarvoor niet. Er is wel beschreven wat er te zien was op de metingen, maar op hoofdlijnen. Bij de voorspellingen is niet tot nauwelijks gebruik gemaakt van modellen.

Voor de Zuidoostdijk geldt dat de voorspelling gedaan op 3-9-2012 juist is, voor wat betreft locatie en mechanisme. Tijdens het experiment wordt deze voorspelling op basis van metingen op details bijgesteld. De analyse van de data laat echter geen waterdichte onderbouwing zien van de voorspelling, met name is onduidelijk hoe de veranderingen ten aanzien van bijvoorbeeld de belastingstappen hebben bijgedragen aan de eventuele bijstelling van de voorspelling.

De datum waarop AGT International aangeeft de voorspellingen ingediend te hebben, met daarbij de doorvertaling naar het aantal dagen dat AGT International vooraf het moment van bezwijken van de proefdijken heeft voorspeld, kan niet worden gedeeld.

### Waardering:

D



### 3.4 Samenvatting resultaten

In het experiment zijn meettechnieken en visualisatiesystemen voor verschillende situaties besproken en geëvalueerd. De toepassingen zijn beoordeeld op verschillende criteria. De meetstrategie en het meetplan bepalen uiteindelijk welke criteria belangrijk moeten worden geacht bij het kiezen voor een meettechniek of visualisatiesysteem. Bij deze afweging, op basis van de in dit onderzoek behaalde resultaten, moet het volgende meegenomen worden:

- De criteria en waarderingen zijn per meettechniek en visualisatiesysteem in een samenvattende tabel weergegeven. De diverse criteria met bijbehorende waardering geven een totaalbeeld van de inzet van de meettechniek of het visualisatiesysteem.
- Belangrijk is te vermelden dat een "totaalwaardering" niet aan de orde is bij de beoordeling. Een meettechniek of visualisatiesysteem kan hoger gewaardeerd op het ene criterium en lager op het andere. Afhankelijk van de vraag die achter de inzet van een meettechniek of visualisatiesysteem ligt, is de dijkbeheerder dan in staat een meettechniek of visualisatiesysteem te kiezen dat voldoet aan de bijbehorende eisen. Dit zal per situatie verschillen.
- Daarnaast moet vermeld worden dat de criteria, definities en de waardering een raamwerk betreffen. Het heeft niet de potentie om tot een waardering te komen waarbij interpretatie geen rol speelt (dat is ook niet mogelijk en daarvoor is de onafhankelijke beoordelingscommissie). Met andere woorden: de waarderingen zijn een interpretatie van de commissie waarbij het raamwerk als hulpmiddel is gebruikt en de denkwijze weergeeft.
- Bij de beoordeling is uitgegaan van de toegepaste meettechnieken en visualisatiesystemen en de resultaten die zijn behaald binnen de drie proeven van de All-in-one Sensor Validatie Test.
- In de samenvattende tabellen worden de meetpartijen en visualisatiepartijen genoemd en niet de specifieke ingezette meettechniek of het visualisatiesysteem. De beoordeling betreft wel deze specifieke meettechniek of visualisatiesysteem. Deze specifieke informatie wordt gegeven in deel 2 en de bijlage van de rapportage.
- Voor diverse meettechnieken en visualisatiesystemen zijn aanpassingen of verbeteringen op bepaalde criteria eenvoudig realiseerbaar. Selectie puur op basis van de "beste waardering" wordt daarom afgeraden, hoewel een betere waardering natuurlijk wel een indicatie vormt van bewezen kwaliteiten.

De volgende tabellen geven een overzicht en samenvatting van de beoordeling van de meettechnieken en van de visualisatiesystemen.



Onderstaande tabellen geven een overzicht en samenvatting van de beoordeling van de meettechnieken.

