



Sensoren

Met sensoren kan meer inzicht verkregen worden in de sterkte van een dijk. Met informatie uit de sensoren zoals waterspanning, vervorming en temperatuur kan de sterkte van de dijk beter worden berekend.

1. INLEIDING
2. GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
3. STRATEGIE MEERLAAGSVEILIGHEID
4. SCHEMATISCHE WEERGAVE
5. TECHNISCHE KENMERKEN
6. GOVERNANCE
7. KOSTEN EN BATEN
8. PRAKTIJKERVERVARING EN LOPEND ONDERZOEK
9. KENNISLEEMTES
10. BRONNEN & LINKS
11. VOORBEELD ACTIVITEITEN IJKDIJK
12. DISCLAIMER

1. Inleiding

Met monitoringstechnologie kan meer inzicht verkregen worden in de sterkte van een dijk. Bij de inzet van monitoringstechnieken wordt gebruik gemaakt van sensoren voor het meten van relevante grootheden op en in de dijk, zoals waterspanning, vervorming of temperatuur. Een geïnstrumenteerde dijk kan tegenwoordig continu worden geanalyseerd. Met informatie uit sensoren kan de sterkte van de dijk beter worden berekend. Tegelijkertijd kan de veiligheid hierdoor worden vergroot, omdat er eerder kan worden ingeschat of de dijk verzwakt dreigt te raken. Daarnaast kunnen naar verwachting de kosten voor ontwerp, onderhoud en dijkverbeteringen worden verlaagd, omdat dit doeltreffender kan gebeuren dan in het verleden door nauwkeurigere schattingen van beheer-, ontwerp- en

versterkingsparameters. Een monitoringssysteem kan op relatief goedkope wijze continu waardevolle informatie verschaffen over uiteenlopende parameters.

Meettechnologieën dragen bij aan:

- Inspectie/beheer
- Toetsen op veiligheid
- Risicobeheersing door continue inspectie van dijken na afkeuren en vóór versterking
- Optimalisatie van het versterkingsontwerp van afgekeurde dijken
- Early warning
- Optimalisatie van het langjarig beheer en onderhoud (asset management)

2. Gerelateerde onderwerpen en Deltafacts.

Trefwoorden: dijkmonitoring, monitoringstechnieken, meettechnologieën, Life Cycle Monitoring, asset management, [Flood Control](#), [IJKdijk](#), LiveDijk, HWBP.

3. Strategie meerlaagsveiligheid

Meerlaagsveiligheid is onder te verdelen in:

1 Preventie, 2 Ruimtelijke ordening, **3 Crisisbeheersing**

Doordat monitoringssystemen een bijdrage kunnen leveren bij de beoordeling van de sterkte van dijken, valt dit bij uitstek onder preventie. In geval van het dreigend falen van een dijk, kunnen monitoringstechnieken gerelateerd zijn aan de 3de laag van crisismanagement, doordat ze dan in operationeel overstromingsbeheer ingezet kunnen worden.

4. Schematische weergave

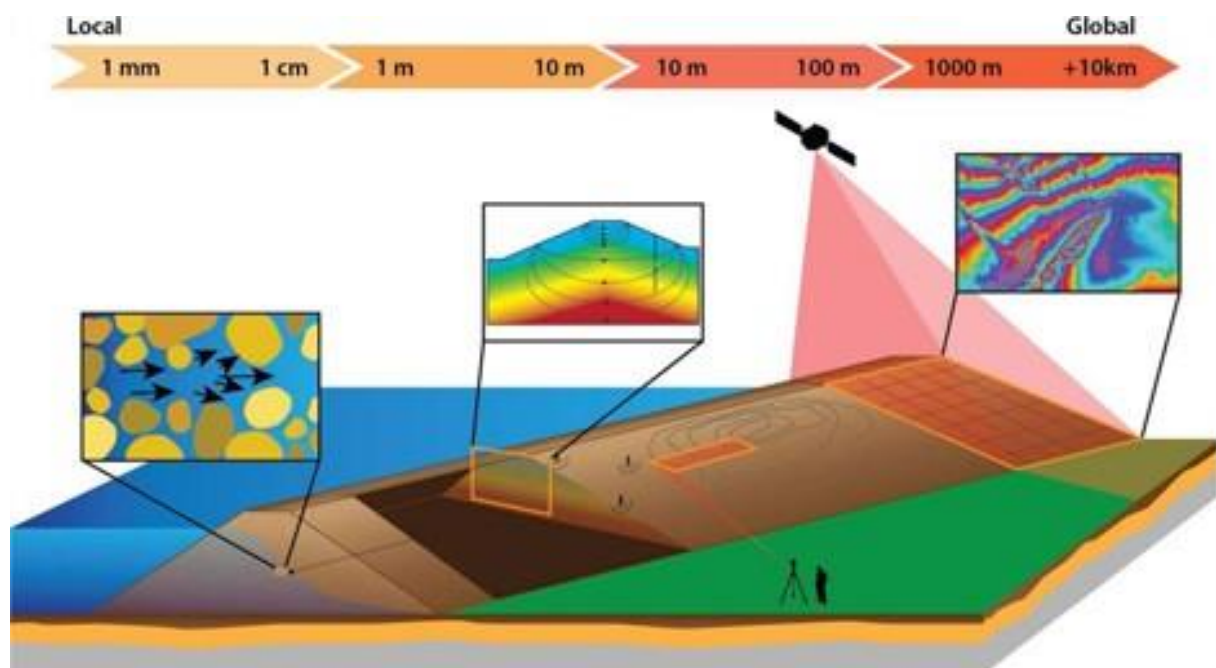
Binnen monitoringssystemen kan een onderscheid gemaakt worden tussen twee typen: lokale/in situ systemen (in de dijk) en remote sensing/ ex situ systemen (op afstand van de dijk). Onder in-situ wordt in de dijk verstaan. Dit zijn instrumenten die in de grond worden aangebracht en doorgaans op één punt of langs een lijn meten. Onder remote sensing (ex-situ) wordt verwezen naar methoden waar vanaf afstand gemeten wordt (landbased, airborne en satelliet), bijvoorbeeld om vervormingen vast te stellen. Die kunnen als indicatie dienen voor het gedrag van de dijk. Sensoren aan het oppervlak van de dijk worden soms geschaard onder in situ monitoring en soms onder remote sensing. Metingen op de dijk zelf naar

bijvoorbeeld vervorming en scheuringen aan het oppervlakte zijn in situ, maar geofysische metingen vanaf het oppervlak waarmee dieper in de dijk gemeten wordt, worden doorgaans tot remote sensing gerekend.

