

IV-Keten

**Veiligheid als basis
Monitoringsfilosofie en proeftuinen**

drs. ing F.P.W. van den Berg
dr.ir. A.R. Koelewijn

1207933-000

Titel
IV-Keten

Opdrachtgever
Rijkswaterstaat

Project
1207933-000

Kenmerk
1207933-000-VEB-0001

Pagina's
176

Trefwoorden

Monitoring, waterkering, faalmechanisme, sensor, proeftuin, monitoringstechnieken, CIP, IJkdijk, Livedijk

Samenvatting

Dit is de aanzet voor het sleuteldocument veiligheid als basis. In deze rapportage wordt de monitoringsfilosofie gekoppeld aan de veiligheid van de waterkering. Hierbij wordt ook meegenomen, wat, waarom en hoe wordt er gemeten en wat doen we er mee om de veiligheid van de waterkering te waarborgen.

Dit rapport is een integratie van die deelonderdelen in het kader van de IV keten en maakt deel uit van het Corporate Innovatie Programma (CIP) van Rijkswaterstaat en Deltares. De volgende drie onderdelen zijn opgenomen in deze rapportage:

- Monitoringsfilosofie en systematische opzet monitoring
- Proeftuinen
- Smart sensor kit

Monitoringsfilosofie en systematische opzet monitoring

Eerst wordt het belang van monitoring voor alle onderdelen van de dijkbeheercyclus uiteengezet. Monitoren wordt hierbij gedefinieerd als het geheel van tijdsafhankelijke, waar nodig herhaalde metingen aan een constructie en de verwerking daarvan, om indien nodig tot onderbouwde wijzigingen ten aanzien van de constructie, het beheer ervan of de monitoring zelf te kunnen besluiten. Vervolgens wordt een stappenplan gegeven om op systematische wijze tot de opzet van een rationeel onderbouwde monitoring te komen waarbij de verzamelde meetgegevens ook daadwerkelijk gebruikt kunnen worden. Daarbij worden veel algemene aandachtspunten aangegeven en wordt dit met praktijkvoorbeelden ondersteund.

Proeftuinen

De laatste jaren neemt de ontwikkeling van de algemeen toepasbare monitoringssystemen voor waterkeringen toe. Binnen de geotechniek worden al vele jaren uitgebreide monitoringstechnieken ontwikkeld en regelmatig toegepast, denk hier bij aan de Betuweroute, HSL en de Noordzuidlijn. Voor de bepaling van de sterkte van de waterkeringen was dit echter nog niet algemeen toepasbaar.

In dit rapport is een overzicht gegeven van de geselecteerde proeftuinen die van belang zijn voor deze verdere ontwikkeling van de monitoringssystemen voor waterkeringen. Een van de eerste grote monitoringsprojecten met real time metingen aan waterkeringen in Nederland was het baggerdepot Ketelmeer in 1999. Hierbij werden 3 jaar lang 78 meetlocaties met waterspanningsmeters gemonitord. Na de doorbraak van de veenkade bij Wilnis is enkele weken real time gemonitord aan de onbezweken delen, totdat deze waren gestabiliseerd. In 2008 werd een aanvang gemaakt met de verschillende IJkdijk experimenten (macrostabiliteit en piping).

Sindsdien is er als spin-off van deze ijkdijsprojecten ook een groot aantal andere IJkdijk projecten opgestart. Zoals Livedijk Utrecht, Livedijk Eemshaven en op een grotere schaal de Livedijk XL in Noordoost Groningen.

Titel
IV-Keten

Opdrachtgever
Rijkswaterstaat

Project
1207933-000

Kenmerk
1207933-000-VEB-0001

Pagina's
176

In 2012 heeft de All-in-one Sensor ValidatieTest (AIO-SVT) plaatsgevonden waarbij meer inzicht is verkregen in de functionaliteit en de prestaties van de dijkmonitoringssystemen. De belangrijke onderdelen van de dijkmonitoringssystemen zijn de meettechnieken en de visualisatiesystemen. Voor de AIO-SVT zijn negen meettechnieken en drie visualisatiesystemen ingezet en beoordeeld.

Naast de livedijken die een direct uitmoeisel zijn van de IJkdijk, zijn er ook verschillende Waterschappen die ook hun eigen proeftuin hebben al dan niet in samenwerking met andere partijen. Een aantal van deze proeftuinen bij onder andere Waternet, HH Delfland en Waterschap Rivierenland zijn beschreven. Behalve in Nederland zijn er ook proeftuinen/pilots in het buitenland aanwezig. Een aantal hiervan zijn beschreven; Boston (Groot Brittannië), Gambsheim (Frankrijk), Rheindeich (Duitsland) en Dayulan (China).

Als laatste grote IJkdijkexperiment zit er een zettingsvloeiingsexperiment in de planning. Momenteel worden de voorbereidingen hiervoor getroffen.

Op basis van het huidige discours laat het zich aanzien dat de ontwikkelingen van de sensors/ dijkmonitoringssystemen en visualisatiesystemen de komende jaren zich nog verder sterk zal ontwikkelen.

Smart sensor kit

De Digitale Delta is een project waarbinnen Rijkswaterstaat, IBM, Hoogheemraadschap Delfland, TU Delft en Deltares gezamenlijk onderzoeken hoe met behulp van betere informatiedeling en slim hergebruik van ICT toepassingen het waterbeheer in Nederland verbeterd kan worden.

Een onderdeel van de Digitale Delta is het project/ proeftuin Smart Sensor Kit (SSK).

Binnen het project SSK wordt met ondernemingen als Hydrologic en IBM gewerkt aan de ontwikkeling van een nieuw waarschuwingssysteem voor overstromingen. Door grote hoeveelheden real-time data van waterafvoersystemen en waterstanden te combineren met meteorologische data en simulatiemodellen, zijn watermanagers beter in staat om de beschikbare capaciteit van wateropslag te monitoren. Hierdoor kan in geval van een naderende overstroming sneller worden gehandeld. Daarnaast zullen deze gegevens via het digitale platform beschikbaar worden gesteld voor andere partijen die met behulp hiervan hun eigen waterprojecten kunnen starten. Om dit te realiseren heeft Delfland haar beheergebied als experimenteelgebied ter beschikking gesteld.

Momenteel worden de voorbereidingen getroffen voor deze proeftuin. Verwacht wordt dat in 2014 met dit project kan worden aangevangen.

Referenties

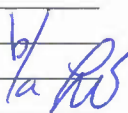
Titel
IV-Keten

Opdrachtgever
Rijkswaterstaat

Project
1207933-000

Kenmerk
1207933-000-VEB-0001

Pagina's
176

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	dec. 2013	drs. ing. F.P.W van den Berg dr. ir. A.R. Koelewijn		drs. V. Hopman		dr. ir. L. Janssen	
2	jan. 2014	drs. ing. F.P.W van den Berg dr. ir. A.R. Koelewijn		drs. V. Hopman		dr. ir. L. Janssen	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond Corporate Innovatieprogramma	1
1.2 Kader en doel	2
1.3 Achtergrond	2
1.4 Expertmeeting	3
1.5 Leeswijzer	4
2 Monitoringsfilosofie	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Definitie van monitoren	5
2.3 Waarom monitoring?	5
2.4 Onzekerheden in de veiligheidsbeoordeling	5
2.5 Positie van monitoring in keten van toetsen, ontwerpen, versterken en onderhouden	6
2.6 Positie van monitoring in vigerende leidraden en technische rapporten	9
2.7 Mogelijkheden voor inpassing monitoring in toetsing	10
3 Systematische opzet en uitvoering van monitoring	13
3.1 Inleiding	13
3.2 Projectafbakening	13
3.3 Verzameling van historische gegevens	13
3.4 Vaststellen van de maatgevende belastingen	14
3.5 Identificatie maatgevende faalmechanismen	14
3.6 Identificatie maatgevende parameters	15
3.7 Keuze monitoringstrategie	15
3.8 Keuze te monitoren parameters	17
3.9 Bepaling orde van grootte van veranderingen	19
3.10 Vaststelling waarschuwings- en alarmwaarden	19
3.11 Bepaling interventiemogelijkheden	20
3.12 Registratie van relevante omgevingsinvloeden	20
3.13 Keuze locaties van metingen	21
3.14 Benoem specifieke doel(en) van ieder instrument	22
3.15 Vaststelling verwachtings-, waarschuwings- en alarmwaarden per instrument	22
3.16 Beschrijf functionele eisen aan de te selecteren instrumenten	23
3.17 Stel procedures op ter bepaling van het correct functioneren van de instrumenten	24
3.18 Plan regelmatige calibratie en onderhoud	26
3.19 Plan installeren van de instrumenten	30
3.20 Stel aankoopspecificaties op voor de instrumenten	31
3.21 Plan verzameling van meetgegevens	31
3.22 Plan verwerking van meetgegevens	32
3.23 Verdeling van verantwoordelijkheden	32
3.24 Stel de (voorlopige) begroting op	32
3.25 Vastleggen van het monitoringssysteem in een ontwerpverslag	32
3.26 Installatie en inbedding van het monitoringssysteem	33
3.27 Gebruik en periodieke herziening van het monitoringssysteem	33
4 Verschillende proeftuinen	35
4.1 Inleiding	35

4.2	IJkdijk projecten	37
4.3	LiveDijk Eemshaven (Noorderzijlvest)	39
4.4	Droogteproef Veenderij (Waternet)	43
4.5	Livedijk Utrecht (Stichtse Rijnlanden & Rijkswaterstaat)	66
4.6	LiveDijkXL (Noorderzijlvest)	68
4.7	All-in one sensor validatie test	69
4.8	Livedijk Ameland (Wetterskip Fryslân) – piping tijdsafhankelijk	80
4.9	Livedijk Piping (Rivierenland) –	84
4.10	Monitoring baggerspecie depot Ketelmeer	85
4.11	Vlaardingsekade (Delfland)	88
4.12	Stammerdijk(Waternet) - 'representatieve locatie'	89
4.13	Lekdijk (Rivierenland) – doordringing waterdruk in slappe lagen	91
4.14	Colijnsplaat (DMC / Zeeuwse Eilanden) – stoppen zandverlies uit dijk in sloot	95
4.15	Vechtkade (Waternet) – invloed baggeren & golfoverslag	96
4.16	Ringdijk Watergraafsmear - metingen tbv EU UrbanFlood	100
4.17	Grebbedijk (Vallei en Eem), piping en stabiliteit,	101
4.18	Monitoring bodemdaling in kustgebieden (Subcoast)	105
4.19	Pilot Dayulan langs de Yellow River China	108
4.20	Grand Sluice, Boston, UK (Environment Agency)	113
4.21	Rheindeich (K7), Rees, Duitsland (EU FP7 UrbanFlood)	116
4.22	Gambsheim, Frankrijk monitoren van de Rijndijken	125
5	Smart sensor kit	130
5.1	Inleiding	130
5.2	Digitale Delta	130
5.3	Smart sensor kit	131
6	Samenvatting en conclusies	132
6.1	Algemeen	132
6.2	Monitoringsfilosofie	132
6.3	Systematische opzet en uitvoering van monitoring	133
6.4	Proeftuinen	133
6.5	Smart sensor Kit	136
6.6	Conclusie en aanbevelingen	136
7	Literatuur	139
	Bijlage(n)	
A	Meettechnieken	A-1
A.1	Inleiding	A-1
A.2	Indeling van de verschillende soorten meettechnieken	A-2
A.3	Zakbaak	A-3
A.4	Zettingsmeetslang	A-5
A.5	Total station	A-5
A.6	Laseraltimetrie	A-7
A.7	Scheurmeter	A-8
A.8	Convergentie-opnemer	A-8
A.9	GPS	A-9
A.10	Inverted Pendulum	A-9

A.11	Extensometer	A-9
A.12	Hellingmeetbuis	A-11
A.13	Hellingmeter	A-13
A.14	Glasvezel	A-14
A.15	Dichtheidsmeter	A-15
A.16	Digitale camera	A-15
A.17	Multispectrale fotografie	A-15
A.18	Infrarood camera	A-16
A.19	Vochtmetr	A-16
A.20	Self potential	A-17
A.21	Waterspanningsmeters	A-18
A.22	Drukopnemer	A-20
A.23	Seismiek	A-21
A.24	Akoestische emissie	A-22
A.25	Radar	A-22
B	Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing (DTS)	B-1
B.1	Fundamentals	B-1
B.2	Resolution	B-2
B.3	Installation	B-3
B.4	Configurations	B-5
B.5	Applications	B-6
B.6	References for this Annex	B-7

1 Inleiding

1.1 Achtergrond Corporate Innovatieprogramma

Het Corporate Innovatieprogramma (CIP) van Rijkswaterstaat (RWS) voor 2012-2015 is bedoeld om door innovatie bij te dragen aan het verder optimaliseren van de RWS-productie. Dat vereist nauwe aansluiting op de core business van RWS en actieve deelname van RD'en, grote RWS-programma's, marktpartijen en kennisinstellingen.

In deze context wordt Deltares gevraagd om (1) het inbrengen van nieuwe robuuste innovatieve kennis en (2) om die kennis te verbinden met bestaande kennis van andere partijen, zodat aldus de RWS-productie slimmer en goedkoper kan worden gemaakt. Het cluster slim meten inwinnen betreft één van de 6 clusters in het CIP.

Rijkswaterstaat wordt uitgedaagd onder moeilijke omstandigheden (meer met minder) de basisfuncties van de drie netwerken overleef te houden. Daarom zoekt Rijkswaterstaat voortdurend naar mogelijkheden de taakuitvoering te verbeteren, onder andere door het zoeken naar nieuwe uitvoeringsmogelijkheden voor het beheer. De kerntaak van het ITC (Innovatie Test Centrum) is om met behulp van experimenteel onderzoek te bevorderen dat innovaties landen in het primaire proces. Deze taak kan worden gesplitst in drie subtaken:

1. Door middel van co-financiering de markt stimuleren om validatietests te (laten) verrichten op door deze marktpartijen ontwikkelde innovaties. In toenemende mate wordt door RWS actief buiten de eigen organisatie gezocht naar reeds ontwikkelde kennis (van "not invented here" naar "proudly found elsewhere"). De uitdaging voor het project Innovatie Testcentrum – Nat (ITC-nat) is, om buiten de RWS organisatie ontwikkelde innovatieve producten op zijn merites te beoordelen/testen en vervolgens toegepast te krijgen in het primaire proces.
2. Het nadrukkelijk aansluiting zoeken bij uitvoeringsprogramma's zoals het HoogWaterBeschermsProgramma (HWBP) en de waterschappen (regionale waterkeringen). Enerzijds om de kosten van het onderzoek te spreiden, maar anderzijds om de potentiële markt te vergroten, waardoor de businesscase voor innovatie-investering zal verbeteren.
3. Het ITC zal in nauwe samenwerking met het CIP-cluster SMIT – werkveld Testen praktische ondersteuning geven bij het opzetten van de optimale teststrategie. Want veel in- en externe innovaties zullen voordat ze in de reguliere uitvoeringsprogramma's en -diensten gebruikt worden, experimenteel getest worden. Een goede teststrategie bij experimentele testen zal bijdragen aan een optimale uitvoering.

Dit rapport is een integratie van drie deelonderdelen in het kader van de IV keten en maakt deel uit van het Corporate Innovatie Programma (CIP) van Rijkswaterstaat en Deltares. De volgende drie onderdelen zijn opgenomen in deze rapportage:

- Monitoringsfilosofie en systematische opzet monitoring
- Proeftuinen
- Smart sensor kit

1.2 Kader en doel

Deze rapportage bevat een handreiking voor het monitoren van waterkeringen, in de eerste plaats bedoeld voor waterkeringbeheerders. Hierin wordt ook de huidige monitoringsfilosofie vastgelegd. Tevens is opgenomen welke parameters relevant zijn, voor welke toepassingen het gehanteerd kan worden en welke methoden er voorhanden zijn. Ook de mogelijkheden voor het gebruik van een eindige-elementenmethode zoals Plaxis zal worden onderzocht.

De (on)mogelijkheden van het monitoren zullen ook worden meegenomen in de rapportage.

De verbinding met de diverse proeftuinen in Nederland zal worden gezocht en er zullen analyses van de uitgevoerde metingen worden uitgevoerd. Het betreft hier metingen van: waterspanning, stijghoogte, temperatuur en deformatie. Dit zijn de meest voorkomende parameters, die inzicht geven in de verschillende faalmechanismen.

Monitoren van dijken kan zinvol zijn om onzekerheden in de berekende belasting en sterkte te verkleinen, waardoor er een beter zicht ontstaat op de werkelijke veiligheid die de dijk biedt tegen overstromingen.

Dit kan in diverse fasen gebeuren (tussen haakjes elementen uit de dijkbeheercyclus):

- Bij aanleg of versterking (beleid, verbetering);
- Ten behoeve van de periodieke toets op veiligheid (toetsing);
- Na afkeuring van dijken in de loop van het toetsingsproces (inspectie, buitengewoon onderhoud);
- Als hulpmiddel bij het beheer (inspectie, beleid, planvorming, buitengewoon onderhoud en vergunningverlening);
- Als waarschuwingssysteem bij dreigende calamiteiten (calamiteitenbestrijding).

Het monitoren onderscheidt vier verschillende opeenvolgende fasen die alle doorlopen dienen te worden:

1. Waarom & wat moet er gemonitord worden? (monitoringsfilosofie).
2. Het monitoren zelf.
3. Interpretatie van de metingen.
4. Toepassen van de meetresultaten en herijken van 1).

1.3 Achtergrond

Veiligheid tegen overstromen staat hoog op de politieke agenda. Op dit moment is een aantal programma's in uitvoering waaronder het Hoogwaterbeschermingsprogramma, Ruimte voor de Rivier. Deze beide programma's hebben als doel om in 2017 de primaire waterkeringen op orde te hebben. De ambitie is dat dan alle waterkeringen voldoen aan de nu geldende normen.

Rijkswaterstaat heeft een aantal wettelijke taken op het gebied van waterveiligheid. Deze primaire taak moet doelmatig, efficiënt en effectief worden uitgevoerd. Door een beperkte kennis van de actuele staat van de waterkeringen en de relatie tot de faalmechanismen kunnen we de keringen nog onvoldoende scherp ontwerpen, toetsen en beheren. Daarnaast is in de afgelopen toetsingsronde gebleken dat van 1/3 van de keringen niet voldoende kennis beschikbaar was om te kunnen bepalen of deze keringen aan de norm voldoen of niet.

Nederland kent internationaal gezien zeer strenge veiligheidsnormen als het gaat om overstromingen. Bij het beoordelen en ontwerpen van waterkeringen moet rekening gehouden worden met extreme omstandigheden die in werkelijkheid nog niet zijn waargenomen. Oftewel: de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen gebeurt nu vrijwel volledig op basis van theoretische (hydraulische en geotechnische) modellen, gevoed met ten dele regionaal of zelfs landelijk geldige parameterwaarden. De resulterende onzekerheid, die veiligheidshalve verdisconteerd dient te worden, is fors. Verschillende grootschalige bezwijkproeven (zoals bij Bergambacht in 2001 en bij de IJkdijk in de periode 2008-2012) hebben dit ook daadwerkelijk aangetoond.

De kosten voor het op orde brengen van de primaire waterkeringen zijn significant hoger dan het beschikbare budget. Kostenreducerende product- en procesontwikkeling is daarom dringend gewenst. Doelmatig waterbeheer waarbij de uitgaven van beheerders economisch gunstig en zo doeltreffend mogelijk worden uitgevoerd is de sleutel.

De omvang en aard van de problematiek zijn zodanig, dat de ontwikkeling van de oplossing zich over meerdere jaren zal uitstrekken, alleen al vanwege de behoefte aan langdurige meetreeksen voor een betere onderbouwing van scherpe keuzes bij het ontwerp van versterkingen. Dit vereist een duurzame structuur, waarin alle stakeholders participeren en wordt gezorgd voor continuïteit.

De belangrijkste aanbevelingen die uit een eerder onderzoek op dit vlak uit 2011 volgden [Koelewijn, 2011], zijn:

- Het ontwerp van een monitoringssysteem moet bepaald worden op basis van de wijze waarop de meetgegevens zullen worden gebruikt. Ook de selectie van gemeten parameters, meetsystemen, aanbrengmethode, insteltijd, meetnauwkeurigheid en meetfrequentie moeten hierop worden afgestemd.
- Waarborging van de datacontinuïteit vereist een passend protocol dat ook gehanteerd wordt, samenhangend met het doel van de monitoring.
- Bijzondere gebeurtenissen op de meetlocatie moeten zo veel mogelijk worden bijgehouden in een logboek, zodat het verloop van de metingen zo goed mogelijk verklaard kan worden.
- De integratie van het deterministische DikeTool-model met een stochastisch model in een Kalman filter wordt aanbevolen. Met zo'n model kan de stabiliteit in hoogwatersituaties en de onzekerheid in die voorspelling worden gekwantificeerd. Deze voorspelling kan worden getoetst aan signaalwaarden. Door kalibratie van het DikeTool-model is de relatie met het tijdsafhankelijk gedrag immers verbeterd en is hierdoor reductie van de onzekerheden rond het gedrag bij hoogwater mogelijk.
- Geconditioneerd onderzoek in een geotechnisch laboratorium, aangevuld met consolidatieberekeningen, zal het inzicht vergroten in de werking en praktische bruikbaarheid van instrumenten die met nieuwe installatiemethoden in de grond worden aangebracht, waarbij zinvol gebruik kan worden gemaakt van het vele onderzoek dat mede ten grondslag heeft gelegen aan de installatiemethoden voor 'traditionele' instrumenten.

1.4 Expertmeeting

Voorafgaand aan deze rapportage is op 10 juli 2013 een expertmeeting georganiseerd bij Deltares om de vraagstelling voor onderhavige rapportage juist te krijgen. Het verslag van deze bijeenkomst is weergegeven in [Berg, van den, 2013].

De volgende deelnemers zijn aanwezig geweest en hebben deelgenomen aan de discussie:

Martin van de Meer (Fugro), Jan Tigchelaar (HH Delfland), Rob van Putten (Waternet), Rutger Krans (Rijkswaterstaat), Joost van der Hammen (Rijkswaterstaat), Frans van den Berg, Goaitske de Vries, Paul Schaminee en André Koelewijn (allen Deltares).

Aan het einde van deze bijeenkomst werd geconcludeerd dat de onderhavige rapportage op de goede weg is. Uit de expertmeeting zijn waardevolle adviezen naar voren gekomen die in deze rapportage zijn opgenomen.

Na deze rapportage zullen er ook vervolgstappen worden genomen om de ontwikkelde monitoringsfilosofie binnen Rijkswaterstaat te implementeren.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 zal de monitoringsfilosofie worden behandeld. In hoofdstuk 3 zal nader worden ingegaan op de systematische opzet en de uitvoering van de monitoring. Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de verschillende proeftuinen en in hoofdstuk 5 zal de digitale delta aan bod komen. De rapportage wordt afgesloten met een samenvatting en conclusies in hoofdstuk 6.

2 Monitoringsfilosofie

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt een algemene monitoringsfilosofie voor Nederlandse dijken. Dit omvat méér dan alleen doordacht meten: een doordacht ontwerp, juiste verwerking van de meetgegevens en zonodig passende vervolgacties behoren daar eveneens toe.

Eerst wordt in een aantal paragrafen ingegaan op de hier gehanteerde definitie van monitoren (§2.2), de cruciale vraag 'Waarom monitoren?' (§2.3), onzekerheden in de veiligheidsbeoordeling (§2.3), de mogelijke positie van monitoring in de keten van ontwerpen, toetsen en versterken (§2.5), de positie in vigerende leidraden en technische rapporten (§2.6) en de mogelijkheden voor inpassing van monitoring in het toetsingsproces zoals reeds verwoord in [Koelewijn, 2011] (§2.7).

2.2 Definitie van monitoren

Monitoren wordt hier gedefinieerd als het geheel van tijdsafhankelijke, waar nodig herhaalde metingen aan een constructie en de verwerking daarvan, om indien nodig tot onderbouwde wijzigingen ten aanzien van de constructie, het beheer ervan of de monitoring zelf te kunnen besluiten.

Deze definitie is bewust ruim gekozen, zodat er ook elementen als grondonderzoek (veelal beschouwd als eenmalig, maar zeker in het geval van een dik slappe-lagenpakket en een omvangrijke ophoging kan na enige tijd herhaling zeer nuttig zijn) en visuele inspecties¹ onder vallen. Monitoren is nadrukkelijk niet beperkt tot alleen instrumentatie, omdat dit zou leiden tot een inefficiënte beperking van de mogelijkheden om bruikbare waarnemingen te doen.

2.3 Waarom monitoring?

Monitoring dient te worden ingezet om specifieke vragen ten aanzien van de constructie te beantwoorden; in het algemeen leidt dit tot verkleining van onzekerheden. Dit vergt uiteraard een goede analyse vooraf van het te verwachten gedrag van de constructie onder uiteenlopende omstandigheden. De inzet van instrumentatie (of visuele inspectie) dient hierop te worden gebaseerd. Als er geen vraag is, dan zou instrumentatie ook overbodig moeten zijn [Dunncliff, 1993, 1999]. Wanneer er wel een vraag is, dan moet beoordeeld worden welke vorm van monitoring geschikt is om die vraag op een doelmatige wijze te beantwoorden. Met de metingen kan vervolgens de analyse op regelmatige tijdstippen en bij bijzondere omstandigheden worden geactualiseerd.

2.4 Onzekerheden in de veiligheidsbeoordeling

Bij de beoordeling van de veiligheid van dijken moeten onvermijdelijk aannames worden gedaan over de te hanteren parameters. Het belastingverloop is niet op voorhand bekend, evenmin als de precieze samenstelling van de dijk en de ondergrond en het gedrag onder extreme omstandigheden. De gedane aannames behoren aan de conservatieve kant te zijn, zodat een betere kennis van de werkelijkheid *over het algemeen* niet leidt tot onaangename verrassingen (of het ten onrechte net goedkeuren van een onveilige situatie), maar juist resulteert in een gunstiger uitkomst. Soms is de uitkomst echter dat de veiligheid kleiner is dan eerder werd aangenomen.

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

Deze aanpak levert enerzijds een 'beloning' voor het uitvoeren van aanvullend onderzoek en metingen, anderzijds biedt het een bescherming tegen de gevolgen van onwetendheid. Met de werkwijze waarbij al te ongunstige uitkomsten van de veiligheidsbeoordeling op basis van weinig gegevens worden vermeden, bestaat er echter ook de mogelijkheid dat de omstandigheden of het gedrag te gunstig zijn ingeschat. Ook het risico van een te optimistische inschatting wordt verkleind door onderzoek en metingen.

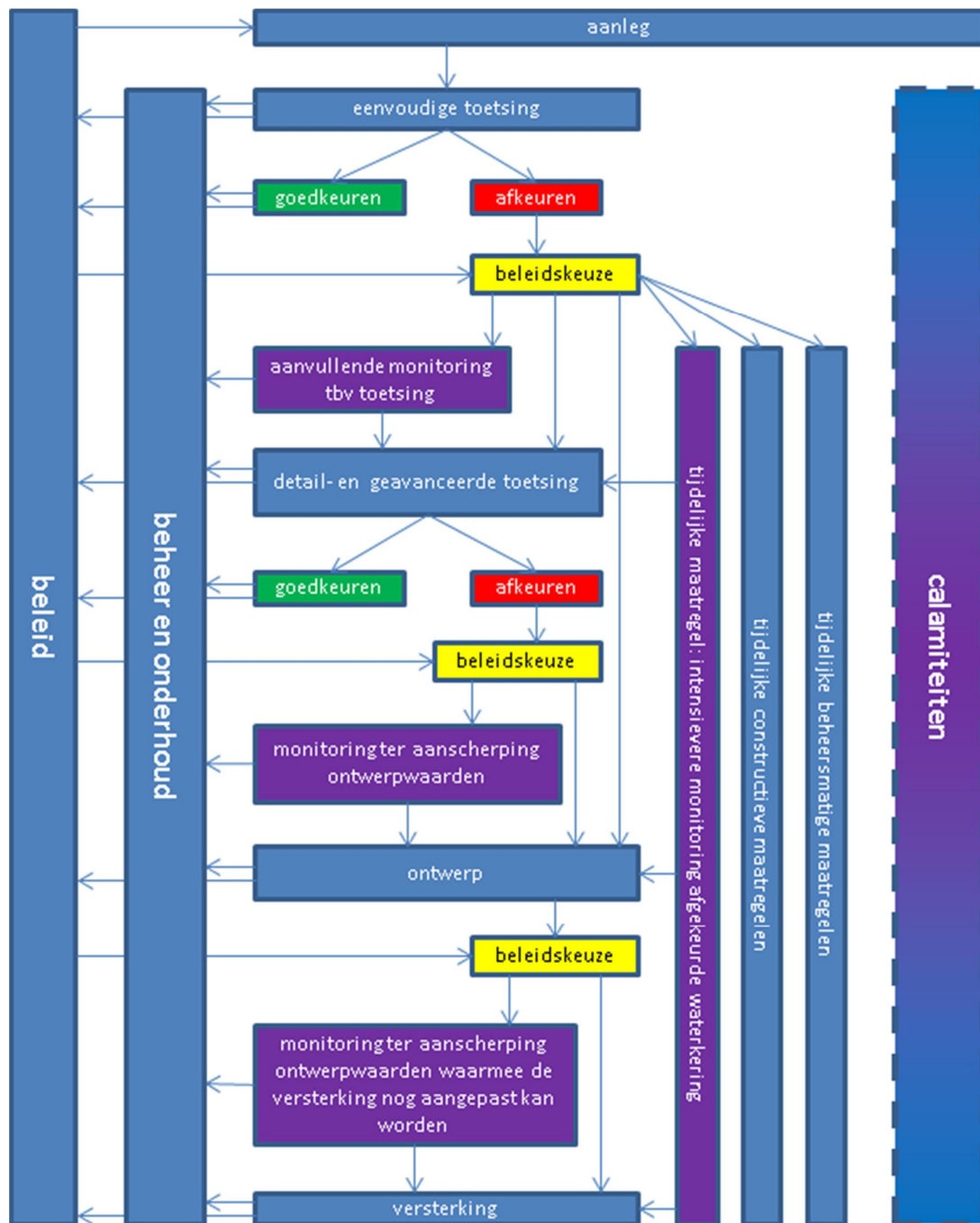
De onzekerheden in de veiligheidsbeoordeling zijn met name te vinden in:

- De te hanteren waterpeilen (onzekerheid in maatgevend hoogwater (MHW) en andere peilen aan de 'bedreigende' kant van de dijk, anderzijds enige onzekerheid ten aanzien van het slootpeil).
- De opbouw van de ondergrond (laagopbouw, aanwezigheid en verloop van geulafzettingen).
- De eigenschappen van de grondlagen (volumegegewicht, sterkte, doorlatendheid).
- De waterspanningen in de dijk en in de ondergrond (ligging freatische lijn, gevoeligheid voor peilwisselingen in zandlagen en doorwerking van peilwisselingen in klei- en veenlagen, wateroverspanningen ten gevolge van consolidatie en kruip – met name bij dijkverzwaringen).
- De bovenbelasting.
- De modellering van de sterkte in de rekenmodellen.

Kwantificering en reductie van deze onzekerheden is mogelijk door een samenhangend geheel van metingen en modellen.

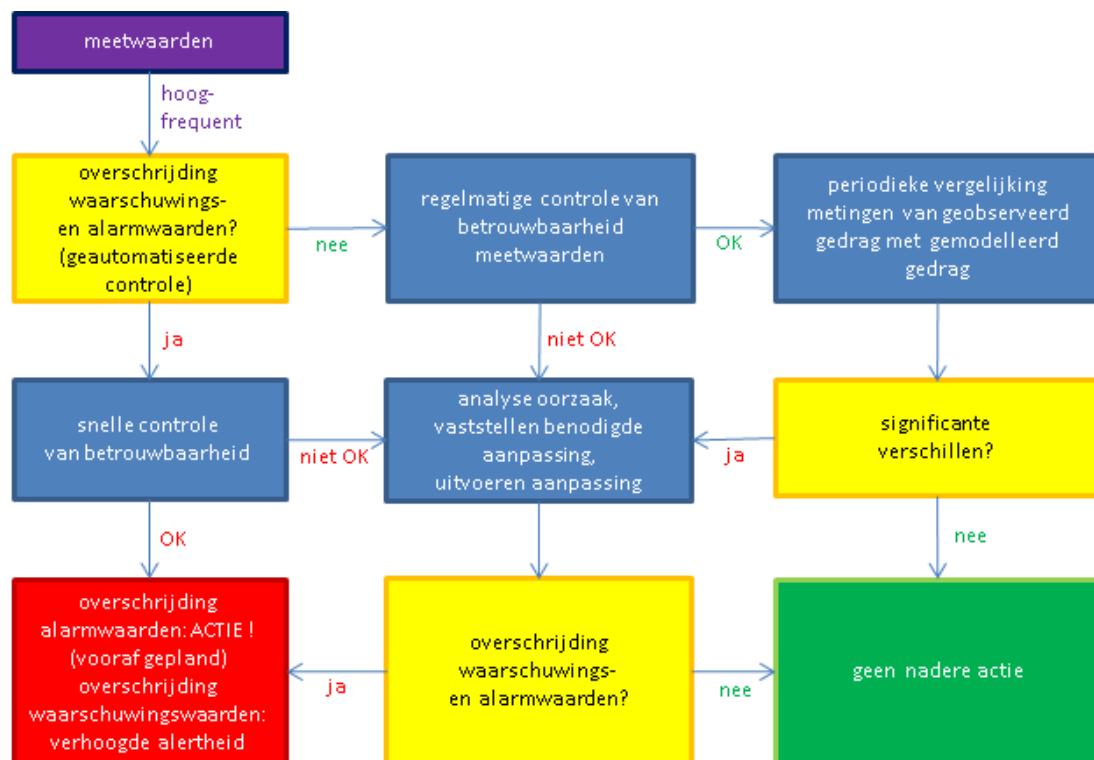
2.5 Positie van monitoring in keten van toetsen, ontwerpen, versterken en onderhouden

Het volgende schema (Figuur 2.1) illustreert de positie van monitoring in een cyclus van voortdurende verbetering – zoals het Nederlandse systeem van waterkeringen, met periodieke toetsing en versterking en slechts zelden de aanleg van een nieuwe waterkering, kan worden beschouwd. Het schema begint voor een dijk die al enige tijd bestaat, met een inschatting van de initiële conditie en verwachtingen omtrent de sterkte en belastingen op de dijk. Hieruit volgt een prognose van het gedrag. Combinatie hiervan met metingen van de sterkte (bijvoorbeeld grond- en laboratoriumonderzoek) en metingen van belastingen (bijvoorbeeld waterstanden en waterspanningen) leidt via een interpretatiemodel tot (verwacht) geobserveerd gedrag. Na (periodieke) analyse levert dit inzicht in de actuele conditie en een geactualiseerde prognose van het gedrag, waaruit ook volgt of de dijk voldoende veilig is of niet. Zo niet, dan is al dan niet ingrijpend onderhoud of versterking noodzakelijk. In alle gevallen wordt doorgesamen met monitoring, al kan de intensiteit van de monitoring uiteraard wel worden aangepast, bijvoorbeeld tot enkel de jaarlijkse inspectie. Een concrete verbinding met calamiteiten wordt niet gelegd in het schema, maar kan in feite op elk moment optreden.



