

Handreiking voor het opstellen van een monitoringsplan t.b.v. piping

V.M. van Beek

1221356-000

Titel

Handreiking voor het opstellen van een monitoringsplan t.b.v. piping

Opdrachtgever

Stichting FloodControl
IJKdijk

Project

1221356-000

Kenmerk

1221356-000-GEO-0010

Pagina's

79

Trefwoorden

Handreiking, monitoring, piping

Samenvatting

Het Tweede IJKdijk-ontwikkelprogramma van de Stichting FloodControl IJKdijk is bijna voltooid. Onderdeel van de afspraken met het ministerie van Infrastructuur en Milieu is dat de stichting de kennis die in het programma is opgedaan rapporteert. Het voorliggende document is een uitwerking hiervan: de ontwikkeling van een handreiking voor het monitoren ten behoeve van het faalmechanisme piping, op basis van beschikbare kennis uit FloodControl IJKdijk projecten. Deze handreiking is ontwikkeld voor de verschillende fasen van dijkbeheer: beoordeling, ontwerp, aanleg/uitvoering, beheer en onderhoud en calamiteiten. Ten behoeve van het opstellen van deze handreiking zijn de meningen en behoeftes van een aantal waterkeringbeheerders in kaart gebracht

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	aug. 2016	dr.ir. V.M. van Beek		dr.ir. A.R. Koelewijn		ir. L. Voogt	
2	jun. 2017	dr.ir. V.M. van Beek	<i>VB</i>	dr.ir. A.R. Koelewijn	<i>AK</i>	ir. L. Voogt	<i>LV</i>

Status

definitief

1 Introductie

Het Tweede IJkdijk-ontwikkelprogramma van de Stichting FloodControl IJkdijk is bijna voltooid. Onderdeel van de afspraken met het ministerie van Infrastructuur en Milieu is dat de stichting de kennis die in het programma is opgedaan rapporteert. Het is de intentie om de opgedane kennis van de afgelopen jaren te verwerken in praktische rapporten en handreikingen voor de praktijk.

Een van de faalmechanismen die uitgebreid bestudeerd is in de ontwikkelprogramma's van Stichting FloodControl IJkdijk is piping. Het voorliggende document is een handreiking voor het monitoren van piping in de verschillende fasen van dijkbeheer. Bij het ontwikkelen van deze handreiking zijn de resultaten uit het eerste IJkdijkprogramma, alsmede de in het innovatieprogramma FloodControl 2015 behaalde resultaten betrokken.

Monitoren is hier gedefinieerd als het geheel van tijdsafhankelijke, waar nodig herhaalde metingen aan een waterkering én de verwerking daarvan, om onderbouwd tot wijzigingen ten aanzien van de waterkering, het beheer ervan of de monitoring zelf te kunnen besluiten. Deze definitie is bewust ruim gekozen, zodat bijvoorbeeld visuele inspecties¹ en grondonderzoek er ook onder vallen (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Het inzetten van monitoringstechnieken kan in verschillende fasen van de levenscyclus van een dijk zinvol zijn. Door monitoringdata in alle fasen van de levenscyclus te benutten – beoordeling, ontwerp, aanleg/uitvoering, beheer en onderhoud, en calamiteitenbeheer – kunnen onzekerheden worden verkleind en kan er beter gebruik van worden gemaakt. Het draagt dan ook bij tot een afgewogen asset management. Bij het opstellen van deze handreiking zijn ook de meningen en behoeftes van de waterkeringbeheerders in kaart gebracht.

Voor de handreiking is een eerder gepubliceerd schema aangehouden, ontwikkeld voor alle levensfasen van een dijk en voor alle faalmechanismen (Koelewijn en Van den Berg, 2014; Van den Berg en Koelewijn, 2014). Dit schema is specifiek gemaakt voor piping door de doelen voor monitoring nader uit te werken voor piping (hoofdstuk 2), de relevante parameters voor piping te beschouwen (hoofdstuk 3), een samenvatting te geven van beschikbare monitoringstechnieken en hun potentie voor het monitoren van piping (Appendix A) en de ervaringen te beschouwen m.b.t. piping in de Livedijk en IJkdijk projecten (Appendix B). De behoeftes van waterkeringbeheerders t.a.v. het monitoren van piping zijn door middel van interviews in kaart gebracht (Appendix C) en meegenomen in de ontwikkeling van de monitoringshandreiking (hoofdstuk 4).

¹ Visuele inspectie: observaties met behulp van het menselijk oog, gekoppeld aan een adequaat getraind brein.

2 Doel monitoring voor piping

Monitoring kan een rol spelen in de verschillende fasen van de levenscyclus van een dijk: beoordeling, ontwerp, aanleg/uitvoering, beheer en onderhoud en calamiteiten. De doelstelling kan voor iedere fase anders zijn.

2.1 Beoordeling

Tijdens de beoordeling van een dijk is het belangrijk om tot een zo goed mogelijk oordeel te komen van de dijk. In het onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (Förster et al., 2012) zijn de verschillende toetsmethoden voor piping toegelicht. De toetsing² bestaat uit drie niveaus: de eenvoudige toets, de gedetailleerde toets en de toets op maat. De benodigde hoeveelheid data neemt toe met de graad van detaillering. Monitoring kan in elk van de fasen van toegevoegde waarde zijn.

Indien geen kunstwerk aanwezig is wordt bij de eenvoudige toets bekeken of opbarsten op kan treden. In eerste instantie wordt uitgegaan van een stationaire situatie. Bij de toets op maat kan ook rekening gehouden worden met tijdsafhankelijkheid.

In de gedetailleerde toets wordt met de regel van Sellmeijer gerekend in combinatie met de zogenoemde 0,3D regel. In de toets op maat kan mogelijk met meer gegevens van ondergrond en stromingspatroon een meer gedetailleerde berekening worden gemaakt op basis van de meest recente inzichten. Hierbij kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van de softwarepakketten DgFlow, ModFlow of MSEEP.

De beoordelingsmethoden zijn voor de eenvoudige toets en de geavanceerde toets voor heel Nederland vrijwel hetzelfde, maar de lokale omstandigheden kunnen van grote invloed zijn op het monitoringsplan.

Wanneer een kunstwerk aanwezig is, is een ander mechanisme maatgevend. De toetsing wordt dan uitgevoerd met eenvoudige vuistregels, zoals Lane, of met de minder strenge fragmentenmethode. Indien dit niet tot goedkeuring leidt, kan er gerekend worden met een 2D eindige-elementen model. Er moet in elk geval rekening gehouden worden met de mogelijkheid van achterloopsheid.

Het doel voor monitoren voor de beoordeling van piping is, ongeacht het niveau van toetsing, om meer zekerheid te verkrijgen met betrekking tot de invoerwaarden van relevante parameters. Aangezien het toetsschema conservatief is ingesteld, leidt minder onzekerheid in het algemeen tot minder conservatieve invoerwaarden en daarmee tot een gunstiger uitkomst. Hierbij is de afweging tussen inspanning en winst van belang (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

2.2 Ontwerp

Indien bij het beoordelingsproces niet tot goedkeuring kan worden gekomen, wordt een ontwerp gemaakt voor een dijkversterking. Meer weerstand tegen piping kan bereikt worden door vergroting van de horizontale kwelweglengte (berm, voorland), vergroting van de verticale kwelweglengte (damwand, waterdicht scherm), verlaging van het verval (getrapte

² Onlangs is de term 'toetsing' vervangen door 'beoordeling', in oudere rapporten wordt daarom nog gesproken over toetsing.

kering, verlaging bovenwaterstand, verhoging binnenwaterstand) of door gecontroleerde aflat van water (DMC, filter, geotextiel, grofzandbarrière).

De ontwerpmethoden verschillen over het algemeen niet van de beoordelingsmethoden, maar er wordt wel rekening gehouden met hogere belastingwaarden en hogere binnendijkse respons als gevolg van morfologische veranderingen, in verband met een langere beoogde (rest)levensduur. Meer zekerheid ten aanzien van de inputparameters voor de beschikbare modellen is daarom ook een belangrijke winst bij het ontwerpen van pipingmaatregelen. Door aanvullende data kan het mogelijk zijn dat de versterkingsmaatregel verkleind wordt of dat er zelfs helemaal geen versterking nodig is (0-maatregel).

De optimale monitoringsstrategie is afhankelijk van de gekozen maatregel.

2.3 Aanleg / Uitvoering

Tijdens de uitvoering van een maatregel kan het van belang zijn vast te stellen of de maatregel correct wordt en is uitgevoerd. Het nut en de noodzaak van deze monitoring is afhankelijk van het type maatregel:

- verlengen horizontale kwelweglengte: geen aanvullende monitoring noodzakelijk
- gecontroleerde aflat van water met DMC / filter: controleren op functioneren door middel van debietmeting, verlaging stijghoogte via peilbuismetingen, in geval van DMC bepaling zandgift tijdens installatie en controle op zandgift bij een pomptest na installatie.
- gecontroleerde aflat van water met grofzandbarrière / geotextiel: controleren aanwezigheid maatregel op juiste locatie mede op basis van de uitvoeringsparameters (Taal, 2017), controleren op slib-insluiting in het pakket en zandinsluitingen in het afdekkend pakket.
- verlaging van het verval (binnendijkse peil-opzet): controle op verhoogde waterstand
- vergroting verticale kwelweglengte: controleren aanwezigheid maatregel

Het doel van monitoring tijdens de aanleg of uitvoering is dus eenduidig: vaststellen of de maatregel dusdanig aangelegd/uitgevoerd is dat deze tijdens een hoogwater naar behoren zal functioneren.

2.4 Beheer en onderhoud

Per 1 januari 2017 krijgen de beheerders van primaire waterkeringen te maken met de zorgplicht waterveiligheid nieuwe stijl. Op basis van goed georganiseerde werkprocessen en gegevensbeheer moet iedere beheerder op elk gewenst moment kunnen aantonen dat zijn organisatie de zaken op orde heeft voor de waterveiligheid van de inwoners.

‘De zorgplicht houdt in dat de beheerder de wettelijke taak heeft om de primaire kering aan de veiligheidseisen te laten voldoen en voor het noodzakelijke preventieve beheer en onderhoud te zorgen. Om die reden worden de keringen door de beheerder regelmatig geïnspecteerd om te beoordelen of de fysieke toestand van de kering nog in overeenstemming is met de ontwerpuitgangspunten. In het geval de fysieke toestand van de kering door bijvoorbeeld technische veroudering of (storm)schade niet meer voldoet aan de minimale ontwerpuitgangspunten dient de beheerder de nodige onderhouds- en herstelmaatregelen te treffen.’ (Kader Zorgplicht voor Primaire Waterkeringen, 2015).

Voor piping is het beheer en onderhoud afhankelijk van het type maatregel. Schade kan ontstaan door degradatieprocessen (bijvoorbeeld de erosie van een sliblaag op de rivierbodem, het verstoppert van een drainagemaatregel of het slijten van een geotextiel), of

door het pipingproces zelf (bijvoorbeeld cumulatieve schade ten gevolge van het ontstaan van pipes).

Degradatie kan optreden bij bodemvreemd materiaal, zoals een geotextiel. Hier kan rekening mee gehouden worden door een materiaal te kiezen met geschikte levensduur. Daarnaast kan verstopping optreden. Dit kan optreden bij filters of bij een geotextiel. Monitoring kan ingezet worden om het functioneren van een geotextiel te controleren.

Daarnaast kan degradatie optreden ten gevolge van flora en fauna. Hierbij kan gedacht worden aan schade door bevers of muskusratten of door de wortels van bomen. Ook menselijk ingrijpen kan een rol spelen, zoals het diep ploegen in een (brede) berm, het uitvoeren van een boring, of het aanleggen van een bronnering.



*Figuur 2.1 Zandmeevoerende wellen bij een boom en een bronnering tijdens het hoogwater van januari 2011
(bron: Waterschap Rivierenland)*

Een hoogwater kan wel voor schade zorgen. Piping is een sluipend fenomeen, maar treedt vrijwel uitsluitend op bij hoogwater. Een zandmeevoerende wel kan ook ontstaan bij een hoogwater dat aanzienlijk lager is dan het maatgevend hoogwater en is dan niet per definitie een gevaar voor doorbraak. Zolang het waterpeil het kritieke niveau niet overschrijdt, kan de pipe niet verder groeien dan de kritieke lengte. Er is dan geen ernstige schade aan de dijk. Immers bij een volgend hoogwater moet alsnog het kritieke niveau overschreden worden om de pipe verder te laten groeien.

Het kritieke verval is echter niet overal nauwkeurig bekend. Veel dijken worden bij de eenvoudige beoordeling of de gedetailleerde beoordeling afgekeurd, maar zijn nog niet versterkt. Ook kan het voorkomen dat een maatregel niet functioneert zoals verwacht. Bij een hoogwater kan het kritieke verval dan overschreden zijn, zonder dat er doorbraak is opgetreden. Bij het blijven bestaan van de pipes (de mate waarin dat gebeurt is onzeker) kan een pipe bij een volgend, lager, hoogwater weer verder groeien. Het is daarom belangrijk om signaalwaarden te hebben voor de mate van de ontwikkeling van de pipe. Aangezien dit alleen op kan treden tijdens een calamiteit wordt hierop in de navolgende paragraaf ingegaan.

Het doel van monitoring bij beheer en onderhoud is dus eenduidig: het vaststellen van eventuele degradatie van maatregelen en het vastleggen van mogelijke nieuwe wel-locaties.

2.5 Calamiteiten

Tijdens het hoogwater is het van belang om vast te stellen of en wanneer er (extra) noodmaatregelen en evacuatie nodig zijn. Het Waterschap adviseert de gemeente of eventueel minister in hoeverre de veiligheid van de dijk gegarandeerd kan worden, waarna de bestuurder een besluit neemt met betrekking tot evacuatie. In principe zouden de ontworpen en uitgevoerde maatregelen voldoende moeten zijn om het proces niet zover te laten komen, maar dit kan niet zonder meer aangenomen worden. Vooral voor afgekeurde en nog onversterkte trajecten kan het zinvol zijn deze te instrumenteren om vast te stellen wanneer het proces te ver vordert. Het is dus belangrijk om vast te kunnen stellen of het pipingproces dusdanig ver gevorderd is dat bezwijken binnen de duur van het hoogwater te verwachten is.

Piping is een tijdrovend proces en bestaat uit verschillende fasen. Het terugschrijdende proces is langdurig, omdat de korrels aan de kop van de pipe door de grondwaterstroming losgemaakt moeten worden en vervolgens afgevoerd moeten worden door de pipe. In (Van Beek, 2015b) is beschreven dat het terugschrijdende proces in zand vermoedelijk niet sneller zal verlopen dan 2 mm/s. Nadat de pipe de rivier heeft bereikt, wordt de pipe geruimd. Door de ontstane verbinding tussen rivier en polder neemt de erosie snel toe aan de riviervoorzijde. De pipes, die maar enkele millimeters diep zijn, kunnen deze hoeveelheid zand niet afvoeren en raken verstopt. Het proces van ontstoppen, ruimen en opnieuw verstopping duurt ongeveer net zo lang als het terugschrijdende proces. Op het moment dat de pipe de bovenstroomse zijde bereikt is de tijd tot bezwijken minimaal in de orde van grootte van uren (gebaseerd op ervaringen bij de IJkdijk, Van Beek en Förster, 2012).

Voorgesteld wordt om drie signaalwaarden te hanteren:

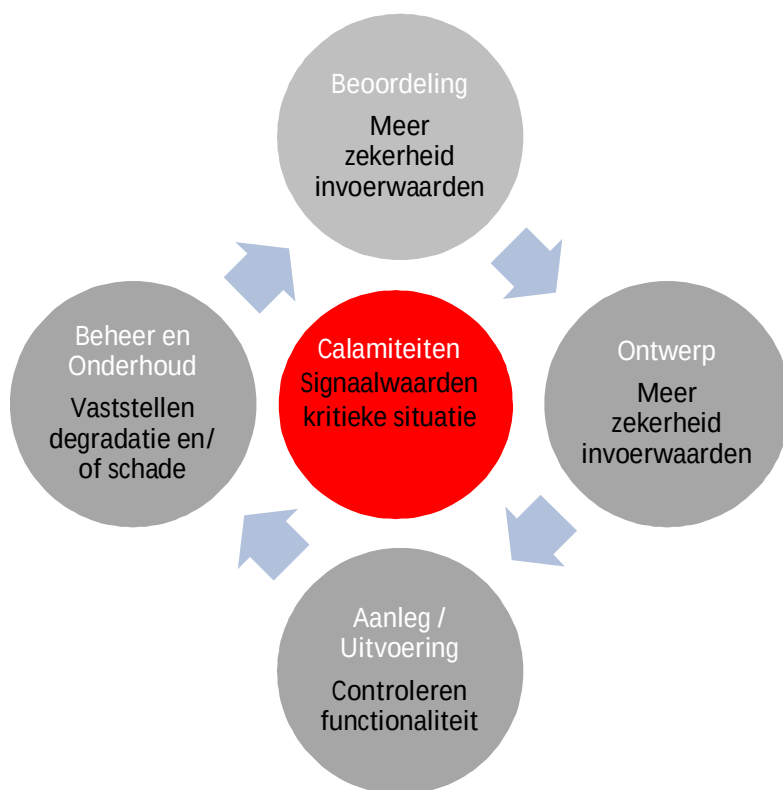
- Waarschuingswaarde: ontstaan van een zandmeevoerende wel.
- Kritieke waarde: de pipe is voorbij de kritieke lengte of heeft het kunstwerk gepasseerd. Extra maatregelen zijn noodzakelijk en de veiligheid van de kering kan niet gegarandeerd worden. Het bereiken van de kritieke waarde kan worden vastgesteld aan de hand van niet-visuele monitoringsmethoden.
- Alarmwaarde: de pipe heeft de bovenstroomse zijde bereikt. Extra maatregelen zijn noodzakelijk en bezwijken binnen afzienbare tijd is een mogelijk scenario. Het bereiken van de alarmwaarde is niet zichtbaar op basis van visuele waarnemingen en kan met niet-visuele monitoringstechnieken worden vastgesteld.

In al deze gevallen moet rekening gehouden worden met schade aan de dijk (verzwakking door pipe-ontwikkeling).

2.6 Samenvatting

De doelstelling van monitoring hangt samen met de fase van dijkbeheer waarin het project zich bevindt. In Figuur 2.2 zijn de fasen en bijbehorende doelstellingen weergegeven.

Overkoepelend over alle fasen heen geldt dat gestreefd moet worden naar een optimalisatie tussen inspanning en winst (Koelewijn en Van den Berg, 2014), waarbij bovendien geldt dat in een vroegere fase beginnen met inwinnen van gegevens op de lange duur, over de hele levenscyclus gerekend, goedkoper en kwalitatief beter uitpakt dan pas beginnen te monitoren in de fase waarin de metingen nodig zijn, zoals aangegeven bij het concept van Life Cycle Monitoring (Van der Meer et al., 2016b).



Figuur 2.2 Doelstelling monitoring ten behoeve van piping als functie van fase in dijkbeheer

3 Maatgevende parameters voor verschillende monitoringsdoelstellingen

In hoofdstuk 2 is vastgesteld dat de belangrijkste doelstellingen voor het monitoren ten behoeve van het faalmechanisme piping zijn:

1. Meer zekerheid verkrijgen t.a.v. de invoerwaarden van rekenmodellen
2. Controleren van de functionaliteit van maatregelen
3. Detecteren van degradatie of schade
4. Signaleren van een kritieke situatie

Voordat besloten kan worden tot een monitoringsstrategie, is het van belang vast te stellen welke parameters met welke nauwkeurigheid benodigd zijn om aan deze doelstellingen te voldoen.

3.1 Invoerwaarden rekenmodellen

In alle rekenmodellen voor de beoordeling van het risico op piping wordt een balans gezocht tussen de belasting van het water in het watervoerende pakket en de weerstand die de grond daartegen biedt. Dit geldt zowel voor het voorstadium van piping, opbarsten, als voor het piping-proces zelf (met of zonder kunstwerk).

3.1.1 Opbarsten

Bij het bepalen van het risico op opbarsten wordt bepaald of de opwaartse waterdruk onder het slappe-lagenpakket hoger is dan het gewicht van het pakket zelf. De belastende parameter is de waterdruk onder het slappe-lagenpakket, terwijl het gewicht en de dikte van de deklaag bepalen hoeveel weerstand de grond biedt.

Tabel 3.1 Parameters voor opbarsten

Belastende parameter	Weerstandbiedende parameter
Waterdruk onder slappe-lagenpakket	Dikte deklaag
	Volumiek gewicht deklaag

Doordat de rivier in contact staat met het watervoerend pakket neemt de waterdruk onder het slappe-lagenpakket toe met toenemende buitenwaterstand. De waterdruk onder het slappe-lagenpakket is daarnaast afhankelijk van de mate van afstroming naar het dijklichaam en naar het maaiveld.

3.1.2 Piping (zonder kunstwerk)

Bij de beoordeling op piping wordt gerekend met het Sellmeijer-model. Dit kan op eenvoudige wijze, zoals met de regel van Sellmeijer, of op meer geavanceerde wijze, met DgFlow, een numeriek model waarin het Sellmeijer-model is geïmplementeerd.

Het Sellmeijer-model berekent bij welk verval een bestaande korte pipe kan doorgroeien naar de rivierzijde, op basis van het evenwicht van de korrels in de pipe. Het evenwicht van de korrels in de pipe wordt bepaald door de stroming in de pipe, welke gevoed wordt door de stroming door het watervoerend pakket.

Hoeveel water naar de pipe stroomt is afhankelijk van de samengestelde doorlatendheid van de ondergrond, de mate van anisotropie, van het aanwezige verval over de waterkering, van de lengte en dikte van het watervoerende pakket en van de mate van afstroming naar het

dijklichaam. Het voorland kan een aanzienlijke invloed hebben op de kwelweglengte. Wanneer aangetoond kan worden dat het voorland voldoende afsluit, mag het intreepunt overeenkomstig buitenwaarts verschoven worden.

Het zand biedt weerstand tegen erosie. Hoe groter de korrel, des te moeilijker deze verplaatst wordt door het water. Aangezien de pipe zich direct onder het slappe-lagenpakket ontwikkelt, wordt de korreldiameter in de bovenkant van het watervoerend pakket beschouwd. In rivierafzettingen wordt een grote variatie in korreldiameter aangetroffen, waaruit een conservatieve waarde wordt gekozen.

Tenslotte mag bij aanwezigheid van een deklaag gecompenseerd worden voor de drukval in de verticale pipe door de deklaag met behulp van de 0,3D-rekenregel.

Tabel 3.2 Parameters piping

Belastende parameter	Weerstandbiedende parameter
Doorlatendheid watervoerend pakket	Kwelweglengte
Dikte watervoerend pakket	Korreldiameter
	Dikte deklaag

3.1.3 Piping (met kunstwerk)

Wanneer er een kunstwerk aanwezig is om de verticale kwelweg te verlengen, wordt het risico op piping bepaald met de regel van Lane of minder conservatief door te berekenen wanneer het zand benedenstrooms van het kunstwerk fluïdiseert (heave). Voor de regel van Lane is niet meer informatie nodig dan een grove indicatie van het type materiaal en de totale verticale en horizontale kwelweglengten.

Voor het berekenen van heave zijn verschillende methoden beschikbaar. In alle methoden wordt bepaald hoe hoog de gemiddelde gradiënt is benedenstrooms van het kunstwerk, uitgaande van het ontbreken van drukverliezen in de pipe. Deze gradiënt wordt bepaald door het verval over de waterkering, de variatie in doorlatendheid in het watervoerende pakket, de dikte van het watervoerend pakket, de kwelweglengte, de locatie en insteekdiepte van het kunstwerk en de doorlatendheid van het kunstwerk (in geval van geotextiel). Een kanttekening hierbij is dat bij opbarsten achter het kunstwerk, bijvoorbeeld door een klei-afdekking heen, er sprake zal zijn van een meer geconcentreerde uitstroming. De heave gradiënt mag niet groter zijn dan 0,5.

Tabel 3.3 Parameters piping (met kunstwerk)

Belastende parameter	Weerstandbiedende parameter
Variatie van doorlatendheid in watervoerend pakket	Kwelweglengte
Dikte watervoerend pakket	Insteekdiepte kunstwerk
	Doorlatendheid kunstwerk

3.2 Controleren functionaliteit maatregelen

Tijdens de aanleg van een maatregel is het van belang vast te kunnen stellen of de maatregel naar behoren zal functioneren tijdens hoogwater. In de aanlegfase gaat het er dan met name om of de maatregel geïnstalleerd is zoals gepland. In onderstaande tabel zijn verschillende maatregelen weergegeven, evenals mogelijke afwijkingen tijdens het aanlegproces en daarna.

Tabel 3.4 Controle functionaliteit maatregelen

Maatregel	Gebrek in functioneren	Te meten
Berm	-	Aanwezigheid
Voorland klei-inkassing	-	Aanwezigheid
Damwand	Uit het slot lopen, niet op diepte komen als gevolg van uitvoeringsproblemen of onjuiste afstemming materieel op damplank-eigenschappen.	Eventueel wijken meten met slotverklikkers
Geotextiel	Ontstaan scheuren, verstopping	proefgaten, drukval over geotextiel, gewijzigde waterstroming
Grofzandbarrière	Onvoldoende dikte, ontmenging, verstopping	Aanwezigheid (niet-destructief moeilijk meetbaar), drukval over barrière, gewijzigde waterstroming
DMC	Verstopping, uitval aansturing, zandgift	Doorlatendheid, afvoercapaciteit, softwarematige controle
Filter	Ontmenging / Verstopping	(niet-destructief moeilijk meetbaar)

3.3 Detecteren degradatie of schade

Het detecteren van degradatie of schade ontstaan na hoogwater kan in twee situaties relevant zijn:

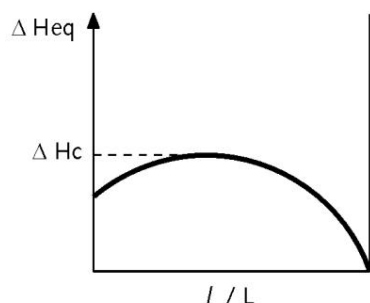
- Periodiek: degradatie ten gevolge van tijdsafhankelijke processen: verstopping of slijtage
- Na een hoogwater: ontstaan van pipes met bovenkritieke lengte.

Verstopping is van belang voor maatregelen die een drainerende functie hebben, zoals een DMC of waterontspanners, of waarbij verandering van doorlatendheid ongewenst is, zoals een filterconstructie. Verstopping kan mechanisch, chemisch of biologisch van aard zijn. In alle gevallen wordt de verstopping gekenmerkt door een afname in doorlatendheid.

Degradatie van het (bodemvreemde) materiaal is theoretisch mogelijk, maar in veel gevallen zal bij de keuze van een maatregel rekening gehouden worden met de duurzaamheid van het materiaal. In dit document wordt daarom niet verder ingegaan op het monitoren van degradatie. Schade (gaten, breuken, scheurvorming) door dierlijke activiteit, ongelijke zetting, wortelgroei en/of verontreiniging met agressieve stoffen is echter wel denkbaar.

Het ontstaan van pipes met bovenkritieke lengte is mogelijk als de huidige maatregelen ontoereikend zijn. Dit kan verschillende oorzaken hebben. In het geval van pipes met bovenkritieke lengte zijn de pipes dusdanig ver gegroeid dat de waterkering bij een volgend hoogwater minder water kan keren dan voorafgaand aan de schade. Hierbij wordt verondersteld dat de pipes ofwel in stand blijven ofwel zorgen voor een dusdanig lossere bovenlaag nabij de (voormalige) pipes, dat de bovenlaag verzwakt is. Dat dit kan voorkomen blijkt duidelijk uit het onderzoek nabij de Ingensche Waarden (Wiertsema & Partners, 2011). Het Sellmeijer-model laat zien hoe het verval voor verder doorgroeien van de pipes afneemt boven het kritieke verval. De curve is afhankelijk van de configuratie, met de kritieke lengte

dichterbij het uittredepunt naarmate de concentratie van stroomlijnen nabij het uittredepunt kleiner is. Naarmate de pipes langer zijn neemt het evenwichtsverval, en daarmee het verval om de pipe te laten doorgroeien, steeds verder af. Opgemerkt wordt dat het ruimproces ook een aanzienlijk verval vergt (de exacte hoogte is niet bekend), wat niet meegenomen is in dit proces.



Figuur 3.1 Relatie tussen pipe lengte en evenwichtsverval (TAW, 1999)

3.4 Signaleren van een kritieke situatie

Tijdens een hoogwater kan door verschillende oorzaken de situatie ontstaan dat de pipe verder doorgroeit dan de kritieke lengte. Piping is een langdurig proces en kan zal daarom bij het overschrijden van de kritieke lengte niet direct tot falen van de dijk leiden.

Monitoring kan ingezet worden om tot verschillende signaalwaarden te komen:

- Waarschuingswaarde: ontstaan van een zandmeevoerende wel.
- Kritieke waarde: de pipe is tot halverwege de kwelweglengte gekomen.
- Alarmwaarde: de pipe heeft de bovenstroomse zijde bereikt.

Het ontstaan van een zandmeevoerende wel is het begin van het pipingproces en duidt niet per definitie op een kritieke situatie. Het ontdekken van zandmeevoerende wellen is echter niet altijd eenvoudig. Monitoring kan daarbij ingezet worden als hulpmiddel.

Zowel bij het ontstaan van een zandmeevoerende wel, als bij een pipe die tot halverwege de kwelweglengte of tot volledige lengte is gekomen moet kennis verkregen worden over de ontwikkeling van de pipe. Om vast te stellen welke parameters gemeten zouden moeten worden moet vastgesteld worden welk effect de pipe achterlaat ten opzichte van de pre-pipe situatie.

Ten eerste kan opgemerkt worden dat de pipe alleen gevormd kan worden als het zand wordt afgevoerd. Dit betekent dat de krater geleidelijk steeds verder op zal bouwen naarmate de pipe verder groeit. De snelheid van transport en het volume van de krater zijn dus mogelijke parameters voor de vaststelling van het verloop van het proces. Hierbij wordt opgemerkt dat er ook situaties bestaan waarbij het vrijgekomen zand door stroming direct afgevoerd wordt en er dus geen sprake is van de opbouw van een krater.

Daarnaast heeft de pipe invloed op het patroon van waterstroming. Hoewel de pipe maar enkele millimeters diep is, is de pipe aanzienlijk meer doorlatend dan het omringende zand. Parameters die een indicatie van het stroombeeld geven zijn daarom mogelijk geschikt voor het monitoren van de pipe. Dit kunnen parameters zijn die direct gekoppeld zijn aan het stroombeeld, zoals waterspanning, stroomsnelheid of debiet, maar ook indirecte parameters, die teruggeleid kunnen worden naar de directe parameters, zoals de temperatuur.

