



## 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. 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 dijkverbetering worden verlaagd, omdat dit doeltreffender kan gebeuren dan in het verleden door nauwkeuriger schattingen van beheer-, ontwerp- en

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

Meettechnologieën dragen bij aan:

- Reguliere inspecties en beheer
- Toetsen op veiligheid van dijken
- Risicobeheersing door continue inspectie van dijken na afkeuren en vóór versterking
- Optimalisatie van het versterkingsontwerp van afgekeurde dijken
- Early warning systemen
- 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 en 3. Crisisbeheersing. Doordat monitoringssystemen een bijdrage kunnen leveren bij de beoordeling van de sterkte van dijken, valt dit bij uitstek onder 2. *preventie*. In geval van het dreigend falen van een dijk, kunnen monitoringstechnieken gerelateerd zijn aan de derde 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:

1. lokale/in situ systemen (in de dijk)
2. remote sensing/ ex situ systemen (op afstand van de dijk).

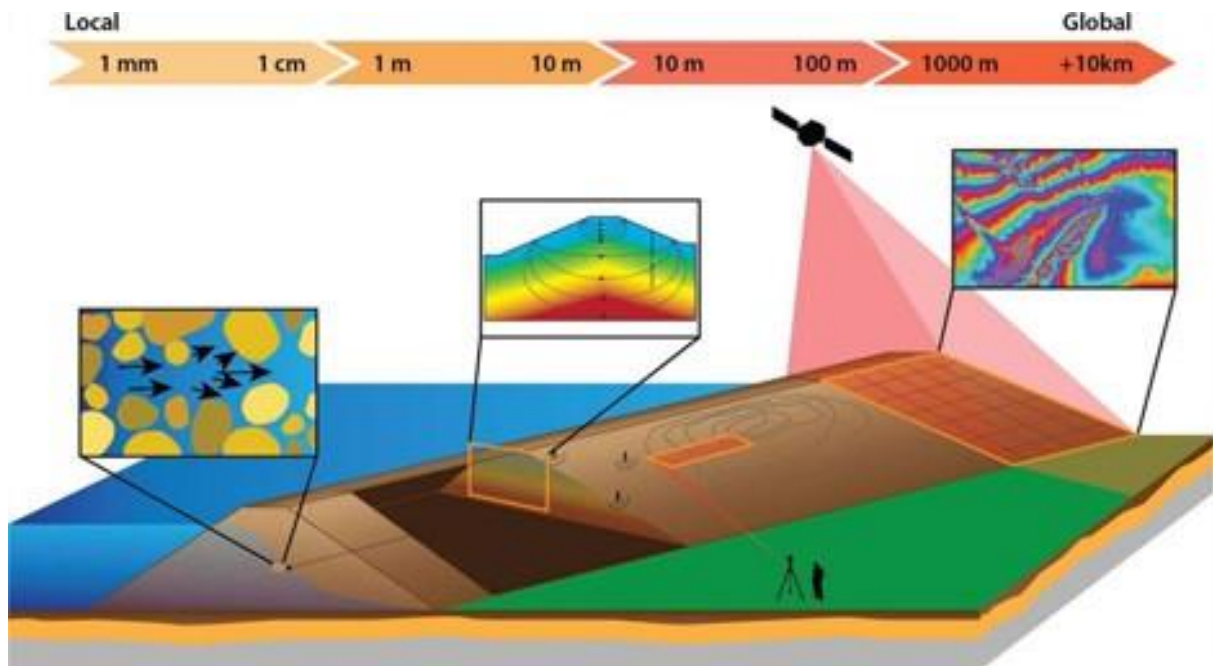
Onder in-situ wordt in de dijk verstaan. Dit zijn instrumenten die in de grond worden aangebracht en doorgaans op één punt of langs een lijn meten.

Onder remote sensing (ex-situ) wordt verwezen naar methoden waarmee 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.