Criteriaum/Meeettechniek BEOORDELING	TenCate en Inventec	StabiAlert	MetaSensing	Koenders	ITC	InTech	Empec	Volker Wessels Telecom en Landustrie	Alert Solutions
Nauwkeurigheid	B	C	B	C	C	B	C	B	B
Reikwijdte	C	C	B	C	C	B	B	D	D
Metingdichtheid	A	B	B	B	B	B	B	D	D
Meetfrequentie	C	A	A	B	C	A	C	A	B
Mate van redundantie	B	C	D	D	D	A	D	C	C
Robuustheid	D	B	D	C	E	B	B	A	B
Aanlooptijd	D	C	B	C	B	A	B	E	D
Informatieverwerkingstijd	D	A	C	B	D	C	D	A	A
Interpretatie	D	B	D	D	B	C	D	C	B
Voorspelling faalmechanisme	C	D	E	E	D	E	D	n.v.t.	C
Effectiviteit maatregel	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	A	n.v.t.

Criteriaum/Waardering LEGENDA	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid	Niet haalbaar, enige onnauwkeurigheid is inherent aan meten	Hoge nauwkeurigheid van het instrument	Matige nauwkeurigheid	Het systeem moet geijkt worden met een andere meting	Niet nauwkeurig genoeg om bruikbaar te zijn voor de betreffende parameter
Reikwijdte	Volume meting (driedimensionale meting)	Oppervlaktmeting (tweedimensionale meting)	Lijnmeting	Puntmeting	Nietszeggend
Metingdichtheid	Niet generiek te kwalificeren	Niet generiek te kwalificeren	Niet generiek te kwalificeren	Niet generiek te kwalificeren	Niet generiek te kwalificeren
Meetfrequentie	Eenmaal per 15 seconden of vaker	Eenmaal per minuut	Eenmaal per uur	Eenmaal per dag	Een meting per meerdere dagen
Mate van redundantie	Meervoudig uitgevoerd en back-up mogelijkheid van data	Meervoudig uitgevoerd	Enkelvoudig uitgevoerd met back-up mogelijkheid van data	Enkelvoudig uitgevoerd	Enkelvoudig uitgevoerd, en meetstelsysteem blijkt (ten dele) niet te functioneren
Robuustheid	Er is rekening gehouden met alle mogelijke vormen van uitval en er is een oplossing voorhanden	Weinig omstandigheden denkbaar die invloed hebben op het functioneren	Techniek heeft stabiel gefunctioneerd onder gegeven omstandigheden	Veel moeite met veeldomstandigheden	Kan niet omgaan met veeldomstandigheden
Aanlooptijd	Onmiddellijk inzetbaar	Binnen enkele uren operationeel	Binnen enkele dagen operationeel	Binnen een week operationeel	Binnen minimaal een maand operationeel
Informatieverwerkingstijd	Begrijpelijke data is realtime beschikbaar	Begrijpelijke data is met een korte vertraging van enkele minuten beschikbaar	Er is nog een bewerkingslag noodzakelijk voordat begrijpelijke data beschikbaar is	Er is nog een bewerkingslag van 0.5 tot 2 dagen noodzakelijk voordat begrijpelijke data beschikbaar is	Er zijn meerdere dagen nodig om tot begrijpelijke data te komen

<b>Interpretatie</b>	Direct interpreteerbare gemeten grootheden en deze kunnen worden vergeleken met meerdere technieken	Gemeten grootheden zijn (vrijwel) direct interpreteerbaar	Interpreteerbaar zonder expert	Levert gegevens, maar vergt expert om iets mee te kunnen	Onduidelijk
<b>Voorspelling faalmechanisme</b>	Het juiste faalmechanisme wordt voorspeld op het juiste tijdstip	Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is en een volledig beeld weergeeft	Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is, maar niet het volledige beeld wordt weergegeven	Er wordt wel iets relevantis (achteraf) geduid maar is onvoldoende specifiek gemaakt	Geen voorspelling of niet aangetoond

Onderstaande tabellen geven een overzicht en samenvatting van de beoordeling van de visualisatiesystemen.

