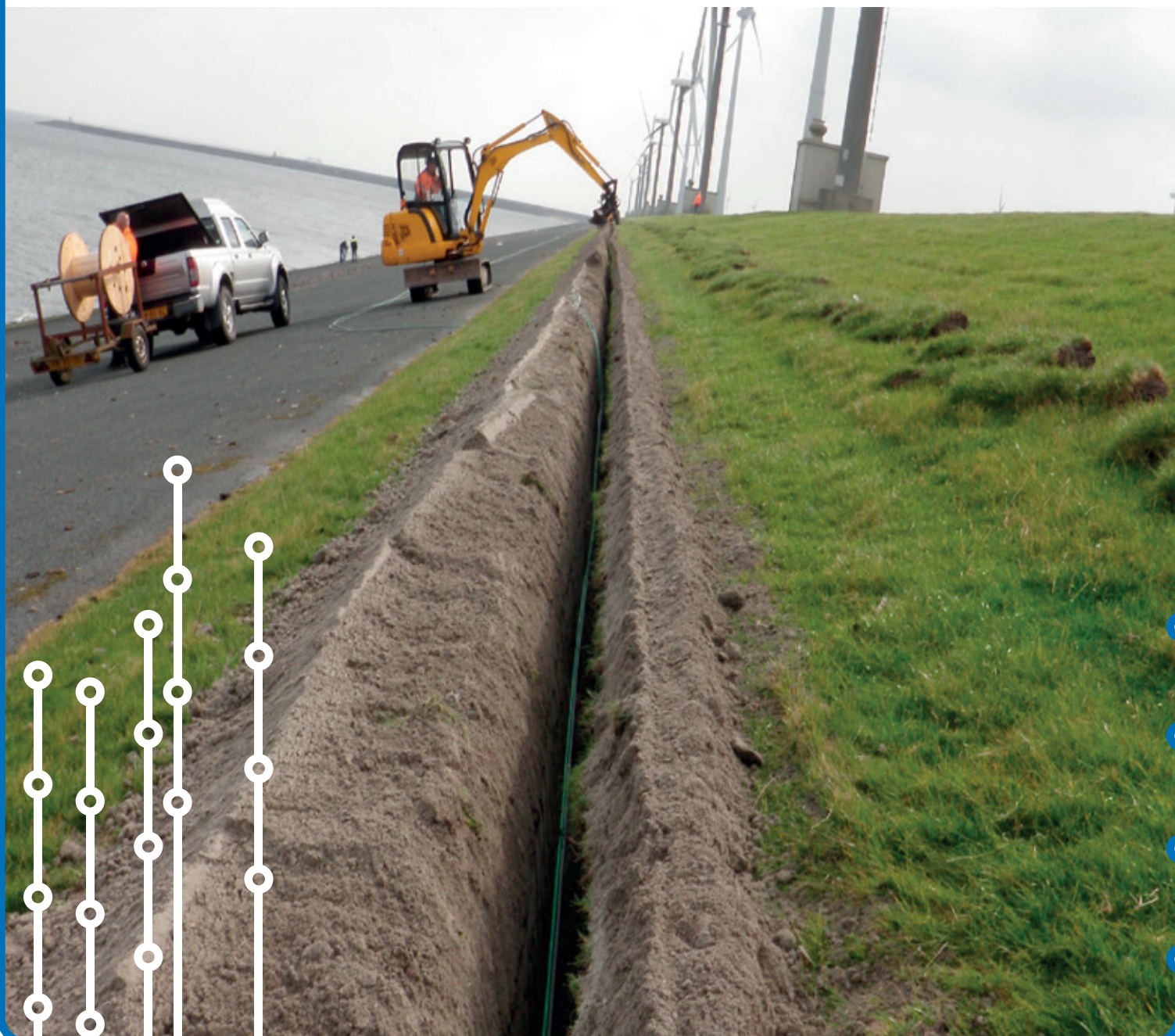
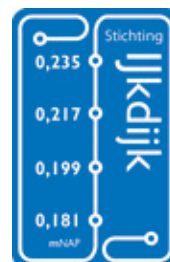
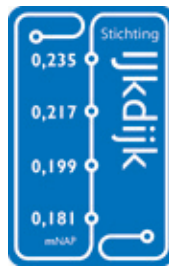


Best Practices

Stichting FloodControl IJkdijk

Meerwaarde voor de waterveiligheidspraktijk:
ontwikkelde kennis en toepassingen afkomstig
van projecten uit het eerste en tweede IJkdijk
ontwikkelprogramma





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

Auteurs: André Koelewijn, Deltares
Sander Bakkenist, BZ Innovatiemanagement B.V.
Suzanne Stoorvogel-van der Horst, Deltares

Vormgeving: mariëtte jongen vormgeving

Referentie: Koelewijn, A.R., Bakkenist, S, Stoorvogel-van der Horst, S.A. (2016). Best Practices Stichting FloodControl IJkdijk. Meerwaarde voor de waterveiligheidspraktijk: ontwikkelde kennis en toepassingen afkomstig van projecten uit het eerste- en tweede IJkdijkontwikkelprogramma. Stichting FloodControl IJkdijk.

© 2016 FloodControl IJkdijk

Trefwoorden:

Best practices, Stichting FloodControl IJkdijk, eerste- en tweede IJkdijk ontwikkelprogramma, meet- en monitoringssystemen, meerwaarde van monitoring voor beheer- en onderhoud-, beoordeling- en versterkingsfase

Met tekstuele bijdragen van: Miramap BV, Intech BV, VolkerWessels Telecom en Landustrie Sneek BV, Fugro Geoservices BV, BZ Innovatiemanagement B.V, Waterschap Noorderzijlvest, TNO, Deltares.

Externe referenten: Marco Veendorp (Arcadis).

Best Practices Stichting FloodControl IJkdijk

**Meerwaarde voor de waterveiligheidspraktijk:
ontwikkelde kennis en toepassingen afkomstig
van projecten uit het eerste en tweede IJkdijk
ontwikkelprogramma**

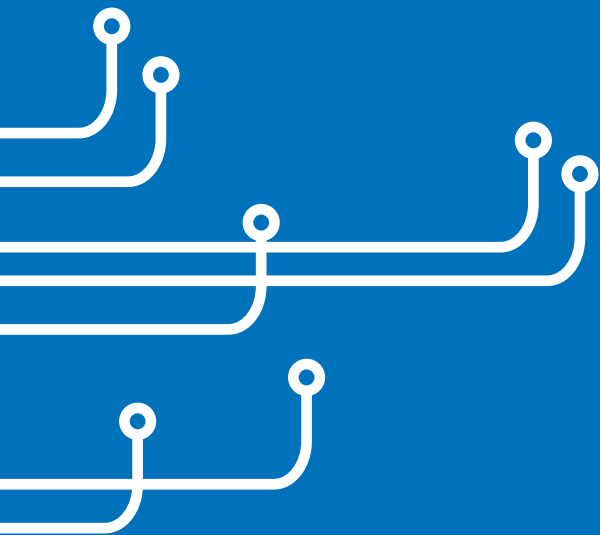
Auteurs

André Koelewijn *Deltares*

Sander Bakkenist *BZ Innovatiemanagement B.V.*

Suzanne Stoorvogel-van der Horst *Deltares*

april 2016



Samenvatting

In het eerste- en tweede IJkdijk ontwikkelprogramma is binnen de verschillende activiteiten, (onder meer) de LiveDijken en veldproeven veel kennis ontwikkeld. Dit betreft kennis over faalmechanismen aan keringen en de (door)ontwikkeling van innovatieve toepassingen en technieken voor de beheerderspraktijk.

Binnen deze best practices rapportage is de meerwaarde van de projecten bekeken vanuit drie primaire processen van de waterbeheerder: beheer en onderhoud, beoordelen (voorheen toetsen) en versterken.

De gedachte hierachter is dat betrouwbare technische informatie over keringen, bereikt door analyse van rationeel en gestructureerd meten en monitoren aan deze keringen een bijdrage levert aan het inzicht in de toestand van de dijken. Deze informatiecycclus van de kering stelt de beheerder in de gelegenheid om op ieder gewenst moment (tot real-time) inzicht in zijn beheersgebied te hebben. Hiermee wordt aangesloten op trends en behoeften als assetmanagement, continue inzicht en de zorgplicht. Specifiek kan dit daarnaast bijdragen aan het beoordelingsproces (door meer inzicht minder afkeuren of beter geprioriteerd voor versterking) en bij het scherper ontwerpen (binnen de versterkingsopgave). Ten slotte bieden de beschreven meet- en monitoringstechnieken inzicht en handvatten in het geval van calamiteuze situaties, informatie uit monitoringssystemen kan worden benut voor een betere (crisis)besluitvorming.

Waardevolle informatie over het gedrag van de dijk, en over het te verwachten gedrag bij maatgevende omstandigheden, kan ten dele worden ingewonnen met visuele inspecties, ten dele door reeds beschikbare informatie, bijvoorbeeld in archieven of bij omwonenden, beter te ontsluiten en ten dele door gericht op locatie nieuwe informatie in te winnen met adequate meet- en monitoringstechnieken.

De succesverhalen, of best practices, kunnen worden onderverdeeld in nieuwe of verbeterde meettechnieken, verbeterde proceskennis en de praktische integratie van verschillende data- en informatiebronnen om daarmee tot verbeterde kennis over het gedrag van dijken te komen. Kaders in de tekst belichten technieken en ontwikkelingen die door beheerders en onderzoekers als extra waardevol zijn beschouwd.

Succesvolle meettechnieken die in het IJkdijk ontwikkelprogramma naar voren zijn gekomen zijn:

- Sterk in prijs verlaagde volautomatische hellingmeetbuizen voor het bepalen van het deformatiepatroon over de diepte;
- Toepassing van infraroodbeelden voor vroegtijdige detectie van kwelstromen vanuit een dijk;
- Passieve radiometrie voor vochtbepaling in dijken en voor de kwaliteitsbepaling van asfaltbekledingen.

Daarnaast hebben de diverse speciale proefnemingen baanbrekende inzichten opgeleverd in de faalmechanismen piping (proeven in 2009 en 2012, praktijkonderzoek in 2013-2015), zettingsvloeiing (proef in 2014) en microstabiliteit (proeven in 2012, praktijkonderzoek in 2015).

Het project De Veenderij heeft een best practice opgeleverd voor het monitoren van droogte aan veenkaden, die ook op andere locaties toepasbaar is en invulling geeft aan de zorgplicht bij veenkaden. Deze bestaat uit twee stappen. De eerste stap is gericht op het middels Search and Select in kaart brengen van het onderzoeksgebied en hotspots te identificeren. In de proefopzet bleek een mobiele passieve microgolfstralingssensor hiervoor in het bijzonder geschikt. Hiermee worden vochtverschillen in de dijk tot 1 meter diepte opgenomen. Door herhaalmetingen ontstaat inzicht in lokale veranderingen. De tweede stap is erop gericht om hotspots uit te rusten met in-situ sensoren om de waterspanning te meten, gecombineerd met de inzet van peilbuizen om de stijghoogte in het pakket te meten. Beide metingen zijn complementair en geven informatie over de waterhuishouding van het dijklichaam. De gegevens kunnen worden gebruikt voor het uitvoeren van sterkteberekeningen in de modellen D-GeoStability en Plaxis en zijn daarmee direct aan de sterkte van de waterkering te relateren.

De opslag van data in het DDSC heeft geleid tot een standaardisatie van dijksensordata en kent veelbelovende mogelijkheden tot het trekken van generieke conclusies, bijvoorbeeld over de ontwikkeling van de freatische lijn onder uiteenlopende omstandigheden. Ook is het DDSC operationeel inzetbaar gebleken, zowel bij extreme

condities als voor bijzondere proefnemingen om het gedrag van de dijk onder extreme condities op een veilige wijze beter te leren kennen.

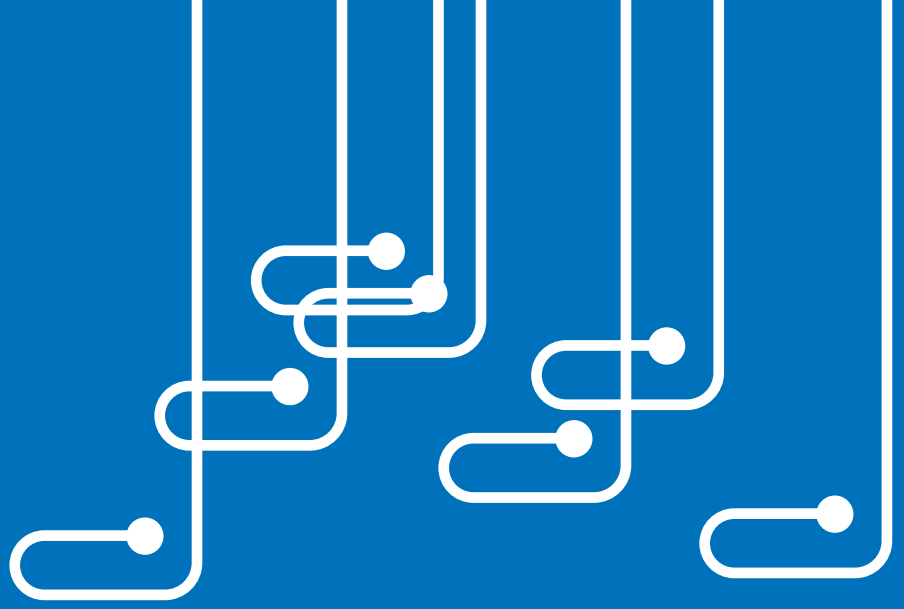
Onder meer met deze technieken en methoden is een nauwkeuriger en betrouwbaarder inzicht in de conditie van de waterkering verkregen voor de Ommelanderzeedijk in Groningen, de Waddenzeedijk bij Ameland, de regionale keringen bij Waternet en de Voorhavendijk van de Beatrixsluizen in Nieuwegein.

Voor de Ommelanderzeedijk, waar verreweg de grootste investeringen hebben plaatsgevonden van alle LiveDijken, is op voorzichtige wijze de return on investment bepaald. Met de investering van anderhalf miljoen euro is tenminste 20 miljoen euro bespaard op de dijkversterking, door toepassing van veel van de in IJkdijk-kader ontwikkelde technieken, kennis en wijze van samenwerken.

Uit de diverse proef- en praktijkonderzoeken is duidelijk naar voren gekomen dat geen enkele data- of informatiebron op zichzelf een compleet, volledig, nauwkeurig en betrouwbaar inzicht in de sterkte en het gedrag van dijken oplevert. Dit heeft onder meer te maken met de variabiliteit van de ondergrond en de inherente onzekerheid in metingen en in modellen. Het vertalen van lokale informatie naar grotere dijkstrekkingen kent daardoor inherente beperkingen. Hierdoor zijn de onzekerheden in de beoordeling van de dijkveiligheid op regionaal niveau vaak groter dan dijkbeheerders zich realiseren.

Om een kwalitatief goed, nauwkeurig en betrouwbaar beeld te krijgen van de sterkte van de waterkering blijkt het noodzakelijk om kwalitatief goede data en informatie in voldoende kwantiteit met elkaar te combineren. De vereisten blijken per dijk verschillend te zijn en sterk afhankelijk van de situatie.

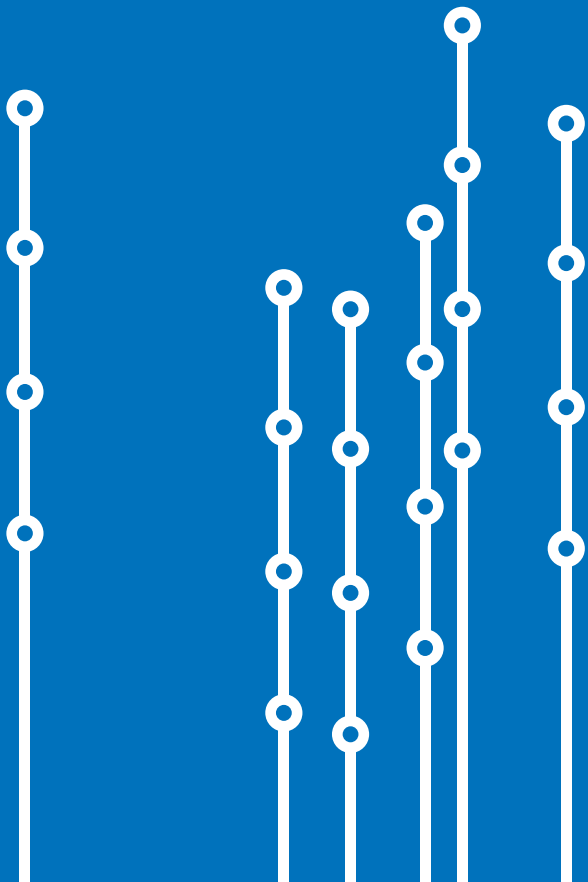
Verder is de kenmerkende aanpak van de Stichting IJkdijk om een impuls te geven aan de toepassing van informatie- en communicatietechnologie binnen een bepaald domein, in dit geval de Nederlandse dijkenwereld, een voorbeeld gebleken voor andere domeinen, waar eenzelfde samenwerking tussen overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen geconcretiseerd is in het gebruik van testlocaties en proefnemingen in de praktijk.





Inhoudsopgave

Samenvatting	5
Voorwoord	11
1 Inleiding	13
1.1 Aanleiding en projectscope	13
1.2 Selectie projecten	14
1.3 Focus	15
1.4 Leeswijzer	15
2 Aanpak en werkwijze IJkdijk ontwikkelprogramma	17
2.1 Werkwijze Stichting FloodControl IJkdijk	17
2.2 Gecombineerd toepassen van meettechnieken	17
3 Beheer en Onderhoud	19
3.1 Goed geïnformeerd is goed beheerd	19
3.2 Dijkkijken en begrijpen	19
3.3 Volautomatische hellingmeetbuis	20
3.4 De detectie van kwelstromen en pipingrisico verbeterd	20
3.5 De verdroging van veenkaden gekarteerd	21
3.6 Informatiecyclus op orde	24
3.7 Periodiek meten aan erosie verlaagt het risico op zettingsvloeiing	26
3.8 Het beter reguleren van de waterstand in de dijk: Dijk Data Service Center (DDSC)	29
4 Beoordelen	33
4.1 Met meten en informatie wordt het werkelijke gedrag van dijken betrouwbaar voorspeld	33
4.2 Gericht monitoren verkleint pipingprobleem	33
5 Versterken	37
5.1 Met meten en informatie de versterking optimaliseren	37
5.2 Door informatieverdieping valt er vóór de uitvoering al veel te besparen	37
5.3 De dijk versterken door het waterpeil te beheersen	39
5.4 Meten is weten en bespaart op versterkingsmaatregelen	40
6 Conclusies	43
7 Aanbevelingen	45
8 Literatuurlijst	47



Voorwoord

FloodControl IJkdijk werkt sinds 2004 aan innovaties voor de waterveiligheidssector. In de FloodControl IJkdijk-programma's werd gericht op het meten aan dijken en stresstesten, het analyseren van deze meetgegevens in relatie tot de dijksterkte, enkele innovatieve dijkversterkingsconcepten en het bieden van concrete handelingsperspectieven aan beheerders, voor beheer en onderhoud van waterkeringen en crisismanagement.