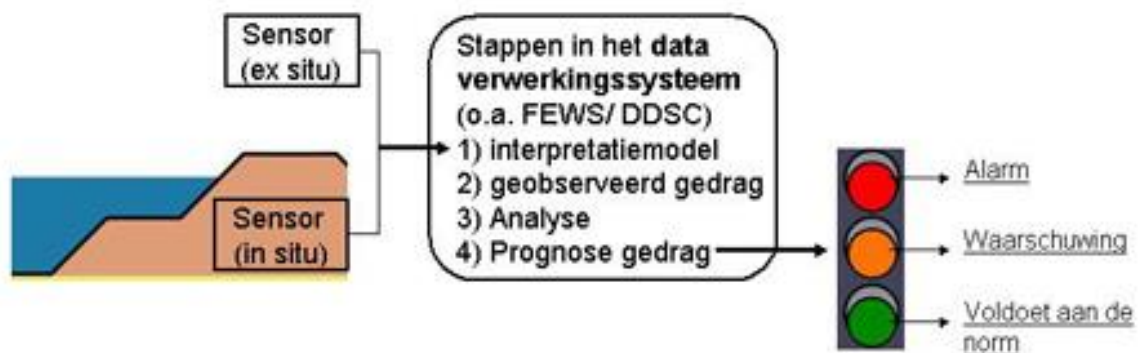
Door te meten kan de sterkte van de dijk, gerelateerd aan diverse faalmechanismen, nauwkeuriger dan voorheen bepaald worden. Monitoring kan hierbij gedefinieerd worden als het geheel van tijdsafhankelijke metingen én de verwerking daarvan, om op basis daarvan onderbouwd te kunnen besluiten tot aanpassingen 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 wordt 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	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit	In-situ	Dagelijks	Verbetering, buitengewoon onderhoud
Zettingsmeetslang	Verticale deformatie	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit	In-situ	Elke seconde tot dagelijks	Verbetering, calamiteitenbestrijding
Total station	Deformatie	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit, heave	Remote sensing	Meerdere punten, één per 10 sec.	Verbetering
Laseraltimetrie	Deformatie	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit, heave	Remote sensing	Vele punten, jaarlijks	Verbetering, buitengewoon onderhoud, toetsing, inspectie
Scheurmeter	Deformatie	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit, heave, bekleding	In-situ	Elke minuut tot jaarlijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding
Convergentie-opnemer	Deformatie	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit, heave, bekleding	In-situ	Elke minuut tot jaarlijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding
GPS	Deformatie	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit, heave, bekleding, hoogte	In-situ	Elke minuut tot jaarlijks	Verbetering, buitengewoon onderhoud, inspectie, calamiteitenbestrijding
Inverted Pendulum	Horizontale deformatie	Macrostabiliiteit	In-situ	Eens per minuut	Verbetering, buitengewoon onderhoud
Extensometer	Verticale deformatie	Macrostabiliiteit, hoogte	In-situ	Eens per minuut	Verbetering, buitengewoon onderhoud
Hellingmeetbuis	(horizontale) deformatie	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit	In-situ	Eens per 10 seconden	Verbetering, toetsing
Hellingmeter	Lokale hoekverdraaiing	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit	In-situ	Elke seconde	Verbetering, buitengewoon onderhoud
Glasvezel	Temperatuur, rek, druk	Piping, heave, macro-stabiliiteit, micro-stabiliiteit, instabiliteit bij overslag	In-situ	Eens per 10 seconden	Verbetering, toetsing, inspectie, buitengewoon onderhoud
Dichtheidsmeter	Erosie	Piping, micro-stabiliiteit, overloop en overslag	In-situ	Eens per 10 seconden	Calamiteitenbestrijding
Digitale camera Voor Stereoscopie	Vervorming, bijzonderheden	Macrostabiliiteit, microstabiliiteit, 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
Vochtmeter	Vochtgehalte	Overloop en overslag	In-situ	Eens per 10 seconden	Toetsing, calamiteitenbestrijding
Self potential	Elektrische potentiaal	Piping, microinstabiliteit	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, buitengewoon 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, buitengewoon onderhoud

## 6. Governance

Door als waterkeringbeheerder 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, of het gedrag van de dijk op basis van waarnemingen uit het veld of anderszins (optimaliseren beheer en onderhoud)
- Het vormt de brug tussen theorie en praktijk, wat monitoring uitermate geschikt maakt voor kennisontwikkeling.
- In voorbereiding op een versterking om meer informatie te krijgen over het gedrag van de dijk en de ondergrond; optimalisatie van het dijkontwerp
- Controle van uitgangspunten en aannames, die in een dijkontwerp gehanteerd zijn en verificatie van gehanteerde rekenregels
- 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 betrouwbaarheid en 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 (Handreiking Life Cycle Monitoring – Groene Versie) is in ontwikkeling bij de POV-Macrostabieliteit. Daarbinnen is reeds een kwalitatieve tool ontwikkeld voor deze afweging (A.R. Koelewijn & M.T. van der Meer et al., 2019).

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 positief kosten-baten saldo zal een investering in sensortechnologieën lonen.