Criterion/Visualisatiesysteem BEOORDELING	Siemens	Fugro en Nelen & Schuurmans	AGT International
Combineren meettechnieken	B	B	B
Functionaliteiten en informatievoorziening	B	C	D
helderheid uitspraken	A	A	E
Voorspelling faalmechanisme	B	B	D

Criterion/Waardering LEGENDA	A	B	C	D	E
<b>Combineren meettechnieken</b>	Volumebeeld (meerdere metingen tot een driedimensionale weergave van de situatie in de tijd)	Raaien (meerdere metingen tot dwarsdoorsneden)	Tijd (meerdere metingen in de tijd)	Multi-scalair (meerdere metingen)	Scalair (één meting)
<b>Functionaliteiten en informatievoorziening*</b>	5 Kernfunctionaliteiten	4 Kernfunctionaliteiten	3 Kernfunctionaliteiten	2 Kernfunctionaliteiten	1 Kernfunctionaliteit
<b>helderheid uitspraken**</b>	5 Niveaus	4 Niveaus	3 Niveaus	2 Niveaus	1 Niveau
<b>Voorspelling faalmechanisme</b>	Het juiste faalmechanisme wordt voorspeld op het juiste tijdstip	Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is en een volledig beeld weergeeft	Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is, maar niet het volledige beeld wordt weergegeven	Er wordt wel iets relevantis (achteraf) geduid, maar is onvoldoende specifiek gemaakt	Geen voorspelling of niet aangetoond

\* Plotten van grafieken van meetdata - weergave van dijksterkte (eenvoudige dijksterktemodellering) – virtual dike modellering (geavanceerde dijksterktemodellering) - gebruik van data driven models - informatie over besluitvorming

\*\* Informatie op het niveau van een bestuurder – een manager – een dijkbeheerder – een expert – een ingenieur



## Deel 4 Discussie

### 4.1 Context

Bij de drie proeven van de All-in-one Sensor Validatie Test zijn een groot aantal meettechnieken, visualisatiesystemen en één interventietechniek ingezet. Deze meettechnieken en visualisatiesystemen hebben allemaal een verschillende doelstellingen als het gaat om de uiteindelijke inzet en het gebruik. In dit deel worden deze meettechnieken en visualisatiesystemen geplaatst in hun context: welke meettechniek en welk visualisatiesysteem levert informatie ten behoeve van welke toepassing.

### 4.2 Toepassingsgebied

Meettechnieken hebben verschillende doelstellingen en daarmee verschillende toepassingen. De verschillende toepassingsgebieden van meettechnieken kunnen zijn:

- Risicobeheersing (in uitvoeringssituatie of extreme veranderlijk belastingen);
- Modelverfijning (ten behoeve van analyse, bijstelling van parameters);
- Ondersteuning bij visuele inspecties (alarm, signaaldetectie);
- Early warning systeem (eigenlijk ook een risico beheersend systeem).

Toepassing 1, risicobeheersing, is de aloude toepassing van monitoring in de geotechniek. Door te meten aan parameters die direct en kwantitatief te herleiden zijn naar een geotechnisch proces kan inzicht worden verkregen in dat proces en of dat proces zich volstrekt volgens de verwachting.

Toepassing 2, modelverfijning, is eveneens een relatief oude toepassing, maar wordt door de sterk verbeterde ICT mogelijkheden nu heel anders toegepast. Voorheen werden voor deze toepassing over een relatief korte periode analoge puntmetingen uitgevoerd naar het waterspanningsverloop. Dit veelal met tot doel om een analytisch model op te zetten, bijvoorbeeld voor grondwaterstroming, wat dan gebruikt kon worden voor piping- of stabiliteitsberekeningen. Door de verbeterde technieken, dataopslag en datacommunicatie kunnen deze metingen op een andere manier en over een langere periode worden uitgevoerd.