Met de rapportage van het project *Kennisdoorbraak* zijn de belangrijkste resultaten van de afgelopen jaren gebundeld. De gegevens afkomstig uit de uitgevoerde projecten (bezwijkexperimenten, LiveDijken, modelleringen, visualisatieprojecten, data- en informatieprojecten, etc.) zijn verzameld. Meet- en monitorresultaten zijn opgenomen in het Dijk Data Service Centrum. De in ieder project getrokken conclusies zijn met elkaar vergeleken zodat algemene conclusies ten bate van het beheer van waterkeringen en versterkingen hiervan getrokken kunnen worden. Hierbij wordt specifiek gericht op de waarde voor de beheerder ten bate van doelmatig en efficiënt waterkeringbeheer.

Belangrijk onderdeel van de eindrapportage zijn kennisborging en –deling op een dusdanige wijze dat beheerders en hun adviseurs de resultaten goed kunnen toepassen. Zij moeten in staat zijn om over de ontwikkelde kennis, kunde en systemen goede afwegingen te kunnen maken en handvatten hebben om dit te kunnen toepassen in de praktijk. De basis ligt hierbij in de technisch aangetoonde werkzaamheid van oplossingen in combinatie met financiële aspecten en concrete toepassingsvelden.

Op basis van de in de afgelopen jaren uitgevoerde projecten zijn er best practices opgesteld waarmee beheerder en adviseurs concrete handvatten krijgen om met de ontwikkelde en gevalideerde kennis in de beheerpraktijk te werken. De enige succesvolle innovatie is immers een innovatie die wordt gebruikt. Daarom focust FloodControl IJkdijk zich bij de integrale eindrapportage op ontsluiting, borging en actief gebruik. Hiervoor is als middel een Kennisplatform Dijkmonitoring (www.dijkmonitoring.nl) opgericht.

Om ervoor te zorgen dat ontwikkelde kennis gebruikt kan worden in de reguliere praktijk, is naast het kennisplatform een cursus ontwikkeld door stichting Wateropleidingen in samenwerking met FloodControl IJkdijk. In de cursus wordt actief gebruik gemaakt van de inhoud van dijkmonitoring.nl zodat de ontwikkelde kennis actief wordt ingezet.

De grootste uitdaging ligt nu in de volgende stap van gevalideerde innovaties naar toepassing in de praktijk concreet in te vullen. Hiervoor is en blijft intensieve samenwerking tussen de partners van de gouden driehoek nodig. Beheerders en bedrijven kunnen tot elkaar komen in het streven naar reguliere toepassing. Kennisinstellingen spelen een belangrijke onafhankelijke rol in kwaliteitsbewaking. De gouden driehoek waaraan FloodControl IJkdijk in de afgelopen jaren heeft gewerkt moet dit nu oppakken.

drs. I.L. Ritsema

wnd. voorzitter stichting FloodControl IJkdijk

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

NAP
0,181
mNAP

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en projectscope

In het eerste- en tweede IJkdijk ontwikkelprogramma van de Stichting FloodControl IJkdijk en voorgangers Stichting FloodControl 2015 en Stichting IJkdijk is binnen de verschillende activiteiten, (onder meer) de LiveDijken en veldproeven veel kennis ontwikkeld. Dit betreft kennis over faalmechanismen aan keringen en de (door)ontwikkeling van innovatieve toepassingen en technieken voor de beheerderspraktijk.

Deltares heeft vanuit Stichting FloodControl IJkdijk de opdracht gekregen om een 'Kennisdoorbraak' te realiseren. Deze kennisdoorbraak bestaat uit het bijeenbrengen van opgedane kennis en toepassingen en dit breder toepasbaar maken voor gebruikers en (kering)beheerders in de praktijk middels verschillende activiteiten, te weten:

- een lessons learned rapportage;
- een best practices rapportage;
- een monitoringshandleiding piping;
- het verbeteren en integreren van online omgevingen;
- informatie aansprekend beschikbaar stellen middels infographics;
- en de ontwikkeling van een cursus aanbod.

Voor dit project zijn omwille van scope en budget acht projecten uitgekozen, waarop de activiteiten worden toegepast, te weten:

LiveDijk XL, LiveDijk Ameland, LiveDijk de Veenderij, LiveDijk Utrecht, de veldproef Zettingsvloeiing, de All-in-One Sensor validatietest, de SUCCESS methodiek en het Dijk Data Service Centre (DDSC).

Binnen deze rapportage wordt de meerwaarde van de projecten bekeken vanuit drie primaire processen van de waterschappen: beheer en onderhoud, beoordelen en versterken.

De gedachte hierachter is dat betrouwbare informatie over keringen, bereikt door analyse van rationeel en gestructureerd meten en monitoren aan deze keringen een bijdrage levert aan het inzicht in de toestand van de dijken. Deze informatiecycle stelt de beheerder in de gelegenheid om op ieder gewenst moment (tot real-time) inzicht in zijn beheersgebied te hebben. Hiermee wordt aangesloten op trends en behoeften als assetmanagement, continue inzicht en de zorgplicht. Specifiek kan dit daarnaast bijdragen aan het beoordelingsproces (door meer inzicht minder afkeuren of beter geprioriteerd voor versterking) en bij het scherper ontwerpen (binnen de versterkingsopgave). Ten slotte bieden de in de rapportage beschreven meet- en monitoringstechnieken inzicht en handvatten die gebruikt kunnen worden binnen de calamiteiten fase, waarbij informatie uit monitoringssystemen benut kan worden voor een betere (crisis)besluitvorming.

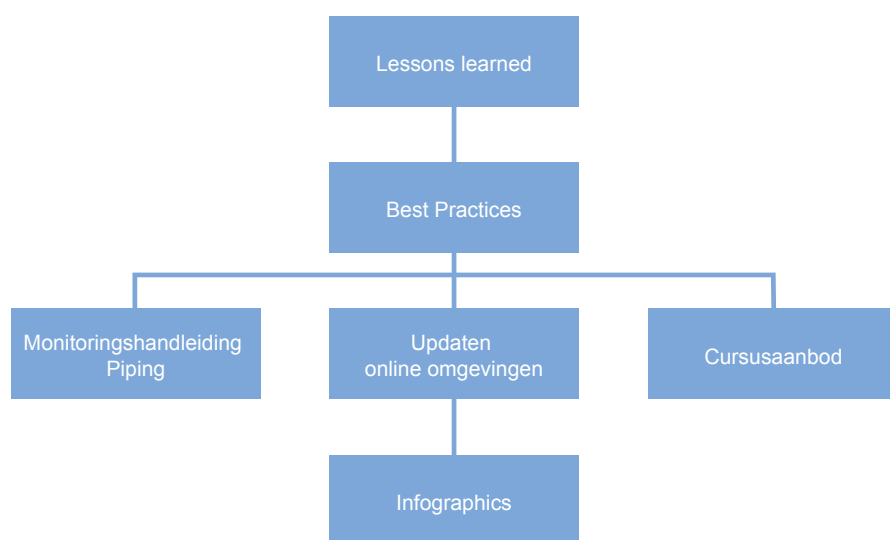
In de lessons learned rapportage (Stoorvogel-van der Horst, 2016) geschreven als onderdeel van dit project, is *gereflecteerd* op de ervaringen van de partijen betrokken bij de projecten, afkomstig uit de zogenaamde gouden driehoek (overheid, bedrijven en kennisinstellingen). Gereflecteerd is op de geleerde lessen van de acht projecten vanuit technisch-, bestuurlijk- en procesmatig perspectief. Om hiertoe te komen zijn 14 respondenten geïnterviewd. De belangrijkste bevindingen binnen deze lessons learned rapportage hebben als input gediend voor de gevolgde werkwijze (langs de drie processen van de waterkeringbeheerder) binnen deze best practices rapportage.

In de best practices rapportage wordt de *impact* van de activiteiten die binnen de projecten zijn ondernomen voor de beheerderspraktijk beschreven. Dit betreft onder andere kennis die een bijdrage levert aan het vaststellen van pipingrisico voor dijken, de validatie van inzet van infraroodmetingen voor verschillende doeleinden zoals kweldetectie en oppervlaktewatertemperatuur en antwoorden op kennisvragen omtrent dominante mechanismen die een rol spelen bij het ontstaan van zettingsvloeiingen. Kaders in de tekst belichten technieken en ontwikkelingen die door beheerders en onderzoekers als extra waardevol zijn beschouwd.

Naast de beschreven impact wordt in een aanvullende rapportage een extra verdiepingsslag gemaakt met het opstellen van het generieke monitoringshandleiding Piping. Deze handleiding geeft de waterkeringbeheerder

praktische handvatten in de beoordeling en monitoring van het faalmechanisme piping. Deze handleiding zal in mei 2016 beschikbaar komen.

Naast de lessons learned rapportage en best practices rapportage worden de bestaande online omgevingen met elkaar geïntegreerd. Dit betreft een upgrade van de inhoud en het gebruikersgemak van de website www.dijkmonitoring.nl en een duidelijkere link tussen voorgenoemde website, de Dijk Data Service Center website (www.openddsc.nl) en de algemene website van de stichting FloodControl IJkdijk (www.floodcontrolijkdijk.nl). Zowel de lessons learned rapportage als de best practices rapportage worden op deze websites ontsloten. Om de bevindingen en resultaten op een aansprekende wijze aan een breder publiek te kunnen ontsluiten wordt van de geselecteerde projecten een infographic gemaakt en worden deze op termijn op de website ontsloten. Ten slotte wordt een leerhuis ontwikkeld met een cursus aanbod, met daarin een uitgewerkte cursus.



Figuur 1 Samenhang activiteiten binnen Kennisdoorbraak project.

1.2 Selectie projecten



Figuur 2 Deltares. Geselecteerde projecten.

Acht projecten zijn gekozen: respectievelijk van noord naar zuid en van west naar oost:

- LiveDijk Ameland, aan de Waddenzeekering op Ameland.
- LiveDijk XL aan de Ommelanderzeedijk en de Lauwersmeerdijk in Groningen.
- All in One sensor validatie test op de testlocatie in Booneschans.
- De SUCCESS methodiek, toegepast bij waterschap Groot Salland (sinds 1 januari 2016 gefuseerd met waterschap Reest en Wieden, als waterschap Drents Overijsselse Delta).
- LiveDijk de Veenderij: een boezemkade ten zuiden van Amsterdam.
- LiveDijk Utrecht: bestaat uit de Grechtdijk in Woerden en de Voorhavendijk bij de Beatrixsluizen in Nieuwegein.
- De veldproef zettingsvloeiing aan de Plaat van Walsoorden in de Westerschelde.
- Ten slotte de database Dijk Data Service Center (DDSC), niet op de kaart weergegeven.

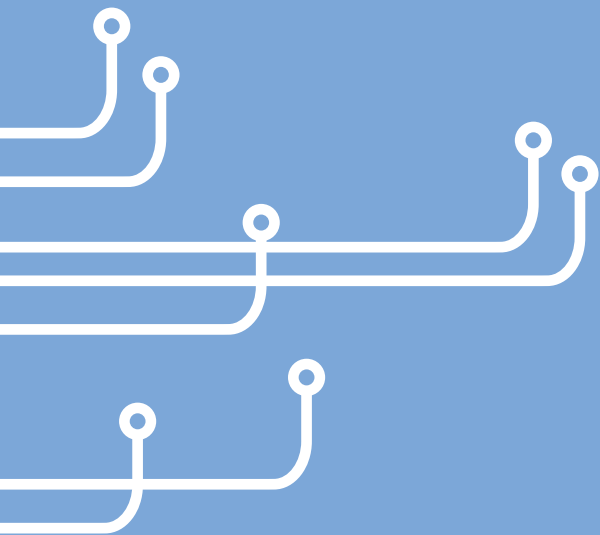
1.3 Focus

In deze rapportage zijn de Best Practices beschreven. Zoals genoemd zijn hier de kennis, technieken en toepassingen beschreven die door onderzoekers, het bedrijfsleven en beheerders als meest waardevol worden beschouwd. Resultaten van de projecten evenals de impact op de beheerderspraktijk zijn beschreven.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk twee beschrijft de aanpak en werkwijze die binnen het eerste- en tweede IJkdijk ontwikkelprogramma is gevolgd. De kenmerkende benadering is in nationaal en internationaal opzicht bijzonder te noemen en vindt ook in andere domeinen navolging.

Hoofdstuk Beheer en Onderhoud beschrijft de best practices uit de projecten waarbij de meerwaarde het best onder het proces van beheer en onderhoud geduid kan worden. Hoofdstuk vier gaat in op de impact uit activiteiten gericht op het beoordelingsproces. Hoofdstuk vijf beschrijft toepassingen binnen proeven die bijdragen aan het scherper kunnen ontwerpen bij de versterkingsopgave. Hoofdstuk zes beschrijft de conclusies, welke uitmonden in aanbevelingen te lezen in hoofdstuk zeven.



2 Aanpak en werkwijze IJkdijk ontwikkelprogramma

2.1 Werkwijze Stichting FloodControl IJkdijk

De Stichting FloodControl IJkdijk en voorgangers Stichting FloodControl 2015 en Stichting IJkdijk hebben de afgelopen tien jaren uitgebreid onderzoek verricht naar de ontwikkeling en toepassing van (inter)nationaal vermarktbare monitoring- en informatiesystemen van dijken. Onderzoek betrof onder andere het valideren van monitoring- en data-analysetechnieken, ontwikkeling van systemen en toepassing in de praktijk.

Eerste- en tweede IJkdijkontwikkelprogramma voorbeeldwerkwijze voor andere domeinen

De FloodControl IJkdijkprojecten hebben een belangrijke rol gespeeld als voorbeeldproject en -traject. De werkwijze heeft als voorbeeld gediend voor projecten die in het verlengde hiervan liggen. Een toepassing hiervan is STOOOP (Sensortechnologie Toegepast Op Ondergrondse Pijpleidingen). Kennisinstelling TNO gaat hierbij samenwerken met de netbeheerders van gasleidingen en waterleidingen. Hierin wordt gekeken wat de invloed is van zettingen op de risico's van breuken in leidingen. Dezelfde werkwijze wordt toegepast door leidingen op testlocaties in het noorden van Nederland te begraven en gecontroleerd te belasten en d.m.v. sensoren metingen te verrichten, zoals bij de IJkdijk proeven is gedaan. Op een aantal locaties in Nederland wordt ook het gedrag van echte leidingen bestudeerd.

Daarnaast is er het project Smart Dairy Farming waarbij door middel van sensor technologie op afstand de gezondheid van koeien gemonitord kan worden. Dichterbij, binnen het waterveiligheidsdomein wordt voor de Project Overschrijdende Verkenningen (PoV) de werkwijze toegepast in het Hoogwater Beschermings Programma (HWBP). Het FC IJkdijkprogramma heeft geleerd dat deze werkwijze zowel inhoudelijk als procesmatig toegepast kan worden binnen andere domeinen. De werkwijze heeft betrekking op zowel samenwerkingsverbanden binnen de gouden driehoek als de werkwijze met testlocaties en 1:1 proeven.

Ook is er binnen de projecten interesse vanuit het buitenland geweest om aan proeven deel te nemen. Zowel binnen de All-in-one Sensor Validatie Test als binnen de veldproef Zettingsvloeiing hebben buitenlandse partijen innovatieve technieken toegepast om hier meer ervaring mee op te doen.

2.2 Gecombineerd toepassen van meettechnieken

In 2005 beschreef STOWA in haar toekomstvisie voor inspectie en monitoring van waterkeringen een getrappt monitoringssysteem waarbij verschillende informatiebronnen (remote sensing, in situ, archieven, inspecties, meldingen van derden, et cetera.) werden gecombineerd om uiteindelijk het beheer van waterkeringen zo goed mogelijk te kunnen ondersteunen. De data- en informatiebronnen zouden elkaar ondersteunen bij de beeldvorming en het bepalen van uit te voeren werkzaamheden. Aan het combineren van verschillende data- en informatiebronnen is in de bezwijkexperimenten en LiveDijk-projecten vorm gegeven.

De bezwijk-experimenten en LiveDijk projecten hebben geleerd dat geen enkele data- of informatiebron op zichzelf een compleet, volledig, nauwkeurig en betrouwbaar inzicht oplevert in de sterkte en het gedrag van dijken. Dat geldt voor de parameters die worden gebruikt in de toetsregels, voor visuele inspecties en voor *state of the art* monitoringstechnieken. Een van de oorzaken hiervan is dat uitgevoerde puntmetingen, vaak toegepast in lage ruimtelijke spreiding, iets zeggen over de op dat punt gemeten toestand (waarbij rekening moet worden gehouden met meetfouten) en dat dit in heterogene situaties niet betrouwbaar en nauwkeurig te vertalen is naar het omliggende gebied. Toegepaste modellen zijn erg gevoelig voor dominante parameters en een gebrekkige hoeveelheid ingevoerde data. De bandbreedte van de onzekerheid van sterkteberekeningen is fors terwijl het niet gebruikelijk is om deze inzichtelijk te maken. Daarnaast is het niet gebruikelijk om buiten de regulier toegepaste werkwijzen aanvullende data en informatie in te winnen ter verdere staving van het gevormde oordeel.

Faalmechanismen worden geïnitieerd op zeer lokaal niveau met bij optreden ervan veel grotere regionale of landelijke gevolgen. Het op regionaal niveau beoordelen van dijken met lokaal ingewonnen data blijkt een forse band-

breedte van onzekerheid met zich mee te brengen waarvan de beheerder zich waarschijnlijk niet bewust is. Een goede combinatie van data- en informatiebronnen kan bijdragen aan verbetering.