Tenslotte is de aanwezigheid van een pipe tijdens het hoogwater gekenmerkt door holle ruimte. Na het hoogwater kan de pipe dichtvloeien. De afwezigheid van totaalspanningen in de pipe, de deformatie van de laag boven de holle ruimte, of de afwijkende eigenschappen van de holle ruimte ten opzichte van het omringende materiaal vormen aanknopingspunten voor het ontdekken van de pipe.

Mogelijke relevante parameters zijn daarom:

- Kwel
- Kratervolume
- Mate van zandtransport
- Waterspanning
- Watertemperatuur
- Stroomsnelheid
- Debiet
- Totaalspanning
- Deformatie toplaag
- Dichtheid

De pipe (of het patroon van pipes) is een zeer lokaal fenomeen. In sommige gevallen is het alleen zinvol om zeer lokaal te meten. In de navolgende hoofdstukken wordt hier nader op ingegaan.

4 Handreiking monitoring piping

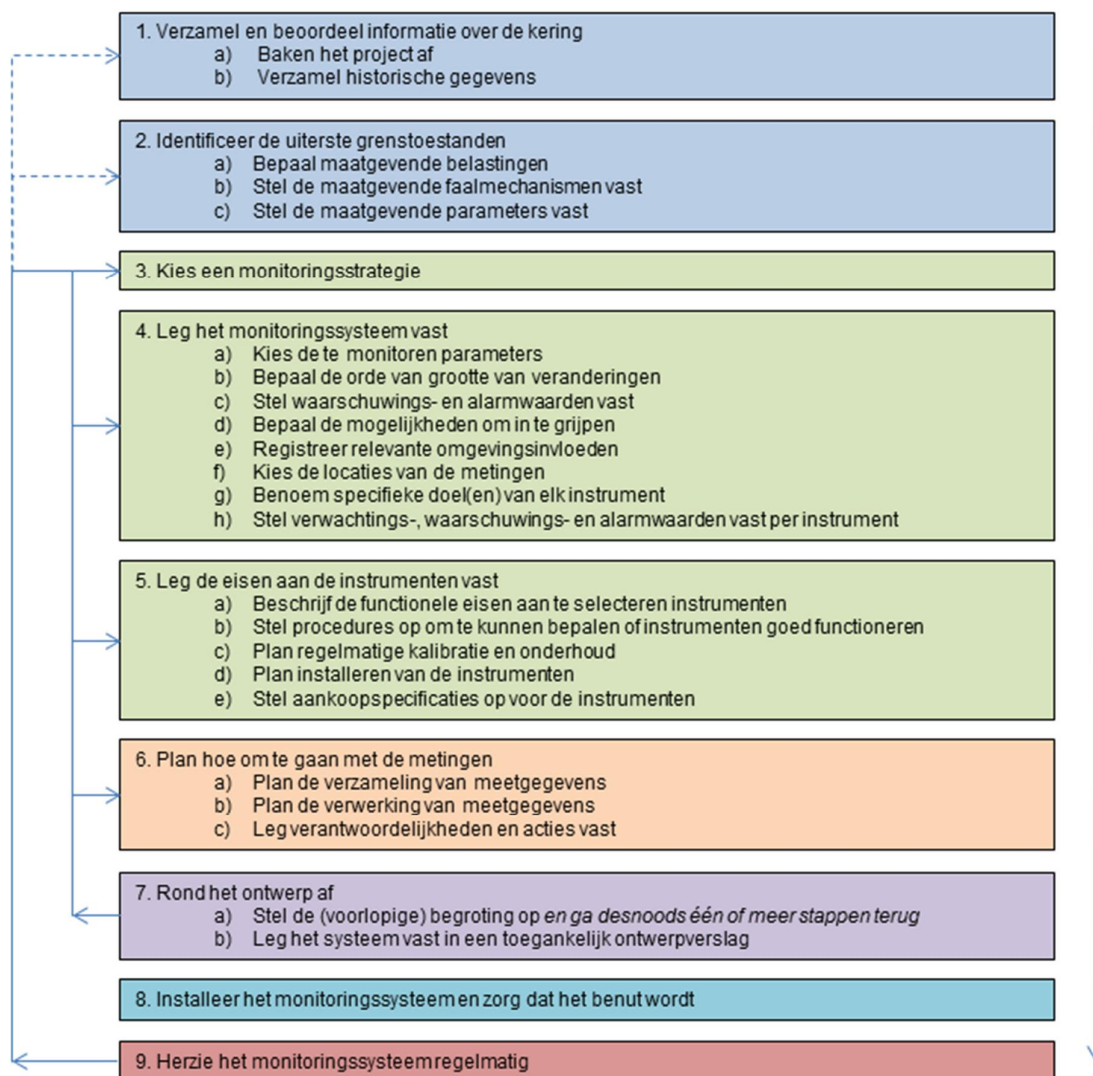
4.1 Globale opzet monitoringsplan

In Koelewijn en Van den Berg (2014) is een generiek schema gegeven voor het opzetten van een monitoringsplan. Deze opzet is bedoeld voor alle faalmechanismen en onderdelen van de life cycle van een dijk en is hier meer specifiek gemaakt voor piping en voor de verschillende life cycles van een dijk. In Figuur 4.1 is het gehanteerde stroomschema weergegeven.

In hoofdstuk 2 is vastgesteld dat de verschillende fasen van dijkbeheer, beoordeling, ontwerp, uitvoering, beheer en calamiteiten verschillende doelstellingen voor monitoring met zich mee brengen:

- Beoordeling en ontwerp: meer zekerheid m.b.t. invoerwaarden
- Aanleg / Uitvoering: controle functionaliteit
- Beheer: vaststellen degradatie en/of schade
- Calamiteit: detecteren piping en vaststellen kritieke situatie (signaalwaarden)

Deze doelstellingen vormen de basis voor het ontwikkelen van een monitoringsplan. Gedeeltelijk zijn onderstaande generieke acties voor de verschillende fasen gelijk; waar verschillen ontstaan wordt dit toegelicht.



Figuur 4.1 Stroomschema monitoringsplan

4.2 Verzamel en beoordeel informatie over de kering

Deze stap bestaat uit het afbakenen van het project en het verzamelen van historische gegevens. Voor de afbakening van het project wordt de generieke toelichting gevolgd (Koelewijn en Van den Berg, 2014): 'De projectafbakening betreft zowel de ruimtelijke begrenzing als de afbakening in de tijd, het budget en de reikwijdte binnen de organisatie. De waarde van deze stap is dat alle betrokkenen van hetzelfde uitgaan'.

Gegevensverzameling is uiteraard een belangrijk onderdeel van de beoordeling en het ontwerp: in hoofdstuk 3 is nader ingegaan op de hiervoor te verzamelen parameters. Het beschouwen van de beschikbare data is het startpunt voor het vaststellen welke aanvullende monitoringstechnieken tot een beter onderbouwde beoordeling of een verbeterd ontwerp kan leiden. Ook in de beheers- en calamiteitenfase is gegevensverzameling van belang om vast te stellen waar mogelijk schade op kan treden of waar piping zou kunnen optreden tijdens een hoogwater.

Gedacht kan worden aan de volgende databronnen:

- Geologische kaarten
- Zandbanenkaart
- Geotechnische lengteprofielen
- Veld- en laboratoriumonderzoek (boringen, sonderingen, korrelverdelingen, volumegewichten, waterspanningsmetingen)
- Eerdere waarnemingen en wellen-inventarisatie kaarten: Zijn er problemen geweest met kwel? zijn er gevallen bekend van zandmeevoerende wellen in het verleden (grootte, locatie t.o.v. de dijk, mogelijke oorzaak). Zijn er vroeger dijkdoorbraken geweest?
- Oudere ontwerp- en toetsrapporten
- Situatietekeningen
- Profielen
- As built-tekeningen
- Historisch kaartmateriaal
- (Hydrologische) ondergrondmodellen

4.3 Identificeer de uiterste grenstoestanden

In deze stap worden maatgevende belastingen, faalmechanismen en parameters vastgesteld. De maatgevende belastingen zijn over het algemeen vastgelegd als het Maatgevend Hoogwater (MHW) en situaties als Extreme Neerslag. Daarnaast zijn er belastingen als een verkeersbelasting, en eventuele belastingen die samenhangen met een bijzondere situatie ter plaatse (Koelewijn en Van den Berg, 2014). Voor piping speelt het polderpeil (of bij afwezigheid van een sloot, de hoogte van het maaiveld) een belangrijke rol, omdat de belasting uiteindelijk wordt bepaald door het verval over de waterkering.

Het bezwijken van een waterkering vindt plaats door een keten van gebeurtenissen die leidt tot verlies van de waterkerende functie. Ook wanneer de keten niet geheel doorzet, kan er aanzienlijke schade optreden, bijv. door scheurvorming. Piping treedt op door opeenvolgend: opbarsten, terugschrijdende pipe-vorming, ruimen, (deformatie) en bezwijken. Er kan pas aanzienlijke schade ontstaan wanneer het ruimproces vrij ver gevorderd is. Dit is een stadium waarin evacuatie noodzakelijk lijkt.

Wanneer een monitoringsplan opgezet wordt voor piping, is het noodzakelijk vast te stellen of andere mechanismen mogelijk ook een rol spelen. Het monitoringsplan kan dan geoptimaliseerd worden voor beide faalmechanismen. Het kan zo zijn dat er meerdere maatgevende faalmechanismen zijn. In dat geval is het noodzakelijk na te gaan in hoeverre deze op elkaar inwerken. Hierdoor kan het mogelijk zijn dat met één instrument geen onderscheid gemaakt kan worden tussen het ene of het andere faalmechanisme, of dat juist kan worden vastgesteld welke van de twee zich voordoet maar is een tweede instrument nodig om de ernst te bepalen. Dit kan per situatie sterk verschillen (Koelewijn en Van den Berg, 2014). De ervaring bij de LiveDijk XL, over het onderscheid tussen piping en microstabiliteit naar aanleiding van geconstateerde zandmeevoerende wellen, vormt hiervan een goed voorbeeld (zie §B.6).

4.4 Kies een monitoringsstrategie

De keuze van de monitoringsstrategie is afhankelijk van de gehanteerde ontwerpfilosofie en de gewenste intensiteit van het onderhoud. Het doel is altijd om een veilige situatie te creëren, wat op verschillende manieren bereikt kan worden: een veilige situatie met weinig tot geen onderhoud en betrekkelijk weinig monitoringsinspanning is doorgaans alleen te bereiken met een ontwerp dat hoge uitvoeringskosten kent. Een ontwerp met lage uitvoeringskosten kan ook tot een veilig ontwerp leiden, maar zal waarschijnlijk gepaard gaan met hoge onderhoudskosten en matig tot hoge kosten voor monitoring (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Hoe hiermee om te gaan is sterk afhankelijk van de lokale situatie en de voorkeuren van de waterkeringbeheerder. In de onderstaande paragrafen zal per onderdeel nader ingegaan worden op de monitoringsintensiteit voor piping.

4.5 Leg het monitoringssysteem vast

Het vastleggen van het monitoringssysteem is de kern van het monitoringsplan. De te volgen stappen zijn hier voor de verschillende life cycle fasen apart toegelicht, omdat de afwijkende doelstellingen tot andere overwegingen leiden. De monitoringssystemen die volgen uit de verschillende doelstellingen kunnen vervolgens naast elkaar worden gelegd, waardoor een afweging gemaakt kan worden op basis van significantie.

4.5.1 Beoordeling en ontwerp

De doelstelling voor het monitoren ten behoeve van beoordeling en ontwerp voor piping is het vergaren van parameters ten behoeve van een meer nauwkeurige inschatting van het risico op piping en voor het maken van een geoptimaliseerd ontwerp.

De acties die hierbij een rol spelen zijn (Koelewijn en Van den Berg, 2014), zie ook figuur 4.1:

- a. Kies de te monitoren parameters
- b. Bepaal de orde van grootte van veranderingen
- e. Registreer relevante omgevingsinvloeden
- f. Kies de locaties van de metingen
- g. Benoem specifieke doel(en) van elk instrument
- h. Stel verwachtingswaarden vast per instrument

4.5.1.1 Keuze van parameters

Gezien de veelheid aan parameters die invloed hebben op het fenomeen piping, is het van belang een keuze te maken voor die parameters waarvan het meten ervan het meeste effect zal hebben op de betrouwbaarheid van de beoordeling of de keuze voor het ontwerp. Deze afweging is zeer locatie-specifiek. Als voorbeeld wordt hierbij de Livedijk Ameland genoemd: in dit gebied loonde het de moeite om het tijdsafhankelijke stijghoogteverloop in kaart te brengen. Bij rivierdijken, die doorgaans langduriger belastingen moeten weerstaan, kan het meer zinvol zijn om de heterogeniteit van de ondergrond beter in kaart te brengen. In deze stap is het zinvol om per parameter te beschouwen wat de mogelijke variatie is, en wat het effect hiervan is op de beoordeling of het ontwerp. Deze gevoeligheidsstudie bepaalt de intensiteit van het onderzoek en de te beproeven parameters. De parameters zijn in verschillende groepen te verdelen: grondwatermodellering, eigenschappen zandbaan en deklaag.

Meer inzicht in de grondwaterstroming is met name relevant wanneer er voorland aanwezig is of juist een diepe erosiekuil (bijvoorbeeld bij kribben), wanneer er intredeweerstand te verwachten is of als de belasting sterk tijdsafhankelijk is. Het in rekening brengen van deze aspecten kan plaatsvinden door het ondergrondmodel te kalibreren met metingen, en heeft effect op de predictie voor opbarsten en piping.

Meer inzicht in de eigenschappen van de zandbaan kan verkregen worden door de afmetingen (dikte, breedte, lengte) van de zandbaan beter in te schatten. Daarnaast kan gekeken worden naar de variatie in doorlatendheid en korrelgrootte en kan onderzocht worden of de zandbaan gefundeerd of ongefundeerd is. In de proeftuin bij IJzendoorn (Arcadis, 2015) is de variatie in korrelgrootte in detail onderzocht. Dit bleek niet tot een aangescherpt ontwerp te leiden op basis van de huidige toetsmethodiek. Het moet daarom ook in dit stadium zorgvuldig worden overwogen welke meetintensiteit zinvol is.

Meer inzicht in de deklaag (variatie in dikte en gewicht) heeft invloed op het oordeel voor opbarsten. In een proeftuin bij Veessen is de variatie in de dikte onderzocht met boringen en met grondradar (<http://medusa-online.com/beter-onderzoek-naar-dijken/>).

4.5.1.2 *Bepaal de orde van grootte van veranderingen*

De orde van grootte van veranderingen speelt op verschillende manieren een rol. Ten eerste moet de variatie van verandering gemeten kunnen worden. Daarnaast moet de te verwachten variatie relevant zijn voor het beoordelingsoordeel of het ontwerp. Als voorbeeld kan hierbij gedacht worden aan de dikte van de zandlaag: bij een dikke zandlaag zal het voor het beoordelingsresultaat niet veel uitmaken of deze een meter dikker of dunner is, bij een dunne zandlaag of onzekerheid over de fundatie kan het relevant zijn dit nader te onderzoeken.

De orde van grootte van veranderingen is sterk afhankelijk van de afzettingsgeschiedenis van de ondergrond: bij rivierafzettingen is er veel meer laterale spreiding in parameters te verwachten dan bij een windafzetting. De correlatielengte is de lengteschaal waarop de fluctuaties uitmiddelen. Deze lengte is zelden bekend, hoewel op basis van geologische kennis een inschatting gemaakt kan worden.

4.5.1.3 *Registreer relevante omgevingsinvloeden*

De generieke beschrijving uit Koelewijn en Van den Berg (2014) voldoet hier: 'Relevante omgevingsinvloeden betreffen allereerst het weer, verder reguliere maar weinig voorkomende activiteiten als maaien, maar ook vandalisme of diefstal e.d. Dit soort bijzondere gebeurtenissen kan het beste per gedeelte van een waterkering worden bijgehouden in een logboek waar op kan worden teruggegrepen bij nader onderzoek van afwijkende meetwaarden of (het begin van) afwijkende trends.'

4.5.1.4 *Kies de locaties van de metingen*

De locaties van de metingen volgen uit de doelstelling van de monitoring, de beschikbare data, de gekozen parameters, en de specifieke eigenschappen van de locatie. Daarbij geldt dat één goedgeplaatst instrument veelal meer informatie kan verschaffen dan een reeks ondoordacht geplaatste instrumenten (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Ten behoeve van de beoordeling zal het onderzoek zich voornamelijk richten op vergroting van de kennis van de ondergrond. De locatie van de zandbaan is hierbij relevant. Wanneer er onvoldoende data beschikbaar is, kan het zinvol zijn het gebied beter in kaart te brengen met gebiedsdekkende technieken, alvorens de locaties van de metingen te kiezen.

De mate van heterogeniteit is een belangrijke overweging bij het vaststellen van de meetlocaties. De orde van grootte van veranderingen, zoals besproken in §4.5.1.2, kan per parameter en locatie afgewogen worden en meegenomen in de keuze voor meetlocaties. Bij zeer hoge fluctuaties van de parameter op korte afstand is het meer zinvol het gebied op basis van geologische kennis te karakteriseren dan om op een aantal punten te meten, met onderlinge afstand kleiner dan de correlatielengte. Aan de andere kant kan het aantal metingen beperkt worden bij parameters met grotere correlatielengte.

Daarnaast kan een indeling gemaakt worden op basis van risico op piping, aan de hand van beschikbare gegevens. In eerste instantie kunnen metingen worden aangebracht in de zwakkere zones. Wanneer dergelijke zones niet aanwezig zijn of als er een onderbouwde behoefte bestaat aan meer uitgebreide instrumentatie (bijvoorbeeld op grond van een betrouwbaarheidsanalyse), dan kunnen één of meer representatieve gebieden worden vastgesteld waar de monitoring zich primair op richt. Deze primaire monitoringsgebieden

zullen in de praktijk meestal de vorm hebben van een (dwars)doorsnede. Daarnaast dienen bij voorkeur ook één of meer secundaire monitoringsgebieden worden ingericht ter controle van de aanname dat deze gedeelten inderdaad van secundair belang zijn. Uit oogpunt van kosten verdient het de voorkeur om de instrumentatie in deze secundaire gebieden eenvoudig te houden, maar op essentiële punten wel overeen te laten komen met de primaire monitoring om een goede vergelijking mogelijk te maken (Koelewijn en Van den Berg, 2014). Gebiedsdekkende technieken kunnen worden aangewend om inzichtelijk te maken of er onderscheid te maken is tussen zwakkere en sterkere zones.

Meer inzicht in grondwaterstroming:

- Eventueel veldonderzoek om aanvullende informatie te verkrijgen over de locatie van de zandbaan (geofysisch onderzoek, bijv. grondradar en EM voor de deklaagdikte en Electrical Resistivity voor de zandbaan, boringen, sonderingen).
- Waterspanningsmetingen: Minimaal 2 meetraaien van minimaal 5 waterspanningsmeters in de toplaag van het zandpakket: zo ver mogelijk in het voorland en verder ter plaatse van de buitenteen, de kruin, de binnenteen en nabij het uittredepunt. Bij een voorland van grote lengte kan gekozen worden voor een extra meetpunt.
- Afhankelijk van de lengte van het traject en de aanwezige heterogeniteit kan gekozen worden voor meerdere raaien.
- Glasvezel t.b.v. temperatuurmeting kan een aanvulling zijn om een meer continu beeld te verkrijgen. Deze zou in het voorland en ter plaatse van de binnenberm in het zandpakket kunnen worden aangelegd.

Omdat in deze fase de pipe niet gedetecteerd hoeft te worden is een zeer dicht meetnet (onderlinge afstanden van enkele meters) niet nodig. Een aandachtspunt is de tijdsduur van de monitoring: om een goed beeld van de stromingssituatie te krijgen kan het nodig zijn om gedurende langere tijd (enkele jaren) te meten waarbij ook een hoogwater van enige betekenis optreedt.

Meer inzicht in eigenschappen zandbaan:

- Afmetingen zandbaan en fundatie: geofysisch onderzoek (bijv. grondradar en EM voor de deklaagdikte en Electrical Resistivity voor de zandbaan), boringen en sonderingen, intensiteit afhankelijk van de grootte van de zandbaan.
- Variatie in doorlatendheid: pompproef, korrelaties met korrelverdelingen op verschillende dieptes, HPT sonderingen.
- Variatie in korrelgrootte: boringen met korrelverdelingen juist onder de deklaag ten behoeve van karakterisering van de zandlaag gericht op de erosiegevoeligheid.

De intensiteit en locaties van de metingen ten behoeve van karakterisatie van de zandlaag zijn sterk afhankelijk van de lokale situatie. Opgemerkt wordt dat doorlatendheid een 'macro-parameter' is: het gaat uiteindelijk om hoeveel water er naar de pipe stroomt en dit wordt beïnvloed door de doorlatendheid van het gehele pakket, en niet alleen door die van de toplaag. De korrelgrootte daarentegen is een parameter die op microniveau van belang is: de pipe ontwikkelt zich geleidelijk langs de deklaag en komt daarbij een variatie aan korrels tegen. De proeftuin bij IJendoorn laat zien dat een heel dicht netwerk van metingen voor onderzoeksdoeleinden inzichtelijk is, maar dat dit voor de karakterisatie van de zandlaag niet nodig is. Op basis van een tiental metingen (afhankelijk van de grootte van het gebied) en kennis van de afzettingsgeschiedenis zou het gebied goed te karakteriseren moeten zijn.

Meer inzicht in deklaag (dikte en gewicht):

Meer inzicht in de deklaag kan verkregen worden met behulp van boringen, geofysisch onderzoek (seismiek / grondradar). Bij de proeftuin Veessen-Wapenveld zijn goede resultaten

verkregen met de grondradar voor het in kaart brengen van de dikte van de deklaag, hoewel de metingen geen goede resultaten geven bij leidingen en kabels. Als de verwachting is dat de dikte van de deklaag sterk varieert, is het aan te raden voor een dicht netwerk van metingen te kiezen of een beperkter aantal metingen in combinatie met een gebiedsdekkende methode, daar de zwakste plek bepalend zal zijn voor opbarsten. Waar twijfels bestaan over het doorlopen van de deklaag over de rivierbodem, kan geofysisch onderzoek ook aanvullende informatie verschaffen.

4.5.1.5 *Benoem specifieke doelen van elk instrument*

De generieke beschrijving uit Koelewijn en Van den Berg (2014) is toepasbaar voor piping: "Ieder instrument dient geselecteerd en geplaatst te worden om bij te dragen aan het beantwoorden van één of meer specifieke vragen: als er geen vraag is, dan moet er ook geen instrument zijn" (Dunnicliff, 1993, 1999). Uit de voorgaande stappen zou dit al ondubbelzinnig moeten volgen, zodoende kan deze stap eerder als een checklist worden gezien. Dat neemt niet weg dat dit concreet gemaakt moet worden, waardoor eventuele inconsistenties die in de vorige stappen in de loop van het proces ingeslopen zijn aan het licht kunnen komen. Overigens kan het bereiken van redundantie of dubbeling van cruciale instrumenten een prima doel zijn voor een instrument.

4.5.1.6 *Stel verwachtingswaarden vast per instrument*

In deze stap worden de te verwachten meetwaarden per instrument vastgesteld. Deze stap is van belang, omdat:

- Een overzicht hiervan het later gemakkelijk zal maken om de betrouwbaarheid van de meetwaarden te bepalen
- Het benodigde meetbereik en het onderscheidend vermogen vastgesteld worden.

Voor de doelstelling van het vergaren van informatie over de stroming en de ondergrond zijn de veranderingen in de tijd betrekkelijk klein, of zelfs afwezig. De detectiesnelheid speelt daarom geen rol. Het meetbereik is sterk afhankelijk van de lokale situatie en de betreffende parameter, maar is op basis van kennis van de locatie en afzettingsgeschiedenis goed te beredeneren. Zo kan bijvoorbeeld de ordegrootte van bulkdoorlatendheid van het watervoerend pakket geschat worden op basis van de kennis van de ondergrond, pompproeven uit de omgeving of correlaties. De ordegrootte van de afmetingen van de zandlaag kan geschat worden op basis van zandbanenkaarten en relevantie (ongefundeerde zandbanen van kleine afmeting zijn niet pipinggevoelig). De metingen t.b.v. het in kaart brengen van de grondwaterstroming zijn tijdsafhankelijk. Op basis van de buiten- en binnenwaterstand (en eventueel de temperatuur, bij indirecte metingen) is een goede inschatting te maken van de te verwachten meetwaarden.

4.5.2 *Aanleg en beheer*

De doelstellingen voor het monitoren ten behoeve van de aanleg en het beheer van maatregelen zijn respectievelijk het controleren van de functionaliteit en het vaststellen van degradatie en/of schade. Zoals in hoofdstuk 2 is toegelicht, is het afhankelijk van de gekozen maatregel welke vorm van monitoring gepast is om deze doelstelling te behalen.

Bij dit onderdeel wordt ervan uitgegaan dat als een maatregel correct is aangebracht en niet aangetast is door degradatie of schade, dat deze naar behoren zal functioneren tijdens een hoogwater. Het falen tijdens een hoogwater (bijvoorbeeld: ondanks voldoende aanwezige lengte, groeit de pipe door naar bovenstroomse zijde) wordt in deze fase daarom niet beschouwd.

De hier beschouwde maatregelen zijn de berm, voorland klei-inkassing, een damwand, een verticaal zanddicht geotextiel, een grofzandbarrière, een DMC en een filter. Zoals in hoofdstuk 2 aangegeven, zijn er bij aanleg geen problemen te verwachten bij een berm of voorland klei-inkassing. Er kan hooguit gecontroleerd worden of deze inderdaad aanwezig zijn. Bij een damwand kan uit het slot lopen gedetecteerd worden met slotverklikkers. Het niet op diepte komen kan bij de aanleg ook eenvoudig worden vastgesteld. Een geotextiel kan scheuren bij aanleg. Dit kan steekproefsgewijs met proefgaten worden vastgesteld; ook wordt gewerkt aan 'verklikkende' technieken. Daarnaast biedt de handreiking VZG ook aanbevelingen voor uitvoeringsmonitoring voor correcte plaatsing van een geotextiel: Nadat met een maakbaarheidsproef is aangetoond dat het materieel geschikt is om het geotextiel op juiste wijze aan te brengen, bieden plaats-gerelateerde uitvoeringsdata de benodigde basis voor toekomstige toetsingen om de reproduceerbaarheid van de techniek als betrouwbare piping-maatregel aantoonbaar te maken. Vanwege de onderlinge samenhang en beïnvloeding is het relevant veel machine-parameters continue te monitoren en te registreren. Deze moeten allen herleidbaar zijn naar locatie (XYZ). Hierbij kan gedacht worden aan actuele en maximaal optredende toerentallen en opgenomen vermogen van toevoervijzels voor aanvulzand, aanvulklei (geeft indruk van voldoende en ononderbroken tegendruk), aan-uit-standen van toevoerbanden en trilmotoren voor aanvulzand- en klei, positionering van geleider-arm, rijnsnelheid, graafketting snelheid, etc. (Taal, 2017).

Ook de aanwezigheid van een grofzandbarrière kan steekproefsgewijs met proefboringen worden vastgesteld, welke daarna uiteraard weer opgevuld en afgedicht moeten worden. Voor de meeste methoden is het (eventueel na enkele testen in geval van een innovatieve methode) voldoende te vertrouwen op de aanbrengtechniek of is het functioneren op dezelfde wijze te controleren als later in geval van degradatie nodig is.

In onderstaande tekst wordt daarom ingegaan op het monitoren van functionaliteit en eventuele degradatie of schade in de tijd, ten gevolge van ontmenging, verstopping, flora en fauna en menselijk ingrijpen.

De acties die bij het opstellen van het monitoringssysteem voor aanleg en beheer een rol spelen zijn (zie ook figuur 4.1):

- a. Kies de te monitoren parameters
- b. Bepaal de orde van grootte van veranderingen
- c. Stel waarschuingswaarden vast
- d. Bepaal de mogelijkheden om in te grijpen
- e. Registreer relevante omgevingsinvloeden
- f. Kies de locaties van de metingen
- g. Benoem specifieke doel(en) van elk instrument
- h. Stel verwachtings-, waarschuings- en alarmwaarden vast per instrument

Per maatregel zal, waar dat zinvol is, op deze acties worden ingegaan. Voor de beschrijving van (e) omgevingsinvloeden en (g) specifieke doelen wordt verwezen naar §4.5.1.3 en §4.5.1.5.

4.5.2.1 *Berm of voorland klei-inkassing*

Een binnen- of buitenberm of klei-inkassing kan beschadigen door menselijk ingrijpen of door flora en fauna. Op menselijk ingrijpen kan gecontroleerd worden door middel van visuele inspectie of door hoogtemetingen. Bij schade door flora en fauna kan gedacht worden aan de invloed van omgewaaide bomen en muskusratten. Het is mogelijk dat er hierdoor een zwakke plek ontstaat. Deze schade kan door visuele inspectie worden vastgesteld. Infraroodcamera's

kunnen ook kwellocaties detecteren. Wanneer de kwelweglengte verkort is door de ontstane schade, is het nodig dit te herstellen.

4.5.2.2 *Damwand of kwelscherm*

Bij een stalen damwand ligt beschadiging niet voor de hand. Wanneer dit toch gebeurt, is reparatie noodzakelijk om de afdichtende werking te herstellen.

Een kwelscherm kan zwakker zijn en daardoor gemakkelijker beschadigen door bijvoorbeeld graafwerkzaamheden (bijvoorbeeld voor het leggen van kabels of leidingen). Hier zal bij de gangbare visuele inspecties op gelet moeten worden. Als de afdichtende functie in gevaar gekomen is, zal reparatie noodzakelijk zijn.

4.5.2.3 *Verticaal zanddicht geotextiel*

Een verticaal zanddicht geotextiel kan verstopping in de tijd. In principe wordt het geotextiel zo gekozen dat de kans hierop klein is, maar er is nog onvoldoende ervaring met het geotextiel om dit uit te sluiten voor de praktijk. De maatregel is bij een kleinere doorlatendheid van het geotextiel minder effectief, omdat het water dan om het geotextiel heen stroomt, waardoor de verticale gradiënt benedenstrooms van het geotextiel oploopt. Er kan dan op dezelfde wijze bezwijken ontstaan als bij een (te) korte damwand welke is toegepast als pipingscherm.

Het verstopping kan mogelijk gedetecteerd worden door actieve temperatuurmetingen³ in het geotextiel. Een toename in doorstroming, detecteerbaar door een snellere afname van de opgewarmde kabel, kan duiden op pipe-vorming. Een geleidelijke afname duidt op verstopping. Deze twee processen kunnen uit elkaar gehouden worden door de tijdsduur. Verstopping is een geleidelijk proces, terwijl pipes zich alleen vormen tijdens hoogwater. Waterspanningsmetingen kunnen aanvullende informatie leveren voor interpretatie van de grondwaterstroming, daar dit door wisselende buitenwaterstand en veranderingen door pipe-vorming niet eenvoudig is.