Figuur 2.1 Veiligheidsbeschouwing voor geïnstrumenteerde dijken in een cyclus van voortdurend meten, regelmatige analyse en periodieke versterking

De analyse kan mede leiden tot waarschuwings- en alarmwaarden voor (combinaties van) meetwaarden. Deze kunnen worden toegevoegd aan het interpretatiemodel, opdat indien nodig snel actie kan worden ondernomen bij geconstateerde over- (of onder-)schrijding van deze waarden, zonder dat eerst een hernieuwde analyse hoeft plaats te vinden. Dit kan ten dele worden geautomatiseerd, om tijdverlies in dergelijke situaties te vermijden. Een mogelijk stroomschema daarbij is aangegeven in Figuur 2.2.



Figuur 2.2 Handelingsschema voor beoordeling van meetwaarden in het kader van monitoring.

Monitoren is zinvol wanneer hiermee de onzekerheden in de berekende belasting en sterkte (en daarmee de veiligheid) kunnen worden verkleind, zodat uiteindelijk kosten kunnen worden bespaard zonder afbreuk te doen aan de veiligheid. Dit kan in verschillende fasen en voor verschillende toepassingen gebeuren:

1. Bij aanleg/versterking: om het gedrag van dijk en ondergrond vast te stellen tijdens de uitvoering tot aan de oplevering, bijvoorbeeld het zettings- en consolidatieverloop en gemeten waarden te kunnen vergelijken met ontwerpwaarden. De bedoelde robuustheid van het ontwerp, of het gebrek daaraan, wordt hiermee tijdens de uitvoering aangetoond: de aannamen bij het ontwerp kunnen worden getoetst. Bij toepassing van innovaties helpt monitoring om de werking hiervan aan te tonen. Voortzetting van (een deel van) de uitvoeringsmonitoring zal deze onderbouwing verder kunnen versterken.
2. Ten behoeve van de toetsing: om onzekerheden te verkleinen, bijvoorbeeld ten aanzien van stijghoogten, ligging freatische lijn of laagscheidingen. Dit genereert een robuuste opgavebepaling.
3. Na afkeuring van dijken in de toetsing (eventueel al bij de eerste niet-goedkeuring bij de zogenaamde 'eenvoudige toets'): opnieuw om onzekerheden te verkleinen - afkeuren is al mogelijk op basis van betrekkelijk summiere informatie, echter voor een robuust, maar sober uitgevoerd ontwerp is veel gedetailleerdere informatie nodig, waarbij langere in-situ meetreeksen van grote waarde kunnen zijn. Het is daarom van groot belang om meteen na afkeuren al over te gaan tot de opzet (of herziening) van een monitoringssysteem gericht op een goed ontwerp. Daarnaast zal een dergelijk monitoringssysteem van pas kunnen komen in situaties met een significante belasting.
4. Als hulpmiddel bij het beheer: ondersteund door ten dele geautomatiseerde monitoring kan de frequentie van dijkinspecties worden teruggebracht en kunnen deze bovendien

- gerichter plaatsvinden, ook het dagelijks onderhoud, de controle daarop (de schouw) en de kwaliteit en eventuele frequentie van de inspectie kunnen hiermee worden verbeterd.
5. Als hulpmiddel bij het beleid; systematische monitoring (inclusief het vastleggen en ontsluitbaar houden van de data) levert op objectieve wijze inzicht in de sterke en zwakke delen van de dijk over langere afstanden, waarmee het beleid op langere termijn geoptimaliseerd kan worden, waarmee adequaat 'life cycle asset management' mogelijk wordt.
 6. Als waarschuwingssysteem bij calamiteiten. Een systeem van 'continu toetsen' op basis van monitoringsdata zou al bijdragen tot een actueel beeld van de sterke en vooral zwakke plekken, wanneer de monitoringsdata in real-time verwerkt kan worden en gecombineerd kan worden met voorspellingen voor parameterwaarde-ontwikkelingen op de korte termijn, dan is een actueel inzicht in het veiligheidsniveau mogelijk. Dit laatste vereist over het algemeen wel aanvullende voorzieningen met betrekking tot datacontinuïteit en doorgifte van data – storingen in dataverkeer hangen immers ten dele samen met extreme omstandigheden. Ook geldt dat een alarm alleen zinvol is wanneer er nog voldoende tijd is om te handelen en de omstandigheden zich daar nog toe lenen. Daarentegen geldt ook dat alarmeringen en waarschuwingen dusdanig beperkt moeten worden afgegeven dat het systeem in het gebruik hanteerbaar blijft [Tigchelaar, 2012].

Het benutten van de in één fase opgedane kennis voor andere fasen vergroot de waarde en verhoogt de efficiency. Koppeling van datastromen kan het inzicht verbeteren. Bijvoorbeeld de constatering van een drassige binnentoeen bij het dagelijks beheer kan de interpretatie van waterspanningsmetingen versterken, omgekeerd kunnen metingen leiden tot meer gerichte inspecties. In alle gevallen gaat het om verkleining van onzekerheden in de berekende dijksterkte door meten: "meten is weten". Alleen al vanwege de heterogeniteit van de ondergrond is een onzekerheidsmarge noodzakelijk, maar deze kan wel worden verkleind door doelgerichte metingen, bijvoorbeeld van waterspanningen of grondwaterstroming.

Zo is het in de zesjaarlijkse veiligheidstoetsing van de primaire waterkeringen bijvoorbeeld verplicht om in veel situaties een marge van 0,5 tot 0,8 meter te hanteren ten aanzien van de ligging van de freatische lijn [TAW, 2004]. Langdurige monitoring, voornamelijk onder 'dagelijkse' omstandigheden (en dus met relatief weinig intensieve belastingen, zoals extreme neerslag of hoogwater), zal in combinatie met een passende analyse een onderbouwing kunnen geven van een passende, mogelijk kleinere, marge voor de toetsing bij maatgevende omstandigheden. Het spreekt vanzelf dat de metingen zelf dan wel met een geringe onnauwkeurigheidsmarge moeten worden uitgevoerd. Dergelijke metingen leveren bovendien een betrouwbaarder beeld van het niveau van de freatische lijn dan een eenmalige meting of een korte meetreeks van bijvoorbeeld twee weken.

Een monitoringsstrategie kan erop gericht worden om significante onzekerheden te verkleinen. Wanneer de onzekerheden echter gering zijn voor die aspecten waar monitoring tot meer zekerheid kan leiden, dan is die monitoring over het algemeen ook niet zinvol (zie ook §2.3).

2.6 Positie van monitoring in vigerende leidraden en technische rapporten

In de vigerende Leidraden en Technische Rapporten bestaat sinds kort wat meer aandacht voor de meerwaarde van metingen. Dit komt bijvoorbeeld tot uitdrukking in de schematiseringsfactor, een partiële veiligheidsfactor waarmee recht gedaan kan worden aan de hoeveelheid kennis (of juist het gebrek daaraan) over parameters die van invloed zijn op de sterkte van een bepaald dijktraject, zoals de waterspanningen (en de onzekerheid

daaromtrent) en de dikte van verschillende grondlagen. Meer kennis leidt daarbij tot een gunstiger factor [Calle, 2011].

In de meeste, merendeels wat oudere Leidraden en Technische Rapporten gericht op de sterkte van dijken wordt aan metingen slechts sporadisch enige aandacht gegeven, zoals bijvoorbeeld in de Handreiking Constructief Ontwerpen uit 1994 [TAW, 1994ab]. Doorgaans wordt er echter wel ruimte gelaten voor het toepassen van gunstiger omstandigheden “indien de beschikbare kennis daartoe mogelijkheden geeft”, een wat vage omschrijving waarmee detailkennis op basis van metingen kan worden ingebracht. Ook ontbreekt het in de bestaande rapporten nog aan een waarderingsmaat voor de duur van de meetreeks: voor het benedenrivierengebied lijkt één 13-uursmeting ter bepaling van de respons van de waterspanningen onder de binnentee van de dijk op de variërende buitenwaterstand even waardevol te worden geacht als metingen gedurende twee weken of gedurende drie jaar.

2.7 Mogelijkheden voor inpassing monitoring in toetsing

Eind 2011 kon geconstateerd worden dat er voldoende mogelijkheden leken te zijn om monitoringsresultaten te gebruiken in de toetsing [Koelewijn, 2011]: “de ruimte is er in principe.” Voordat er echter uitgewerkte ‘recepten’ zullen liggen voor een breed scala aan meetmethoden en bruikbaar voor alle faalmechanismen zal er echter nog wel enige ervaring mee moeten worden opgedaan en zal er voor diverse aspecten nog gericht onderzoek uitgevoerd moeten worden. Aspecten waar toen geen of onvoldoende duidelijkheid over bestond, betreffen:

- Criteria om de waarde van een meetreeks vast te stellen (mede afhankelijk van de absolute tijdsduur, meetfrequentie, kwaliteit van de metingen en de voorgekomen gebeurtenissen zoals betrekkelijk hoge buitenwaterstanden).
- Richtlijnen om de evenwichtigheid van de beschikbare gegevens te bepalen en te kunnen waarderen.
- Mogelijkheden om aanvullende (of ‘zachte’) data op objectieve wijze in te passen, zoals vanuit remote sensing
- Hoe om te gaan met vervormingsmetingen – indien er plastische vervormingen zijn opgetreden (en dat is in grond al snel het geval), dan is er in het algemeen geen eenduidige oorzaak meer aan te geven voor het waargenomen verplaatsingsveld, waardoor de potentiële waarde van dergelijke metingen geringer lijkt te zijn dan die van waterspanningsmetingen, welke bovendien vaak direct als invoerparameter in modellen toegepast kunnen worden – zie §3.22.
- Vaststelling van de werkelijke meeton nauwkeurigheid, waarbij zowel de absolute onnauwkeurigheid, bijvoorbeeld ten opzichte van een referentiepeil, als de relatieve onnauwkeurigheid ten opzichte van eerdere metingen met hetzelfde instrument danwel ten opzichte van andere instrumenten – zie §3.18 en §4.3.
- De mate van representativiteit van een gering aantal meetpunten; wanneer zijn er voldoende meetpunten? En in hoeverre is dit afhankelijk van de grondopbouw? – zie §4.3.
- Specifiek voor de detectie van grondwaterstroming en piping met behulp van temperatuurmetingen is de vraag welke nauwkeurigheid vereist is, met name bij relatief snel veranderende waterstanden – zie Bijlage B Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing (DTS).

Een ander aspect betreft de koppeling van meetdata met fysische modellen, waardoor de extrapolatie van bekende omstandigheden naar maatgevende omstandigheden beter onderbouwd kan worden, bijvoorbeeld door het calibreren van modelparameterwaarden op

basis van beschikbare meetreeksen. Een voorbeeld hiervan is het programma 'DikeTool', waarvan in 2011 door Deltares een prototype is ontwikkeld binnen het onderzoeksprogramma Flood Control 2015 en waarmee vooralsnog grondwaterstromingsparameters kunnen worden bijgesteld. In 2012 is dit doorontwikkeld voor piping en macrostabiliteit.

In het verlengde hiervan ligt het vaststellen van eenduidige (sets van) waarschuwings- en alarmwaarden voor de meetwaarden van (groepen van) sensoren, zodat bij overschrijding snel kan worden ingegrepen.

Met het uitwerken van de voornoemde punten zijn niet meteen alle vragen opgelost. Een voorbeeld van een kwestie waar in het verleden slechts een voorlopig antwoord op is geformuleerd, betreft de respons van de waterspanningen in een watervoerend pakket onder en achter de dijk dat in contact staat met het buitenwater. Zoals in het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken [TAW, 2004] beschreven staat, kan op basis van een korte meetreeks al een inschatting worden gemaakt van de zogenoemde dempingsfactor: de mate waarin de verandering van de buitenwaterstand gevolgd wordt. De dempingsfactor heeft echter geen constante waarde, maar anders dan in [TAW, 2004] verondersteld wordt, is deze onder meer afhankelijk van aanslibbing en erosie van de waterbodem. Erosie op bijvoorbeeld een rivier vindt met name plaats bij perioden met hoge tot zeer hoge afvoeren, daarbuiten vindt vooral aanslibbing plaats. Wanneer de afvoeren in een reeks van jaren tamelijk bescheiden zijn, dan zal op basis van metingen geleidelijk een steeds lagere dempingsfactor kunnen worden vastgesteld. Regelmatige actualisering van de eigenschappen van de gebruikte modellen, onder andere voor grondwaterstroming, tot kort voor een hoogwater zal hiermee tot een lage waarde van de dempingsfactor leiden. Wanneer vervolgens bij hoogwater significante erosie plaatsvindt, zal juist een hoge dempingsfactor van toepassing zijn, hetgeen een (zeer) ongunstig effect heeft. Bij een adequate fysische modellering, in bijvoorbeeld de eerder genoemde doorontwikkeling van 'DikeTool', kan vooraf een inschatting van de invloed hiervan worden gemaakt, zodat bijvoorbeeld de toetsing met een juiste (hoge) waarde voor deze dempingsfactor kan worden uitgevoerd. Analooq hieraan zullen er meer aspecten zijn waarbij deze nieuwe ontwikkelingen tot een betrouwbaarder analyse kunnen leiden dan de huidige praktijk.

Met de reeds beschikbare monitoringsdata uit diverse projecten is voor de meeste van de hiervoor genoemde vragen een voorlopig danwel meer definitief antwoord te krijgen. Ook zal hiervoor gebruik kunnen worden gemaakt van ontwikkelingen binnen de huidige nHWBP- en WTI-programma's en het Toetsinstrumentarium 2018.

Voor de implementatie in de praktijk moet dan verder nog worden gedacht aan aspecten als:

- Betrouwbare doorgifte van gegevens.
- Tijdige signalering en respons op waarschuwings- en alarmwaarden.
- Inbedding van monitoring in de beheerpraktijk (opleiding en training van medewerkers, overdracht van kennis naar volgende generaties, technische ondersteuning en organisatorische inbedding).

Met name het laatste aspect, de organisatorische inbedding, zou in de praktijk nog veel aandacht kunnen vergen.

3 Systematische opzet en uitvoering van monitoring

3.1 Inleiding

Monitoring komt uiteindelijk het meest tot zijn recht wanneer dit op systematische wijze wordt opgezet en uitgevoerd, ingebed in de organisatie en in overeenstemming met de doelen die worden nagestreefd. In dit hoofdstuk wordt een handreiking gegeven voor een systematische omgang met monitoring gedurende de gehele levenscyclus van een waterkering. Daarmee is het ook bruikbaar als middel ter ondersteuning van asset management.

Monitoring levert informatie op over het gedrag van een constructie. Dit is niet alleen van belang voor het aspect waarvoor specifiek gemonitord werd, maar ook voor andere aspecten. Zo kan de meting van waterspanningen in de ondergrond van een dijk gedurende enkele weken leiden tot afkeuren van de dijk binnen de toetsing. Dit heeft niet alleen gevolgen voor de uitkomst van de betreffende toetsronde, maar ook voor het beheer: er zal eerder en vaker geïnspecteerd moeten worden bij ongewoon hoge buitenwaterstanden. Ook is de verkregen informatie van belang voor het ontwerp van een toekomstige versterking. Daar kan op worden geanticipeerd door meer en langduriger metingen te verrichten, om zo de respons scherper in beeld te krijgen.

Omgekeerd kan de observatie van het probleemloos doorstaan van een extreme belasting (bijvoorbeeld extreme neerslag na een natte periode) vanuit het beheer een gunstige invloed hebben op het beheer (eventueel verlaging van de inspectiefrequenties) en op de toetsing.

Dit hoofdstuk is in belangrijke mate gebaseerd op de handreiking voor monitoring van met name bouwputten door Dunnicliff in 1988 en de aanvullingen daarop [Dunnicliff, 1993, 1999], de in het kader van Delft Cluster ontwikkelde HerMes monitoringsfilosofie [Koelewijn, 2001], langjarige ervaringen met monitoring bij stuwdammen [Broderick & Marr, 2012] en de opgedane ervaringen met monitoring, vooral met betrekking tot dijken (zie ook hoofdstuk 4). Het is toegespitst op de Nederlandse praktijksituatie bij waterkeringen.

3.2 Projectafbakening

De projectafbakening betreft zowel de ruimtelijke begrenzing als de afbakening in de tijd, het budget en de reikwijdte binnen de organisatie.

Dit wordt in veel gevallen betiteld als een overbodige stap, maar is vereist om bij alle betrokkenen dezelfde verwachtingen te krijgen. Ook is het zinvol voor degenen die nieuw betrokken raken bij een project.

Vanuit de inhoud is een heldere ruimtelijke begrenzing van belang bij zogenaamde 'verborgen waterkeringen', zoals keringen in een grootstedelijke omgeving en delen van de ondergrond die niet zichtbaar bijdragen aan de veiligheid (zoals meestal een gedeelte van het achterland voorbij de teen van de dijk voor het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit, of een slecht-doorlatende grondlaag voor het faalmechanisme opbarsten en piping – doorgaans zijn deze wel opgenomen binnen de keurgrenzen of leggerzonering).

3.3 Verzameling van historische gegevens

Relevante historische gegevens betreffen ontwerpdocumenten, as built-tekeningen, eerdere waarnemingen, resultaten van veld- en laboratoriumonderzoek, historisch kaartmateriaal en gegevens over bijzondere gebeurtenissen in het verleden, zoals dijkdoorbraken.

Historisch kaartmateriaal kan informatie verschaffen over de variabiliteit van de ligging van de waterkering, hetgeen ook indicatief is voor de variabiliteit van de ondergrond. Reeds lopende monitoring valt hier ook onder.

Sommige informatie heeft onder bepaalde omstandigheden slechts een beperkte houdbaarheid, bijvoorbeeld de uitkomsten van een boring in een gebied met een dik slappe-lagenpakket enige jaren na een flinke ophoging. Niet alleen de actuele maaiveldligging zal zijn veranderd, evenals de hoogte van het oorspronkelijke maaiveld, maar ook de eigenschappen van de slappe lagen, zoals volumegegewicht, watergehalte en doorlatendheid.

3.4 Vaststellen van de maatgevende belastingen

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, het polderpeil en eventuele belastingen die samenhangen met een bijzondere situatie ter plaatse.

3.5 Identificatie maatgevende faalmechanismen

Een waterkering kan alleen bezwijken door een faalmechanisme: een keten van gebeurtenissen die leidt tot verlies van de waterkerende functie. Overigens kan er ook al aanzienlijke schade optreden wanneer deze keten zich niet geheel doorzet. Omwille van bijvoorbeeld de ontsluitingsfunctie worden dan ook vaak aanvullende eisen gesteld die bijvoorbeeld scheurvorming in een weg op de dijk moeten tegengaan.

De gangbare faalmechanismen zijn beschreven in de toetsingsvoorschriften voor dijken en kaden [V&W, 2007, V&W, STOWA, 2007, 2010]. Daarnaast zijn in uitzonderlijke gevallen ook andere faalmechanismen mogelijk, zoals suffosie (dit is de uitspoeling van fijn materiaal bij sterk gegradeerd zand en grind, leidend tot verdere erosie en instorten). Ook de afschuiving bij Wilnis in 2003 verliep volgens een lange tijd onmogelijk geacht faalmechanisme [van Baars, 2005, Bezuijen et al., 2005].

Voor een concrete situatie zullen de maatgevende faalmechanismen over het algemeen al bij de toetsing zijn geïdentificeerd. Toch blijken daarbij wel eens faalmechanismen over het hoofd te worden gezien, bijvoorbeeld door een verward hanteren van de toetsvoorschriften als 'receptenboek'. Zo is slechts enkele jaren geleden bij een zeedijk daardoor een tamelijk acuut risico op zettingsvloeiing niet onderkend: de toets op zettingsvloeiing is in [V&W, 2007] namelijk opgenomen in de katern 'Voorland' en van een voorland was in de gegeven situatie inmiddels geen sprake meer, zodat alles wat in die katern is opgenomen als irrelevant werd beschouwd en de toets op dat onderdeel niet werd uitgevoerd.

Ook bij overgangen van het ene type waterkering op het andere is maatwerk geboden en kan een benadering zoals die standaard gehanteerd wordt door het US Army Corps of Engineers uitkomst bieden: een situatiegebonden analyse door (vak)experts en (situatie)deskundigen hoe het mogelijk is om tot bezwijken te komen, waarbij dan bijvoorbeeld de invloed van verzakkingen en de vorming van kleine spleten uiteindelijk fataal kan worden. Een complicerende factor kan namelijk zijn dat bepaalde faalmechanismen mede als inleidend faalmechanisme voor andere faalmechanismen kunnen dienen, zo kan bijvoorbeeld piping op zichzelf leiden tot falen, maar het kan ook leiden tot een afschuiving (binnenwaartse macrostabiliteit).

3.6 Identificatie maatgevende parameters

Uit de maatgevende faalmechanismen kunnen de fysische parameters worden afgeleid die maatgevend zijn voor falen, evenals de locatie waar deze parameters het meest van belang zijn in met name de initiatiefase van falen. Met behulp hiervan is tijdige detectie en eventueel ingrijpen mogelijk.

Voor bijvoorbeeld macrostabiliteit zijn waterspanningen en vervormingen in en onder de kern van de dijk maatgevend. Voor piping is dit zandtransport en voor golfoverslag het overslaand debiet en stroomconcentraties bij knikken en obstakels in het binnentalud.

3.7 Keuze monitoringstrategie

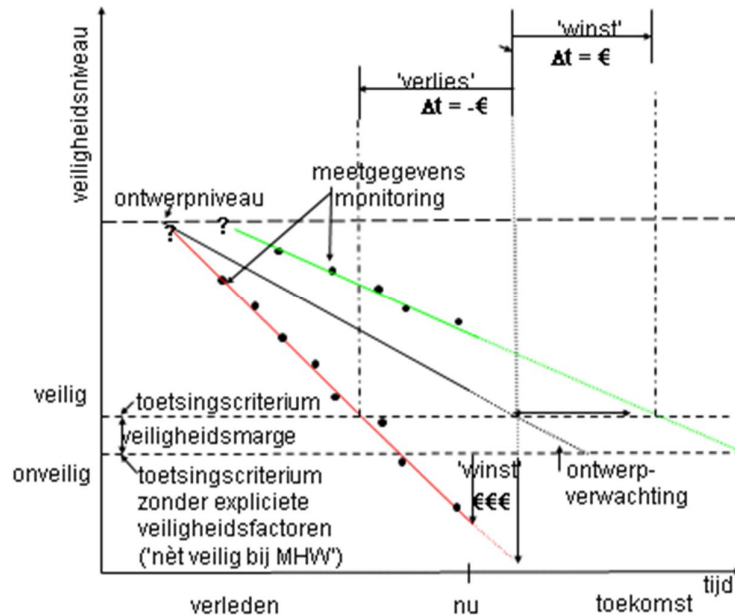
De keuze van de monitoringstrategie is in hoge mate bepalend voor de uitwerking en is voor een deel niet los te zien van de gehanteerde ontwerpfilosofie en de intensiteit van het onderhoud. In het algemeen kan gesteld worden dat voor de Nederlandse waterkeringen wordt gestreefd naar een situatie met voldoende veiligheid tegen zo laag mogelijke totale kosten. Er zijn echter verschillende keuzemogelijkheden, mede omdat de relatie tussen veiligheid en de gepleegde inspanning op het gebied van onder andere aanleg, onderhoud en monitoring niet altijd op eenzelfde manier gelegd 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. De monitoring is vereist om te bepalen of het vereiste veiligheidsniveau nog steeds behaald wordt. Bij het (qua kosten) andere ontwerp is er sprake van betrekkelijk lage uitvoeringskosten, maar meestal hoge onderhoudskosten en matig tot hoge kosten voor monitoring. Dan is de monitoring mede nodig om de effecten van het onderhoud te bepalen en eventueel te optimaliseren, maar ook om het veiligheidsniveau te kunnen aantonen.

In Figuur 3.1 is het veiligheidsniveau van een waterkering in de loop van de tijd aangegeven, met daarin het ontwerpniveau – ruim boven het toetsingscriterium en de veiligheidsmarge die vereist is vanwege het onvermijdelijke tijdsverloop tussen afkeuren in de periodieke toetsing en een dijkversterking.

De diagonale lijnen geven de degradatiesnelheid aan, d.w.z. de snelheid waarmee de veiligheid van de waterkering in de loop van de tijd afneemt, bijvoorbeeld ten gevolge van zwaardere hydraulische belastingen. In het ontwerp bestaat daarvoor een bepaalde verwachting; iedere waterkering wordt immers met een bepaalde levensduur ontworpen. Dit is aangegeven met de zwarte lijn. Door monitoring, met de bijbehorende analyse, kan het werkelijke veiligheidsniveau worden ingeschat. Hiervoor zijn in Figuur 3.1 twee verschillende scenario's weergegeven: het groene, gunstige scenario en het rode, ongunstige scenario. Uit de metingen aan de kering op een zeker tijdstip, in combinatie met de inschattingen voor het gedrag onder maatgevende omstandigheden, volgt telkens één veiligheidsniveau. Dit is aangegeven met een aantal dikke stippen rondom de groene en rode lijnen (merk op dat een lineair verloop niet vanzelfsprekend, bovendien is deze figuur slechts illustratief en indicatief, omdat de waarden langs de assen niet geconcretiseerd zijn).

Gesteld kan worden dat er in het 'groene scenario' sprake is van potentiële winst door monitoring doordat de degradatiesnelheid lager blijkt te zijn dan voorzien en de volgende dijkversterking kan worden uitgesteld.

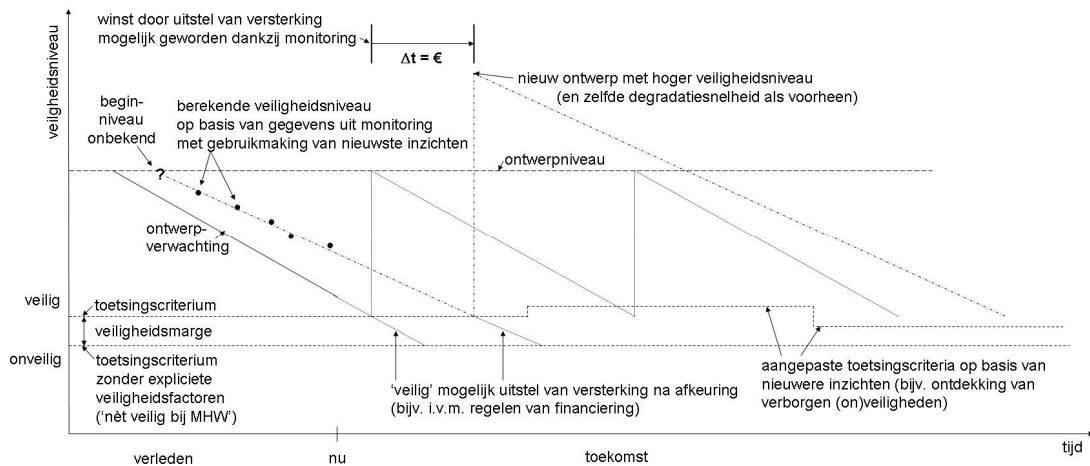


Figuur 3.1 Veiligheidsniveau in de loop van de tijd, met ontwerpverwachting en twee scenario's door monitoring

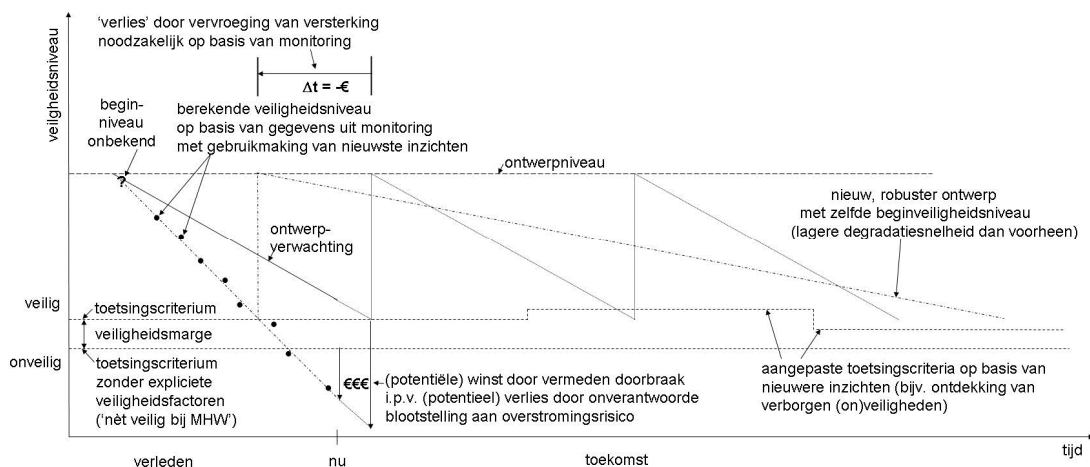
In geval van het 'rode scenario' is een dijkversterking eerder nodig dan gepland, hetgeen als verlies kan worden gezien. Daar staat een veel grotere winst ten gevolge van een vermeden potentiële dijkdoorbraak in de periode dat de kering onveilig zou zijn geweest tegenover.

Een scenario als het groene wordt vaak aangegeven als 'de winst die monitoring bereikt kan worden'. En ook al zal dit scenario vanwege de conservatieve opzet van de toetsingsvoorschriften naar verwachting het vaakst optreden ('meer kennis leidt tot scherper toetsen'), het werkelijke voordeel uit monitoring wordt bereikt door betere kennis omtrent het gedrag van de waterkering, waardoor de kans op onaangename verrassingen verkleind wordt. Dit voordeel wordt zodoende ook behaald wanneer de zwarte lijn volgens de ontwerpverwachting precies uitkomt.

In Figuur 3.2 en Figuur 3.3 zijn de situaties uit Figuur 3.1 gesplitst weergegeven, samen met enkele aanpassingen van de voorwaarden vanuit ontwerp en toetsing. Aanpassing van de toetsingscriteria, bijvoorbeeld door voortschrijdend inzicht met betrekking tot de gehanteerde modellen, kan dan leiden tot sneller of minder snel afkeuren. Bij het ontwerp van een versterking kan, in afwijking van de eerdere situatie, gekozen worden voor een hoger veiligheidsniveau en/of een lagere degradatiesnelheid.



Figuur 3.2 Veiligheidsniveau in de loop van de tijd volgens het gunstige scenario van Figuur 3.1, met enige aanpassingen van de gekozen randvoorwaarden.



Figuur 3.3 Veiligheidsniveau in de loop van de tijd volgens het ongunstige scenario van Figuur 3.1, met enige aanpassingen van de gekozen randvoorwaarden

3.8 Keuze te monitoren parameters

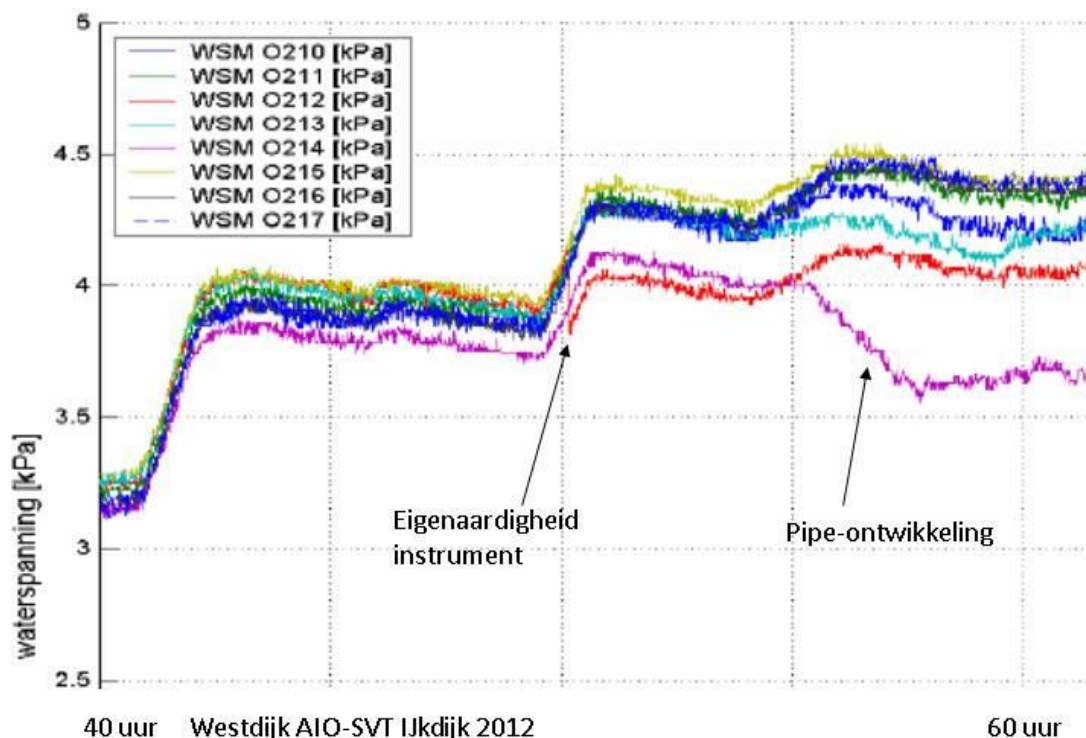
Uit de identificatie van de maatgevende parameters, inclusief de positie, volgt nog niet direct welke parameters op welke plaats het beste gemonitord kunnen worden. Doorgaans is het namelijk efficiënter om een andere parameter op een andere plaats te meten, zonder dat dit wezenlijk ten koste gaat van de beoogde doelen van de monitoring.

Wanneer er meerdere maatgevende faalmechanismen zijn, dan is het noodzakelijk na te gaan in hoeverre deze op elkaar in werken. 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.

Een voorbeeld betreft het faalmechanisme piping en heave. Dit begint bij een dusdanig groot waterstandsverschil over de kering dat de grondwaterstroming aan de landzijde dermate sterk wordt dat gronddeeltjes worden weggespoeld, waarbij het bovendien zo is dat zich onder een cohesieve laag (bijvoorbeeld klei, of ook beton) een opening of 'pipe' kan vormen

die verder groeit naar de andere kant van de dijk, totdat er een doorgaande open verbinding is ontstaan die door verdere erosie uitgroeit tot een groter gat en uiteindelijk een bres. Maatgevend is hier het transport van gronddeeltjes (meestal zand, maar soms ook andere grondsoorten). Directe detectie hiervan met instrumenten is lastig, zeker wanneer de kwelstroom vrij groot is en er veel vegetatie is. Met visuele inspecties kan dit wel worden opgemerkt, maar ook dan kan de zichtbaarheid een probleem vormen voor vroegtijdige detectie (bijvoorbeeld vanwege vegetatie of diep, troebel water). Ook de inspectiefrequentie kan een probleem vormen bij dit faalmechanisme, dat zich vrij snel kan ontwikkelen.