Om een kwalitatief goed, nauwkeurig en betrouwbaar beeld te krijgen van de sterkte van de waterkering, is het noodzakelijk om kwalitatief goede data en informatie van voldoende kwantiteit met elkaar te combineren.

In navolgende hoofdstukken zijn toepassingen uitgewerkt waarbij de combinatie van verschillende meettechnieken gezamenlijk tot beter inzicht leiden in de sterkte van dijken dan individuele metingen en modelleringen. Door het toepassen van verschillende meettechnieken, data en informatiebronnen krijgt de waterkeringbeheerder een nauwkeuriger en betrouwbaarder inzicht in de toestand van zijn waterkering. Dat is gebleken bij onder andere de Ommelanderzeedijk, de regionale keringen van Waternet, de Waddenzeedijk bij Ameland en de Voorhavendijk van de Beatrixsluizen.

De ingewonnen informatie van de Ommelanderzeedijk bijvoorbeeld wordt gebruikt bij het vormgeven van de dijkversterking door Noorderzijvest. Het heeft het toetsresultaat aangescherpt wat tot aanvullend inzicht heeft geleid in de gevoeligheid van de kering voor de beschouwde faalmechanismen. De gebruikte data, de uitgevoerde analyse en het gebruik hiervan bij de dijkversterking zijn navolgbaar en controleerbaar waardoor ook invulling wordt gegeven aan de zorgplicht.

De conclusie die wordt getrokken is dat per dijk moet worden bepaald welke data en informatie benodigd is om een kwalitatief goed, nauwkeurig en betrouwbaar oordeel te vellen over de dijksterkte. Op basis hiervan kan vervolgens worden besloten hoe deze data ingewonnen wordt met een combinatie van technieken en bronnen.

3 Beheer en Onderhoud

3.1 Goed geïnformeerd is goed beheerd

Tijdens de beheerfase kunnen zich lokaal verslechtingen voordoen in dijken of kunnen er door hoge belasting situaties ontstaan waarbij meer inzicht nodig is. De toepassing van meet- en monitoringstechnieken, het verkrijgen van betrouwbare, nauwkeurige, complete en beschikbare informatie, dit bijhouden en op systematische wijze mee omgaan, maakt het mogelijk direct een actueel inzicht te verkrijgen in de staat van de kering, deze te volgen, te voorspellen en tijdig maatregelen te treffen op het moment dat risicovolle situaties zich voordoen. Daarbij levert informatie een belangrijke basis voor het kunnen realiseren van doelmatig life cycle management.

Enkele voorbeelden

- Verzakkingen van het dijklichaam, waterkeringvreemde elementen of kunstwerken kunnen met het oog onopgemerkt blijven. Echter kunnen zakkings- of vervormingssnelheid een indicatie geven voor bezwijken. De verzakkingen kunnen langzamerhand een kritiek punt bereiken waarna plotseling bezwijken kan optreden met alle gevolgschade van dien. Het tijdig detecteren van verzakkingen leidt tot het tijdig in kunnen grijpen.
- Kleine schades aan bekledingen (steenzettingen, asfalt, kwaliteit/gezondheid grasmatten) kunnen onopgemerkt blijven. Een kleine schade kan in geval van belasting van de bekleding leiden tot grotere gevolgschade waardoor een groter beslag wordt gelegd op onderhoudsgelden. Het tijdig detecteren hiervan ondersteunt doelmatig levenscyclusbeheer/asset management.
- Inzicht in de waterhuishouding van dijken kan uitdroging of juist vernatting tijdig detecteren in hiervoor gevoelige dijken. Door een combinatie met dijkconditionering kan voorkomen worden dat veendijken uitdrogen of juist onacceptabel hoge waterspanningen in dijken ontstaan.
- Door het continu inspecteren van kruisingen van kabels en leidingen met waterkeringen kunnen bijvoorbeeld lekkages in waterleidingen tijdig worden opgespoord. Waterleidingen kunnen worden afgesloten zodat gevolgschade kan worden beperkt door het repareren van de leiding.

Vormen nieuwe monitoringstechnieken met sensoren dan een alternatief voor visuele inspecties? Nee. Visuele inspecties vormen de kern van het beheer- en onderhoudsproces van waterkeringen, gecombineerd met de aanwezige gebiedskennis. Het gestructureerd meten en verzamelen van dijk informatie door de tijd heen vormt in voorkomende gevallen een belangrijke, soms onmisbare, aanvulling hierop.

3.2 Dijkkijken en begrijpen

In 2011 zijn grote delen van de Ommelanderveedijk tussen Delfzijl en Eemshaven in de verlengde derde toetsronde afgekeurd op binnenwaartse macrostabiliteit. Op grond van de bestuurlijke en maatschappelijke verantwoordelijkheid is een verscherpt inspectieregime opgezet om in de periode tot aan versterken de dijk grootschalig te monitoren. Bij het vormgeven van de plannen voor de LiveDijk XL, verdeeld over ruim twintig kilometer langs de Ommelanderveedijk, is gebruik gemaakt van de kennis die bij de inspecteurs, beheerders, experts maar ook omwonenden aanwezig was. Zij hebben informatie verstrekt die aanvullend bleek op uitgevoerde metingen en modelleringen in het kader van de toetsing op veiligheid. Met deze informatie zijn lacunes in de kennis gedefinieerd waarop vervolgens gericht aanvullende data en informatie is verzameld. Dit vond plaats met meetsystemen, maar ook door archiefonderzoek.

De kennis die bij inspecteurs, beheerders en omwonenden aanwezig is, is van belang om te betrekken in het beheerproces van de gehele levenscyclus.

In de Project Overstijgende Verkenning piping vond het project 'Werkplaats Zwarte Water' plaats. In deze werkplaats draaide het om het delen van kennis op narratieve wijze waarbij de input van impliciete kennis een belangrijke rol speelde. Daarbij werd gewerkt volgens de principes dat bij het verkrijgen van een beeld van de dijk gebruik wordt gemaakt van mensen, modellen en metingen. Deze drie leveren allen data en informatie en moeten van hoge kwaliteit en in balans zijn wil een gedegen oordeel gevormd kunnen worden.

Visuele inspecties, de inbreng van ervaring en gevoel, van impliciete kennis zijn daarmee van groot belang om tot dijkbegrijpen te komen. Het vult de metingen en modellen aan, en vice versa.

3.3 Volautomatische hellingmeetbuis

Meettechniek volautomatische hellingmeetbuis (SAAF)

Een hellingmeetbuis is een monitoringsapparaat om vervormingen in de horizontale richting te meten. Hiertoe wordt een verticale pijpflexibele PVC-buis met een inwendige diameter van 2,6 cm in de ondergrond aangebracht tot in een onvervormbare laag, in Nederland meestal een Pleistocene zandlaag. Door middel van een sonde wordt de toename van de hoekverdraaiing bepaald per lengte-eenheid en zodoende de verplaatsing per lengte-eenheid. Door meerdere metingen in de tijd uitvoeren kan de totale verplaatsing worden bepaald. De Engelse term voor dit instrument is inclinometer, een term die vaak ook in het Nederlands wordt gebruikt. In de buis wordt een streng van flexibel verbonden starre elementen geplaatst, waarbij hoekverdraaiing in de knooppunten wordt bepaald in drie dimensies, ervan uitgaande dat de richting van de zwaartekracht constant blijft. Onder de (verifieerbare) aanname dat het onderste punt niet verplaatst of verdraait kan een drie-dimensionaal vervormingspatroon over de gehele hoogte van de buis worden bepaald.

Toepassing en meerwaarde voor de waterkeringbeheerder

Er zijn diverse aanbieders van volautomatische hellingmeetbuizen (producent Measurand uit Canada, leverancier voor Europa is Inventec), vaak wordt dit type instrument aangeduid met de merknaam van de aanbieder die in de voorbereidingen voor de IJkdijkproef met macrostabiliteit in 2008 een veel goedkoper systeem aanbood dan op dat moment gangbaar was, door toepassing van moderne micro-elektronica. Dit systeem koppelt een hoge meetnauwkeurigheid, een hoge meetfrequentie (tot eens per 10 seconden) en een korte onderlinge afstand (doorgaans iedere 0,30 m, maar ook afstanden van 0,15 m en 0,50 m komen voor). Voorheen werden vrijwel uitsluitend handmatige systemen toegepast, met een lagere meetfrequentie, vaak een lagere meetnauwkeurigheid, een veel beperkter meetbereik en gebrek aan inzetbaarheid in risicovolle fasen.

Inmiddels is deze techniek succesvol toegepast in diverse projecten waar informatie over het vervormingspatroon in de diepte nodig is. Naast de macrostabiliteitsproef in de IJkdijk in 2008 is het systeem ingezet in Boston (Engeland), waar essentiële informatie over de bezwijkvorm van een waterkering in de stad kon worden verkregen zodat een ingrijpende versterking achterwege kon blijven, bij de All-in-one sensorvalidatietest in 2012 als referentiemonitoring, bij de proeven in het kader van 'Dijken op Veen' (Markermeerdijk) en bij de proef in de Leendert de Boerspolder (2014-2015). Daarnaast wordt het systeem veelvuldig ingezet bij bouwputten.

De SAAF volautomatische hellingmeetbuis maakt het de beheerder mogelijk om tegen een redelijke prijs-kwaliteitverhouding een hellingmeetbuis in te zetten om een vervormingsprofiel over de diepte te verkrijgen op een bekende zwakke plek in de dijk, waar dit voorheen vrijwel onbetaalbaar was.

3.4 De detectie van kwelstromen en pipingrisico verbeterd

Binnen LiveDijk de Veenderij, LiveDijk Ameland en LiveDijk XL is in de periode 2013-2015 een techniek getest door InTech Dike Security Systems. De techniek heet Intech infrarood kwel dijkscan.

Deze techniek berust op het op afstand meten van de uitstraling van infrarood van de waterkering met infrarood sensoren in combinatie met speciaal ontwikkelde software. Doordat met deze techniek op afstand wordt gemeten wordt het dijklichaam niet verstoord of verzwakt.

Dit is een indirecte meetmethode, er blijft steeds een vertaalslag nodig naar wat een veranderend warmtebeeld betekent voor de toestand van het dijklichaam.

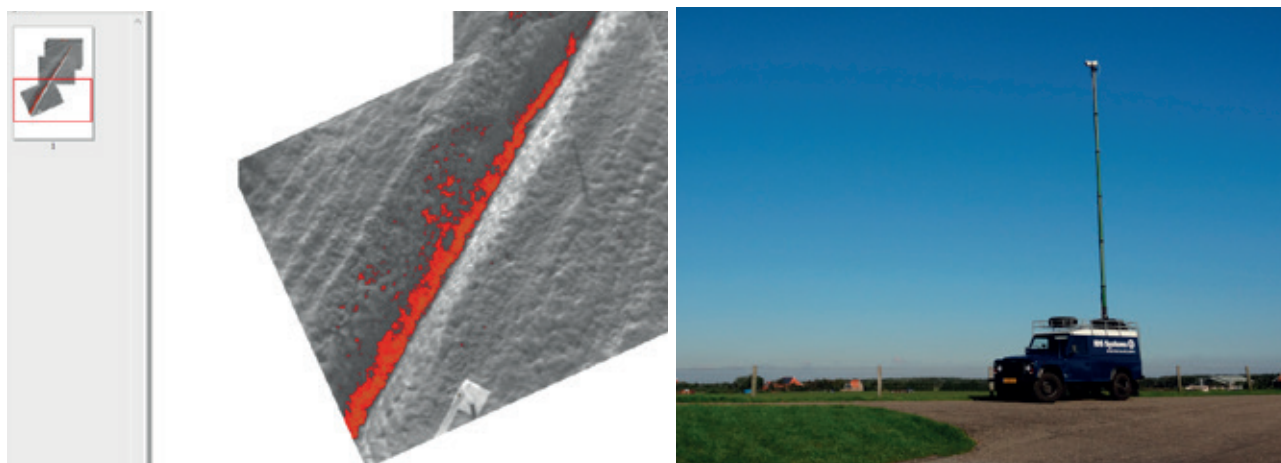
Waarom en waarvoor is het gebruikt?

De temperatuurmetingen worden vastgelegd door een infraroodcamera. De camera is zowel in vaste opstelling als gemonteerd op een terreinwagen inzetbaar; hiermee ontstaat een mobiel platform dat op uiteenlopende locaties kan worden ingezet door op of langs de dijk te rijden. In de figuur is te zien hoe water uit het dijklichaam de temperatuur van het water in de teensloot bepaalt.

Infrarood temperatuurmetingen kunnen worden gebruikt voor het waarnemen van kwelstromen – daar stromend grondwater een andere temperatuur heeft dan stilstaand water - en aanwezige scheuren in dijklichamen. Deze toepassing kan worden ingezet voor intensieve controle tijdens bijzondere proef- of beheersituaties.

Wat heeft de waterbeheerder er aan in de praktijk?

Bij periode van een hoge waterstand en langdurige belasting van een waterkering kan het van belang zijn voor de beheerder om de optredende kwelstroom of optredende scheurvorming vroegtijdig te signaleren en met regelmaat te volgen gedurende deze periode. Het monitoren gebeurt bij voorkeur op afstand om het belaste dijklichaam zoveel als mogelijk te ontzien. Bij de LiveDijk Ameland en LiveDijk XL is gewerkt met infrarood temperatuurmetingen om hierin te voorzien.



Figuur 3 InTech Dike Security Systems. Invloed water uit dijklichaam op temperatuur water in teensloot.

3.5 De verdroging van veenkaden gekarteerd

Binnen LiveDijk de Veenderij, ook wel 'droogteproef' genoemd zijn verschillende technieken ingezet, waaronder een techniek van Miramap. Miramap heeft een technologie ontwikkeld om op een snelle manier ruimtelijke informatie te verkrijgen van vochtcondities van een kadedijk. Hierbij wordt gebruik gemaakt van metingen van een L-band radiometer, een meettechniek die zijn oorsprong kent in de ruimtevaart, maar door Miramap is doorontwikkeld voor dijkinspectietoepassingen. Met een L-band radiometer is het mogelijk om de ruimtelijke variatie van bodemvocht van de eerste centimeters in kaart te brengen met een ruimtelijke resolutie van 1 meter.

Een microgolven radiometer meet de uitstraling van het grondoppervlak in het microgolvenbereik. Het is een passieve sensor en voor een L-band radiometer meet hij bijvoorbeeld de natuurlijke uitstraling bij een golflengte van 21 cm. De radiometer drukt deze uitstraling uit in helderheidstemperaturen. Deze helderheidstemperaturen zijn een functie van de temperatuur, vocht en materiaal van de ondiepe ondergrond tot maximaal 1 meter diepte. Omdat water direct invloed uitoefent op het electro-magnetische veld, heeft de hoeveelheid water in de bodem een hele sterke relatie met de gemeten helderheidstemperaturen. Met behulp van speciale fysische modellen kan dan het bodemvocht signaal goed uit de gemeten helderheidstemperaturen gehaald worden. In het project meet de radiometer al rijdend elke seconde met een ruimtelijke resolutie van 1 meter. De metingen zijn gekoppeld aan GPS-waarnemingen om zo ook de plaats van de observaties te bepalen.



Figuur 4 *Miramap, kade de Veenderij, nabij een watergang van de Klein Duivendrechtsche Polder.*

Waarom en waarvoor is het gebruikt?

Tijdens de droge zomer van 2003 verschoof eind augustus in Wilnis een veenkade. Enkele dagen later volgde de afschuiving van een veenkade nabij Terbregge. Uiteindelijk vonden gedurende de nazomer van 2003 op circa 50 locaties verspreid over het land serieuze scheurvormingen of vervormingen van (veen-) kaden plaats. De langdurige droogte vormde een belangrijke oorzaak voor deze doorbraken en vervormingen. Op basis van deze gebeurtenissen is "langdurige droogte" als belastingssituatie geïdentificeerd.

Direct na de identificatie van langdurige droogte als nieuwe belastingssituatie dienden de waterschappen op korte termijn grote lengtes kadestrekkingen te inspecteren. Dit resulteerde in een enorme inspanning. In 2004 is daarom de vraag gesteld welke technische hulpmiddelen de visuele inspectie van veenkaden konden ondersteunen. Daaruit is geconcludeerd dat inspectietechnieken (in theorie) een belangrijke (ondersteunende) bijdrage kunnen leveren aan de inspectie van verdroogde veenkaden. Echter er was weinig ervaring met de (on)mogelijkheden van deze inspectietechnieken in de praktijk.

Ten opzichte van 2004 zijn er veel ontwikkelingen geweest m.b.t. de meet- (en inspectie-) technieken. Op basis daarvan is het zinvol om vast te stellen op welke wijze deze technieken kunnen bijdragen aan bovengenoemde problematiek. De doelstelling binnen LiveDijk de Veenderij was daarom:

"Welke meettechnieken kunnen de effecten van verdroging (droogtegevoeligheid) van de veenkade volgen". De gebruikte meetlocatie is de kade de Veenderij (zie figuur 4.) en ingericht in 2011 – 2012. De locatie ligt in het beheersgebied van Waternet. De Veenderij ligt even ten zuidwesten van Amsterdam en grenst aan een watergang van de Klein Duivendrechtsche Polder.

Binnen dit LiveDijk project heeft Miramap onderzocht hoe goed de effecten van verdroging van de veenkade te volgen zijn aan de hand van observaties met MIRA technologie. Door op verschillende tijdstippen de dijk in te meten is de ruimtelijke vochtdynamiek van een dijklichaam in kaart gebracht en deze informatie is gebruikt om de effecten van verdroging te ontrafelen. De metingen zijn gevalideerd met in-situ bodemvochtmetingen.