Waarschuingswaarden kunnen worden vastgesteld op basis van berekeningen met een geotextiel met beperkte doorlatendheid. Een geotextiel met beperkte doorlatendheid kan nog steeds voldoende veiligheid bieden. Wanneer de veiligheid niet meer voldoende is, is het nodig om een nieuw geotextiel te plaatsen. Omdat de plaatsing van een verticaal zanddicht geotextiel niet mogelijk is bij hoogwater zal dit tijdig gedaan moeten worden.

Daarnaast kan het geotextiel door wortels en dieractiviteit (bijv. bevers) beschadigd worden. De kans is echter betrekkelijk klein dat dit precies bij de locatie van de pipe (juist onder het slappelagenpakket) plaatsvindt. Het is niet mogelijk om dit niet-destructief te meten. Door het geotextiel op te nemen in de legger kan schade door menselijk ingrijpen mogelijk voorkomen worden.

4.5.2.4 *Grofzandbarrière*

Een grofzandbarrière kan ontmengen of verstopping. In principe wordt een grofzandbarrière zo aangelegd dat het intern stabiel is en dat er geen fijne deeltjes in kunnen spoelen, maar door onbekendheid met het omringende materiaal en door de aanbrengmethode is dit nog niet volledig uit te sluiten.

³ *Temperatuurmetingen waarbij opwarming plaatsvindt, bijvoorbeeld door middel van een koperkabel langs een glasvezelkabel.*

Verstopping zou op dezelfde wijze gemonitord kunnen worden als bij het geotextiel. Het uitspoelen van materiaal is niet eenvoudig te monitoren. Het uitspoelen van materiaal uit de barrière (wat bij een goed ontwerp en goede uitvoering overigens niet zou kunnen gebeuren) zorgt voor een toename van de poriegrootte, waardoor het zand bovenstrooms van de barrière door de barrière heen kan spoelen. Mogelijk kan na het ontstaan van pipes door middel van proefgaten vastgesteld worden of er holle ruimtes zijn ontstaan bovenstrooms van de barrière. Praktijkervaringen leren echter dat het niet eenvoudig is om pipes te traceren door de geringe afmetingen van de pipes. Een andere mogelijkheid is het aanbrengen van een verwarmbare glasvezelkabel bovenstrooms van de barrière, om daarmee pipe-vorming te detecteren.

Indien blijkt dat de barrière verstopt is, zal vastgesteld moeten worden of de veiligheid nog voldoende gewaarborgd is. Indien dit niet het geval is, zal de barrière opnieuw aangebracht moeten worden. Net als voor het verticaal zanddicht geotextiel geldt dat het plaatsen bij hoogwater niet mogelijk is en dus tijdig zal moeten gebeuren wanneer tijdens of na een hoogwater geconstateerd wordt dat vervanging noodzakelijk is.

4.5.2.5 *Horizontale drainagebuis*

De werking van een horizontale drainagebuis (zoals het DMC-systeem) berust op het gecontroleerd afvoeren van water, waardoor de stroming van water benedenstrooms van de pipe te gering is om pipes te laten ontstaan of te laten doorgroeien. Verstopping is daarom de belangrijkste vorm van degradatie. Met het DMC-systeem wordt regelmatig een test uitgevoerd om te controleren of alles nog naar behoren functioneert. Eventuele degradatie is daarbij een aandachtspunt en komt bij de daarvoor uitgevoerde pompproef vanzelf naar voren. Vervolgens is op eenvoudige wijze regeneratie van het systeem mogelijk, zodat het weer als vanouds functioneert.

Daarnaast zijn er nog andere manieren waarop dit systeem kan falen, zoals een stroomstoring of een storing aan de pomp. Het systeem is voor toepassing bij Veessen-Wapenveld op deze punten voldoende betrouwbaar gebleken.

4.5.2.6 *Filter*

Een filter berust net als de DMC op het gecontroleerd aflaten van water. Doordat het filter aan het maaiveld gelegen is, is er risico op (mechanische, chemische en biologische) verstopping. Een filter moet daarom met enige regelmaat gecontroleerd worden op doorlatendheid. Hier zal bij het ontwerp rekening mee moeten worden gehouden, zodat er gemakkelijk pompproeven of infiltratieproeven kunnen worden uitgevoerd en bemeten. Bij opgetreden verstopping zal vaak tot gedeeltelijke of volledige vervanging moeten worden overgegaan.

4.5.3 *Calamiteiten*

De doelstelling voor het monitoren ten behoeve van calamiteiten voor piping is het is het geven van aanvullende informatie ten behoeve van de veiligheid. Deze informatie kan gebruikt worden om beter onderbouwd keuzes te maken voor prioritering van maatregelen of voor evacuatie.

De acties die bij het opstellen van een monitoringsplan voor calamiteiten een rol spelen zijn (zie ook figuur 4.1):

- a. Kies de te monitoren parameters
- b. Bepaal de orde van grootte van veranderingen
- c. Stel waarschuwings- en alarmwaarden vast
- d. Bepaal de mogelijkheden om in te grijpen

- e. Registreer relevante omgevingsinvloeden
- f. Kies de locaties van de metingen
- g. Benoem specifieke doel(en) van elk instrument
- h. Stel verwachtings-, waarschuwings- en alarmwaarden vast per instrument

Voor de beschrijving van (e) omgevingsinvloeden en (g) specifieke doelen wordt verwezen naar §4.5.1.3 en §4.5.1.5.

4.5.3.1 *Keuze van parameters*

In hoofdstuk 3 is toegelicht dat monitoring bij een calamiteit ingezet kan worden om te bepalen of er zandmeevoerende wellen ontstaan (identificeren van mogelijke risicolocaties) en om te bepalen hoe ver het proces gevorderd is.

Detecteren van een zandmeevoerende wel

Het detecteren van zandmeevoerende wellen is een eerste en belangrijke stap in het bepalen van de veiligheid, omdat er zonder deze vaststelling geen maatregelen genomen kunnen worden. Traditioneel wordt dit gedaan door middel van visuele inspectie. De locaties waar wellen ontstaan zijn veelal bekend bij waterkeringbeheerders, maar het is niet altijd zo dat wellen op dezelfde locatie terugkomen. Bij een maatgevend hoogwater zal het bovendien zo zijn dat er op meer locaties zandmeevoerende wellen ontstaan, dan bij voorgaande lagere hoogwaters. Door weersomstandigheden, troebel water en de omvang van het gebied waar wellen kunnen ontstaan kan het moeilijk zijn om de zandmeevoerende wellen visueel te ontdekken. Ook aspecten als begroeiing en de uitstroomblocatie spelen een rol: in een diepe vaart of een kanaal is een wel moeilijk of niet zichtbaar.

Zandmeevoerende wellen worden gekenmerkt door een gelokaliseerde uitstroom van grondwater. Daar het grondwater over het algemeen een andere temperatuur heeft dan het oppervlaktewater is dit een geschikte parameter voor het detecteren van wellen. Naarmate een wel sterker is, zal deze ook beter en daarmee sneller zichtbaar zijn in de temperatuurmetingen, ook als het temperatuurverschil betrekkelijk klein is (dit is wel de reden dat de relatieve nauwkeurigheid van de temperatuurmetingen 0,1 graad of nauwkeuriger moet zijn (Bersan, 2015)).

Detecteren van de voortgang van het pipingproces

Het pipingproces begint met het terugschrijden van pipes in de richting van de rivier. Wanneer deze pipes een kritieke lengte (zie figuur 3.1) overschrijden zal de pipe bij gelijkblijvende waterstand doorgroeien. Dit zal alleen plaatsvinden wanneer het kritieke verval is overschreden. Niet iedere zandmeevoerende wel duidt dus op een kritieke situatie. Wanneer de pipe de bovenstroomse zijde bereikt, wordt de pipe door de toename van erosie verruimd aan de bovenstroomse zijde. Doordat de pipes benedenstrooms onvoldoende afvoercapaciteit hebben raken deze verstopt, waardoor het ruimproces geleidelijk van bovenstrooms naar benedenstrooms plaatsvindt door een herhaald proces van erosie, verstopping en ontstopping. Na het voltooiën van de ruimfase is geen tijd meer beschikbaar voor evacuatie. De IJkdijkproeven lieten zien dat de mate van zandafvoer min of meer gelijk was in zowel de terugschrijdende fase als in de ruimfase. Op basis van de visuele inspectie is het dan niet vast te stellen in welke fase het proces zich bevindt.

Op dit moment is het gangbaar om iedere zandmeevoerende wel van enige betekenis op te kisten: het is immers niet bekend of de zandmeevoerende wel gevaarlijk is of niet. De wellen worden daarnaast beoordeeld op risico: op basis van de mate van zandafvoer, debiet, grootte. Zowel bij een situatie met traditionele maatregelen (bijv. een berm), als met innovatieve maatregelen (bijv. een geotextiel) is het niet zichtbaar wat er onder de grond gebeurt. Bij een

hoogwater dat hoger is dan voorgaande hoogwaters kan wel de situatie ontstaan dat er onvoldoende capaciteit (mankracht en middelen) beschikbaar is om alle zandmeevoerende wellen van enige betekenis op te kisten. Monitoring kan daarbij aanvullende informatie leveren, waarin het geheel van ervaring met de kering (eerder waargenomen wellen, kennis van de ondergrond), visuele inspectie, risicoprofiel en meetresultaten wordt afgewogen.

Om de voortgang van het pipingproces te detecteren kan gekozen worden voor het meten van de terugschrijdende fase of het meten van het ruimproces.

Het meten van de terugschrijdende fase vraagt het detecteren van de kleine pipes. Deze pipes hebben invloed op het grondwaterstromingspatroon en kunnen daarom in principe met waterspanningsmeters en temperatuursensoren (actief of passief) gemeten worden. In §A.25 is toegelicht dat het terugschrijdende proces gekenmerkt wordt door een benedenstroomse daling van de waterspanning. Doordat de stroomsnelheid groter is in de pipe, kunnen ook variaties in temperatuur de pipes duiden. Passieve metingen blijken echter veelal moeilijk interpreteerbaar (Bersan, 2015; Koelewijn en Taccari, 2017), waardoor deze tijdens een calamiteit met de huidige stand van zaken vooralsnog onvoldoende snel resultaten lijken te bieden. Actieve metingen (met verwarmde kabel) zijn mogelijk wel tijdig te interpreteren, hoewel dit nog niet tijdens een hoogwater in de praktijk is aangetoond.

Het meten van de ruimfase is relatief eenvoudiger dan het meten van de terugschrijdende fase, omdat de pipes groter zijn en dus veel meer impact hebben op de grondwaterstroming. Waterspanning en variatie in stroomsnelheid (te detecteren met actieve of passieve temperatuurmetingen) zijn daarom geschikte parameters. Daarnaast zakt de deklaag wat na, waardoor rekmetingen ook de verruimde pipe zouden kunnen duiden. De ervaringen daarmee zijn vooralsnog niet eenduidig (Koelewijn en Taccari, 2017).

4.5.3.2 *Bepaal de orde van grootte van veranderingen*

Het ontstaan van een zandmeevoerende wel is zoals aangegeven niet altijd visueel op te merken. Bij troebel water of water met grotere diepte kan een wel gemakkelijk over het hoofd worden gezien. In visueel opzicht kunnen de veranderingen dus zeer klein zijn. Wanneer de wel in principe wel goed zichtbaar is, kan deze nog dusdanig klein zijn dat deze van een grotere afstand (bijv. op een luchtfoto) niet zichtbaar is. Zandmeevoerende wellen met een krater kleiner dan ca. 30 cm in diameter (uitgaande van een ronde vorm) mogen in de gangbare situatie van een teensloot achter een dijk, of eenvoudigweg op het maaiveld, nog wel over het hoofd gezien worden, omdat deze (voorlopig) geen gevaar vormen voor de veiligheid van de dijk. Gevaarlijker zijn de situaties waarbij geen zichtbare zandkrater kan ontstaan, bijvoorbeeld bij een helling of een diepe vaart of kanaal achter de dijk.

Of de kwel in temperatuur zichtbaar is door een afwijkende temperatuur, is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen grondwater en oppervlaktewater en de nauwkeurigheid van het meetinstrument. Voor de Nederlandse situatie zal een wel van serieuze betekenis eigenlijk altijd wel detecteerbaar zijn, mits de meetnauwkeurigheid 0,1 graad of beter bedraagt (Bersan, 2015).

Het detecteren van het terugschrijdende pipingproces door middel van waterspanning vergt metingen nabij de pipe. Hoe verder van de pipe, hoe kleiner de afname in waterspanning. De absolute afwijking in waterspanning in de pipe zelf is afhankelijk van een aantal factoren:

- Waterstandsverschil over de kering: de afwijking in waterspanning neemt in absolute zin toe met toename van het waterstandsverschil.

- Zandsort: naarmate het zand grover is, is de pipe groter en de drukval in de pipe lager (Van Beek, 2015a) (grotere afwijking waterspanning).
- Mate van overschrijding van het kritiek verval: naarmate het kritiek verval verder overschreden is ontstaan grotere pipes met relatief kleine drukval over de lengte van de pipe (grote afwijking waterspanning in de ondergrond zelf) (Vandenboer et al., t.b.p.)
- Aanwezigheid van barrièremaatregel: het stoppen van de pipe door een maatregel, bijvoorbeeld een damwand, geotextiel of grofzandbarrière, leidt tot verdere uitgraving van de pipes benedenstrooms van de maatregel en een daardoor kleinere drukval in de pipe (grotere afwijking waterspanning).

De verandering in temperatuur ten gevolge van toename van stroomsnelheid in de pipes is afhankelijk van het verschil tussen oppervlaktewatertemperatuur en grondwatertemperatuur. De toename van de stroomsnelheid in de pipe zelf is afhankelijk van de grootte van de pipe (zie hierboven genoemde overwegingen) en de doorlatendheid van het pakket.

Bij het ruimproces neemt de grootte van de pipe dusdanig toe dat de waterspanning gelijk wordt aan die van het buitenwater. De ordegrootte van verandering is dan afhankelijk van het oorspronkelijke verloop van de waterstand over de kering.

De stroomsnelheid in de verruimde pipe zal aanzienlijk groter zijn dan in de terugschrijdende pipe, er zijn geen absolute waarden bekend. De temperatuur in de pipe zal die van het buitenwater aannemen.

De ordegrootte van de verandering in rek is moeilijk aan te geven. Hier is nog erg weinig ervaring mee en de beperkte ervaring die er bij de IJkdijkproeven en de LiveDijk Willemspolder (Koelewijn en Taccari, 2017) mee is opgedaan gaf een sterke variatie weer.

Zowel bij het terugschrijdende proces als bij het ruimproces kan de hoeveelheid getransporteerd zand in de ordegrootte van tientallen liters tot meerdere kubieke meters liggen.

4.5.3.3 *Stel waarschuwings- en alarmwaarden vast*

Om op een zinvolle wijze de meetwaarden te kunnen beoordelen, moet het duidelijk zijn welke meetwaarden als normaal kunnen worden beschouwd, wanneer er extra aandacht vereist is en wanneer er alarm geslagen moet worden. Met name voor het laatste geval is het noodzakelijk dat er snel gehandeld kan worden op basis van actuele meetwaarden en er niet sprake zal zijn van een analyse achteraf (dus pas als de calamiteit of catastrofe achter de rug is) (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Bij het detecteren van een zandmeevoerende wel is er direct alertheid gewenst. Hier zijn geen waarden voor benodigd: de wel is er of niet. Er zijn verschillende mogelijkheden:

- De wel is dusdanig klein dat tijdelijke maatregelen (nog) niet nodig zijn (zie §4.5.3.2).
- De wel is groot genoeg om maatregelen te nemen.

Voor het detecteren van terugschrijdende erosie kan het zinvol zijn om te beschouwen wanneer een pipe de kritieke lengte gepasseerd is: dat kan inhouden dat een maatregel (bijv. geotextiel of damwand) gepasseerd is of dat de pipe voorbij de helft van de kwelweglengte is gekomen (de kritieke lengte is de pipe-lengte behorende bij het kritiek verval en is altijd korter dan de helft van de kwelweglengte, zie ook Figuur 3.1).

Voor het detecteren van het ruimproces is het van belang de start van het ruimproces te kunnen detecteren: er moet immers nog voldoende tijd voor evacuatie zijn. Dit betekent dat er alleen aan de bovenstroomse zijde verruiming heeft plaatsgevonden.

De concrete vaststelling van waarschuwings- en alarmwaarden per instrument en per groep van instrumenten kan uiteraard pas plaatsvinden wanneer de keuze daarvoor is gemaakt (zie de laatste stap van dit onderdeel), maar in algemene zin kan, en moet, er op dit punt in de procedure al aandacht aan worden besteed omdat dit mede van invloed is op de keuzes die voordien al gemaakt moeten worden (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

4.5.3.4 *Bepaal de mogelijkheden om in te grijpen*

Bij het detecteren van een zandmeevoerende wel wordt er vrijwel altijd ingegrepen. De methode hiervoor zal per waterschap verschillen. Op basis van gesprekken met enkele waterkeringbeheerders blijkt dat veelal opgekist wordt, tenzij het een hele kleine zandmeevoerende wel betreft, die niet snel in formaat toeneemt. Hier zijn verschillende methoden voor (gebruik van geotextiel, grof zand, of alleen waterstand opzetten). Daarna zal de wel geobserveerd worden om vast te stellen of de tijdelijke maatregel afdoende is geweest, of dat er aanvullende maatregelen nodig zijn. Wanneer maatregelen niet mogen baten, en er voldoende reden is om aan te nemen dat de veiligheid in gevaar is (bijvoorbeeld door kennis van de kering en informatie uit aanvullende metingen), kan advies tot evacuatie afgegeven worden.

4.5.3.5 *Kies de locaties van de metingen*

De locaties van de metingen volgen uit de doelstelling van de monitoring, de beschikbare data, de gekozen parameters, en de specifieke eigenschappen van de locatie. Bepaalde locaties zullen meer gevoelig zijn voor piping dan andere. Denk voor een meer gevoelige locatie bijvoorbeeld aan een schaaldijk met sterk infiltrerende krib-erosiekuilen. Daarbij geldt dat één goedgeplaatst instrument veelal meer informatie kan verschaffen dan een reeks ondoordacht geplaatste instrumenten (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Detecteren van zandmeevoerende wellen

Het detecteren van wellen is de eerste stap. Het gebied dat hiervoor afgezocht moet worden zal per locatie verschillen. Hoe verder de wel van de dijk gelegen is, hoe kleiner de kans is dat deze daadwerkelijk tot falen van de dijk zal leiden, zo laten ook de ervaringen in Nederland en de Verenigde Staten zien. Met behulp van rekenmodellen kan de benodigde kwelweglengte berekend worden. Uitgaande van conservatieve invoerwaarden, geeft dit een redelijke indicatie van het te doorzoeken gebied. Wanneer met infrarood gemeten wordt om kwel te detecteren, verdient de toepassing in een dergelijk gebied mogelijk nog nader onderzoek.

Detecteren van de voortgang van het pipingproces

Om de terugschrijdende pipes te detecteren, moeten waterspanningsmeters in een zeer dicht net worden geplaatst met een onderlinge afstand van slechts enkele meters, dicht onder de deklaag (<0.5 m). Een dergelijk meetnet is doorgaans financieel niet haalbaar, tenzij het een zeer klein gebied betreft. Actief meten van temperatuur wordt uitgevoerd met behulp van glasvezel, waarmee voor elke strekkende meter een meting kan worden verkregen. Deze methode geeft daarom een gebiedsdekkend beeld. De meting is echter moeilijker te interpreteren dan de waterspanningsmetingen, waardoor een combinatie van waterspanningsmetingen en temperatuurmetingen de voorkeur verdient. Om vast te stellen of de pipe tot halverwege de kwelweglengte is gegroeid, zijn meerdere meetpunten in de dwarsdoorsnede noodzakelijk. Echter, om met een verwarmbare glasvezelkabel het optreden

van piping te detecteren zou één kabel voldoende moeten kunnen zijn. Voor het vroegtijdig detecteren van piping is een locatie vrij dicht bij het uittredepunt ideaal, voor het detecteren van een verontrustende mate van pipe-ontwikkeling zou deze ongeveer halverwege de kwelweglengte (op een derde tot drie-vijfde, gerekend vanaf het uittredepunt) geplaatst moeten worden. Door de aanwezigheid van een berm zou dit overigens nog altijd binnendijks kunnen zijn. Uit oogpunt van redundantie is het toepassen van twee afzonderlijke, onafhankelijke kabels aan te bevelen (dus niet één enkele (doorgeluste) kabel). De ondersteunende waterspanningsmetingen, die natuurlijk niet per se ter plaatse van een optredende pipe geplaatst zullen zijn, moeten hiervoor binnen een doorsnede bovenstrooms, onder de dijk en benedenstrooms aangebracht worden. Om dit zinvol te laten zijn, zal vooraf er voor gezorgd moeten worden dat de metingen ook bij hoogwater tijdig verwerkt zullen worden – zie hiervoor ook §4.7.

Voor het detecteren van het ruimproces is er een iets minder dicht meetnet nodig. Waterspanningsmeters zouden echter nog steeds op een onderlinge afstand van ca. 10 m geplaatst moeten worden, wat het toepassen van temperatuurmetingen (en eventueel rekmetingen, die het geheel echter wel weer duurder maken) via glasvezelkabel aantrekkelijk maakt. Ook voor het ruimproces is een combinatie van technieken nodig. Om te detecteren of het ruimproces begint zijn met name metingen aan de bovenstroomse zijde benodigd, in het voorland of bij schaar dijken ter plaatse van de buitenkruin. Alle temperatuur- en waterspanningssensoren moeten zo dicht mogelijk onder de deklaag (<1 m) in het zand geplaatst worden. De rekmetingen moeten in de deklaag, zo dicht mogelijk bij het zandpakket geplaatst worden.

Tevens moet gedacht worden aan metingen van het buiten- en polderwater (temperatuur en peil), welke in lagere ruimtelijke frequentie kunnen worden bemeten dan de metingen voor het detecteren van de pipes. De hierin te verwachten variatie (rekening houdend met het effect van bijvoorbeeld regenbuien) kan hierbij als leidraad worden gehanteerd.

4.5.3.6 *Stel verwachtings-, waarschuwings- en alarmwaarden vast per instrument*

De volgende stap betreft het concreet vaststellen van de te verwachten meetwaarden per instrument. Een overzicht hiervan zal het later gemakkelijker maken om de betrouwbaarheid van de meetwaarden te bepalen, maar eerst is het zinvol om hiermee het benodigde meetbereik, het onderscheidend vermogen en de detectiesnelheid vast te stellen (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Het zal niet mogelijk zijn om ver voorafgaand aan het hoogwater exacte waarden te geven voor waarschuwing en alarm voor het detecteren van de pipe: voor temperatuur zijn deze sterk afhankelijk van de vigerende temperaturen tijdens het hoogwater en voor waterspanning zijn deze afhankelijk van de vigerende waterstand. De metingen zullen in onderlinge samenhang onderzocht moeten worden op anomalieën.

4.5.4 *Vergelijken van monitoringssystemen voor verschillende levensfasen en faalmechanismen*

De voorgaande stappen hebben geleid tot optimale monitoringssystemen voor de verschillende levensfasen van de dijk. Omdat monitoring doorgaans ingezet wordt met een specifiek doel kan het zijn dat het plan gericht is op één specifieke levensfase. Het kan ook zijn dat er voor meerdere levensfasen vragen zijn, waardoor er meerdere systemen opgesteld zijn. Daarnaast kan het zo zijn dat er ook monitoringsplannen opgesteld worden voor andere faalmechanismen.

In alle gevallen is het zinvol om te bekijken of er overlap is tussen de monitoringssystemen, of er overvloedige metingen zijn en of metingen ook kunnen bijdragen aan andere levensfasen of faalmechanismen, eventueel na aanpassing van locatie of frequentie, om uiteindelijk tot één monitoringsplan te komen.

4.6 Leg de eisen aan de meettechnieken vast

Na het vastleggen van het monitoringssysteem kunnen de eisen waar de meettechnieken aan moeten voldoen worden vastgelegd. De volgende vijf stappen worden hiervoor genoemd in (Koelewijn en Van den Berg, 2014):

- a. Beschrijf de functionele eisen aan te selecteren instrumenten/meettechnieken
- b. Stel procedures op om te kunnen bepalen of instrumenten goed functioneren
- c. Plan regelmatige kalibratie en onderhoud
- d. Plan installeren van de instrumenten / uitvoeren van de meettechniek
- e. Stel aankoopspecificaties op voor de instrumenten

4.6.1 Beschrijf de functionele eisen aan te selecteren instrumenten/meettechnieken

Voor de concrete selectie van de benodigde instrumenten is het sterk aan te raden om functionele eisen te formuleren. Dit maakt het gemakkelijker om uiteenlopende offertes van aanbieders te vergelijken. Van de aanbieders moet dan ook wel worden gevraagd om aan te geven in hoeverre hun product(en) zullen voldoen aan de gestelde eisen. Bewezen betrouwbaarheid van vergelijkbare systemen onder enigermate vergelijkbare omstandigheden is daarbij een belangrijk voordeel. Overigens kunnen aanbieders onderling sterk verschillen in de mate waarin de op dit punt aangeleverde informatie zélf betrouwbaar is, het vragen om referenties bij andere opdrachtgevers is raadzaam voor de cruciale onderdelen (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Bij de functionele eisen kan het bovendien zinvol zijn een onderscheid te maken tussen het minimaal vereiste niveau en het idealiter gewenste niveau (eventueel te formuleren als 'functionele wensen'). Bij een afweging tussen concurrerende aanbiedingen die alle aan het minimale niveau voldoen en op wisselende onderdelen aan het gewenste niveau kan hierdoor de keuze vergemakkelijkt worden. Het onderscheid is nog belangrijker wanneer door sommige aanbieders niet voldaan wordt aan het minimumniveau (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Bij de all-in-one sensor test is een lijst met beoordelingscriteria opgesteld (De Vries et al., 2013). In onderstaande tekst zijn deze parameters en afwegingen t.b.v. het monitoren voor piping toegelicht.

Meetfrequentie

De meetfrequentie is afhankelijk van het gekozen monitoringsdoel en de te verwachten variatie van de parameter. Veel parameters die te meten zijn voor beoordeling en ontwerp variëren zelfs helemaal niet, zoals bijvoorbeeld de eigenschappen van de zandbaan. Een eenmalige meting voldoet in dat geval. Voor het beter in kaart brengen van de grondwaterstroming volstaat een meting van eenmaal per uur. Bij detectie van pipes is een grotere frequentie gewenst: tenminste meerdere malen per uur. Voor het identificeren van zandmeevoerende wellen zijn enkele controles per dag voldoende. Voor het vaststellen van schade of degradatie voor beheer kunnen voor het vaststellen van de frequentie de richtlijnen voor beheer worden gevolgd.

Nauwkeurigheid

De vereiste nauwkeurigheid dient afgesteld te worden op de te verwachten variatie van de betreffende parameter. Welke afwijking daarvan acceptabel is, is afhankelijk van de

doelstelling voor het monitoren. Het is ook mogelijk om technieken te combineren, om daarmee tot een kalibratie van de meting te komen. Gebiedsdekkende technieken als seismiek of grondradar geven wellicht een wat onnauwkeurig beeld van de ondergrond, maar bieden wel een gebiedsdekkend beeld: door deze metingen te combineren met boringen en sonderingen kunnen de resultaten wel gekalibreerd worden.

Resolutie

De resolutie van gebiedsdekkende methoden moet voldoende zijn om de betreffende fenomenen te detecteren. Bij een te lage resolutie bestaat het risico op het over het hoofd zien van belangrijke fenomenen. Hierbij kan gedacht worden aan het missen van bijvoorbeeld kleine geulen bij seismisch onderzoek of het niet kunnen identificeren van zandmeevoerende wellen met luchtfoto's of infraroodonderzoek van grotere afstand.

Reikwijdte

De reikwijdte kan variëren van 3D-meting tot puntmeting, en de functionaliteit is afhankelijk van het gewenste meetdoel en de verwachte variatie van de parameter over de ruimte. Puntmetingen als boringen en (HPT) sonderingen geven een nauwkeurig beeld van de samenstelling op dat punt, maar dit zegt niet veel over de eigenschappen van het geheel. Om toch een dekkend beeld te verkrijgen zijn veel metingen nodig of combinatie met andere technieken. Voor het detecteren van terugschrijdende pipes zijn zoveel meetpunten nodig dat het meten met behulp van alleen waterspanning niet haalbaar is: hier zijn aanvullende metingen nodig van bijvoorbeeld temperatuur welke een meer continu beeld geven.

Robuustheid

Wanneer gedurende langere tijd gemeten wordt, is robuustheid een belangrijke eis. Een beperkt gebrek aan robuustheid kan ondervangen worden door dubbelingen en variatie van technieken. De toe te passen technieken moeten echter wel geschikt zijn voor veldomstandigheden. Een bekend probleem is bijvoorbeeld is het verloop van waterspanningsmeters doordat er lucht in de sensor komt.

Aanlooptijd

De aanlooptijd kan variëren van onmiddellijk inzetbaar tot meer dan een maand. De vereisten zijn afhankelijk van de meetdoelstelling en het verloop van het project.

Informatieverwerkingstijd

De informatieverwerkingstijd is een belangrijke parameter. Voor beoordeling en ontwerp of voor beheer is het geen probleem als er een bewerkingsslag benodigd is die enkele uren of dagen in beslag neemt. Voor toepassing van monitoringstechnieken tijdens calamiteiten is het echter van belang dat de data 'near real time' beschikbaar is. Wanneer dit niet mogelijk is, is de techniek ongeschikt. Het detecteren van de pipes met behulp van waterspanning en temperatuur is hier een goed voorbeeld van: beide vragen tijd om de metingen te verwerken en te kunnen interpreteren. Op dit moment is er nog onvoldoende ervaring met het snel verwerken van deze data t.b.v. het detecteren van de pipes.

Interpreteerbaarheid

De interpreteerbaarheid varieert van 'direct interpreteerbare en vergelijkbare grootheden beschikbaar' via 'interpreteerbaar zonder expert' tot 'expert vereist voor interpretatie', en is met name van belang wanneer de dataverwerking snel moet gebeuren. Tijdens een calamiteit is het van belang dat capaciteit direct beschikbaar is om conclusies te trekken uit de data. Het is wel denkbaar dat een team opgeleid wordt om de data te kunnen interpreteren

tijdens een hoogwater. Bij minder urgente projecten kan het ook een nadeel zijn als data alleen door een expert geïnterpreteerd kan worden.