Indirecte metingen van piping zijn mogelijk met waterspanningen of met temperatuur [Koelewijn et al., 2010, van Beek et al. 2011, Bersan et al. 2013]. Een voorbeeld van waterspanningsmetingen waarmee piping kan worden vastgesteld is gegeven in Figuur 3.4. Dit vergt echter een dicht net van goed functionerende waterspanningsmeters: minimaal één per maximaal 2 meter in de lengterichting van de dijk, geplaatst op de juiste diepte (dat wil zeggen in de bovenste meter van de pipinggevoelige laag zelf). Een ander indirecte meetmethode is met behulp van temperatuurmetingen, bijvoorbeeld met behulp van een glasvezelkabel op de juiste diepte in langsrichting van de dijk. Hiermee kan een beeld worden verkregen van de grondwaterstroming en veranderingen daarin. Een concentratie van de grondwaterstroming vormt een indicatie van de aanwezigheid van een pipe, terwijl uit de grondwatersnelheid ter plaatse in combinatie met nadere gegevens over de grond kan worden afgeleid of verdere erosie kan optreden.



Figuur 3.4 Selectie waterspanningsmetingen nabij binnenteen IJkdijk-experiment met piping: geleidelijke terugval in waterspanning correspondeert met ontstaan van een pipe [Koelewijn, 2012]

Een ander voorbeeld betreft het faalmechanisme binnenwaartse macrostabiliteit. Het primaire probleem hierbij is gebrek aan schuifsterkte langs een potentieel glijvlak, bij waterkeringen veelal veroorzaakt door verhoogde waterspanningen en daardoor afname van de

schuifsterkte. Een goede kennis van de bodemopbouw is hierbij van belang, waarbij bedacht moet worden dat soms zeer dunne laagjes maatgevend kunnen zijn, zoals een dunne laag platgeslagen rietveen of een dun laagje Allerød [Zwanenburg et al., 2012]. Dit kan met eenmalig grond- en laboratoriumonderzoek worden vastgesteld en eventueel na enige decennia worden herijkt. Als tijdsafhankelijke variabele, en daarmee een potentieel in de tijd te monitoren parameter, geldt de waterspanningsverdeling in de ondergrond. Deze is van directe invloed op de schuifsterkte. Metingen precies in het glijvlak zijn praktisch niet haalbaar (dat zou een dicht woud aan waterspanningsmeters vereisen), maar met enkele instrumenten in de belangrijkste grondlagen en rekening houdend met de typische lengte van een afschuiving (afhankelijk van de grootte van de dijk en de dikte van het slappe-lagenpakket doorgaans 10 tot 30 meter, bij oprijfcondities oplopend naar meer dan 100 meter) kan een geheel afdoende instrumentatie met behulp van waterspanningsmeters redelijk beperkt blijven – zeker in vergelijking met het voorgaande voorbeeld voor piping en heave. Vaak worden als alternatief aan vervormingen gemeten als indicator van een optredende afschuiving. Dit gebeurt soms in de diepte, maar meestal alleen aan het oppervlakte. Het probleem van deze aanpak is dat er al sprake moet zijn van een initiële afschuiving voordat er vervormingen meetbaar worden. Dit geldt des te sterker wanneer er alleen aan het oppervlak wordt gemeten: de eerste vervormingen langs het schuifvlak treden doorgaans meer in de diepte op, zoals gemeten bij de dijkvervormingsproef bij Bergambacht [Lindenberg et al., 2002] en een recente proef bij de IJkdijk [Koelewijn, 2012].

De keuze van de te monitoren parameters is zeer belangrijk voor de opzet van een monitoringssysteem. Wanneer bepaalde mechanismen over het hoofd worden gezien en deze later optreden is de kans groot dat deze niet worden gedetecteerd of dat de desondanks gemeten signalen onjuist worden geïnterpreteerd. Eén van de grootste risico's bij monitoring kan zodoende liggen in een onjuist ontwerp van het monitoringssysteem. Als maatregel hiertegen wordt wel voorgesteld om zoveel mogelijk te monitoren en zoveel mogelijk data te verzamelen, maar een betere aanpak lijkt te vinden in een goede opzet van de monitoring en een tijdige review van het monitoringsplan, waarbij er voldoende gelegenheid wordt geboden aan de reviewer om zich goed in te lezen en in te leven in de situatie.

3.9 Bepaling orde van grootte van veranderingen

Over het algemeen zijn veranderingen van parameterwaarden bepalend voor gedragsveranderingen en is de absolute waarde van minder belang. Bovendien is er qua relevantie een grens aan de grootte van veranderingen: voorbij een zekere waarde doet de grootte van de verandering er niet meer toe, bijvoorbeeld omdat de waterkering dan al lang bezwaken is. Dit kan van invloed zijn op het type meting dat gekozen wordt, of op het type instrument – met sommige meettechnieken is meting van absolute waarden (bijvoorbeeld van de druk) noodzakelijk, terwijl met andere technieken alleen veranderingen gemeten kunnen worden.

3.10 Vaststelling waarschuwings- en alarmwaarden

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 haast onvermijdelijk sprake zal zijn van een analyse achteraf (dus pas als de calamiteit of catastrofe achter de rug is).

Op basis van ontwerp- en toetsingsberekeningen is het mogelijk om grenswaarden te bepalen waarbij extra waakzaamheid of actie is geboden. Dit kunnen zowel minimumwaarden

(ondergrenswaarden) als maximumwaarden (bovengrenswaarden) zijn en het is ook denkbaar dat deze voor verschillende instrumenten ten dele met elkaar samenhangen. 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 §3.15), 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 eerder gemaakt moeten worden.

In het stroomschema in Figuur 2.2 is aangegeven hoe er op snelle wijze actie ondernomen kan worden zonder onnodig paniek te zaaien. Zie hiervoor ook §3.20 en §3.22.

3.11 Bepaling interventiemogelijkheden

In samenhangen met de waarschuwings- en alarmwaarden dient er in deze fase te worden gekeken naar de interventiemogelijkheden wanneer de meetwaarden aangeven dat er mogelijk iets mis is.

Bij het overschrijden van alarmwaarden moet er nog sprake zijn van enig handelingsperspectief, zoals noodmaatregelen of (selectieve) evacuatie. Uiteraard dienen ook dergelijke maatregelen tevoren zijn voorbereid.

Bij het overschrijden van waarschuwingswaarden zouden dergelijke maatregelen nog niet nodig moeten zijn (anders zouden de waarden anders moeten worden gekozen), maar kan afhankelijk van de situatie en de vooruitzichten al wel een deel van de organisatie worden geactiveerd. Ook het bijplaatsen van instrumentatie, intensiveren van visuele inspecties en het repareren van defecte apparatuur kan passend zijn wanneer waarschuwingswaarden worden overschreden. In het laatste geval dient wel zorgvuldig te worden nagegaan wat de oorzaak van het defect is – er kan immers sprake zijn van een ernstige, onvoorziene en/of onopgemerkte situatie die verder kan verergeren.

In [Tigchelaar, 2012] wordt voor een aantal bezweken dijken aangegeven hoeveel tijd er ongeveer verstreken was tussen eenvoudig waarneembare afwijkingen en falen. Dit varieert van minder dan een half uur tot een etmaal, voor verscheidene faalmechanismen (macrostabiliteit, golfoverslag, piping en zettingsvloeiing). Daarin wordt gesteld dat als het mogelijk is om in vier uur tijd een calamiteitenorganisatie in te richten (wat vaak een optimistische aanname zal zijn), het treffen van maatregelen in veel gevallen te laat zou zijn gekomen. Daar is tegenin te brengen dat in een aantal van deze bezwijkgevallen (niet alle!) met moderne technieken afwijkingen al eerder waren geconstateerd. Tijdig ingrijpen zou in die gevallen dan wel mogelijk zijn geweest, mits er snel genoeg zou zijn gehandeld en een stroomschema als in Figuur 2.2 binnen hooguit enkele uren doorlopen zou zijn geweest. Bedacht moet worden dat in zulke gevallen de kans op (achteraf) onterecht alarm slaan natuurlijk wel aanzienlijk is.

Daarnaast wordt in [Tigchelaar, 2012] uiteengezet hoe tijdrovend een uitgebreid monitoringssysteem kan uitpakken indien de waarschuwings- en alarmwaarden niet goed zijn gekozen of indien het systeem veel storingen vertoont.

3.12 Registratie van relevante omgevingsinvloeden

Relevante omgevingsinvloeden betreffen allereerst het weer (deels te registreren via weerstations in de buurt, zonder significant verlies van nauwkeurigheid – voor neerslagmetingen gaat dit echter niet op), verder reguliere maar weinig voorkomende activiteiten als maaien, maar ook vandalisme 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.

3.13 Keuze locaties van metingen

Uit de gekozen monitoringstrategie, de keuze van te monitoren parameters en de analyses die hebben geleid tot de vaststelling van waarschuwings- en alarmwaarden volgt op welke locaties het kenmerkende gedrag kan worden gemeten waarmee de diverse potentiële faalmechanismen kunnen worden gedetecteerd. Daarbij geldt dat één goedgeplaatst instrument veelal meer informatie kan verschaffen dan een reeks ondoordacht geplaatste instrumenten.

In eerste instantie kunnen instrumenten worden aangebracht in de meest zwakke of zwaarst belaste zones². 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.

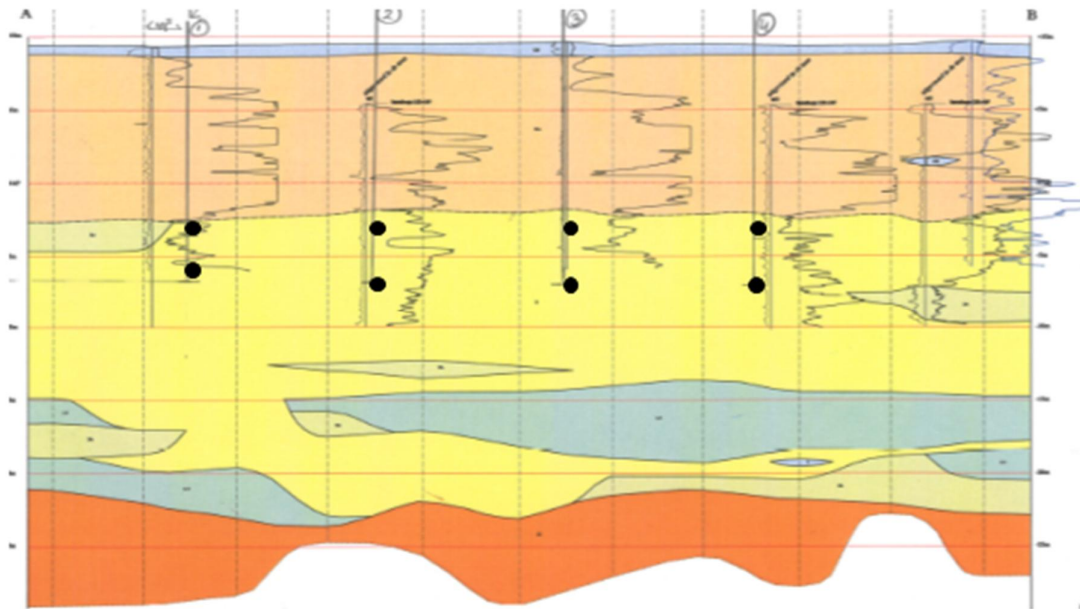
Een concrete invulling van deze aanpak is beschreven in [Koelewijn & Van, 2003].

Een aspect dat van grote invloed is bij de keuze van het aantal meetraaien is de heterogeniteit van de dijk en de ondergrond. Dit is vrij nadrukkelijk naar voren gekomen in de metingen in het project 'LiveDijk Eemshaven' (zie ook §4.3). In Figuur 3.5 is het geotechnisch lengteprofiel weergegeven met de sensorposities van de sensoren die permanent onder water staan (zie ook Figuur 4.2. t/m Figuur 4.4). In Figuur 3.6 zijn de metingen gedurende een periode van twee weken weergegeven.

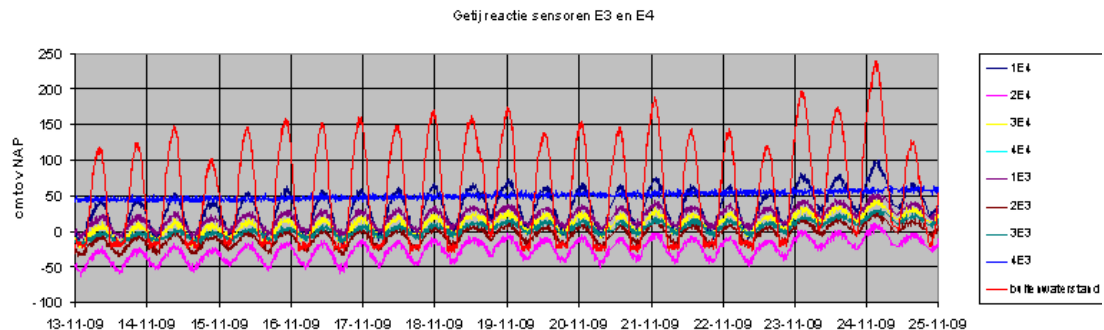
Op het eerste gezicht doet de variatie in de metingen wat merkwaardig aan: deze acht instrumenten zijn immers allemaal in dezelfde zandlaag geplaatst. Aanvankelijk was de belangrijkste kritiek op het meetplan dan ook dat er sprake was van overdreven veel redundantie: op alle acht locaties zou immers vrijwel hetzelfde gemeten worden. Eén sensor bleek defect te zijn, zodat er nog zeven 'identieke' metingen overblijven. Nadere beschouwing van het lengteprofiel met daarin ook de sonderingen nabij de meetraaien laat zien dat er sprake is van aanzienlijke variaties in deze zandlaag, waarschijnlijk een wadafzetting met sliblagen en -laagjes. Dit leidt tot een verschillende respons op de waterstand, waarbij er bovendien sprake zal zijn van een verschillende interne opzet van de waterstand (zie [Barends & van Hoven, 2007]), hetgeen samen met de verticale plaatsingsnauwkeurigheid (zie ook §3.17) de verschillen in het gemiddelde peil verklaart.

Deze metingen laten zien welke variatie kan optreden op ogenschijnlijk identieke locaties, wat ook de vraag oproept in hoeverre het toepassen van slechts één meetinstrument als 'representatieve meting' gerechtvaardigd is.

² of kan Remote Sensing-apparatuur hiervoor worden aangewend.



Figuur 3.5 Geotechnisch lengteprofiel LiveDijk Eemshaven met posities sensoren E3 en E4



Figuur 3.6 LiveDijk Eemshaven: metingen sensoren E3 en E4, en waterstand

3.14 Benoem specifieke doel(en) van ieder instrument

“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” [Dunncliff, 1993, 1999]. Dit vormt het centrale thema in het werk van Dunncliff en is op rationele gronden te verdedigen. 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 ook aan het licht kunnen komen. Overigens kan het bereiken van redundantie of dubbeling van cruciale instrumenten een prima doel zijn voor een instrument.

3.15 Vaststelling verwachtings-, waarschuwings- en alarmwaarden 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. Het onderscheidend vermogen en de detectiesnelheid zijn met name van belang indien de range van verwachte meetwaarden betrekkelijk groot is en relatief weinig verschilt van de

grenswaarden waarbij tot actie moet worden overgegaan. Ook kan de snelheid waarmee veranderingen kunnen optreden tegenover de snelheid waarmee deze gedetecteerd kunnen worden van doorslaggevende invloed zijn bij de concrete selectie van meetmethoden en instrumenten.

3.16 Beschrijf functionele eisen aan de te selecteren instrumenten

Voor de concrete selectie van de benodigde instrumenten is het sterk aan te raden om allereerst functionele eisen te formuleren en het daar eventueel ook bij te laten. 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 zelf betrouwbaar is, het vragen van referenties bij andere opdrachtgevers is raadzaam voor de cruciale onderdelen.

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.

Voor de functionele eisen (en wensen) kan gebruik worden gemaakt van de beoordelingscriteria en –schalen die gebruikt zijn bij de All-in-one sensorvalidatietest van de IJkdijk [de Vries et al., 2013ab] – zie ook §4.7.

Voor de instrumentatie zelf kan de volgende lijst worden gebruikt:

- Meetfrequentie (variërend van vaker dan eens per seconde tot minder dan eens per dag).
- Nauwkeurigheid (variërend van hoog (beter dan 1 promille van de relevante range van parameterwaarden) via laag (slechter dan 10 procent) tot 'slechts aanvullend bij andere metingen').
- Resolutie.
- Reikwijdte (variërend van 3D-meting tot puntmeting).
- Robuustheid (variërend van meerdere oplossingen voor potentiële uitval tot feitelijk ongeschikt voor veldomstandigheden).
- Aanlooptijd (variërend van 'onmiddellijk inzetbaar', via 'operationeel binnen enkele uren/dagen' tot 'meer dan een maand' – dit kan overigens mede afhankelijk zijn van de grondgesteldheid).
- Informatieverwerkingstijd (variërend van 'begrijpelijke data is direct (*real time*) beschikbaar' tot 'er is een bewerkingsslag van x uur/dagen nodig voordat begrijpelijke informatie uit de data beschikbaar is').
- Interpreteerbaarheid (variërend van 'direct interpreteerbare en vergelijkbare grootheden beschikbaar' via 'interpreteerbaar zonder expert' tot 'expert vereist voor interpretatie').

Behalve instrumentatie is ook een systeem vereist waarmee de metingen ontsloten en eventueel geduid kunnen worden. Daaraan kunnen onder meer de volgende eisen worden gesteld:

- Er vindt semi-automatische controle en eventuele correctie van de data plaats, waarbij aanpassingen navolgbaar en corrigeerbaar zijn.
- De beschikbare informatie wordt helder gepresenteerd, met eventueel een verschillend detailniveau afhankelijk van de gebruiker (variërend van inhoudelijk expert tot – eventueel, op een hoog aggregatieniveau – de bestuurder).
- Een koppeling aan voorspellingen van belastingen (weer en waterstanden).
- Overschrijdingen van waarschuwings- en alarmwaarden worden duidelijk weergegeven.
- Er wordt gewaarschuwd als gegevens niet ververs worden en als meetwaarden onwaarschijnlijk lang niet veranderen (bijvoorbeeld een getij-afhankelijke waterstand die enige tijd op hetzelfde peil blijft).

3.17 Stel procedures op ter bepaling van het correct functioneren van de instrumenten

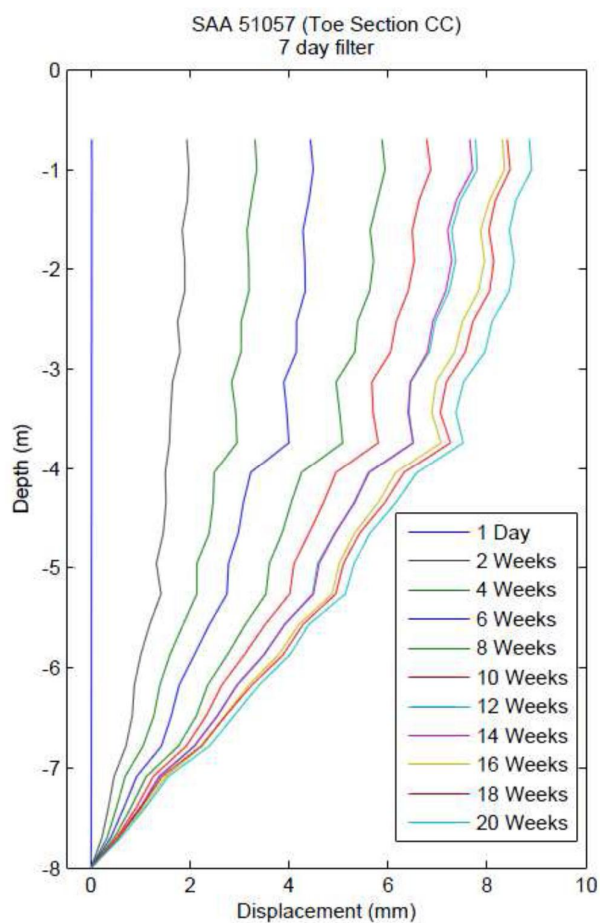
Onderdeel van het ontwerp van een monitoringssysteem is ook het periodiek controleren van het correcte functioneren van de instrumenten. Dit bestaat uit regelmatige calibratie (zie de volgende paragraaf) en uit controle van de meetwaarden, hetgeen verder uitgewerkt is in §3.20 en §3.22. Naast deze meer technische respectievelijk routinematige procedures, is het ook zinvol om van tijd tot tijd na te gaan in hoeverre er voldaan wordt aan de gestelde uitgangspunten, aannamen en randvoorwaarden.

Verder worden de meetfrequentie en de doorgifte-frequentie beïnvloed door de frequentie waarmee vernieuwing van de meetgegevens nodig is, ook tijdens eventuele calamiteiten: als er een plotselinge afwijking in de metingen wordt gerapporteerd, dan kan er sprake zijn van een fysieke reden (met andere woorden: de afwijkende meetwaarde is correct) of van een meetfout. Een duidelijk onderscheid daartussen kan pas worden gemaakt zodra er één of meer volgende meetwaarden bekend zijn (en soms door ter plaatse poolhoogte te nemen). De meetfrequentie en de doorgifte-frequentie zullen hierop moeten worden afgestemd, of eventueel aanpasbaar moeten zijn.

Zo doen zich In waterspanningsmetingen soms merkwaardige fluctuaties voor, zie bijvoorbeeld de sprong tussen twee metingen in Figuur 3.4, daar aangegeven als 'Eigenaardigheid instrument'. Bij de daar gebruikte instrumenten lijkt sprake te zijn van fluctuaties tussen een hoge en een lage waarde, met daartussen tot 0,5 kPa verschil, hetgeen ter plaatse net zo significant is als een op vrij korte afstand passerend pipingkanaal – de monitoring is opgezet voor de detectie daarvan. Soms wisselen deze fluctuaties elkaar voor enige tijd in hoog tempo af, soms is er slechts een enkele sprong, zoals in Figuur 3.4 het geval is. Meer voorbeelden zijn aangegeven in [Koelewijn, 2012, aldaar p.10].

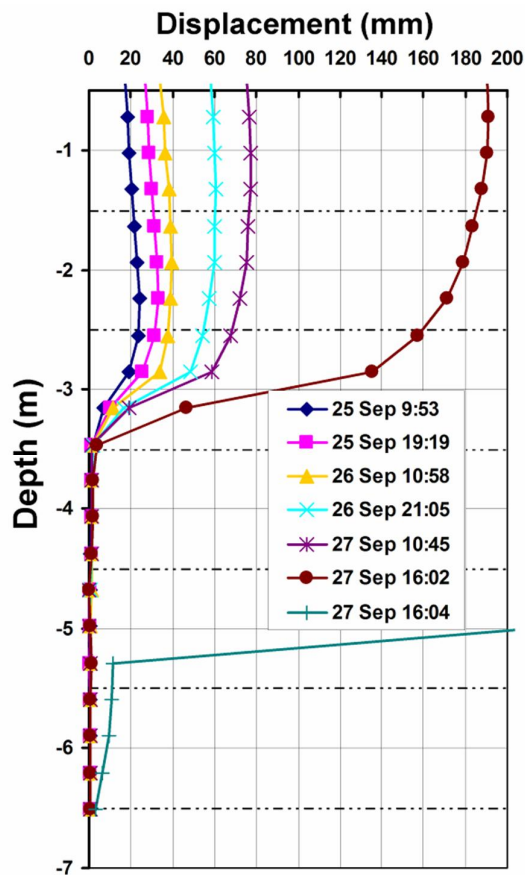
Twee andere voorbeelden hangen samen met hellingmeetbuizen. Met een hellingmeetbuis kan het horizontale verplaatsingsprofiel over een verticaal worden bepaald door in een met de grond meebewegende buis steeds op korte afstanden de hellingshoek te meten. Dit gebeurt op basis van de tussenafstanden en de aanname dat het onderste punt vast en onveranderlijk is.

In Figuur 3.7 zijn verwerkte metingen getoond voor een meetraai in Boston (UK) die onderdeel was van het Urban Flood project (zie ook §4.20). Hier is te zien dat ook het onderste meetsegment voortdurend beweegt. Het is daarom de vraag of aan de aanname dat het onderste punt vastligt, wordt voldaan.



Figuur 3.7 Horizontale vervorming in een meetraai in Boston (UK)

In Figuur 3.8 is een voorbeeld gegeven van een hellingbuismeting bij het IJkdijkexperiment van 2008 [Weijers et al., 2009]. Hier lijken de vervormingen bij de laatste meting plotseling op een veel lager niveau gesitueerd. In werkelijkheid is het volautomatische meetinstrument uit het anker getrokken en bevond het zich tijdens de laatste meting ongeveer twee meter hoger.



Figuur 3.8 Metingen middelste hellingmeetbuis in IJkdijk macrostabiliteitsexperiment (2008)

3.18 Plan regelmatige calibratie en onderhoud

Voor betrouwbaar en correct functioneren is regelmatige calibratie en onderhoud vereist. De frequentie waarmee dit moet gebeuren verschilt per instrument en de omstandigheden waaronder deze worden ingezet. Soms is her-calibratie niet mogelijk en zal herplaatsing of een andere meettechniek overwogen moeten worden.

Bij de planning hiervan kan op zich worden uitgegaan van de specificaties hierover door de leverancier, al dienen deze wel kritisch beschouwd te worden. Wanneer specificaties ontbreken is een gezonde dosis argwaan ten aanzien van de aangeboden apparatuur veelal gepast.

Problemen die kunnen optreden zijn onder andere drift van de sensor (geleidelijke verandering van de uitvoerwaarde bij vergelijkbare invoer/belasting), fysieke verplaatsing van het instrument (door bijvoorbeeld zettingsprocessen bij een slappe ondergrond, door verwachte belastingen wanneer er bijvoorbeeld een afschuiving plaatsvindt (zie Figuur 3.8) en door onbedoelde belastingen zoals aanrijdingen of vandalisme waardoor er plotseling een alarmwaarde kan worden overschreden terwijl er dan mogelijk 'alleen maar' een lokaal probleem bij het instrument is en er verder niets aan de hand is). Ook kan een instrument of zelfs het hele systeem volledig uitvallen, zie hiervoor bijvoorbeeld §4.5, §4.7 en [Tigchelaar, 2012].

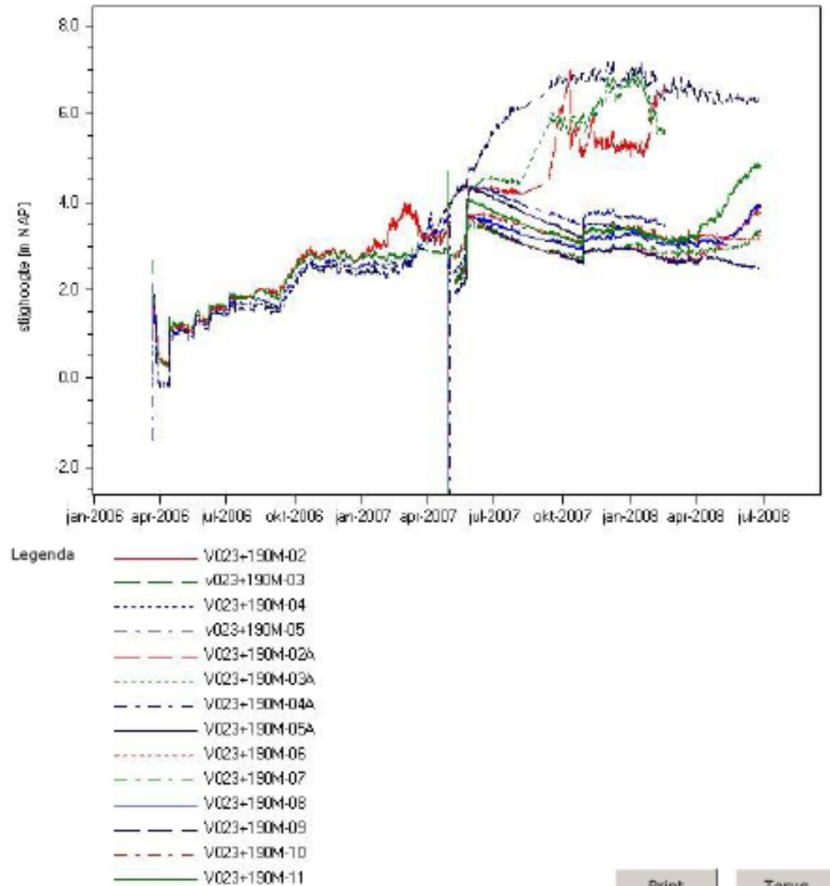
Bij beperkte afwijkingen ten gevolge van verzakkingen of drift kan hier vaak nog wel rekening mee worden gehouden. Bij onvoorspelbare afwijkingen en volledige uitval uiteraard niet. Soms kan hercalibratie een uitweg bieden, mits dit mogelijk is, anders is vervanging noodzakelijk indien de metingen gecontinueerd 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.

Bij de interpretatie van de metingen dient men er altijd op verdacht te zijn dat de calibratie niet meer (geheel) juist is.

Wanneer waterspanningsmeters voor kortere of langere tijd droogvallen, dan kan ook het filter uitdrogen. De ervaring heeft geleerd dat deze daarna dan vaak niet meer goed functioneren (zie bijvoorbeeld §4.21) en op z'n minst opnieuw gekalibreerd zouden moeten worden – iets dat in de praktijk al snel neerkomt op herplaatsen.

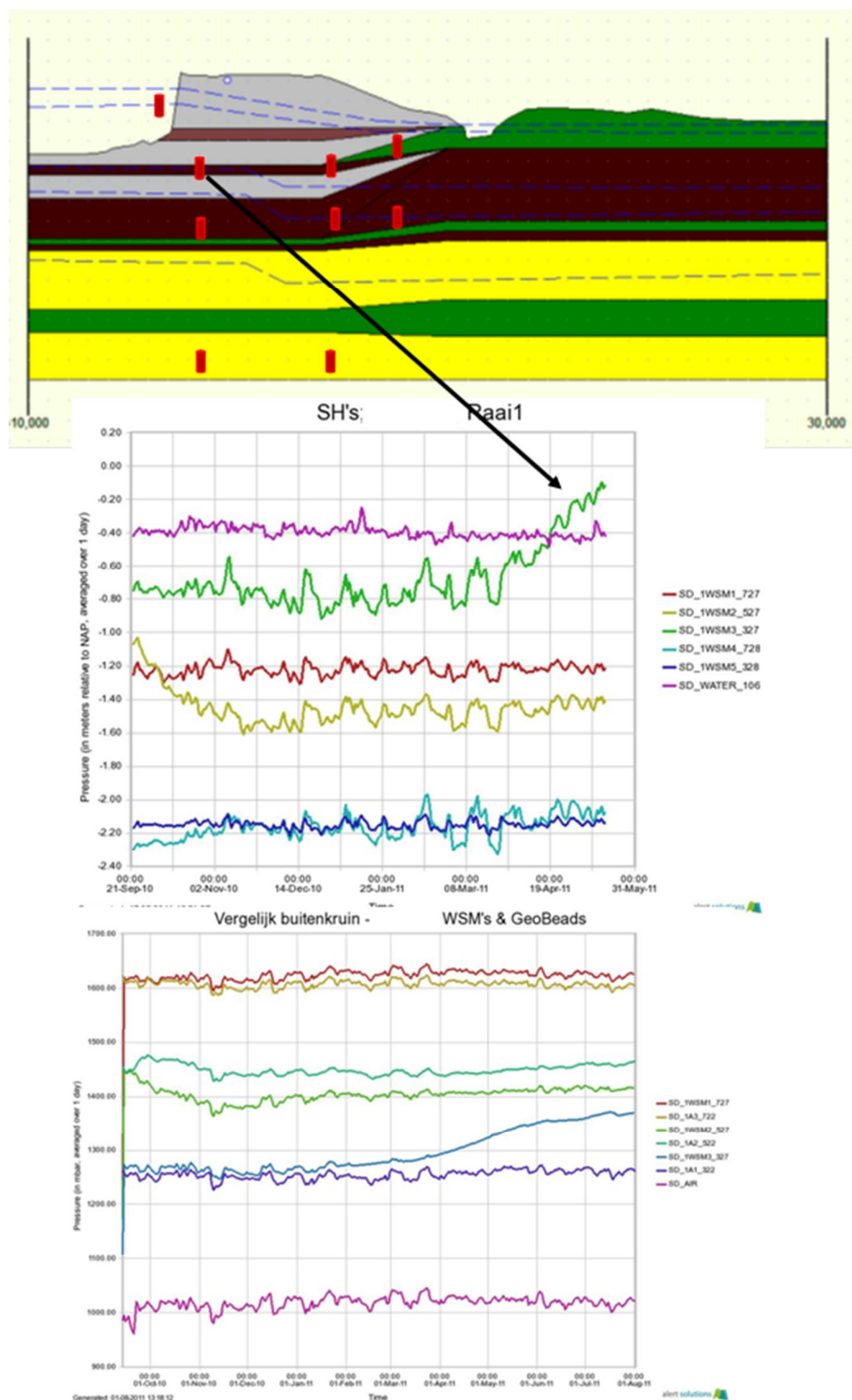
Vooraf waterspanningsmeters in veen- en kleilagen, maar soms ook in zandlagen, blijken op termijn gevoelig te zijn voor gasvorming. Dit kan worden toegeschreven aan bacteriën die zich via het filter in de meetkamer nestelen, waardoor de meetwaarden na enige tijd onbetrouwbaar worden [Hopman, 2008]. In Figuur 3.9 zijn waterspanningsmetingen getoond vanaf eind maart 2006 t/m juni 2008. Aanvankelijk zijn alle meetwaarden nog aannemelijk (de gestage stijging is terug te voeren op een toename van de belasting), maar na 1 jaar en 3 maanden wijkt één van de instrumenten ongeloofwaardig veel af van het algemene beeld waarbij de belasting in ogenschouw genomen wordt. Drie maanden later wordt dit gevolgd door het volgende instrument en nog een maand later vertoont een derde instrument een merkwaardige afwijking die op een gegeven moment zó groot wordt dat er wel iets mis moet zijn met het instrument. En hoewel de meetreeks nog iets te kort is om er helemaal zeker van te zijn lijkt ook in mei 2008 een vierde instrument (van de in totaal 14 hier geplaatste instrumenten) een te grote afwijking te vertonen.

Project Dijkversterking Alblasterwaard Zederik Monitoring waterspanningsmeters



Figuur 3.9 Voorbeeld van oplopende waterspanningsmeter [Hopman, 2008]

In Figuur 3.10 is de gasvormingsproblematiek geïllustreerd voor een boezemkade in Noord-Holland (de gegevens zijn beschikbaar gesteld op voorwaarde dat de locatie er niet bij vermeld zou worden). In de bovenste grafiek is te zien dat de voor atmosferische druk gecorrigeerde meetwaarden bij één waterspanningsmeter op een gegeven moment onmiskenbaar begint op te lopen en zelfs boven de waterstand in de boezem (aanvankelijk de bovenste lijn) uitstijgt. Dit is gebeurd in een droge periode, zodat de oplopende spanningen ook niet aan regenval die zich ophoopt in een scheur reikend tot aan de waterspanningsmeter kan worden toegeschreven. In de onderste grafiek is de totale druk weergegeven, dus zonder correctie voor de atmosferische druk, voor niet alleen een deel van de instrumenten in de bovenste grafiek, maar ook voor in duplo geplaatste instrumenten van een ander type. Daar waar de 'dubbele' instrumenten aanvankelijk min of meer gelijk op lopen, blijkt het instrument dat problemen vertoont eind januari al in sterk geringere mate fluctuaties vertoonde. In de bovenste grafiek komen de problemen pas begin april onmiskenbaar aan het licht. Dit voorbeeld laat zien dat het waardevol is om op verschillende wijzen naar de meetdata te kijken; een andere presentatie kan informatie onthullen die anders niet zichtbaar is.