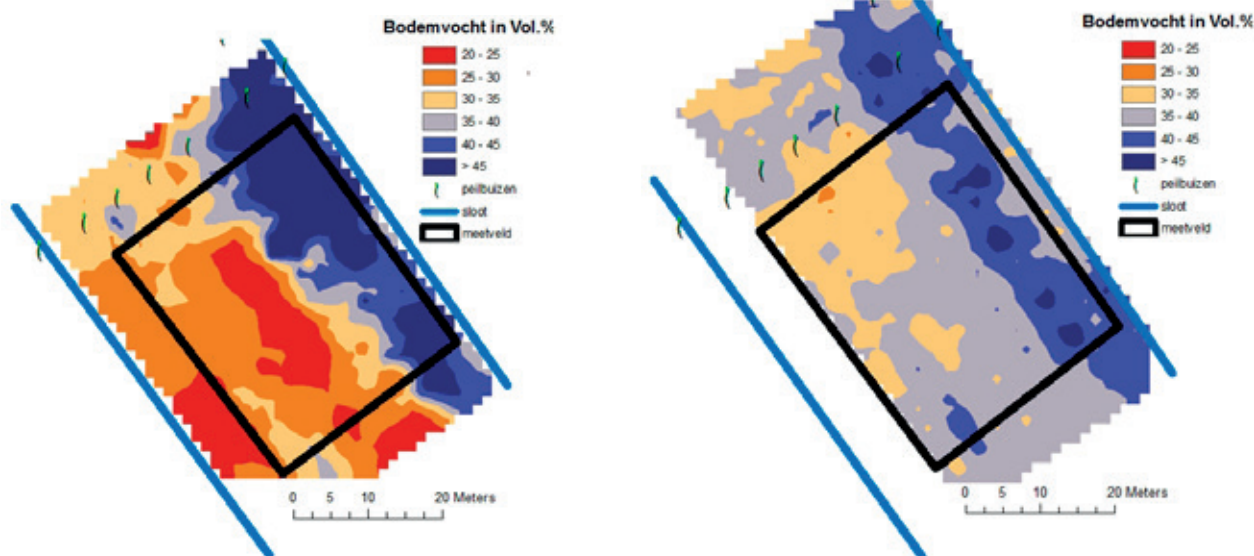
Wat heeft de waterbeheerder er aan in de praktijk?

Met passieve microgolven radiometrie wordt op een non-destructieve efficiënte manier nauwkeurig bodemvocht gekarteerd met een ruimtelijke resolutie van 1 m. Nauwkeurige bodemvochtkaarten verschaffen informatie over de waterhuishouding van de dijk. Nauwkeurige bodemvochtinformatie in de tijd kan gebruikt worden om de kwetsbaarheid van de kadedijk in kaart te brengen. Droogtegevoelige en dus kwetsbare gebieden van de dijk worden in beeld gebracht voor de beheerder. Hoewel het absolute vochtgehalte nog niet één op één te herleiden is naar dijksterkte, kunnen de technieken door het signaleren van afwijkingen in vochtgehalten een betrouwbare ondersteuning van visuele inspecties zijn. De beheerder is in staat de dijk te monitoren en gericht inspecties uit te voeren.

Ook kunnen gerichter in-situ sensoren worden geplaatst. Een visuele inspectie onderzoekt de fysieke toestand van de waterkering, maar biedt geen compleet inzicht in de toestand binnenin de waterkering. Een visuele inspectie kan verdroging of verzadiging slechts gedeeltelijk detecteren via scheurvorming, verzakking of natte plekken, maar veranderingen van vochtcondities binnenin de dijk zijn zoals beschreven niet met het blote oog zichtbaar.

1 Oktober 2011

23 Augustus 2012



Figuur 5 Miramap, Ruimtelijk bodemvocht van de Kadedijk op twee verschillende tijdstippen. De blauwe lijnen geven de sloten weer. De linkersloot ligt bij de kruin van de kade en wordt aangegeven als het buitenwater en de rechtersloot ligt aan de teen van de kade en wordt aangegeven als de teensloot. De zwarte lijn geeft het meetveld aan. Verder zijn de microgolfwaarnemingen geconverteerd naar bodemvocht en laten duidelijk een sterke vochtdynamiek zien. De helling is het gevoeligste voor verdroging en bij de teen (links bovenin) zijn een aantal natte zones zichtbaar, die ook het gehele jaar nat zijn.

De verschillende gecreëerde bodemvochtkaarten laten een sterke ruimtelijke dynamiek zien in bodemvocht waarbij met name opvalt dat bepaalde locaties op de helling de grootste bodemvochtvariatie laten zien en een aantal locaties aan de teen van de dijk continu nat zijn. Dit is ook duidelijk de kwelzone van deze dijk. De gebieden op de helling met de sterkste bodemvochtvariatie in de tijd zijn het meest kwetsbaar voor droogte omdat zij de sterkste uitdroging vertonen. Verder is in dit onderzoek ook aangetoond dat de bodemvochtwaarnemingen een goede correlatie hebben met de grondwaterstanden tot ongeveer 1 meter diepte en dus een sterke potentie laten zien om microgolven radiometer observaties te gebruiken om freatische lijnen van de veenkaden te bepalen. Dit is met name belangrijk bij onderzoek naar de stabiliteit van dijken omdat de freatische lijn een belangrijke parameter is in stabiliteitsberekeningen.

Vooruitzichten van de toepassing

LiveDijk de Veenderij heeft een best practice opgeleverd voor beheerders voor het monitoren van droogte aan veenkaden met inzicht welke technieken wel en niet zinvol zijn bij het meten van verdroging door gecombineerde inzet van technieken in twee stappen, die ook op andere locaties toepasbaar is en invulling geeft aan de zorgplicht bij veenkaden.

De eerste stap in de aanpak is gericht op het middels *search and select* in kaart brengen van het onderzoeksgebied en hotspots te identificeren. In de proefopzet bleek de MIRA technologie van MiraMap (www.dijkscan.nl) hiervoor in het bijzonder geschikt. Met een mobiele passieve microstralingssensor worden vochtverschillen in de dijk tot 1 meter diepte opgenomen. Door herhaalmetingen ontstaat inzicht in lokale veranderingen.

De tweede stap is er op gericht om *hotspots* uit te rusten met in-situ sensoren om de waterspanning te meten, gecombineerd met de inzet van peilbuizen om de stijghoogte in het pakket te meten. Beide metingen zijn complementair en geven informatie over de waterhuishouding van het dijklichaam. De gegevens kunnen worden gebruikt voor het uitvoeren van sterkteberekeningen in de modellen D-GeoStability en Plaxis en zijn daarmee direct aan de sterkte van de waterkering te relateren.

3.6 Informatiecyclus op orde

Binnen het project LiveDijk XL is de techniek Passieve Microgolf Radiometrie (MIRA technologie) van Miramap toegepast voor de locatie Lauwersmeerdijk. Voor waterschap Noorderzijlvest, is continu inzicht in de sterkte van de dijk van belang. De sterkte van de dijk hangt onder andere af van de asfaltbekleding waarmee het dijklichaam is afgedekt. De bekleding - die de dijk als een stevige schil afdekt - voorkomt dat golven en overslaand water de onderliggende grond kunnen verweken en wegspoelen. Gedetailleerd inzicht in de kwaliteit van de asfaltbekleding, en de mate, locatie en tijdstip van mogelijke achteruitgang van zwakke plekken is de belangrijkste informatiebehoefte van de eindgebruiker. Juist in het kader van de 'nieuwe' zorgplicht loont het de moeite om dit traject te onderzoeken met de MIRA technologie.

Het totaal aan informatie (de Passieve Microgolf Radiometrie en boringen) geeft de beheerder inzicht in kwetsbare locaties, zodat indien nodig noodvoorzieningen kunnen worden getroffen. Daarnaast geven de metingen aan of de gehele asfaltbekleding dient te worden gereconstrueerd, of dat wellicht delen van de bekleding nog voor een langere periode veilig kunnen functioneren. De beheerder heeft het idee dat de asfaltkwaliteit de laatste tijd snel slechter is geworden. Dit is bevestigd met verschilbeelden tussen de MIRA metingen van 2014 en 2013, en die van 2015 en 2014.

Naast de verschilbeelden is de beheerder geïnteresseerd in de sterkte van het asfalt. Uit het onderzoek blijkt dat de MIRA metingen iets zeggen over de structuur van het asfalt, met name of er sprake is van een losliggende slijtlaag, of er holle ruimten in en/of onder het asfalt zijn en of de dichtheid van het asfalt afwijkt. Na vergelijking met Valgewicht Deflectie Metingen (VGD) lijkt het erop dat deze indicatoren ook iets zeggen over de sterkte. Nader onderzoek wordt hier aanbevolen.

Binnen onderstaand kader is de techniek en wijze van toepassing nader beschreven.

Onderzoek naar asfaltbekledingen bij Noorderzijlvest (LiveDijk XL)

De techniek van Miramap is toegepast binnen het LiveDijk XL-project waarbij gebruik gemaakt is van de Passieve Microgolf Radiometrie, oftewel MIRA technologie van Miramap. Deze technologie meet de natuurlijke uitstraling van de ondergrond in het microgolvenbereik. Door het al rijdend uitvoeren van niet-destructieve asfaltmetingen met MIRA wordt een gedetailleerde, vlakdekkende opname gemaakt. Dit ruimtelijk beeld geeft gedetailleerd inzicht in het vochtgehalte in het asfalt en de sterkte van de bekleding en is daarmee bruikbaar om zwakke plekken te lokaliseren en, door herhaald te meten, te volgen in de tijd. Op de aldus gelokaliseerde zwakke plekken is door middel van gerichte boorkernen een validatie en nadere inspectie uitgevoerd.

De metingen zijn in aangrenzende lengtereaaiën uitgevoerd vanaf de meetquad. Deze is uitgerust met:

1. Twee MIRA sensoren voor het bepalen van de locatie van structuurvariaties/ holle ruimten /losliggende slijtlaag en het bepalen van vocht in asfalt en asfaltdikte (door met twee MIRA sensoren tegelijk in twee polarisaties te meten, is het mogelijk een Microwave Polarization Difference Index, MPDI, te bepalen, een maat voor de asfaltstructuur);
2. Een camera die foto's maakt van de bovenzijde van het asfalt (ter ondersteuning van de MIRA metingen, 'weet wat/waar je meet');
3. Een RTK GNSS ontvanger met een hoekmeter om de metingen exact te geo-refereren, de locatie van anomalieën exact te bepalen en bij een vervolgmeting mogelijke (hoogte) deformaties te ontdekken;
4. Een warmtebeeldcamera voor het bepalen van de asfalttemperatuur als ondersteuning bij het onderzoeken van opbollingen/frezen/lassen/patches.



Waarom en waarvoor is het gebruikt?

Ter plaatse van de Lauwersmeerdijk is een asfaltbekleding aanwezig. Deze asfaltbekleding is over een lengte van 7,2 km afgekeurd op zowel het faalmechanisme AGK (golflap) als AES/AMT (ernstige schade/materiaaltransport). Binnen Fase 1 van het project LiveDijkXL Lauwersmeer is in september 2013 een 0-meting uitgevoerd op de kwaliteit van het asfalt van de Lauwersmeerdijk, tussen km85 en km86. De resultaten van deze meting zijn uitgebreid beschreven in het Monitoringsplan Lauwersmeerdijk zoals dat is opgeleverd door het consortium van Fase 1 van LiveDijkXL Lauwersmeer, onder penvoerderschap van Witteveen+Bos op 28 mei 2014 (ref GN207-2/14-011.063 Definitief Monitoringplan Lauwersmeerdijk).

Opdrachtgevers Stichting FloodControl-IJkdijk en Waterschap Noorderzijlvest hebben vervolgens aangegeven de resultaten van de eerste meting veelbelovend te vinden, en een tweede en derde asfaltmeting te laten uitvoeren op de Lauwersmeerdijk, zowel tussen km85 en km86, als over de gehele strekking (Fase 2). Het doel daarbij was het bepalen van potentiële zwakke plekken in de asfaltbekleding en het in kaart brengen van mogelijke achteruitgang van deze plekken.



Figuur 6 Miramap, overzicht dijkvakmarkeringen op de Lauwersmeerdijk.

Wat heeft de beheerder er aan gehad?

De eindgebruiker heeft op een drietal momenten (2013, 2014, 2015) inzicht gekregen in de staat van het asfalt, de locatie van kwalitatief zwakke plekken, alsmede de mate van achteruitgang van de asfaltbekleding tussen 2013 en 2015.

De beheerder zegt over het doel 'effectiever verbeteren': "Door het gebruik van MIRA technologie kon gericht worden vastgesteld waar de zwakke plekken van de asfaltbekleding zijn. Verificatie met boorkernen scoorde positief. Met deze nieuwe kennis is het mogelijk snel een beeld te krijgen waar (op korte termijn) preventieve 'herstel' maatregelen nodig zijn. Dit betreft zowel onderhoudswerkzaamheden als dijkverbeteringsmaatregelen."

De beheerder over het doel 'effectiever beheren': "Nu moet de Lauwersmeerdijk over de gehele strekking worden aangepakt maar daarmee zijn nog niet alle kilometers asfaltdijk van Noorderzijlvest 100% op orde. Er resteert nog circa 40 kilometer dijk met asfaltbekleding. Ook hier kunnen dus verstopt zwakke plekken zijn. Juist in het kader van de 'nieuwe' zorgplicht loont het mogelijk om dit traject te onderzoeken met de MIRA technologie."

Vooruitzichten voor toepassing

De vooruitzichten voor toepassing van de techniek zijn veelbelovend. De techniek wordt al bij diverse beheerders toegepast. De techniek levert waardevolle data en informatie voor gebruik bij het dagelijks beheer van de waterkeringbeheerder en continu inzicht (in de sterkte van asfaltdijkbekledingen) vanuit de zorgplicht.

Behalve bij 'Beheer en Onderhoud' zou de techniek ook kunnen worden ingezet op andere momenten, namelijk bij de primaire processen 'Beoordelen' of 'Versterken'.

Beoordelen - In het project is gebleken dat met de methode MIRA de kwaliteit en daarmee de sterkte van de asfaltdijkbekleding vlakdekkend in beeld gebracht kan worden. Opname van de methode als beoordelingsinstrument in het WBI 2017 zou daarom een logische stap zijn. Aanbevolen wordt nader te onderzoeken hoe de met MIRA gemeten parameters gerelateerd kunnen worden aan waterbouwkundige grootheden die bij de toetsing gebruikt worden, zogenaamde WBI parameters, zoals breuksterkte, dichtheid of omvang aangetast oppervlak.

Versterken - Bij het ontwerpen van een dijkversterking is het soms nodig te weten hoe de dijk er precies bij ligt, om later bij de uitvoering niet voor verrassingen te komen staan. Bijvoorbeeld wanneer het ontwerp is om bestaande bekleding te overlagen, is inzicht in holle ruimte onder of in de huidige bekleding belangrijk. Bij diverse andere projecten is de methode al op deze manier ingezet. Daarnaast kan na de realisatie en aanleg van nieuwe bekleding het werk van de aannemer gecontroleerd worden met de methode MIRA. Hierbij is het zaak dat dergelijke methodes worden opgenomen in een inspectieprotocol.

3.7 Periodiek meten aan erosie verlaagt het risico op zettingsvloeiing

Zettingsvloeiing is een mechanisme waarbij zand in een onderwatertalud schijnbaar spontaan vervloeit, waardoor tot honderdduizenden kubieke meters zand over afstanden van wel honderden meters verplaatst kunnen worden. Wanneer een zettingsvloeiing plaatsvindt in of nabij een dijk, wordt dit ook wel oever- of dijkval genoemd. De waterkering kan hierdoor ernstig beschadigd raken en zijn waterkerende functie verliezen. In de Derde Toets op Veiligheid kon circa 50 kilometer primaire kering in Nederland niet worden goedgekeurd. Maatregelen zijn kostbaar.

Wat is onderzocht en waarom?

Stichting IJkdijk voerde in september en oktober 2014 onder werkelijke omstandigheden in de Westerschelde, een experiment uit rond dit faalmechanisme. De hoofdvraag daarbij was in hoeverre waterbeheerders meettechnieken en data-analysesystemen kunnen inzetten in de huidige beoordeling van vooroevers die gevoelig zijn voor zettingsvloeiing.

Gedurende de meetperiode zijn er verschillende kleinere zettingsvloeiingen opgetreden. Deze waren weliswaar van kleinere omvang en mogelijk ook van kortere duur dan een grotere zettingsvloeiing, maar de mogelijkheid was er om de verschijnselen goed te kunnen meten en te documenteren. Vooraf opgestelde hypothesen zijn bevestigd dan wel verworpen. Een mogelijke verklaring voor het uitblijven van een grote vloeiing tijdens de proef, zoals die

wél vlakbij de proeflocatie gebeurde in juli 2015, is dat het zand net dichter op elkaar was gepakt waardoor de kritische combinatie van geometrie en grondeigenschappen niet voorhanden was. Zettingsvloeiing is ondanks de mogelijke grote schaal van optreden een zeer gevoelig proces. Ook bij experimenteel onderzoek is vaak gebleken dat het exact herhalen van eenzelfde proef totaal verschillende uitkomsten kan geven. Met name de gevoeligheid voor de pakking blijkt erg groot. Dit is juist een parameter die in het veld lastig te bepalen is. De ontwikkeling van (een) methode(n) om in situ pakking van het zand in het veld te bepalen blijft dan ook een aandachtspunt voor toekomstig onderzoek naar zettingsvloeiing.

Doordat de uiteindelijke vloeiingen kleiner waren was het niet mogelijk om het schaaleffect te meten. Wel waren de acht gemeten zettingsvloeiingen tijdens de proef groter dan ooit waargenomen in de talrijke proeven die in test-faciliteiten zijn uitgevoerd. Aangezien schaaleffecten bij zettingsvloeiingen een grote rol spelen maar tegelijkertijd complex zijn, was het experiment een zeer waardevolle aanvulling op proeven die in het verleden in het laboratorium zijn uitgevoerd.

Een van de belangrijkste vooraf geformuleerde kennisvragen was welk mechanisme dominant is bij zettingsvloeiingen: verwekingsvloeiing of bresvloeiing. Het eerste mechanisme vindt vooral plaats in zeer losgepakt zand, het tweede kan ook in vaster gepakt zand optreden. Op basis van monitoring van het proces zijn beide mechanismen goed van elkaar te onderscheiden. Uit het grondonderzoek bleek dat er sprake was van zeer losgepakt zand. Toch bleken de opgetreden vloeiingen vooral bresvloeiing te betreffen. Een voorzichtige eerste conclusie is daarom dat er bij veel vloeiingen in het verleden waarschijnlijk vaker sprake is geweest van bresvloeiingen dan tot de proef werd aangenomen en dat het mechanisme verwekingsvloeiing mogelijk veel minder belangrijk is dan tot nu toe gedacht.

Dit is relevante kennis voor toekomstig onderzoek (zoals meer focus op bresvloeiing dan op verwekingsvloeiing), maar ook voor de praktijk: voor bresvloeiing zijn andere parameters relevant dan voor verwekingsvloeiing, hetgeen betekent dat waterschappen andere grondgegevens moeten verzamelen. Ook met betrekking tot maatregelen is deze conclusie relevant: bepaalde maatregelen die puur gericht zijn op het voorkomen van verweking (zoals verdichting van zandpakketten) kunnen minder relevant blijken.