4.6.2 Stel procedures op om te kunnen bepalen of instrumenten goed functioneren

Voor meetsystemen die gedurende langere tijd worden gebruikt, is het een onderdeel van het ontwerp van een monitoringssysteem om procedures op te stellen voor het functioneren. Dit speelt met name bij het in kaart brengen van de grondwaterstroming t.b.v. beoordeling en ontwerp en bij de monitoringstechnieken die tijdens een hoogwater aanvullende informatie leveren. De andere metingen zijn zo laagfrequent dat per meting bekeken kan worden of de resultaten betrouwbaar zijn.

Het periodiek controleren van de instrumenten bestaat uit regelmatige kalibratie (zie de volgende paragraaf) en uit controle van de meetwaarden (zie §4.7).

4.6.3 Plan regelmatige kalibratie en onderhoud

Regelmatige kalibratie en onderhoud is nodig voor het meten van waterspanning t.b.v. beoordeling en beheer en voor de metingen die ingezet worden tijdens een calamiteit. De frequentie waarmee dit moet gebeuren verschilt per instrument en de omstandigheden waaronder deze worden ingezet.

Problemen die kunnen optreden bij waterspanningsmetingen zijn onder andere drift van de sensor (bijvoorbeeld door lucht in de sensor) of uitval van het instrument of het systeem. Voor glasvezelmetingen kan vandalisme of uitval van het systeem voor afwijkend functioneren zorgen.

Wanneer afwijkend functioneren aangetroffen is, kan kalibratie soms een uitweg bieden, anders is vervanging noodzakelijk indien de metingen gecontinueerd dienen te worden. Dit kan een goed moment zijn om het monitoringsplan gedeeltelijk of geheel te herzien: het kan namelijk zo zijn dat er inmiddels voldoende betrouwbare meetgegevens verzameld zijn voor het (oorspronkelijke of aangepaste) doel. Dan is vervanging niet zinvol en moet dit ook niet plaatsvinden. Bij de contractvoorwaarden kan hier ook rekening mee worden gehouden, alleen al omdat het denkbaar is dat er wel een andere locatie is waar alternatieve plaatsing wél zinvol is (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Wanneer meettechnieken slechts voor een enkele meting worden ingezet is kalibratie uiteraard ook van belang. Hier wordt in §4.7 op in worden gegaan. Bij de interpretatie van de metingen dient men er altijd op verdacht te zijn dat de kalibratie niet meer (geheel) juist is.

4.6.4 Plan installeren van de instrumenten / uitvoeren van de meettechniek

Het installeren van de instrumenten vergt enige tijd. Hierbij moet niet alleen worden gedacht aan de benodigde tijd om de instrumenten aan te brengen zelf, maar ook aan de benodigde vergunningen, toestemmingen van landeigenaren, KLIC-meldingen voor controle op reeds aanwezige kabels en leidingen en de tijd van het jaar (zoals het 'gesloten seizoen' waarbinnen er in principe geen vermijdbare activiteiten op en rond primaire waterkeringen mogen plaatsvinden, het broedseizoen wanneer dat relevant is, de kans op vorst of uitdroging, enz.) (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Aandachtspunten zijn beschreven in Koelewijn en Van den Berg (2014) en kunnen als volgt geïnterpreteerd worden voor het monitoren t.b.v. piping:

- De installatiediepte moet bepaald en gecontroleerd worden, met name als de verticale positie van belang is. Dit kan bijvoorbeeld met een boring of een sondering vooraf. Hierbij kan gedacht worden aan de plaatsing van waterspanningssensoren of

glasvezelkabels die bedoeld zijn voor detectie van pipingkanalen tijdens een hoogwater. Deze moeten nabij de deklaag in het zandpakket worden geplaatst. Bij een te grote verticale afstand is het mogelijk dat de pipes niet gedetecteerd worden.

- Kort voor installatie moet ieder instrument apart worden gekalibreerd, dit omdat de kalibratiewaarden per instrument verschillen. Het hanteren van één set waarden voor alle instrumenten van hetzelfde type leidt tot onnodige onnauwkeurigheden.
- Eveneens kort voor installatie moet het filter van iedere waterspanningsmeter verzadigd worden, om zo luchtinsluitingen te voorkomen. Dit moet met zoet water gebeuren.
- Zout water is in het algemeen iets waar sensoren meestal slecht tegen kunnen – wanneer dat niet vermeden kan worden, dan moet hier terdege rekening mee worden gehouden. Dit is vooral van belang bij waterspanningsmeters en enkele vormen van geofysisch onderzoek zoals Spontane Potentiaal-metingen. Voor bijvoorbeeld glasvezelkabels is dit niet relevant.
- Een zorgvuldige administratie in het veld van welk instrument waar is geplaatst, is essentieel maar blijkt helaas niet altijd te worden bijgehouden.
- De plaatsingsnauwkeurigheid. Voor waterspanningsmeters bijvoorbeeld is met name de verticale positie van wezenlijk belang voor de nauwkeurigheid van de meetwaarden: een onnauwkeurigheid van ± 5 centimeter in de plaatsing betekent een onnauwkeurigheid van 10 centimeter waterkolom bij de verwerking van de meetdata; voor betrouwbaarheidsanalyses kan dit van groot belang zijn. Inmetingen met GPS bieden in verticale richting meestal onvoldoende nauwkeurigheid (de meetnauwkeurigheid van GPS-systemen is doorgaans slechter in verticale richting dan in horizontale richting, al liggen de behoeften meestal andersom).
- In de praktijk gehanteerde uitvoeringstechnieken kunnen een significante invloed hebben op de metingen, zozeer dat deze zelfs volledig onbetrouwbaar kunnen zijn of worden. Dit kan ook gelden voor eenmalige metingen, zoals boringen of sonderingen. Bij waterspanningsmeters levert dit té vaak problemen op.
- De installatie van instrumenten levert óók gegevens op over de samenstelling van de ondergrond – maar deze worden nu vaak nog niet verwerkt. Verwerking van deze extra grondonderzoekspunten is waardevol.

Van algemene invloed op de kwaliteit van de metingen is de ruimte die in de planning beschikbaar is, evenals de ruimte in de budgetten. Dit geldt in het bijzonder voor de installatie van de instrumenten. Een goede planning en supervisie van de uitvoering door een externe partij kunnen veel problemen voorkomen.

4.6.5 Stel aankoopspecificaties op voor de instrumenten / meettechnieken

De generieke beschrijving uit Koelewijn en Van den Berg (2014) voldoet voor deze stap: 'In verband met de wenselijkheid van concurrerende, vergelijkbare offertes kunnen de aankoopspecificaties het beste geformuleerd worden in functionele eisen en dient een deskundige te worden betrokken bij niet alleen de formulering van deze eisen maar ook bij de beoordeling van de aanbiedingen mede betrokken te worden.'

4.7 Plan hoe om te gaan met de metingen

Het plannen van hoe om te gaan met de metingen is met name voor langdurige en hoogfrequente metingen van belang. Echter voor eenmalige metingen, zoals vaak uitgevoerd voor de doelstelling van beoordeling en ontwerp, kan het ook zinvol zijn om vooraf na te denken welke stappen uitgevoerd moeten worden, zodat een realistisch beeld van de inspanning wordt verkregen.

4.7.1 Plan de verzameling van meetgegevens

De verzameling van meetgegevens vereist een zorgvuldige voorbereiding. Het gaat hierbij om het verzamelen van data van alle sensoren, het doorgeven van de data en het opslaan van de data (Koelewijn en Van den Berg, 2014). Eventueel kan in dit stadium al gekozen worden voor controle van de data op ontbrekende, foutieve of alarmwaarden.

Een eerste verwerkingsslag van de data wordt in dit stadium vaak ook al uitgevoerd. Denk hierbij aan bijvoorbeeld de correctie van waterspanningen voor atmosferische druk of het omzetten van het meetsignaal vanuit de glasvezelkabel naar de relevante parameter (rek of temperatuur).

Het verzamelen en opslaan van de data moet op een dusdanige manier worden uitgevoerd, dat de verwerking en interpretatie van meetgegevens zo eenvoudig mogelijk wordt gemaakt. Hierbij kan gedacht worden aan eenvoudig uit te lezen data-files, uitleesbare tijdsindicatie conform gangbare programma's en optimale indeling van registratie van parameters in de tijd.

Bij de datadoorgifte is de betrouwbaarheid op verscheidene manieren van belang. Het gaat hierbij om de zekerheid waarmee de data aankomt, de zekerheid dat de data niet ergens wordt afgetapt door derden en de zekerheid dat de data niet onderweg wordt aangepast (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

Een snelle, geautomatiseerde controle van gegevens kan bestaan uit controle op chronologie, ongeldige meetwaarden (zoals -9999), identieke datum/tijd-stempels, de meetfrequentie, waarden buiten het meetbereik, geen verandering in het signaal ('dood signaal'), staprends en outliers, lineaire trends en barometrische controle (correlatie met de atmosferische druk) (Fest en Van den Berg, 2013).

4.7.2 Plan de verwerking van meetgegevens

De verwerking van meetgegevens bestaat uit het corrigeren van de ruwe data tot begrijpelijke grootheden, de weergave van de data en de interpretatie zelf. Dit is een stap die essentieel is, maar in het begin vaak veel tijd kost.

De ruwe data moet soms gecorrigeerd worden naar begrijpelijke grootheden, vaak ten opzichte van een referentiepunt. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld het omzetten van waterspanning naar stijghoogte, waarbij gecorrigeerd wordt voor de locatie van de waterspanningsmeter, zodat waarden van verschillende diepte vergeleken kunnen worden of het omzetten van de ruwe data uit grondradarmetingen naar deklaagdikte in een XYZ-grid.

Na de initiële controle op de overschrijding van waarschuwings- en alarmwaarden bij de verwerking ook een meer gedegen controle van de metingen vereist, voordat deze als betrouwbaar kan worden opgeslagen en verder gebruikt in de organisatie. De omzetting van meetgegevens uit ruwe waarden naar begrijpelijke grootheden, vaak ten opzichte van een zekere referentie, kan een bron van fouten vormen. Verwisseling van instrumenten of de bijbehorende kalibratiewaarden hoeft pas na geruime tijd tot onbegrijpelijke waarden te leiden, maar moet natuurlijk al van begin af aan vermeden worden. De verwerking via spreadsheets is zelden foutloos, zeker op de langere duur. In plaats daarvan zijn er diverse speciale softwarepakketten beschikbaar die beter gebruikt kunnen worden (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

De weergave van de data is een belangrijke stap ter voorbereiding op de interpretatie van data. Enkele suggesties waarbij aan gedacht kan worden:

- Selecteer een relevant tijdsbestek: de relevante tijdsperiode kan variëren van een korte periode ter duiding van een specifieke gebeurtenis tot het langduriger monitoren van variaties over verschillende jaren.
- Weergave van relevantie omgevingsparameters, zoals het te verwachten meetbereik, waarschuwing of alarmwaarden.
- Data t.b.v. kartering van de ondergrond: profielen of 3D weergave.
- Waterspanningsmetingen t.b.v. karakterisering van de grondwaterstroming of detectie van pipes: profielen langs de as van de dijk, 3D plot of contour plot (XY). Voor de detectie van pipes kan ook gedacht worden aan het plotten van de afwijking ten opzichte van het te verwachten verloop van de waterspanning langs de as van de dijk. Het kan ook zinvol zijn om karakteristieke niveaus aan te geven, zoals de maaiveldhoogte in het achterland en de kruinhoogte. (Grond)waterpeilen zijn daar goed aan te relateren en fysisch onwaarschijnlijke waarden worden zo sneller opgemerkt.
- Boringen en grondradarmetingen t.b.v. deklaagdikte: profielen, scatter plots of contour plots
- Temperatuurmetingen voor detectie van pipes: kleurenplot als functie van lengte en tijd of in geval van meerdere raaien als 3D scatter plot. Aangezien bij passieve temperatuurmetingen met name veranderingen in temperatuur een goede indicator zijn voor detectie van pipes kan ook gekozen worden om het temperatuurverloop in de tijd als gradiënt te plotten (dT/dt).

Het is aan te raden de grafieken zo eenvoudig mogelijk te houden. In Koelewijn en Van den Berg (2014) zijn nog enkele suggesties gegeven om de grafiek inzichtelijk op te maken.

De interpretatie kan bestaan uit de controle van de metingen, het beschouwen van anomalieën en trends, de onderlinge vergelijking van resultaten van verschillende meetmethoden, tijdsperiodes of (referentie-)locaties en de vergelijking met en kalibratie van ondergrondmodellen door middel van inverse analyse. De voorspelling t.a.v. de dijkveiligheid kan uiteindelijk verfijnd worden door het beschouwen van alle informatie: zowel de visuele inspecties, de kennis van de waterkering en de ondergrond, en de aanvullende meetresultaten uit het monitoringsplan, en de vergelijking met modellen.

4.7.3 Leg verantwoordelijkheden en acties vast

De generieke beschrijving uit Koelewijn en Van den Berg (2014) voldoet grotendeels voor deze stap: 'Verantwoordelijkheden [en bijbehorende acties] voor de verschillende onderdelen kunnen het beste worden neergelegd bij de partij die op een bepaald onderdeel de meeste invloed heeft. Financiën, macht (institutioneel) en inhoudelijke expertise spelen daarbij een rol, evenals contractuele afspraken. Hierbij moet gewaakt worden voor overspannen en uiteindelijk niet-afdwingbare beloften.'

4.8 Rond het ontwerp af

Het afronden van het ontwerp is beschreven in Koelewijn en Van den Berg (2014). Op basis van voorgaande stappen zijn alle elementen van een goed ontwerp beschikbaar, maar dat moet ook budgettair mogelijk zijn en vervolgens toegankelijk worden vastgelegd.

4.8.1 Stel de (voorlopige) begroting op en ga desnoods één of meer stappen terug

Op dit punt is het verstandig om een begroting te maken. Wanneer de begrote kosten niet overeenkomen met het beschikbare budget, dan kan het verstandig zijn om enkele tot vele stappen terug te gaan, zoals ook is aangegeven in figuur 4.1. Dit geldt overigens zowel bij overschrijding als bij onderschrijding van het beschikbare budget: bij significante verschillen is er waarschijnlijk een mismatch tussen verwachtingen en mogelijkheden en kunnen er rationele gronden voor zijn om het budget voor monitoring aan te passen, bijvoorbeeld omdat hiermee de overall-risico's worden verkleind, of omdat ook uitgebreide monitoring

onvoldoende verschil maakt met betrekking tot het handelingsperspectief. In dergelijke gevallen is het belangrijk om hier ook goed over te communiceren.

4.8.2 Leg het systeem vast in een toegankelijk ontwerpverslag

De voorgaande stappen behoren te worden vastgelegd in een samenhangend verslag. Alleen al het maken van zo'n verslag kan eventuele inconsistenties aan het licht brengen. Behalve daarvoor is het vooral ook nuttig als referentiemateriaal bij de interpretatie en verwerking van metingen en voor de periodieke herziening van het monitoringssysteem.

4.9 Installeer het monitoringssysteem en zorg dat het benut wordt

De eigenlijke installatie vormt het meest zichtbare onderdeel van het monitoringssysteem. De inbedding in de organisatie vergt aanvankelijk ook de nodige aandacht – anders is de hele opzet mogelijk zelfs zinloos – maar leidt in het ideale geval tot een zekere onzichtbaarheid van het systeem, doordat het als vanzelfsprekend ingebed raakt in de organisatie (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

4.10 Herzie het monitoringssysteem regelmatig

Bij het gebruik van het monitoringssysteem zal de waarde van een goede voorbereiding blijken. Indien nodig zullen de voorziene maatregelen getroffen moeten worden: een gepaste reactie op de gemeten waarden en waarnemingen. Afhankelijk van de situatie kan er noodzaak zijn tot (tijdelijke) aanpassing van de meetfrequentie, reparatie of vervanging van uitgevallen instrumenten, enzovoorts.

Voor eenmalige metingen is het zinvol om terug te kijken naar het verloop van het monitoren en vast te stellen of er op basis van de metingen lering getrokken kan worden voor het uitvoeren van vergelijkbare plannen op andere locaties.

Voor langduriger of herhaalde metingen is het zinvol het systeem periodiek te herzien. Dit kan vooraf al worden gepland, eventueel aanvankelijk met een hogere frequentie dan later. Incidenten als uitval, onverwachte uitkomsten, onduidelijkheden in interpretatie of overschrijding van waarschuwings- en alarmwaarden kunnen ook aanleiding zijn voor een herziening, zie ook figuur 4.1 (Koelewijn en Van den Berg, 2014).

5 Referenties

Arcadis (2015). POV Piping “Pipingonderzoek dijkkring 43, d70 en kD bepaling” – Resultaten grondonderzoek en analyses, Arcadis rapport C03011.000275.0400.

Bersan, S. 2015. *Piping detection in dike foundations by distributed temperature sensing. Understanding the development of thermal anomalies*, Proefschrift, Universiteit van Padua.

De Vries, G., Ter Brake, C.K.E., De Bruijn, H. de, Koelewijn, A.R., Langius, E.A.F., Van Lottum, H. en Zomer, W.S. (2013). Dijkmonitoring: beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen. Amersfoort: STOWA/Stichting IJkdijk.

Dunnicliff, J. (1993), *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*, Wiley, New York, 577 pp.

Dunnicliff, J. (1995), Systematic approach to planning monitoring programs using geotechnical instrumentation: an update. *Field measurements in geomechanics*, Leung, Tan & Phoon, editors, Balkema, Rotterdam, 1999, 19-30.

Fest P.M.J. en Van den Berg, A. (2013), *Controle data 15 maart tot 1 september 2013*, monitoring Waddenzeedijk Ameland, notitie AME5-4, Witteveen+Bos, Deventer, 3 oktober 2013.

Flood Control IJkdijk (2015). Nota Innovatieve meettechnieken – De stand van zaken van het publiek-private kennis- en innovatieprogramma Flood Control IJkdijk (FCIJ) en de kennis en innovatiebehoefte voor waterveiligheid van Rijkswaterstaat. Rapport 20150629 Nota Innovatieve meettechnieken.docx, versie maandag 29 juni 2015 – Revisie 28.

Forster, U., Van den Ham, G., Calle, E. en Kruse, G. (2012). Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen. Deltares rapport 1202123-003-GEO-0002.

Koelewijn, A. en De Vries, G. (2012). Monitoringsplan Livedijk XL Noorderzijlvest. Deltares rapport 1205450-000-GEO-0002.

Koelewijn, A. en Förster, U. (2014). Ontwerp voor LiveDijk Willemspolder bij Waterschap Rivierenland. Deltares memo 1208555-000-GEO-0002 versie 6, 31 maart 2014.

Koelewijn, A. en Van den Berg, F. (2014). Monitoren van waterkeringen. Deltares memo 1209403-000-VEB-0001.

Koelewijn, A. (2016). Stand van zaken LiveDijk Willemspolder. Deltares memo 1208555-000-GEO-0008.

Koelewijn, A. en Taccari, M.L. (2017). LiveDijk Willemspolder, Praktijkproeven Verticaal Zanddicht Geotextiel. Deltares rapport 1208555-000-GEO-0006 versie 2.

Loots, G. en Van der Kolk, B. (2015). Eindrapport Livedijk Utrecht. TNO rapport – projectnummer 055.01599.

Luijendijk, M.S. (2013). Monitoringsplan Livedijk Ameland. Deltares rapport 1206727-000-GEO-0003.

Luijendijk, M.S. (2016). Livedijk Ameland – (innovatieve) monitoringsresultaten km 2,4 en synergie met versterkingsproject Waddenzeedijk Ameland km 7,0. Deltares rapport 1206727-000-GEO-0009.

Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2015). Kader Zorgplicht Primaire Waterkeringen versie 2.0, Maart 2015.

Sluis, J.J.M, Sirks, E.E., Koelewijn, A.R., Veenstra, J.W. (2016). Effect van tijdsafhankelijkheid op piping bij zeedijken – resultaten monitoringsproef op Ameland. Geotechniek Januari 2016, pp. 8-12.

Stichting IJkdijk (2010). IJkdijk Pipingexperiment – validatie van sensor- en meettechnologie voor detectie van optreden van piping in waterkeringen. Rapport no. 2010-26-PIW, ISBN: 978.90.5773.485.4.

Taal, L. (2017). Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel, Groene versie. POV-piping, Tiel, 14 juni 2017, 49 pp., verkrijgbaar via <http://pov-piping.nl/content/ontwerp-en-beoordelingsrichtlijn-vzg.html>

Van Beek, V. en Ulrich Förster (2012). SBW Piping: 2B. Bureaustudies fysische onderbouwing aangepaste rekenregel, tijdsafhankelijkheid en heterogeniteit. Rapportage 1204201-002-GEO-0001, Deltares, Delft.

Van Beek, V.M. (2015a). Backward erosion piping: initiation and progression. PhD dissertation, TU Delft.

Van Beek, V.M. (2015b). Toelichting snelheid pipe-ontwikkeling. Deltares memo 1220077-005-HYE-0004-m.

Van den Berg, F.P.W. en Koelewijn, A.R. (2014), Monitoringsfilosofie voor de Nederlandse waterkeringen, Geotechniek 18(3):34-38.

Vandenboer K. et al. (te verschijnen). Artikel over groeisnelheid van de pipe bij kritische en boven-kritische vervallen.

Van der Meer, M.T., Nieuwenhuis, J.W. en Bakkenist, S. (2016a). LiveDijk XL Noorderzijlvest – State of the Art 2015, Stichting FloodControl IJkdijk, Groningen, juni 2016.

Van der Meer, M.T., Koelewijn, A.R., Weijenborg, A. & Konstantinou, M. (2016b), Handreiking Life Cycle Monitoring Fase 1, concept, Projectoverstijgende verkenning macrostabiliteit, Tiel, 22 augustus 2016.

Wichman, B.G.H.M. (2012). Inrichting monitoringsysteem voor Grebbedijk; voorbereidingen voorafgaande aan eerstvolgend hoog water. Deltares rapport 1204397-000-0011.

Wichman, B.G.H.M. (2013). Jaaroverzicht monitoring Grebbedijk; evaluatie meetgegevens". Deltares rapport 1204397-000-GEO-0014.

Wichman, B.G.H.M. (2014). Vooronderzoek Grebbedijk - piping risico's bij Blauwe kamer. Deltares rapport 1208977-000-GEO-0004.

Wiertsema & Partners (2011). Grondonderzoek Rijnbandijk 13 Ingen, VN-50260.4.

A Overzicht meettechnieken en relevante parameters

In deze Appendix is een overzicht gegeven van mogelijke meettechnieken en de parameters die hiermee bepaald kunnen worden. In Tabel A.1 wordt aangegeven hoe de techniek nuttig kan zijn voor het monitoren ten behoeve van piping en de technieken zijn in onderstaande tekst nader toegelicht. Hierbij is gebruik gemaakt van de beschrijvingen in Flood Control IJkdijk (2015).

Tabel A.1 Overzicht van monitoringstechnieken t.b.v. piping

Monitoringstechniek	Directe parameter	Indirecte parameter															
		Dikte deklaag	Hoogteligging maaiveld	Volumiek gewicht deklaag	Waterdruk onder deklaag	Intreepunt	Uitredpunt	Dikte watervoerend pakket	(Variatie in) doorlatendheid WVP	Korrel diameter	Kratervolume	Mate van zandtransport	Debiet	Stroomsnelheid	Totaalspanning	Deformatie toplaat	Dichtheid ondergrond (aanwezigheid pipe)
Boringen	Grondslag	x	x	x				x		x							x
Sonderingen	Conusweerstand, schachtwrijving	x	x					x									x
HPT-sondering	Conusweerstand, dissipatie van wateroverspanning	x	x					x	x								x
Pompproef	meten van daling waterspanning t.g.v. bemaling								x								
Waterspanningsmetingen	Waterspanning (soms ook temperatuur)				x	x	x							x			
Glasvezel	Temperatuur, rek, druk					x								x	x	x	
Visuele waarneming	Diameter krater, waarnemen snelheid transport, deformatie, zand		x				x			x	x	x				x	
Infraroodcamera	Temperatuur						x							x			
Dichtheidsmeter	Dichtheid water (aanwezigheid vaste deeltjes)											x					
SP	Eigenpotentiaal													x			
Seismiek	Trillingen	x						x									
EM en geo-elektrisch onderzoek	Geleidbaarheid van de bodem	x						x	x								
Radar	laagdikte en de diëlektrische constante	x															x
Drukopnemer	Gronddruk														x		
Tracers	Locatie van tracer													x			
GPS	Plaatsveranderingen aan het oppervlak		x														

A.1 Akoestische emissie

Bij akoestische emissie worden de geluiden gemeten die karakteristiek horen bij de energie die vrijkomt bij plotselinge scheurvorming binnen een materiaal. Door de tijd te vergelijken tussen de verschillende opnemers, kan de locatie van de scheurvorming worden bepaald. Bij piping treedt de scheurvorming van de dijk in een laat stadium van het proces op: mogelijk tijdens het ruimproces en wellicht pas tijdens bezwijken. Tijdens het ontstaan van terugschrijdende pipes treedt geen scheurvorming op.

A.2 Boringen

Boringen worden eerst visueel geïnspecteerd, maar worden vervolgens vaak ook voor nadere inspectie naar een laboratorium gebracht. In het laboratorium worden classificatieproeven uitgevoerd. Voorbeelden zijn volumegewicht-bepaling en korrelverdelingsbepalingen, welke invoerparameters voor het voorspellen van piping leveren.

A.3 Convergentie-opnemer

Een convergentie-opnemer meet het verschil in afstand tussen de twee meetpunten om te bepalen of de punten naar elkaar toe of van elkaar af bewegen. Een dergelijke opnemer wordt alleen toegepast als er rond de waterkering een kunstwerk is. Ten opzichte van een kunstwerk kan dan de relatieve verplaatsing worden gemeten. Bij het pipingproces treedt alleen verplaatsing op tijdens het ruimproces of tijdens het bezwijken.

A.4 Dichtheidsmeter

Een dichtheidsmeter, veel gebruikt in de bagger-wereld, kan worden gebruikt om te bepalen hoeveel deeltjes er in water rondzweven. Bij een zandmeevoerende wel worden zandkorrels afgevoerd. De dichtheid van de vloeistof in een zandmeevoerende wel is, samen met de grootte van de korrels en het debiet, een indicator voor de drukval in de verticale pipe door het slappe-lagenpakket.

A.5 Digitale camera

Een digitale camera kan opnamen maken waarmee veranderingen of bijzonderheden kunnen worden vastgelegd. Een camera kan gemakkelijk worden ingezet vanaf een vast punt, bij visuele inspecties, of vanuit de lucht. Het maken van luchtfoto's is de oudste toepassingsvorm van 'remote sensing'. Er worden foto's gemaakt van de dijk door een object dat hoog in de lucht vliegt. Dat kan een vliegtuig of helikopter zijn, maar ook een Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) of 'drone'. Vaak wordt de inzet van een gewone digitale camera gecombineerd met andere opnames, zoals infrarood. Voor piping zijn luchtfoto's zinvol om veranderingen in het landschap te detecteren, zoals zandmeevoerende wellen. Opgemerkt wordt dat kleine wellen waarschijnlijk niet te detecteren zijn door middel van luchtfoto's.

A.6 Totaaldrukopnemer

Een totaaldrukopnemer meet de normaalkracht in een vlak in de grond. Ter plaatse van de pipe is geen gronddruk aanwezig. Een totaaldrukopnemer kan wanneer juist geplaatst mogelijk een pipe detecteren, maar dat vereist wel een (toevallig) juiste plaatsing. Bovendien zijn drukopnemers veelal aanzienlijk groter dan de typische afmeting van een pipe.

A.7 Elektromagnetische metingen en geo-elektrische metingen

Bij elektromagnetische metingen wordt het geleidingsvermogen van de ondergrond in kaart gebracht, door een magneetveld te creëren en te bemeten met spoelen die op variërende

afstand van elkaar geplaatst worden. Bij geo-elektrische methoden wordt met behulp van elektroden op wisselende afstanden een elektrische stroom door de ondergrond gestuurd en bemeten. Voor beide methoden geldt dat variaties in geleidend vermogen kunnen duiden op verschillen in hoeveelheid klei, vocht (porositeit) en zouten in de bodem.

A.8 Extensometer

Een extensometer kan de verticale verplaatsing meten. Zo kan zetting of zwel gemonitord worden. Bij piping is er nauwelijks sprake van zwel of zetting.

A.9 Glasvezelkabel

Een glasvezelkabel (optical fibre) is een glazen of plastic golfgeleider met een diameter van ongeveer 0.1 mm die het mogelijk maakt om licht over kilometers lengte te sturen. Door te kijken naar de verandering in de frequentie van de lichtbundel die erdoor heen wordt gestuurd, kan er door een computer berekend worden waar de vervorming plaatsvindt en hoe groot deze is. De glasvezel kan ook worden gebruikt als temperatuurmeter. Door temperatuurverschillen te meten kunnen verschillen in stroomsnelheid gedetecteerd worden. Vervorming kan bij piping optreden wanneer het ruimproces plaatsvindt: de pipes zijn dan dusdanig groot dat de kleilaag erboven inzakt. Daarnaast treedt vervorming op bij het bezwijken van de dijk. Door het terugschrijden van pipes treedt er een verandering in de grondwaterstroming op: de pipe is meer doorlatend dan het omringende zandpakket. Hierdoor ontstaan verschillen in stroomsnelheid. Deze verschillen kunnen passief gemeten worden of actief, door de kabel te verwarmen en de afkoeling te bekijken. Dit laatste biedt een hogere nauwkeurigheid. Tijdens het ruimproces worden de pipes breder en dieper, en de invloed op de grondwaterstroming is daarom groter dan bij het terugschrijdende proces. De ruimfase is daarom eenvoudiger te detecteren.

A.10 GPS ontvangers

Speciale GPS ontvangers kunnen plaatsveranderingen aan het oppervlak te meten met een nauwkeurigheid van 1 à 2 mm. Bij piping zijn niet veel horizontale verplaatsingen te verwachten tot de laatste fase van het pipingproces (bezwijken).

A.11 Grondradar

De grondradar kan informatie geven over de bodemopbouw. Een elektromagnetische golf wordt met een radarantenne de grond ingestuurd. Bij diëlektrische contrasten (zoals scheidingen van bodemlagen of objecten) zal de golf gereflecteerd worden. Met grondradar kan de laagdikte en de diëlektrische constante worden gemeten. Zowel de dikte van het afdekkende pakket, met eventuele discontinuïteiten, als de dikte van de zandlaag zijn belangrijke parameters voor het bepalen van het risico op piping. Pipes hebben mogelijk ook een andere diëlektrische constante dan hun omgeving.

A.12 Hellingmeetbuis

De hellingmeetbuis of inclinometer kan vervorming in de horizontale richting te meten. Deze kunnen worden toegepast bij grondverschuivingen, in stabiele hellingen, dammen, oevers, ophogingen en het meten van afwijkingen in kunstwerken. Trillingen en bewegingen kunnen op deze manier worden gevolgd. Bij piping zullen tot het laatste stadium weinig trillingen of horizontale vervormingen optreden.