Figuur 3.10 Waterspanningsmetingen bij een boezemkade met een instrument met gasvormingsproblemen

Figuur 3.10 illustreert overigens ook het nut van het weergeven van de hoogste buitenwaterstand in een grafiek met waterspanningsmetingen, deze vormt immers een natuurlijke bovengrens aan de meetwaarden (afgezien van situaties met hoge wateroverspanningen zoals bij een grote ophoging op een dik slappe-lagenpakket). Meetwaarden die hier bovenuit komen, wijzen op incorrect functioneren van het instrument (zie ook §3.17).

3.19 Plan installeren van de instrumenten

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, 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.) en de benodigde rusttijd na installatie, met name bij plaatsing van instrumenten in het slappe-lagenpakket in de grond.

Enkele aandachtspunten zijn:

- Kort voor installatie moet ieder instrument apart worden gecalibreerd, dit omdat de calibratiewaarden 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 spoelen moet met zoet water gebeuren, niet met brak of zout water.
- 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.
- Een zorgvuldige administratie in het veld van welk instrument waar geplaatst is, ligt voor de hand. Toch blijken er geregeld achteraf aanpassingen plaats te vinden op grond van de meetwaarden: 'Als dit de meetwaarden zijn, dan moet de volgorde van de instrumenten wel anders zijn, anders kloppen de metingen niet.' Impliciet geldt daarbij de aanname dat de meetwaarden correct zijn en ontbreekt een kritische houding ten aanzien van de metingen. In §4.21 is een voorbeeld gegeven van data die niet goed bij de locaties van de sensoren lijkt te passen.
- 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. Voor het eerder gegeven voorbeeld van de metingen van de Livedijk Eemshaven (§3.13, met name Figuur 3.6) is het onzeker welk gedeelte van de tot 70 centimeter verschil tussen de verschillende sensoren voor dezelfde parameter (stijghoogte vlak onder het dijklichaam) toe te schrijven is aan interne opzet of de verticale plaatsingsonnauwkeurigheid.
- De installatie van de instrumenten in de grond, door wegdrukken of plaatsing in een boorgat, veroorzaakt afwijkende waterspanningen. Deze moeten eerst dissiperen voordat er sprake is van betrouwbare metingen. In zand gebeurt dit binnen hooguit enkele uren, in dikkere klei- en veenlagen kan dit enkele weken duren. Overigens is dit meestal wel uit de metingen af te leiden uit een asymptotisch verloop (eventueel gesuperponeerd op andere fluctuaties). Ook kunnen instrumenten nog enige tijd nazakken of kantelen indien deze bijvoorbeeld zijn geplaatst in een boorgat, zie §4.17 en [Tigchelaar, 2012] voor enkele voorbeelden.

- In de praktijk gehanteerde installatietechnieken kunnen een significante invloed hebben op de metingen, zozeer dat deze zelfs volledig onbetrouwbaar kunnen zijn of worden. Een voorbeeld hiervan is te vinden in §4.13, waar een boorgat slecht afgedicht bleek te zijn.
- Installatie van instrumenten levert óók gegevens op over de samenstelling van de ondergrond – maar deze worden nu vaak nog niet verwerkt.

Van algemene invloed op de kwaliteit van de metingen is de ruimte die in planning beschikbaar is, evenals de ruimte in de budgetten. Dit geldt in het bijzonder voor de installatie van de instrumenten.

3.20 Stel aankoopspecificaties op voor de instrumenten

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.

3.21 Plan 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. Het schema van Figuur 2.2 is op dat moment al van belang. Daarbij geldt dat de daarin genoemde controles en eventuele alarmeringen aan het einde van de hiervoor genoemde keten kunnen plaatsvinden, wat in eerste instantie het meest voor de hand ligt, maar het kan ook eerder gebeuren, eventueel al bij de sensor zelf. De betrouwbaarheid en snelheid van handelen spelen bij deze keuze een grote rol.

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.

Verdere aandachtspunten:

- Permanente actie bij de controle op de overschrijding van de waarschuwings- en alarmwaarden (fig. 2.2) – inclusief meetwaarden die niet samenhangen met het doel van het instrument, die overigens wel zouden kunnen wijzen op een calamiteit waar het monitoringssysteem niet specifiek voor ingericht is, zoals een brand. Ook kan een softwarematige fout leiden tot onjuiste correcties en uiteindelijk uitval, zoals het buitenaardse voorbeeld van de Mars Global Surveyor [de Rooij, 2013] laat zien.
- Wanneer er voor bepaalde (beperkte) tijd géén meetwaarde is ontvangen dan is een waarschuwing nodig. Dit is echter een ander type waarschuwing dan de waarschuwing bij de overschrijding van waarschuwingswaarden – deze waarschuwing is immers niet op meetwaarden gebaseerd.
- Wanneer er voor bepaalde tijd (instrument- en positieafhankelijk) geen verandering is geregistreerd, dan is er eveneens reden voor een (geautomatiseerde) waarschuwing waar actie op ondernomen moet worden.
- Met waterspanningsmeters wordt feitelijk niet de waterspanning gemeten, maar de totale druk. De atmosferische druk moet daar dan nog van worden afgetrokken. Deze moet daarvoor bij voorkeur ter plaatse aan het maaiveld worden gemeten, hoewel de afwijking over het algemeen gering is wanneer meetwaarden van nabijgelegen KNMI-stations hiervoor worden gebruikt. Het corrigeren voor de fluctuaties in de atmosferische druk is pas op grote diepte irrelevant, maar voor waterkeringen wél relevant.

Een voorbeeld van snelle, geautomatiseerde controle van gegevens is de Dataprofeet van Witteveen+Bos. Hierin wordt de data automatisch gecontroleerd op chronologie, ongeldige meetwaarden (zoals -9999), identieke datum/tijd-stempels, de meetfrequentie, waarden buiten het meetbereik, geen verandering in het signaal ('dood signaal'), staptrends en outliers, lineaire trends en barometrische controle (correlatie met de atmosferische druk) [Fest & van den Berg, 2013].

3.22 Plan verwerking van meetgegevens

Na de initiële controle op de overschrijding van waarschuwings- en alarmwaarden is periodiek ook een meer gedegen controle van de metingen vereist, voordat deze als betrouwbaar kan worden opgeslagen en verder gebruikt in de organisatie in de zes fasen van de dijkbeheercyclus zoals genoemd in §2.5.

Er blijken discrepanties op te kunnen treden met betrekking tot de datering van de meetgegevens (zie §4.2.1 in [van der Kolk et al., 2011], bij gebruik van archiefdata (d.w.z. alle data die niet on-line binnenkomt) moet men hierop bedacht zijn.

Voorspellingen ten aanzien van dijksterkte kunnen worden verfijnd door het toevoegen van gedragsmonitoring, waarnemingen, anomalie-detectie en expert judgement. Triggers van afwijkend gedrag kunnen semi-automatisch worden opgespoord door het toepassen van "Change Detection" technieken zoals data-driven modelling. In voorspellingsmodellen kan de data zijn nut bewijzen, bijvoorbeeld ook om de modelparameters te verbeteren zoals geïllustreerd door de inverse analyse met behulp van Plaxis [Nutall, 2013].

3.23 Verdeling van verantwoordelijkheden

Verantwoordelijkheden 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, zoals "99,99% datadoorgiftebetrouwbaarheid!" van een klein datatransportbedrijf dat bij een serieuze calamiteit al ten onder is voordat een claim geformuleerd kan worden – laat staan dat afhankelijkheid van een (te) goedkope verbinding in zo'n geval al vermeden had moeten worden.

3.24 Stel de (voorlopige) begroting op

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, naar §3.16, §3.13, §3.8, §3.7 of §3.2. 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 ook rationele gronden voor zijn om het budget voor monitoring aan te passen, bijvoorbeeld omdat hiermee de overall-risico's worden verkleind.

3.25 Vastleggen van het monitoringssysteem in een ontwerpverslag

De voorgaande stappen behoren te worden vastgelegd in een samenhangend verslag. Het maken van zo'n verslag alleen al 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.

3.26 Installatie en inbedding van het monitoringssysteem

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 is ingebed in de organisatie.

3.27 Gebruik en periodieke herziening van het monitoringssysteem

Bij het gebruik van het monitoringssysteem zal de waarde van een goede voorbereiding blijken. Indien nodig zullen de voorziene maatregelen getroffen moeten worden: gepaste reactie op overschrijding van waarschuwings- of alarmwaarden, aanpassing van de meetfrequentie, reparatie of vervanging van uitgevallen instrumenten, enzovoorts.

Periodiek zal het systeem herzien moeten worden. Dit kan vooraf al worden gepland, eventueel aanvankelijk met een hogere frequentie dan later. Incidenten als uitval of overschrijding van waarschuwings- en alarmwaarden kunnen ook aanleiding zijn voor een herziening. Dit kan ook leiden tot een concretisering van de abstracte figuren in §3.7.

4 Verschillende proeftuinen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen de verschillende proeftuinen worden beschreven waarmee de afgelopen jaren ervaring is opgedaan.

Bij het opzetten van proeftuinen moet er rekening mee worden gehouden dat het combineren van theorie en praktijk niet altijd een positieve invloed heeft gehad op het plaatsen van de meetinstrumenten. Er zijn verschillende voorbeelden te noemen waarbij de monitoring buiten proportie groeide doordat degene die de leiding hadden het verschil niet konden maken tussen wat *nodig* is en wat *aardig is om te weten* uit onderzoeksoogpunt. Hierdoor willen dikeigenaren soms niet hun dijk beschikbaar stellen voor dijkonderzoeken [DiBiagio, 1999]. Doordat de grote IJkdijkprojecten niet op bestaande dijken zijn uitgevoerd, maar op opgeworpen grondlichamen is dat probleem deels verholpen.

De Waterwet geeft ook mogelijkheden om metingen mogelijk te maken. De vrijwilligheid is dan minder vanzelfsprekend. Verder heeft de beheerder ervaring met het betrekken van de omgeving. Dit is mensenwerk en dit moet ook goed uitgevoerd worden.

In dit hoofdstuk zal per proeftuin worden beschreven welke parameters we hebben gemonitord en wat daarvan geleerd wordt, voor nu en in de toekomst. Indien de proeftuin via de Stichting IJkdijk wordt gesubsidieerd wordt een proeftuin een Livedijk genoemd. Zijn nationale en internationale projecten opgenomen.

Per proeftuin zal een korte omschrijving worden gegeven. Hierbij zullen in ieder geval de volgende zaken worden besproken:

Korte omschrijving project (locatie, start, looptijd doel van de monitoring, opdrachtgever)

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Wat is het eindresultaat van de metingen?

Hierbij wordt ook ingegaan op de monitoringsvraag. De meeste gemonitorde parameters zijn niet direct gekoppeld aan hetgeen men wilt weten. Men wil niet weten wat de temperatuur van het water is, maar of en waar er piping optreedt. Hierbij is sprake van een indirecte meting. Indien bekend zal ook worden vermeld wat men aan de metingen heeft gehad.

Zijn er bijzonderheden te melden?

Hiervoor hebben, behalve de auteurs, de volgende personen input geleverd:

- Bernadette Wichman, Bernard van der Kolk, Goaitske de Vries, Victor Hopman, Jan Blinde en Peter Kraaijenbrink (Deltares).
- Rob van Putten en Haroen Lemmers (Waternet).
- Jan Tigchelaar (Hoogheemraadschap Delfland).

Opgemerkt dient te worden dat de afhankelijk van de fase waarin de proeftuin zich bevindt er meer of minder informatie bekend c.q. beschikbaar is.

In dit hoofdstuk zullen eerst de IJkdijk projecten en de spin-off's daarvan behandeld worden. Vervolgens de andere proeftuinen en als laatste (vanaf paragraaf 4.18) de (semi)buitenlandse proeftuinen. In tabel 4.1 is een overzicht van de verschillende proeftuinen gegeven en het jaar van uitvoering.

§	Naam	IJkdijk gerelateerd	Periode van uitvoering	Land van uitvoering	Gebruikte Techniek
4.2	IJkdijk projecten Overslagproef, macrostabiliteit en piping	Ja	2007- 2009	NL	Diversen
4.3	Livedijk Eemshaven	Ja	2008	NL	WSM ¹⁾ en glasvezel
4.4	Droogteproef Veenderij	Ja	2011- 2012	NL	Remote sensing, WSM glasvezel
4.5	Livedijk Utrecht	Ja	2011- 2013	NL	WSM en glasvezel
4.6	Livedijk XL	Ja	2011- 2013	NL	WSM, glasvezel en DMC
4.7	All in one sensor validatie test	Ja	2012	NL	Diversen
4.7	Livedijk Ameland	Ja	2012- 2013	NL	WSM en glasvezel
4.9	Livedijk Piping Rivierenland	Ja	2014	NL	Nog te bepalen
4.10	Baggerspecie depot Ketelmeer		1999	NL	WSM
4.11	Vlaardingsekade		2008- 2012	NL	WSM en peilbuizen
4.12	Stammerdijk		2009- 2010	NL	WSM
4.13	Lekdijk		2010	NL	WSM en hellingmeetbuis
4.14	Colijnplaat		2010	NL	DMC
4.15	Vechtkade		2011	NL	WSM, peilbuizen
4.13	Ringdijk Watergraafsmeer		2011- 2013	NL	WSM
4.17	Grebbedijk		2011- 2013	NL	WSM
4.18	Subcoast		2010- 2013	NL/ Europa	Satellietmetingen
4.19	Dayulan, langs Yellow River		2011- 2012	China	WSM, Glasvezel
4.20	Grand Sluice		2011	Engeland	WSM, glasvezel en SAA(P)
4.21	Rheindeich		2011- 2012	Duitsland	WSM
4.22	Gambshheim		2013	Frankrijk	Glasvezel

¹⁾ WSM = waterspanningsmetingen

Tabel 4.1 Verschillende proeftuinen

4.2 IJkdijk projecten

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

- Rondom maatgevende faalmechanismen (overslag, macrostabiliteit en piping).
- Van met name in-situ monitoring- en sensortechnieken, in mindere mate remote sensing technieken en airborne technieken.
- Van robuuste sensornetwerken, data-opslag en verwerking en datarepresentatie.
- Van toepasbare sensorsystemen en opschaling hiervan.

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

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

Validatie

De uitvoering van validatie-experimenten voor sensortechnologie voor waterkeringen en het opdoen van geotechnische kennis in relatie hiermee wordt hier nagestreefd. Validatie is noodzakelijk voor de uiteindelijke ontwikkeling van een algemeen toepasbaar sensorsysteem. In 2008 en 2009 zijn hiervoor respectievelijk het macrostabiliteitsexperiment (1 proef) en het pipingproject (4 proeven) uitgevoerd. Voor de IJkdijklocatie in Oost-Groningen is in 2012 de All-in-one Sensor Validatie Test (SVT) uitgevoerd. Bij de SVT zijn in augustus en september 2012 drie dijksegmenten tot bezwijken gebracht waarbij op voorhand de faalmechanismen macrostabiliteit, piping, microstabiliteit en overloop een rol konden spelen. Aan de monitoringsbedrijven was het de uitdaging om de juiste faalmechanismen te diagnosticeren, lokaliseren en prognosticeren. Dit is beschreven in [de Vries et al., 2013ab]. In 2014/2015 zal tot slot nog op een nader te bepalen locatie een experiment naar zettingsvloeiing worden uitgevoerd.

LiveDijk

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

- LiveDijk Eemshaven (waterschap Noorderzijlvest), zie ook §4.3.
- LiveDijk De Veenderij (Waternet HH Amstel, Gooi en Vecht. Combinatie tussen Validatie en LiveDijk), zie ook §4.4.

- LiveDijk Utrecht (HH de Stichtse Rijnlanden, Prov. Utrecht, RWS Dienst Utrecht), zie ook §4.5.
- LiveDijk XL Noorderzijlvest (waterschap Noorderzijlvest, zie ook §4.6.
- Vlaardingsekade (door HH van Delfland gerealiseerd), zie ook §4.11.
- Stammerdijk (Waternet, UrbanFlood), zie ook §4.12.
- Ringdijk (Waternet, UrbanFlood), zie ook §4.16.
- Livedijk Ameland (Wetterskip Fryslân), zie ook §4.8.

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

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

LiveDijk XL

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

Het was en is de verwachting dat na afloop van de proeftuin LiveDijk XL de kennis en producten dermate ver ontwikkeld zijn dat vermarkting nationaal en internationaal op grotere schaal kan plaatsvinden. De doelstellingen van het project zijn als volgt:

- Bewaken van de veiligheid (early warning/ /early detection) van de afgekeurde dijken tot deze zijn verbeterd. In nauw verband met het Dijk Data Service Centrum (Zie paragraaf 4.13) en de gebruikte modellen voor sterkteberekening en –voorspelling, wordt met de verkregen meetgegevens aan deze doelstelling invulling gegeven.
- Het leveren van aanvullende informatie over de opbouw van bodem en dijk en eigenschappen van het grondwater, ten behoeve van de dijkversterkingswerken (toepassing vindt plaats op een in de derde toetsronde afgekeurde dijk). Hierbij is een aansluiting te realiseren bij de hoogwaterbeschermingsprogramma's en de afweging of optimalisatie van versterkingsontwerpen gerealiseerd kunnen worden met de verkregen monitoringsresultaten. In samenwerking met het programma Flood Control 2015 wordt hier onderzoek naar gedaan.
- Het monitoren van de dijkvakken en na de verbeterwerken, mede in voorbereiding voor het beheer en onderhoud.

Deze doelstelling betreft een lange-termijndoelstelling. Besparingen op beheer en onderhoud zijn moeilijk in te schatten. Wel is nu al een significante besparing te verwachten in de kosten voor de toetsing op veiligheid.

4.3 LiveDijk Eemshaven (Noorderzijlvest)

De informatie is voornamelijk afkomstig van Bernard van der Kolk (Deltares) en [van der Kolk, 2011].

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Inleiding

In 2008 heeft de stichting IJkdijk in het Oost-Groningse Booneschans een full-scale macrostabiliteitsproef uitgevoerd waarbij de ter plaatse gebouwde dijk voorzien was van verschillende sensoren. Deze proef was een eerste grote validatiestap naar een monitoringsysteem voor waterkeringen. Het project LiveDijk Eemshaven is opgestart om een tweede validatiestap te maken en te testen of sensoren aangebracht kunnen worden in een bestaande zeedijk en daar een goed monitoringsysteem vormen voor de dijk.

Een groot verschil tussen de IJkdijk en de LiveDijk Eemshaven is dat bij de IJkdijk de sensoren tijdens de aanleg van de dijk konden worden aangebracht en bij de LiveDijk Eemshaven zijn de sensoren aangebracht in een al bestaande dijk die daarbij niet negatief mag worden beïnvloed. LiveDijk Eemshaven is de eerste dijk waar langdurig realtime gemeten werd door een combinatie van sensoren.

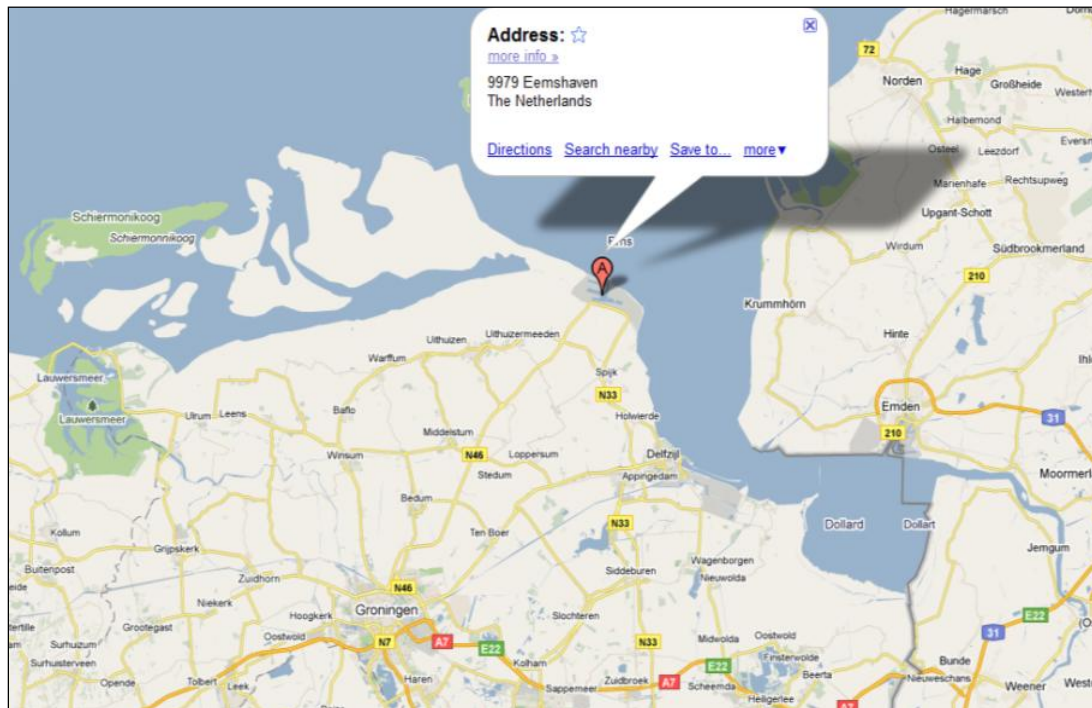
Doelstelling

Doel van het project LiveDijk Eemshaven is om aan te tonen dat een monitoringssysteem aangelegd kan worden zonder de dijk nadelig te beïnvloeden. Daarmee een stap verder te komen in de ontwikkeling van monitoringsystemen van dijken. Daarbij gold voor LiveDijk Eemshaven het doel om de relevantie en bruikbaarheid van de gemeten waarden te bepalen en waar verbeteringen mogelijk zijn voor de LiveDijk Eemshaven en toekomstige LiveDijken.

Locatie beschrijving

De locatie van de LiveDijk Eemshaven is gelegen aan Noord-West zijde van de Eemshaven op de zogenaamde Borkumkade. (zie figuur). Het deel van de dijk, dat bestemd is voor de metingen en de plaatsing van de sensoren, is gelegen tussen dijkraai 45050 en 45900.

De dijk keert het water van de Waddenzee, is geen primaire waterkering maar wordt wel beheerd als primaire waterkering.



Figuur 4.1 Ligging van de LiveDijk Eemshaven in het uiterste noordoosten van Nederland

Opdrachtgever

De LiveDijk Eemshaven is uitgevoerd in opdracht van Stichting IJkdijk en het Waterschap Noorderzijlvest.

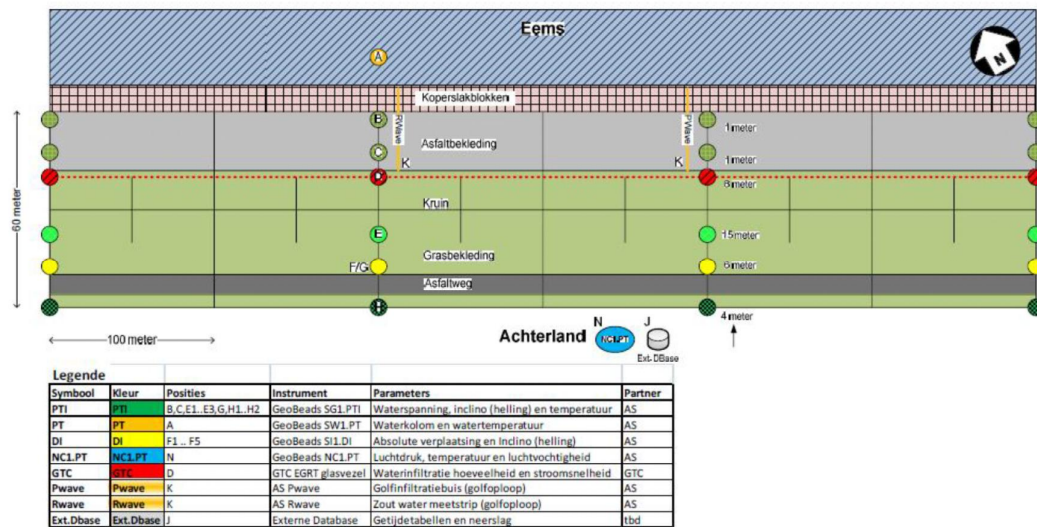
Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

De metingen zijn uitgevoerd door sensoren van Alert Solutions, (GeoBeads, zie Bijlage A.21) en door GTC Kappelmeyer, met een glasvezel kabel.

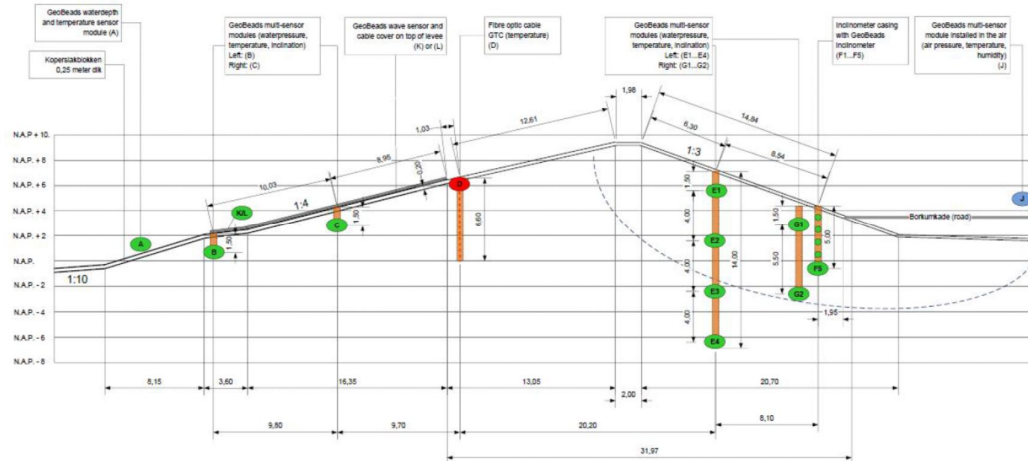
De GeoBeads (puntmeting) hebben onderstaande parameters gemeten:

- Waterdruk.
- Inclinator.
- Temperatuur.

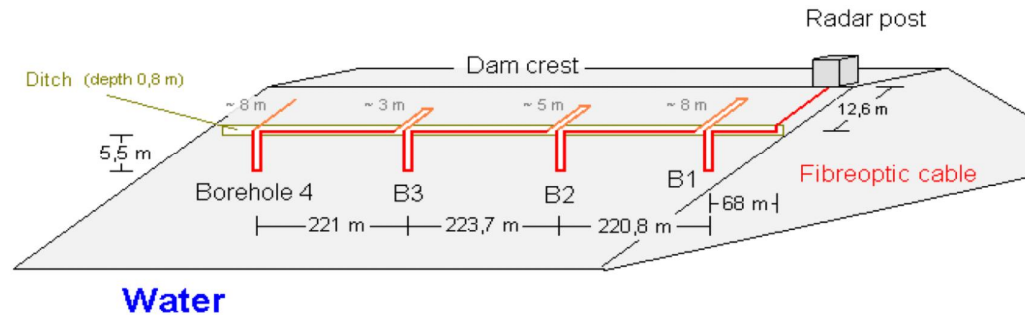
GTC Kappelmeyer heeft met behulp van glasvezel alleen temperatuur gemeten.



Figuur 4.2 Schematisch bovenaanzicht met sensor locaties.



Figuur 4.3 Dwarsdoorsnede met sensorlocaties



Figuur 4.4 Ligging glasvezelkabels

Wat is het eindresultaat van de metingen?

De metingen zijn geanalyseerd in een evaluatierapport beschreven. [van der Kolk, 2011].
Onderstaand de conclusie van dat rapport:

Conclusies specifiek ten aanzien van het project LiveDijk Eemshaven

Meetfrequentie

De meetfrequentie kan over het algemeen aanzienlijk lager, naar bijvoorbeeld eens per uur meten, maar met automatische verhoging van de meetfrequentie (tot de huidige frequentie van eens per vijf minuten) bij windsnelheden van 7 Bft en meer uit windrichtingen tussen west en noordoost (over noord).

Dataopslag

Voor een goede, volledige analyse moet de data op een dusdanige manier opgeslagen en verwerkt kunnen worden dat deze gericht kan worden op het eigenlijke doel, in plaats van dat er veel tijd verloren gaat met de databewerking.

Installatie

De hellingmetingen zijn niet bruikbaar, doordat het onderste deel van de hellingmeetbuis niet in een vaste laag blijkt te staan.

Interpretatie

Opvallend is de stijgende trend in waterspanningsmetingen, een verklaring hiervoor is niet gevonden.

Sensorkwaliteit/ Uitval

De uitval van vooral de dieper gelegen sensoren maakt (gedeeltelijke) vervanging noodzakelijk voor de voortzetting van dit onderzoeksproject.

Zijn er bijzonderheden te melden?

De data die gemeten wordt in de dijk moet op een betere en makkelijker wijze gepresenteerd kunnen worden. Vragen die hierbij een rol spelen zijn onder andere, wie beschikt over de data en wie heeft de toegang tot deze data.

Snelle analyses van de metingen zijn nu niet mogelijk omdat er eerst veel werk gaat zitten in databewerking en dataverwerking. Een voorbeeld hiervan is de noodzakelijke correctie van de waterspanningsmetingen voor de luchtdruk. Dit zorgt nu voor een onnodige complicatie bij de interpretatie. Vanuit meettechnisch standpunt is gescheiden opslag van beide meetwaarden weliswaar te begrijpen, maar voor de verwerking door deskundigen met een civiele achtergrond (ook van bijvoorbeeld een waterschap) werkt dit nodeloos ingewikkeld.

Veel storingen duren niet lang maar er is ook een aantal storingen van lange duur. Aanbevolen wordt om hier maatregelen tegen te treffen.

4.4 Droogteproef Veenderij (Waternet)

De informatie is voornamelijk afkomstig van Goaitske de Vries (Deltares) en [de Vries, 2011].

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

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

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

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

“Welke meettechnieken kunnen de effecten van verdroging (droogtegevoeligheid) van de veenkade volgen”.

De meetlocatie is de kade de Veenderij en ingericht in 2011 – 2012.

De locatie waar de veenkade wordt geïnstrumenteerd ligt in het beheersgebied van Waternet. De Veenderij ligt even ten zuidwesten van Amsterdam en grenst aan een watergang van de Klein Duivendrechtsche Polder. Figuur 4.5 geeft een overzicht.

Gedurende de meetperiode is het proefvak gemaaid (met een handmaaier), conform “normaal” regime. In het proefvak is geen vee toegelaten.



Overzicht locatie De Veenderij (Bron: Google)



Buitentalud geselecteerde locatie



Kruin geselecteerde locatie

Binnentalud geselecteerde locatie

Figuur 4.5 Locatieoverzicht en details de Veenderij

Onderstaande figuur geeft de organisatie en deelnemers weer van het project.



Figuur 4.6 Organogram organisatie en deelnemers

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

De monitoring kan worden onderverdeeld in de *referentie* monitoring en de *innovatieve* monitoring.

De *referentiemonitoring* kan worden gezien als een verzameling van bewezen technieken die anno 2011-2012 kunnen worden ingezet om te meten aan de verschijnselen die droogte kan veroorzaken bij (veen)dijken.

De aspecten waarop gemonitord is zijn direct terug te koppelen op de geotechnische aspecten of gegevens die nodig zijn om het gedrag onder verschillende klimatologische omstandigheden te meten. Hierbij wordt vooral gekeken naar de aspecten die een rol hebben gespeeld bij de dijkverschuivingen in Wilnis en Terbregge in 2003. Beide dijkverschuivingen hebben gemeen dat de vochthuishouding in en onder de dijk veranderde, waarbij het verdrogen van de dijk in beide gevallen een “trigger” was in het faalproces. Vooral het “gewicht” van een veendijk is één van de parameters die erg belangrijk is gebleken. Het totale gewicht van de dijk is echter niet te meten in het veld, zodat ervoor gekozen is om de parameters die afhankelijk zijn voor de eventuele afname van het gewicht te monitoren. Deze parameters zijn vooral gericht op het bepalen van de volume krimp van veen en de afname van het gewicht van de dijk door het verdrogen van veen als gevolg van het verlagen van de grondwaterstand. De gemeten parameters zijn:

- De grondwaterstand en de waterdrukken in de veendijk.
- Het vochtgehalte van een veendijk rondom de verzadigde zone.
- Het volume krimpgedrag van veen.
- Temperatuur van het veen.

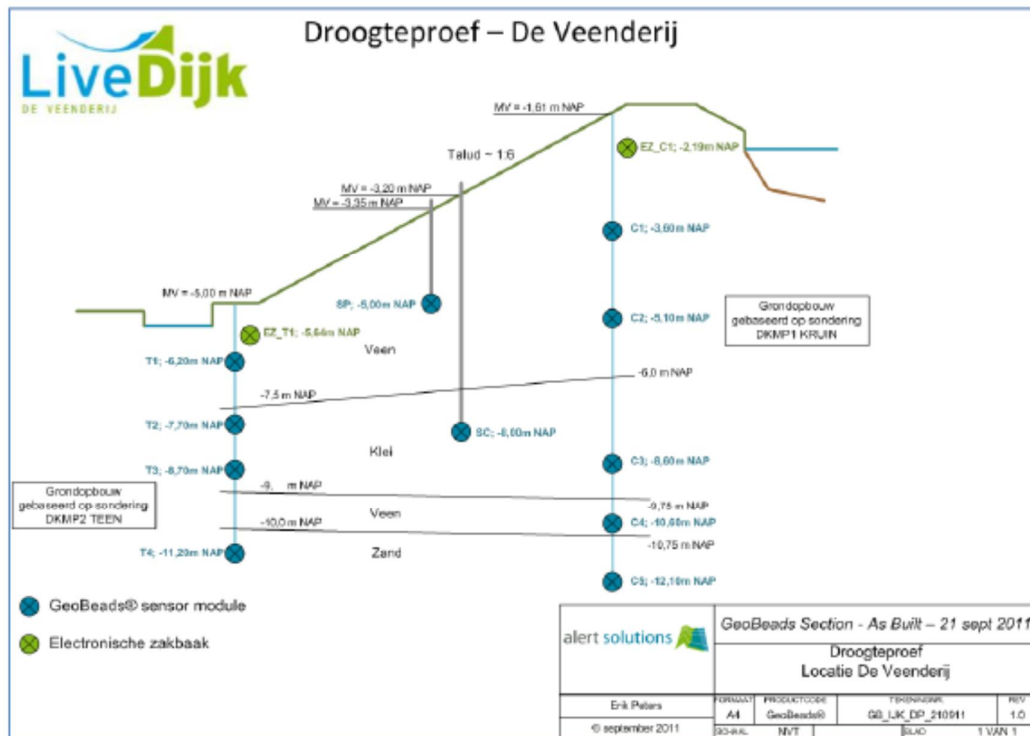
Ten opzichte van 2004 zijn er veel ontwikkelingen geweest m.b.t. de meet- (inspectie) technieken. Doel is te kijken hoe de technieken van nu (2011) kunnen bijdragen aan het meten aan droogte. Daarom zijn *innovatieve* monitoringstechnieken ingezet van zes verschillende meetpartijen. Dit betreffen:

- Alert Solutions
- Ecoflight
- Miramap
- ITC
- Ten Cate
- Intech

Techniek en monitoringsstrategie Alert Solutions

Alert Solutions BV heeft in de Veenderij in één dwarsraai meerdere GeoBeads® multi-sensor modules aangebracht (Zie ook paragraaf A.21). Tevens zijn twee elektronische zakbakens aangebracht (experimentele systemen) welke de zetting in de bovenste veenlaag registreren.