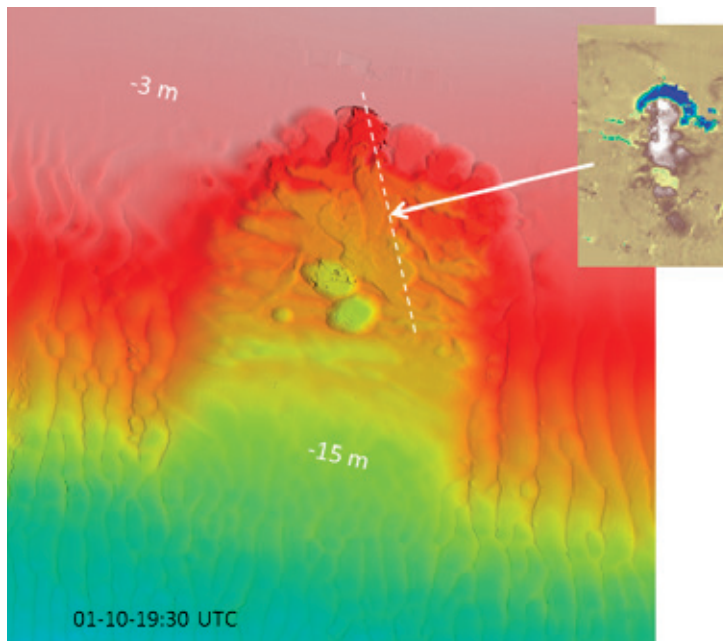
Beoordeling van vooroevers op gevoeligheid voor zettingsvloeiing vindt in het WBI 2017 (Wettelijk Beoordelings-instrumentarium 2017) plaats aan de hand van een aantal relevante invoerparameters. Naast de actuele geometrie van het onderwatertalud, de pakking en korrelverdeling van de zand- en siltlagen en de aanwezigheid van stoorlagen, is ook de verwachte beweeglijkheid van de vooroever een belangrijke invoerparameter voor zowel de globale als gedetailleerde toets. Voor vooral de laatste parameter geldt dat gedurende meerdere jaren monitoring essentieel is om de parameter te kunnen kwantificeren. Indien er geen informatie over de beweeglijkheid van de vooroever beschikbaar is, wordt er in de toetsmethode default vanuit gegaan dat deze gelijk is aan die van een gemiddeld talud, wat in de meeste gevallen zal leiden tot een conservatief toetsoordeel.

In het experiment bleken meettechnieken en data-analysesystemen in staat om gedetailleerde informatie te verschaffen over de (veranderende) parameters, c.q. geometrie en grondeigenschappen van het proefvak in de Westerschelde. Hieronder volgt een overzicht van enkele toepaste technieken en systemen, in monitoring van zettingsvloeiingsgevoelige vooroevers conform de beoordelingsmethode:

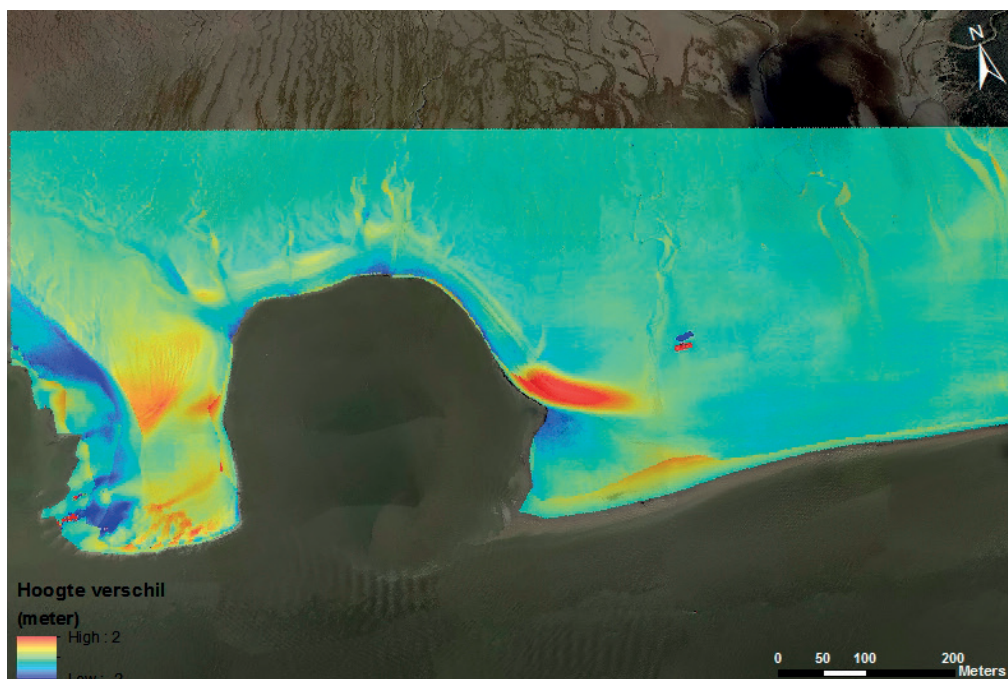
- **Grondonderzoek:** Vooral in dynamische omgeving zoals de Wester- of Oosterschelde zijn de voor zettingsvloeiing relevante grondeigenschappen in de vooroever vaak anders dan die onder de dijk. In die situaties lijkt het aanbevelenswaardig om het grondonderzoek dan ook in de vooroever zelf, dus buitendijks, uit te voeren. In de proef is aangetoond dat zelfs vrij innovatieve technieken, zoals seismische sonderingen of een HPT sondering, vanaf het water uitgevoerd kunnen worden. In veel gevallen zal de extra nauwkeurigheid waarmee relevante grondeigenschappen bepaald kunnen worden door grondonderzoek in het voorland uit te voeren, dus vaak vanaf het water, opwegen tegen de extra kosten ten opzichte van grondonderzoek vanaf het land.
- **Multibeam echoloding:** Deze techniek om vanaf een klein meetschip over meerdere frequenties tegelijkertijd door middel van geluidsgolven de diepte te bepalen onder en naast het schip, blijkt snel en nauwkeurig en is toepasbaar in meeste estuaria en rivieren in Nederland. Bij voorkeur dienen de metingen bij hoogwater uitgevoerd te worden, omdat zo een zo groot mogelijk deel van de vooroever gepeild kan worden. Naast de uitvoering van de metingen zelf, is processing, visualisatie en interpretatie van de lodingen cruciaal. Bestaande GIS-ge-

relateerde visualisatietools zijn daarbij zeer behulpzaam. Er kunnen eenvoudig verschilkaarten en dwarsprofielen worden gemaakt, die door de tijd “afgespeeld” kunnen worden.

- **Hoogtemeting:** Airborne laseraltimetrie, waarmee vanuit een vliegtuig (of helikopter) de hoogte van het onderliggende terrein in kaart wordt gebracht, is goed toepasbaar in de bepaling van het bovenwater-gedeelte van de geometrie. Echter leveren luchtfoto's ook bruikbare hoogtemodellen, die qua nauwkeurigheid niet hoeven onder te doen voor een hoogtemodel bepaald via airborne laseraltimetrie.



Figuur 7 Multibeam meting proefvak 1-10-2014-19:30 UTC met actieve bres, met ingevoegde 1 uur verschilmeting (blauw=erosie, geel/wit = depositie). (Ham, van den, G.A., Mastbergen, D.R., Koelewijn, A.R., Brake, ter, C.K.E. & Zomer, W.S. (2015))



Figuur 8 Hoogtemodel met de verandering tussen vóór en ná het experiment door land aanwinst en verlies. (Ham, van den, G.A., Mastbergen, D.R., Koelewijn, A.R., Brake, ter, C.K.E. & Zomer, W.S. (2015))

De beschreven meettechnieken meten parameters met betrekking tot geometrie en grondeigenschappen. Door middel van visualisatietechnieken kan deze data vanuit andere invalshoeken worden bekeken en geïnterpreteerd. Bovendien is verzameling van data essentieel in het valideren van bestaande rekenmodellen.

Wat heeft de waterbeheerder er aan in de praktijk?

De proef was belangrijk voor keringbeheerders Rijkswaterstaat en waterschap Scheldestromen omdat:

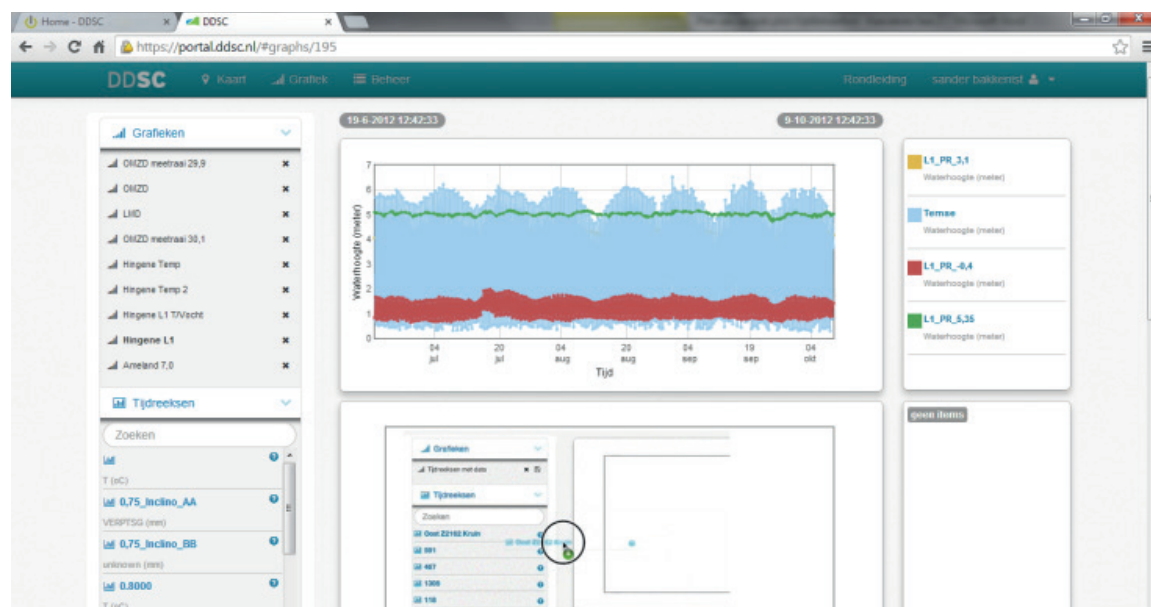
- Betere voorspellingen van zettingsvloeiingen helpen aan het bevorderen van de waterveiligheid en de waterkeringen;
- Onzekerheden in huidige beoordelingscriteria verkleind kunnen worden (o.a. bij de Oosterschelde kering) en het formuleren van (eventuele alternatieve) beheersmaatregelen.
- Voor de stakeholders is het ook zinvol om het onderzoek breder te trekken. Zettingsvloeiingen spelen namelijk niet alleen bij waterveiligheid, maar ook onder andere bij zandwinputten. Een ander governance aspect betreft de gedeelde verantwoordelijkheid rondom de gevolgen van zettingsvloeiingen: de waterkering (waterschap) en de vaargeul (RWS). De vraag wie verantwoordelijk is voor de financiering van maatregelen werd onlangs in de landelijke verkenning vanuit DGRW aan de orde gesteld.

Vooruitzichten van het onderzoek

De verkenning krijgt mogelijk een vervolg, bijvoorbeeld via een Project Overstijgende Verkenning. In Nederland komen zettingsvloeiingen niet heel veel (meer) voor. Daar waar het risico op zettingsvloeiing groot is, worden vaak maatregelen genomen door het bestorten van onderwater hellingen (na)bij keringen om deze op die manier minder kwetsbaar te maken. Dit zijn over het algemeen echter zeer kostbare maatregelen. Middels het doen van onderzoek hoe zettingsvloeiingen verlopen is het wellicht ook mogelijk om andere en/of meer optimale beheersmaatregelen te treffen.

3.8 Het beter reguleren van de waterstand in de dijk: Dijk Data Service Center (DDSC)

De data uit dijken met monitoringssystemen, zoals de LiveDijk projecten, moeten op een gestructureerde, uniforme en toegankelijke wijze worden opgeslagen en voor bewerking geschikt worden gemaakt. Een systeem hiervoor, dat specifiek voor de waterkeringbeheer is opgezet, was nog niet voorhanden. Stichting IJkdijk heeft in samenwerking met de in LiveDijk-projecten participerende beheerders gewerkt aan de vorming van een Dijk Data Service Centrum dat voorziet in de beschreven behoefte. Door het DDSC gezamenlijk met beheerders te ontwikkelen is gestreefd naar een uniform systeem dat toepasbaar is voor alle waterkeringbeheerders. In 2016 wordt het DDSC in overleg met beheerders doorontwikkeld.



Figuur 9 DDSC. screenshot DDSC waterhoogte.

Wat is onderzocht en waarom?

In 2013 is het Dijk Data Service Center (DDSC) in de eerste operationele versie gelanceerd. Het DDSC is een portal voor waterkeringbeheerders om monitoringsinformatie beheersbaar te verzamelen, op te slaan en beschikbaar te maken voor verdere verwerking. Stichting IJkdijk heeft opdracht gegeven voor de ontwikkeling van het DDSC. Een consortium van Nelen en Schuurmans / Fugro realiseerde de bouw.

Data en informatie van monitoringssystemen in dijken (LiveDijken en validatie-experimenten) worden verzameld in het DDSC. Het systeem is specifiek gebouwd om zeer grote hoeveelheden data op een gestructureerde en uniforme manier op te slaan en beschikbaar te maken voor bewerking en analyse, afkomstig uit monitoringssystemen voor dijken. Daarnaast worden de meetgegevens gecombineerd weergegeven met relevante andere statische databronnen zoals het AHN en de gegevens die in Dino-databases worden opgeslagen.

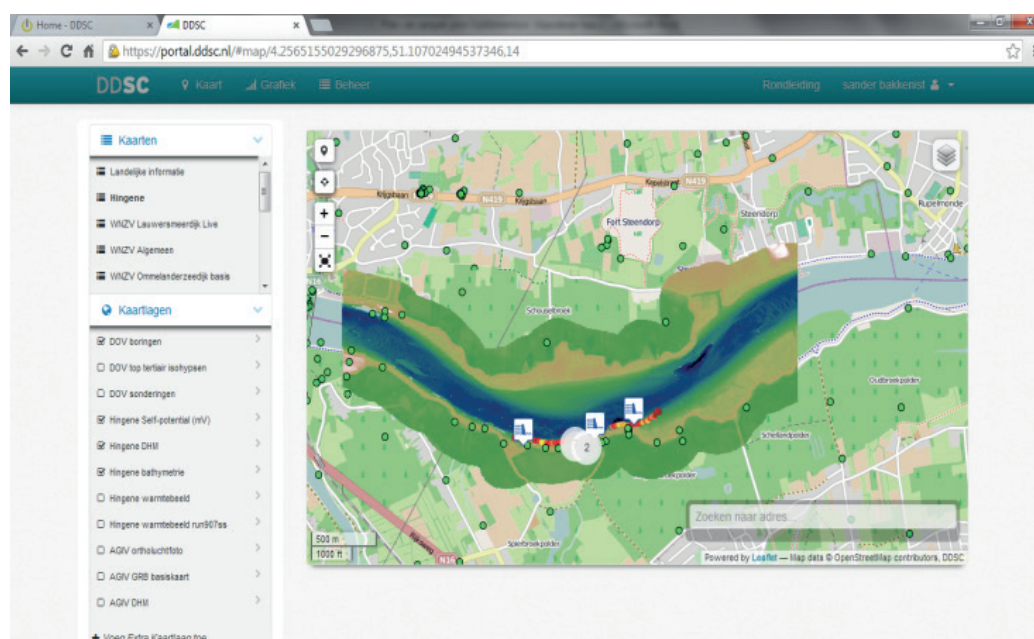
Wat heeft de waterbeheerder er aan in de praktijk?

Naast vastleggen en uitwisselen van monitoringsdata helpt het DDSC bij:

Standaardisatie: omdat verschillende sensorleveranciers gegevens aanleveren aan het DDSC, wordt gewerkt aan een uniforme aanlevering van meetgegevens. In aanverwante sectoren als waterzuivering gebeurt dit al veel langer en heeft dit geleid tot normering (NEN normen). Inzet van het DDSC draagt bij aan standaardisatie

Meer kennis over het gedrag van de dijk: in elke wetenschapsdiscipline is het verzamelen van gegevens de eerste stap om tot nieuwe kennis te komen. Het DDSC verzamelt gegevens over het gedrag van dijken. Door het samenbrengen van deze gegevens voor alle dijken in één database wordt bovendien een nieuwe vorm van inzicht mogelijk gemaakt. Het gaat om inzicht op basis van 'data-mining' waarbij binnen historische bestanden gezocht wordt naar vergelijkbare situaties in het verleden. Binnen het IJkdijk-programma wordt gewerkt aan anomalie-detectie om afwijkingen in datastromen te detecteren. Door het leggen van statistische verbanden tussen datareeksen wordt het mogelijk afwijkingen te detecteren om gedrag van de dijk te duiden en te voorspellen.