Door te meten kan de sterkte van de dijk, gerelateerd aan diverse faalmechanismen, nauwkeuriger dan voorheen bepaald worden. Monitoring kan hierbij gedefinieerd worden als het geheel van tijdsafhankelijke metingen én de verwerking daarvan, om op basis daarvan onderbouwd te kunnen besluiten tot aanpassingen aan de constructie, het beheer of de monitoring.

Door te monitoren kunnen parameters direct of indirect worden gemeten.

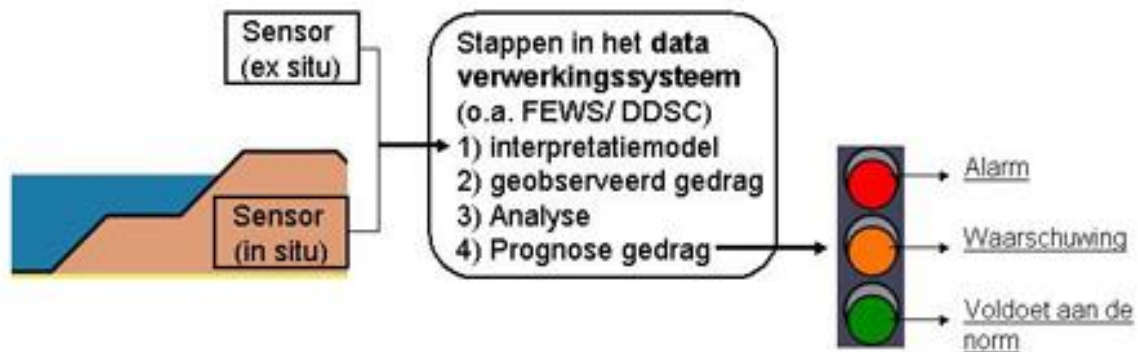
Bijvoorbeeld temperatuur kan gebruikt worden als maat voor grondwaterstroming en vormt zo een indirecte meting. Tevens kan er op afzonderlijke punten (discreet) of meer continu worden gemeten langs een lijn (1-dimensionaal) of over een vlak (2-dimensionaal). Bijvoorbeeld temperatuurmetingen met glasvezelkabels kunnen op specifieke punten op de kabel plaatsvinden (discreet), of meer uitgesmeerd over een lengte van bijvoorbeeld 1 meter (continu) – in dit laatste geval wordt een gemiddelde waarde verkregen. Er kan op verschillende schalen gemeten worden, zoals uitgebeeld in onderstaande figuur.



Monitoring op diverse schalen, bewerkt naar [Mooney \(2012\)](#).

Sensoren worden gekoppeld aan een uitleessysteem. Vervolgens vindt er datatransport plaats en worden de data geanalyseerd. Op basis van de analyse volgt,

indien nodig, actie. Op deze manier kunnen monitoringssystemen een bijdrage leveren aan de waterveiligheid. Schematisch is dit als volgt weer te geven:



Een mogelijk hulpmiddel bij de interpretatie is data gedreven modellering, waarbij veranderingen in het gedrag van de dijk op vergelijkbare belastingen kunnen worden gedetecteerd. Het uitgangspunt is dat er actie moet worden ondernomen als de reactie van de dijk op belasting in ongunstige zin verandert. De verandering in dijkgedrag is af te leiden uit fluctuerende metingen.

5. Technische kenmerken

Onderstaande tabel laat de toepassing, parameter en aard van verschillende typen sensoren zien (overgenomen uit Van den Berg & Koelewijn, 2014a).

Techniek	Parameter(s)	Relevante faalmechanismen	Type	Typische frequentie	Toepassingen in dijkbeheercyclus
Zakbaak	Verticale deformatie	Macrostabieliteit, microstabieliteit	In-situ	Dagelijks	Verbetering, buitengewoon onderhoud
Zettingsmeetslang	Verticale deformatie	Macrostabieliteit, microstabieliteit	In-situ	Elke seconde tot dagelijks	Verbetering, calamiteitenbestrijding
Total station	Deformatie	Macrostabieliteit, microstabieliteit, heave	Remote sensing	Meerdere punten, één per 10 sec.	Verbetering
Laseraltimetrie	Deformatie	Macrostabieliteit, microstabieliteit, heave	Remote sensing	Vele punten, jaarlijks	Verbetering, buiten-gewoon onderhoud, toetsing, inspectie
Scheurmeter	Deformatie	Macrostabieliteit, microstabieliteit, heave, bekleding	In-situ	Elke minuut tot jaarlijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding

Convergentie-opnemer	Deformatie	Macrostablieit, microstablieit, heave, bekleding	In-situ	Elke minuut tot jaarlijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding
GPS	Deformatie	Macrostablieit, microstablieit, heave, bekleding, hoogte	In-situ	Elke minuut tot jaarlijks	Verbetering, buiten-gewoon onderhoud, inspectie, calamiteitenbestrijding
Inverted Pendulum	Horizontale deformatie	Macrostablieit	In-situ	Eens per minuut	Verbetering, buiten-gewoon onderhoud
Extensometer	Verticale deformatie	Macrostablieit, hoogte	In-situ	Eens per minuut	Verbetering, buiten-gewoon onderhoud
Hellingmeetbuis	(horizontale) deformatie	Macrostablieit, microstablieit	In-situ	Eens per 10 seconden	Verbetering, toetsing
Hellingmeter	Lokale hoek-verdraaiing	Macrostablieit, microstablieit	In-situ	Elke seconde	Verbetering, buiten-gewoon onderhoud
Glasvezel	Temperatuur, rek, druk	Piping, heave, macro-stablieit, micro-stablieit, instablieit bij overslag	In-situ	Eens per 10 seconden	Verbetering, toetsing, inspectie, buiten-gewoon onderhoud
Dichtheidsmeter	Erosie	Piping, micro-stablieit, overloop en overslag	In-situ	Eens per 10 seconden	Calamiteitenbestrijding
Digitale camera Voor Stereoscopie	Vervorming, bijzonderheden	Macrostablieit, microstablieit, heave, algemeen	Remote sensing	Elke seconde tot dagelijks	Verbetering, toetsing, inspectie, buiten-gewoon onderhoud, calamiteitenbestrijding
Multispectrale fotografie	Gewaskwaliteit	Overloop en overslag	Remote sensing	Dagelijks tot maandelijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding
Infrarood camera	Temperatuur	Piping	Remote sensing	Elke seconde tot dagelijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding
Vochtmetr	Vochtgehalte	Overloop en overslag	In-situ	Eens per 10 seconden	Toetsing, calamiteitenbestrijding
Self potential	Elektrische potentiaal	Piping, microinstablieit	In-situ	Eens per 10 seconden	Toetsing