De meetopzet - die nadrukkelijk de veenlaag instrumenteert en als referentie ook de klei- en diepere zandlaag – is gekozen om de invloed van uitdroging op deze dijk te analyseren. Zie Figuur 4.7 voor de dwarsdoorsnede van de locatie van de sensoren.



Figuur 4.7 Dwarsdoorsnede locatie van GeoBeads® modules van Alert Solutions

Met de door Alert Solutions gekozen opzet van het meetsysteem wordt het gezamenlijke doel nagestreefd om mogelijke uitdroging van het veenpakket op te sporen. Daarvoor worden specifiek de volgende metingen beschouwd:

- *Inclinometer:* Door uitdroging krimpt mogelijk het ondiepe veenpakket in. Dit wordt gevolgd met de elektronische zakbakens in kruin en teen en met de inclino sensoren in de multi-sensor modules van het type GeoBeads.
- *Waterspanningen:* Door uitdroging zal de waterdruk in het veenpakket mogelijk afnemen (daling van de freatische lijn). Dit wordt gevolgd met de waterspanningsmeters van het GeoBeads..
- *Temperatuur:* Mogelijk dat door sterke uitdroging een temperatuurprofiel ontstaat, welke wezenlijk afwijkt van het gebruikelijke temperatuur seizoenspatroon dat in veel dijken kan worden waargenomen.

Techniek en monitoringsstrategie Ecoflight

Multispectrale fotografie is een meetmethode voor het opsporen van vegetatiestress, nog voordat met het blote oog effecten van stress zichtbaar zijn. Zie ook paragraaf A.17. Bij de meting wordt het door de vegetatie weerkaatste zonlicht in 4 kleuren (blauw, groen, rood en nabij-infrarood (onzichtbaar voor het menselijk oog)) separaat digitaal gefotografeerd. De reflectie in het nabij-infrarode domein is een gevoelige maat voor de vitaliteit van de vegetatie. Vitale vegetatie reflecteert veel nabij-infrarood licht, gestreste vegetatie weinig.

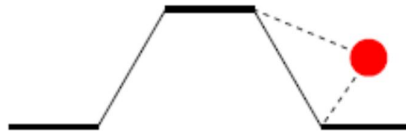
Uitdroging van de bodem is een belangrijke stress factor. Doel van het onderzoek is het vaststellen of door met multispectrale fotografie te kijken naar de vegetatiestress door droogte op veenkades, het mogelijk is om niet-destructief en niet-invasief droogteverschijnselen in de veenkade op te sporen, nog voordat met het blote oog effecten zijn waar te nemen.

Door een correlatie te leggen tussen de vegetatie stressmetingen en in-situ metingen aan de veenkade kunnen:

- De in-situ metingen ruimtelijk geïnterpoleerd worden.
- De vegetatie stressmetingen gekalibreerd worden aan de referentiemonitoring (welk vegetatie stress niveau hoort bij welke toestand, zoals bepaald met de in-situ metingen, van de veenkade).

Met deze laatste informatie ontstaat dus een monitoringsmethode waarbij kijkend met multispectrale fotografie naar vegetatie op een veenkade informatie wordt verkregen over de (droogte)toestand in de kade tot de worteldiepte.

Idealiter worden multispectrale opnames vanuit een vliegend platform gemaakt. Vanwege de hoge kosten van een dergelijke opzet en het beperkte budget binnen dit project is hiervan afgeweken en is vanaf de grond de kade gefotografeerd. De geometrie is in Figuur 4.8 weergegeven.



Figuur 4.8 Geometrie en opstelling Ecoflight

De kade wordt vanaf de zijkant bekeken (het talud wordt gefotografeerd). De camera is gemonteerd op een stellage met een hoogte van ongeveer 2 m. De afstand tussen talud en camera is ongeveer 100 m. Het gehele proefvlak van ongeveer 30 m en de zone erbuiten wordt afgebeeld. Het beelddetail (resolutie) is 2 – 3 cm. Gedurende het groeiseizoen (maart tot en met september 2012) is periodiek een opname gemaakt. De camera meet dus niet continu. In extreme situaties (langdurige droogte) kan de tijdsperiode tussen twee opnames worden verkort. Na elke meting wordt een vegetatie stress analyse gedaan, door middel van een optimalisatie en visuele inspectie van de opgenomen beelden.

Voor deze meetserie is een 3 CCD multispectrale camera gebruikt. De eerste CCD registreert het 'gewone' RGB daglicht beeld. De andere twee CCDs leggen het nabij-infrarode licht in twee separate banden vast.

Techniek en monitoringsstrategie Miramap

Tijdens dit project is gebruik gemaakt van een door Miramap ontwikkelde passieve microgolven scanner. (Zie ook paragraaf **Error! Reference source not found.**). Deze scanner registreert de natuurlijke uitstraling bij 1.4 GHz (L-band). Dit komt overeen met een golflengte van 21 cm. De sensor registreert de observaties in helderheidstemperaturen met een nauwkeurigheid van 1 K. Voor deze studie is er zowel in de horizontale als in de verticale modus ingemeten. Op deze manier kan de hoeveelheid aanwezige bodemvocht het beste bepaald worden.

De radiometer is gekalibreerd en kan zonder additionele stroomvoorzieningen 3 uur meten. Elke meting wordt voorzien van een GPS locatie en intern opgeslagen. De observatiesnelheid van de sensor is 1 seconde met een ruimtelijke resolutie van om en nabij 1 m. De penetratiediepte van de sensor over de kadedijk varieert tussen een paar centimeter als het heel nat is tot maximaal een meter wanneer er nauwelijks vocht aanwezig is.

In het kader van de studie naar de toepasbaarheid van L-band radiometrie voor het onderzoek naar de effecten van verdroging van de veenkade, zijn er zes metingen in de tijd verricht in het aangegeven meetveld.

Techniek en monitoringsstrategie ITC

De Universiteit Twente, Faculteit Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), heeft data ingewonnen voor de evaluatie van opties voor de bepaling van oppervlakte grondvochtigheid van een veen dijk met IR remote sensing vanaf een hoogte.

De vegetatie aanwezig rond en op dijken wordt beïnvloed door wijzigingen in de grondwaterstand en de vochtigheid van het dijk materiaal. De meest waarschijnlijke wijzigingen treden naar verwachting op in de chlorofyl concentraties van de vegetatie [Van der Meijde et al., 2006]. [Adams et al. 1999] laat zien dat de efficiëntie van absorptie van het chlorofyl afneemt en de IR reflectie daalt als gevolg van veranderingen in de celstructuur van de plant wanneer de vegetatie onder "stress" staat, i.e. minder gezond is. Dit leidt tot een afname van de reflectie in de IR gelijktijdig met een toename van reflectie in het rood.

De ruimtelijke spreiding van de oppervlaktetemperatuur rond de dijk kan worden gerelateerd aan het vochtgehalte van de bodem. De variatie van de temperatuur in de ondergrond hangt af van het thermische richtgetal dat een functie is van het watergehalte. Het effectieve bodem vochtgehalte is maximaal aan het begin van de lente en neemt vervolgens af tot het einde van de zomer (Behaegel et al., 2006). Thermische bodemeigenschappen worden sterk beïnvloed door het volumetrisch watergehalte, volume fractie van vaste stoffen, en het volume deel van lucht in de bodem.

Als de stabiliteit van veendijken en mogelijk ook klei dijken afhangt van het vochtgehalte, en de gezondheid van de vegetatie op een dijk afhankelijk is van het vochtgehalte, en het is mogelijk om de gezondheid van de vegetatie door remote sensing vast te stellen, dan moet het ook mogelijk zijn om een relatie te leggen tussen de grondgegevens, remote sensing en de kwaliteit van het veen en waarschijnlijk de kwaliteit van een dijk.

Gegevens zijn opgenomen voor 110 punten in het studiegebied van de locatie. Hiervan blijkt 1 punt niet geschikt vanwege in en op de dijk aanwezige kabels. De data punten liggen op 10 lijnen van de onderkant van de dijk tot de top. De afstand tussen de lijnen is 5 m. Elke lijn heeft 11 opname punten op onderling 2.5 m afstand

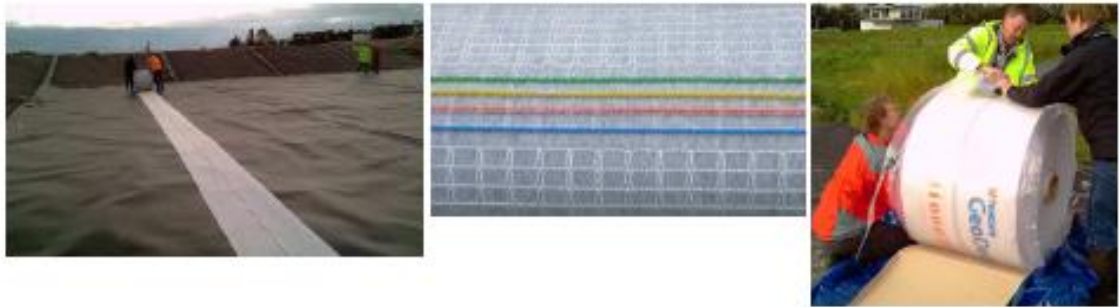
De volgende data zijn opgenomen per locatie:

- Oppervlakte vochtigheid met een z.g. soil moisture probe (ThetaProbe Soil Moisture Sensor - ML2x (by Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK).
- Hyperspectral gereflecteerde straling met een ASD Fieldspec Pro (alleen op 18 augustus 2012; rond 12:30 uur).
- Gewoon licht opnames met een (standaard) Canon EOS camera (Canon EOS 400D van Canon Inc., Tokyo, Japan).
- Grond temperatuur opnamen met een NEC thermo tracer (rond 13:00 en 16:00 uur op 17 augustus 2012, en rond 05:00, 1000 en 14:00 uur op 18 augustus 2012).

Techniek en monitoringsstrategie Ten Cate

De TenCate GeoDetect® mat (zie ook paragraaf A.14) bestaat uit glasvezelkabels met een geotextiel. Het is een strip van 0.76 m breed waarin 4 glasvezelkabels zijn opgenomen. Twee kabels meten temperatuur, de andere twee rek. Binnen dit project is één kabel van beide parameters gebruikt.

De dijk lengte die gemonitord is, is ongeveer 30 m lang. De geotextiel strips zijn geïnstalleerd op 3 verschillende niveaus, te weten de kruin, het midden van het talud en de teen van de dijk. De strips zijn ongeveer 40 cm diep ingegraven.



Figuur 4.9 Ten Cate meetsysteem

Techniek en monitoringsstrategie Intech

InTech Dike Security Systems BV heeft een remote sensing techniek ontwikkeld om faalmechanismen van waterkeringen vroegtijdig te kunnen opsporen. Deze techniek berust op het op afstand meten van de uitstraling van infrarood van de waterkering met infrarood sensoren in combinatie met speciaal ontwikkelde software.

Doordat met deze techniek op afstand wordt gemeten wordt het dijklichaam niet verstoord of verzwakt. Dit systeem is ingezet bij het meten van uitdroging van de Veendijk te Ouderkerk aan de Amstel van november 2011 tot en met oktober 2012. Voor het verrichten van de metingen tijdens het experiment heeft InTech gebruik gemaakt van een meetopstelling die zich in en op een container bevindt.



Figuur 4.10 Installatie van de meetopstelling van Intech

Door middel van het meten van de temperatuur aan het dijkoppervlak kan uitdroging van een veenkade worden vastgesteld. Het streven in deze proef was om 4 beelden per dag vast te leggen. Voor de droogteproef is gebruik gemaakt van een door InTech ontwikkelde meetopstelling. De meetopstelling bevond zich in een container. Op de container is een getuide mast van 5 meter bevestigd waarop de infrarood sensoren zijn bevestigd. De container is voorzien van eigen stroomvoorziening. Deze bestaat uit zonnepanelen, een windmolen en een noodaggregaat. Deze stroomvoorziening is tevens gebruikt door andere meetpartijen. Ook bevindt zich er een draadloze internetverbinding, dataopslag en een dataprocessing voorziening in de container. Hiermee is de data zowel op locatie als op afstand bereikbaar en analyseerbaar.

In de periode van november 2011 tot en met oktober 2012 zijn in totaal c.a. 1300 metingen verricht. Het voornemen was 4 afbeeldingen per dag te maken. Gedurende de meetperiode is een deel van de data echter verloren gegaan. Hierdoor is er over een deel van de perioden waarin gemeten is, geen data meer beschikbaar.

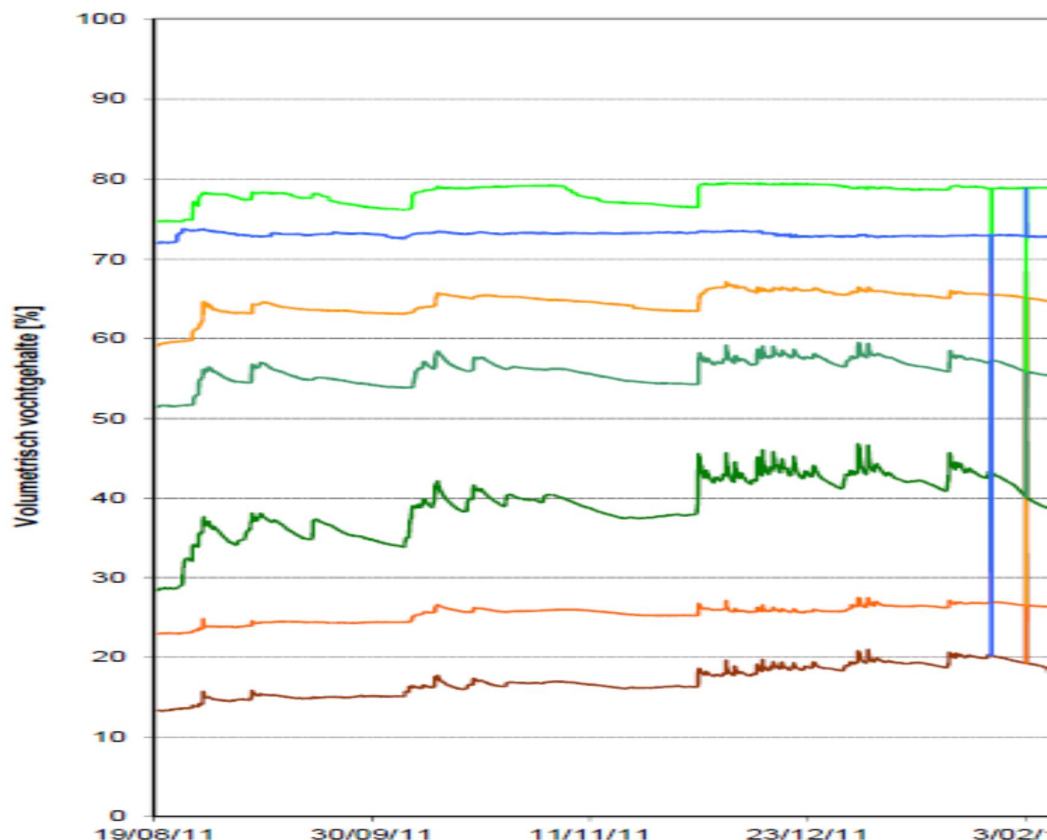
Wat is het eindresultaat van de metingen?

Referentie monitoring:

De meetperiode die in deze rapportage geanalyseerd wordt is gestart op 19 augustus 2011 en loopt tot november 2012. In deze gehele meetperiode zijn er geen extreem droge perioden geweest, wel was er sprake van een korte droge winterperiode (3 februari tot 12 februari 2012) en zijn er enkele periode geweest met veel neerslag. Ook valt de periode vanaf 1 april tot medio juli 2012 op.

Periode vanaf 19 augustus tot 23 december 2011

In de eerste 3,5 maanden van de meetperiode, dus vanaf 19 augustus tot aan circa 1 december 2011, is er weinig neerslag gevallen. Dit is goed zichtbaar in de bodemvocht meters die in deze periode een relatief constant bodemvochtgehalte laten zien met enkele pieken. Zie Figuur 4.11.

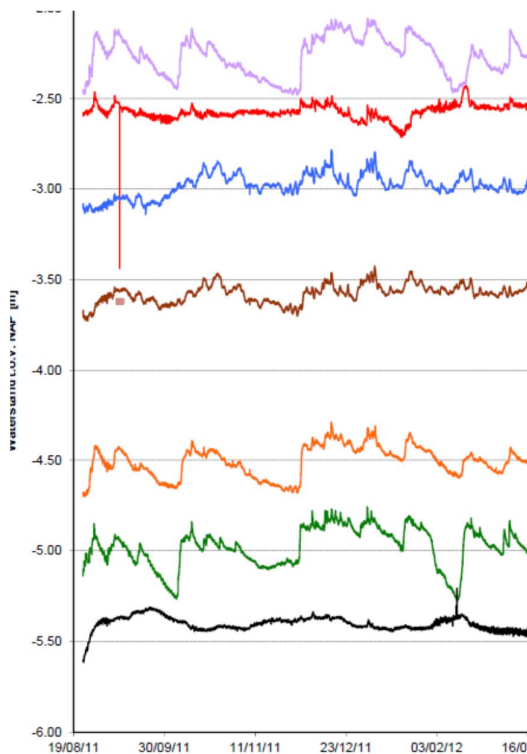


Figuur 4.11 Bodemvochtmetingen (19-6-2011 t/m 3-2-2012)

Opvallend is dat het vochtgehalte bij neerslag snel toeneemt maar na het stoppen van de neerslag ook weer geleidelijk afneemt. Een deel van de neerslag lijkt tot een meer continu

hoger vochtgehalte te leiden. Er is een trend waarneembaar waarbij het vochtgehalte langzaam stijgt. Dit is te verklaren uit het feit dat er in deze periode van het jaar geen noemenswaardige verdamping opgetreden is. In de peilbuismetingen is dit ook waarneembaar. Daarnaast geldt voor de bodemvochtmetingen dat nadere analyse voor wat betreft de absolute getallen gewenst is (t.a.v. o.a. gemeten variaties en de calibratie).

Hierna komen enkele pieken voor in de neerslagmeting waarbij met name vanaf 12 tot 19 december 2011 in 7 dagen ruim 51 mm neerslag valt. Dit leidt tot een directe verhoging van de grondwaterstand. Opvallend is dat de “eerste” neerslag leidt tot een directe toename van de grondwaterstand en dat de daarop volgende neerslag er voor zorgt dat deze grondwaterstand hoog blijft, maar niet verder toeneemt. Dit is ook waarneembaar in de vochtmetingen. Kennelijk wordt als gevolg van de eerste hoeveelheid neerslag de onverzadigde zone verzadigd waardoor deze geen water meer extra kan opnemen en daardoor zowel het bodemvocht gehalte als de waterdruk niet meer verder kan stijgen. Wanneer de periode met neerslag stopt is een snelle afname van de stijghoogte waarneembaar. Dit is weergegeven in Figuur 4.12 waar de peilbuismetingen zijn gepresenteerd die de grondwaterstand (freatische lijn) weergeven. De afname snelheid verloopt exponentieel zoals bij doorlatendheid verwacht mag worden. Uit de metingen van de extensometers in deze periode is een zwelling van het grondlichaam aan het maaiveld af te leiden. Dit is conform de verwachtingen in deze situatie. Opgemerkt wordt dat een dergelijk gedrag als locatiespecifiek moet worden beschouwd.



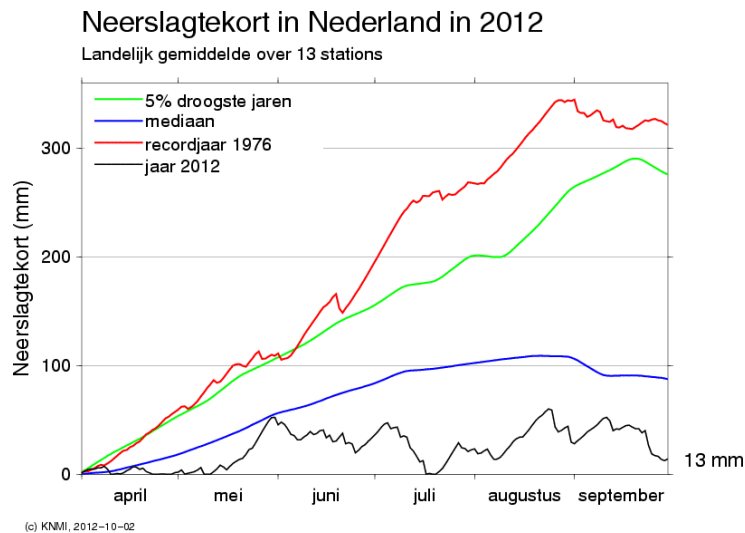
Figuur 4.12 Peilbuismetingen (stijgingen en exponentiele dalingen grondwaterstand 19-6-2011 t/m 16-4-2012)

Periode rond begin februari 2012

In deze periode is er sprake van strenge vorst gedurende 13 dagen. De vorst valt in 164 dagen (30 januari 2012) na start van de proef, 177 dagen na start (12 februari 2012) is de vorst weer verdwenen. Een zeer droge vorst periode kan ook leiden tot verdroging van de kades. In de metingen van de vochtmeters is dit ook te zien, er vindt een zeer snelle daling van het vochtgehalte plaats rond 3 februari 2012 als het echt koud wordt. In de metingen van de extensometers is een inklinking van het grondlichaam zichtbaar alsmede in verschillende peilbuizen. Vooral in de peilbuis in de kruin (pb2) en de peilbuizen in de binnenteen van de dijk. Halverwege het talud is het minder duidelijk. Dit geldt overigens ook voor de vochtmeters, ook hier is in het midden van het talud geen duidelijk ander gedrag gemeten.

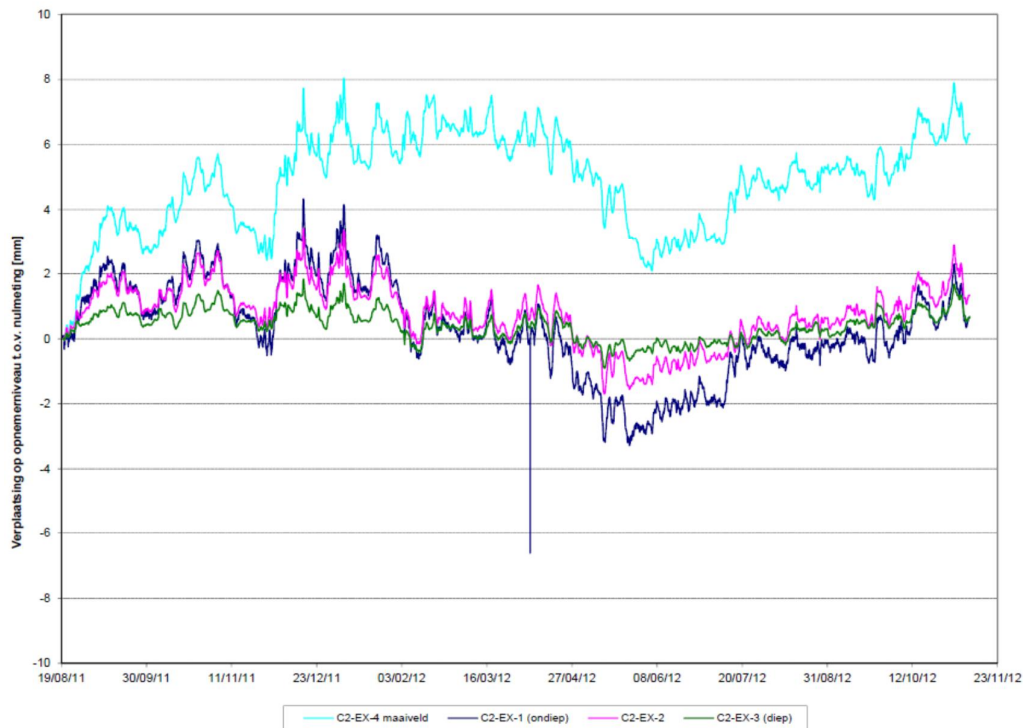
Periode voorjaar 2012, vanaf 1 april tot medio juli

In eerst deel van deze periode tot 22 juni is een continu aflopend vochtgehalte waarneembaar met een eveneens continue afnemen van de omvang van de dijk. De metingen van de extensometers laten na de eerder gemeten zwelling een lichte krimp zien. In deze periode valt ruim 80 mm neerslag, omdat het gewas in deze periode echter ook groeit en de verdamping toeneemt, neemt het neerslagtekort wel toe. Zie hiervoor Figuur 4.13.



Figuur 4.13 Neerslagtekort in Nederland in 2012

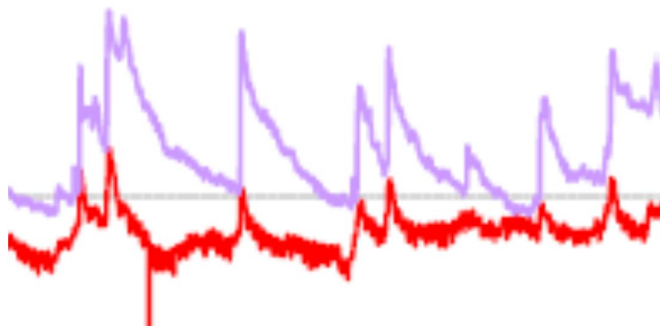
In Figuur 4.13 is zichtbaar dat op 1 juni 2012 het neerslagtekort over de gemeten periode relatief groot is en raakt aan de mediaan. Dit traject is vanaf mei ingezet. Op de grondwaterstanden is deze (lichte) daling eveneens waarneembaar. Omdat het neerslagtekort niet is doorgezet worden deze tendensen in de meetgrafieken omgebogen tot stijgende lijnen als het gaat om waterstanden en vochtgehalte. De extensometingen laten een krimp zien in de periode van 1 april tot 1 juni 2012 en daarna een relatief constant beeld tot medio juli 2012 waarna de dijk gaat zwellen. Figuur 4.14 geeft deze metingen weer. Deze zwelling is gerelateerd aan de neerslag die dan valt. In Figuur 4.12 is zichtbaar dat medio juli 2012 het neerslagtekort even nul is.



Figuur 4.14 Extensometingen (19-5-2011 t/m 23-11-2012)

Periode vanaf medio juli tot 21 november 2012

In deze periode valt relatief veel neerslag, ruim 660 mm. Rond 20 augustus 2012 was het warm en droog in Nederland, deze periode was echter van korte duur en daardoor niet zichtbaar op de metingen. Gedurende de gehele periode van medio juli 2012 tot 21 november 2012 treden forse buien op gevolgd door droge periode. Deze neerslag is goed te herleiden uit de peilbuis metingen en vochtmetingen. Opvallend is dat ook hier zichtbaar is dat de grondwaterstand bijna direct reageert op het begin van de neerslag. Wanneer de neerslagperiode zich over een langere periode doorzet, neemt de grondwaterstand niet meer verder toe. Wanneer de neerslag stopt neemt de grondwaterstand exponentieel in de tijd af. Op onderstaande Figuur 4.15 is dit zichtbaar.



Figuur 4.15 Detail peilbuismetingen (snelle stijging en exponentiele afname van de stijghoogte)

Figuur 4.15 is een detailweergave van de stijghoogte gemeten in pb 2 (paars) en pb 1 (rood) over de periode van medio juli 2012 tot 12 oktober 2012. Op de verticale as is de stijging van de grondwaterstand uitgezet en op de horizontale as de tijd.

De directe stijging van de waterstand als reactie op de neerslag zijn goed te zien, alsmede de exponentiele daling van de waterstand bij situaties zonder neerslag. Deze reactie komt overeen met die van goed doorlatende grond. Opvallend is dat na de eerste reactie van de grondwaterstand op de neerslag deze bij aanhoudende neerslag niet toeneemt.

Conclusies referentiemonitoring

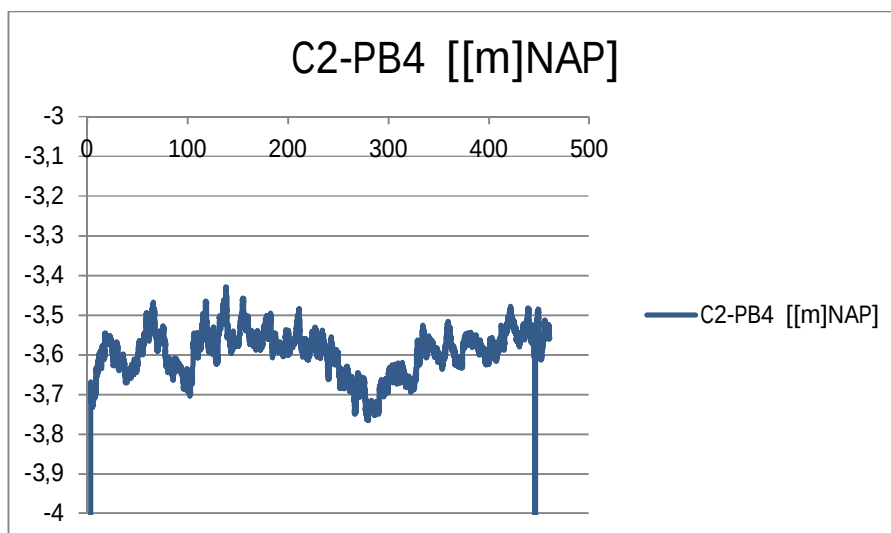
Op basis van de metingen kunnen de volgende locatie specifieke conclusies worden getrokken.

- De peilbuizen laten een directe relatie met de neerslag en met het neerslagtekort zien.
- De freatische lijn reageert praktisch direct op neerslag, waarbij de toename in de tijd bij langdurige neerslag beperkt is. Dit komt vermoedelijk omdat dan de grond boven de gemiddelde grondwaterstand na de eerste neerslag compleet is verzadigd waardoor er geen regenwater meer infiltreert maar van het talud afloopt (bij een langere periode met neerslag neemt de run off factor toe).
- De meetresultaten van de extensometers laten een zwel-krimpgedrag zien wat verklaard kan worden vanuit de neerslag/verdampingscijfers. Door langer door te meten kan worden geconcludeerd of hierin een seizoen cyclus zichtbaar is. Deze meting legt een één op één relatie met het bezwijkmodel, immers het waterkerende vermogen neemt af naarmate de omvang van de dijk afneemt.
- Uit de vochtmeters volgt een duidelijk relatie met de freatische lijn als het gaat om tendensen die worden gemeten. Dit kan verklaard worden omdat de grote van de onverzadigde zone vrij direct in verhouding staat tot de hoogteligging van de freatische grondwaterstand in dit specifieke geval.
- Ondanks dat de meetperiode geen droge periode bevat verschaft de verzamelde data toch behoorlijk wat informatie. Wanneer gedetailleerd wordt gekeken naar de reactie van de meetinstrumenten op de klimatologische omstandigheden, dan is die reactie zichtbaar. De verschillen zijn echter niet zo groot omdat er geen extreem droge periodes zijn geweest in de afgelopen meetperiode. Wel zijn de seizoenen zichtbaar in de metingen doordat er trends waarneembaar zijn met betrekking tot het vernatten of verdrogen van de dijk.
- Voor wat betreft de langdurige relaties en trendlijnen is het zeer nuttig te kijken of de nu gemeten trendlijnen ook voor de komende seizoenen kunnen worden waargenomen.

Conclusies innovatieve methoden

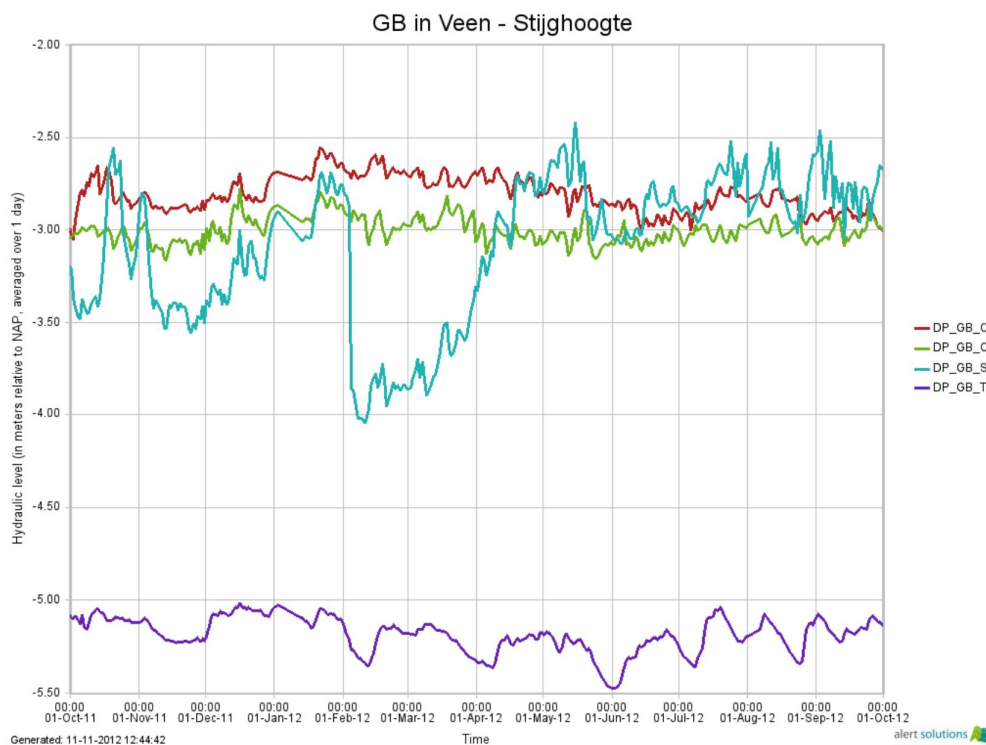
Metingen Alert Solutions

Alert Solutions meet waterdrukken in de dijk door middel van waterspanningsmeters. De meters zijn op verschillende niveaus in de dijk geplaatst en geven naast informatie over de freatische lijn ook informatie over het waterspanningsverloop over het slappe lagen pakket. Om deze metingen te vergelijken is eerst gekeken naar het globale beeld van de freatische lijn, in relatie tot de waterspanningen.