A.13 Hellingmeter

De hellingmeter wordt toegepast bij zetting van de grond en ook bij het monitoren van de vervorming in waterkeringen tijdens uitvoeren van werkzaamheden. Vervormingen treden bij piping alleen in het laatste stadium op, waarbij de dijk bezwijkt.

A.14 HR Satellietbeelden

Hoge resolutie satellietbeelden kunnen beelden maken tot een resolutie van 50 centimeter. Doordat de beelden worden genomen vanaf een hoog standpunt is de geometrische kwaliteit goed. Omdat een satelliet continu meet, maar slechts af en toe langskomt (en hierdoor de hoogwater-piek periode mist) óf op zo'n grote afstand staat dat de resolutie beperkter is zijn er wel belangrijke beperkingen. Een voordeel is dat er geen mobilisatie nodig is. Opgemerkt wordt dat zandmeevoerende wellen vaak kleiner zijn dan 50 cm en daardoor niet altijd opgemerkt zullen worden.

A.15 Infraroodcamera

Een infraroodcamera kan een visuele weergave van de heersende temperaturen geven. Doordat het water van onder de dijk vaak een andere temperatuur heeft dan het binnen- en buitenwater, kunnen op deze manier preferente kwelstromen worden gedetecteerd.

A.16 Laseraltimetrie

Laseraltimetrie kan vervormingen in een waterkering op afstand meten. De doorlooptijd van een scan is laag, waardoor acuut kan worden opgetreden in het geval van optredende vervormingen. De intensiteit van de teruggekaatste laserstraal kan aanvullende informatie leveren over het type grond. De verplaatsingen kunnen met een nauwkeurigheid van circa 1 centimeter worden gemonitord. Hierbij wordt opgemerkt dat de aanwezigheid van gras of gewassen de interpretatie van de verplaatsingen moeilijk maakt. Voorafgaand aan opbarsten kan het maaiveld omhoog komen: de verandering in hoogte is daarom een mogelijke indicator voor het optreden van opbarsten.

A.17 Pompproef

Met een pompproef kunnen de geohydrologische parameters van de bodem worden bepaald, waarbij water wordt onttrokken aan een watervoerend pakket en in de omgeving van de onttrekking stijghoogten in de tijd worden gemeten.

A.18 Radar

Radar, vaak aangeduid als Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) kan vervormingen vastleggen. Het grote voordeel van deze meettechniek is dat er grote oppervlakten kunnen worden bekeken binnen een dusdanig tijdframe dat het mogelijk is om snel veranderingen in de waterkering te observeren. Bij piping zijn echter niet veel vervormingen te verwachten tot het laatste stadium van het proces (bezwijken).

A.19 Seismiek

Seismiek biedt de mogelijkheid om de ondergrond continu in kaart te brengen. Dit kan zinvol zijn voor het opsporen van oude geulen, gevuld met zand. Deze geulen kunnen gevoelig zijn voor piping.

A.20 SP

Spontane potentiaal (self-potential) kan gemeten worden aan de oppervlakte om waterstromingen in kaart te brengen. Wanneer een pipe ontstaat concentreert de stroming zich naar de pipe toe. Deze methode is daarom mogelijk geschikt om pipes te detecteren.

A.21 Sonderingen

Sonderingen kunnen een inzicht geven van de verticale variatie in de dichtheid, sterkteparameters en samendrukkingsparameters en daarmee in de scheiding tussen grondlagen. Recentelijk is de HPT-(AMPT)-sondering ontwikkeld, waarmee lokaal de doorlatendheid (en anisotropie) kunnen worden gemeten.

A.22 Temperatuurmeters

Temperatuurmeters zijn kleine sensoren die de temperatuur van grond of grondwater registreren. Variatie in temperatuur kan duiden op verschillen in stroomsnelheid. Aangezien pipes doorlatender zijn dan het omringende zand kunnen deze gedetecteerd worden door de afwijkende temperatuur.

A.23 Tachymeter

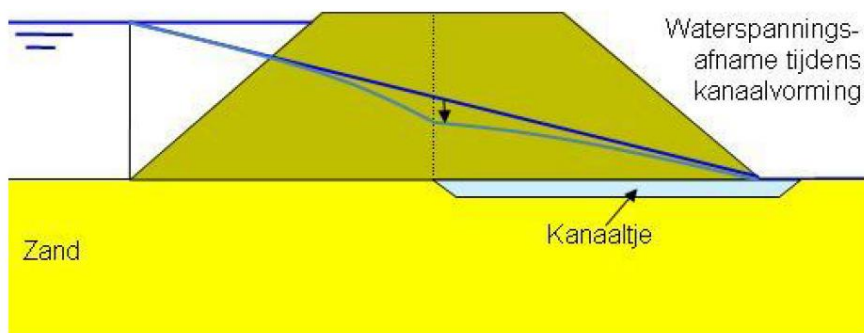
Een tachymeter wordt meestal ingezet om deformaties in het horizontale en verticale vlak te bepalen. Bij piping treden tot het laatste stadium van het proces niet veel vervormingen op.

A.24 Visuele inspectie

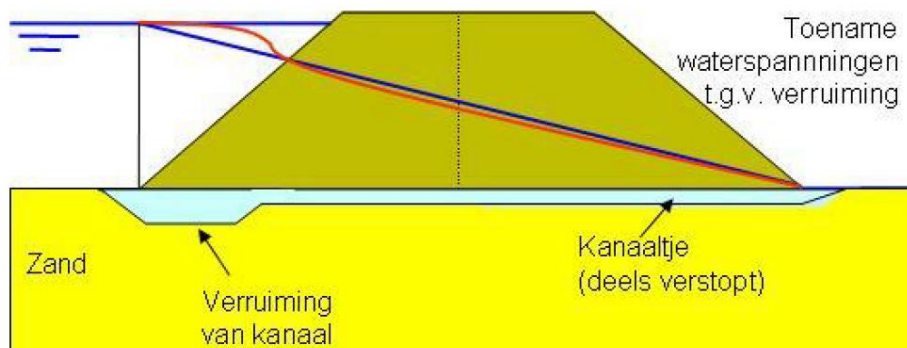
Visuele inspectie is de traditionele methode om afwijkende omstandigheden te detecteren, zoals kwel, zandmeevoerende wellen of scheurvorming. Bij een zandmeevoerende wel wordt doorgaans gelet op de grootte, mate van zandtransport, debiet, troebelheid van het water en zandsort.

A.25 Waterspanningsmeter

Een waterspanningsmeter meet de lokale grondwaterspanning. Wanneer pipes ontstaan, welke veel doorlatender zijn dan het omringende zand, neemt de waterspanning in om de pipe af. Dit effect is geïllustreerd in figuur A.1. Nadat de pipe de bovenstroomse zijde heeft bereikt, begint het ruimproces. De pipe wordt aan de bovenstroomse zijde breder en dieper, wat zich doorzet naar de benedenstroomse zijde. Door de aanwezigheid van de verruimde pipe kan de bovenstroomse waterdruk tot onder de dijk doordringen, wat gedetecteerd kan worden als een verhoging van de waterdruk (figuur A.2).



Figuur A.1 Verandering in waterspanningsverloop ten gevolge van het ontstaan van een pipe



Figuur A.2 Verandering in waterspanningsverloop ten gevolge van het ruimproces

B Ervaringen met monitoring in FloodControl en IJkdijk projecten

In de eerste en tweede IJkdijk ontwikkelprogramma's is door het uitvoeren van de verschillende activiteiten, waaronder de LiveDijken en IJkdijk veldproeven, veel kennis ontwikkeld. Dit betreft kennis over faalmechanismen van waterkeringen en de (door)ontwikkeling van innovatieve toepassingen en technieken voor de beheerderspraktijk. In onderstaande tekst is per project weergegeven hoe omgegaan is met monitoring ten behoeve van piping.

De beschouwde projecten zijn de IJkdijk Pipingproeven (2009), de all-in-one sensorvalidatietest (2012) en de LiveDijkprojecten Ameland, Grebbedijk, Utrecht, XL en Willemspolder.

B.1 Piping IJkdijk experimenten 2009

In 2009 zijn 4 grote-schaalproeven uitgevoerd om het faalmechanisme piping te onderzoeken en na te gaan of het gebruik van meet- en sensortechnieken een aanvulling kan vormen op de reguliere visuele inspectie voor het tijdig detecteren van het optreden van het mechanisme piping bij waterkeringen. De resultaten zijn gerapporteerd in (Stichting IJkdijk, 2010). Tenzij anders vermeld is onderstaande informatie afkomstig uit dit rapport.

Bij de proeven is als doel gesteld om op een zodanige termijn het mechanisme te detecteren opdat ingrijpen nog mogelijk is. De focus van het onderzoek ligt dus duidelijk bij het aantonen van piping tijdens een hoogwater (calamiteit). Het aanleggen, belasten en laten bezwijken van vier dijken op een zandlaag, aangelegd op de testlocatie in Booneschans, gaf de betrokken partijen de gelegenheid diverse soorten meetapparatuur uit te testen.

In het pipingexperiment zijn verschillende soorten meettechnieken toegepast. Op hoofdlijnen richtten deze meettechnieken zich op de volgende parametergroepen: waterspanning, temperatuur (zowel extern als intern), trilling en beweging, stromingspotentiaal en capaciteit. De referentiemonitoring bestond uit een vrij dicht netwerk van waterspanningsmetingen op de interface van klei en zand. Met deze metingen kon worden vastgesteld hoe ver de pipe gevorderd was.

In onderstaande paragrafen zijn de toegepaste monitoringstechnieken en de bijbehorende resultaten nader toegelicht. Er is vooral gefocust op de haalbaarheid van het detecteren van het pipingproces, hoewel eigenschappen als nauwkeurigheid, robuustheid, aanlooptijd, informatieverwerkingstijd en interpretatie uiteraard ook een rol spelen.

B.1.1 Visuele inspectie

De visuele inspectie bij de IJkdijk proeven bestond uit het één maal per uur waarnemen van de aanwezigheid en grootte van de aanwezige zandmeevoerende wellen, en de mate van zandtransport. De wellen werden weggeschept en de hoeveelheid afgevoerd zand werd geregistreerd. Daarnaast is gelet op eventuele scheuren of verzakkingen van de dijk.

Uit de observaties werd geconcludeerd dat de mate van transport niet toeneemt ten gevolge van het langer worden van de pipe. Ook tijdens het proces van ruimen neemt de mate van zandtransport niet of nauwelijks toe (Van Beek et al., 2011).

Het ontstaan van zandmeevoerende wellen was over het algemeen goed vast te stellen op basis van visuele inspectie. Bij troebel water waren de wellen niet goed zichtbaar. De inspectie geeft geen beeld van de lengte van de pipe of de fase van het proces (terugschrijven of ruimen). Nadat de pipe volledig geruimd is, nemen de waterstroom en het zandtransport sterk toe en kan de dijk bezwijken.

Visuele inspectie is daarom geschikt om vast te stellen of het proces van piping begonnen is. Het geeft echter slechts beperkte informatie over het voortschrijden van het proces.

B.1.2 Waterspanningsmetingen

Tijdens de vier proeven is met verschillende methoden de waterspanning gemeten:

- Als referentiemeting voor het vaststellen van de pipe-groei: verschillende raaien met sensoren op de interface van klei en zand met een onderlinge afstand van 1 m.
- Met GeoBeads: in proef 1 en 4, verschillende raaien op 20 cm diep in het zandpakket en enkele meetpunten op grotere diepte (tot 1 m).

Het terugschrijven van de pipe wordt gekenmerkt door een verlaging in de waterspanning, terwijl het ruimen wordt gekenmerkt door een toename in de waterspanning. Beide fasen zijn goed herkenbaar in het patroon van waterspanningsmetingen. De metingen van de GeoBeads vertoonden sterke overeenkomsten met de referentiemetingen. Ook op een diepte van 1 m waren de fasen van terugschrijven en ruimen goed herkenbaar. Opvallend was het feit dat de afname in stijghoogte, ten gevolge van het ontstaan van pipes, over de gehele breedte van de dijk (ca. 20 m) gemeten werd. Een afstand van enkele meters blijkt dus geen probleem te zijn voor het waarnemen van de verlaging van waterspanningen door pipes. Hierbij wordt wel opgemerkt dat in deze situatie, met een kunstmatig aangebrachte zandlaag (geen natuurlijke afzetting) niet de gebruikelijke anisotropie in doorlatendheid kent – bij natuurlijke afzettingen zal dit voor diepergelegen meetpunten ongunstiger uitpakken.

Het plaatsen van twee raaien vlak achter elkaar biedt de mogelijkheid om het verhang te bepalen. De locatie van de pipe kan daarmee nauwkeuriger worden vastgesteld.

De meetfrequentie van de GeoBeads was 1x per minuut. Dit bleek ruimschoots voldoende om de ontwikkeling van de pipe te kunnen volgen.

Geconcludeerd kan worden dat waterspanning een geschikte parameter is om het pipingproces te volgen. Er is echter een relatief dicht net van metingen benodigd (onderlinge afstand maximaal ca. 10 m), om terugschrijvende pipes te detecteren. Het ruimen van de pipe is duidelijker waar te nemen dan het terugschrijven van de pipes. Hiervoor zou een minder dicht netwerk ook volstaan. De positie van sensoren is bij voorkeur dichtbij de overgang van zand naar klei, mits in het zand, maar ook op enige diepte (maximaal beproefde diepte 1 m) worden de pipes gedetecteerd.

B.1.3 Temperatuur (passief meten)

De aanwezigheid van pipes resulteert in veranderingen in het grondwaterstromingspatroon, wat zorgt voor een herverdeling of vermenging van aanwezige temperatuurgradiënten in het daarvoor vrijwel stilstaande grondwater in het zandpakket. Bij het passief meten van temperatuur wordt gebruik gemaakt van aanwezige temperatuurverschillen tussen oppervlaktewater en grondwater.

In de vier proeven is de temperatuur gemeten:

- Met GeoBeads (Alert Solutions): in proef 1 en 4, verschillende raaen op 20 cm diep in het zandpakket en enkele meetpunten op grotere diepte (tot 1 m).
- Met optische glasfiber kabel en TenCate GeoDetect, in proef 1 t/m 4, verschillende rijen in langsstrekking van de dijk op 0-10 cm in het zandpakket.

Bij de GeoBeads temperatuurmetingen is verandering zichtbaar op alle geïstrumenteerde posities in het zandpakket. Er zijn twee fasen zichtbaar in toename van temperatuur. Het patroon is vergelijkbaar op verschillende locaties in het zandpakket.

Ten Cate Geosynthetics en Inventec B.V. hebben een monitoringssysteem toegepast op basis van optische glasfiber kabel en de TenCate GeoDetect® monitoringstechnologie. Het ontwerp, de handmatige installatie van het systeem (sensoren en instrumentatie) en de data analyse werden uitgevoerd in partnerschap met de Franse bedrijven EDF en GeophyConsult.

Voor de 4 pipingexperimenten werden de optische fibers op 6 locaties in de lengterichting van de dijk geïnstalleerd, op verschillende afstanden van de binnentoe van de dijk. Tijdens experimenten werden met de fibers zowel temperatuur als rek gemeten, met uitzondering van experiment 1 waarbij alleen temperatuur werd gemeten. In experiment 1, 2 en 3 zijn de kabels zonder geotextiel toegepast. In de eerste proef lagen de kabels 10 cm onder het zand/klei scheidingsvlak, in de andere proeven ter plaatse van het scheidingsvlak. Voor experiment 4 werden stroken TenCate GeoDetect® met geïntegreerde optische fiberkabels op 6 locaties in de dijkdoorsnede aangebracht om zowel temperatuur als rek te meten. De uitlezing van de rek was beperkt tot de eerste 3 locaties. De TenCate GeoDetect® strips zijn 10 cm onder het grensvlak aangebracht. In alle experimenten kon het (begin van het) ruimproces zeer duidelijk worden vastgesteld. Met meer gedetailleerde analyses was het ook mogelijk om het terugschrijdende proces vast te stellen. Hoe dichter de meting bij de pipe ligt, hoe duidelijker het signaal is.

Uit deze proeven is geconcludeerd dat temperatuursensoren zeer geschikt zijn voor het vaststellen van het optreden van het begin van het ruimproces.

Voor het vaststellen van het terugschrijdende proces kan het passief meten van temperatuur ook gebruikt worden. Dit vergt intensievere analyse van de data, waardoor een goede voorbereiding vereist is om dit tijdens een calamiteit in te zetten. Een groot voordeel van de glasvezelkabel is het continue laterale meetsignaal en de nauwkeurige indicatie van de mogelijk problematische locaties zodra er afwijkingen van het normale patroon optreden.

B.1.4 Temperatuur (heat-pulse)

Het passief meten van temperatuur heeft als nadeel dat er in bepaalde perioden in het jaar (lente, herfst) weinig verschil is in bodem en buitenwatertemperatuur, hoewel afwijkingen in het gebruikelijke grondwaterstromingspatroon duidelijker naar voren zullen komen naarmate deze groter zijn, ondanks de beperkte temperatuursverschillen. De heat-pulse methode maakt gebruik van een glasvezelkabel die verwarmd kan worden met behulp van een koperkabel binnen dezelfde omhulling. De temperatuurverhoging in de nabije omgeving van de kabel is afhankelijk van de warmtecapaciteit en warmtegeleiding van het omgevingsmateriaal. Een lokale toename in stroomsnelheid resulteert in minder warmtetransport plaats door het effectievere advectione warmtetransport. Hierdoor ontstaan er duidelijk zichtbare afwijkingen in deze gebieden gedurende opwarming.

Over het algemeen kan gesteld worden dat de actieve temperatuurmetingen eenvoudiger te interpreteren zijn en meer duidelijke resultaten geven dan de passieve metingen.

B.1.5 Trillingen DikeSurvey

DikeSurvey is een bedrijf dat zich richt op het detecteren van bewegingen en trillingen in bodem en grondlichamen. In proef 1 en proef 4 zijn 10 detectiekabels geplaatst op verschillende locaties onder de dijk, zowel in de klei en in het zand, alle nabij het grensvlak klei en zand (<0.50 m). In (Stichting IJkdijk, 2010 is geen vergelijking gemaakt met de referentiedata. Een aantal van de conclusies is in onderstaande tekst geciteerd.

- De semi-ruwe data is bewerkt tot betrouwbare en reproduceerbare data. In het vervolg van deze rapportage wordt uitgegaan van deze bewerkte data.
- Alle 10 de kabels (m.u.v. kabel 14 in de klei) vertonen een overeenkomstig patroon
- Er zijn aanwijzingen dat de ontwikkeling van pipes zich manifesteert in het frequentiebereik tussen 4 en 7 Hz
- In het zand zijn tussen de detectiekabels bewegingen geregistreerd met een voortplantingssnelheid van ca. 4 - 10 mm/s
- Binnen een marge van 0 – 500 mm ten opzichte van het scheidingsvlak zand/klei zijn geen grote verschillen in het bewegingspatroon van de verschillende sensoren waargenomen. Geconcludeerd kan worden dat de afstand van de detectiekabels ten opzichte van het scheidingsvlak zand/klei minder gevoelig is dan aanvankelijk werd verondersteld.
- Sensoren aangebracht in de klei leveren vrijwel net zo waardevolle informatie als de sensoren in het zand.
- Gedurende het verloop van de beide experimenten is gebleken dat de stabiliteit van de proefdijken geleidelijk afnam.

Het optreden van terugschrijden en ruimen van de pipes is niet (eenduidig) af te leiden uit de metingen. Omdat alle 10 de kabels hetzelfde patroon geven, lijkt het niet eenvoudig om met deze techniek meer zekerheid te verkrijgen over de locatie van de pipes en de fase waarin het proces zich bevindt.

B.1.6 Self Potential

De Self Potential (SP)-methode is een passieve geo-elektrische methode die het van nature aanwezige elektrisch veld in de grond meet, dus zonder gebruik te maken van een actieve stroombron. Grondwaterstroming zorgt ook voor de aanwezigheid van een elektrisch veld. Aangezien pipes voor een verandering in het grondwaterstromingspatroon zorgen, kan de aanwezigheid van pipes wellicht gemeten worden met deze methode.

Fugro heeft de SP-methode toegepast in proef 4, door middel van plaatsing van elektroden aan het oppervlak. Gekozen is voor plaatsing op de dijk en in het zand aan de voet van de dijk: 'Twee rijen van ieder 3 elektroden zijn geplaatst aan de linker- en rechterzijde op de helling van de dijk, een rij van 10 elektroden is in het zand aan de voet van de dijk geplaatst met een tussenafstand van 2 m en een rij van 16 elektroden is 1 m uit de voet van de dijk in het zand geplaatst met een tussenafstand van 1.25 m. De referentie-elektrode is op de dijk geplaatst. De frequentie van metingen was 0.1 Hz. Voorafgaand aan de analyse is de data gefilterd. Het eerste optreden van een relatief grote SP anomalie aan het oppervlak trad 4 uur en 15 minuten op voorafgaand aan het bezwijken van de dijk.'

Het ITC heeft in experiment 2, 3 en 4 absolute potentiaalmetingen uitgevoerd via non-polariseerbare elektrodes op 24-27 locaties op de dijk, in twee parallelle lijnen aan de benedenstroomse zijde van de dijk. Na het filteren van de data blijft in het overgebleven

signaal grotere fluctuatie van het signaal zichtbaar vanaf 8 uur voor de werkelijke dijkdoorbraak. Dit is duidelijk zichtbaar in alle elektroden die binnen 10 meter van de zwakke plek staan.

Het moment dat de pipes de bovenstroomse zijde bereikte was ca. 20 uur voorafgaand aan het bezwijken. De SP signalen pikten het proces pas later op.

Hoewel de SP methode een eenvoudig te installeren methode is, kan deze methode daarom niet toegepast worden als waarschuwing voor het bereiken van de halve of de volledige pipelengte.

B.1.7 Infrarood

InTech Dike Security Systems BV heeft een remote sensing-techniek ontwikkeld, welke berust op het op afstand meten van de uitstraling van infrarood van de waterkering. Hiermee kunnen verschillen in temperatuur gemeten worden. Deze techniek is in alle vier de proeven toegepast.

De zandmeevoerende wellen zijn met de meettechniek van InTech bij alle vier de experimenten in een vroeg stadium te herkennen. Zandmeevoerende wellen geven een duidelijk temperatuursverandering aan het dijkoppervlak c.q. het benedenstroomse bassin. Uit de resultaten van de experimenten blijkt dat het kwelwater in eerste instantie werd opgewarmd door warmte in het dijklichaam. Gebleken is dat wanneer de snelheid van water van de zandmeevoerende wellen toeneemt, het water minder warmte van het dijklichaam kan opnemen en de temperatuur van het uitstromende water afneemt.

De techniek biedt daarmee een aanvulling op de visuele inspectie. Het constateren van nieuwe wellen lijkt kansrijk, vooral in geval van een hoogwater dat substantieel hoger is dan de hoogwaters tot op heden: het verdubbelen of wellicht nog verder toenemen van het aantal wellen kan dan niet worden uitgesloten. Met deze techniek is echter niet vast te stellen in welke fase het pipingproces zich bevindt.

B.1.8 Akoestische metingen

Het pipingproces bleek niet te detecteren met de akoestische sensoren in de Luisterbuis en deze techniek is daarom in dit rapport niet nader beschouwd.

B.1.9 Rek

Ten Cate Geosynthetics en Inventec B.V. hebben een monitoringssysteem toegepast op basis van optische glasfiber kabel en de TenCate GeoDetect® monitoringstechnologie. In proef 2, 3 en 4 is hierbij, naast temperatuur, ook rek gemeten. Voor de locaties van de meetraaien wordt verwezen naar §B.1.3. Alleen in proef 4 is GeoDetect toegepast, in de andere proeven zijn alleen kabels aangelegd. Met de losse kabels kon geen relatie worden vastgesteld tussen de locatie van zandmeevoerende wellen en rekmetingen. Wanneer een geotextiel werd toegepast was het ruimproces zichtbaar, hoewel minder duidelijk dan bij de temperatuurmetingen. Rek is daarmee een potentiële indicator voor piping (alarmeringswaarde). De afstand tot het pipingkanaal is mogelijk wel een punt van aandacht, in dit experiment werd het geotextiel op 10 cm diepte in het zandpakket aangelegd, terwijl de deformatie op grotere diepte wellicht niet meetbaar is.

B.1.10 Samenvatting

Voor het detecteren van de aanwezigheid van een pipe zijn visuele inspecties en infraroodmetingen het meest geschikt. Voor het detecteren van het terugschrijdende proces

zijn waterspanningsmetingen en temperatuurmetingen de enige technieken die uitsluitend kunnen bieden. Het ruimproces wordt duidelijk aangegeven door de temperatuurmetingen, de waterspanningsmetingen en de rekmetingen (in geotextiel).

De benodigde dichtheid van het netwerk van metingen bleek lager te zijn dan vooraf gedacht. Afwijkingen in de metingen bleken doorgaans over de hele breedte van de dijk zichtbaar, met wisselende intensiteit afhankelijk van de locatie. Dit geeft aan dat een onderlinge afstand van enkele meters een dekkend beeld zou moeten geven. De maximaal beproefde diepte was 1 m; dit bleek niet nadelig voor de metingen. De verandering in rek werd wel minder zichtbaar naarmate het geotextiel dieper gelegen was.

B.2 All-in-one sensor validatie test 2012

De all-in-one sensor validatie testen zijn in 2012 uitgevoerd op de IJkdijklocatie te Booneschans, nabij Bad Nieuweschan. In dit project zijn drie proefdijken beproefd die op meerdere faalmechanismen konden bezwijken. De deelnemende bedrijven konden voorspellingen doen over de ontwikkelingen van de sterkte van de proefdijken en het moment van falen. De beschouwde faalmechanismen waren piping, macro-instabiliteit, micro-instabiliteit en erosie ten gevolge van overlopen. De resultaten van deze proeven zijn gerapporteerd in De Vries et al. (2013). Tenzij anders vermeld is de informatie in deze paragraaf afkomstig uit dit rapport.

In twee van de drie dijken was het faalmechanisme piping mogelijk: de Oost- en de Westdijk, uitgevoerd in dezelfde faciliteit als de pipingexperimenten van 2009. Deze dijken bestonden uit een klei-/veen-/zanddijk op een zandondergrond. Volgens het ontwerp was bezwijken mogelijk ten gevolge van piping, micro-instabiliteit van de zandkern en/of erosie ten gevolge van overlopen. Om andere bezwijkvormen dan piping beter mogelijk te maken is in beide proefdijken een pipingpreventiemaatregel toegepast. In de Oostdijk was dat een filter van grof zand (korreldiameter 1 mm tot 2 mm) en in de Westdijk een regelbare drainagebuis (DMC-systeem). In beide proefdijken is de maatregel geplaatst op een kwart van de kwelweglengte vanaf de benedenstroomse teen. In de Westdijk is bovendien een DMC-systeem geplaatst in de zandkern, direct achter de kleikade, om ook het faalmechanisme micro-instabiliteit van de zandkern te kunnen beïnvloeden. In beide proeven zijn zandmeevoerende wellen ontstaan en is de dijk bezweken door micro-instabiliteit.

De doelstelling van de testen was het verkrijgen van inzicht in de functionaliteit en prestaties van “full service” dijkmonitoringssysteem. Hierbij wordt expliciet ingegaan op het realtime voorspellen van de dijksterkte ten aanzien van meerdere faalmechanismen.

Uit de proeven bleek dat de integratie van meerdere meettechnieken, een data-verwerkingssysteem en visualisatiesystemen tot de beste voorspelling van de dijksterkte leidde. Na het experiment zijn aan de hand van het opgestelde beoordelingskader door een onafhankelijke beoordelingscommissie, bestaande uit personen met verschillende expertises binnen het vakgebied, waarderings toegekend aan de specificaties van de meettechnieken en de visualisatiesystemen.

Er hebben elf meetpartijen en vier visualisatiepartijen deelgenomen aan het experiment. De tien meetpartijen waarvan technieken zijn toegepast voor de Oost- en Westdijk zijn:

- TenCate samen met Inventec;
- StabiAlert;
- Koenders;
- ITC;

- InTech;
- Empec;
- Volker Wessels Telecom samen met Landustrie;
- Alert Solutions.

In onderstaande tekst is het functioneren van de verschillende methoden nader toegelicht, onderverdeeld in de te meten parameters.

B.2.1 Visuele inspectie

Gedurende de hele proef is tenminste éénmaal per uur een visuele inspectie uitgevoerd. Daarbij is voor wat betreft piping gelet op de aanwezigheid van wellen (al dan niet zandmeevoerend), eventuele 'wolken' van fijn materiaal in suspensie in het benedenstroomse bassin en mogelijke effecten op de dijk zoals scheurvorming en verzakkingen. Daarnaast is de hoeveelheid uitgestroomd zand gemeten. Dit laatste is met enige vertraging gebeurd bij uitsluitend de wellen waar al zoveel zand was uitgestroomd dat in het ondiepe bassin effectief opkisten dreigde op te treden ter plaatse van de zandkraters.

Tegen het einde van de proef werden gedetailleerde inspecties van dichtbij te risicovol en zijn ook de metingen van het zandtransport gestaakt.

B.2.2 Waterspanningsmetingen

De referentiemetingen bestonden uit 4 raaien van 19 waterspanningsmeters op het grensvlak van klei en zand, waarvan twee benedenstrooms van de maatregel, één vrij direct bovenstrooms ervan en één aan de bovenstroomse zijde van het bassin.

Bij de Oostdijk was de aanwezigheid van piping terug te vinden in de metingen van meerdere waterspanningsmeters in zowel de eerste als de tweede meetraai vanaf de benedenstroomse rand; deze meetraaien bevonden zich benedenstrooms van de in deze proefdijk toegepaste preventieve maatregel tegen piping: een grof-zand-koffer (een volume van grof zand met de juiste filtereigenschappen ter onderbreking van de erosie in de kwelweg). Bovenstrooms hiervan kon in de waterspanningsmetingen geen teken van kanaalvorming worden onderscheiden.

In de Westdijk is het DMC-systeem toegepast. Op één punt in de buis worden de waterspanning en de temperatuur gemeten. Omdat het een open buis is, is een puntmeting in principe voldoende. Het doel van het systeem is als maatregel ingezet te worden voor het voorkomen van faalmechanismen zoals piping, microinstabiliteit en macrostabiliteit, waarbij monitoring een onderdeel is. Het hoofddoel van de DMC-buis is dus niet het monitoren van de dijk maar conditioneren. Daar is de meting voldoende voor. Wanneer de maatregel wordt ingezet, dient er wel aanvullende monitoring plaats te vinden in de dijk.