Door deze metingen over langere periodes uit te voeren kan het model zichzelf ook weer “updaten” wanneer bij afwijkende randvoorwaarden of belastingpatronen tendensen worden gemeten die afwijken van de verwachte tendens. Ook hiervoor worden veelal puntmetingen toegepast omdat deze eenvoudig te vertalen zijn naar absolute waarden in een model. Voor het opzetten van de modellen hebben ook grondradartechnieken een meerwaarde omdat deze over een groter oppervlakte een continu beeld kunnen geven, bijvoorbeeld over de dikte van de waterremmende laag. Ook technieken gebaseerd op elektrische potentiaalmetingen zouden deze modellen kunnen versterken.

Toepassing 3, ondersteuning bij visuele inspecties, is een toepassing waarvoor veelal remote sensing technieken kunnen worden ingezet omdat deze over een grotere oppervlakte informatie geven die kunnen duiden op afwijkend gedrag van dijken onder verschillende belastingen. De voortgang van het gedrag en de koppeling van remote sensing technieken aan een direct bezwijkmodel is veelal (nog) niet mogelijk. Dit maakt deze technieken niet minder waardevol. Sterker nog, de inspectiedruk die in bepaalde situaties ontstaat (denk bijvoorbeeld aan inspecties om zandmeevoerende wellen op te sporen bij hoge rivierwaterstanden) leidt tot hoge kosten. Daarnaast geven deze technieken een beter reproduceerbaar signaal aan dan verschillende menselijke ogen dat kunnen.

In toepassing 4, early warning systemen, komen eigenlijk alle drie eerder genoemde toepassingen bij elkaar. Hiervoor is zowel behoefte aan directe parameters om de toestand van de dijk in beeld te brengen (denk aan een veiligheidsfactor) alsmede het signaleren van afwijkend gedrag van de dijk. Ook kunnen de meer indirecte parameters “helpen” bij het vertalen van de directe gemeten (punt) parameters naar grotere dijkstrekkings.

Visualisatiesystemen kunnen de dijkbeheerder helpen bij het analyseren of beoordelen van verschillende meettechnieken naast elkaar. Bijvoorbeeld puntmetingen gecombineerd met meer globale metingen aan de dijk die gecombineerd een kwalitatief en kwantitatief beeld van de dijk geven.

Dergelijke visualisatiesystemen zijn meer dan alleen een groot “dashboard” waarop verschillende metingen kunnen worden gepresenteerd. De visualisatiesystemen kunnen meerdere meettechnieken tegelijk presenteren en eventueel analyseren. Belangrijk daarbij is dat de visualisatiesystemen toegankelijk zijn voor verschillende doelgroepen (bijvoorbeeld een wetenschapper, dijkbeheerder, bestuurder) en dat de actuele en toekomstige sterkte kunnen worden voorspeld. Bijvoorbeeld op basis van verschillende metingen of dat zelfs een prognose kan worden gegeven op basis van meettendensen of anomalieën. Aan de hand van deze prognoses (en het actuele inzicht in de dijksterkte) kunnen visualisatiesystemen ondersteuning bieden bij besluitvorming. Ook het bijstellen van rekenparameters op basis van metingen (neuraal netwerk of zelflerend systeem) is een toepassing.

### 4.3 Afweging inzet meettechnieken en visualisatiesystemen

Binnen de vier genoemde toepassingsgebieden worden verschillende eisen gesteld aan de visualisatiesystemen en meettechnieken. Zo zijn er meettechnieken die meer indirecte, niet absolute signalen van een dijk aangeven, bijvoorbeeld relatieve verdroging of vernatting van dijken. Deze meettechnieken zullen voor toepassingsgebied 3 en 4 een grotere waarde hebben dan voor 1 en 2.

Andere meettechnieken geven een directe absolute parameter, zoals een waterdruk, die rechtstreeks te relateren is aan de sterkte van dijken. Deze meettechnieken hebben een meerwaarde in alle toepassingsgebieden maar vertellen vaak alleen iets over de situatie bij het meetobject (puntmeting). Bij het aangeven of iets een “directe” parameter is of een indirecte parameter speelt ook de stand van de techniek een rol.