Water-spanningsmeter	Totale druk of waterspanning, soms ook temperatuur	Piping, heave, macro-stabiliteit, micro-stabiliteit, instabiliteit bij overslag	In-situ	Elke seconde tot dagelijks	Verbetering, toetsing, inspectie, buiten-gewoon onderhoud
Drukopnemer	Gronddruk	Macrostabiliteit	In-situ	Elke seconde	Verbetering
Seismiek	Trillingen, grondwater	Piping, macrostabiliteit verweking	In-situ	Hoogfrequent	Verbetering, toetsing
Akoestische emissie	Geluid	Macrostabiliteit, microstabiliteit	In-situ	Hoogfrequent	Calamiteitenbestrijding
Radar	Deformatie, vochtgehalte, gewaskwaliteit	Piping, heave, macro-stabiliteit, micro-stabiliteit, overloop en overslag, instabiliteit bij overslag	Remote sensing	Wekelijks tot maandelijks	Verbetering, toetsing, inspectie, buiten-gewoon onderhoud

6. Governance

Door als waterschap op tijd te voldoen aan de veiligheidsnormen kan aansprakelijkheid worden vermeden. Daarbij kan monitoring een waterschap helpen en bewust maken van de verhoogde risico's van een (afgekeurde) dijk. Met behulp van monitoring en het inzetten van nieuwe technologieën kan men aantonen dat alles in het werk is gesteld om redelijkerwijs te voldoen aan de zorgplicht van een waterkering. Voor meer informatie, zie [juridificering van inspecties en het waterschap](#).

Nederland loopt op dit moment voorop in het grootschalig testen en ontwikkelen van monitoringssystemen voor dijken, de ambitie is dat deze kennis ook in het buitenland toegepast zal worden.

7. Kosten en baten

Er bestaan verschillende selectiecriteria, voorwaarden en doelen op basis waarvan bepaald kan worden of het zin heeft om een dijk te monitoren met behulp van sensortechnologie:

- Dijk voldoet niet aan de norm (afgekeurd)
- Dijk voldoet aan de norm, maar beheerder heeft reden om toch te monitoren, zoals een onderhoudsvraagstuk
- In voorbereiding op een versterking om meer informatie te krijgen over het gedrag van de dijk; optimalisatie dijkontwerp
- Optimaliseren beheer en onderhoud

- Automatisch uitvoeren van een toets op de veiligheid (sterkte berekening)

Voor de keuze van een sensor is een aantal factoren cruciaal (De Vries et al, 2013):

- Nauwkeurigheid;
- Reikwijdte;
- Metingdichtheid;
- Meetfrequentie;
- Mate van redundantie;
- Robuustheid;
- Aanlooptijd;
- Informatieverwerkingstijd;
- Interpretatie;
- Voorspelbaarheid faalmechanisme met behulp van de metingen in aanvulling op hetgeen verder bekend is.

Een afwegingssystematiek voor monitoringssystemen voor de toepassing op het gebied van dijken is in ontwikkeling bij de POV Macrostabieleit, daarbinnen is reeds een kwalitatieve tool ontwikkeld voor deze afweging. (Van der Meer et al., 2016a)

Bepalende factoren voor de kosten worden gevormd door verschillende onderdelen:

- technische kosten van de sensor
- implementatiekosten en aansluitingskosten
- uitvoeringskosten van het system

Bovenstaande keuzemogelijkheden maken dat de kosten voor een sensor locatie- en doelspecifiek is. Bij een technische positief kosten-baten saldo zal een investering in sensortechnologieën lonen.

De baten van sensoren in een dijk kunnen liggen in een goedkoper dijkontwerp, omdat door het eerder signaleren van problemen er met minder onzekerheidsmarge ontworpen kan worden. Ook zal op termijn dijkinspectie waarschijnlijk minder frequent nodig zijn, waardoor kosten worden bespaard.

Een concreet voorbeeld: de zesjaarlijkse veiligheidstoetsing van de primaire waterkeringen verplicht om in veel situaties een marge van "0,5 tot 1" meter te hanteren ten aanzien van de ligging van de freatische lijn (niveau van de waterspiegel). Gebruik van sensortechnieken zal in combinatie met een passende

analyse een onderbouwing kunnen geven van een beter passende marge voor de toetsing bij maatgevende omstandigheden ([Koelewijn, 2011](#)). Echter, zoals aangetoond in [Van der Kolk et al. \(2011\)](#), blijven meetonauwkeurigheden altijd van belang. Daarnaast is de meetuitkomst afhankelijk van de intensiviteit, duur en grondsoort. Dit maakt dat meten en toetsing zich nog lastig tot elkaar verhouden.