Figuur 4.16 Peilbuismeting Deltares (dag 0 t/m 500)

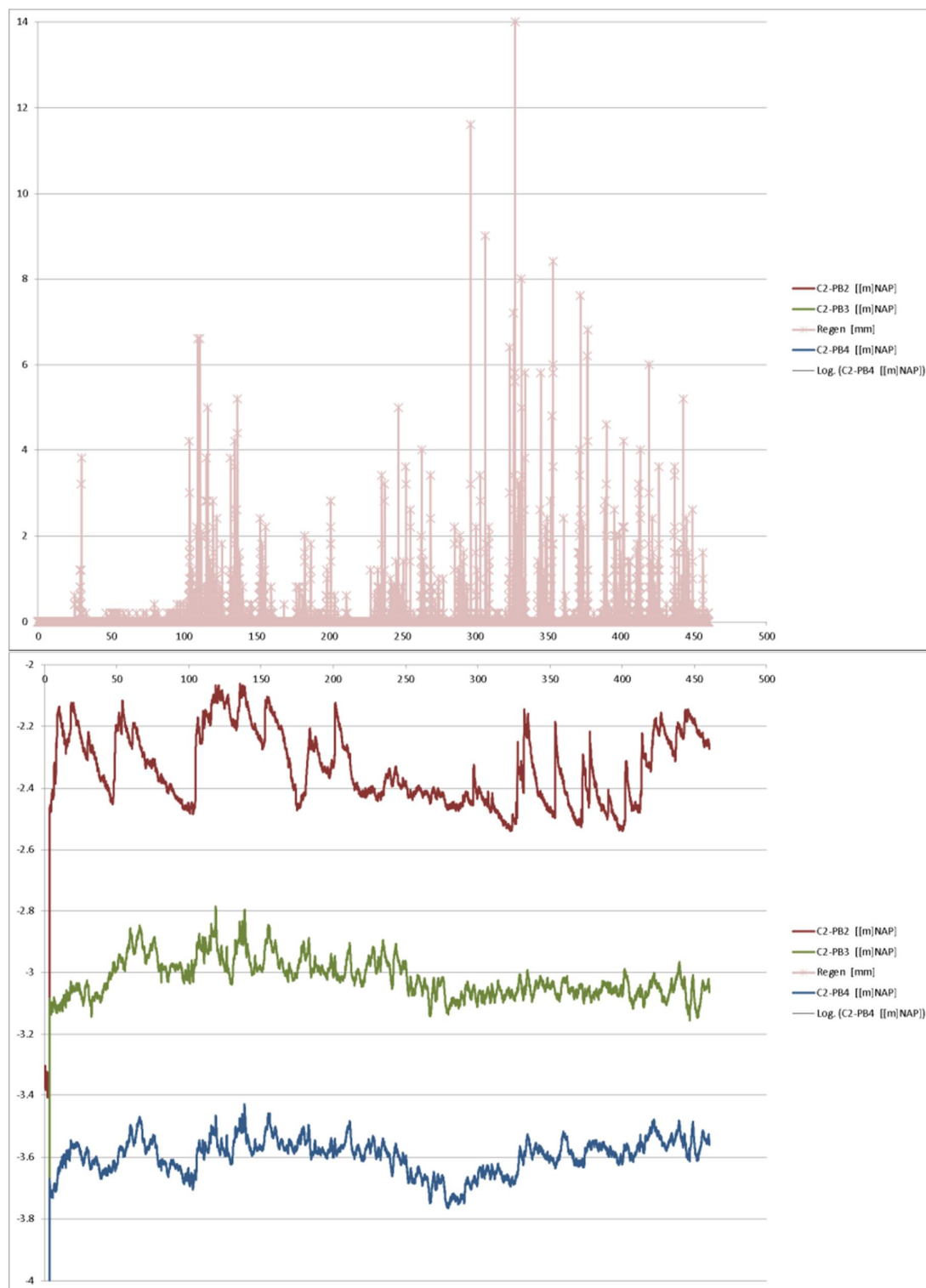
In Figuur 4.16 is zichtbaar dat vanaf circa 200 dagen (c.a. 1 april 2012) ondanks het relatief groot aantal regenbuien de grondwaterstand toch afneemt. Na de zomer periode, ook als was deze nat, is zichtbaar dat de trend toch weer omhoog gaat vanaf 290 dagen. De seizoenscyclus is ondanks de relatief natte zomer toch zichtbaar. Wanneer het vochtgehalte wordt bekeken blijkt dit eveneens het geval. De extremen liggen in beide gevallen wel dicht bij elkaar.



Figuur 4.17 Waterspanningsmetingen onder de kruin van de dijk Alert Solutions (1-10-2011 t/m 1-10-2012)

Uit de grafieken van de waterspanningen is met name voor dp_gb_c1 en c2 deze tendens ook te zien. Ook hier wordt een lagere waterdruk gemeten in de maand juni, juli en een hoge in maart 2012. C1 en c2 staan in de kruin van de dijk op respectievelijk NAP – 3,60 m en NAP – 5,10 m.

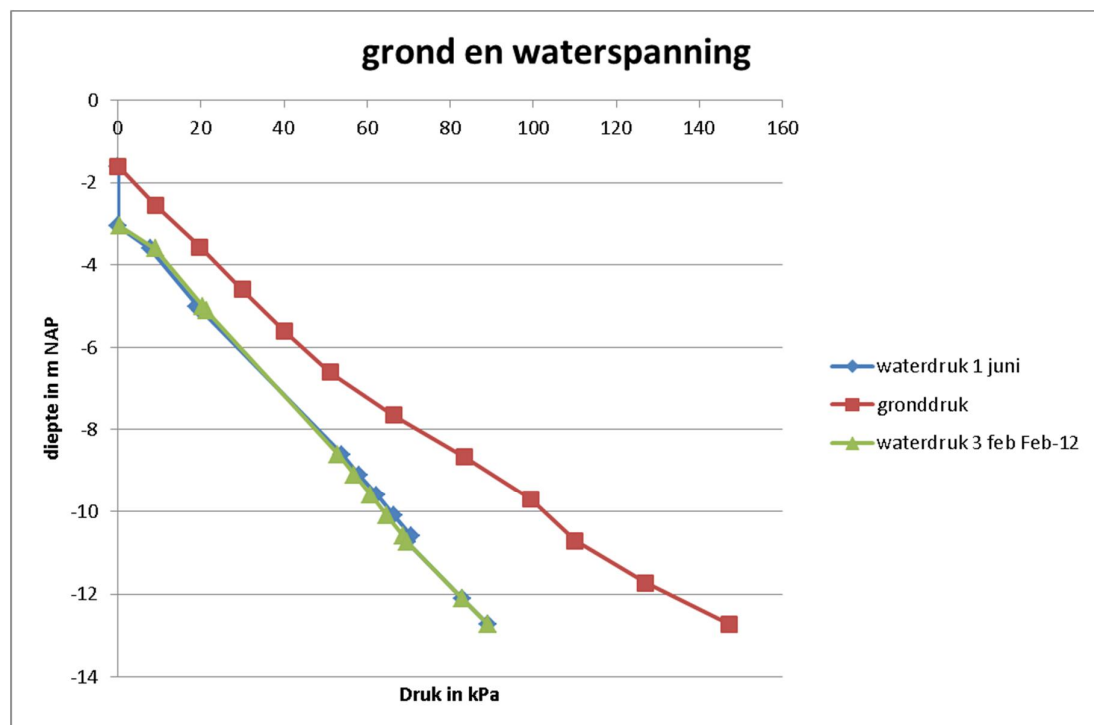
De waterspanningsmeters reageren anders op de regenbuien dan de peilbuismetingen in raai C2_ PB 3, zie Figuur 4.17 voor de waterspanningsmetingen van Alert Solutions en Figuur 4.18 voor de neerslaggegevens en peilbuismetingen van Deltares.



Figuur 4.18 Peilbuismetingen Deltares onder de kruin in raai C2 gerelateerd aan de neerslag (dag 0 – 500)

In de waterspanningsmeters is de piekreactie die in de peilbuismetingen zichtbaar zijn minder duidelijk zichtbaar. Dit zou kunnen worden verklaard omdat de waterspanningsmeters dieper staan dan de peilbuizen waardoor er enige mate van demping ontstaat in de reactie. Er is wel een duidelijk reactie, alleen is deze wat uit gedempt. Het lijkt erop dat de waterspanningsmeter een iets hogere stijghoogte aangeeft dan de freatische peilbuis in C2_PB3. De freatische lijn in C2_PB2 is hoger dan de waterspanningsmeter aangeeft. Dit kan komen doordat de waterdruk over het slappe lagen pakket verloopt van de hoge freatische waterstand tot aan de lage stijghoogte in het zand. De peilbuis geeft dit effect niet weer, de waterspanningsmeters lijkt deze invloed wel te merken. Het feit dat de waterdruk in de peilbuis sneller reageert dan de waterdruk gemeten met de waterspanningsmeters zou eveneens door dit effect kunnen worden verklaard.

Op basis hiervan kan worden gesteld dat de peilbuismetingen en de waterspanningsmetingen complementair aan elkaar zijn en dat beide informatie geven over de waterhuishouding in de dijk. Opgemerkt wordt dat het voor de sterkte van de waterkering belangrijk is om te weten in hoeverre de waterdruk op een niveau van bijvoorbeeld maaiveld – 2 m reageert (ongeacht de laagscheiding) op de freatische lijn. Wanneer deze min of meer constant blijft op een bepaalde diepte en de freatische lijn daalt sneller, dan neemt de grondspanning wel af als gevolg van verdroging van de freatische lijn, maar neemt de waterdruk niet af wat kan leiden tot een lagere sterkte. De waterspanningsmeter heeft dan de voorkeur. Figuur 4.19 geeft dit grafisch weer.



Figuur 4.19 Grond- en waterspanningen

Hier is op verschillende tijdstippen de grond en waterspanning gepresenteerd. In deze grafiek is de grondspanning met de rode lijn aangegeven, de waterspanning over de diepte is weergegeven met blauw en rood. Als gevolg van de hogere grondwaterstand op 3 februari 2012 is zichtbaar dat de freatische lijn hoger ligt en de stijghoogte in het veen hoger is (NAP -4 m). Op NAP – 6,0 m ongeveer op de overgang tussen veen en klei is de waterdruk

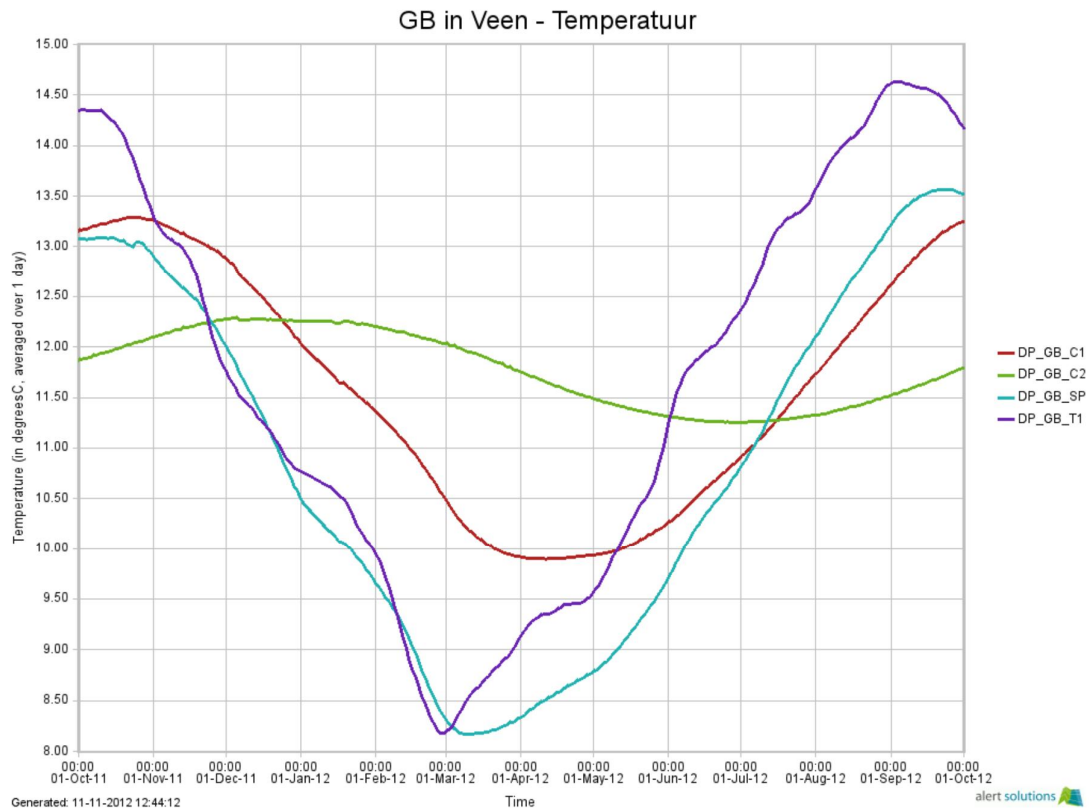
constant. Voor stabiliteitsanalyses is dit van belang en dit is dan ook de meerwaarde van waterspanningsmetingen t.o.v. enkel peilbuismetingen.

Wanneer het nu langdurig droog zou zijn loop naast de waterdruk ook de gronddruk hoog in het pakket terug. Hierdoor verlaagd ook de gronddruk op NAP – 6,0 m en op NAP -12,0 m terwijl de waterdruk in deze lagen gelijk blijft (worden beïnvloed door de waterdruk in het zandpakket. Hierdoor neemt de korreldruk (grond – waterdruk) af en dat is nadelig voor de sterkte van de dijk.

Over de meetperiode heen zijn er afwijkende meetpatronen gemeten (zie hiervoor figuur 5.2, de daling in de blauwe lijn) die niet verklaard kunnen worden. Bij het toepassen van waterspanningsmeters in veen is dit niet ongewoon. Als gevolg van gasvorming in het filter gaan de waterspanningsmeter afwijkende waarde registreren, die fysische niets te maken hebben met de waterdruk op dat niveau. Dit geldt voor bijna alle type waterspanningsmeters. Of de afname in DB_SG_SP en SG ook hierdoor is veroorzaakt is onzeker omdat gasvorming veelal leidt tot oplopende drukken en niet tot aflopende drukken. In de rapportage van Alert Solutions wordt het afwijkende meetpatroon toegewezen aan mogelijke “ontspanning” van water langs de stand van het meetsysteem. In het algemeen kan worden gesteld dat bij de opzet van een monitoringsstrategie met dit soort van meetinstrumenten rekening moet worden gehouden met uitval van een aantal sensoren. Dit kan worden opgevangen door het aantal instrumenten over te dimensioneren of vervangbaar/herplaatsbaar te maken.

De inclinometers van Alert Solutions hebben zeer kleine hoekverdraaiingen gemeten. De inclinometingen geven een indicatie dat er beweging plaatsvindt, maar de informatie is niet te herleiden tot absolute horizontale verplaatsingen (over verschillende grondlagen) omdat de streng meetsensors niet verankerd zijn in een zandlaag. Dit maakt dat de informatie die de metingen geven lastig te interpreteren is.

De temperatuurmetingen van Alert Solutions laten wel schommelingen zien die gerelateerd zijn aan de lange duur ontwikkeling van de buitentemperatuur. Zie hiervoor Figuur 4.20.



Figuur 4.20 Temperatuurmetingen Alert Solutions (1-10-2011 t/m 1-10-2012)

Als gevolg van de relatief hoge temperaturen in het najaar is de temperatuur relatief hoog wanneer de vorstperiode rond 3 februari 2012 invalt. De daling van de temperatuur in de meetsensoren daalt door nadat de vorst allang weer verdwenen is en bereikt op 1 maart 2012 de laagste temperatuur van ca. 8 graden. Daarna gaat het weer langzaam opwarmen. De gemeten temperaturen liggen ongeveer tussen de 8 en 11 graden. Dit soort waarden worden in het algemeen gemeten. Voor dit type meting is het interessant om te kijken hoe de temperatuur ontwikkeling is in een zeer warme droge periode om de nauwkeurigheid te toetsen.

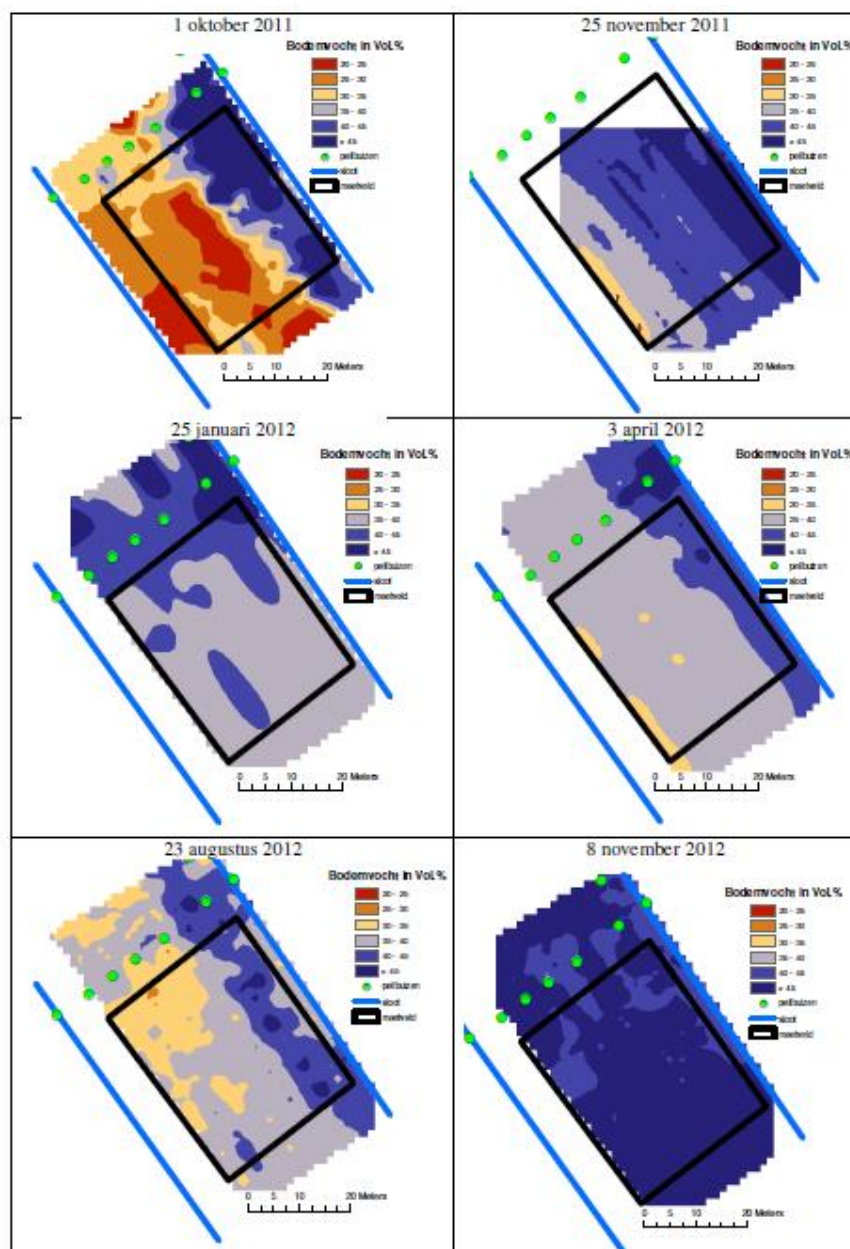
Metingen Ecoflight

Op basis van de data kan niet worden beoordeeld of Ecoflight de kleine veranderingen in vochtgehalte kan meten. De geanalyseerde tijdstippen laten wel degelijk een verandering van vochtverandering zien op basis van de referentiemonitoring en Miramapmetingen, maar deze leidt kennelijk niet tot een toename van de vegetatie-stress. Ecoflight geeft aan dat de mate van verdroging in de meetperiode onvoldoende geweest is om tot vegetatie stress te leiden. Het gemaaid gras is wel als vegetatie-stress zichtbaar. Hiermee kan worden afgevraagd of vegetatiestress altijd 1 op 1 is ter herleiden naar verdroging van dijken en hoe groot de verandering in bijvoorbeeld het vochtgehalte van dijken moet zijn, wil er een verschil in vegetatiestress optreden.

Metingen Miramap

Met de door Miramap gehanteerde techniek is een verandering in het vochtgehalte gemeten over de meetperiode die duidelijk herleidbaar is naar de gemeten vochtgehalte en freatische

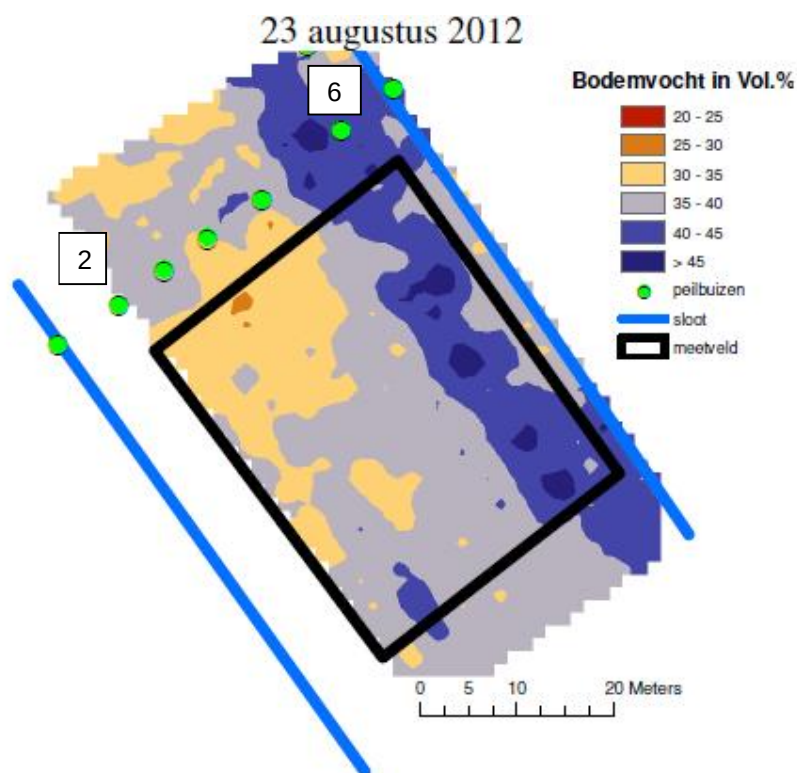
grondwaterstand met de referentiemonitoring. Figuur 4.21 geeft een overzicht van de metingen op zes verschillende tijdstippen.



Kleurenschaal: Rood 10-25%vocht, oranje 25-30%vocht, geel 30-35%vocht, grijs 35-40%vocht, lichtblauw 40-45% vochten donkerblauw > 45% vocht

Figuur 4.21 Miramap, ruimtelijk bodemvocht van de dijk op zes verschillende tijdstippen(kleurenschaal

In de rapportage van Miramap is detailFiguur 4.22 weergegeven met een bodemvochtbeeld voor 23 augustus 2012.



Figuur 4.22 Bodemvochtmeting Miramap (23 augustus 2012)

De groene bolletjes zijn aan de originele figuur toegevoegd, deze geven de bodemvochtmeters van de referentiemonitoring weer. Meter 2 staat in de buitenkruinlijn, meter 6 in de teen. De tussenliggende bolletjes geven de meters 3 tot en met 5 aan. In Tabel 4.2 Vergelijking bodemvochtmetingen referentiemonitoring met bodemvochtmetingen Miramap zijn deze bodemvochtmetingen vergeleken met de metingen van Miramap.

Vochtmeters	Vochtpercentage	
	Referentiemonitoring	Miramap
Nummers		
6	77	>45
5	38	35 – 40
4	20	30-35
3	29	35 – 40
2	16	Geen waarde

Tabel 4.2 Vergelijking bodemvochtmetingen referentiemonitoring met bodemvochtmetingen Miramap

In absolute zin wijken de data wel wat van elkaar af, echter de gemeten trend van een drogere en minder doge zone alsmede de afnemende en toenemende verdroging in de tijd is wel waarneembaar. Dit is ook wat de tabel aangeeft. De getallen betreffende het absolute vochtgehalte wijken onderling af. Omdat het hier enerzijds een puntmeting in de grond betreft vergeleken met een grotere oppervlakte scan, is dit mogelijk hierdoor deels verklaarbaar. Anderzijds meet Miramap het vochtgehalte op een ander niveau in de grond, de vochtmeter zit op c.a. 0,25 m onder maaiveld. Daarnaast geldt voor de bodemvochtmetingen van de referentiemonitoring dat nadere analyse voor wat betreft de absolute getallen gewenst is (t.a.v. onder andere gemeten variaties en de kalibratie). Dit maakt een vergelijking lastig.

Metingen ITC

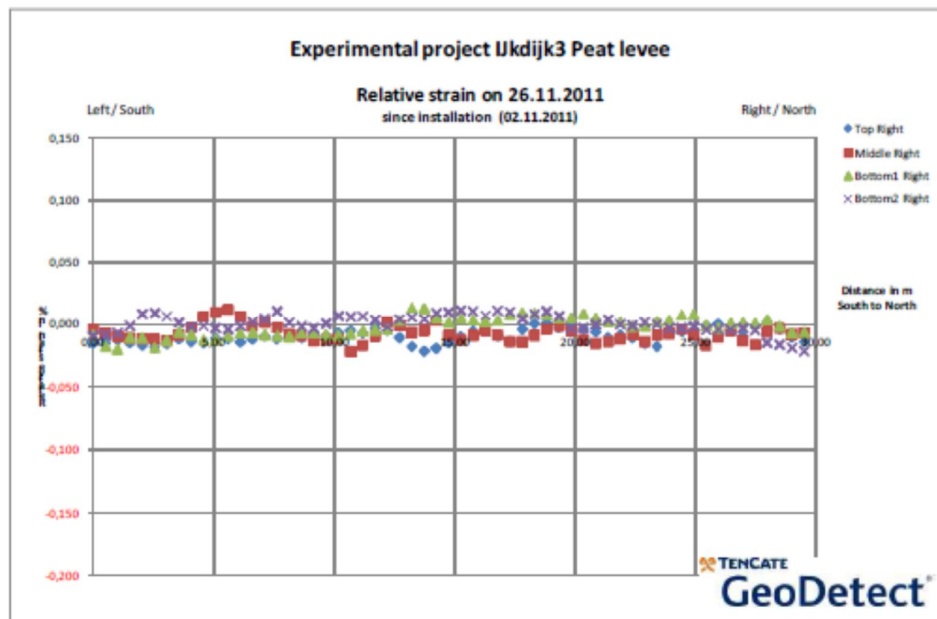
Het doel van de metingen van de door ITC gehanteerde techniek was het verzamelen van data van de dijk verkregen vanuit remote sensing technieken en in-situ veld metingen. De te verzamelen data levert informatie over het vochtgehalte van de dijk en de ontwikkeling hiervan in de tijd.

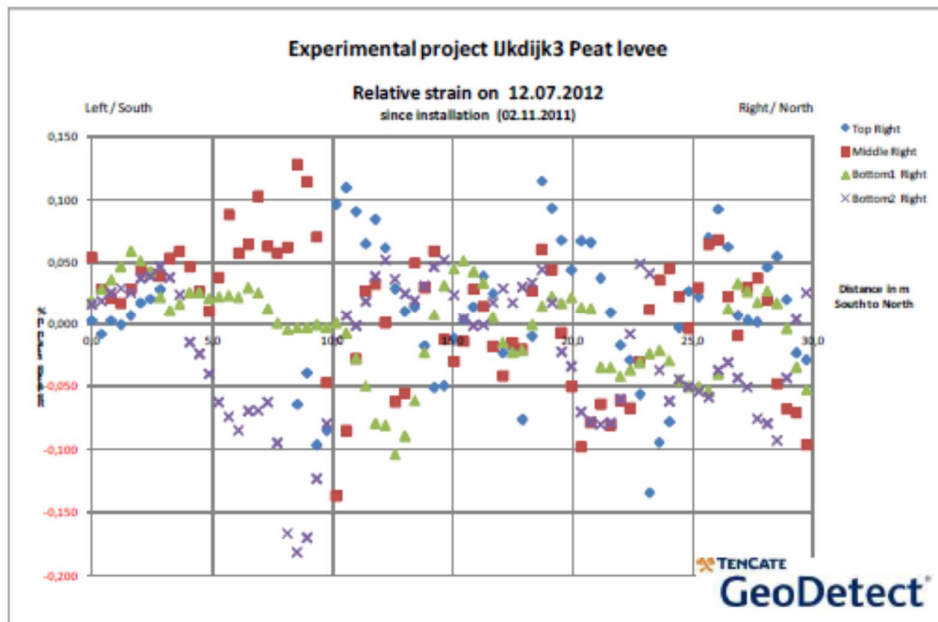
De hypothese was om op basis van reflectie technieken een inschatting te kunnen geven van het actuele vochtgehalte van een dijk gedurende droge periode en het opsporen van anomalieën in deze reflecties. Dit wordt gedaan door een droge en een natte situatie met elkaar te vergelijken. Op basis van reflectie technieken (remote sensing) en een correlatie tussen deze reflectie technieken en vochtmeters zou dan een betrouwbare indicatie van de verdroging van de dijk kunnen worden gegeven. Door het ontbreken van een droge periode kon deze hypothese niet getoetst worden. Alleen de eerste “basis” meting is uitgevoerd. Door de kleine hoeveelheid data heeft dus ook geen vergelijking kunnen plaatsvinden, ook niet op eventuele gebeurtenissen gedurende de meetperiode.

Metingen Ten Cate

Het Ten Cate meetsysteem heeft tot doel deformatie en temperatuur te kunnen meten met glasvezeltechnieken. Deze glasvezels zijn gemonteerd op een geotextiel wat in de grond is gebracht. De deformaties worden uitgedrukt als relatieve rekken. Een deel van de deformaties die worden gemeten worden door Ten Cate toebedeeld aan het nazakken van de sleuven waarin het geotextiel is aangebracht, zeker in de startperiode van het meten.

Door allerlei omstandigheden zijn er slechts zeer weinig meetdata beschikbaar. Uit de aangeleverde data is te zien dat de rekken in de glasvezels gedurende de proef toenemen. Zeker op basis van het figuur opgesteld op basis van de relatieve rekken van 12 juli 2012, Figuur 4.23 Relatieve rekmetingen Ten Cate van de 4 strips (26-11-2011 boven en 12-7-2012 onder), is te zien dat de een behoorlijke toename is van vervorming in vrijwel de hele dijk (kruin, talud, teen).





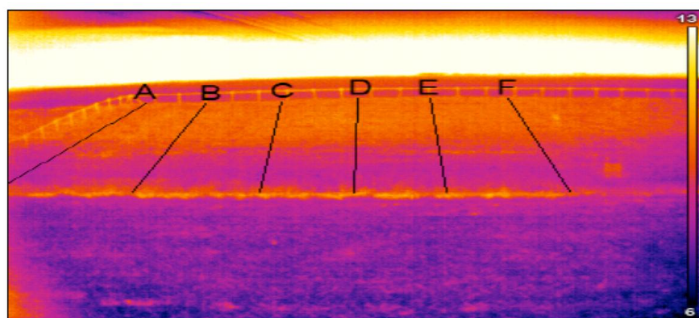
Figuur 4.23 Relatieve rekmetingen Ten Cate van de 4 strips (26-11-2011 boven en 12-7-2012 onder)

De metingen laten een behoorlijke scatter zien. Opvallend is dat de twee onderste raaien (beide bottom raaien) die dicht bij elkaar liggen eveneens onderling een grote scatter laten zien. De raai halverwege het talud laat in absolute zin de grootste variatie zien. Dit kan vanuit de extensometers worden verklaard. Verder is er onvoldoende data beschikbaar om hier nadere analyses op uit te voeren.

Metingen Intech

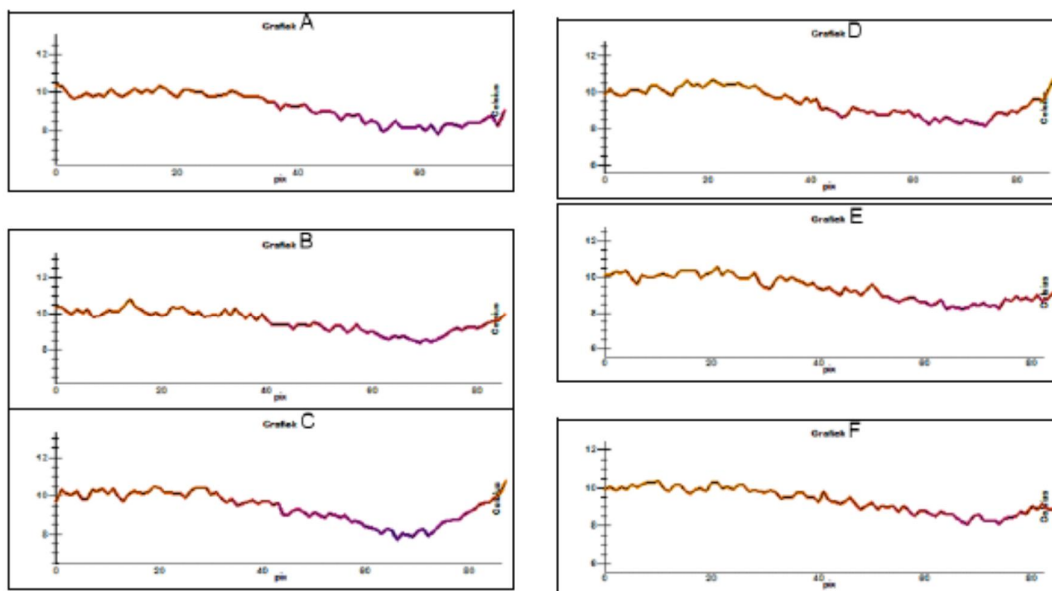
Intech meet met infrarood camera's aan de dijk om op die manier warmte beelden op te vangen die iets zouden kunnen zeggen over droogte. Als gevolg van het uitblijven van een droge periode is deze hypothese niet getest. Er wordt in de rapportage van Intech niet ingegaan op eventuele tussentijdse gebeurtenissen, en of er wellicht wel veranderingen zichtbaar zijn in het infrarood beeld. Wel wordt het beeld dat gemaakt is op 15 augustus 2012 nader uitgewerkt.

Onderstaand een afbeelding van 15 augustus 2012 om 2:00 uur. De periode hieraan voorafgaand is relatief droog geweest. Uit dit temperatuur beeld blijkt dat er een verschil is tussen de temperatuur aan de top van de dijk in vergelijking met de temperatuur aan de teen van de dijk. De temperatuur aan de kruin van de dijk is hoger dan aan de teen van de dijk. Een hoger vochtgehalte zorgt voor een lagere temperatuur. Deze trend over het dijkprofiel is ook waarneembaar in de referentiemonitoring (onder andere de vochtmetingen) en de metingen van Miramap.



Figuur 4.24 Infraroodbeeld Intech 15 augustus 2012

Voor nadere analyse is het verticale temperatuurverloop over zes raaien onderzocht. In onderstaande grafieken is het verloop van temperatuur op het dijkoppervlak per raai weergegeven. De koudere teen van de dijk als gevolg van een hoger vochtgehalte is in de grafieken zichtbaar.



Figuur 4.25 Nadere analyse verticaal temperatuursverloop Intech over 6 raaien

Er zijn door Intech echter te weinig opnames gerapporteerd om een eenduidige analyse en vergelijking van gebeurtenissen te kunnen maken voor het vastleggen van veranderingen in verdroging. Er is over een bepaalde periode meetdata verloren gegaan.