Samenvattend vereist het inzetten van meettechnieken vooral een goede meetstrategie en meetplan: wat is het doel, wat is het toepassingsgebied, wat zijn de risico's, hoe groot is het te bemeten gebied en wat zijn de middelen. Ook over aspecten die de resultaten van metingen kunnen beïnvloeden dient te worden nagedacht. Door dit goed uit te werken en parameterspecifiek te maken (welke parameters zijn er nodig om het gestelde doel te halen) kunnen de juiste meettechnieken worden ingezet. Zo is een juiste installatie en plaatsbepaling van belang, maar ook de combinatie van meettechnieken en de integratie van deze meettechnieken met een data-verwerkingssysteem en visualisatiesystemen.

## Deel 5 Conclusie en eindresultaat

### 5.1 Inleiding

Het doel van de All-in-one Sensor Validatie Test was het verkrijgen van inzicht in de functionaliteit en prestaties van full service dijkmonitoringssystemen en hierbij expliciet in te gaan op het realtime voorspellen van de dijksterkte ten aanzien van meerdere faalmechanismen.

Als onderdeel hiervan zijn drie proefdijken op succesvolle wijze tot bezwijken gebracht, waarbij zowel nieuwe meettechnieken als visualisatiesystemen op een goede manier konden worden getest.

### 5.2 Bezwijken proefdijken

Voor elk van de proefdijken is vooraf vastgelegd volgens welke faalmechanismen deze zouden kunnen bezwijken. De deelnemende bedrijven hebben daar met hun meettechnieken en visualisatiesystemen ook rekening mee gehouden, zoals in de praktijk ook vanuit de toetsing de kwetsbare kanten van de dijk bekend zijn.

De in augustus beproefde proefdijken konden beide bezwijken op de faalmechanismen piping (afhankelijk van de werking van de piping preventiemaatregelen), micro-instabiliteit of erosie ten gevolge van overlopen. In beide gevallen is wel piping opgetreden maar heeft dit niet tot bezwijken geleid, maar heeft micro-instabiliteit van de zandkern tot een dusdanige verzakking van de proefdijk geleid dat de kruin uiteindelijk overliep en verdere verzakking en erosie tot een bres leidde.

De in september beproefde proefdijk is op gecontroleerde wijze bezweken door macro-instabiliteit langs een glijvlak door de ondergrond, hetgeen één van de twee vooraf geïdentificeerde bezwijkmechanismen was. Het andere bezwijkmechanisme, micro-instabiliteit door afdrukken van de kleibekleding, heeft hooguit een marginale rol gespeeld in de eindfase van de proef.

Naast de toepassing van nieuwe meettechnieken zijn bij alle drie de proeven ook meer traditionele, bewezen meettechnieken ingezet als referentiemonitoring. Deze heeft naar behoren gefunctioneerd. Hiermee is een helder beeld van het verloop van de proeven verkregen. De referentiemonitoring was tijdens de proeven niet beschikbaar voor de deelnemende bedrijven. De metingen zijn beschikbaar gesteld nadat de deelnemende bedrijven hun rapportage gereed hadden.

### 5.3 Meettechnieken

Er is een grote verscheidenheid aan meettechnieken uitgetest door elf verschillende meetpartijen, die drie remote sensing technieken en verder in-situ meettechnieken hebben ingezet. Eén techniek valt daarbij extra op, omdat dit meer een dijkversterkingstechniek betreft dan een meettechniek.

Het functioneren van deze meettechnieken in de verschillende proeven waarin deze zijn toegepast, is beoordeeld volgens tien verschillende criteria. Per onderdeel lopen de waarderingen op criteria soms sterk uiteen, zodat voor nieuwe toepassingen concreet beoordeeld zal moeten worden hoe zwaar ieder criterium moet tellen. Voor diverse meettechnieken zijn aanpassingen of verbeteringen op bepaalde criteria eenvoudig realiseerbaar. Selectie puur op basis van de "beste waardering" wordt daarom afgeraden, hoewel een betere waardering natuurlijk wel een indicatie vormt van bewezen kwaliteiten.