Life Cycle Monitoring

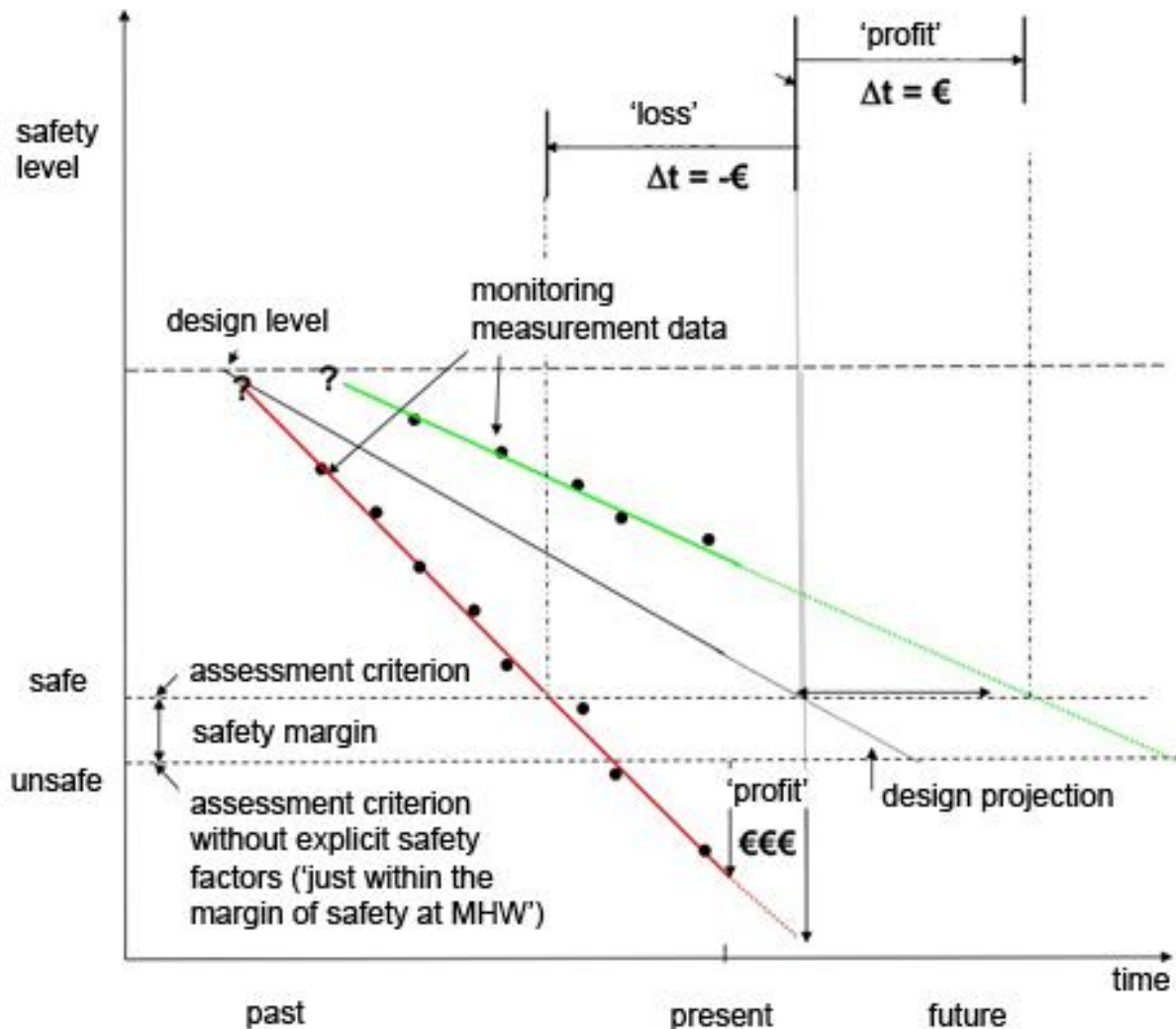
Life Cycle Monitoring heeft betrekking op alle levensfasen van een dijk die doorlopen worden: afkeuren, ontwerp, uitvoering en beheer (voorafgaand aan een volgend moment van afkeuren en het daarna weer opstarten van een dijkversterking). De volgende figuur geeft een eerste raamwerk met vier levensfasen van de dijk en/of het dijkversterkingsproject: beheerfase (inclusief toetsing), afkeurfase (inclusief vaststellen scope), ontwerpfase en uitvoeringsfase. In de figuur is aangegeven wat het nut van eerder monitoren in een beschouwde fase kan zijn voor een volgende fase.



Monitoring in de levenscyclus van een dijk ([Van der Meer et al., 2016a](#))

Winst van monitoring

In onderstaande figuur is het veiligheidsniveau van een dijk uitgezet tegen de tijd, met de ontwerpverwachting (de zwarte diagonaal) en twee mogelijke uitkomsten door monitoring (de groene en de rode diagonalen).



Winst van monitoring ([van den Berg & Koelewijn, 2014a](#))

In de groene situatie (zie groene lijn) valt de berekende veiligheidsniveau op basis van gegevens uit monitoring hoger uit dan bij de ontwerpverwachting. Er is hier sprake van winst van monitoring bij gunstige uitkomsten. Dit betekent dat er pas in een later stadium kosten gemaakt hoeven te worden, wat op korte termijn besparing oplevert. De delta t laat de winst van monitoring zien, uitgaande van de marge voor mogelijk 'veilig' uitstel van versterking na afkeuring. In de rode situatie (zie rode lijn) blijkt de sterkte van de kering onder die van de ontwerpverwachting uit te komen. Er ontstaat een 'verlies' door vervroeging van de versterking gebaseerd op

informatie uit de monitoring. Ook vervroegde versterking kan baten opleveren, de €€€ laat de baten zien verkregen door het vermijden van een potentiële doorbraak van de dijk.

Het groene scenario treedt naar verwachting het vaakste op, door de bewust conservatieve opzet van de toetsingsvoorschriften. De grootste winst is echter te behalen door betere kennis omtrent het gedrag van de waterkering, waardoor de kans op het falen van een dijk wordt verkleind. Dit voordeel wordt dus ook behaald wanneer de ontwerpverwachting uitkomt ([Van den Berg & Koelewijn, 2014b](#)).

Binnen het project FloodControl 2015 is in 2010 onderzoek uitgevoerd naar een business case voor gebruik van sensortechnologie voor dijken (Bultsma et al., 2010). De voornaamste conclusie was dat bij monitoring van dijkstukken die net zijn goedgekeurd of net zijn afgekeurd over het algemeen winst te behalen valt, mits de onzekerheden samenhangen met tijdsafhankelijke parameters zoals waterspanningen. Aanbevolen wordt om vooraf een afweging tussen kosten en baten te maken. Binnen het programma IJkdijk 2008 – 2012 is onderzoek uitgevoerd naar een business case voor gebruik van sensortechnologie voor dijken. Van 2014 tot 2016 hebben beide programma's de krachten gebundeld om actieve inzet van innovatie en monitoring bij het programma HWBP te stimuleren, waarna het als levensvatbare ontwikkeling is losgelaten.

Bij Waternet is een business case opgesteld waarin met 1 ton investering 20 miljoen aan versterkingen wordt onderbouwd, door gebruik te maken van een nieuwe aanpak met toepassing van sensortechnologie voor afgekeurde dijken. Dit is inhoudelijk onderbouwd in ([Van Putten, 2013](#)).

8. Praktijkervaring en lopend onderzoek

Op dit moment lopen er nog verschillende projecten met sensoren in dijken: IJkdijk, LiveDijk, Digidijk, UrbanFlood en Flood Control 2015. Centraal staat het onderzoek naar de toepassing van monitoringssystemen en implementatie hiervan in de dagelijkse beheerpraktijk. Er valt te denken aan testen, valideren en een eerste introductie van nieuwe sensor- inspectie en observatietechnieken) en het uitvoeren van experimenten.

De verschillende ontwikkelstappen in het IJkdijk ontwikkelprogramma werken van een eerste technisch inhoudelijke toets naar de werking en toepasbaarheid van meettechnieken voor waterkeringen toe naar de interpretatie en voorspellingen van dijksterkte voor risicobeheersing, versterking en beheer en onderhoud. Per ontwikkelstap wordt hier kort op ingegaan.