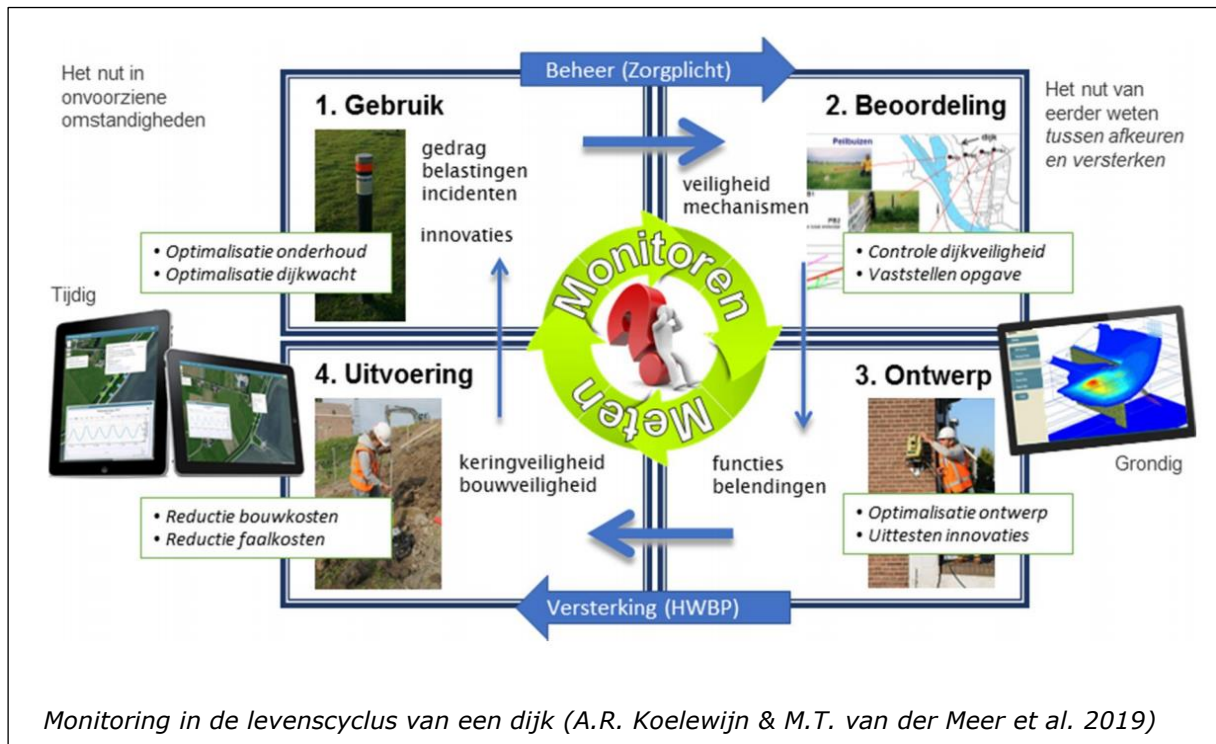
De baten van sensoren in een dijk kunnen liggen in een goedkoper dijkontwerp, omdat door het eerder signaleren van problemen er met minder onzekerheidsmarge ontworpen kan worden. Ook zal op termijn dijkinspectie waarschijnlijk minder frequent nodig zijn, waardoor kosten worden bespaard.

Een concreet voorbeeld: de twaalfjaarlijkse veiligheidsbeoordeling (conform het WBI 2017) 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 beoordeling bij maatgevende omstandigheden ([Koelewijn, 2011](#)). Echter, zoals aangetoond in [Van der Kolk et al. \(2011\)](#), blijven meetonnauwkeurigheden altijd van belang. Daarnaast is de meetuitkomst afhankelijk van de intensiviteit, duur en grondsoort. Dit maakt dat meten en beoordelen zich nog lastig tot elkaar verhouden.