Over het algemeen wordt met behoorlijke precisie zichtbaar wat er met de proefdijk gebeurt. Bij de meettechnieken en de voorspellingen van het falen van de proefdijken geldt dat het volledige beeld ontbreekt. De voorspellingen zijn enkel gebaseerd op eigen data. Daarnaast wordt aangegeven door de meetpartijen dat er een zeker gebrek aan geotechnisch inzicht is bij zichzelf. Verder is het zo dat de voorspellingen gaandeweg beter worden.

## 5.4 Visualisatiesystemen

Een viertal visualisatiepartijen heeft deelgenomen met visualisatiesystemen waarbij de data van de verschillende meettechnieken kon worden gecombineerd. Alle data werd verzameld en beschikbaar gesteld door hetzelfde data-verwerkingssysteem waarvan het functioneren reeds bij eerdere experimenten was bewezen.

Met de visualisatiesystemen zijn uiteenlopende resultaten bereikt, gemeten naar de hiertoe vooraf opgestelde criteria. Daarbij lag bij het ene visualisatiesysteem wat meer de nadruk op het gebruik van geavanceerde dijkmodelleringstechnieken en data-driven modellering, door het andere visualisatiesysteem werd nadrukkelijker gebruik gemaakt van geotechnische vakkennis en bewezen-sterktemethoden en de het derde visualisatiesysteem legde sterk de nadruk op de visualisatie van data.

De combinatie van meetdata uit verschillende bronnen blijkt de kwaliteit van de voorspellingen duidelijk ten goede te komen. In de loop van de proeven worden de meeste voorspellingen steeds beter, waarbij vaak een volledig beeld wordt weergegeven.

## 5.5 Full service dijkmonitoringsystemen

Het uiteindelijke doel is om te komen tot full service monitoringssystemen. De cruciale vraag of zo'n systeem haalbaar is, kan met de voorliggende componenten zeker positief worden beantwoord. De verschillende componenten die voor een dergelijk integraal dijkmonitoringssysteem nodig zijn, betreffen:

- 1 Diverse meettechnieken – in-situ en remote sensing, traditioneel en innovatief, ondersteunend aan visuele inspecties;
- 2 Een data-verwerkingssysteem;
- 3 Een visualisatiesysteem, inclusief weergave van de data, dijksterktemodellering, anomaliedetectie en heldere, begrijpelijke en betrouwbare informatie ten behoeve van besluitvorming.

Geconcludeerd kan worden dat met de integratie van bovengenoemde componenten gekomen is tot nauwkeurige en betrouwbare voorspellingen van de dijksterkte binnen de All-in-one Sensor Validatie Test. Met een juiste aanpak, expert kennis en een zorgvuldige combinatie van meettechnieken zijn full service dijkmonitoringsystemen voor waterkeringen dan ook zeker haalbaar.

De concrete invulling hangt daarbij uiteraard mede af van de dijk(en) waarvoor het full service dijkmonitoringssysteem gemaakt moet worden. De samenvattende tabellen, gevat in hun context, zijn hierbij bruikbaar.

## Deel 6 Toekomstvisie

De eerste toekomstvisie werd in 2008 geschreven in de eindrapportage van het macrostabiliteitsexperiment. De toekomstvisie die hierin werd geschetst was een combinatie van verschillende monitoringstechnieken met analyse- en prognostische modellen om inzicht te krijgen in de actuele sterkte en het gedrag van waterkeringen. Nu de rapportage van de AIO SVT is afgerond en de conclusies zijn getrokken, blijkt dat aan de toekomstvisie uit 2008 in hoge mate invulling is gegeven.

De resultaten van de AIO SVT laten zien dat de toegepaste monitorings-, integratie-, analyse- en visualisatie systemen de actuele en verwachte toestand van de proefdijken inzichtelijk kunnen maken met behoorlijke precisie. Hieronder vallen onder andere grondwaterstromingen, deformaties en berekeningen naar piping en stabiliteit.