1. Validatie-experimenten

Het primaire doel in deze projecten is het bepalen welke meettechnieken tot aanvullend inzicht kunnen leiden in het gedrag van keringen, gefocust op een aantal voor Nederland belangrijke faalmechanismen. De conclusies die in de validatie-experimenten worden getrokken over toepasbaarheid van meettechnieken en het nut en de noodzaak voor dijken en specifieke faalmechanismen vormen de basis voor de te vormen LiveDijk projecten.

2. LiveDijk / Stress tests

Stichting IJkdijk zet bij de realisatie van LiveDijk projecten specifiek in op een vervolg van de validatie-experimenten. De LiveDijk projecten die momenteel in uitvoering of reeds gerealiseerd zijn, focussen dan ook op stabiliteit en piping. Ook wordt een droogtegevoelige veenkade gemonitord. Kennis die aan de basis hiervan staat zijn de droogteonderzoeken van STOWA.

3. LiveDijk XL's

Uiteindelijk is het van belang om niet alleen de dijktechnologische kennis te koppelen aan meettechnieken, maar ook ervaring op te doen in de opschaling van enkele honderden meters naar tientallen kilometers dijk. Uitdagingen in ICT systemen, gegevens verwerking en modelmatige gegevensbewerking en -interpretatie, etc. vormen hierbij een van de grootste doelen. Daarbij wordt specifiek gefocust op de mogelijkheden van monitoring voor versterkingen en risicobeheersing. Eén grootschalig traject waar reeds veel op de toekomstige versterkingskosten is bespaard door een combinatie van monitoring en specifieke proeven is de Ommerlanderzeedijk (Van der Meer et al., 2016b), een ander grootschalig monitoringsproject is momenteel in voorbereiding.

4. Dijk Data Service Centrum

Vanuit de zorg voor versnippering per waterschap, waarbij alle data apart worden omgezet, wordt er gewerkt aan een Dijk Data Service Centrum (DDSC). Belangrijk is om uniformiteit te bereiken in het verwerken van data afkomstig van de sensoren om in de toekomst de stabiliteit van de dijken live te kunnen monitoren. Het DDSC stroomlijnt gegevensinwinning en -

verwerking en maakt data op een eenvoudige wijze beschikbaar voor de beheerder. Het databeheersysteem dat de monitoringsgegevens uiteindelijk allemaal bundelt en stroomlijnt is de kroon op het IJkdijk ontwikkelprogramma. De kern van het DDSC wordt door beheerders vormgegeven en aangestuurd. In samenwerking met het bedrijfsleven kunnen vervolgens belangrijke applicaties worden ontwikkeld. Het DDSC is nog in ontwikkeling,

Door het IJkdijk Pipingexperiment is er veel kennis opgedaan op het gebied van het faalmechanisme piping, de werking ervan en de factoren die uiteindelijk falen bepalen. Er zijn met name experimenten gedaan naar piping en stabiliteit. Voor piping bleek waterspanning een sleutelparameter ([Koelewijn et al., 2010](#)). Voor de hellingstabiliteit was dit waterspanning en vervorming, waarbij satelliet informatie aanvullende informatie kan leveren. Het blijkt echter dat visuele inspectie op dit moment belangrijk blijft. Visuele inspectie is nodig vanwege onverwachte gebeurtenissen, niet geïstrumenteerde parameters en mogelijke verandering/verplaatsing van de sensor, waardoor de meetwaarde onbedoeld verandert. Ook is met alleen gebruik van sensoren het niet mogelijk om een compleet beeld te krijgen van de stabiliteitsstatus van de dijk ([Hopman et al. 2011](#)). Een beperking van het pipingexperiment is dat het een hybride vorm is tussen een laboratorium en een praktijkervaring, maar nog geen reële situatie.

Voor meer info over IJkdijk, zie [voorbeeld activiteit](#).

Informatie infrastructuur [Dijk Data Service Centrum](#)

De ontwikkeling van een DDSC is ingezet omdat een goede informatie infrastructuur voor de data van de sensoren onmisbaar is. Het DDSC wordt gemaakt voor het beheersbaar verzamelen, opslaan en verwerken van alle meetinformatie van de sensoren. Het gaat om een grote hoeveelheid gegevens die op gestandaardiseerde wijze verzameld, opgeslagen en verwerkt worden. Deels kan dit met al bestaande technologie, deels zal hier nieuwe (IT) technologie voor ontwikkeld moeten worden. Deze nieuwe technologie is ook te gebruiken in andere domeinen.

In het DDSC ontwikkeltraject gaat het om de volgende onderwerpen:

- Realiseren van een centrale database waarin sensorwaarden kunnen worden vastgelegd. De database is er op gebouwd om robuust grote hoeveelheden

data te kunnen verwerken. Deelnemende waterschappen kunnen gebruik maken van het DDSC systeem voor het benaderen van hun eigen LiveDijk en opslaan en bewerken van eigen data.

- Werken aan standaardisatie. Er zijn uiteenlopende typen sensoren die informatie over het gedrag van de dijk opleveren. Denk aan waterspanning, beweging, temperatuur(verloop), camerabeelden, etc. In het DDSC worden 4 manieren aangeboden om sensorgegevens aan te leveren. Leveranciers worden gevraagd hierop aan te sluiten in de LiveDijk projecten. Zo werken we aan standaardisatie
- Ontwikkelen van toepassingen voor anomaliedetectie (onregelmatigheden opsporen). Dit is een relatief nieuw vakgebied, dat zeker in dijkmonitoring nog niet eerder is toegepast. Hoe leer je een systeem wat het normale gedrag is van een dijk? Hoe kan je afwijkingen van dat normale gedrag herkennen en gebruiken voor alarmering? Het vergelijken van situaties rondom dijken met historische gegevens en daarbij benodigde sensormetingen is ook een nieuw gebied. Hoe kan je het gedrag van dijken in de tijd op een gestandaardiseerde manier beschrijven, zodat ze onderling vergelijkbaar worden?
- Bedrijven en instellingen uitnodigen om eigen applicatie te ontwikkelen die gebruik maken van het DDSC, zoals bijvoorbeeld gebeurd is rond de proefnemingen in de Leendert de Boerspolder (augustus – oktober 2015).

In de periode 2014 / 2016 is het DDSC doorontwikkeld op basis van de eerste gebruikservaringen.