Zijn er verdere bijzonderheden te melden?

Zie voorgaande.

4.5 Livedijk Utrecht (Stichtse Rijnlanden & Rijkswaterstaat)

De informatie is voornamelijk afkomstig van Bernard van der Kolk (Deltares)

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Inleiding

De provincie Utrecht, Rijkswaterstaat Utrecht en Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden hebben de intentie gezamenlijk ervaring op te doen met innovatieve technieken voor dijk monitoring. Hiertoe is aangesloten op het ontwikkelinitiatief om te komen tot slimme dijken en robuuste monitoringsystemen van de Stichting IJkdijk. Voor het project LiveDijk Utrecht zijn een tweetal locaties uitgekozen om verdere ervaring op te doen. Het betreft de westelijke Voorhavendijk aan de rivier de Lek nabij de Prinses Beatrixsluis en de Grechtdijk, nabij Woerden. Deze laatste locatie betreft een boezemkade.

Relevantie

In Nederland wordt al enige jaren ervaring op gedaan met innovatief meten en monitoren in en om dijken. Binnen de diverse IJkdijk projecten is aangetoond dat het mogelijk is om (real-time) monitoring in een dijk te installeren en te koppelen aan eenvoudige analyse modules. Om het succes van meten en monitoren bij dijken te continueren is het van belang dat in LiveDijk projecten de meerwaarde van sensortechnologie in combinatie met dijk analysesystemen voor waterkeringbeheerders wordt aangetoond. Voorliggend rapport beschrijft de meerwaarde van dijk monitoring voor de genoemde dijklocaties en geeft aan hoe het monitoring strategie er uit zou moeten zien. Het is van belang om vooraf een strategie te bepalen en te onderzoeken wat relevant is om te monitoren. Elke dijkstrekking is anders door de heterogeniteit van ondergrond. Ook niet elk faalmechanisme is een even grote bedreiging van een waterkering. Daarnaast maakt het verschil in belasting, locatie en veiligheidsnormering dat elke monitoring strategie op de specifieke dijk locatie moet zijn afgestemd.

In de LiveDijk Utrecht worden realtime waterspanningmeting gekoppeld aan stabiliteitsberekeningen met DAM.

Locatie

Het LiveDijk Utrecht project bevat twee verschillende locaties waar een monitoringsysteem wordt ingericht. Hieronder wordt een beschrijving van de beide locaties gegeven.

Voorhavendijk

De Voorhavendijk is gelegen aan de westzijde van het toegangskanaal van de Beatrixsluizen te Nieuwegein en behoort tot dijkkring 15. De dijk keert het water van de rivier de Lek. In de laatste toetsronde (2006-2011) is de voorhavendijk volledig goedgekeurd. Dit maakt dat er uit veiligheidsoogpunt geen directe noodzaak is tot monitoring. Er bestaat echter het voornemen om dijkkring 15 samen te voegen met dijkkring 14 en 44. Hierdoor zullen de toetsnorm en de randvoorwaarden wijzigen.

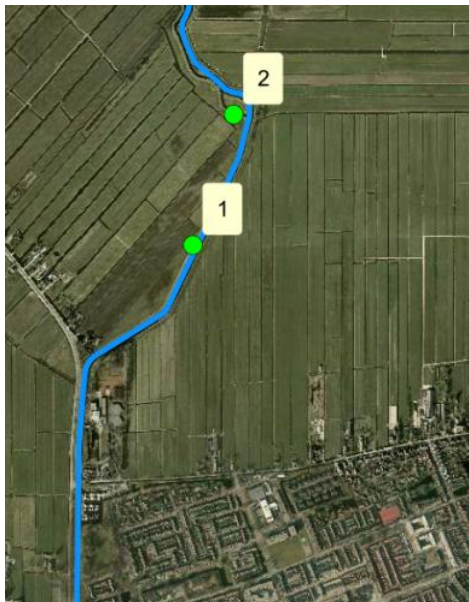
Omdat de dijk volgens de laatste toetsing veilig is maar de norm mogelijk gewijzigd gaat worden, wordt er gezocht naar een monitoringstrategie gericht op het verzamelen van aanvullende gegevens die meer inzicht geven in het gedrag van de dijk. Deze gegevens kunnen gebruikt worden bij het beoordelen van de dijk met ander randvoorwaarden. Daarnaast zijn uit het interview met de beheerder en analyse van de beschikbaar gestelde gegevens voldoende aanknopingspunten vastgesteld om een monitoringstrategie op te zetten.



Figuur 4.26 Locatie LiveDijk Utrecht Voorhavendijk te Nieuwegein

Grechtdijk

De Grechtdijk is een boezemkade gelegen ten noorden van Woerden en keert het water van de Grecht. De dijk bestaat uit klei op een veen en klei ondergrond.



Figuur 4.27 Locaties LiveDijk Utrecht Grechtdijk

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

De metingen in de LiveDijk Utrecht worden uitgevoerd door de sensoren van Alert Solutions en Ten Cate.

AlertSolutions meet met zijn GeoBeads de volgende parameters:

- Waterdruk.
- Inclinatie.
- Temperatuur.

Deze metingen worden zowel in de Grechtdijk als in de Voorhavendijk uitgevoerd.

Ten Cate meet temperatuur met behulp van een glasvezelkabel. Dit gebeurt alleen in de Grechtdijk.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

Er wordt nu circa een jaar gemeten. De metingen zijn nog niet geanalyseerd.

Zijn er bijzonderheden te melden?

Opvallend is dat er in de Voorhavendijk al 4 van de 27 GeoBeads binnen een jaar kapot zijn.

4.6 LiveDijkXL (Noorderzijlvest)

De informatie is voornamelijk afkomstig van Frans van den Berg (Deltares)

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

In de provincie Groningen worden drie dijken gemonitord; te weten: Ommelanderveedijk, Lauwersmeerdijk en de Eemskanaaldijk. Deze monitoring wordt onder andere in samenwerking met het waterschap Noorderzijlvest en stichting IJkdijk uitgevoerd. De kwaliteitsborging is in handen van Deltares.

Uit de derde veiligheidstoetsing van de primaire waterkeringen van waterschap Noorderzijlvest is gebleken dat circa een derde van de dijken niet voldoet aan de gestelde eisen. Er is niet met voldoende zekerheid te stellen dat deze dijken de omstandigheden waaraan getoetst wordt, zoals een extreme storm, kunnen weerstaan.

Het afkeuren van een dijk betekent dat er verbeterwerken of dijkversterkingen moeten worden uitgevoerd om de kering te laten voldoen aan de gestelde eisen. Tot de realisatie van de verbeterwerken wordt een traject doorlopen van planvorming, verkrijgen van vergunningen en budgettaire overwegingen. Tussen het moment van afkeuren en gereedkomen van de verbeterwerken ligt naar verwachting enkele jaren. Waterschap Noorderzijlvest wil onderzoeken op welke manier een dijkmonitoringssysteem toegepast kan worden 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.

Een aantal dijkvakken van de Ommelanderveedijk is, zoals reeds genoemd, bij de toetsing afgekeurd op onder andere macrostabiliteit en microstabiliteit. Daarom zijn er versterkingen gepland. Als voorbereiding hierop voert Waterschap Noorderzijlvest in samenwerking met

Stichting IJkdijk en een consortium van marktpartijen, onderzoek uit naar het gedrag van dijk met behulp van een dijkmonitoringsysteem. Zo weet het waterschap hoe de dijk ervoor staat. Dankzij de informatie uit dat systeem kunnen toekomstige versterkingen ook doelmatiger worden uitgevoerd.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Monitoringssysteem

De Ommelanderzeedijk wordt zowel op afstand (remote sensing) als door meten in de dijk (in-situ) gemonitord. Dit gebeurt met drie verschillende meettechnieken: waterspanningsmeters en peilbuizen, het DMC-systeem en het IDS systeem. De metingen worden gekoppeld aan informatie van ondergrond en omgeving om een goed beeld te krijgen van wat er in de dijk gebeurt

Waterspanningsmeters

Sensoren meten waterspanning in de dijk. Stijghoogtes en drukverschillen worden hiermee aangetoond. Het waterschap gebruikt deze gegevens in ontwerpberekeningen. Parameters, die de basis vormen voor het ontwerp van een dijkverbetering, zijn door de meetgegevens met meer zekerheid vast te stellen. Zo kan het ontwerp van de dijkversterking efficiënter worden uitgevoerd. Na de versterking kunnen effecten van versterkingsmaatregelen worden gemonitord, wat kennis oplevert die te gebruiken is in het oplossen van soortgelijke problematiek op andere plaatsen in Nederland en daarbuiten.

DMC systeem

Het Dijk-monitoring en –conditioneringssysteem (DMC) bestaat uit een horizontale filterbuis in de dijk. Een glasvezelsensor in de buis meet waterspanning en temperatuur. Behalve dat het systeem interessante informatie oplevert voor ontwerpberekeningen, anticipeert het ook op zorgwekkende waarden. Een te hoge waterspanning kan wijzen op stabiliteitsproblemen. Een afwijkende temperatuur kan een teken zijn van schadelijke waterstroming. In beide gevallen pompt het DMC systeem gecontroleerd water uit de dijk via de filterbuis, wat de stabiliteit en sterkte van de dijk ten goede komt.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

De metingen zijn nog niet geanalyseerd.

Zijn er bijzonderheden te melden?

De trillingen van de aardbevingen in 2013 in Groningen zijn door de verschillende meetsystemen gemonitord.

4.7 All-in one sensor validatie test

De meeste informatie is afkomstig van Goaitske de Vries en uit [de Vries et al., 2013a]

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Aanleiding

In de IJkdijk validatie-experimenten macro-instabiliteit en piping is aangetoond dat ontwikkelingen in de dijk met monitoringsinstrumenten realtime te volgen zijn [Weijers et al, 2009; Koelewijn et al, 2010].

Met behulp van aanvullende berekeningen is de sterkte van de dijk gedurende de proef op basis van de veelal handmatig ingevoerde actuele meetdata bepaald. De experimenten werden uitgevoerd met twee doelstellingen: een doelstelling met betrekking tot monitoringssystemen en een validatiedoelstelling met betrekking het faalmechanisme.

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

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

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

Objectieve vergelijking van dijkmonitoringssystemen

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

Doelstelling

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

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

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

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

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

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

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

Onderzoeksvragen

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

1.Op basis van welke relevante criteria kan de prestatie van meettechnieken worden beoordeeld?

2.Op basis van welke relevante criteria kan de prestatie van visualisatiesystemen worden beoordeeld?

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

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

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

Deelnemers

Er hebben negen (consortia van) meetpartijen en drie (consortia van) visualisatiepartijen deelgenomen aan het experiment.

Meetpartijen met hun meettechnieken:

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

Partijen met hun visualisatiesystemen:

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

Locatie

Net als de voorgaande IJkdijk experimenten vond dit experiment plaats op de IJkdijk locatie te Booneschans, nabij Bad Nieuweschans.



Figuur 4.28 Luchtfoto IJkdijk locatie met de Oost- en Westdijk in het midden en de Zuiddijk links op de achtergrond

Globale opzet experiment

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

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

De toegepaste meettechnieken en visualisatiesystemen. zijn hieronder kort samengevat. Voor een uitgebreide versie wordt verwezen naar [de Vries et al., 2013a] en bijlage A.

TenCate/Inventec

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.

Techniek

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

StabiAlert

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

Techniek

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

MetaSensing

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

Techniek

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

Koenders

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

Techniek

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

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

ITC

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

Techniek

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

InTech

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

Techniek

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

Empec

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

Techniek

De antenne van de grondradar is voorzien van een zender en ontvanger. De zender zendt een radio signaal in de orde van grootte van 100 Mhz in de grond. Dit signaal wordt teruggekaatst door voorwerpen, of aardlagen die verschillen van de laag die er boven ligt. De mate van terugkaatsing wordt bepaald door de di-elektrische constante van het materiaal. Als

twee verschillende materialen een zelfde constante hebben zal men deze niet kunnen waarnemen. Het teruggekaatste signaal wordt ontvangen door de ontvanger en werkt in de logger tot een visueel beeld. De tijd in nano seconden die het signaal aflegt wordt geregistreerd. De diepte wordt dus weergegeven in een tijd. Als de grondsnelheid, in m/ μ s, is bepaald kan de diepte in meters worden uitgerekend. De software op de logger is in staat om de gemiddelde grondsnelheid te bepalen. Deze wordt gebruikt voor de interpretatie van de diepte. De penetratiediepte van het signaal is afhankelijk van de signaalfrequentie, signaaldemping van de grond en de elektrische weerstand van de grond.

Volker Wessels Telecom/Landustrie

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

Techniek

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

Alert Solutions

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

Techniek

Alert Solutions heeft waterspanningsmeters en multisensormodules toegepast. Er zijn twee types waterspanningsmeters ingezet. De multisensormodules meten naast waterspanning ook temperatuur en inclinatie (de hoek van de sensor ten opzichte van het verticale zwaartekrachtveld). De instrumenten worden met standaard sondeermaterieel in onder meer dijken aangebracht.

Visualisatiesystemen

Siemens

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

Fugro/Nelen & Schuurmans

Fugro Geoservices en Nelen & Schuurmans hebben in het experiment hun ontwikkelde Levee-Portal toegepast. Het doel van het Levee-Portal is het accuraat weergeven van informatie met betrekking tot de staat van de verschillende dijklichamen gedurende de experimenten. Dit ambitieniveau is geënt op een hoger doel: een systeem dat ondersteuning

kan bieden bij de beoordeling van veiligheidssituaties gedurende hoog water. Nadrukkelijk is gekozen om een visualisatie-platform toe te passen dat voor verschillende gebruikers een eigen interface biedt. Achter het Levee-Portal draaide het datamanagement systeem GeODin. Dit systeem is geschikt voor grootschalig geografisch ontsluiten en analyseren van geotechnische data. Het toepassen van dit systeem maakte het mogelijk om zowel monitoringdata te analyseren als dijksterktemodelering toe te passen. Zo werd niet enkel monitoringdata gevisualiseerd, maar ook de dijksterkte real time in het Levee-Portal gepresenteerd.

AGT International

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

Beschrijving systeem

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

Wat is het eindresultaat van de metingen?

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

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

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

Met aanvullingen op deze voornoemde literatuur, zijn de volgende criteria opgesteld voor de meetparameters:

- Meettechnieken:
 - Meetnauwkeurigheid.
 - Reikwijdte.
 - Meetdichtheid sensornet.
 - Meetfrequentie.

- Mate van redundantie.
- Robuustheid.
- Aanlooptijd.
- Informatieverwerkingstijd.
- Interpretatie.
- Voorspelling faalmechanisme (incl. tijdstip).
- Visualisatiesystemen:
 - Combineren meettechnieken.
 - Functionaliteiten en informatievoorziening.
 - Helderheid uitspraken.
 - Voorspelling faalmechanisme (incl. tijdstip)

Per criterium is een waardering aangegeven met een waarderingsschaal. De criteria en waarderingen zijn per meettechniek en visualisatiesysteem in een samenvattende tabel weergegeven (Figuur 4.29). De diverse criteria met bijbehorende waardering geven een totaalbeeld van de inzet van de meettechniek of het visualisatiesysteem.

Criterium/Waardering	A	B	C	D	E
Nauwkeurigheid	1 Niet haalbaar, enige onnauwkeurigheid is inherent aan meten	Hoge nauwkeurigheid van het instrument	Matige nauwkeurigheid	Het systeem moet gekijkt worden met een andere meting	Niet nauwkeurig genoeg om bruikbaar te zijn voor de betreffende parameter
Reikwijdte	Volume meting (driedimensionale meting)	Oppervlaktmeting (tweedimensionale meting)	Lijnmeting	Puntmeting	Nietszeggend
Metingdichtheid	Niet generiek te kwalificeren	Niet generiek te kwalificeren	Niet generiek te kwalificeren	Niet generiek te kwalificeren	Niet generiek te kwalificeren
Meetfrequentie	Eenmaal per 15 seconden of vaker	Eenmaal per minuut	Eenmaal per uur	Eenmaal per dag	Eén meting per meerdere dagen
Mate van redundantie	Meervoudig uitgevoerd en back-up mogelijkheid van data	Meervoudig uitgevoerd	Eenkelvoudig uitgevoerd met back-up mogelijkheid van data	Eenkelvoudig uitgevoerd	Eenkelvoudig uitgevoerd, en meetsysteem blijkt (ten dele) niet te functioneren
Robuustheid	Er is rekening gehouden met alle mogelijke vormen van uitval en er is een oplossing voorhanden	Weinig omstandigheden denkbaar die invloed hebben op het functioneren	Techniek heeft stabiel gefunctioneerd onder gegeven omstandigheden	Veel moeite met veldomstandigheden	Kan niet omgaan met veldomstandigheden
Aanlooptijd	Onmiddellijk inzetbaar	Binnen enkele uren operationeel	Binnen enkele dagen operationeel	Binnen een week operationeel	Binnen minimaal een maand operationeel
Informatieverwerkingstijd	Begrijpelijke data is realtime beschikbaar	Begrijpelijke data is met een korte vertraging van enkele minuten beschikbaar	Er is nog een bewerkingslag noodzakelijk voordat begrijpelijke data beschikbaar is	Er is nog een bewerkingslag van 0.5 tot 2 dagen noodzakelijk voordat begrijpelijke data beschikbaar is	Er zijn meerdere dagen nodig om tot begrijpelijke data te komen
Interpretatie	Direct interpreteerbare gemeten grootheden en deze kunnen worden vergeleken met meerdere technieken	Gemeen grootheden zijn (vrijwel) direct interpreteerbaar	Interpreteerbaar zonder expert	Levert gegevens, maar vergt expert om iets mee te kunnen	Onduidelijk
Voorspelling faalmechanisme	Het juiste faalmechanisme wordt voorspeld op het juiste tijdstip	Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is en een volledig beeld weergeeft	Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is, maar niet het volledige beeld wordt weergegeven	Er wordt wel iets relevant (achteraf) gedacht, maar is onvoldoende specifiek gemaakt	Geen voorspelling of niet aangetoond
Combineren meettechnieken	2 Volumebeeld (meerdere metingen tot een driedimensionale weergave van de situatie in de tijd)	Raaien (meerdere metingen tot dwarsdoorsneden)	Tijd (meerdere metingen in de tijd)	Multi-scalar (meerdere metingen)	Scalar (één meting)
Functionaliteiten en informatievoorziening*	5 Kernfunctionaliteiten	4 Kernfunctionaliteiten	3 Kernfunctionaliteiten	2 Kernfunctionaliteiten	1 Kernfunctionaliteit
Helderheid uitspraken**	5 Niveaus	4 Niveaus	3 Niveaus	2 Niveaus	1 Niveau
Voorspelling faalmechanisme	Het juiste faalmechanisme wordt voorspeld op het juiste tijdstip	Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is en een volledig beeld weergeeft	Er wordt een voorspelling gedaan die voor een deel juist is, maar niet het volledige beeld wordt weergegeven	Er wordt wel iets relevant (achteraf) gedacht, maar is onvoldoende specifiek gemaakt	Geen voorspelling of niet aangetoond

Meettechnieken¹ Visualisatiesystemen². * Plotten grafieken van meetdata - weergave dijksterkte (eenvoudige dijksterktemodellering) - virtual dike modellering (geavanceerde dijksterktemodellering) - gebruik data driven models - informatie besluitvorming. ** Informatie op niveau bestuurder, manager, dijkbeheerder, expert en ingenieur.

Figuur 4.29 Criteria en waardering voor meettechnieken toegepast in het IJkdijk All in one-validatie-experiment [de Vries et al., 2013b]

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

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

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

In de samenvattende tabellen in [de Vries et al., 2013a] worden de meetpartijen en visualisatiepartijen genoemd en niet de specifieke ingezette meettechniek of het visualisatiesysteem. De beoordeling betreft wel deze specifieke meettechniek of visualisatiesysteem.

Conclusie

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

Als onderdeel hiervan zijn drie proefdijken op succesvolle wijze tot bezwijken gebracht (zie Figuur 4.30), waarbij zowel nieuwe meettechnieken als visualisatiesystemen op een goede manier konden worden getest.



Figuur 4.30 Bezweken Oostdijk

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

De in augustus beproefde proefdijken konden allebei bezwijken op de faalmechanismen piping (afhankelijk van de werking van de toegepaste pipingpreventiemaatregelen), micro-instabiliteit of erosie ten gevolge van overlopen. In beide gevallen is wel piping opgetreden wat echter niet tot bezwijken heeft geleid, maar heeft micro-instabiliteit van de zandkern tot een dusdanige verzakking van de proefdijk geleid dat de kruin uiteindelijk overliep en verdere verzakking en erosie tot een bres leidde. Dit gebeurde overigens in beide gevallen op enkele meters afstand van de rand van de proefdijk en niet helemaal aan de rand.

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

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

Meettechnieken

Er is een grote verscheidenheid aan meettechnieken uitgetest door negen verschillende meetpartijen, die drie remote sensingtechnieken en verder in-situ meettechnieken hebben ingezet. Eén techniek is een combinatie van een dijkversterkingstechniek en een meettechniek.

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

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

Visualisatiesystemen

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

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

vakkennis en bewezen-sterktemethoden en de het derde visualisatiesysteem legde sterk de nadruk op de visualisatie van data.

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

Full service dijkmonitoringssystemen

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

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

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

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

4.8 Livedijk Ameland (Wetterskip Fryslân) – piping tijdsafhankelijk

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

De Waddenzeedijk van Ameland maakt onderdeel uit van dijkkringgebied 2 (normfrequentie 1/2000 jaar). In de tweede toetsronde is de zeedijk gedeeltelijk afgekeurd. Dit deel is opgenomen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP).

Wetterskip Fryslân is de beheerder van de waterkering en heeft Witteveen+Bos opdracht gegeven om de versterkingsmaatregelen te ontwerpen. Over een aangesloten traject van circa 300 m zijn op dit moment pipingmaatregelen opgenomen in het voorkeursalternatief (VKA). Daarbij is uitgegaan van de vigerende rekenregel van Sellmeijer. Worden de nieuwe inzichten gehanteerd die de afgelopen jaren zijn ontwikkeld binnen het programma Sterkte Belastingen Waterkeringen onderdeel piping, dan zijn over een langer traject maatregelen noodzakelijk.

Het waterschap wil graag: i) weten of de huidige voorziene maatregelen verder geoptimaliseerd kunnen worden, ii) beter de gevolgen in kaart brengen van de nieuwe inzichten, indien de nieuwe rekenregel formeel wordt vastgesteld en iii) bijdragen aan het lopende onderzoek naar piping door een deel van de waterkering beschikbaar te stellen voor aanvullend onderzoek.

Het is niet mogelijk om alle vragen rondom piping te onderzoeken. Er is daarom expliciet voor gekozen om het onderzoek te richten op zeedijken en dan vooral op de invloed van een dynamisch waterstandverloop op de kans op piping.

Het faalmechanisme piping zoals hier beschouwd is kan in principe alleen optreden indien een cohesieve laag (doorgaans klei of veen, maar het kan ook een constructie zoals een betonnen keermuur zijn) over een zandlaag heen ligt, er sprake is van een significant waterstandsverschil (een groot verval over de kering) en die zandlaag voldoende contact maakt met het bovenstroomse water, zodat er een kwelstroming kan optreden.

Het hoofddoel van het project is het verkrijgen van kennis over piping ter plaatse van zeedijken. Deze kennis moet leiden tot:

- Versterking Waddenzeedijk Ameland:
 - Geoptimaliseerd ontwerp van de versterkingsmaatregelen.
 - Meer inzicht in de gevolgen van de opgedane kennis uit het onderzoeksprogramma SBW voor zeedijken.
- IJkdijk: LiveDijk projecten:

De hoofddoelstellingen van de LiveDijk projecten onderzoek kunnen als volgt worden verwoord:

 - Bewaken van de veiligheid (waaronder early warning) van de afgekeurde dijken tot deze zijn verbeterd.
 - Het leveren van aanvullende informatie over de opbouw van bodem en dijk, ten behoeve van het optimaliseren van de versterkingswerkzaamheden.
 - Het monitoren van de dijkvakken voor, tijdens en na de verbeterwerken ten einde het beheer en onderhoud te kunnen optimaliseren (o.a. de toetsing op veiligheid en reguliere onderhoudswerkzaamheden).
 - Het opdoen van nieuwe kennis over het gedrag van dijken, wijze van toetsing, etc.
- SBW:
 - Bijdragen aan het lopende onderzoek naar piping door een deel van de waterkering beschikbaar te stellen voor aanvullend onderzoek.
 - Het genoemde pipinggevoelige traject kan een proefproject zijn voor het uittesten van de nieuwe piping regels, met name gericht op de nieuwe criteria voor het starten van een pipe in relatie tot de locale gradient.

De volgende partijen zijn betrokken bij het project:

- Wetterskip Fryslân: beheerder van de projectlocatie en verantwoordelijk voor het versterkingsproject Waddenzeedijk Ameland.
- Witteveen+Bos: adviseren van het waterschap voor het versterkingsproject Waddenzeedijk Ameland.
- Deltares: uitvoering programma SBW en inhoudelijk betrokken bij het IJkdijk-ontwikkelprogramma (partner binnen de Stichting IJkdijk).
- Stichting IJkdijk: penvoerder en coördinator IJkdijk-ontwikkelprogramma.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Monitoring richt zich op het verkrijgen van informatie voor het kunnen behalen van de hoofddoelstellingen. De geselecteerde dijk is gevoelig voor piping, zo blijkt uit de toetsing. De resultaten van de toetsing geven echter reden om aan te nemen dat met aanvullend onderzoek tot een ander oordeel gekomen zou kunnen worden.

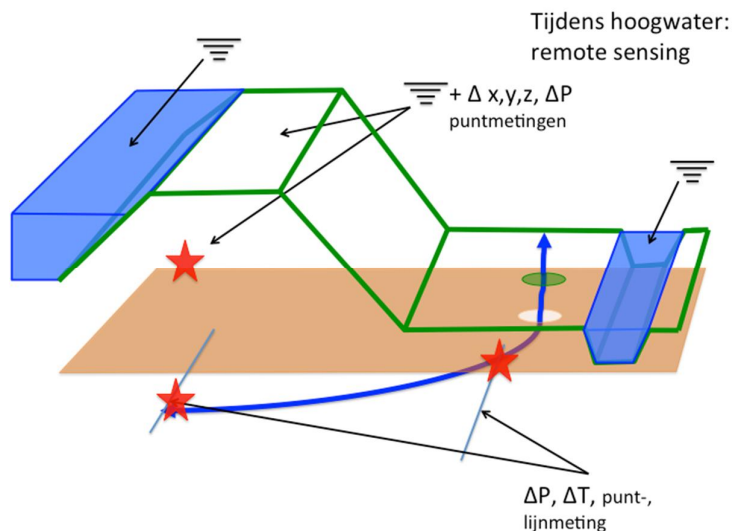
Aanvullend op de parameters die juist hiervoor gemeten worden, zijn in onderstaande lijst ook andere parameters vermeld die passen in het concept LiveDijk van Stichting IJkdijk. Tot een definitieve afweging van te monitoren parameters wordt later in het project gekomen. In ieder geval worden parameters gemeten die betrekking hebben op piping.

- Waterstand buitenwater.
- Waterstand binnendijks.
- Waterdruk in de dijk (puntmetingen).
- Waterspanning en temperatuursverschillen.
 - Aan de teen van de dijk (ruimtelijk zeer frequent).
 - Onder de dijk (indien mogelijk).
- Beweging van de dijk (x, y en z coördinaten) gerelateerd aan het dijkprofiel en door beweging veroorzaakte veranderingen hierin (optioneel).
- Kwel met remote sensing (optioneel).
- Vervorming met remote sensing (optioneel).

Specifieke locaties, invalshoek en technieken van de diverse metingen hangen af van de locatiespecifieke omstandigheden. Er wordt op twee verschillende locaties gemeten: nabij km 2.4 (referentielocatie) en nabij km 7.0 (op piping afgekeurde locatie).

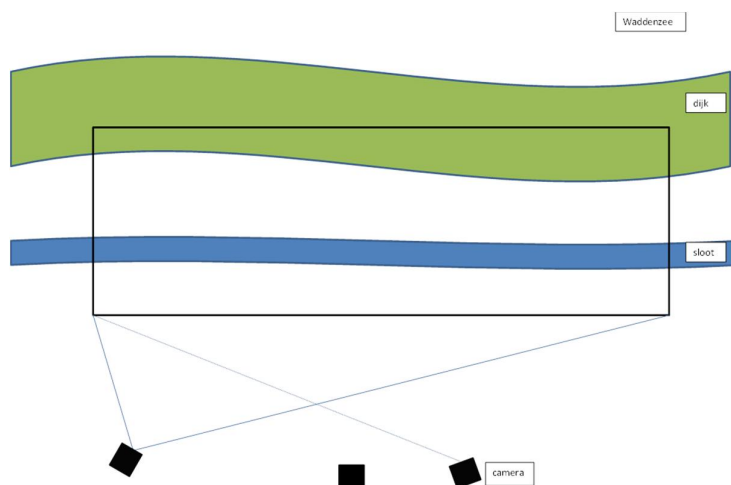
Eventuele mogelijkheden zijn opgenomen in onderstaande schematische weergave, zie Figuur 4.31.

De rode sterren geven aan waar in het geval van een early warning belangrijke signalen worden gegeven. Deze locaties zijn belangrijk voor de identificatie van de verschillende faalmechanismen.



Figuur 4.31 Testlocatie Ameland

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. Zie Figuur 4.32



Figuur 4.32 Metingen Intec



Figuur 4.33 Locatie puntmetingen op de binnenberm van de waterkering (situatie 7 maart 2013)

Er wordt tevens gemeten met de grondradar. Deze is gericht op twee aspecten:

- Het detecteren van eventueel aanwezige holtes/onregelmatigheden in de ondergrond.
- Om een beter beeld van de ondergrond te verkrijgen.

Voor het eerste aspect is het belangrijk dat dit met enige regelmaat gebeurt voor, tijdens en na een storm (hoogwater), omdat dit mogelijk een manier is om pipingkanaaltjes vroegtijdig te kunnen detecteren. Als deze metingen niet herhaaldelijk worden uitgevoerd, kan kennis hieromtrent ook niet worden opgebouwd.

Voor het tweede aspect is in het monitoringsplan opgenomen dat het maken van dwarsprofielen eenmalig nodig is en niet meer tijdens de andere meetperioden. Na het maken van de dwarsprofielen is de ondergrond beter in beeld gebracht, inclusief het door of aflopen van de kleilaag in het voorland. Ook eventueel de richting en lengte van eventueel aanwezige onregelmatigheden wordt op deze manier in beeld gebracht.

Tijdens die andere meetperioden gaat het dan voornamelijk om het ruwweg controleren op onregelmatigheden (holtes) in de ondergrond, omdat het vermoeden is als er holtes aanwezig zijn, deze in de dwarsrichting op de dijk zullen lopen.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

De resultaten van de metingen worden momenteel bestudeerd.

Zijn er bijzonderheden te melden?

Nog niet.

4.9 Livedijk Piping (Rivierenland) –

De informatie is voornamelijk afkomstig van Ulrich Förster (Deltares)

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Dit pilotproject bij Rivierenland bevindt zich nog in de opstartfase. In april 2014 zullen de aannemers de pilotlocaties inrichten. Het gaat hierbij om 5 pilottrajecten (4 in primaire kering) met verticaal zandremmend geotextiel.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Er is nog niets gemeten. De bedoeling is om aan de hand van glasvezelkabelmetingen (actieve methode: opwarmen door middel van een koperkabel en afkoelen als gevolg van langsstromend water) langs een in te brengen geotextiel te controleren of de doorlatendheid van het doek in de loop van de tijd achteruit gaat.

Verder onderzoek wordt uitgevoerd om door middel van radartechnieken de ontwikkeling van het pipingproces in het veld te volgen. Hier heeft reeds onderzoek onder laboratoriumomstandigheden voor plaatsgevonden.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

Nog niets.

Zijn er bijzonderheden te melden?

Nog niet.

4.10 Monitoring baggerspecie depot Ketelmeer

De informatie is voornamelijk afkomstig van Peter Kraaijenbrink (Deltares) en [Peters, 1999]

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Dit project is opgenomen in deze lijst van proeftuinen, omdat dit een van de eerste grote online monitoringsprojecten was.

Door zijn ligging aan de monding van de IJssel heeft het Ketelmeer jarenlang als “bezinkput” gefungeerd zodat het grootste deel van de bodem van het meer nu ernstig verontreinigd is. De Minister van Verkeer en Waterstaat heeft daarom besloten een baggerspeciedepot aan te leggen en het Ketelmeer te saneren door het vervuilde slib weg te baggeren en op te slaan in het depot. Het IJsselmeer en het grondwater worden daardoor beschermd tegen verontreinigingen, die vanuit de huidige verontreinigde waterbodem van het Ketelmeer worden verspreid. Het depot dient zodanig ingericht te zijn dat de specie wordt geïsoleerd van de omgeving waardoor geen onaanvaardbare uittrekking van verontreinigingen naar het grondwater kan optreden.

Het depot, met een nuttige inhoud van circa 23 miljoen m³, bestaat uit een diepe put tot circa NAP -45 meter, omgeven door een cirkelvormige ringdijk met een hoogte tot NAP +10 meter en een diameter van circa 1 km.

Probleemstelling

Tijdens het ontwerpproces voor het speciedepot Ketelmeer zijn geotechnische ontwerpberoekeningen uitgevoerd om de risico's van instabiliteit van de ringdijk en het consolidatiegedrag van de ondergrond vast te stellen. In de praktijk blijkt dat, ondanks uitgebreid en goed uitgevoerd grondonderzoek, het consolidatiegedrag van de ondergrond kan afwijken van het door middel van berekeningen voorspelde gedrag. Het consolidatiegedrag is van grote invloed op de stabiliteit van de grondconstructies. Door uitvoering van metingen en een zorgvuldige interpretatie van die metingen kan een goed inzicht worden verkregen in de werkelijke toestand van de ondergrond in de aanleg- en de vulfase van het depot. De resultaten van de waterspanningsmetingen kunnen consequenties hebben voor de snelheid waarmee ophogingen kunnen worden uitgevoerd. Bij een sneller verlopend consolidatieproces zullen de ophoogslagen sneller achter elkaar kunnen worden uitgevoerd. Bij een langzamer verlopend proces is het tegenovergestelde het geval.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Doel

Het doel van het monitoringssysteem is de registratie van de waterspanningen in de holocene lagen tot 7 meter onder de aan te leggen ringdijk. Bij de opzet van het systeem is uitgegaan van het volgende programma van eisen:

- Bereik waterspanningsmetingen tot 25 meter waterkolom (2,5 bar).
- Nauwkeurigheid waterspanningsmeting +/- 10 cm waterkolom.
- Aantal meetlokaties: 78.
- Meetperiode 3 jaar; 2 waarnemingen per dag.