Toepassing van de gevalideerde systemen in de beheerpraktijk wordt hiermee op korte termijn (enkele jaren) in aansluiting op de LiveDijk projecten van het IJkdijk ontwikkelprogramma mogelijk gemaakt. De toepassing kan zich onder meer richten op het realiseren van de volgende doelstellingen:

- Het inwinnen van informatie om dijkversterkingen in ontwerp en uitvoering te kunnen optimaliseren;
- Het op basis van monitoring kunnen uitvoeren van een deel van de toetsing op veiligheid;
- Optimalisatie van het gehele levenscyclusbeheer van dijken;
- Het realiseren van early warning systemen voor (afgekeurde) dijken die ook in reguliere omstandigheden informatie inwinnen;
- Monitoren van het functioneren van innovatieve dijkversterkingstechnieken (zoals verticaal geplaatst geotextiel, dijkconditionering, etc.).

Nu drie grootschalige validatie-testen op de IJkdijklocatie zijn uitgevoerd, en een vierde naar zettingsvloeiing in voorbereiding is op een andere locatie, blijft de verwachting dat dijkmonitoring in de toekomst bestaat uit een combinatie van visuele inspecties met innovatieve meetmethoden. Een getrapte benadering ligt voor de hand (remote sensing in combinatie met in situ technieken) waarbij gedegen historisch onderzoek van de locaties niet moet worden onderschat. Het op orde en actueel hebben van beheerregisters en leggers zijn hierbij van het grootste belang om continuïteit van kennis en goede overdracht van informatie tijdens de gehele levenscyclus te waarborgen.

In samenwerking met Flood Control 2015, Urban Flood en partners uit de gouden driehoek, is aansluiting gezocht en gevonden bij de business cases Flood Control 2100 en De Digitale Delta van het topsectorenbeleid. Ook samenwerking met het nieuwe Hoogwaterbeschermingsprogramma wordt nagestreefd. Hierbij wordt vormgegeven aan het toepassen van de in het IJkdijk ontwikkelprogramma ontwikkelde kennis om het behalen van de doelstellingen van het nHWBP te ondersteunen. Eind 2012 zijn hiervoor de eerste gesprekken gevoerd tussen het nHWBP en Stichting IJkdijk. Belangrijke voorbeeldprojecten zijn de LiveDijk projecten het in ontwikkeling zijnde Dijk Data Service Centrum (DDSC). Het DDSC biedt dijkbeheerders, kennisinstellingen en bedrijfsleven de mogelijkheid om met de ingewonnen gegevens van dijken analyses uitvoeren met als doel invulling te geven aan de hierboven vermelde doelstellingen. Hierbij dient op zorgvuldige wijze te worden bepaald welke dijken geschikt zijn voor monitoring en wat de aanvullende waarde hiervan is.





## Referenties

[Alipoor & Hadinejad, 2011]

Alipoor, A. & Hadinejad, F. (2011) "Multi Criteria Decision Making for Optimal Sensor Selection", *2011 International Conference on Computer Communication and Management Proc. Of CSIT vol.5* Singapore: IACSIT Press

[Koelewijn et al., 2010]

Koelewijn, A., Pals, N., Sas, M. & Zomer, W. (2010). *IJkdijk Piping experiment. Validatie van sensor- en meettechnologie voor detectie van optreden van piping in waterkeringen* (2010-26 PIW). Groningen: Stichting IJkdijk.

[Koelewijn et al., 2012a]

Koelewijn, A.R., Peters, D.J., Vries, de, G., Loon, van, J. & Bersan, S. (2012) *All in One-Sensor Validatie Test, Factual report Westdijk – proefverloop en referentiemonitoring*, Report 1206242-006-GEO-0001, 3 November 2012. Delft: Deltares.

[Koelewijn et al., 2012b]

Koelewijn, A.R., Peters, D.J., Vries, de, G., Loon, van, J. & Bersan, S. (2012) *All in One-Sensor Validatie Test, Factual report Eastdijk – proefverloop en referentiemonitoring*, Report 1206242-006-GEO-0002, 5 November 2012. Delft: Deltares.