### **Life Cycle Monitoring**

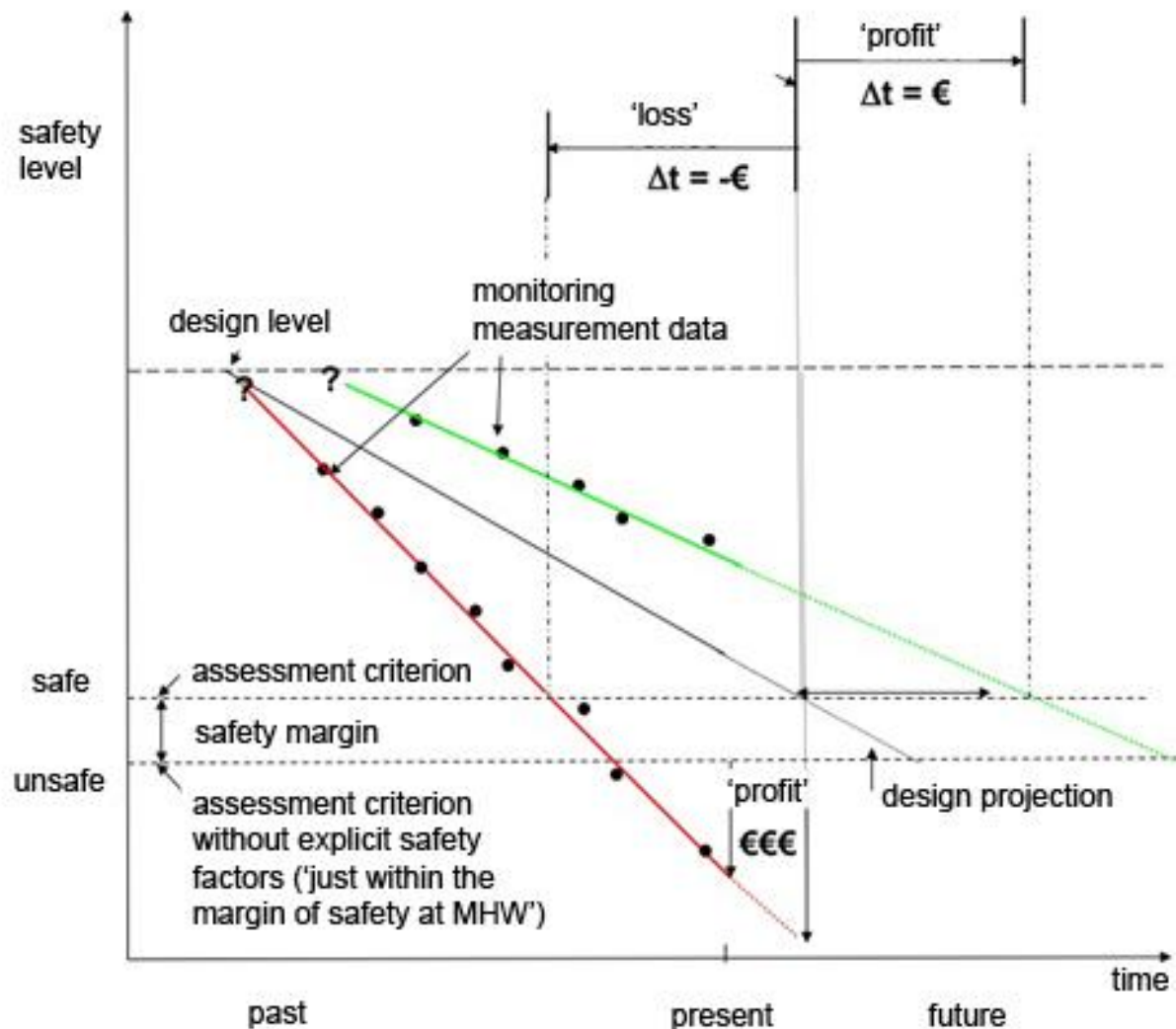
Life Cycle Monitoring heeft betrekking op alle levensfasen van een dijk die doorlopen worden: afkeuren, ontwerp, uitvoering en beheer (voorafgaand aan een volgend moment van afkeuren en het daarna weer opstarten van een dijkversterking). De volgende figuur geeft een eerste raamwerk met vier levensfasen 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.





### 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 het 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. Het verschil dat in de tijd optreedt ( $\Delta t$ ) 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 beoordelingsvoorschriften (WBI 2017). De grootste winst is echter te behalen door het verkrijgen van 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

In de afgelopen 10-12 jaar is er in verschillende onderzoeksprojecten met sensoren in dijken ervaring opgedaan, zoals IJkdijk, LiveDijk, Digidijk, UrbanFlood en Flood Control 2015.

Een nieuwe ontwikkeling zijn de voorgenomen monitorings- en bezwijkproeven ter plaatse van de Hedwige- en Prosperpolder (langs de Schelde in Zeeuws Vlaanderen en aangrenzend België). In de periode tot en met medio 2023 zullen diverse partijen

grootschalige veldproeven uitvoeren en door middel van uitgekiend meten en monitoren van en op de Scheldedijk en de binnenwaarts gelegen Sieperdadijk, kennis ontwikkelen ten aanzien van doorbraak en overstromingsbestendigheid van dijken. Faalmechanismen als erosie door golfoverslag, afschuiving door infiltratie, piping en complicaties met pijpleidingen (ontploffende gasleidingen en lekkende vloeistofleidingen) kunnen aan de orde komen. Daarnaast zullen dijkwachten worden getraind en noodmaatregelen uitgetest.