Lopende en recent afgeronde projecten

Het project [UrbanFlood](#) onderzocht het gebruik van diverse sensoren in waterkeringen in combinatie met een online “early warning system” (EWS). Het EWS, dat door middel van de sensoren in de waterkeringen voortdurend een vinger aan de pols heeft, zorgt voor vroegtijdige alarmering en betere informatie voor de waterbeheerders en de noodhulpdiensten. Door toepassing van moderne software technologie in combinatie met geofysische rekenmodellen worden afwijkingen in de waterkering snel opgemerkt en doorgerekend. Voor de waterbeheerder is dergelijke informatie van belang voor een realistische toets aan de normen voor dijkstabiliteit. In crisissituaties attendeert een EWS op kritieke dijkcondities en mogelijke gevolgen. De UrbanFlood technologie genereert automatisch een EWS voor een waterkering, of deze nu 10m of 10km lang is. UrbanFlood kan dijken, waar dan ook ter wereld, vanuit meerdere locaties tegelijkertijd monitoren; in het kader van UrbanFlood zijn

monitoringsystemen aangebracht in dijken bij en in Amsterdam, in Zeeland, in de binnenstad van Boston aan de Engelse oostkust en langs de Rijn in Duitsland nabij Rees. Ook wordt een dam in Brisbane gemonitord. Dit is niet alleen een garantie voor een robuuste non-stop waakzaamheid; de reactie van dijken op eb en vloed, passerende schepen en auto's geeft inzicht in dijkstabiliteit. Het monitoren van de eigenschappen van dijken elders genereert kennis die de analyse van elke specifieke dijk ten goede komt. Ook de presentatie van real-time EWS analyses aan diverse instanties tegelijkertijd maakt gebruik van internet en webtechnologieën welke een gecoördineerd besluitvormingsproces bevorderen. UrbanFlood koppelt de kennis van zes partners uit vier landen (NL, PL, RU, UK), ieder een autoriteit op het eigen vakgebied, van ICT tot water.

Doorontwikkeling van het programma 'DikeTool' in het kader van FloodControl 2015 zal zorgen voor een eenduidige (set van) waarschuwings- en alarmwaarden. Daarnaast verbetert het de meetreeksen waardoor grondwaterstromings,- piping en stabiliteit kunnen worden bijgesteld om de onzekerheid te verkleinen. Een belangrijke sensor in dit programma is de waterspanningsmeter.

Begin 2014 vonden er bij de Noord-Hollandse Markermeerdijken (Amsterdam – Hoorn, Hoogheemraadschap HollandsNoorderkwartier) bezwijkproeven plaats met als doel de veldwaarde van de sterkte van het veen aan de teen van de dijk vast te stellen. Hierbij is gebruik gemaakt van waterspanningmeter,s, inclinometer,s, zettingsmeetslangen en automatische zakbaken. In oktober 2015 zijn proefnemingen met een regionale kering bestaande uit klei op veen, de dijk van de Leendert de Boerspolder, afgerond met een succesvolle bezwijkproef.

TNO is in samenwerking met de TU Delft een project aan het ontwikkelen voor een satellietstelsel speciaal voor waterapplicaties: WaterSat. De focus hierin is het op grote schaal (met meer dan 500 nanosatellieten) meten van vervormingen kleiner dan 1mm (hoogteverschillen). Tevens wordt er binnen FloodSat nagedacht over het uitbouwen van een early-warning systeem met sensordata afkomstig uit remote-sensing.

Verder is er gewerkt aan de uitwerking van de business case Digitale Delta in het kader van Topsector Water. De Digitale Delta kijkt naar de realisatie van praktijkvoorbeelden van individuele showcases water en ICT in systeemverband. Het

doel is om te komen tot een infrastructuur en platform om meetgegevens te verwerken en te delen. Een belangrijke discussie binnen de business case is het verantwoorden en dragen van kosten voor het opzetten van de infrastructuur.

Momenteel loopt een onderzoek in de Willemspolder bij IJzendoorn naar de vorming van piping en de mitigerende invloed van pipingwerende maatregelen als het verticaal zanddicht geotextiel (VZG) en de grofzandbarrière (GZB).

Rond de afronding van de IJkdijk-ontwikkelprogramma's is een tweetal concluderende eindrapporten verschenen, één over de 'lessons learned' ([Stoorvogel-van der Horst, 2016](#)) en één over de 'best practices' ([Koelewijn et al., 2016](#)).

9. Kennisleemtes

Belangrijke kennisleemtes op het gebied van de meettechnologie zijn:

- wat zijn alarmwaarden voor de verschillende parameters? Dit wordt nader geconcretiseerd binnen pilots in de POV Macrostabieleit. Factoren die hierbij een rol spelen zijn de meetnauwkeurigheden van de sensortechnieken, de vereiste handelingstijd na alarmering opdat nog effectief maatregelen kunnen worden genomen en de vereiste zekerheid ten aanzien van de alarmering om tot actie over te gaan.
- hoe kan omvang van een meetreeks (totale tijdsduur, meetfrequentie, ruimtelijke omvang) worden gewaardeerd? Deze kennisleemte wordt op dit moment binnen LiveDijk XL onderzocht.
- hoe betrouwbaar is de informatie gezien het feit dat de samenstelling van de ondergrond in detail overal verschilt, het belastingoverloop niet op voorhand bekend is en het gedrag onder extreme omstandigheden onbekend is? De onzekerheden in de veiligheidsbeoordeling zijn met name te vinden in:
 - de te hanteren waterpeilen;
 - de opbouw van de ondergrond (laagopbouw, aanwezigheid en verloop van geulafzettingen);
 - de eigenschappen van de grondlagen (volumegewicht, sterkte, doorlatendheid);
 - de waterspanningen in de dijk en in de ondergrond (ligging freatische lijn, gevoeligheid voor peilwisselingen in zandlagen en doorwerking van peilwisselingen in klei- en veenlagen ([Koelewijn, 2011](#))). Deze kennisleemtes zijn recent binnen het programma 'Wettelijk Toets

Instrumentarium (WTI)' van RWS, spoor ondergrondmodellering, onderzocht en worden in de loop van 2016 geadresseerd.