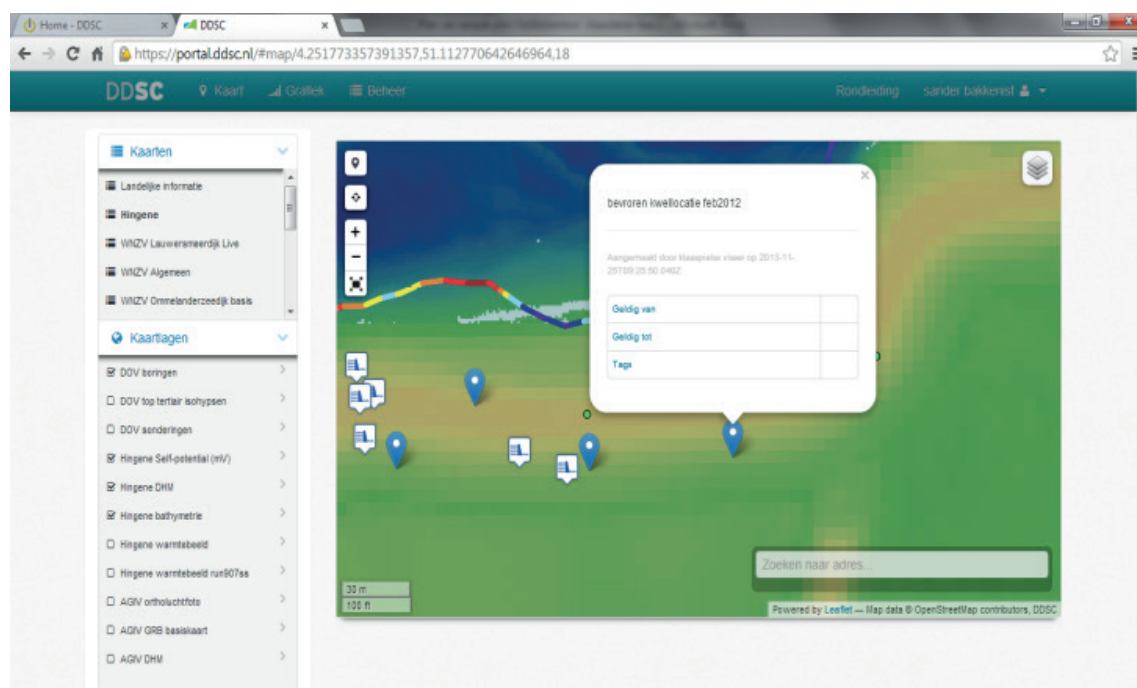
Kennisdeling: beheerders kunnen inzicht verwerven in het gedrag van elkaars dijken. Zo werkt Waternet aan het hertoetsen van hun dijken op basis van de actuele freatische lijn uit sensorwaarden om de stabiliteitsfactor te bepalen. Het idee is om het gedrag van keringen elders in het land hierbij te betrekken waarvoor benodigde data vanuit het DDSC wordt verkregen.



Figuur 10 DDSC, screenshot DDSC kaarten.

Open source code en open standaarden voor uitwisseling: inwinnen van dijkdata brengt grote hoeveelheden data met zich mee. Het DDSC is ontworpen om met deze grote hoeveelheden om te gaan. De broncode is open source. Een belangrijk aspect hierbij is ook de keuze voor de open source code en open standaarden. Dit voorkomt een 1-op-1 afhankelijkheid van één aanbieder. Bovendien maakt het gebruik van open standaarden voor de gegevens uitwisseling de koppeling met andere systemen eenvoudiger.

Het operationeel gebruik van het DDSC heeft tijdens de uitvoering van het LiveDijk XL project vorm gekregen. Het DDSC is als operationeel informatiesysteem ingezet bij de verschillende deelfasen van het project en bij bijzondere omstandigheden van hoogwater.



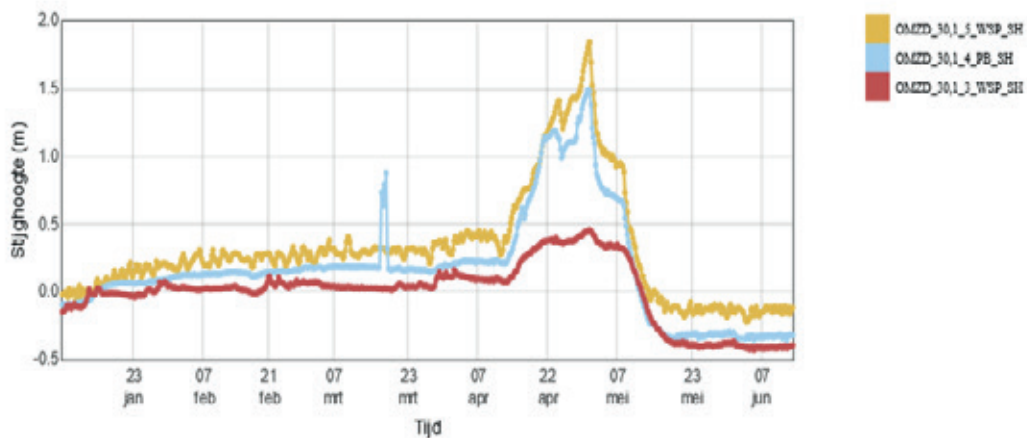
Figuur 11 DDSC, screenshot DDSC kaart: kwellocatie.

Praktijkvoorbeeld

Voor LiveDijk XL bleek het DDSC een belangrijk hulpmiddel in de analyse van de metingen gedurende de 5-6 decemberstorm uit 2013 (Sint Nicolaasvloed). Een actuele weergave van gegevens via het DDSC bleek van nut bij het volgen van het verloop van het effect van de storm op de Ommelanderzeedijk. Na afloop van de storm zijn de gegevens van opgetreden waterspanningen geanalyseerd voor een beter begrip van het gedrag van de dijk. Het systeem geeft in combinatie met het aanwezige Dijk Monitorings- en Conditioneringssysteem (DMC) informatie uit parameters, waterstanden en instrumenten waardoor informatie ingewonnen werd over het gehele dijktraject en over de actuele stand van de dijken. Aan de hand van informatie uit waterspanningsmeters is in het DDSC te zien welke mogelijke verschillen werden aangegeven in lengterichting en op dwarsraai. Ook is het mogelijk water-niveaus van verschillende locaties in een plot weer te geven om het verloop van de actuele waterstand te zien, dit is interessant daar verwachtingswaarden van Rijkswaterstaat naast deze gegevens worden gelegd. Het DDSC slaat deze waterstanden ook op, zodat er gelijk een historische database wordt gecreëerd.

Ook voor de infiltratieproef XL in het najaar van 2014 en het voorjaar van 2015 had de database grote waarde, onder andere in het registreren van de vele verschillende soorten data. De inzet van het DDSC bleek van belang voor het actief controleren van waterspanningen in de Ommelanderzeedijk. Benutting van het DDSC maakte het mogelijk dat er op afstand kan worden bijgestuurd. Terwijl er meerdere experts op afstand meekeken en adviseerden over te nemen stappen, leverde het DDSC de actuele informatie over toestand van het dijklichaam. Onderstaande figuur werd met regelmaat tussen de deelnemers gedeeld en vergeleken met de waarnemingen in het veld en via andere monitoringsapparatuur waarmee er feitelijk sprake was van een remote-controlled dijk.

Hier bleek de combinatie van vaste gegevens als de hoogteligging van het dijklichaam, de plaatsing van sensoren gecombineerd met real-time weergaven van tijdreekswaarnemingen en foto- en filmopnamen van de locatie ter plaatse een waardevolle ondersteuning van de beslissingen die genomen moesten worden door de proefleiding. Daarmee vormen deze infiltratieproeven een mooi voorbeeld hoe data en informatie kunnen ondersteunen bij operationele besluitvorming



Figuur 12 DDSC: Waterdrukken in de Ommelanderzeedijk tijdens de tweede infiltratieproef XL.

4 Beoordelen

4.1 Met meten en informatie wordt het werkelijke gedrag van dijken betrouwbaar voorspeld

In de afgelopen tientallen jaren is veel inspanning gestoken in het beter begrijpen van het gedrag van waterkeringen en het bepalen van hun sterkte onder extreme omstandigheden. Het betrouwbaar voorspellen van deze conditie hangt samen met het inzicht in de onzekerheden van het rekenmodel. Zo kunnen de eigenschappen van klei of veen sterk variëren, en deze heterogeniteit introduceert onzekerheden wanneer een dijkkring op sterkte moet worden beoordeeld. Het is dus zaak deze met voldoende zekerheid in kaart te brengen. In voorgaande decennia was het moeilijk en duur om grote hoeveelheden data in te winnen om daarmee op volume of vlakdekkende schaal een oordeel te kunnen vormen over een waterkering. De in die tijd ontwikkelde modellen bevatten mechanismen om met deze onzekerheden om te kunnen gaan terwijl aan de waterveiligheid naar verwachting geen concessies worden gedaan.

Vanaf 2017 worden de primaire keringen beoordeeld volgens de nieuwe veiligheidsnormering gebaseerd op overstromingsrisico's. Het wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI) omvat handreikingen om deze beoordeling uit te voeren. De rol van goede data en informatie over de waterkering is daarbij een belangrijke factor om te komen tot een betrouwbare beoordeling van de veiligheid van de waterkering.

De ontwikkeling en toepassing van nieuwe, innovatieve meetsystemen om meer te weten te komen over het gedrag en de sterkte van dijken kan daarbij goed worden gebruikt. Ook meetsystemen die meetwaarden opleveren die niet direct passen in de beschikbare modellen bleken verrassend aanvullend inzicht op te leveren over de ontwikkelingen in de sterkte van de dijken (infrarood-metingen, radiogolfmetingen, radar-verschilmetingen, laserscanners, glasvezelkabels, et cetera).

In de bezwijkproeven bleek de meerwaarde in gecontroleerde en homogene situaties. De werkelijkheid is echter veel complexer dan de op de proeflocatie gecreëerde full-scale proefopstellingen. Er zijn in het kader van de Live-Dijk XL bij Noorderzijvest meerdere belastingproeven uitgevoerd op de Ommelanderzeedijk. Uit de monitoringsresultaten bleek dat de aannames die in het verleden werden gemaakt mogelijk aangescherpt konden worden. De verwachting was gerechtvaardigd dat het gedrag van de dijk onder belasting anders, gunstiger, zou zijn dan was berekend. Zo is dat ook bij Waternet in Amsterdam en bij de Waddenzeedijk op Ameland onderzocht.

In al deze gevallen werd geconcludeerd dat de ingewonnen data en informatie met meetsystemen, gecombineerd met modellen, inzicht van betrokken experts, gebiedskennis van beheerders en inspecteurs leidde tot een betrouwbaarder beeld van de dijk en zijn sterkte en weerstand tegen faalmechanismen.

4.2 Gericht monitoren verkleint pipingprobleem

Wat is onderzocht en waarom?

Rond het faalmechanisme piping heeft het onderzoek in het kader van de IJkdijk veel impact gehad. Allereerst heeft de IJkdijk-faciliteit in 2009 met intensieve metingen bij een viertal proeven op grote schaal de validatie geleverd voor het toenmalige SBW-onderzoek. In dat onderzoek bleek uit proeven op kleinere schaal dat de bestaande rekenregel van Sellmeijer veelal (iets) te soepel was. Ook is daarin geconcludeerd dat de rekenregel van Bligh, toen honderd jaar oud, vooral bij grotere dijken en hogere veiligheidsniveaus tot onveilige uitkomsten leidt.

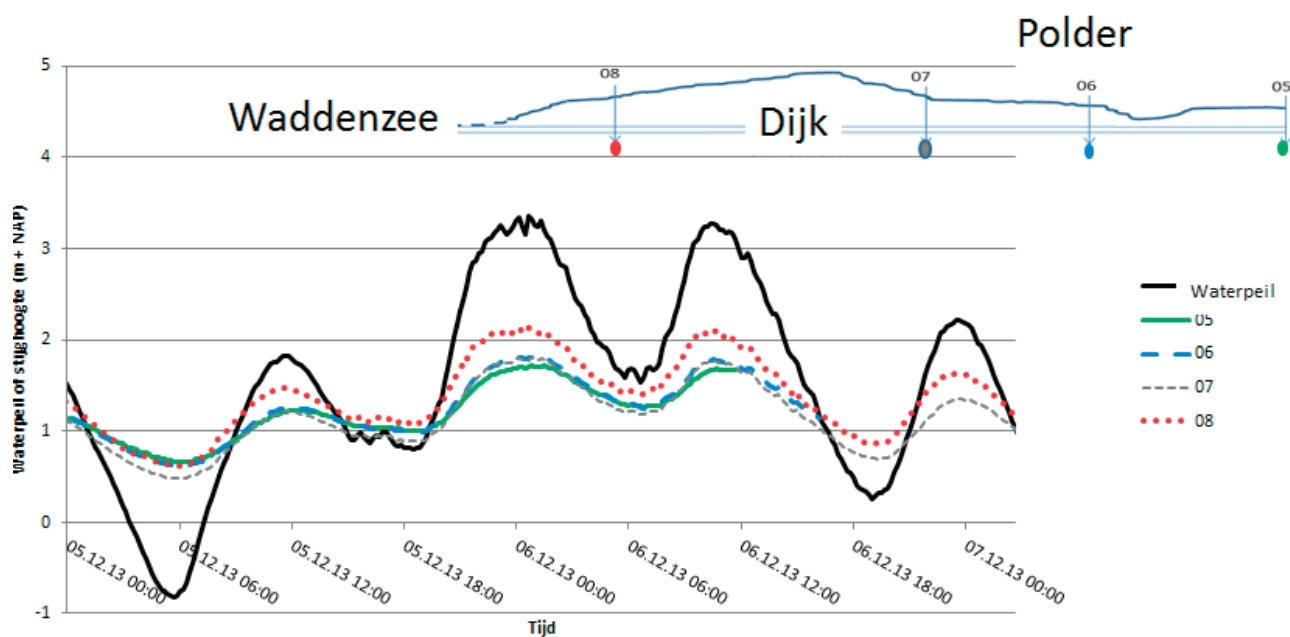
De verscherping van de rekenregel van Sellmeijer als het afscheid van de rekenregel van Bligh hadden allebei ongeveer evenveel impact op de dijkversterkingsopgave met betrekking tot piping; in geld uitgedrukt nam die met naar schatting 2 miljard euro toe. Ondertussen was er mede door de zeer uitgebreide metingen bij de IJkdijk wel een beter inzicht verkregen in het pipingproces zelf. Met name het onderscheid tussen primaire en secundaire erosie, uitgekristalliseerd in het proefschrift van Van Beek (2015), heeft een belangrijke stap voorwaarts gevormd.

Dit verbeterde inzicht maakte het mogelijk om nieuwe en vernieuwde preventie maatregelen tegen piping te ontwikkelen: een reguleerbare en regenererbare semi-horizontale drainagebuis (zie ook §5.3), het verticaal zanddicht geotextiel en de grofzandbarrière. Deze zijn in 2012 met positieve uitkomsten uitgetest op de IJkdijk in het kader van de All-in One Sensorvalidatietest, zoals beschreven door Koelewijn et al. (2014).

Wat heeft de waterbeheerder er aan in de praktijk?

Op Ameland vindt in het kader van het HWBP-2-programma een dijkversterking plaats. In de aanloop naar die versterking rees de vraag of daarbij een kostbare damwand als maatregel tegen piping noodzakelijk zou zijn. Deze damwand zou over een lengte van ongeveer 300 meter moeten worden aangebracht. Een goedkopere berm was niet mogelijk vanwege de aanwezigheid van een boerderij binnendijks. Het vermoeden bestond echter dat op basis van metingen van de doordringing van de waterdrukken in de voor piping gevoelige zandlaag onder de dijk en met behulp van tijdsafhankelijke analysemethoden er mogelijk voldoende veiligheid zou kunnen worden aangetoond.

In de dijk zijn drie meetraaien met elk vier waterspanningsmeters en een peilbuis aangebracht. De kwaliteit van de data liet enigszins te wensen over, echter in één van de raaien konden voldoende nauwkeurige metingen worden verkregen. De dwarsdoorsnede ter plaatse is weergegeven in figuur 13. Daarin zijn ook de metingen weergegeven van een betrekkelijk zeldzaam hoogwater (kans van voorkomen in de orde van 1/50e per jaar), al enkele maanden nadat de metingen gestart waren. Hieraan is te zien dat er sprake is van een relatief grote weerstand in het meest zeewaarts gelegen deel van de dijk – de waterdruk wordt over dat gedeelte namelijk relatief sterk gedempt.



Figuur 13 Dwarsdoorsnede Waddenzeedijk Ameland bij km 7,0 met waterpeil en stijghoogtemetingen rond de Sint Nicolaasvloed 2013 (Koelewijn, 2016).

Door de inzet van meer geavanceerde analysemethoden kon worden aangetoond dat dit dijkgedeelte reeds voldoende weerstand tegen piping kent, zoals beschreven door Sluis et al. (2016). Dat er amper sprake was van tijdsafhankelijkheid (te herkennen aan een eventuele vertraging van de hoogwatergolf) maakt daarvoor niet wezenlijk uit. Het onderzoek, dat mede door het verkennende karakter bijna twee ton gekost heeft, heeft voor beheerder Wetterskip Fryslân de aanleg van een damwand van zeven ton uit kunnen sparen.

Mede dankzij het verbeterde inzicht in het faalmechanisme piping zullen de veranderingen in de komende jaren er ook niet toe leiden dat een maatregel zoals een damwand alsnog noodzakelijk wordt op deze locatie. Tegenover de overgang naar de verscherpte regel van Sellmeijer (onder het HWBP-2-programma geldt nog de 'oude' regel) en de grotere zeespiegelstijging dan eerst werd verwacht, staan ook de verlaging van de veiligheidsnorm voor de dijkkring Ameland, de invloed van de deklaag op de slootbodem die niet is meegenomen in de analyses en de invloed van heterogeniteit binnen de pipinggevoelige zandlaag zelf waardoor er extra weerstand bestaat tegen piping. De doelgerichte monitoring heeft hier zodoende veel informatie opgeleverd waarmee het probleem van piping verkleind is.

Recent is hier de opvatting bijgekomen dat piping waarschijnlijk helemaal niet tot ontwikkeling zal komen in de hier aanwezige wadzandformaties, hetgeen mede ondersteund is door dit meetproject op Ameland.



5 Versterken

5.1 Met meten en informatie de versterking optimaliseren

Door te meten wordt een verbeterd zicht op de werkelijke sterkte van dijken verkregen (1), kunnen grond parameters beter gedefinieerd worden (2), en wordt de werkelijke scope van het probleem duidelijker (3). Dit verkleint de invloed van het conservatisme in de aannamen die bij gebrek aan informatie wel gemaakt móeten worden, of die bij een te optimistische aanname zijn gemaakt, zoals in de hoofdstukken hiervoor al aan de orde is gekomen.

Bij dijkversterkingsprojecten kan de periode tussen afkeuren in de toetsing en het begin van de eigenlijke ontwerpactiviteiten ten behoeve van de noodzakelijke versterking vele jaren bedragen. Al dan niet op basis van voorfinanciering kan die periode worden benut om op gerichte wijze te meten aan de aspecten uit de toetsing die daarin met enige onzekerheid omgeven waren én significant hebben bijgedragen aan het afkeuren (mede vanwege die onzekerheid en de noodzaak om bij gebrek aan informatie een conservatieve schatting te maken). In §5.2 wordt dit geïllustreerd aan de hand van de Ommelanderzeedijk tussen Delfzijl en Eemshaven.