[Moser & Zomer, 2006]

Moser, W.M. & Zomer, W.S. (2006) *Inspectie van waterkeringen. Een overzicht van meettechnieken* (2006-31). Utrecht: STOWA.

[de Vries, 2012]

Vries, de, G. (2012) *Draaiboek All in One Sensor Validatie Test (AIO SVT)*, Report 1206242-001-GEO-0013, versie 2, 2 August 2012. Delft: Deltares.

[de Vries et al., 2012]

Vries, de, G., Bruijn, de, H.T.J., Peters, D.J., Loon, van, J. & Koelewijn, A.R. (2012) *All in One-Sensor Validatie Test, Factual report Zuiddijk – proefverloop en referentiemonitoring*, Report 1206242-006-GEO-0005, 12 november 2012. Delft: Deltares.

[Weijers et al., 2009]

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

[w.ijkdijk.nl/resultaataio](http://w.ijkdijk.nl/resultaataio)

## Bijlage

Factual reports van de meet- en visualisatiepartijen zijn te vinden onder:

[www.ijkdijk.nl/resultaataio](http://www.ijkdijk.nl/resultaataio)





# Dankbetuiging

De All In one Sensor Validatie Test van Stichting IJkdijk werd mede mogelijk met ondersteuning van het Ministerie van Economische Zaken en STOWA.



Ministerie van Economische Zaken



STICHTING TOEGEPAST ONDERZOEK WATERBEHEER

Verder verleende een breed scala aan organisaties hun steun en betrokkenheid.

De partners die de Stichting IJkdijk vormen:

- TNO
- Deltares
- NV NOM
- STOWA
- Sensor Universe
- AGT International
- Alert Solutions
- Empec
- Fugro
- InTech
- ITC
- Koenders
- Landustrie
- MetaSensing
- Nelen & Schuurmans
- Siemens
- StabiAlert
- TenCate
- Inventec
- Volker Wessels Telecom
- Waterschap Hunze en Aa's
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu
- Grondverzet en aannemersbedrijf Van der Meer
- Staatsbosbeheer
- Gemeente Bellingwedde
- Gemeente Old Ambt
- De bewoners van de Hamdijk

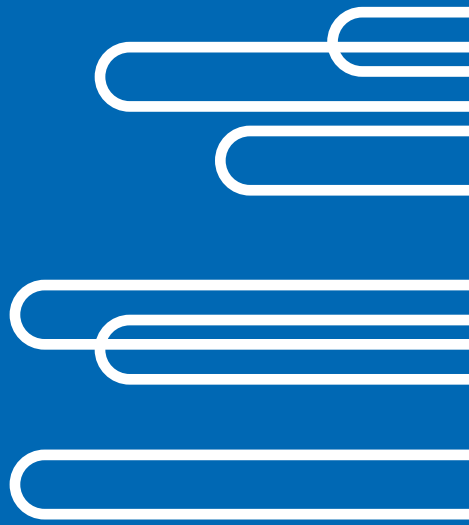


Stichting IJkdijk

Vanaf 2007 heeft Stichting IJkdijk projecten in uitvoering gebracht op de testlocatie in Bad Nieuweschans aan de Hamdijk. Conform de afspraken die zijn gemaakt met Staatsbosbeheer en de bewoners van de Hamdijk, heeft Stichting IJkdijk in oktober 2012 de locatie officieel overgedragen aan Staatsbosbeheer. Hiermee eindigen de activiteiten van de Stichting IJkdijk op de testlocatie.



*IJkdijk locatie na het experiment*





## Contact

Stichting IJkdijk  
Postbus 424  
9700 AK Groningen

E [info@ijkdijk.nl](mailto:info@ijkdijk.nl)  
T 050 521 44 66

[www.ijkdijk.nl](http://www.ijkdijk.nl)