- hoe vaak moet er gemeten worden om metingen betrouwbaar verwerkt te krijgen en hoe wordt hieruit een betrouwbaar, semi-automatisch alarmsignaal verkregen? Hoe werkt het systeem van op het juiste moment alarm slaan om aansluitende vervolgacties effectief te laten verlopen. Deze kennisleemte is ten dele beantwoord in de All-in-one sensor validatie test (AIO-SVT) ([De Vries et al., 2013ab](#)).
- Het langjarig meten op specifieke onderdelen voor de ontwikkeling van bijvoorbeeld sterktekaracteristieken, vervormingskaracteristieken of bekledingsconditie. Deze referentielocaties ondersteunen de hierboven genoemde ontwikkeling naar ervaringsgegevens. Door het specifieke karakter kan dit kleinschalig uitgevoerd worden. Deze kennisleemte wordt op dit moment binnen LiveDijk onderzocht en is al eerder onderzocht binnen UrbanFlood.
- Het ontwikkelen van adaptieve sterkte- en conditiemodellen die uiteindelijk een kwalitatieve beoordeling kunnen geven van de toestand van de waterkering of het watersysteem.
- Ontbreken van criteria om de waarde van een meetreeks vast te stellen, daar dit afhankelijk is van de totale tijdsduur, frequentie en kwaliteit van de metingen in relatie tot de voorgekomen gebeurtenissen ([Koelewijn, 2011](#)).

10. Bronnen & links

Bronnen

- Van den Berg, F.P.W. & Koelewijn, A.R. (2014a), KPP CIP SMIT deelproject IVketen, [Veiligheid als basis, Monitoringsfilosofie en proeftuinen](#), rapportnummer 1207933-000-VEB-0001-v2, Deltares, Delft, 176 pp.
- Van den Berg, F.P.W. & Koelewijn, A.R. (2014b), [Monitoringsfilosofie voor de Nederlandse waterkeringen](#), Geotechniek 18(3):34-38.
- Bernard van der Kolk, John van Esch en André Koelewijn (2011), KPP [CIP SMIT deelproject "Veiligheid als basis: inbedding \(dijk\)meten en monitoring"](#), Deelproduct "Analyse meetdata pilot", rapportnr. 1204819-003-VEB-0001-v03, Deltares, Delft, 57 pp.
- Bultsma, M. et al. (2010). Feasibility study of smart levees concepts. Stichting Flood Control, 55 pp.

- Hopman, V., Kruiver, P. en Koelewijn A. R., (2011). [How to create a smart levee](#). Proc. 8th Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Berlin, 12-16 September, 12 pp.
- Koelewijn, A. R., Pals, N., Sas, M. J. en Zomer, W.S. (2010). [IJKdijk pipingexperiment; validatie van sensor en meettechnologie voor detectie van optreden van piping in waterkeringen](#). Stichting IJKdijk, rapportnummer 2010-26 PIW.
- Koelewijn, A. R (2011) [Verkennde notitie veiligheidsfilosofie](#). Deltares. 1204819-003-VEB-0002. status concept.
- 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. Groningen.
- Meer, M.T. van der, Koelewijn, A.R., Weijenborg, A. en Konstatinou, M. (2016a). [Handreiking Life Cycle Monitoring, Fase 1. POV Macrostabieleit project 3.2A1](#), Tiel, juni 2016.
- Meer, M.T. van der, Nieuwenhuis, J.W. en Bakkenist, S. (2016b). LiveDijk XL Noorderzijlvest – State of the Art 2015, Stichting FloodControl IJKdijk, Groningen, juni 2016.
- Mooney, M. (2012), [Advancing earth dam and levee sustainability through monitoring science and condition assessment](#), toegekend voorstel onder het PIRE-programma van het National Science Fund van de Verenigde Staten, Golden, Colorado.
- Pengel. B., Wentholt, L., Krzhizhanovskaya, V., Shirshov, G., Melnikova, M., Gouldby, B., Koelewijn, A., Pyayt, A., Mokhov, I., Pals, N., Meijer, R., en Broekhuijsen, J. [The urban flood warning system: sensors and coastal flood safety](#). Proceedings of CoastGIS 2011: 10th International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal ZoneManagement (Vol IV pp20-27), September 6-8, 2011, Oostende, Belgium. www.coastgis.info, ISBN: 9788889405246.
- Putten, R.D. van (2013), [Dijken optimaliseren met sensing](#), Geotechniek 17(5):56-58.
- Stoorvogel-Van der Horst, S.A. (2016), [Lessons Learned Stichting Flood Control IJKdijk: Ervaringen en lessen uit het eerste- en tweede IJKdijk ontwikkelprogramma](#). FloodControl IJKdijk, Groningen.

- Vries, G. de, Brake, ter, C.K.E., Bruijn, H. de, Koelewijn, A.R., Langius, E.A.F., Lottum, H.van & Zomer, W.S. (2013). [Dijkmonitoring: beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen](#).

Websites

- [IJKdijk](#)
- [UrbanFlood](#)
- [Flood Control 2015](#)
- [Professionalisering Inspectie Waterkeringen \(PIW\)](#)
- [DDSC.nl](#)
- [Dijkmonitoring.nl](#)

Deze Deltafact is opgesteld door Deltares, 22 december 2011 en laatst herzien in september 2017.

Auteurs

- L. van Vliet
- A.R. Koelewijn
- M. van der Vat
- F.P.W. van den Berg.

De Deltafact is mede gebaseerd op externe interviews met en informatie van:

- Wouter Zomer (Stichting IJKdijk)
- Robert Meijer (TNO)
- Dolf Daal (Hoogheemraadschap Delfland) Bob Pengel (Urban Flood)

11. Voorbeeld activiteiten IJKdijk

De IJKdijk, een initiatief van N.V .NOM, STOWA, Stichting IDL/Sensor Universe, Deltares, TNO en het bedrijfsleven, is een internationaal uniek project gericht op het ontwikkelen, testen en valideren van sensorsystemen in waterkeringen. Vanuit de Stichting IJKdijk is de afgelopen jaren geïnvesteerd in kennisontwikkeling:

1. rondom maatgevende faalmechanismen (overslag, macrostabiliteit en piping);
2. van met name in-situ monitoring- en sensortechnieken, in mindere mate remote sensing technieken en airborne technieken;
3. van robuuste sensornetwerken, data-opslag en verwerking en datarepresentatie;

4. van toepasbare sensorsystemen en opschaling hiervan.

Daarnaast is er sterk geïnvesteerd in marktontwikkeling door het organiseren van experimenten waarbij marktpartijen konden participeren;

De ontwikkelstappen in het IJkdijk programma zijn onderling onlosmakelijk met elkaar verbonden. Met een goede onderlinge afstemming en centrale sturing op projectdoelstellingen kunnen wensen en eisen van beheerders leiden tot optimale productontwikkeling door bedrijven in waardevolle showcases die kunnen leiden tot internationale verkoop. Kennisinstellingen dragen bij in de koppeling tussen dijktechnologie, meettechnologie en ICT.