Alert Solutions BV ontwikkelde en leverde sensornetwerken voor continue monitoring van infrastructurele werken. In dit project, zijn net als in de IJkdijkproeven van 2009, GeoBeads® toegepast, die temperatuur en waterspanning meten. In de Oostdijk is gekozen voor een configuratie met in elk van de twee rijen één sensor per 3 meter langsstrekking, benedenstrooms van de pipingmaatregel. In de Westdijk is in elke rij één sensor per 6 m toegepast. De meetfrequentie van 1 x per 1 tot 1,5 minuut werd als voldoende ervaren. De druksensoren hebben een nauwkeurigheid van 0.02 % over het volledige meetbereik. Voor het faalmechanisme piping moeten een fors aantal puntmetingen worden uitgevoerd om het

proces te kunnen volgen. Wanneer een combinatie van faalmechanismen wordt verwacht, wordt de inzet van dergelijke puntmetingen nog groter.

B.2.3 Temperatuur (passief)

TenCate Geosynthetics en Inventec BV hebben gezamenlijk deelgenomen aan het experiment met de toepassing van TenCate GeoDetect®. De partijen hebben samengewerkt met EDF en GeophyConsult op het gebied van gegevensacquisitie en analyse. Voor het detecteren van piping werden vijf stroken op de scheiding tussen zand en kleilaag aangelegd in zowel de Oost- als de Westdijk. De temperatuur kan gemeten worden met een nauwkeurigheid van 0,1 graad Celsius. Iedere strekkende meter wordt een meting uitgelezen. In deze proeven is gekozen voor een meetfrequentie van 1x per uur. Dit is aan de lage kant.

Koenders Instruments maakt gebruik van de SDT (Smart Dike Tube). Deze probe heeft verschillende geïntegreerde sensoren. De behuizing zorgt ervoor dat de SDT zowel horizontaal als verticaal in een dijkvak ingebracht kan worden. In de Oost- en Westdijk is gebruik gemaakt van verticaal geplaatste SDT's. Voor deze proeven is de SDT uitgerust met de volgende sensoren:

- Temperatuur via glasvezel;
- Rek via glasvezel.

Voor nadere informatie over deze methode wordt verwezen naar De Vries et al. (2013). De uitkomsten waren op zichzelf veelbelovend, maar de uitwerking was beperkt en er lijkt vooralsnog geen vervolg aan deze meetmethode te zijn gegeven.

De GeoBeads van Alert Solutions meten ook temperatuur. De temperatuursensoren hebben een nauwkeurigheid van 0,5 graad over het volledige meetbereik. Dit is voldoende bevonden. Er worden in De Vries et al. (2013) geen uitspraken gedaan over het voorspellend vermogen van de sensor voor piping.

In de Westdijk is het DMC-systeem toegepast. Voor toelichting op de metingen zie §B.2.2.

B.2.4 Deformatie

MetaSensing levert diensten met remote sensing apparatuur. In dit experiment werd gemeten met de Fast Ground Based Synthetic Aperture Radar (FastGBSAR). De radar is opgesteld aan de binnenzijde van de Westelijke proefdijk. De opstelling bestond uit twee betonnen blokken met daarop een rail waarover het instrument horizontaal kon wegen. Een voorspellende waarde is niet binnen dit project aangetoond. Tevens is de inschatting, gezien de resultaten en analyse achteraf, dat deze er niet is voor de betreffende techniek. Om deze reden is deze techniek niet nader beschouwd in deze rapportage.

B.2.5 Electrical resistivity

ITC heeft in het experiment elektrische weerstandsmetingen uitgevoerd op de Oostdijk om te testen of deze methode geschikt is om kleine veranderingen in vochtgehalte in een dijk als gevolg van lekkage tijdig waar te nemen. In de Westdijk is niet gemeten, in de Oostdijk wel. Weerstandsmetingen geven een indicatie van de variatie in de elektrische weerstand in de ondergrond, die afhankelijk is van materiaaleigenschappen als porositeit en vochtgehalte. De voornaamste veranderingen in de tijd worden veroorzaakt door een veranderend vochtgehalte. Aangezien de bulkeigenschappen van de ondergrond gelijk blijven, kan door meerdere metingen te doen in de tijd deze variatie in vochtgehalte gemeten worden. In de proef zijn twee rijen van 14 elektroden geïnstalleerd. De keuze voor 14 elektroden op twee rijen is gebaseerd op de breedte van de proefdijk en de benodigde tijd voor één meting. Bij het gebruik van meer elektroden duurt het langer voor één meting is gedaan. Bij deze 14

elektroden duurde één meting 37 minuten, waardoor ieder uur een nieuwe meting gedaan kon worden,

Door de elektroden in twee parallelle rijen neer te zetten kan een 3D beeld van de dijk verkregen worden. De afstand tussen de elektroden bedroeg 1,5 m, de afstand tussen de twee rijen 1 m, gemeten over de schuine zijde van de dijk. 14 Elektroden met onderlinge afstand van 1,5 m bereiken theoretisch een maximale diepte van 4,14 m.

Met de metingen kan het proefverloop worden gevolgd (door een analyse achteraf). Binnen dit project is niet aangetoond dat er ook een voorspellende waarde kan worden gegeven. De methode is daarom nog niet rijp om in een monitoringshandleiding voor de detectie van piping te worden opgenomen.

B.2.6 Infrarood

InTech maakt gebruik van een infraroodcamera. Deze techniek berust op het op afstand meten van de uitstraling van infrarood van de waterkering met hoge resolutie. Daarmee kunnen temperatuurverschillen worden gedetecteerd. Tijdens de proeven werden inderdaad temperatuurverschillen waargenomen ten gevolge van wellen. Echter, details van de faalmechanismen kunnen niet helemaal worden gezien. Zo kunnen wel wellen in beeld worden gebracht, maar kon niet het onderscheid worden gemaakt tussen watervoerend of zandmeevoerend, al is het systeem op dit punt inmiddels wel verder doorontwikkeld. De vraag is in hoeverre dit systeem cruciale signalen opmerkt die niet met visuele inspecties ook zouden worden gezien. Het is echter mogelijk dat bij een hoogwater dat significant hoger is dan de tot op heden waargenomen waterstanden zoveel wellen ontstaan dat visuele inspectie ontoereikend is. In dat geval kan deze techniek aanvullend informatie verstrekken.

B.2.7 Grondradar

Empec Survey ontwikkelt een integraal systeem waarbij grondradars, video, warmte camera's, weerstandsmeting en laserscan kunnen worden gebruikt als een relatief snelle manier om een dijk in te meten en waterstromen binnen een dijk te kunnen waarnemen. Het systeem is mobiel en kan met relatief grote snelheid (tussen de 60 en 80 km/uur) over een dijk worden verplaatst. De grondradar werd over de proefdijk gereden. Het systeem bestond uit een op afstand bediend voertuigje met een aanhangertje waarop het radar was gemonteerd.

De aanlooptijd (de opbouw en kalibratie van het gebruikte systeem) bedroeg ongeveer 20 tot 30 minuten. De reikwijdte is wel erg afhankelijk van de grondopbouw. Voor de testlocatie was de reikwijdte voldoende. De techniek is ingezet op de kruin van de proefdijk waarbij is gemeten tot en met 23 augustus 2012. Op dit tijdstip waren over beide bakken 12 wellen zichtbaar. Dit waren nog watervoerende wellen die nog geen zand meenamen. Van deze 12 wellen waren 7 stofwolkjes van zand zichtbaar en 5 wellen met alleen opwellend water. In geen van de wellen was op dat moment al zandtransport waargenomen en er waren dus nog geen pipes. Bij de interpretatie was het lastig te achterhalen wanneer bepaalde beelden of trends wel als wellen worden gemarkeerd, en wanneer niet. De methode heeft in dit project geen voorspellende waarde gehad, maar aangezien er nog geen pipes waren op het moment van meten was dit ook niet te verwachten. De potentie van deze methode is daarmee nog niet volledig onderzocht.

B.2.8 Rek

Het GeoDetect, geïnstalleerd door TenCate Geosynthetics en Inventec BV (zie §B.2.3) is ook geschikt voor het meten van rek. Minimale rekken van 0.01 % kunnen worden gemeten. Op iedere 40 cm wordt een rekmeting verkregen.

Vanwege de geringe omvang van de pipes in de terugschrijdende fase en de daarbij optredende gewelfwerking worden pipes lang niet altijd zichtbaar met dit systeem. Pas als de pipes in de ruimfase een grotere omvang krijgen, worden deze beter zichtbaar, maar dit is bij de uitgevoerde proeven niet opgetreden.

B.2.9 Samenvatting

De all-in-one sensorvalidatietest heeft als belangrijk verschil met de proeven in 2009 dat de dijk uiteindelijk niet door piping is bezweken. De pipe-vorming heeft zich niet verder uitgestrekt dan de pipingmaatregel. Hierdoor is het niet mogelijk om een volledig oordeel te geven over de potentie van de technieken m.b.t. piping. De temperatuur- en waterspanningsmetingen komen ook hier als meest kansrijk naar voren voor het detecteren van piping. De grondradarmetingen zijn alleen uitgevoerd voordat er pipes zijn ontstaan: het is daarom moeilijk te zeggen of pipes gedetecteerd zouden kunnen worden.

Het eindrapport levert daarnaast een goede samenvatting voor andere parameters dan de haalbaarheid voor pipingdetectie: nauwkeurigheid, reikwijdte, metingdichtheid, meetfrequentie, mate van redundantie, robuustheid, aanlooptijd, informatieverwerkingstijd en interpretatie.

B.3 Livedijk Ameland

De Waddenzeedijk van Ameland is in de tweede toetsronde (2001-2006) deels afgekeurd, onder andere op het faalmechanisme piping. Om te bepalen of over een lengte van 300 m (traject km 6.8-7.1) de voorziene maatregel (een damwand) kunnen worden heroverwogen door nader onderzoek uit te voeren, is Livedijk Ameland opgezet in combinatie met het versterkingsproject Waddenzeedijk Ameland van advies- en ingenieursbureau Witteveen en Bos. De doelstelling was het meenemen van het effect van de niet-stationaire belasting op het grondwaterstromingspatroon, waardoor een beter dijkversterkingontwerp kan worden gemaakt. Het monitoringsplan is beschreven in Luijendijk (2013) en de resultaten zijn beschreven in Luijendijk (2016). Onderstaande informatie is afkomstig uit deze rapporten.

Er zijn hiervoor verschillende monitoringstrajecten opgezet:

- Km 7.0: hoofdlocatie, geïnstrumenteerd met waterspanningsmeters.
- Km 2.4: referentielocatie, bedoeld om meer informatie te leveren voor het traject bij km 7.0: temperatuur- en infraroodmetingen.

De doelstellingen van Livedijk Ameland zijn als volgt:

- 1 Monitoren van de dijk op km 2,4, met als doel vroegtijdig te kunnen waarschuwen wanneer pipingrisico optreedt (totdat de dijk verbeterd is).
- 2 Monitoring op traject km 6,8-7,1 ondersteunen, zodat het effect van het voorliggende wad op de intreeweerstand duidelijk wordt.
- 3 Het leveren van aanvullende lokale ondergrondinformatie door inzet van infrarood camera/temperatuurmetingen aan oppervlak (detecteren uittredend grondwater) en temperatuurmetingen op geringe diepte (detecteren veranderingen in grondwaterstroming). Dit ten behoeve van het optimaliseren van de eventuele versterkingsmaatregelen.

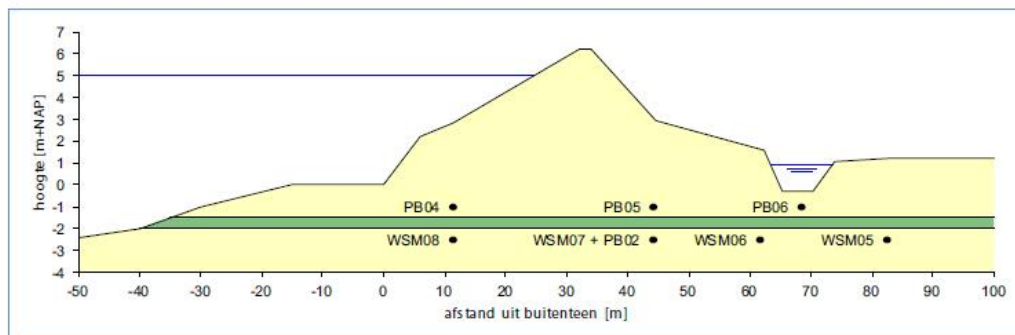
De monitoringsperiode duurde van september 2013 tot augustus 2015, inclusief drie hoogwatersituaties.

B.3.1 Waterspanningsmetingen en temperatuurmetingen

Omdat zich bij traject km 6,8- 7,1 een geul bevindt voor de kust, en de remmende invloed van de geul op de waterspanningsmetingen niet duidelijk is en het niet mogelijk was om de geul nader te inspecteren, zijn er ook waterspanningen gemeten ter plaatse km 2,4. Deze moeten de invloed van de geul op de waterspanningen duidelijk maken en zo de meetresultaten op km 6,8-7,1 ondersteunen dan wel verwerpen.

Voor km 2.4 is gekozen voor twee meetraaien met vijf sensoren: één in de insteek van de binnendijkse sloot aan de kant van de dijk, één ter plaatse van de binnenteen, één ter plaatse van de kruin, één ter plaatse van het buitentalud en één zo dichtbij als mogelijk bij de buitendijkse geul, zo ver mogelijk het voorland in. De onderlinge afstand tussen raai 1 en 2 is 5 m. Later zijn nog twee aanvullende raaien aangebracht in verband met onduidelijkheden over de diepteligging van de aanvankelijk aangebrachte sensoren. Alle sensoren zijn ongeveer 30 cm onder de kleilaag aangebracht.

Bij km 7.0 zijn drie raaien uitgezet met in totaal twaalf waterspanningsmeters (WSM01 t/m WSM12) en drie peilbuizen. De instrumenten zijn aangebracht in het watervoerende pakket. In de zomer van 2014 zijn in de middelste raai over een periode van vier weken drie extra peilbuizen geplaatst boven de slecht doorlatende laag om beter inzicht te krijgen in de geohydrologische interactie tussen de freatische lijn en de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket, zie Figuur 5.1. De onderlinge afstand tussen de raaien is ca. 50 m.



Figuur 5.1 Geschematiseerde dwarsdoorsnede met de locatie van de meetinstrumenten (raai 2) (Sluis et al., 2016)

Alle waterspanningsopnemers zijn gecombineerd met temperatuursensoren.

Uitgaande van het aangepaste stijghoogteverloop dat volgde uit de waterspanningsmetingen bij km 7,0, konden nieuwe pipingberekeningen worden gemaakt. De weerstand in het voorland was dusdanig groot dat met het in rekening brengen van deze weerstand tot goedkeuring gekomen kon worden.

De waterspanningsmetingen geven de invloed van de geul bij km 7,0, en het ontbreken ervan bij km 2,4, duidelijk aan. De metingen op km 2,4 zijn meer gedempt en gemiddeld hoger dan op km 7,0. Dit betekent dat de metingen op km 7,0 een verminderde weerstand, vermoedelijk veroorzaakt door de geul, weergeven.

Vanuit het onderzoek bij km 7,0 is al geconstateerd dat de situatie daar dankzij de inzichten uit de aanvullende monitoring voldoet voor wat betreft piping. De dijk bij km 2,4, die al voldeed aan de eisen, heeft zodoende nog wat meer reserve voor dit faalmechanisme.

De temperatuurmetingen geven aan dat de temperatuur circa een kwart seizoen achterloopt ten opzichte van het buitenwater temperatuur. Dit betekent dat de temperatuurveranderingen onder de dijk, in de ondergrond, zich langzaam aanpassen en er kennelijk geen preferente grondwaterstromingsbanen zijn, laat staan pipingkanaaltjes, ter plaatse van de meetraaien.

B.3.2 Infrarood

Een infraroodcamera is gebruikt om de temperatuurveranderingen te meten in de sloot en aan de teen van de dijk. Met behulp van deze metingen kan het risico op piping worden verkleind door bijvoorbeeld tijdig maatregelen te nemen. In deze studie is de infraroodcamera toegepast bij stormsituaties waarbij hoogwater optreedt, om te kijken of er sprake is van uittredend grondwater.

De temperatuurmetingen aan het oppervlak geven aan dat er geen uittredend kwelwater was gedurende drie perioden, waaronder gedurende twee stormen waarbij de buitenwaterstand hoger was dan NAP +3,0 m. De methode is geschikt bevonden als monitoringsmaatregel, indien de dataverwerking vrijwel meteen wordt uitgevoerd, om tijdig maatregelen te kunnen nemen indien uittredend kwelwater wordt gedetecteerd.

B.3.3 Samenvatting

De ingezette monitoringstechnieken bij km 7.0 en km 2.4 hebben er toe geleid dat bij het dijktraject 6.8-7.1 het toetsoordeel in positieve zin kon worden aangepast. De waterspanningsmetingen toonden aan dat er aanzienlijke weerstand in het voorland aanwezig was, waardoor de pipingberekeningen uitgevoerd konden worden met een aangepast stijghoogteverloop.

De infraroodmetingen hebben aangetoond dat er geen voorkeurskanalen aanwezig waren en zouden ingezet kunnen worden bij toekomstige monitoring. Tijdige dataverwerking is hierbij een punt van aandacht. Het meten van temperatuur in de ondergrond kan meer inzicht geven in de stroming in de ondergrond. Er zijn geen preferente stroombanen vastgesteld. De methode wordt door de aanwezige temperatuurverschillen tussen buitenwater en dijk als potentiële methode genoemd voor pipingdetectie.

B.4 Livedijk Grebbedijk

Deltares heeft in opdracht van Waterschap Vallei en Eem voor twee locaties langs de Grebbedijk, bij De Blauwe Kamer en bij Bowlespark, meetconfiguraties voor het monitoren van waterspanningen opgezet. De beoogde monitoring was gericht op de mechanismen piping en binnenwaartse macrostabiliteit. De Grebbedijk is een dijk langs de Nederrijn. Het betreft een primaire kering binnen het beheergebied van het Waterschap Vallei en Eem. Tijdens hoogwater in 2011 en 2012 zijn welletjes waargenomen bij de locatie De Blauwe Kamer. Op deze locatie is bij de binnenteen een extra kleilaag is aangebracht. Tijdens de derde toetsronde is de locatie goedgekeurd voor het faalmechanisme piping. Om vast te stellen wat de oorzaak is voor de zandmeevoerende wellen is een monitoringssysteem ingericht. Door te monitoren wilde men achterhalen hoe de waterhuishouding zich onder wisselende rivierstanden gedraagt, waardoor potentiële risico's bij hoogwater beter op waarde te schatten zijn (Wichman, 2013).

B.4.1 Waterspannings- en temperatuurmetingen

Bij de locatie De Blauwe Kamer is gekozen voor een combinatie van peilbuizen en GeoBead sensoren. Er is één raai met 4 GeoBead-ketens geplaatst: buitendijks, onder de kruin, binnendijks voor de kwelsloot en binnendijks achter de kwelsloot. De peilbuizen zijn naast de Geobead-sensoren geplaatst. Er is op verschillende dieptes waterspanning gemeten: vrijwel

direct onder de deklaag (ca. 20 cm) en ca. 2,20 m onder de deklaag (Wichman, 2013) en op verschillende hoogtes in de deklaag.

De keuze voor de locatie van de metingen is gemaakt op basis van de volgende argumenten (Wichman, 2012):

- De dwarsraai is een zwakkere schakel uit het betreffende dijkvak
- De positie van de ketens in de dwarsraai zijn gelijkmatig verdeeld over het te verwachten potentiaalverloop
- De hoogte van de GeoBead sensoren is gekozen met als doel
 - Het potentiaalverloop in de zandlaag te volgen, ook in de diepte (stromingsrichting van het water)
 - Een check uit te voeren op het opbarsten van de binnenteen
 - De ligging van de freatische lijn in de dijk te volgen
 - De waterspanningen nabij de te verwachten glijcirkel te meten
- Mogelijkheid om een check uit te voeren op lokaal grotere stroming op basis van de temperatuursmetingen. Deze stroming zou nabij het potentiële opbarstpunt (bij de binnenteen) kunnen optreden. Hier zijn GeoBeads geplaatst.
- Voor controle van de GeoBead metingen zijn peilbuizen bijgeplaatst.
- De juiste plaatsing van sensoren is ondersteund door aanvullend grondonderzoek.
- Het meetnet is niet bedoeld om pipes te detecteren.

De meetfrequentie is gekozen als 1 maal per uur onder dagelijkse omstandigheden en 1 maal per 5 minuten bij hoogwater om meer plotselinge veranderingen waar te kunnen nemen.

Als alarmwaarde is het volgende criterium aangehouden (Wichman, 2012): Als tijdens het eerstkomende hoogwater de waterspanningen in bijvoorbeeld de watervoerende laag hoger zijn dan volgens de schematisatie bij dit hoogwater zou moeten optreden, dan is de dijk mogelijk minder veilig dan gedacht, en extra aandacht, bijv. in de vorm van gerichte inspecties of grondonderzoek, is dan nodig. Als er significant hogere stijghoogten (orde 1 decimeter) worden gemeten, moeten deze in onderlinge samenhang worden geïnterpreteerd, alvorens tot verdere actie over te gaan. Deze alarmwaarden zijn vastgesteld op basis van 2D grondwaterstromingsberekeningen en zijn afhankelijk van de gekozen afvoergolf.

Alle GeoBead-sensoren blijken gevoelig genoeg te zijn om veranderingen ten gevolge van de waterstand op de rivier, substantiële neerslag en buitentemperatuur waar te nemen. Verder kan indirect uit het soms grillige verloop van de waterspanningen worden afgeleid dat deze opnemers waarschijnlijk droog hebben gestaan. De drukvariaties in dit grillige verloop zijn waarschijnlijk niet reëel (Wichman, 2013). De ervaring in dit project is dat peilbuizen robuuster zijn dan Geobeads en geen last hebben van tijdelijk droogstaan.

Op basis van de gemeten waterspanningen is het grondwaterstromingsmodel gekalibreerd door de doorlatendheid van het zandpakket en de kleilaag aan te passen. Deze doorlatendheid is vervolgens toegepast in nieuwe pipingberekeningen. De berekeningen kwamen door de aangepaste doorlatendheid ongunstiger uit (Wichman, 2014).

B.4.2 Samenvatting

Bij de Grebbedijk, locatie Blauwe kamer is een raai met Geobeads en peilbuizen geplaatst om de actuele sterkte beter in te schatten en mogelijk de zandmeevoerende wellen te verklaren. Op basis van de waterspanningsmetingen is het grondwaterstromingsmodel gekalibreerd, waardoor het pipingrisico nauwkeuriger bepaald kon worden. Er zijn geen conclusies getrokken uit het verloop van de temperatuurmetingen.

B.5 Livedijk Utrecht

Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden (HDSR), de Provincie Utrecht en Rijkswaterstaat Dienst Utrecht (RDU) hebben samen met hun samenwerkingspartners STOWA en Stichting FloodControl IJkdijk in 2011 een consortium opgericht met als doel het in uitvoering brengen van het project LiveDijk Utrecht. Voor het project LiveDijk Utrecht zijn twee locaties bepaald om ervaring met sensortechnologie op te doen. Het betreft de westelijke Voorhavendijk aan de rivier de Lek nabij de Prinses Beatrixsluis, in beheer bij RDU, en de Grechtdijk, een boezemkade nabij Woerden, in beheer bij HDSR (Loots en Van der Kolk, 2015). Piping is een relevant faalmechanisme voor de Voorhavendijk, maar niet voor de Grechtdijk. In onderstaande tekst wordt daarom met name ingegaan op de Voorhavendijk.

Op basis van de voor deze dijken relevante bezwijkmechanismen is voor beide locaties een monitoringssysteem op maat gemaakt. Het ontworpen meetsysteem is daarna geïnstalleerd in beide dijken. Gedurende een periode van 2½ jaar zijn via het monitoringssysteem meetgegevens verzameld die real-time - door middel van een live dashboard – beschikbaar waren voor de keringbeheerders van HDSR en Rijkswaterstaat. De hoofddoelstelling van het onderzoekstraject was te laten zien hoe nieuwe technologieën en kennis te introduceren voor specialisten op het gebied van waterbeheer door middel van een “LiveDijk” pilot. Daarbij werd gestreefd om aan te tonen hoe dit kan leiden tot besparingen van kosten bij het onderhoud van waterkeringen binnen de daarvoor bestaande processen van de stakeholders en beheerders en het verkrijgen van meer inzicht in het gedrag van de dijk met als doel het vergroten van de waterveiligheid (Loots en Van der Kolk, 2015).

In totaal zijn 9 doelstellingen geformuleerd (Loots en Van der Kolk, 2015):

- 1 Inzicht krijgen in welke mechanismen welk effect hebben op dijklichamen. Het gaat daarbij om de mechanismen (macro)stabiliteit, piping en zetting/verzakking.
- 2 Kennis verkrijgen over welke monitoringssystemen met succes toe te passen zijn bij welk bezwijkmechanisme.
- 3 Kennis krijgen over hoe gegevens uit de monitoring geïnterpreteerd moeten/kunnen worden en daaraan beheersprocessen te koppelen. Hieronder valt ook de implementatie in de beheerorganisatie en de kennisborging.
- 4 Op termijn voldoende kennis (+ ervaring), techniek en materiaal in huis te hebben om zelf te monitoren, bij gebleken nut voor het beheer van de waterkering.
- 5 Bewaken van de veiligheid (early detection) van de dijken tot deze zijn verbeterd;
- 6 Leveren van aanvullende informatie over de opbouw van bodem en dijk, ten behoeve van de verbeterwerken;
- 7 Bewaken van de veiligheid tijdens en na de verbeterwerken.
- 8 De werking van een geavanceerd systeem voor dijkmonitoring te demonstreren.
- 9 Een nieuwe aanpak te onderzoeken van uitvoerings- en onderhoudsprocedures van dijken evenals de effecten hiervan op informatievoorziening voor rampenbestrijding.

Tijdens de meetperiode is geen hoogwater opgetreden waarbij de veiligheid ook maar enigszins in gevaar is geweest, waardoor niet aan alle doelstellingen kon worden voldaan.

B.5.1 Uitgevoerde metingen Voorhavendijk

Het monitoringssysteem bestaat op beide locaties uit drie onderdelen: meetinstrumenten, een data-verwerkingssysteem en een visualisatiesysteem. De metingen in de Voorhavendijk zijn uitgevoerd met GeoBeads. Met deze instrumenten worden drie grootheden gemeten: temperatuur, (water)druk en lokale inclinatie (hoekverdraaiing). Er zijn vier meetraaien geïnstumenteed met elk 6 tot 7 instrumenten, geplaatst in de verschillende bodemlagen. In

het Pleistocene zand (eerste watervoerende pakket) zijn 2 instrumenten aangebracht, per raai op gelijke diepte, op een diepte van enkele decimeters tot enkele meters diepte ten opzichte van de deklaag, waarvan één ter hoogte van de buitenkruin en één meer benedenstrooms, ca. ter plaatse van de binnenteen / uittredepunt. Voorafgaand aan de plaatsing is de bodemopbouw in kaart gebracht met behulp van sonderingen.

De metingen zijn technisch geanalyseerd om te beoordelen of de metingen betrouwbaar en correct zijn. Hierbij is gekeken naar de aspecten datacontinuïteit, verloop en betrouwbaarheid. Door defecte sensoren en onderbrekingen in de stroomvoorziening is niet continu gemeten. Er waren lange periodes (tot 50 dagen) waarin niet gemeten is. In de Voorhavendijk zijn 4 van de 27 instrumenten voortijdig uitgevallen. Van de herplaatste instrumenten gaven 2 instrumenten vervolgens onbetrouwbare / foutieve waterspanningsmetingen. Dit pleit ervoor om nooit op één sensor af te gaan maar te kijken naar het bredere beeld van meerdere sensoren. Hierbij wordt opgemerkt dat sensoren die boven de grondwaterstand geplaatst zijn, gevoeliger zijn voor fouten doordat er lucht of gas in het filter komt en dit niet of niet direct verdwijnt als er water bij het filter komt. Hierdoor wordt mogelijk de waterdruk niet goed gemeten (Loots en Van der Kolk, 2015).

De sensoren die in contact staan met het buitenwater reageren conform verwachting op de verhoging van het buitenwater. In de Voorhavendijk is zo bijvoorbeeld de invloed van eb en vloed terug te zien in de grondwaterstand.

De metingen zijn toegepast om de stabiliteitsberekeningen te verbeteren. Er is niet geanalyseerd wat de invloed van de metingen op het pipingrisico is.

B.5.2 Samenvatting

Hoewel de Geobead sensoren geplaatst bij de Voorhavendijk mede tot doel hadden om een beter inzicht te verkrijgen in de dijk m.b.t. het faalmechanisme piping, zijn voor dit faalmechanisme geen nieuwe inzichten verkregen. De nadruk van de analyse lag op het faalmechanisme macrostabiliteit. Het project is wel zinvol geweest om kennis te verkrijgen over het functioneren van sensoren en over hoe gegevens uit monitoring geïnterpreteerd kunnen worden. De gebruikers hebben actief kennis opgedaan met het LiveDijk Utrecht-systeem, wat heeft geleid tot doorontwikkeling van het dashboard.

B.6 Livedijk XL

In Koelewijn & De Vries (2012) is het monitoringsplan voor 'Livedijk XL' Noorderzijlvest beschreven. De navolgende informatie is overgenomen uit dat rapport. Het monitoringsplan is opgesteld naar aanleiding van de derde veiligheidstoetsing van de primaire waterkeringen van waterschap Noorderzijlvest, waaruit bleek dat circa een derde van de dijken niet voldoet aan de gestelde eisen. Aangezien de verbeterwerken enige jaren op zich zullen laten wachten, heeft Waterschap Noorderzijlvest besloten een dijkmonitoringssysteem toe te passen om de dijken in de tussenliggende periode te bewaken om op deze manier de veiligheid te vergroten en daarnaast informatie in te winnen ten behoeve van de verbeterwerken. Livedijk XL concentreert zich op 2 dijken binnen het waterschap Noorderzijlvest, te weten de Ommerlanderzeedijk en de Lauwersmeerdijk. Bij kilometrerings 30 en 86.2 zijn zandmeevoerende wellen waargenomen.

Met de monitoring van afgekeurde dijken heeft het waterschap drie doelen:

1. Bewaken van de veiligheid (early warning) van de afgekeurde dijken tot deze zijn verbeterd.

2. Het leveren van aanvullende informatie over de opbouw van bodem en dijk, ten behoeve van de verbeterwerken.

3. Het monitoren van de dijkvakken tijdens en na de verbeterwerken.

Voor elk doel spelen andere afwegingen, zowel op financieel als technisch-inhoudelijk gebied. Hier is rekening mee gehouden bij het opstellen van het monitoringsplan.

Meetdoel 1: bewaken van de veiligheid

Een monitoringssysteem zorgt voor een beter beeld van de belasting op de kering en de staat van de kering op dat moment. Dit resulteert erin dat een dreigende calamiteit sneller kan worden herkend en dat sneller ingegrepen kan worden. Hierdoor kan schade aan omgeving en de kering worden voorkomen, of in ieder geval worden beperkt.