Lange tijd heeft het versterken van dijken vooral bestaan uit het verhogen van de kruin en het verbreden van de dijkbasis. Net als bij later eveneens toegepaste constructieve maatregelen zoals het aanbrengen van stalen damwanden of betonnen keermuren, doorgaans bij een gebrek aan ruimte, is daarbij sprake van het aanbrengen van extra materiaal om zo meer weerstand te creëren tegen het veronderstelde faalmechanisme. Meer recent zijn dijkversterkingsmethoden ontwikkeld die direct ingrijpen op het maatgevende faalmechanisme en het optreden hiervan verhinderen, zoals het verhinderen van het korreltransport bij piping of het lokaal verlagen van de freatische lijn bij macrostabiliteit. Het laatste wordt in §5.3 geïllustreerd aan de hand van de DMC-proef bij Delfzijl.

Onzekerheden kunnen verkleind worden door passief te meten, informatie te combineren of door actief in te grijpen, zoals bij de voorgaande voorbeelden, maar deze kunnen ook worden bepaald door letterlijk de proef op de som te nemen en een (niet-destructieve) test uit te voeren. Vanwege de veelal korte proefduur leent een dergelijke test zich uitstekend om uit te voeren in de loop van de ontwerpfase, of desnoods pas in de uitvoeringsfase. Hiervan wordt in §5.4 opnieuw voorbeelden gegeven uit de omgeving van Delfzijl.

5.2 Door informatieverdieping valt er vóór de uitvoering al veel te besparen

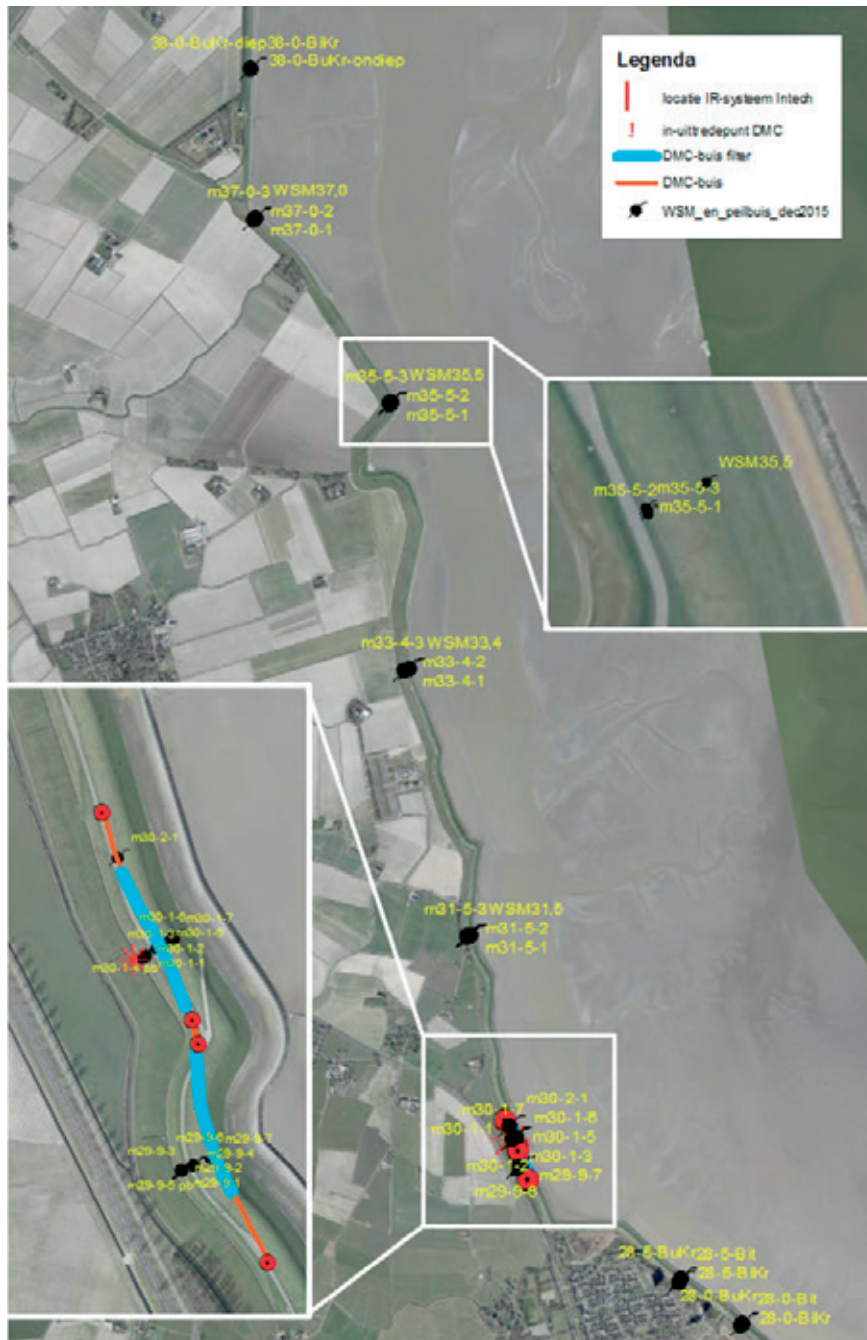
Grote delen van de Ommelanderzeedijk tussen Delfzijl en Eemshaven zijn in 2011 in de verlengde derde toetsronde afgekeurd op het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit. Op grond van de bestuurlijke en maatschappelijke verantwoordelijkheid om in de periode tot aan versterken binnen redelijke grenzen al het mogelijke te doen rondom de waterkerende functie van deze onveilige dijk is een verscherpt inspectieregime opgezet en is besloten om deze dijk grootschalig te monitoren met behulp van moderne systemen: de LiveDijk XL (Van der Meer et al., 2016).

In dit kader is besloten om op een zevental locaties verdeeld over het traject onder meer waterspanningsmeters te plaatsen, om daarmee een beter beeld te krijgen van het verloop in de tijd van de ongunstige, hoge freatische lijn in de dijk. Een belangrijke onderzoeksvraag daarbij was in hoeverre de op de vigerende richtlijnen gebaseerde verhoging van die freatische lijn bij stormomstandigheden terecht was. Weliswaar leidden stormen doorgaans tot een verergering van de onder dagelijkse omstandigheden veelal reeds aanwezige natte plekken in het binnentalud, maar het was onduidelijk in hoeverre de aan te nemen verdere verhoging richting maatgevende omstandigheden reëel was.

De meetlocaties zijn aangegeven in figuur 14. Op de meeste locaties is sprake van slechts één geïnstrumenteerde dwarsraai, maar op een paar locaties wordt intensiever gemeten.

De meetinstrumenten zijn aangebracht vóór de relatief hoge Sint Nicolaasvloed in 2013 (zie ook §4.2). Daarmee had dit meetproject het geluk van een ongebruikelijk zware belasting. Ook voor de dijkbeheerder pakte dit goed uit, niet alleen omdat dit een hoogwater betrof waarover nog wel de verwachting bestond dat de dijk dit aan zou kunnen (en dus niet een mogelijk fataal hoogwater), maar ook omdat de metingen lieten zien dat de invloed van een

serius hoogwater op de ontwikkeling van de freatische lijn aanzienlijk kleiner was dan op grond van de toetsingsvoorschriften (geldig bij gebrek aan lokale metingen) was aangenomen.



Figuur 14 Overzicht meetlocaties Ommelanderveedijk in het kader van LiveDijk XL (Van der Meer et al., 2016)

De werkzaamheden in het kader van de LiveDijk XL vormden ook de aanleiding om historische informatie over de dijkopbouw nader te bekijken. Daaruit kwam naar voren dat deze dijk, die rond 1970 is aangelegd, niet volledig uit zand met een kleibekleding bestaat, maar gebouwd is tegen en over de oude kleidijk – meestal ligt deze aan de zeewaartse kant van de huidige dijk. Tot aan de tweede toetsronde was deze informatie nog gebruikt, maar bij de laatste toetsronde was deze informatie verloren gegaan. Het verloren gaan van dergelijke historische informatie met een significante impact op het toetsresultaat is een breder voorkomend verschijnsel, ook in het oosten en midden van Nederland zijn hier helaas voorbeelden van bekend.

De metingen hebben geleid tot een aanzienlijke kostenbesparing, die verder is toegenomen doordat deze de aanleiding vormden tot aanvullende metingen en proeven, beschreven in §5.4. Een uitsplitsing naar de impact per onderdeel is niet gemaakt en ook niet te maken doordat het geheel aan informatie tot grotere zekerheid en daarmee grotere besparingen leidt dan de losse onderdelen. Een overall-tussenstand van uitgaven en besparingen is gegeven in §5.4.

5.3 De dijk versterken door het waterpeil te beheersen

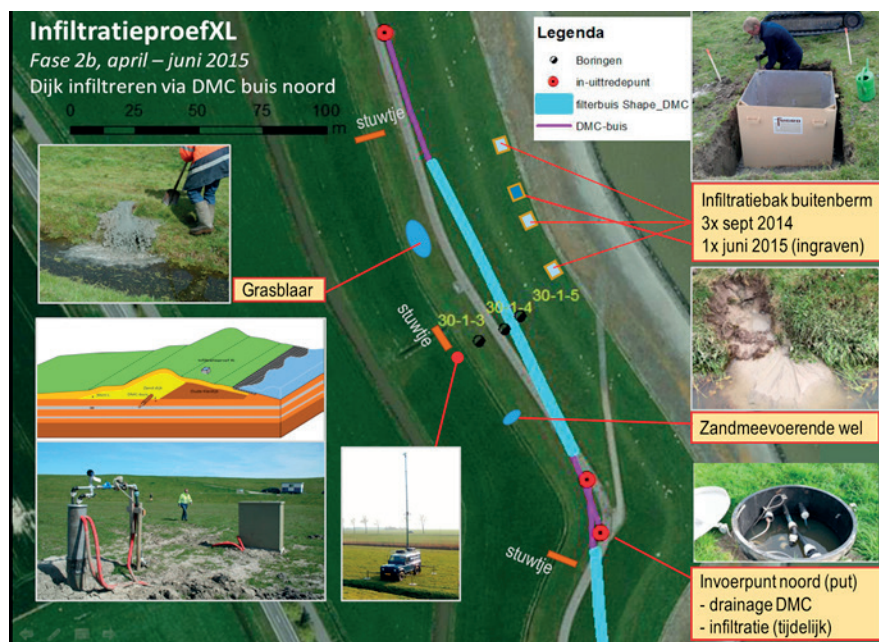
Dijkmonitoring- en conditioneringssysteem (DMC)

Het gegeven dat een verlaging van de freatische lijn in een dijk een veiligheidsprobleem ten aanzien van macrostabiliteit zou kunnen oplossen vormde in 2005 de aanleiding tot de ontwikkeling van het 'Dijkmonitoring- en conditioneringssysteem', kortweg DMC. Dit is een regelbare, regenereerbare horizontale drainagebuis, aangesloten op een pompsysteem of werkend onder vrij verval. Bij proefnemingen bij de IJkdijk bleek DMC ook prima geschikt om het faalmechanisme piping te stoppen: een te hoge waterdruk wordt in de dijk eenvoudigweg verwijderd, waardoor de excessieve grondwaterstroming afneemt en het zandtransport stopt.

Op enkele trajecten in de Ommelanderzeedijk leek aanvankelijk sprake te zijn van piping, naast het probleem met binnenwaartse macrostabiliteit. Op één van die locaties (in figuur 15. linksonder uitvergroet) is bij wijze van pilot binnen de LiveDijk XL het DMC aangebracht over een lengte van 400 meter. Tijdens de voorbereidingen voor de aanleg werd de oude kleidijk binnen de bestaande dijk herontdekt (zie vorige paragraaf), waardoor ook bleek dat er geen probleem was met piping, maar met microstabiliteit.

Na het aanbrengen van het DMC zijn er enkele hoge waterstanden gepasseerd, waaronder de Sint Nicolaasvloed van 2013. Deze vormden goede testomstandigheden waarmee de werking en invloed van het DMC getest kon worden. Daarnaast heeft in het voorjaar van 2015 een infiltratieproef via het DMC plaatsgevonden, waarbij het DMC als het ware omgekeerd is toegepast: er is juist water mee geïnfilteerd in de dijk, zie ook figuur 15. Daarbij is de binnenzijde van de dijk in extreme mate belast, waarmee waardevolle informatie is verkregen over de actuele sterkte van de dijk.

Er kon worden geconcludeerd dat de dijk sterker was dan uit de verlengde derde toetsronde volgde. Daarnaast bleek ook de potentie van het DMC als dijkversterkingsmethode, als alternatief voor bijvoorbeeld bermen of damwanden. Het DMC is inmiddels toegepast als dijkversterking bij Veessen, waar door de aanwezige bebouwing (een historische boerderij) traditionele dijkversterkingsmethoden ongeschikt waren. Een belangrijk verschil tussen een methode als het DMC en traditionele methoden is dat er actief beheer bij vereist is. Het besturingssysteem van het DMC is echter hetzelfde als dat van veel rioolwaterzuiveringsinstallaties, hierdoor is de werking ervan bekend bij de meeste waterschappen. Dit vormt een operationeel voordeel bij de toepassing.



Figuur 15 Overzicht infiltratieproef bij LiveDijk XL (Van der Meer et al., 2016)

Een enigszins vergelijkbaar peilbeheersingssysteem, maar dan met verticale putten en uitsluitend werkend onder vrij verval, is toegepast bij de dijkversterking Schoonhovense Veer – Langerak om daar problemen met binnenwaartse macrostabiliteit op te lossen.

5.4 Meten is weten en bespaart op versterkingsmaatregelen

Op basis van het principe dat toetsingen aan de conservatieve kant uitgevoerd behoren te worden, zijn er door gericht te meten aan de meest onzekere aspecten over het algemeen besparingen mogelijk op de benodigde versterkingsmaatregelen. Echter, ook als de situatie bij nader onderzoek blijkt tegen te vallen, dan nog zijn de metingen zinvol, ook al pakt de dijkversterking daardoor duurder uit, omdat anders het vereiste veiligheidsniveau niet zou zijn behaald.

Wat is onderzocht en waarom?

In de voorgaande paragrafen zijn al meerdere voorbeelden aangehaald voor de Ommelanderzeedijk. In de aanloop naar de infiltratieproef met het DMC zijn daar ook twee infiltratieproeven uitgevoerd op het buitentalud van de dijk, op het gedeelte dat hoger ligt dan de oude kleidijk (zie ook figuur 15.). Bij de Sint Nicolaasvloed van 2013 bleek weliswaar de gunstige invloed van die kleidijk, maar daarbij rees ook de vraag hoe groot de infiltratie in het dijklichaam zou zijn bij een waterstand tot boven die kleidijk. Om dat te bepalen is twee maal een infiltratieproef van ongebruikelijk groot, maar effectief formaat uitgevoerd. Daaruit bleek dat de infiltratie ook op dat gedeelte een stuk kleiner was dan voorzichtigheidshalve was aangenomen.

In de afgelopen jaren is op dezelfde dijk ook een proef uitgevoerd naar de toepasbaarheid van keileem in dijkversterkingen. De uitkomst daarvan was op zichzelf positief, maar deze proef bracht min of meer toevallig ook aan het licht dat een dunne zandlaag als voortzetting van het zandcunet, dat ter plaatse de eigenlijke dijkversterking van rond 1970 vormt, uitermate effectief werkt als drainage van de zandkern. Dat er grote verschillen in drassigheid van het binnentalud waren, was al bekend, maar hierbij kwam ook de oorzaak daarvan aan het licht.

Aanvankelijk was de verwachting dat er bij de Ommelanderzeedijk een dijkversterking nodig zou zijn bestaande uit bijvoorbeeld een verbreding van de binnendijkse berm met ongeveer 20 meter. Met alle verworven inzichten zou dit kunnen worden teruggebracht tot enkele beperkte maatregelen zoals verbeterde drainage. Ook zonder DMC kan al een verlaging van de freatische lijn in de dijk onder maatgevende omstandigheden met 2 meter worden gerealiseerd over een lengte van ongeveer 5 km. De kosten van de oorspronkelijk benodigde dijkversterking zijn

geschat op 4 miljoen euro per km, zodoende bedraagt de kostenbesparing ongeveer 20 miljoen euro. Daar staat ongeveer 1,5 miljoen euro aan uitgaven voor de monitoring in de afgelopen jaren tegenover. Deze investering zou daarmee met een factor groter dan tien worden terugverdiend.

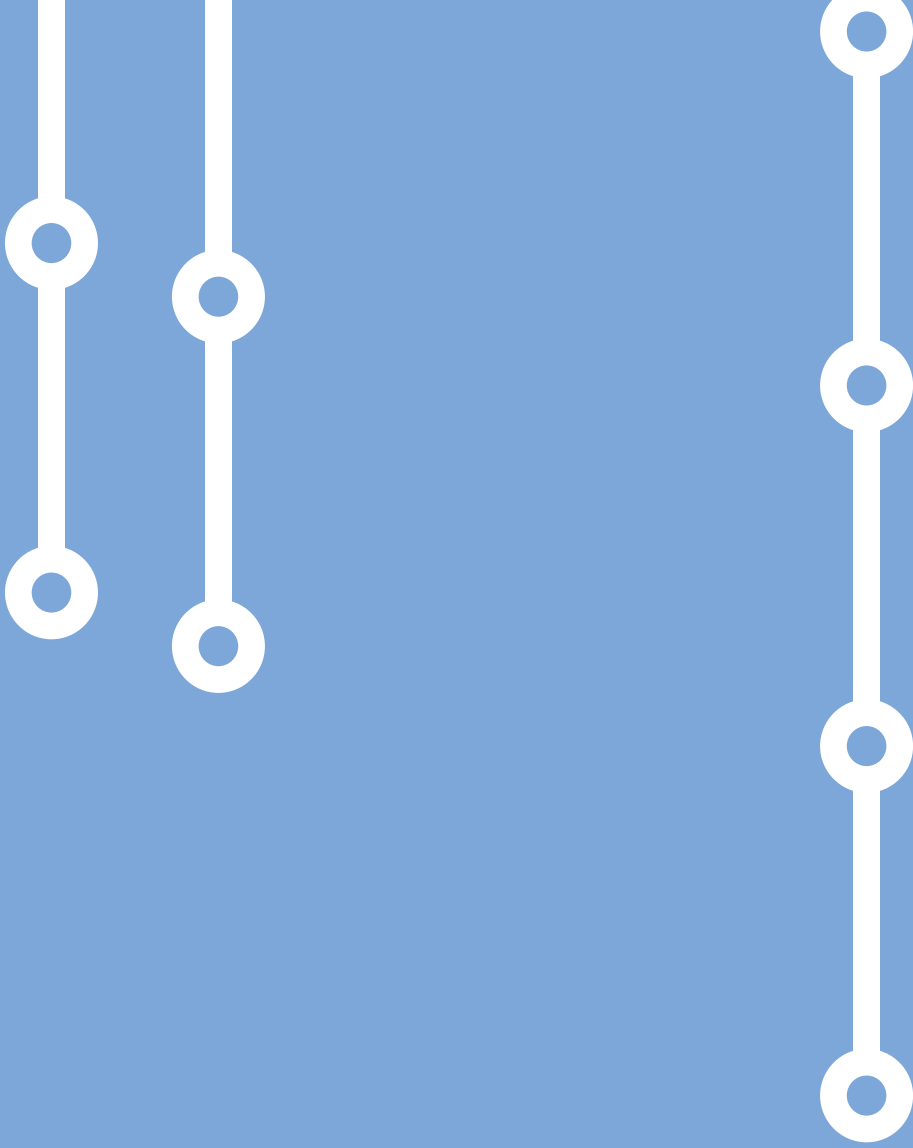
Een complicerende factor bij de financiële aspecten betreft de kostentoedeling rond toetsen en versterken. Toetsingen komen ten laste van het verantwoordelijke waterschap (hier Noorderzijlvest), terwijl voor dijkversterkingen een verdeelsleutel geldt van 50% voor het rijk, 40% voor de gezamenlijke waterschappen en 10% voor alleen het verantwoordelijke waterschap. Dit monitoringsproject is gepresenteerd als een voorinvestering voor de voorgenomen dijkversterking na afkeuring, maar technisch-inhoudelijk is het moeilijk te onderscheiden van een geavanceerde toetsing of een uitgebreide variant van het 'Toetsen op Maat'.