Met de realisatie van de financiering van het IJkdijk-ontwikkelprogramma 2008 – 2012 en 2012 – 2014 kunnen de verschillende ontwikkelstappen in uitvoering worden gebracht. Het ontwikkelprogramma bestaat uit de volgende stappen waarbij voor iedere stap de projecten in voorbereiding of ontwikkeling zijn vermeld:

1. **Validatie**

De uitvoering van validatie-experimenten voor sensortechnologie voor waterkeringen en het opdoen van geotechnische kennis in relatie hiermee wordt hier nagestreefd. Validatie is noodzakelijk voor de uiteindelijke ontwikkeling van een algemeen toepasbaar sensorsysteem. In 2008 en 2009 zijn hiervoor respectievelijk het macrostabiliteitsexperiment (1 proef) en het pipingproject (4 proeven) uitgevoerd. Voor de Ijkdijklocatie in Oost-Groningen is nog één experiment in voorbereiding: de Sensor Validatie Test (SVT). Bij de SVT zullen in september 2012 vier dijksegmenten tot bezwijken worden gebracht volgens de faalmechanismen macrostabiliteit, piping, microstabiliteit en eventueel overloop. Aan de monitoringsbedrijven is het de uitdaging om de juiste faalmechanismen te diagnosticeren, lokaliseren en prognosticeren. Daarna, in 2013, zal op een nader te bepalen locatie een experiment naar zettingsvloeiing worden uitgevoerd.

2. **LiveDijk**

Als vervolgstap op de validatie werkt Stichting IJkdijk samen met beheerders aan een beperkte uitrol van de gevalideerde technologieën naar de beheerpraktijk. Dit vindt plaats in LiveDijk projecten op kleine schaal. Er zijn nu verschillende projecten in uitvoering of voorbereiding, waaronder:

- LiveDijk Eemshaven (waterschap Noorderzijlvest)

- LiveDijk De Veenderij (Waternet HH Amstel, Gooi en Vecht. Combinatie tussen Validatie en LiveDijk)
- LiveDijk Utrecht (HH de Stichtse Rijnlanden, Prov. Utrecht, RWS Dienst Utrecht)
- LiveDijk XL Noorderzijlvest (waterschap Noorderzijlvest, zie ook punt 3)
- Vlaardingsekade (door HH van Delfland gerealiseerd)
- Stammerdijk (Waternet, UrbanFlood)
- Ringdijk (Waternet, UrbanFlood)

3. **Livedijk Ameland**

De LiveDijk projecten worden onderling op elkaar afgestemd zodat ontwikkeldoelstellingen optimaal kunnen worden afgestemd. Doelstellingen van de LiveDijk projecten zijn op hoofdlijnen gelijk, te weten:

- Bepalen van nut en noodzaak van monitoringssystemen voor specifieke dijken (in relatie tot beheer, onderhoud, versterking, toets op veiligheid, etc.) voor beheerders
- vaststellen van het langdurig functioneren van sensortechnologie onder praktijkomstandigheden;
- aantonen dat installatie en operatie van sensortechnologie in een bestaand dijklichaam kan plaatsvinden zonder dat de dijk 'faalt'
- aantonen dat 'achtergrond' ruis als gevolg van omgevingsfactoren kan worden gescheiden van belastingsfactoren relevant voor de faalmechanismen van het dijklichaam
- realiseren van een real-time monitoringsysteem van de sterkte van het dijklichaam door koppeling van de sensortechnologie met een centrale datacentrale en distributie van gegevens naar de werkplek van de dijkinspecteur, beheerders en andere belanghebbenden binnen het waterschap.

4. **LiveDijk XL**

De vergroting van de schaal naar LiveDijk XL is de volgende stap. Hierbij wordt de kennis opgedaan in de kleinere LiveDijk projecten opgeschaald om over lange dijktrajecten (vele kilometers) toe te passen op typisch Nederlandse dijken. Bij zowel LiveDijk als LiveDijk XL speelt de implementatie in de beheerpraktijk (technisch, organisatorisch, procesmatig en planmatig) van waterschappen en Rijkswaterstaat een belangrijke rol. Met Waterschap Noorderzijlvest is het project LiveDijk XL Noorderzijlvest opgesteld. Na LiveDijk XL zijn de kennis en producten dermate ver ontwikkeld dat

vermarkting nationaal en internationaal op grotere schaal kan plaatsvinden. De doelstellingen van het project zijn als volgt:

- Bewaken van de veiligheid (early warning/ /early detection) van de afgekeurde dijken tot deze zijn verbeterd. In nauw verband met het Dijk Data Service Centrum en de gebruikte modellen voor sterkteberekening en –voorspelling, wordt met de verkregen meetgegevens aan deze doelstelling invulling gegeven.
- Het leveren van aanvullende informatie over de opbouw van bodem en dijk en eigenschappen van het grondwater, ten behoeve van de verbeterwerken. Hierbij is een aansluiting te realiseren bij de hoogwaterbeschermingsprogramma's en de afweging of optimalisatie van versterkingsontwerpen gerealiseerd kunnen worden met de verkregen monitoringsresultaten. In samenwerking met het programma Flood Control 2015 wordt hier onderzoek naar gedaan.
- Het monitoren van de dijkvakken en na de verbeterwerken, mede in voorbereiding voor het beheer en onderhoud
Deze doelstelling betreft een lange termijn doelstelling. Besparingen op beheer en onderhoud zijn moeilijk in te schatten. Wel is nu al een significante besparing te verwachten in de kosten voor de toetsing op veiligheid.

In 2012 is bij de Ommelanderzeedijk nabij Delfzijl het zogenaamde DMC systeem van Landustrie/VolkerWesselsTelecom ingebracht. Hiermee is tijdens de winter van 2012/2013 de waterstand in de dijk bemeten en gecontroleerd. Het bijzondere aan het DMC systeem is de mogelijkheid een te veel aan water in de dijk gecontroleerd te laten uitstromen via een regelbare pomp.

In 2013 is wederom de Ommelanderzeedijk samen met de Lauwersmeerdijk nabij Lauwersoog geselecteerd om met behulp van innovatieve monitoringstechnieken nauwkeurig in de gaten te houden. Beide dijkvakken zijn onderdeel van de primaire kering en zijn in beheer bij het waterschap Noorderzijlvest. Tijdens de laatste toetsronde zijn de dijkvakken afgekeurd en dat was voor het Waterschap aanleiding om in samenwerking met Stichting IJkdijk te starten met monitoring.

De ingewonnen gegevens worden voor het Waterschap centraal ontsloten via het zg. DDSC Dijk Data Service Centrum en via een koppeling met DAMlive! wordt sinds 2014 real time de berekende stabiliteit van de dijk weergegeven.

12. Disclaimer

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteur(s) en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.