De monitoringsstrategie voor piping was in deze fase gericht op het detecteren van pipes door het meten van waterspanningen en temperatuur. Voorgesteld werd om voor iedere twee meter dijkstrekking een tweetal waterspanning- of temperatuurmetingen te plaatsen. Uit kostenoverwegingen kan direct al worden gesteld dat temperatuurmetingen, bijvoorbeeld met behulp van glasvezeltechnieken, véél goedkoper zullen zijn dan waterspanningsmetingen. Met een gangbaar type glasvezelkabel kan iedere meter de temperatuur worden bepaald tot op 0,01 graad Celsius nauwkeurig. Voor de buitenwaterstand werd één meting per strekkende kilometer voldoende bevonden. Omdat door toevallige omstandigheden, bijvoorbeeld door inhomogeniteiten in de ondergrond, er enige kans bestaat dat de metingen hier en daar niet correct zijn (bijvoorbeeld wanneer de kabel door een enkele kleilens heengaet), en om enige robuustheid in te bouwen tegen beschadiging door bijvoorbeeld graafwerkzaamheden, werd aanbevolen om per doorsnede niet slechts één, maar twee kabels aan te brengen, op minimaal enige meters afstand van elkaar.

Om de vertaalslag naar een bekende ingenieursparameter als de waterspanning gemakkelijker te maken en het vertrouwen in de metingen – en de juistheid van eventuele opvolgingsacties – te vergroten, werd aanbevolen om naast de temperatuurmetingen met behulp van glasvezelkabels óók waterspanningsmetingen uit te voeren met een ruimtelijke frequentie van eens per 100 meter. Hiermee is het mogelijk om de glasvezelmetingen te koppelen aan de waterspanningen. Vanwege de eerder aangegeven argumenten werd aanbevolen om ook deze controle-instrumenten dubbel aan te brengen, op minimaal enige meters afstand van elkaar, dwars op de dijk.

Daarnaast wordt de mogelijkheid van een DMC buis genoemd, die de mogelijkheid biedt tot monitoren en verbeteren in één. Een groot voordeel van een DMC of HDDW-waterontspanner is dat sprake is van een volledige ononderbroken afvlakking van de potentiële stijghoogten. Bij een verticale waterontspanner zouden lokaal hoge pieken in de stijghoogte kunnen ontstaan.



Figuur 5.2 Instrumentatie per dwarsdoorsnede voor meetdoel 1 bij piping (rode sterren: waterspanningsmeters, kleine cirkels: glasvezelsensoren, grote cirkel: DMC).

Meetdoel 2: aanvullende informatie t.b.v. verbeterwerken

De bij toetsing gedane aannames behoren over het geheel genomen aan de conservatieve kant te zijn, zodat een betere kennis van de werkelijkheid over het algemeen moet leiden tot een gunstiger uitkomst. Deze werkwijze levert enerzijds een 'beloning' voor het uitvoeren van aanvullend onderzoek en metingen, anderzijds biedt het een bescherming tegen de gevolgen van onwetendheid. Hierbij wordt opgemerkt dat de monitoringsstrategie erop gericht wordt om significante onzekerheden te verkleinen. Wanneer de onzekerheden gering zijn voor aspecten waar monitoring tot meer zekerheid kan leiden, dan is die monitoring over het algemeen ook niet zinvol.

De aanvullende informatie voor piping bestond in dit geval tevens uit het meten van waterspanningen (buitenwater en onder de dijk) en temperatuur, om een beter beeld te verkrijgen van de stromingssituatie in de ondergrond, met een lagere ruimtelijke frequentie van 100 m.

Meetdoel 3: monitoren van de dijkvakken tijdens en na de verbeterwerken

Voor piping is de monitoringsstrategie gelijk aan die voor doel 1.

Op basis van deze informatie is gekozen voor monitoren van de volgende strekkingen.

- Strekking km 85,0 - 86,4 - voor piping en asfalt, en ook voor monitoring van de invloed van het Vierhuizergat. Het lijkt niet toevallig dat juist bij km 86,2 de zandmeevoerende wellen zijn geconstateerd.
- Strekking km 29,5 - 30,5 - voor piping en indicatie van variabiliteit t.b.v. macrostabiliteit.

Begin 2016 zijn de tot eind 2015 opgedane ervaringen geëvalueerd (Van der Meer et al., 2016a). Er is gekozen voor een stapsgewijze aanpak, waarbij in eerste instantie is gekozen voor intensieve instrumentatie over een afstand van enkele honderden meters, een locatie met meerdere geïnstrumenteerde dwarsdoorsneden en een aantal 'losse' dwarsdoorsneden. Later is er op grond van de bevindingen hier en daar aanvullende instrumentatie toegepast. Deze gefaseerde aanpak is hier goed bevallen.

De geconstateerde zandmeevoerende wellen bleken niet samen te hangen met piping (terugschrijdende pijpvorming samenhangend met kwel-geïnduceerde erosie van zand onder een cohesieve laag), maar met micro-instabiliteit van de zandkern van de dijken. Dit is mede ontdekt op basis van de uitgevoerde monitoring. Het onderscheid is van groot belang, niet alleen voor de versterkingsmaatregelen, maar ook bij calamiteiten die noodmaatregelen vereisen. Voor piping is het namelijk vrij effectief om het slootpeil tijdelijk op te zetten, terwijl dat voor microstabiliteit juist verkeerd uitpakt.

De monitoring is hier van fundamenteel belang gebleken om de omvang van het pipingprobleem vast te stellen.

B.7 Livedijk Willemspolder

Waterschap Rivierenland verkent de mogelijkheden om pipingremmende maatregelen toe te passen die een alternatief vormen voor de traditionele oplossing bestaande uit een berm aan de landzijde, welke een (zeer) fors ruimtebeslag kent. Een van de maatregelen die het waterschap nader onderzoekt is het gebruik van een verticaal zanddicht geotextiel-scherm bovenin de voor piping gevoelige zandlaag. Het waterschap heeft dit inmiddels bij wijze van pilot op enkele dijkvakken in een primaire kering langs de Lek toegepast en voerde voorafgaand daaraan onder meer een maakbaarheidsproef uit. Om ook binnen afzienbare tijd zicht te krijgen op het functioneren van een dergelijk scherm onder maatgevende

omstandigheden (d.w.z. omstandigheden waarbij een beroep zal worden gedaan op de pipingremmende functie van het scherm) wordt dit ook toegepast in een kade langs een polder in een uiterwaard, de Willemspolder, nabij Echteld. De gekozen locatie is aan de oostzijde, ter plaatse van IJzendoorn. De kans op het (herhaald) optreden van piping is hier aanzienlijk groter dan bij primaire keringen, naar verwachting ongeveer twee keer per jaar. In samenhang met het LiveDijk ontwikkelprogramma van de Stichting IJkdijk kan hier gedurende twee jaar gedetailleerd aan worden gemeten, met de mogelijkheid van een verlenging (Koelewijn en Förster, 2014).

B.7.1 Monitoringsstrategie

De doelstelling van de Livedijk Willemspolder is in Koelewijn en Förster (2014) gedefinieerd als:

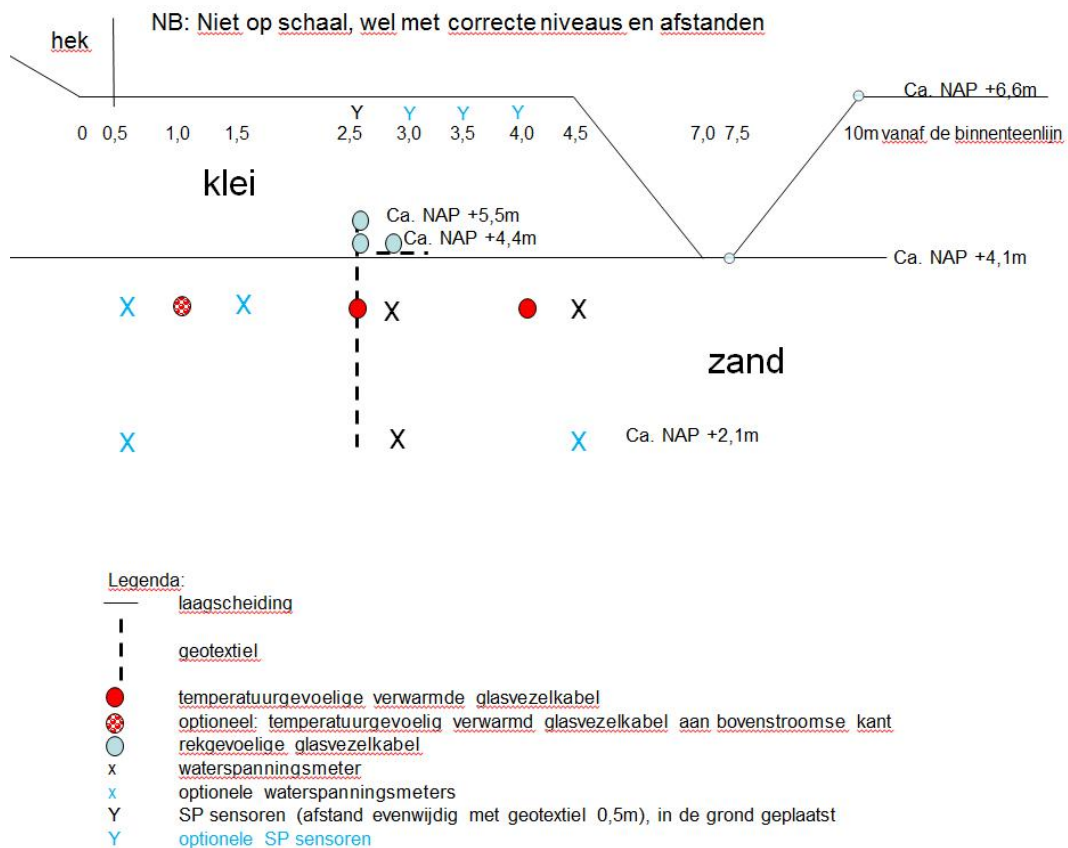
“het monitoren van de functionaliteit van een verticaal zanddicht geotextielscherm als preventieve maatregel tegen piping onder maatgevende omstandigheden”

Als deeldoelstellingen worden daarin onderscheiden:

- a) meten van de ontwikkeling van de pipes
- b) dichtvallen van de pipes en nazakken van de deklaag
- c) meten van de bulkdoorlatendheid over het scherm
- d) meten van de verdeling van de grondwaterstroming over de diepte: door het scherm heen en eronderdoor.

Hiertoe was 100 meter VZG vlak achter de zomerdijk voorzien en 100 meter ‘onbehandelde’ dijk als referentie. Daarbij zou er vrij dicht achter de dijk een nieuwe sloot worden gegraven parallel aan de dijk, om daarmee de kwelweglengte te verkleinen en zodoende de kans dat er piping zal optreden te vergroten.

In Figuur 5.3 is de geplande monitoring in een dwarsdoorsnede weergegeven. Er is besloten om geen van de optionele apparatuur aan te brengen en ook geen SP-sensoren toe te passen. Hierdoor is het bereiken van de deeldoelstelling *d* wel moeilijker geworden. Er zijn 5 groepjes van 3 waterspanningsmeters in de grond gepland – drie achter het geotextiel, twee in het referentiegedeelte.



Figuur 5.3 Relatieve posities van de waterspanningsmeters en glasvezelkabels ten opzichte van elkaar en ten opzichte van het geotextiel (Koelewijn, 2014).

In Koelewijn en Förster (2014) wordt de keuze voor deze monitoringstrategie toegelicht aan de hand van de verschillende doelstellingen:

Wanneer de pipe bij het scherm aankomt, dan kan de pipe zich verdiepen (over de hele lengte of met name bij het scherm) of verbreden (ook weer over de hele lengte of met name bij het scherm). Daarbij kan de pipe zo groot worden dat er een evenwicht ontstaat en er geen verdere groei meer op zal treden. Omdat het rechtstreeks meten van de pipes onder het dijklichaam bij de eerder IJkdijk uitgevoerde proeven onhaalbaar was gebleken, door de onbekende locatie en beperkte afmetingen, is dit niet beoogd. Het werd echter wel mogelijk geacht om de ontwikkeling bij het uittredepunt te volgen door regelmatig het volume aan meegevoerd materiaal te meten en monsters te nemen van het uitstromende materiaal en daar korrelverdelingen van te bepalen. Vergelijking van de korrelverdeling met eerder uitgevoerd grondonderzoek naar de samenstelling van de zandlagen onder de dijk geeft een indicatie waar het materiaal van afkomstig is. De ontwikkeling in de tijd, zowel van het volume uitgestroomd materiaal als van de herkomst ervan, zou een indicatie kunnen vormen van de effectiviteit van het scherm. Wanneer de holtes groter worden zou nazakking van de deklaag plaats kunnen vinden, wat met rekmetingen vastgesteld kan worden.

Voor het meten van de pipe-ontwikkeling kunnen waterspanningsmeters worden ingezet. Deze leveren echter geen dekkend beeld tenzij een zeer groot aantal wordt ingezet. Bij dit

traject is daarom aanvullend gekozen voor een meer innovatieve methode: temperatuurgevoelige, verwarmbare glasvezelkabels boven- en benedenstrooms van het scherm. Deze metingen worden ook toegepast om afwijkingen in de doorlatendheid van het scherm te meten.

Een andere techniek om de ontwikkeling van pipevorming te kunnen volgen is een methode die gebruikt maakt van zogenaamde Spontane Potentialen. Deze zijn uiteindelijk komen te vervallen.

Voorgesteld wordt om zowel met innovatieve technieken als met traditionele instrumenten te meten, de laatste vooral te verificatie. Per gedeelte van het vak (wel en geen geotextielscherm) wordt voorgesteld om dezelfde monitoring aan te brengen; in totaal het volgende (Koelewijn, 2014):

- Eén (optioneel twee) glasvezelkabels in de pipinggevoelige laag, op minimaal 0,1m en maximaal 0,7m onder de bovenkant van die laag, waarvan
 - o één benedenstrooms van het scherm, maar wel vrij dichtbij (afhankelijk van de invloedsbreedte van het aanbrengen van het scherm), om het gebied met pipingactiviteit beter in beeld te kunnen brengen en veranderingen in de bulkdoorlatendheid te kunnen meten
 - o optioneel één bovenstrooms van het scherm, waarvoor hetzelfde geldt, om de verandering in de bulkdoorlatendheid te kunnen meten
- vier locaties met elk twee (optioneel drie) waterspanningsmeters, aan weerszijden van het scherm
 - o één paar op minimaal 0,1m en maximaal 0,5m onder de bovenkant van de pipinggevoelige laag zo dicht bij het scherm als mogelijk (met enig risico op verlies bij het inbrengen van het scherm);
 - o één paar op minimaal 0,1m en maximaal 0,5m onder de bovenkant van de pipinggevoelige laag buiten de zone waar de glasvezelkabels worden aangebracht maar wel zo dicht mogelijk bij elkaar (zonder risico op vernieling door het aanbrengen van de glasvezelkabels)
 - o **optioneel** één paar recht onder het voornoemde paar, binnen een marge van 0,2m op dezelfde diepte als de onderkant van het scherm. Met de waterspanningsmeters aan de onderkant van het scherm zal alleen een verandering kunnen worden gemeten als de doorlatendheid van het scherm sterk is verlaagd. Het is de vraag of dit in de testperiode het geval zal zijn.
 - o en additioneel per locatie een waterspanningsmeter recht onder de waterspanningsmeter aan de benedenstroomse kant zo dicht bij het scherm als mogelijk op dezelfde diepte als de onderkant van het scherm. Met behulp van deze waterspanningsmeter kan het verticale verval over het doek worden gemeten.

In lengterichting van de dijk gezien deze locaties daarbij zo gelijk mogelijk verspreid over die lengte, zodoende:

 - o de eerste zes op 1/3 van de afstand waarover het scherm wordt aangebracht;
 - o de volgende zes op 67 meter vanaf die dwarsraai;
 - o de derde en vierde set op vergelijkbare posities in het referentiedeel zonder geotextielscherm, dus op resp. 133 en 167 meter vanaf de raai met die sondering.
- één peilmeter in de buitendijkse zandwininput – interpolatie tussen de beschikbare peilstations van Rijkswaterstaat wordt mede vanwege stromingseffecten op het waterpeil ongewenst geacht.

- twee peilmeters in de extra sloot, elk aan de uiteinden – peilverschillen zijn mogelijk indien een wel zeer veel zand meevoert.

Het herhaaldelijk dichtvallen van de pipes, het nazakken van de deklaag en het ontstaan van steeds diepere pipes is een extreem scenario dat na afloop van de proefperiode met een proefkuil kan worden onderzocht.

B.7.2 Uitvoering en metingen

De uitvoering heeft tot een aantal wijzigingen geleid, beschreven in Koelewijn (2016):

- Slechts over een afstand van 30 meter is het VZG zodanig aaneengesloten aanwezig in de grond dat doorgaande pipe-vorming hierdoor gehinderd kan worden.
- Inmiddels was ook een andere maatregel tegen piping verder ontwikkeld: de grofzandbarrière (GZB). Eind september/begin oktober 2015 is besloten om de maakbaarheid daarvan ook uit te testen in de Willemspolder (over een afstand van 50 m, direct aansluitend op het referentiegedeelte van 100 m).
- Hierop is besloten tot een andere configuratie van sloten: er zijn een 9-tal kopsloten gegraven aan de parallelsloot om de pipe-vorming op die locaties te stimuleren. Bij een kopsloot treedt piping ruwweg tweemaal sneller op (Van Beek, 2015a).

Er waren onvoldoende waterspanningsmeters gepland om bij iedere kopsloot te kunnen meten. Deze zijn als volgt verdeeld:

- VZG: bij beide kopsloten een groepje van drie waterspanningsmeters;
- referentiegedeelte: bij twee van de vier kopsloten;
- GZB: alleen bij de middelste van de drie kopsloten.

Daarnaast zijn er metingen onder de dijk, buitendijks en van het peil in de langssloot (nabij beide uiteinden).

Aanbevolen is om twee extra waterspanningsmeters te plaatsen om eventuele achterloopsheid bij het geotextiel te kunnen detecteren.

Actieve temperatuurmetingen waren vooralsnog niet mogelijk door een defect. Hierdoor is het analyseren van de vorming van pipes en meten van de doorlatendheid van het scherm bemoeilijkt.

Er is in januari en februari 2016 gedurende 3 hoogwaters gemeten. Bij het eerste hoogwater was er met name activiteit nabij de grofzandbarrière en in het referentiegedeelte. Bij het tweede en derde hoogwater waren er wellen bij het verticaal zanddicht geotextiel en in het referentiegedeelte. De analyse van de metingen is ten tijde van dit schrijven nog niet voltooid.

In juni 2016 zijn nog twee hoogwaters opgetreden. De proef is toen uitsluitend gericht geweest op het gedeelte met het verticaal zanddicht geotextiel. Daarbij was een deel van actieve temperatuurmetingen wél mogelijk. Ook zijn kort voorafgaand hieraan twee extra waterspanningsmeters, nabij de uiteinden van het geotextiel, geïnstalleerd.

Vanwege de opgetreden welvorming is de proef tijdens het vijfde hoogwater vroegtijdig beëindigd. Een uitgebreide analyse is te vinden in (Koelewijn en Taccari, 2017).

B.7.3 Samenvatting

Bij de locatie Willemspolder zijn nieuwe pipingmaatregelen uitgetest in de zomerkade (verticaal zanddicht geotextiel en maakbaarheidsproef grofzandbarrière. Hierbij is monitoring toegepast om de functionaliteit van een verticaal zanddicht geotextielscherm als preventieve maatregel tegen piping onder maatgevende omstandigheden vast te stellen.

Voor het detecteren van de pipes is gekozen voor een combinatie van traditionele waterspanningsmeters en meer innovatieve glasvezelmetingen (rek en temperatuur). Er is succesvol gemeten tijdens verschillende hoogwatersituaties, waarbij zandmeevoerende wellen zijn ontstaan.

B.8 Discussie

De IJkdijk en Livedijk projecten bieden op verschillende manieren inzicht in het monitoren ten behoeve van piping. In de IJkdijkproeven is een grote verscheidenheid aan innovatieve technieken getest in een gecontroleerde omgeving. Hierbij was het doel met name om piping te detecteren.

Tijdens de eerste serie IJkdijkproeven in 2009 bleek dat voor het duiden van de aanwezigheid van een pipe visuele inspecties en infraroodmetingen het meest geschikt zijn. Het duiden van het terugschrijdende erosieproces bleek moeilijk, doordat de pipes kleine afmetingen hebben en de locatie vooraf niet bekend is. Een dicht net van waterspanningsmetingen en grondige analyse van temperatuurmetingen zijn technieken die toegepast konden worden. Het ruimen van de pipe veroorzaakt daarentegen een grote verandering in het stromingspatroon en zorgt ook voor enige zetting van de deklaag, waardoor dit duidelijk gemeten kon worden met temperatuurmetingen, waterspanningsmetingen en rekmetingen (in geotextiel).

De benodigde dichtheid van het netwerk van metingen bleek lager te zijn dan vooraf gedacht. Afwijkingen in de metingen bleken doorgaans over de hele breedte van de dijk zichtbaar, met wisselende intensiteit afhankelijk van de locatie. Dit geeft aan dat een onderlinge afstand van enkele meters een dekkend beeld zou moeten geven. Hoewel dit inzicht verkregen is bij een kunstmatige bodemopbouw zijn voor een anisotrope bodem vergelijkbare resultaten te verwachten: veelal is er sprake van een hogere horizontale dan verticale doorlatendheid, waardoor de pipe in een groter horizontaal gebied meetbaar zou moeten zijn. De maximaal beproefde diepte was 1 m; dit bleek niet nadelig voor de metingen. De verandering in rek werd wel minder zichtbaar naarmate het geotextiel dieper gelegen was.

De all-in-one sensorvalidatietest uit 2012 heeft als belangrijk verschil met de proeven in 2009 dat de dijk uiteindelijk niet door piping is bezwaken. De pipe-vorming heeft zich niet verder uitgestrekt dan de pipingmaatregel. Hierdoor is het niet mogelijk om een volledig oordeel te geven over de potentie van de technieken m.b.t. piping. De temperatuur- en waterspanningsmetingen komen ook hier als meest kansrijk naar voren voor het detecteren van piping. De grondradarmetingen zijn alleen uitgevoerd voordat er pipes zijn ontstaan: het is daarom moeilijk te zeggen of hiermee pipes gedetecteerd zouden kunnen worden. Het eindrapport levert daarnaast een goede samenvatting voor andere parameters dan de haalbaarheid voor piping detectie: nauwkeurigheid, reikwijdte, metingdichtheid, meetfrequentie, mate van redundantie, robuustheid, aanlooptijd, informatieverwerkingstijd, interpretatie.

In de Livedijk projecten zijn de eerder beproefde methoden in de praktijk toegepast. De doelstellingen zijn in deze projecten meer gevarieerd en de monitoringsstrategie is daar doorgaans op afgestemd. De doelstellingen voor de verschillende levensfasen van de dijk zoals benoemd in hoofdstuk 2 komen hier terug:

- Beoordeling en ontwerp: meer zekerheid invoerwaarden model
- Aanleg en uitvoering: controleren functionaliteit
- Beheer en onderhoud: vaststellen degradatie of schade.

- Calamiteit: vaststellen veiligheid

Zo was een belangrijke doelstelling voor Livedijk Ameland om meer informatie in te winnen over de hydrologische invloed van het voorland op de waterspanningen in de ondergrond. Innovatieve technieken werden toegepast om eventuele voorkeurskanalen te detecteren.

Bij de Grebbedijk is op basis van waterspanningsmetingen het grondwaterstromingsmodel gekalibreerd, waardoor het pipingrisico nauwkeuriger bepaald kon worden. Er zijn geen conclusies getrokken uit het verloop van de temperatuurmetingen.

Bij de Livedijk Utrecht zijn verschillende doelstellingen voor verschillende faalmechanismen gecombineerd. De geïnstalleerde GeoBeads hebben voor piping niet tot nieuwe inzichten geleid. Ook bij de Livedijk XL is voor verschillende faalmechanismen een monitoringsstrategie ontworpen. Hierbij is rekening gehouden met verschillende meetdoelen (vaststellen veiligheid bij calamiteit voorafgaand en tijdens uitvoering van verbeterwerk, verbeteren invoerwaarden voor ontwerp). Het verbeteren van de invoerwaarden heeft zich ogenschijnlijk beperkt tot de grondwaterstroming, maar mede dankzij de metingen kon worden vastgesteld dat de geconstateerde zandmeevoerende wellen niet samenhangen met piping, maar met microstabiliteit, hetgeen een heel andere aanpak vereist in het geval van een hoogwatersituatie.

De Livedijk Willemspolder heeft als enige project tot doel om het functioneren van een maatregel te toetsen (verticaal zanddicht geotextiel), tijdens een calamiteit en degradatie ten gevolge van dichtslibben. Omdat ook hierbij de grondwaterstroming een belangrijke indicator is, is ook hier gekozen voor (actieve en passieve) temperatuurmetingen en waterspanningsmetingen. Daarnaast is gekozen voor rekmetingen om eventuele zetting te detecteren.

Het meest gangbaar blijken de waterspannings- en temperatuurmetingen. Deze metingen blijken in de verschillende levensfasen van een dijk voor piping het meest zinvol.

C Ervaringen van waterkeringbeheerders

Het inzetten van monitoringstechnieken kan in verschillende fasen van de levenscyclus van een dijk zinvol zijn. Door monitoringdata in alle fasen van de levenscyclus te benutten – ontwerp, aanleg, beheer en onderhoud, beoordeling en calamiteitenbeheer – kunnen onzekerheden worden verkleind en kan er beter gebruik van worden gemaakt. Het kan dan ook bijdragen tot een afgewogen asset management.

In hoofdstuk 4 wordt op basis van de IJkdijk- en LiveDijkprojecten een handreiking gegeven voor het monitoren ten behoeve van piping. Het betrekken van waterkeringbeheerders is een belangrijke stap in de ontwikkeling van een dergelijke handreiking. De wensen en behoeften uit de praktijk geven immers aan hoe deze handreiking het beste ingevuld kan worden om optimale toepassing in de praktijk te vinden. In gesprekken is ingegaan op de huidige situatie en nut en noodzaak van monitoring t.b.v. piping. Concrete vragen voor elk van de fasen van dijkbeheer zijn:

- Hoe is de huidige situatie?
- Hoe kan monitoren ondersteunend werken?
- Wat zijn de afwegingen om al dan niet voor monitoren te kiezen?
- Waar is behoefte aan vanuit de praktijk?

Er zijn drie waterschappen benaderd met deze vragen. De uitwerking van de interviews zijn te vinden in Appendix C2 t/m C4. In Appendix C1 is de behoefte van de ondervraagde waterschappen samengevat per levensfase van de dijk.

C.1 Samenvatting per levensfase van de dijk

C.1.1 Beoordeling en beheer

De waterkeringbeheerders geven aan dat de toetsing op dit moment uitgevoerd wordt met een beperkte hoeveelheid data. Er is wel grondonderzoek beschikbaar, maar de algemene indruk is dat er te weinig data is om een goed oordeel te vellen. Piping wordt ervaren als een zeer lokaal fenomeen. Dit maakt het lastig om het werkelijke pipingrisico in te schatten.

Hoe hier mee om te gaan blijkt verschillend voor verschillende waterschappen. Een belangrijk aspect dat bij monitoringstechnieken speelt is de betrouwbaarheid van de resultaten. Is de met een innovatieve methode bepaalde waarde echt de goede waarde om hiermee een pipingberekening uit te kunnen voeren?

Sommige waterkeringbeheerders zijn van mening dat meer locatie-specifieke kennis van de dijk bijdraagt aan een verbeterde beoordeling en ontwerp, wanneer dit gericht is op die gebieden waar het risico het grootste is. Dit zien we terug in de verschillende projecten om de geohydrologie en het effect van het voorland lokaal beter in kaart te brengen. De metingen worden gebruikt om grondwaterstromingsmodellen te kalibreren. Dit wordt met name uitgevoerd met waterspanningsmetingen, maar glasvezel werd ook genoemd als innovatieve techniek.

Voor het in kaart brengen van de deklaag (dikte en volumieke gewichten) kunnen verschillende technieken worden ingezet. In het verleden werd EM wel toegepast om van grof naar fijn handboringen te plaatsen om discontinuïteiten inzichtelijk te maken t.b.v. een gebiedsdekkend beeld, hoewel dit in geval van kabels en leidingen interpretatie niet goed mogelijk of onbetrouwbaar is. Geo-elektrisch onderzoek is niet veel toegepast, vanwege de hoge kosten.

Andere waterkeringbeheerders zijn meer sceptisch over het nut van monitoren in deze fase omdat zowel het grondwaterstromingspatroon en de ondergrond moeilijk te kwantificeren zijn en zetten liever in op maatregelen.

C.1.2 Aanleg en beheer

De waterschappen zijn het er over eens dat het van belang is vast te kunnen stellen dat een maatregel ook daadwerkelijk functioneert. Bij veel maatregelen is dit vanzelfsprekend, maar bijvoorbeeld bij het geotextiel of een drainagebuis wordt dit niet zo gezien. Dit kan uitvoeringsmonitoring zijn (schoon en ononderbroken inbrengen van geotextiel) of monitoring tijdens beheer (degradatie / verstopping). De vraag die hierbij altijd speelt is of de alternatieve techniek samen met de benodigde monitoring en mogelijk te nemen (tijdelijke) beheersmaatregelen wel financieel aantrekkelijk is. De aanleg hiervan is eventueel goedkoper, maar de vraag is hoe het er daarna onderhoudstechnisch uit ziet en hoe de situatie over 25 jaar blijkt te zijn met hogere rivier-waterstanden en/of grotere binnendijkse stijghoogten als gevolg van een veranderende riviermorfologie.

Bij monitoring is altijd een vertaalslag nodig. Wat doe je met de meting? Het toepassen van deze technieken verlangt ook daaruit volgende acties. Wat is de aan een bepaalde meetwaarde gekoppelde te nemen maatregel?

C.1.3 Calamiteiten

Op dit moment bestaat de monitoring tijdens een calamiteit vooral uit visuele inspectie. Voor de geïnterviewde waterkeringbeheerders blijkt het met name van belang om ontstane zandmeevoerende wellen te kunnen detecteren. Dit is niet vanzelfsprekend, omdat zandmeevoerende wellen niet altijd op dezelfde locaties terugkomen en ze op vrij grote afstand van de dijk kunnen ontstaan. Weersomstandigheden of troebel water kunnen het visueel detecteren van zandmeevoerende wellen ook bemoeilijken of zelfs onmogelijk maken.