De verkregen data uit metingen zal worden geanalyseerd en centraal worden opgeslagen, gedeeld en gebruikt via de International Levee Performance Database (ILPD) en het Dijk Data Service Centrum (DDSC).

Bij dergelijke veldproeven staat het onderzoek naar de toepassing van monitoringssystemen en implementatie hiervan in de dagelijkse beheerpraktijk centraal. 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 en andere programma's 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.

### **Informatie infrastructuur [Dijk Data Service Centrum \(DDSC\)](#)**

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, etcetera. In het DDSC worden 4 manieren aangeboden om sensorgegevens aan te leveren. Leveranciers worden gevraagd hierop aan te sluiten in de LiveDijk projecten. Op deze wijze wordt gewerkt aan standaardisatie
- Ontwikkelen van toepassingen voor anomaliedetectie (onregelmatigheden opsporen in de ondergrondopbouw). 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 10 m of 10 km 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 werd 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 web-technologieën 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 stabiliteitsanalyses 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, HHNK) 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 waterspanningmeters, inclinometers, zettingsmeetslangen en automatische zakbaken. In oktober 2015 zijn proefnemingen met een regionale kering (Leendert de Boerspolder), bestaande uit klei op veen, 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.

In het voorjaar van 2016 is een onderzoek in de Willemspolder bij IJzendoorn naar de vorming van piping en de mitigerende invloed van pipingwerende maatregelen, zoals het verticaal zanddicht geotextiel (VZG) en de grofzandbarrière (GZB), uitgevoerd (Koelewijn, 2017). Op dezelfde locatie zal in de komende jaren bij een geschikte hoogwaterstand naar verwachting een geïnstrumenteerde praktijkproef zonder maatregelen tot en met bezwijken van de zomerkade worden uitgevoerd.

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](#)).

Binnen de livedijk XL-projecten van Waterschap Noorderzijlvest zijn diverse dijkmonitoring- en conditioneringssystemen geplaatst, waarmee de dijken continu in de gaten worden gehouden. Binnen livedijk XL wordt momenteel onderzoek verricht hoe, of op welke wijze, de omvang van een meetreeks (totale tijdsduur, meetfrequentie, ruimtelijke omvang) kan worden gewaardeerd.

Zoals reeds aangegeven is een recente ontwikkeling de voorgenomen monitorings- en bezwijkproeven ter plaatse van de Hedwige- en Prosperpolder (Zeeuws Vlaanderen, Schelde), die tot medio 2023 zullen lopen (zie ook hoofdstuk 8).

## 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-Macrostablieit. 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 de omvang van een meetreeks (totale tijdsduur, meetfrequentie, ruimtelijke omvang) worden gewaardeerd? (onderzoek vindt plaats binnen LiveDijk XL).



- 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 en het verloop daartussen (ligging freatische lijn, gevoeligheid voor peilwisselingen in zandlagen en doorwerking van peilwisselingen in klei- en veenlagen ([Koelewijn, 2011](#))).
- 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 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.
  - Koelewijn, A.R. (2017). LiveDijk Willemspolder, Praktijkproeven Verticaal Zanddicht Geotextiel. Deltares rapportage 1208555-000-GEO-0006, Delft, december 2017.
  - Koelewijn, A.R., Meer, M.T. van der et al. (2019). Handreiking Life Cycle Monitoring – Groene versie, Geotechnische monitoring van dijken. POV-Macrostabieliteit, project 3.2A4, cluster Monitoring van Sterkte, maart 2019.
  - Meer, M.T. van der, Nieuwenhuis, J.W. en Bakkenist, S. (2016). 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 Zone Management (Vol IV pp20-27), September 6-8, 2011, Oostende, Belgium. [www.coastgis.info](http://www.coastgis.info), ISBN: 9788889405246.

- Putten, R.D. van (2013), **Error! Hyperlink reference not valid.**, 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](#).
- Kraaijenbrink, P, Koelewijn A.R. (2016). Handreiking meten en monitoren aan waterkeringen. Deltares 1230048-003-GEO-0004-V03.

### Websites

- [Professionalisering Inspectie Waterkeringen \(PIW\)](#)
- [DDSC.nl](#)
- [Dijkmonitoring.nl](#)
- [POVM.nl](#)

*Deze Deltafact is opgesteld door Deltares, 22 december 2011 en laatst herzien in juni 2019.*

### Auteurs

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

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. 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.