De recente aardbevingsproblematiek vormt ook hierbij echter een complicatie. Verkennende berekeningen hebben laten zien dat de bermhoogte hierdoor met enkele tientallen meters zou kunnen toenemen. Dat heeft vooral te maken met de vrees voor verweking van de zandkern en dieper gelegen zandlagen (vanaf een diepte onder NAP -15 m). Dit probleem zou eventueel op te lossen zijn door de zandkern van de dijk praktisch geheel droog te maken, dus door de freatische lijn te verlagen tot de onderkant van deze zandkern. Dat vereist een actieve drainagemethode, omdat het slootpeil hoger ligt. De uitgevoerde proeven in het kader van de LiveDijk XL maken het aannemelijk dat dit haalbaar is.

Wat heeft de waterbeheerder er aan in de praktijk?

Samenvattend kan over de ervaringen bij de LiveDijk XL worden opgemerkt dat het belangrijke voordelen biedt om tijdig met meten te beginnen (en dus niet bijvoorbeeld één jaar voorafgaand aan de versterking, maar al gelijk nadat de dijk in de toetsing is afgekeurd):

- Er kan al met een beperkte inzet worden begonnen, die stap voor stap kan worden uitgebreid. Bij langer meten wordt steeds meer inzicht opgebouwd; de ene bevinding leidt tot de volgende actie. Hiermee wordt de kennis over een dijk steeds verder opgebouwd.
- Bij een aanvankelijk beperkte inzet is er een stapsgewijze opbouw van de benodigde budgettering. Hierbij kan in elke stap het budget mede worden afgestemd op de te verwachten baten; zodra (aanvullende) monitoring *naar verwachting* niet meer effectief is, kan het achterwege blijven.
- Naarmate er eerder begonnen wordt, is het handelingsperspectief voor het waterschap groter. Daarmee zullen ook de baten van monitoring voor het waterschap groter zijn.
- Een goede inbedding in het waterschap en het betrekken van meerdere afdelingen binnen het waterschap heeft baat bij een rustige stap-voor-stap benadering.
- Ook de samenwerkende partijen in een langdurend meetproject kunnen hun onderdelen steeds beter op elkaar en op de vragen bij het waterschap afstemmen (Van der Meer et al., 2016).



6 Conclusies

In de voorgaande hoofdstukken zijn de highlights van bij elkaar circa tien jaar onderzoek naar het slimmer maken van dijken met behulp van ICT-middelen en data- en informatiesystemen geïllustreerd. Betrouwbare informatie levert een bijdrage aan het inzicht in de toestand van dijken. Meer inzicht leidt tot:

- het vergroten van het handelingsperspectief;
- passender maatregelen;
- optimaler beheer- en onderhoudscyclus;
- bij de beheer en onderhoudsfase leidt meer inzicht tot effectiever toezicht bij (bijna) calamiteiten.
- een betrouwbaarder inschatting van de restlevensduur bij beoordelen
- een betere prioritering bij beoordelen en versterken;
- scherper ontwerpen binnen de versterkingsopgave;

Waardevolle informatie over het gedrag van de dijk, en over het te verwachten gedrag bij maatgevende omstandigheden, kan ten dele worden ingewonnen met visuele inspecties, ten dele door gericht op locatie nieuwe informatie in te winnen met adequate meet- en monitoringstechnieken, en ten dele door reeds beschikbare informatie, bijvoorbeeld in archieven of bij omwonenden, beter te ontsluiten.

De succesverhalen, of best practices, kunnen worden onderverdeeld in nieuwe of verbeterde meettechnieken, verbeterde proceskennis en de praktische integratie van verschillende data- en informatiebronnen om daarmee tot verbeterde kennis over het gedrag van dijken te komen.

Enkele succesvolle meettechnieken die in het IJkdijk ontwikkelprogramma naar voren zijn gekomen zijn:

- (Sterk in prijs verlaagde) volautomatische hellingmeetbuizen voor het bepalen van het deformatiepatroon over de diepte;
- Toepassing van infraroodbeelden voor vroegtijdige detectie van kwelstromen vanuit een dijk;
- Passieve radiometrie voor vochtbepaling in dijken en voor de kwaliteitsbepaling van asfaltbekledingen.

Daarnaast hebben de diverse speciale proefnemingen baanbrekende inzichten opgeleverd in de faalmechanismen piping (proeven in 2009 en 2012, praktijkonderzoek in 2013-2015), zettingsvloeiing (proef in 2014) en microstabiliteit (proeven in 2012, praktijkonderzoek in 2015). Dit is input voor verbetering van rekenmodellen en rekenregels.

Het project De Veenderij heeft een best practice opgeleverd voor het monitoren van droogte aan veenkaden, die ook op andere locaties toepasbaar is en invulling geeft aan de zorgplicht bij veenkaden. Deze bestaat uit twee stappen. De eerste stap is gericht op het middels search and select in kaart brengen van het onderzoeksgebied en hotspots te identificeren. In de proefopzet bleek een mobiele passieve microgolfstralingssensor hiervoor in het bijzonder geschikt. Hiermee worden vochtverschillen in de dijk tot 1 meter diepte opgenomen. Door herhaalmetingen ontstaat inzicht in lokale veranderingen. De tweede stap is erop gericht om hotspots uit te rusten met in-situ sensoren om de waterspanning te meten, gecombineerd met de inzet van peilbuizen om de stijghoogte in het pakket te meten. Beide metingen zijn complementair en geven informatie over de waterhuishouding van het dijklichaam. De gegevens kunnen worden gebruikt voor het uitvoeren van sterkteberekeningen in de modellen D-GeoStability en Plaxis en zijn daarmee direct aan de sterkte van de waterkering te relateren.

De opslag van data in het DDSC heeft geleid tot een standaardisatie van dijksensordata en kent veelbelovende mogelijkheden tot het trekken van generieke conclusies, bijvoorbeeld over de ontwikkeling van de freatische lijn onder uiteenlopende omstandigheden. Ook is het DDSC operationeel inzetbaar gebleken, zowel bij extreme condities als voor bijzondere proefnemingen om het gedrag van de dijk onder extreme condities op een veilige wijze beter te leren kennen.

Onder meer met deze technieken en methoden is een nauwkeuriger en betrouwbaarder inzicht in de conditie van de waterkering verkregen voor de Ommelanderzeedijk in Groningen, de Waddenzeedijk bij Ameland, de regionale keringen bij Waternet en de Voorhavendijk van de Beatrixsluizen in Nieuwegein.

Voor de Ommelanderzeedijk, waar verreweg de grootste investeringen hebben plaatsgevonden van alle LiveDijken, is op voorzichtige wijze de return on investment bepaald. Met de investering van anderhalf miljoen euro is tenminste 20 miljoen euro bespaard op de dijkversterking, door toepassing van veel van de in IJkdijk-kader ontwikkelde technieken, kennis en wijze van samenwerken.

Uit de diverse proef- en praktijkonderzoeken is duidelijk naar voren gekomen dat geen enkele data- of informatiebron op zichzelf een compleet, volledig, nauwkeurig en betrouwbaar inzicht in de sterkte en het gedrag van dijken oplevert. Dit heeft onder meer te maken met de variabiliteit van de ondergrond en de inherente onzekerheid in metingen en in modellen. Het vertalen van lokale informatie naar grotere dijkstrekkings kent daardoor inherente beperkingen. Hierdoor zijn de onzekerheden in de beoordeling van de dijkveiligheid op regionaal niveau vaak groter dan dijkbeheerders zich realiseren.

Om een kwalitatief goed, nauwkeurig en betrouwbaar beeld te krijgen van de sterkte van de waterkering blijkt het noodzakelijk om kwalitatief goede data en informatie in voldoende kwantiteit met elkaar te combineren. De vereisten blijken per dijk verschillend te zijn en sterk afhankelijk van de situatie.

Verder is de kenmerkende aanpak van de Stichting IJkdijk om een impuls te geven aan de toepassing van informatie- en communicatietechnologie binnen een bepaald domein, in dit geval de Nederlandse dijkenwereld, een voorbeeld gebleken voor andere domeinen, waar eenzelfde samenwerking tussen overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen geconcretiseerd is in het gebruik van testlocaties en proefnemingen in de praktijk.

7 Aanbevelingen

Gelet op de al bereikte resultaten, maar ook de notie dat er nog veel meer mogelijkheden zijn, wordt aanbevolen om verdere doorontwikkeling van meet- en analysetechnieken te continueren, bijvoorbeeld de interpretatie van passieve microgolfmetingen voor de bepaling van de sterkte van asfaltbekledingen en de analyse van de in het DDSC opgeslagen data, bijvoorbeeld om de bestaande vuistregels voor de hoogte van de freatische lijn in dijken aan te scherpen.

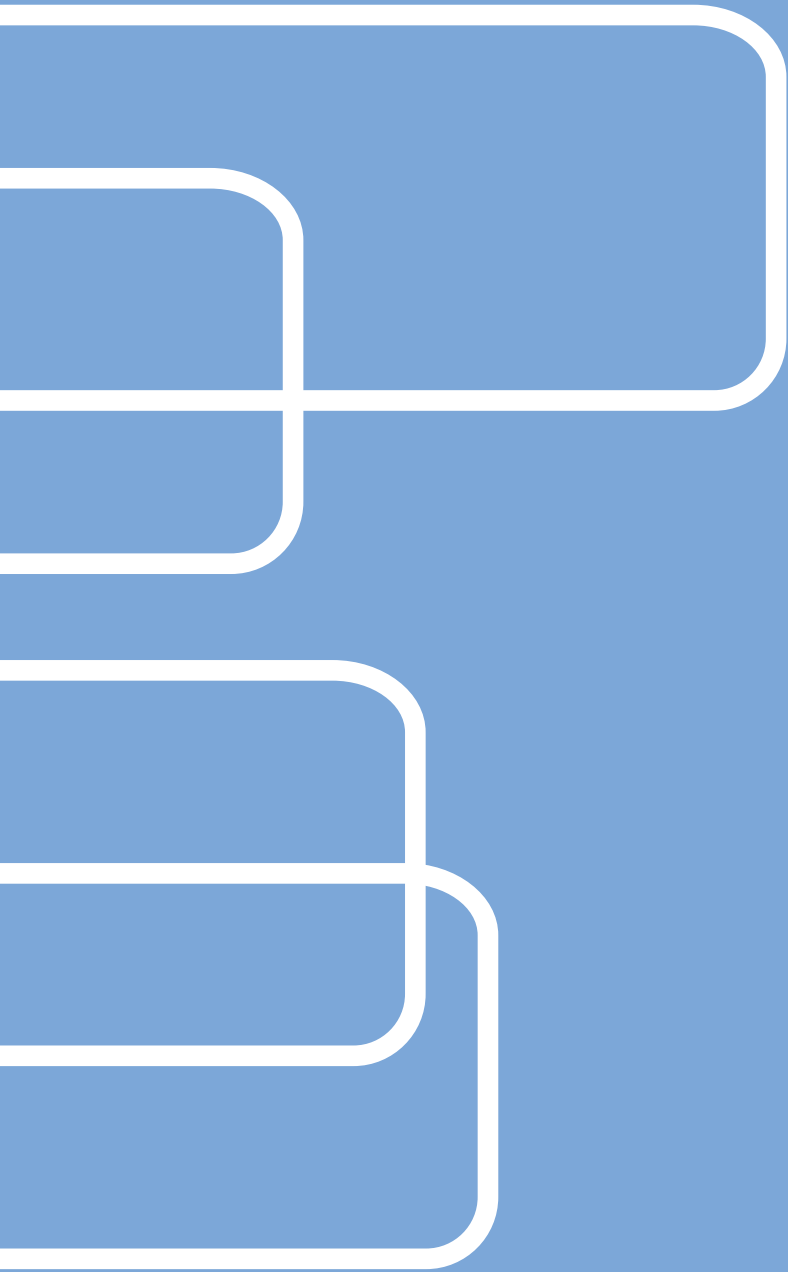
In algemene zin kan voor het monitoren aan dijken, in elk van de fasen uit de levenscyclus (afgekeurd, in ontwerp, in versterking en in normaal beheer) uit zowel de succesvolle best practices als uit de minder succesvol verlopen projecten het volgende worden geconcludeerd als aanbevelingen voor de toekomst:

- Naarmate er eerder begonnen wordt, is het handelingsperspectief voor het waterschap groter. Daarmee zullen ook de baten van monitoring voor het waterschap groter zijn.
- Er kan al met een beperkte inzet worden begonnen, die stap voor stap kan worden uitgebreid. Bij langer meten wordt steeds meer inzicht opgebouwd; de ene bevinding leidt tot de volgende actie. Hiermee wordt de kennis over een dijk steeds verder opgebouwd.
- Bij een aanvankelijk beperkte inzet is er een stapsgewijze opbouw van de benodigde budgettering. Hierbij kan in elke stap het budget mede worden afgestemd op de te verwachten baten; zodra (aanvullende) monitoring naar verwachting niet meer effectief is, kan het achterwege blijven.
- Een goede inbedding in het waterschap en het betrekken van meerdere afdelingen binnen het waterschap heeft baat bij een rustige stap-voor-stap benadering.
- Ook de samenwerkende partijen in een langdurend meetproject kunnen hun onderdelen steeds beter op elkaar en op de vragen bij het waterschap afstemmen.

Nu het IJkdijk ontwikkelprogramma haar activiteiten in 2016 afrondt, kan er in de praktijk verder worden gebouwd aan de kennis over dijken door dijkmonitoring verder in de praktijk te brengen.

Een inhoudelijk grote uitdaging wordt voorzien in de mogelijkheid tot het winnen van relevante informatie uit steeds grotere datastromen (inclusief anomaliedetectie, datamining, artificial intelligence), en dit bij voorkeur real time te koppelen aan voorspellingsmodellen en conditie informatie. Hier zijn door FloodControl IJkdijk slechts de eerste stappen in gezet, en zijn ontwikkelingen niet te stoppen.

Vanuit het perspectief van de waterbeheerder pleit FloodControl IJkdijk voor een proces dat structuur brengt in de datainformatie vraag van de beheerder. De Stichting heeft willen aangeven hoe ontwikkelingen hiervoor geïntegreerd konden worden in het proces van de keringbeheerder en heeft hierin een aantal aspecten kunnen valideren, echter wordt vastgesteld dat dit nog niet volledig op orde is. Tevens wordt verwacht dat de beheerder nog niet voldoende op deze toekomstige opgave is ingesteld, een POV Data op Orde kan hiervoor de ruimte bieden.



8 Literatuurlijst

[de Vries, 2012]

G. de Vries, Eindrapportage Monitoring droogte onderzoek veenkaden, Deltares, rapportage 1203255-006-, Delft 2012

[Koelewijn et al., 2014]

A.R. Koelewijn, G. de Vries, H. van Lottum, U. Förster, V.M. van Beek & A. Bezuijen, 'Full-scale testing of piping prevention measures: Three tests at the IJkdijk', 8th International Conference on Physical modelling in Geotechnics, Perth, 14-17 januari 2014, pp. 891-897, CRC Press.

[Koelewijn, 2016]

A.R. Koelewijn. A systematic approach to health monitoring of dikes. La sicurezza delle opere arginali: aspetti geotecnici e monitoraggio, Padua, March 2016.

[Miramap B.V. 2015]

Miramap B.V. Livedijk XL aanvullend asfaltonderzoek locatie Lauwersmeerdijk, 2015.

[Sluis et al., 2016]

J.J.M. Sluis, E.E. Sirks, A.R. Koelewijn & J.W. Veenstra, 'Effect van tijdsafhankelijkheid op piping bij zeedijken', Geotechniek 20(1):8-12. Educom januari 2016.

[Stoorvogel-van der Horst, 2016]

S.A. Stoorvogel-van der Horst. 'Lessons Learned Stichting FloodControl IJkdijk (2016): Ervaringen en lessen uit het eerste- en tweede IJkdijk ontwikkelprogramma'. FloodControl IJkdijk.

[Van Beek]

V.M. van Beek, Backward erosion piping: initiation and progression, proefschrift TU Delft, 2015. ISBN 978-94-6259-940-6.

[Van den Ham et al., 2015]

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

[Van der Meer et al., 2016]

M.T. van der Meer, J.W. Nieuwenhuis & S. Bakkenist (redactie), 'LiveDijk XL Noorderzijvest – State of the Art 2015', Stichting FloodControl IJkdijk, april 2016.

Contact

Stichting FloodControl IJkdijk
Postbus 97 | 9350 AB Leek

E info@ijkdijk.nl
T 0594 55 50 50

www.floodcontrolijkdijk.nl

Stichting FloodControl IJkdijk
is gevestigd in Groningen