Het voorafgaand aan een calamiteit in kaart brengen van risico-gebieden wordt zinvol gevonden. Het zo vroeg mogelijke signalering van een (aankomende) problemen is essentieel tijdens een crisissituatie. In een noodsituatie zijn de verantwoordelijke mensen met vele acties bezig. Dan is er geen tijd om eerst nog in de data in te duiken. Het is dan wel van belang d.m.v. monitoring een beter antwoord op een concrete vraag te kunnen verkrijgen. Daarnaast kunnen monitoringstechnieken ondersteunend zijn bij het detecteren van zandmeevoerende wellen (drones, helikopters):

- Hoogtemetingen: het omhoogkomen van het maaiveld is een mogelijke indicatie voor opbarsten
- Infraroodmetingen: temperatuurveranderingen duiden kwellocaties aan.
- Luchtfoto's.

Een ondersteuning d.m.v. drones lijkt met name bij regionale keringen interessant, omdat hier meerdere honderden kilometers dijk geïnspecteerd moeten worden, die onder dagelijkse omstandigheden al sterk belast worden. Bij droogte is het dan heel moeilijk om alle keringen goed in de gaten te houden.

Deze monitoringstechnieken zijn in deze fase alleen zinvol als er direct resultaten kunnen worden verkregen. Als een aantal experts opgeleid kunnen worden om de data snel (en in het veld) te interpreteren zou dit een goede aanvulling zijn.

Op basis van de grootte van een zandmeevoerende wel is het niet (of niet eenduidig) te zeggen in welke fase het pipingproces zich bevindt. De IJkdijk proeven hebben zich daarom toegelegd op monitoringstechnieken om de pipes te kunnen detecteren. Waterkeringbeheerders zijn echter wat sceptisch voor toepassing in de praktijk. Hierbij worden verschillende argumenten genoemd:

- Er is nog onvoldoende vertrouwen: het is onvoldoende in de praktijk getoetst (geen 'echte' bezweken dijk) en er is altijd een risico dat eventueel falen niet gedetecteerd wordt op het juiste moment.
- Er is niet voldoende tijd om de data uit te werken. Vooral in geval van een verwacht hoogwater dat aanzienlijk hoger is dan de tot op heden ervaren hoogwaters, kan zowel het detecteren van grote aantallen wellen, als het verwerken van data problematisch worden
- Er is misschien tijdswinst, maar geen vermindering van piping-activiteit. Er zal hoe dan ook opgekist moeten worden.
- Mogelijke verzwakking van de dijk door aanbrengen monitoring.

Toch zijn er waterkeringbeheerders die de ruimtelijk continue metingen tijdens een calamiteit wel als aanvulling zien: ter bevestiging en ondersteuning van de visuele waarnemingen. Belangrijke overwegingen hierbij zijn dat de data direct en vrij eenduidig interpreteerbaar is en aaneengesloten (lokale fenomenen kunnen gemakkelijk over het hoofd gezien worden met puntdata). Ook de maakbaarheid speelt een rol: het voorland en de berm zijn goede plekken om monitoring aan te sluiten. Opgemerkt wordt dat technieken niet altijd high-tech hoeven zijn (denk aan gekleurd zand rondom een geotextiel).

C.2 Interview Waterschap Vallei en Veluwe

Op 24 maart is een gesprek gevoerd met Reindert Stellingwerff en Joost Borgers van Waterschap Vallei en Veluwe. In onderstaande tekst is een samenvatting van dit gesprek gegeven, onderverdeeld naar de verschillende levensfasen van een dijk.

C.2.1 Algemene opmerkingen:

- De titel 'monitoren van piping' is onduidelijk, beter vervangen door het monitoren van parameters ten behoeve van het faalmechanisme piping.
- De Grebbedijk was ook een Livedijk project.

C.2.2 Toetsen/Beoordelen/Ontwerp:

Over de ervaringen met de Grebbedijk:

- Er is weinig informatie over de ondergrond. De toetsing is uitgevoerd op basis van beschikbaar grondonderzoek (oa. korrelgrootteverdelingen), maar er is te weinig informatie. De toplaag kenmerkt zich door een fijne laag stuifzand op een grof / grindig pakket.
- De ervaring met monitoren bij de Grebbedijk leert dat het grondwaterstromingspatroon en de ondergrond moeilijk te kwantificeren zijn. Het onderzoek regionale kwel heeft wel meer inzicht gegeven, maar heeft geen verandering gebracht in het gevoel van veiligheid.
- Piping is een mechanisme dat we niet zien en dat niet (makkelijk) te detecteren is.
- Het waterschap zet dan liever in op maatregelen dan op meer grondonderzoek.

Joost geeft aan dat er meer aandacht zou moeten zijn voor het beginnen van een zandmeevoerende wel. Grof zand kan wellicht niet afgevoerd worden. Het beschouwen van de dikte van de deklaag in combinatie met monsternamen van zand waar opbarsten te verwachten is lijkt hem zinvol.

Het onderzoek bij de Grebbedijk gaf o.a. aan dat de dikte van de deklaag de maatgevende parameter is voor opbarsten. Bij proeftuin Veessen - Wapenveld is de dikte van de deklaag nauwkeurig in kaart gebracht d.m.v. boringen. Dit is een dure aangelegenheid. Bij Groot Salland is daarna ook een locatie bemonsterd om de dikte van de deklaag te bepalen. Hierbij zijn ook geofysische metingen toegepast (EM). Het resultaat is niet bekend bij Joost en Reindert.

Voor het voorbereiden van grondonderzoek (intensiteit, locatie) is wel eens monitoring toegepast (Zusterpolder?).

Bij het ontwerp hoort ook het ontwikkelen van een monitoringsstrategie om de functionaliteit van de maatregel te waarborgen. Bijvoorbeeld, bij het toepassen van een geotextiel is het van belang te kunnen controleren of er geen gaten in ontstaan, ten gevolge van wortels of dieren. Daarnaast kan het van belang zijn eventuele verstopping te detecteren. Bij de aanleg van een DMC is het eveneens van belang om vast te stellen of de buis niet dichtslibt. Het monitoren van de functionaliteit is belangrijk.

De controle van de functionaliteit tijdens hoogwater, m.a.w. of de methode de pipegroei stopt, wordt minder belangrijk gevonden. Als het een goedgekeurde methode betreft, wordt verondersteld dat deze functioneert.

C.2.3 Calamiteiten

Op dit moment is de aanpak bij calamiteiten:

- Visuele inspectie

- In geval van kwel: in de gaten houden

- In geval van zandmeevoerende wel: opkisten

- Indien dit niet werkt: meer opkisten, grindbedden i.c.m. geotextiel aanleggen.

- Indien het gebied te groot is om met grindbedden af te dekken: evacueren.

Kan monitoren hierbij een rol spelen?

- Monitoren hoeft niet altijd high-tech te zijn. Voorbeeld: gekleurd zand rondom het geotextiel als waarschuwing.

- Monitoren vanuit de lucht: luchtfoto's, filmmateriaal en infrarood. Dit kan helpen bij de visuele inspectie. Infrarood metingen zijn wel afhankelijk van de omstandigheden. Als de temperatuurverschillen niet groot genoeg zijn is dit niet zinvol. Mogelijk ook met een drone.

- Een waarschuwingssignaal op basis van high tech monitoring (bijv. temperatuur of waterspanningsmetingen) wordt op dit moment niet heel zinvol geacht. De volgende oorzaken spelen hierbij een rol:

- Er is nog onvoldoende vertrouwen: het is onvoldoende in de praktijk getoetst (geen 'echte' bezwijken dijk) en er is altijd een risico dat eventueel falen niet gedetecteerd wordt op het juiste moment.
 - Er is misschien tijdswinst, maar geen vermindering van activiteiten. Er zal hoe dan ook opgekist worden.
 - Mogelijke verzwakking van de dijk door aanbrengen monitoring.

Het wordt sowieso zinvol gevonden om vooraf in kaart te hebben waar de probleemgebieden liggen op basis van de modeluitkomsten.

C.2.4 Conclusies

- Het waterschap is geïnteresseerd in nieuwe ontwikkelingen rondom monitoring maar zal dit bij een calamiteit niet snel toepassen. Hierbij speelt vooral het gebrek aan 'echte' ervaring en de angst belangrijke signalen te missen een rol.
- Er wordt liever ingezet op maatregelen die piping kunnen voorkomen.
- Het waterschap vindt monitoring zeer zinvol bij het vaststellen van de functionaliteit van een maatregel (schade, degradatie).

C.3 Interview Waterschap Rivierenland

Op 6 april is een gesprek gevoerd met Wim Cornelisse, Hans Knotter en Peter Damen van Waterschap Rivierenland. In onderstaande tekst is een samenvatting van dit gesprek gegeven, onderverdeeld naar de verschillende levensfasen van een dijk.

C.3.1 Algemene opmerkingen

In alle levensfasen van de dijk is het zinvol om een beter inzicht te hebben in het lokale ondergrondmodel en de belasting. Dit geeft niet alleen een beter onderbouwd toetsresultaat en een beter ontwerp, maar geeft ook kennis tijdens een hoogwater wat naar verwachting zwakke plekken zullen zijn. De kennis opgedaan tijdens een hoogwater draagt omgekeerd ook weer bij aan de kennis over de ondergrond. Door in alle fasen informatie te verzamelen en mee te nemen naar de volgende fase, neemt het locatie-specifieke kennisniveau toe.

C.3.2 Toetsen/Beoordelen/Ontwerp

De informatie op basis waarvan de toetsing wordt uitgevoerd is summier, gemiddeld over lange trajecten met vele aannames, terwijl het optreden van piping afhangt van zeer lokale fenomenen. Dit maakt het lastig om het werkelijk pipingrisico in te schatten. Meer locatie-specifieke kennis van zowel belasting als weerstand draagt bij aan de toetsing en het ontwerp; gericht op en afgestemd waar het risico het grootst is. Dus geen 0-1-beschouwing.

Monitoring wordt al toegepast om de geohydrologie beter in kaart te brengen en grondwaterstanden bij hoogwater te voorspellen. Hiervoor is o.a. het MORIA-model uitgebreid en verfijnd. Dit model wordt met name waardevol en betrouwbaar wanneer het geijkt is met waterspanningsmetingen tijdens een serieus hoogwater.

De ijking van het grondwatermodel vereist langdurig monitoren (trek een tijdsperiode uit van ca. 3 jaar), tenzij er snel een hoogwater optreedt. Deze benodigde monitoringstijd is bij veel projecten met een strakke planning helaas niet altijd aanwezig.

Bij WSRL wordt onderkend dat:

- de opening van een bovenstroomse stuw voor aanzienlijke bodemerosie zorgt, wat ertoe kan leiden dat de intrede-weerstand in het voorland/rivierbed aanzienlijk verkleind wordt.
- Bij schaar dijken in een rivierbuitenbocht met kribben, en dus ook krib-erosiekuilen, de intredeweerstand en infiltratie-capaciteit bij hoogwater ongunstiger is t.o.v. andere locaties. Tot op heden wordt bij toetsen/beoordelen/ontwerp nog geen onderscheid hierin gemaakt; mede door het ontbreken van harde monitoringsdata. Bovenstaande effecten kunnen met gevoeligheidsstudies en per locatie in Moria of ander modellen bekeken worden.

Het gehele binnendijkse beheergebied van WSRL is reeds jaren in Moria gemodelleerd en geijkt beschikbaar. Verfijning en ijking van Moria-modellocaties ter hoogte van de waterkeringen is tot op heden uitgevoerd voor de verticale waterontspannerprojecten

Schoonhovenseveer-Langerak (SLA = nieuw) én Opijnen (=ca. 14 jaar operationeel). Voor de ijking van de locatie Opijnen zijn recent door Witteveen+Bos 10 putproeven uitgevoerd. Een gevoeligheids-analyse wordt uitgevoerd om de impact van de krib-erosie-kuilen op de binnendijkse stijghoogte inzichtelijk te maken. Voorts om de beschikbare marge m.b.t. put-verstopping te kwantificeren. De verwachting is dat door regeneratie van de waterontspanner-putten de effectieve stijghoogte-verlaging ivm piping en stabiliteit sterk kan worden verbeterd. WSRL was voornemens om in januari 2017 alle bronnen te regenereren met meting van specifiek debiet vóór en na regeneratie. Dit als onderdeel van inhalen achterstallig onderhoud én aantoonbaar maken effectiviteit stijghoogte-verlaging bij hoog water. Inzicht wordt verkregen in de mate en variatie van verstopping + variatie in doorlaatvermogen als verdere ijking van het grondwatermodel. Dit wordt uitgevoerd als onderdeel van het inhalen van achterstallig onderhoud én aantoonbaar maken van de effectiviteit van stijghoogte-verlaging bij hoog water. Inzicht wordt verkregen in de mate en variatie van verstopping en de variatie in doorlaatvermogen als verdere ijking van het grondwatermodel.

Er wordt op dit moment door verschillende partijen ook gewerkt aan een aanpak om glasvezelkabel te gebruiken voor het afleiden van de doorlatendheden (o.a. rapport Victor Hopman) en grondwaterstromingssnelheden. Op 28 april 2016 bij WSRL-Tiel (middags) werden verschillende presentaties hierover gegeven, kennis en inzicht gedeeld + mogelijke vervolgonderzoeken besproken.

Voor het in kaart brengen van de deklaag (dikte en volumieke gewichten) kunnen verschillende technieken worden ingezet. In het verleden werd EM toegepast om van grof naar fijn handboringen te plaatsen om discontinuïteiten inzichtelijk te maken t.b.v. een gebiedsdekkend beeld. In het geval van kabels en leiding of metalen (schroot, historische schietbanen e.a.) is interpretatie niet goed mogelijk of onbetrouwbaar. Geo-elektrisch onderzoek is niet veel toegepast, vanwege de hoge kosten.

C.3.3 Calamiteiten

De huidige vorm van monitoren bestaat uit visuele inspectie met inachtneming van gebiedskennis:

- Wellen worden beoordeeld op basis van intensiteit: troebelheid van het water en de afvoersnelheid van zand. Vaak is er in eerste instantie een grote afvoer, maar kist de zandmeevoerende wel zich daarna op, waarna het proces langzamer doorgaat. De afstand tot de dijk is ook een belangrijke maat voor het inschatten van het risico.
 - De wellen worden vervolgens opgekist, bij voorkeur zonder geotextiel, zodat de wel daarna goed in de gaten gehouden kan worden en er geen/beperkte drukopbouw van water kan plaatsvinden.
 - Opvallend is dat wellen bij gelijke belasting niet altijd op dezelfde plek terugkomen.
 - Het is altijd belangrijk om de locatie en tijdstip van observaties te registreren.
- Het grootste risico voor piping volgens de beheerders is het over het hoofd zien van een zandmeevoerende wel. Daarom zijn een aantal veranderingen gaande:
- Inspectiegebieden zijn verkleind van 20 km naar 10 km.
 - Desondanks is het dan nog vaak niet mogelijk om het hele achterland goed te inspecteren: wens om beter te detecteren door pipinginspectieploegen in te zetten.

Monitoringstechnieken kunnen ondersteunend zijn bij het detecteren van pipes (drones, helikopters):

- Hoogtemetingen: het omhoogkomen van het maaiveld is een mogelijke indicatie voor opbarsten
- Infraroodmetingen: temperatuurveranderingen duiden kwellocaties aan.

Deze monitoringstechnieken zijn in deze fase alleen zinvol als er direct resultaten kunnen worden verkregen. Als een aantal experts opgeleid kunnen worden om de data snel (en in het veld) te interpreteren zou dit een goede aanvulling zijn.

Voor zowel klassieke dijken als voor dijken waar innovatieve ontwerpmaatregelen zijn toegepast (bijv. geotextiel) geldt dat er bij het optreden van wellen onzekerheid is waar de pipe zich bevindt. De observaties bij de Willemspolder bevestigen dit. Hier zijn zeer grote wellen waargenomen, waarbij toch afgevraagd wordt in welke fase deze zich bevinden. Monitoring zou hier een aanvulling kunnen zijn:

- Tracers (niet nader over gesproken)
- Monitoring om vast te stellen dat de pipe een maatregel gepasseerd heeft
- Monitoring om vast te stellen dat de pipe de bovenstroomse zijde heeft bereikt

Op dit moment is er nog onvoldoende vertrouwen in de technieken om direct bij een hoogwater toe te passen, maar dit vertrouwen kan wel groeien. De monitoring kan ingezet worden als hulpmiddel ('plusje'), in combinatie met de observaties in het veld. Belangrijke overwegingen hierbij zijn dat de data direct en vrij eenduidig interpreteerbaar is en aaneengesloten (lokale fenomenen kunnen gemakkelijk over het hoofd gezien worden met puntdata). Ook de maakbaarheid speelt een rol: het voorland en de berm zijn goede plekken om monitoring aan te sluiten.

Door het ontstaan van nieuwe maatregelen komt de vraag op: wat te doen met wellen achter de maatregel? De beste aanpak lijkt deze toch op te kisten, al is het maar voor de perceptie van de bewoners.

De DMC (horizontale waterontspanner) wordt om deze reden aantrekkelijk gevonden: verlaging van de stijghoogte-belasting waarbij ononderbroken opdrukken, en daarmee ook het ontstaan van zandmeevoerende wellen voorkomen wordt. De macro-stabiliteit wordt hiermee eveneens verhoogd.

C.3.4 Aanleg / Beheer

Bij de aanleg is het van belang zeker te zijn dat de gewenste maatregel er ook daadwerkelijk ligt en kan functioneren. Bij veel maatregelen is dit vanzelfsprekend, maar bijvoorbeeld bij het geotextiel niet. Het zou wenselijk zijn om hier meer zekerheid over te verkrijgen. Dit enerzijds middels een vergaande uitvoeringsmonitoring m.b.t. plaatsvastheid, schoon + ononderbroken inbrengen met voldoende inklemming zonder kortsluit-risico. Anderzijds om locatie-specifiek het mogelijk optreden van degradatie en/of verstopping middels monitoring inzichtelijk te maken.

C.3.5 Conclusies

Monitoring is zinvol in alle levensfasen van de dijk. Voor de toetsing en het ontwerp bestaat dit uit het verkrijgen van meer locatie-specifieke informatie m.b.t. het ondergrondmodel en de belasting hierop. Bezien vanuit de belastingen is het relevant de locatie-specifieke impact van de riviermorphologie te beschouwen en in te kaderen.

Deze kennis kan bovendien meegenomen worden bij een calamiteit omdat beter en gerichter bekend is waar mogelijke zwakke plekken aanwezig zijn. Aanvullend op de visuele inspectie is er tijdens een hoogwater de wens om beter te kunnen detecteren waar zandmeevoerende wellen ontstaan. Voor bekende zwakke plekken kan monitoren aanvullend zijn op visuele inspectie, om vast te stellen in welke fase de pipe zich bevindt.

C.4 Interview Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden

Op 12 mei is een gesprek gevoerd met Paul Neijenhuis en Ruud Weijs van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR). In onderstaande tekst is een samenvatting van dit gesprek gegeven, onderverdeeld naar de verschillende levensfasen van een dijk.

C.4.1 Algemene opmerkingen

In het beheergebied van HDSR zijn 50 km primaire waterkeringen en meerdere honderden kilometers regionale keringen aanwezig.

De pre-verkenning voor de dijkversterking Centraal Holland is grotendeels gebaseerd op traditioneel grondonderzoek. Voor macrostabiliteit is hier aanvullend grondonderzoek uitgevoerd, maar voor piping is de pre-verkenning gebaseerd op grondonderzoek voor dijkverbetering uit de jaren '90. Aanvullend grondonderzoek heeft zich wel met name gericht op het verkrijgen van ongedraineerde parameters. De grondgesteldheid blijkt hier heel wisselend te zijn.

Er zijn inmiddels ook eerste verkennende gesprekken gevoerd met FC IJkdijk hoe monitoring hier eventueel zou kunnen worden meegenomen. Het gaat hier met name om een betere bepaling van de deklaagdikte, zowel in het voorland als ook binnendijks, en de bepaling van de doorlatendheid van het zandpakket. Het probleem hierbij is namelijk dat voor de parameters alleen maar puntsgewijze waardes bekend zijn, maar er geen continu beeld is. De vraag die men beantwoord wil hebben is of piping hier überhaupt echt kan optreden. Momenteel wordt bekeken in hoeverre men een samenwerking wil uitwerken.

In het beheergebied van HDSR is een beperkt aantal zandmeevoerende wellen opgetreden. Hun ligging is door visuele inspecties in kaart gebracht en redelijk goed bekend. Bij gemiddeld hoogwater zijn deze nauwelijks actief. In het meest oostelijke deel van het gebied is het wel de vraag of dit echt piping is, of dat dit niet veel meer door de afstroming van grondwater uit de Utrechtse Heuvelrug wordt veroorzaakt.

Om het voorlandeffect beter in rekening te kunnen brengen is voor een stuk dijk al getest om de deklaagdikte met grondradar in kaart te brengen. De ervaringen zijn positief. Nu wil men deze techniek ook bij andere buitendijkse gebieden toepassen.

Behalve de ervaringen met de pilot Livedijk Utrecht heeft HDSR nog weinig ervaringen met nieuwe monitoringstechnieken. Tot nu toe wordt meer traditioneel gemonitord, maar men is er niet principieel tegen het toepassen van nieuwe versterkingstechnieken en staat er open voor het gebruik van nieuwe monitoringstechnieken, maar deze moeten eerst goed in pilots worden uitgetest voor dat HDSR ze grootschalig gaat toepassen. Voordeel is wel dat voor de in totaal 50 km dijk de dijkversterking wel gefaseerd kan worden aangebracht, wat extra tijd geeft om al van de opgedane ervaringen bij andere pilots te leren en deze inzichten mee te kunnen nemen bij de eigen dijkversterkingen.

Voor het winterseizoen van 2017 moet het al bestaande systeem van peilbuizen zijn uitgebreid en operationeel zijn. De peilbuismetingen zullen meer houvast geven bij het beantwoorden van de vraag of de dikke deklagen in combinatie met het voorland echt gaan opbarsten.

Piping is in het beheergebied van HDSR het maatgevende faalmechanisme. Bij kleine kwelwegtekorten probeert men de opgave in te perken door het meten van de

grondwaterstroming om bijvoorbeeld het voorlandeffect in de beoordeling beter mee te kunnen nemen. Op dit gebied zijn binnen Centraal Holland vele ontwikkelingen gaande en men wil hiervoor ook graag nieuwe technieken toepassen.

C.4.2 Toetsen/Beoordelen/Ontwerp

Uitgangspunt bij het ontwerp van een dijkversterking is in principe het uitvoeren van de verbetering in grond zoals het verbreden van de bestaande berm. In de buurt van gebouwen is het toepassen van alternatieve versterkingstechnieken echter een mogelijke variant. Met het toepassen van drainagetechnieken is men al bekend (bijv. ontlaststelsel Jaarsveld). De vraag die hierbij altijd speelt is of de alternatieve techniek samen met de benodigde monitoring en mogelijk te nemen (tijdelijke) beheersmaatregelen wel financieel aantrekkelijk is. De aanleg hiervan is eventueel goedkoper, maar hoe ziet het er daarna onderhoudstechnisch uit en hoe blijkt de situatie over 25 jaar te zijn? Ook de gegevensopslag van de meetdata dient zo te zijn ingericht dat je er ook nog na deze periode achter kunt komen.

Een belangrijk aspect die bij monitoringstechnieken speelt is de betrouwbaarheid van de resultaten. Is bijvoorbeeld de met een HPT sonde bepaalde kD waarde echt de goede waarde om hiermee een pipingberekening uit te kunnen voeren?

Bij monitoring is altijd een vertaalslag nodig. Wat doe je met de meting? Het toepassen van deze technieken verlangt ook daaruit volgende acties. Wat is de aan een bepaalde meetwaarde gekoppelde te nemen maatregel?

Er bestaan al (historische) kaarten met al in een gebied opgetreden wellen, maar het is handig deze kaarten te verfijnen. Dit is ook van belang om rekenkundig vastgestelde piping problemen ook in het veld door daadwerkelijk aanwezige wellen aan te kunnen wijzen. Echter bij een gemiddeld hoogwater (tot ca. 15,00 meter plus N.A.P. bij Lobith) is er weinig in het veld te zien.

C.4.3 Aanleg

Bij het toepassen van een Verticaal Zanddicht Geotextiel in combinatie met glasvezelkabel ter controle van de blijvende doorlatendheid van het doek, zijn de monitoringkosten een belangrijk aspect en is het ook de vraag wat het uiteindelijk gaat opleveren. In de afweging of zo'n maatregel inclusief monitoring zinvol is moet daarom ook een life cycle analysis worden meegenomen. Monitoring legt extra druk op het beheer. Het managen van het databeheer valt wel in het algemene proces in te richten, maar bij met name langdurige monitoring waar de nadruk meer op trends ligt en waar in het algemeen heel veel data worden ingewonnen die in de beginfase weinig variatie tonen is het voor de beheerder moeilijk om hier voldoende attent op te blijven en de data te bewaken. Het is in dit geval van belang om waarschuwings- of alarmwaarden automatisch aan de beheerder door te geven. Over lange termijn (25 jaar) moet er nog steeds bij de beheerder voldoende kennis van het monitoringssysteem aanwezig zijn. Dit betreft niet alleen het fysieke systeem in het veld maar ook hoe om te gaan met de data.

Alternatieve versterkingstechnieken worden nu al meegewogen, maar vele dingen verkeren nog in een pilotachtige situatie. HDSR is nog terughoudend met het grootschalig toepassen van deze nieuwe technieken. Er moet wel d.m.v. pilots al voldoende zijn aangetoond dat je iets zinvols hiermee kunt meten. Dus men is bereid deze technieken in proefvakken toe te passen en kleinschalig te beginnen.

Bij kunstwerken kan monitoring interessant zijn als de staat van de wel of niet aanwezige kwelschermen niet bekend is. Dit kan eventueel met behulp van peilbuismetingen en pompproeven in kaart worden gebracht. In het projectgebied van Centraal Holland (d.w.z. bij 4 beheerders) zijn ruim 20 kunstwerken aanwezig waar niet bekend is of kwelschermen aanwezig zijn.

C.4.4 Beheer & Onderhoud

Het beheer van monitoringsdata is wel in het lopende beheer (Meet- en Informatie Dienst) in te plannen. De data moeten echter ook goed interpreteerbaar zijn. Wanneer dient een maatregel bijvoorbeeld te worden geregenereerd of worden vervangen. Bij de MID worden o.a. de actuele polderpeilen ingelezen. Hier wordt direct op gereageerd. Dit zou ook met andere monitoringdata mogelijk kunnen zijn.

Monitoring is echter vaak een langdurig verhaal. Als er toch uiteindelijk iets wijzigt moet dit gesignaleerd kunnen worden. Het is vaak moeilijk te bepalen welke acties dan genomen moeten worden.

De meetdata voor het ontlaststelsel Jaarsveld zullen in toekomst ook in het systeem van de CAW (Centrale Automatisering Watersysteem) actief zichtbaar worden gemaakt.

Bij de 50 km primaire keringen rijdt de handhaver een keer per week over de dijk heen. Drie keer per jaar (april, juni en oktober) vindt een schouw plaats. HDSR vertrouwt in het algemeen meer op visuele inspecties tijdens beheer. Je moet met regelmaat zelf op de dijk blijven kijken en niet alleen achter de schermen de monitoringdata bekijken. Monitoring kan eventueel aanvullende informatie leveren, maar kan de inspectie door dijklopers bij hoogwater niet vervangen. Voor het dagelijks beheer bij normale waterstanden heeft een technische monitoring naar verwachting weinig toegevoegde waarde.

Een inspectie m.b.v. een drone is niet maar zo even gedaan. Hoe snel krijg je deze de lucht in? Hiervoor zijn vergunningen/ toestemmingen nodig. En wat doe je met al die data? De interpretatie van de data vergt nog veel inspanning (bijv. beeldbewerking).

Een ondersteuning d.m.v. drones lijkt met name bij regionale keringen interessant, omdat hier meerdere honderd kilometer dijk geïnspecteerd moeten worden, die onder dagelijkse omstandigheden sterk belast worden. Bij droogte is het dan heel moeilijk om alle keringen goed in de gaten te houden. Op dit moment worden acties nog heel reactief genomen. Er is nauwelijks iets geregeld wat je - in het geval dat een droogteschade wordt geconstateerd - gaat doen. Hier is nog niet goed over nagedacht.

C.4.5 Calamiteiten

De toepasbaarheid van een monitoringstechniek is van belang. Het zo vroeg mogelijke signalering van een (aankomende) problemen is essentieel tijdens een crisissituatie. In een noodsituatie zijn de verantwoordelijke mensen met vele acties bezig. Dan is er geen tijd om eerst nog in de data in te duiken. Het is dan wel van belang d.m.v. monitoring een beter antwoord op een concrete vraag te kunnen verkrijgen (om bijv. bij een specifieke zandmeevoerende wel ook onder de dijk te kunnen kijken of de pipe hier al een risicovolle locatie heeft bereikt). Vooraf moet heel duidelijk zijn wat je allemaal nodig hebt om het systeem optimaal in te kunnen zetten.

C.4.6 Conclusies

Je moet open blijven staan voor pilotvoorstellen. Als zich een bepaalde techniek in pilots heeft bewezen moet deze ook grootschaliger kunnen worden toegepast.

Meten an sich kan nooit het doel van monitoring zijn. Er moet eerst een bepaalde vraag zijn die men met de monitoring wil kunnen beantwoorden. Voor het testen van het monitoringssysteem is het vooral van belang dat het gebied waar de monitoring toegepast wordt ook daadwerkelijk geschikt is om een antwoord op de vraag te kunnen genereren. Bij het LiveDijk project Utrecht was dit niet het geval. Doordat de onderzoeksvraag onvoldoende was uitgekristalliseerd gaven de meetresultaten geen inzicht in de vragen van de beheerder. De pilot was er al voordat er een duidelijke onderzoeksvraag op tafel lag.

Als je voor een monitoringstechniek kiest moet je je er echter ook van de mogelijke consequenties bewust zijn. Hoe ga je met de verkregen informatie om? Je moet je van begin af aan bewust van zijn wat je eigenlijk wilt gaan meten, hoe je de gegevens gaat ontsluiten en wat je met deze informatie gaat doen. Er moeten dan ook mogelijke scenario's vooraf worden bedacht en de hieraan gekoppelde acties worden vastgesteld. Een probleem voor de beheerder is ook vaak de grote hoeveelheid data en het feit dat in de beginfase nauwelijks veranderingen in de data optreden en trends pas op zeer lange termijn zichtbaar worden waardoor er de aandacht voor de metingen snel minder wordt. Meldingen bij het bereiken van alarmwaardes zijn daarom van groot belang.

Voor de praktijk is het daarom van belang dat een duidelijk stappenplan wordt beschikbaar gesteld waar uitgangspunten en mogelijke keuzes worden beschreven.

Om voor de inzet van monitoring te kiezen moet dit wel een aanzienlijke kostenbesparing (ruim 30%) opleveren.