Opzet monitoringssysteem

In principe zijn er twee mogelijkheden voor de opzet van het monitoringssysteem. De eerste is het installeren van waterspanningsmeters die handmatig kunnen worden afgelezen. Deze aanpak wordt bij veel ophogingen en dijkversterkingen reeds toegepast waarbij hydraulische (bijvoorbeeld de Bourdon) en pneumatische waterspanningsmeters worden gebruikt. De relatief goedkope instrumenten kennen echter beperkingen qua nauwkeurigheid en onderhoud. Daarnaast zullen de meetkosten bij deze intensiteit van de waarnemingen hoog zijn.

Vanwege de hoge meetfrequentie over een lange periode en de bereikbaarheid van het depot (bootverbinding) is het duidelijk dat een geautomatiseerd monitoringssysteem, geheel op afstand te bedienen, de voorkeur heeft. De investeringen in de automatische data-acquisitiesystemen worden terugverdiend door een sterke reductie van de meetkosten. Als sensor is voor de VWP gekozen.

Vibrating Wire Piezometer (VWP)

De optredende grondwaterspanning wordt bij een VWP gemeten met behulp van een trillende snaar sensor ingebouwd in een conus. Via een filter wordt het poriënwater in contact gebracht met het membraam van de druksensor. In de druksensor bevindt zich tussen het membraam en de behuizing een ingeklemde snaar die in trilling wordt gebracht. De resonantiefrequentie van de trilling wordt gemeten. Bij een hogere grondwaterspanning verslapt de snaar waardoor de frequentie afneemt. Omgekeerd bij een lagere grondwaterspanning neemt de frequentie van de uitlezing toe.

Om voor de invloed van temperatuursvariaties te compenseren is de VWP voorzien van een temperatuursensor. De VWP meet absolute waterdrukken zodat deze meter gevoelig is voor luchtdrukvariaties. Voor de barometrische correctie wordt daarom gelijktijdig met de uitlezing van de VWP de heersende luchtdruk bepaald.

Testen waterspanningsmeters

De waterspanningsmeters van Sinco en Geokon hebben beide praktisch gelijke meetspecificaties. Het meetbereik is 35 meter waterkolom. De nauwkeurigheid van het instrument uitgedrukt in percentage van de volle schaal bedraagt +/- 0,1% FS. De maximale overdruk op het membraam van de opnemer is 2x FS (FS = volle schaal).

Over het lange termijn gedrag van dit type sensoren is gepubliceerd [Mc Rae, 1991]. In het artikel worden testen onder laboratoriumomstandigheden beschreven over een meetperiode van 7 jaar. Daarbij wordt een drift aangetoond kleiner dan 0,1% FS. Over een meetperiode van drie jaar betekent het voor deze waterspanningsmeters een maximaal nulpuntsverloop van 1,5 cm waterkolom.

De waterspanningsmeters van beide fabrikanten zijn door Grondmechanica Delft onderzocht. De eerste test is een controle op de meetnauwkeurigheid, waarbij de trillende snaar sensor wordt aangesloten op een druk-ijkinstallatie. In 12 stappen over een bereik van 0 tot 3,5 bar wordt een bepaalde druk opgelegd aan de sensor en de frequentie van de trillende snaar gemeten. De nauwkeurigheid is het maximaal gevonden verschil tussen opgelegde druk en gemeten druk uitgedrukt in procenten ten opzichte van de volle schaal. Daarna zijn in dezelfde testopstelling beide waterspanningsmeters overbelast tot een maximum druk van 10 bar.

Uitvoeringswijze monitoringsysteem

De installatie van het monitoringsysteem heeft plaatsgevonden nadat de ringdijk tot ongeveer 1 meter boven het wateroppervlak was opgehoogd. →De waterspanningsmeters zijn weggedrukt met een sondeervoertuig waarbij speciale aandacht is gegeven aan een goede afdichting van het gat. Dit ter voorkoming van een lekweg tussen waterspanningsmeter en buitenlucht.

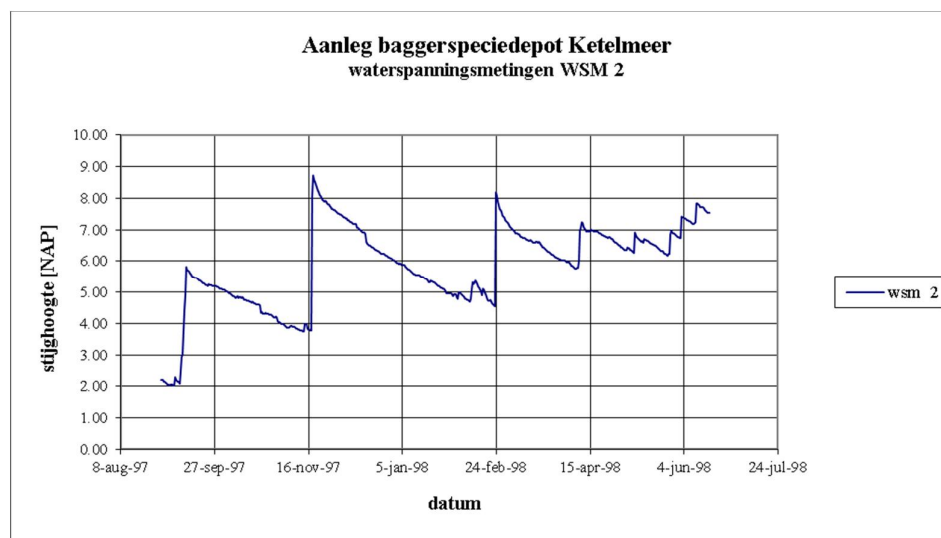
Het data-acquisitiesysteem bestaat uit een aantal meetstations met de volgende voorzieningen:

- Een datalogger voor uitvoering van de metingen en een eerste opslag van de meetgegevens.
- Een aansturingseenheid voor de trillende snaar sensoren.
- Een barometersensor voor registratie van de luchtdruk.
- Een GSM-telefoonverbinding voor het verzenden van de meetgegevens.
- Een zonnepaneel met accu voor de energievoorziening.

De meetstations zijn, in verband met de nog aan te leggen ringdijk, op de juiste hoogte gemonteerd op stalen buispalen. Na plaatsing van alle waterspanningsmeters en meetstations is onder maaiveld de bekabeling aangelegd. In de dagelijkse praktijk wordt nu elke week vanaf kantoor met behulp van een computer en telefoon-modem contact gemaakt met de meetstations. De meetresultaten van de afgelopen week worden binnengehaald en verwerkt voor invoer in de observatiemethode WASPAN van Deltares.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

Dit was in 1999 het eerste online monitoringsproject met behulp van waterspanningsmeters in Nederland. Met deze methode zijn de dijken langs het baggerspeciedepot succesvol en snel opgehoogd. Het ophoogschema en het verloop van de waterspanningen in de tijd is in Figuur 4.34 weergegeven.



Figuur 4.34 Verloop waterspanningsmetingen waterkeringen baggerspeciedepot

Zijn er bijzonderheden te melden?

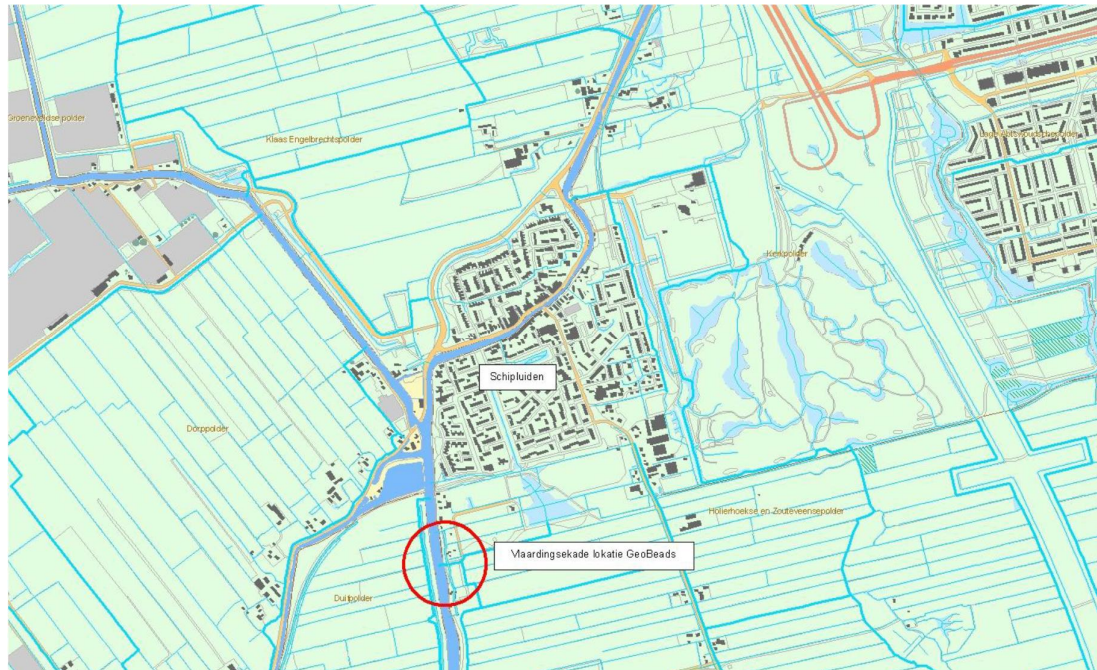
Dit is het eerste grote monitoringsproject waarbij grote aantallen waterspanningsmeters zijn ingezet voor een on-line monitoringsproject.

4.11 Vlaardingsekade (Delfland)

De informatie is voornamelijk afkomstig van Jan Tigchelaar (HH Delfland) en [Tigchelaar, 2012].

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

De proeftuin bevindt zich langs een boezemvaart in Delfland, tussen Schipluiden, Vlaarding en Maasland, in opdracht van het Hoogheemraadschap van Delfland samen met Alert Solutions.



Figuur 4.35 Pilotlocatie Vlaardingsekade

Dit project heeft – voor Nederlandse dijkmonitoringsbegrippen – uitzonderlijk lang gelopen. Na de start in 2008 is gedurende ruim 2,5 jaar met GeoBeads gemeten.

Een klein deel van de binnenberm van de kade vertoonde in 2008 scheurvorming van enkele cm's over een lengte van ongeveer 9m. Deze scheurvorming vond plaats op de binnenberm op het fietspad. Omdat nog met de uitvoering van de werkzaamheden gestart moest worden was een (tijdelijke) maatregel nodig om de stabiliteit van de kering te verzekeren.

Gekozen is voor het dichtzetten van de teensloot door het aanbrengen van een duiker in de teensloot over een lengte van ongeveer 25m en vervolgens de duiker af te dekken met grond. Een andere optie, namelijk het aanbrengen van enkel een monitoringssysteem zonder aanvullende maatregelen, werd als te risicovol bestempeld, temeer omdat een gedetailleerd

veiligheidsbeeld van de kering ter plaatse ontbrak. De duiker en de aangebrachte grond liggen nog steeds ter plaatse.

Om een beeld te krijgen van de praktische toepasbaarheid en effectiviteit van GeoBeads in relatie tot toetsing en kadeverbetering is in samenwerking met Alert Solutions een GeoBeads netwerk geïnstalleerd, als pilot. In 2012 is aanvullend veldonderzoek en aanvullende metingen verricht om het functioneren van het systeem nader te bestuderen en vooral ook om te kunnen inschatten in hoeverre monitoring een volwaardig alternatief is voor grootschalige verbeteringen of vervanging van beheertaken en welke consequenties dit heeft voor een organisatie.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Instrumentatie: enkele tientallen GeoBeads, peilbuizen en een 3D laserscan.

Metingen betreffen: waterspanningen, lokale tilt (t.o.v. verticaal, in twee onderling loodrechte richtingen), vervormingen, en temperatuur.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

De analyse is uitgebreid beschreven in [Tigchelaar 2012].

Zijn er bijzonderheden te melden?

Verder is er veel kortstondige en langdurige uitval van de instrumenten opgetreden. Alle sensoren hebben in de meetperiode van 2,5 jaar uitval vertoond met een duur tot enkele maanden. Ongeveer een derde van de GeoBeads is definitief uitgevallen. Dit is schijnbaar willekeurig gebeurd: er zijn geen specifieke meettraaien met bovenmatig veel of weinig uitval. Ook blijkt de meetfrequentie in perioden van functioneren betrekkelijk variabel te zijn en slecht overeen te stemmen met de ingestelde meetfrequentie. Grote invloed (vert en hor) plaatsingsnauwkeurigheid en referentiemetingen (luchtdruk) op stijghoogte. Instelverschijnselen na installatie van enkele weken (lokale tilt). Invloed ruis op eindresultaat. Vochtgehaltemetingen zijn wel gedaan maar waren experimenteel. Opgemerkt wordt dat sinds 2008 het GeoBeads product verder is ontwikkeld. Met name op het vlak van de meetinstrumenten zelf (modules) en de installatiewijze.

4.12 Stammerdijk(Waternet) - 'representatieve locatie'

De informatie is voornamelijk afkomstig van Waternet (Rob van Putten).

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

In het kader van Urbanflood is een proef uitgevoerd bij de Stammerdijk in het beheergebied van Waternet. UrbanFlood is een project in het kader van de European Union 7th framework Programme dat ontwikkelt en test een internetbased systeem voor Early Warning (EWS). Het project is gestart in december 2009. Het wordt uitgevoerd door een consortium van Cyfronet (Polen), HR Wallingford (Verenigd Koninkrijk), OOO Siemens (Rusland), STOWA, TNO en de Universiteit van Amsterdam (Nederland).

De testlocatie "Stammerdijk" is gerealiseerd in de regio Amsterdam, in nauwe samenwerking met Waternet, de regionale waterbeheer organisatie. Waternet is zeer geïnteresseerd in het

concept van de digitale monitoring van dijken, niet alleen voor een Early warning System (EWS), maar ook om de regelmatige controle van de (regionale) waterkering te vergemakkelijken en zelfs voor de 6-jaarlijkse toetsing. Waternet is voornemens om op meerdere locaties testlocaties aan te brengen.



Figuur 4.36 Testlocatie Stammerdijk

De Stammerdijk ligt tussen de Muiderstraatweg en de Gaasperdammerweg in Diemen.

De veenkade wordt met ruim 20 instrumenten nauwkeurig gemonitord. De monitoringsinstallatie is verdeeld over 2 raaien met 3 verticalen met waterspanningsmeters van het type GeoBeads. De instrumentatie is in grondputten afgewerkt en de data wordt met hoge frequentie draadloos verzonden.

Het doel van de monitoring is de bepaling van het gedrag van de, voor Waternet typische, secundaire waterkering met gering verval (2-3m). In deze proef is met name de geschiktheid van de sensoren beschouwd in plaats van de traditionele meetapparatuur. Voorts is er in deze proef de invloed van de verschillende externe belastingen beschouwd, zoals de verkeersbelasting en scheepvaartbelasting.

Met de inzet van monitoring onderzoekt Waternet actief of haar oordeel over delen van de secundaire keringen kan worden aangescherpt. Op basis van huidige inzichten zou een deel van de kades moeten worden afgekeurd. Aanvullend onderzoek met monitoring kan ertoe leiden dat delen van de kades alsnog kunnen worden goedgekeurd. Dit zou aanzienlijke besparingen tot gevolg hebben.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Met behulp van de GeoBeads is waterdruk, relatieve verplaatsing en de temperatuur gemeten. Tevens zijn er ook peilbuizen en waterspanningsmeters met loggers gebruikt om de waterspanning te bepalen..

Wat is het eindresultaat van de metingen?

GeoBeads meten nauwkeuriger dan traditionele apparatuur. Kleine wisselingen in druk zijn beter te bepalen, de ruis is bij GeoBeads lager dan bij traditionele waterspanningsmeters. Voor Waternet is dit een reden om GeoBeads goed gevalideerd te zien, zodat zij deze zelf vaker kunnen inzetten.

De verkeersbelasting heeft nauwelijks effect op de wateroverspanning. Dit komt mogelijk door de puinlagen die zich onder de verharding bevinden, waardoor er een grote spanningsspreiding plaatsvindt. Daarnaast was het moeilijk om de verkeerslast langdurig te laten plaatsvinden, zonder de doorstroming in het verkeer niet teveel te hinderen. Opvallend was dat de wateroverspanning ten gevolge van de verkeerslast instantaan was. De waterdruk liep niet langzaam op en verdween vrijwel direct na het verwijderen van de verkeerslast.

De (relatieve) verplaatsingen zijn over 2 jaar binnen de 1 graad gebleven en veelal veroorzaakt door het eigen gewicht van de sensoren. Het is een moeilijk te interpreteren parameter doordat de verplaatsing relatief en zonder richting is.

De volgens oud-medewerkers van Waternet verwachtte dijkbewegingen door grote zandschepen zijn niet geregistreerd of waargenomen.

Zijn er verdere bijzonderheden te melden?

Er zijn geen bijzonderheden te melden.

4.13 Lekdijk (Rivierenland) – doordringing waterdruk in slappe lagen

De informatie is voornamelijk afkomstig uit [van der Kolk et al., 2011]

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

In het beheersgebied van waterschap Rivierenland zijn op drie locaties sensoren in de dijk geplaatst, ter plaatse van de dijkpalen AW165, AW196 en AW226. Onderstaand kaartje geeft aan waar de sensoren in de Lekdijk geplaatst zijn.



Figuur 4.37 Locaties sensoren Lekdijk

Het betreffende traject van de Lekdijk waar de sensoren zijn geplaatst, Alblasterdam - Groot Ammers, is in de toetsing afgekeurd, met name op binnenwaartse macrostabiliteit. De laagste toetsscores waren ter plaatse van dijkpalen AW163, AW170, AW196 en AW226. Het traject om te komen tot een dijkverbeteringsplan is ingezet. Daaruit komt een maatregel naar voren, te weten het aanleggen van een stabiliteitsberm aan de binnenzijde van de dijk, die erg ingrijpend en kostbaar is in dit gebied vanwege de vele bebouwing langs de dijk. Dit betekent ook dat het dijkverbeteringstraject de nodige tijd in beslag zal nemen en dat al die tijd de dijk niet aan de gestelde veiligheidsnorm voldoet.

Om die reden is er voor gekozen om in de tijd tot dat de dijk versterkt is via realtime monitoring de status van de dijk in de gaten te houden. Naast realtime metingen wordt ook met conventionele hellingmeetbuizen de toestand van de dijk gevolgd. Verder zijn er voor het dijkversterkingproject peilbuizen geplaatst waarmee waterdrukken in de watervoerende zandlagen kunnen worden bepaald.

De metingen zijn gestart in mei 2010. Van mei t/m december 2010 zijn vier hellingbuismetingen uitgevoerd, sindsdien geen nieuwe metingen.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Telkens één dwarsraai met één streng van 7 tot 9 GeoBeads en één 'traditionele' hellingmeetbuis (handmatig te bemeten om een profiel te krijgen van de verplaatsing over de diepte, doorgaans met één meting per 50 cm diepte). In de middelste raai is één extra streng GeoBeads geplaatst op enkele meters afstand van de 'basisraai', met daarin slechts vier GeoBeads, als redundante meting.

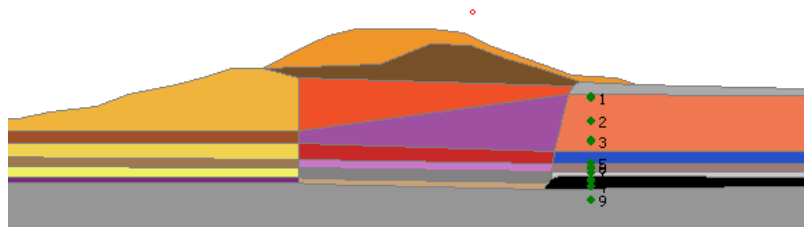
GeoBeads

De metingen betreffen GeoBeads: waterspanningen, lokale tilt (t.o.v. verticaal, in twee onderling loodrechte richtingen) en temperatuur. Hellingmeetbuizen: lokale tilt (t.o.v. verticaal, in twee onderling loodrechte richtingen) over de gehele hoogte van een in de Pleistocene zandlaag verankerde holle buis, waarmee een verplaatsingsprofiel over de hoogte te krijgen is.

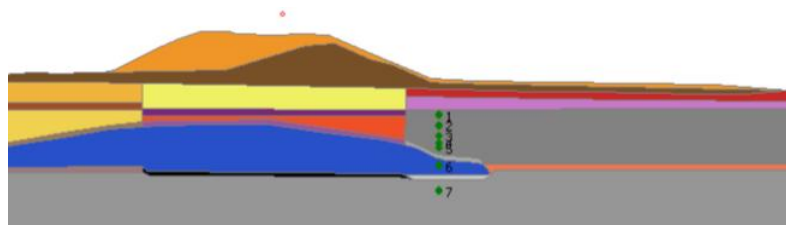
In april 2010 zijn in de Lekdijk op de drie aangegeven locaties sensoren geplaatst.

De GeoBead-ketens zijn met behulp van een sondeerwagen weggedrukt tot een diepte van circa 16m onder het maaiveld. De weggedrukte streng bestaat uit GeoBeads en een signaalkabel. De streng wordt in een mantelbuis op diepte gebracht, waarna de mantelbuis wordt gevuld met water en weer omhoog wordt getrokken. De streng blijft achter in de grond. Om de signaalkabel is zwelklei aangebracht die moet voorkomen dat er een open verbinding overblijft tussen de boven elkaar geplaatste GeoBeads. Een open verbinding waarmee hydraulische kortsluiting tussen twee instrumenten of aquifers ontstaan zou zo voorkomen moeten worden.

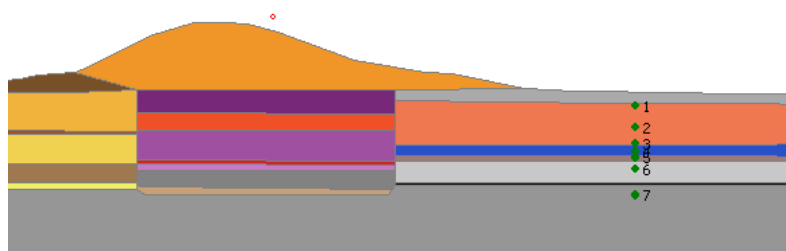
Onderstaande figuren laten de locaties van de GeoBeads in het dwarsprofiel zien.



Figuur 4.38 Locatie sensoren in dp AW 165



Figuur 4.39 Locatie sensoren in dp AW 196



Figuur 4.40 Locatie sensoren in dp AW 226

Hellingmeetbuizen en peilbuizen

Naast de GeoBeads zijn er ook drie hellingmeetbuizen geplaatst. Dit is gebeurd op een onderlinge afstand van ongeveer één meter op dezelfde afstand tot de dijk. De “traditionele”

hellingmeetbuizen en de peilbuizen zijn geplaatst in boorgaten die door middel van pulsbooren zijn gemaakt. De helling van deze buizen is een aantal keer met de “hand” gemeten. Deze metingen vinden plaats door een star apparaat in de buis te laten zakken dat elke halve meter de hoekverdraaiing ten opzichte van de zwaartekracht meet. Deze metingen gebeuren in twee loodrecht op elkaar staande richtingen. Middels de gemeten hoekverdraaiing en de afstand is de verplaatsing van de buis te bepalen onder de aanname dat het onderste punt van de buis beweegt noch roteert.

Verder zijn er ook peilbuizen aanwezig, maar nadere gegevens daarover ontbreken. Het nut van het uitvoeren van in principe dezelfde metingen met verschillende typen instrumenten is dat de betrouwbaarheid van de metingen verhoogd wordt - mits de meetwaarden min of meer gelijk zijn. Is dat niet het geval, dan is er reden om naar de oorzaak van de verschillen te zoeken.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

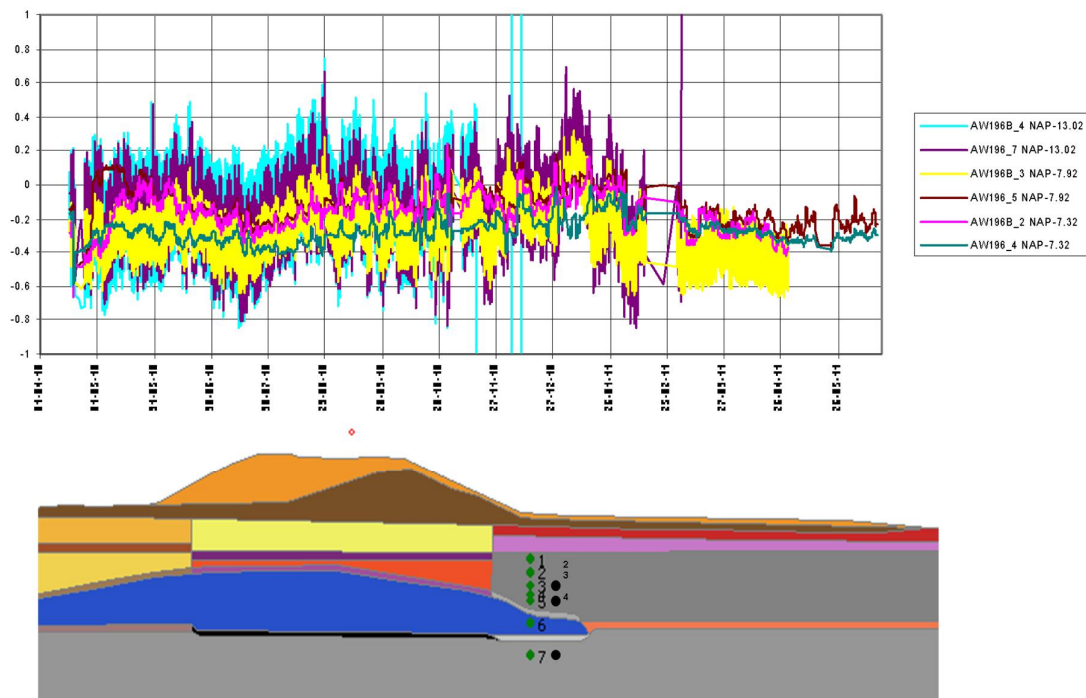
De waterspanningen laten het meest duidelijk een reactie op de verhoogde rivierafvoer zien, vooral in de diepere grondlagen. In de metingen van de waterspanningen is de verhoging van de rivierstand goed waar te nemen. Deze reactie is goed zichtbaar in de zandlagen en de diepe klei- en veenlagen net boven het zand. Verder naar boven is het pakket is de reactie op de rivier slecht tot niet zichtbaar. Dit ligt in de lijn der verwachting.

De temperatuur lijkt niet significant beïnvloed te worden door de hogere afvoer. De hoekverdraaiing van de sensoren (inclinatie) heeft, in de periode van en na hoogwater, in een aantal sensoren een verandering laten zien, maar dat is niet van significante betekenis.

In januari 2011 is een hoogwater gepasseerd, dat bovenstrooms een herhalingsfrequentie kent van eens in de 20 à 25 jaar. Ervaringen bij het TAW-proefvak bij Bergambacht (niet het proefvak van de opdrijfproef uit 2001, maar een locatie zo'n 1400 meter stroomopwaarts daarvan, bij hmp 71.1) leveren de verwachting dat hierbij enige landinwaartse vervorming is opgetreden.

Zijn er bijzonderheden te melden?

In de middelste raai vertoonde de op-één-na-onderste waterspanningsmeting met de GeoBead een merkwaardig resultaat, dat in Figuur 4.41 is weergegeven: de gemeten druk hier (gele lijn) fluctueert mee met de fluctuaties in de Pleistocene zandlaag (lichtblauwe en paarse lijnen), terwijl voor deze meting in het Holocene slappe-lagenpakket een verloop verwacht zou mogen worden als van de andere instrumenten in het Holocene (overige lijnen), met name als van het instrument op ongeveer dezelfde diepte (bruine lijn). Het lijkt er op dat de verticale afdichting van deze aanvullende streng GeoBeads niet goed gefunctioneerd heeft.



Figuur 4.41 Metingen bij AW196 van basisstreng en aanvullende streng (3x2 metingen op vergelijkbare dieptes)

4.14 Colijnsplaat (DMC / Zeeuwse Eilanden) – stoppen zandverlies uit dijk in sloot

De informatie is voornamelijk afkomstig van Harry Bos (VW Telecom) en Henk Wiering (Landustrie)

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Op Noord-Beveland, nabij de Zeelandbrug, is een dijkvak aanwezig waar over een beperkte afstand in de sloot achter de dijk bij vrijwel elk hoogwater zand meespoelde met het kwelwater. Zie Figuur 4.42. Jaarlijks haalde het waterschap hier enkele vrachtwagens zand weg. Na installatie van een regelbare drainagebuis, een in de IJkdijk beproefde techniek, is de instroom van zand in de sloot bij hoogwater gestopt als het systeem actief is. De mate van activering van dit zogenoemde Dijk Monitoring- en Conditioneringssysteem (DMC) is inmiddels afgeregeld op de waterdrukken in de dijk.



Figuur 4.42 Locatie Colijnsplaat

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

In de buis worden op één plaats, die representatief is voor de gehele buis, de waterdruk en de temperatuur gemeten.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

Gekoppeld aan visuele inspecties is het systeem inmiddels zodanig afgeregeld dat het zandtransport (piping-proces) geheel gestopt kan worden doordat de aandrijvende kracht (de waterdruk) wordt weggenomen door de buis – mits deze actief is. Wanneer het systeem wordt uitgeschakeld, dan treedt het zandtransport als vanouds op. Dit vormt een succesvol voorbeeld van de directe koppeling van waarnemingen (visueel en instrumenteel) aan maatregelen waarmee een ongewenste situatie (piping) effectief wordt bestreden.

Zijn er bijzonderheden te melden?

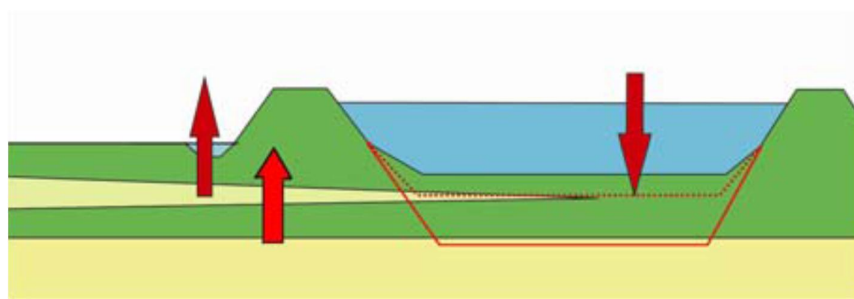
Inmiddels is de DMC buis een operationeel standaard product.

4.15 Vechtkade (Waternet) – invloed baggeren & golfoverslag

De informatie is voornamelijk afkomstig van Haroen Lemmers (Waternet) en [Lemmers et al.].

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Begin 2011 is Waternet gestart met de sanering van de Vecht. Hierbij wordt een saneringsprofiel gebaggerd waarbij de kans op het raken van eventuele zandlagen een probleem kan opleveren. Het contact tussen boezemwater en watervoerende lagen kan leiden tot stijging van waterspanning onder de dijk. Dit wordt hydraulische kortsluiting genoemd, een situatie waarbij een mogelijke kwelweg tussen boezem en watervoerend pakket onder invloed van een verminderde hydraulische weerstand optreedt [STOWA, 2007] en [STOWA, 2010a]. Zie Figuur 4.43.



Figuur 4.43 Schematische weergave kortsluiting.

De gele kleur geeft een zandig pakket weer, de groene kleur klei en/of veen. De rode lijnen tonen een theoretische ontgraving. De rode pijlen geven weer hoe de vermindering van hydraulische weerstand onder de Vecht, kan leiden tot een toename van waterdruk onder de kering of teensloot.

Door het grillige afzettingspatroon van de Vecht zijn in de ondergrond veel stoorlagen (tussenzandlagen) aanwezig. Ook ligt het pleistocene zand relatief dicht bij de saneringsdiepte waardoor de kans op kortsluiting theoretisch groot is. Om inzicht te

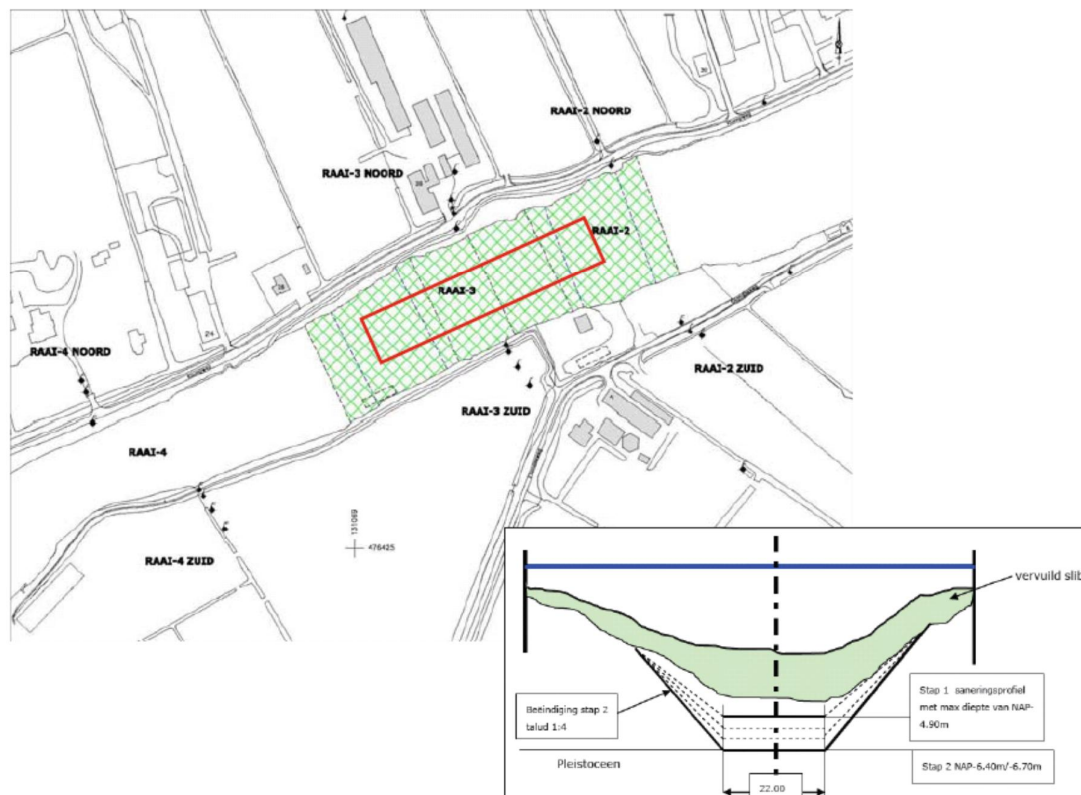
krijgen of dit werkelijk kan optreden is een locatie in de Vecht gekozen om een praktijkproef onder beheersbare omstandigheden uit te voeren. Zo wordt een gecontroleerd contact met een watervoerend pakket onder de bedding van de Utrechtse Vecht verkregen in een proefvak.

De proeflocatie is gekozen op basis van grondopbouw, resultaatsscore van de toetsing op veiligheid secundaire keringen, en de resultaten van DAM (Dijksterkte Analyse Methode) [GeoDelft, 2007] en [Waternet, 2010A].

De dimensies van het proefvak zijn 100 meter in lengte, en 22 meter in breedte. Dit is laagsgewijs ontgraven in lagen van 50 centimeter dikte, tot een diepte van 6,40 meter min NAP, de diepte waar de top van het pleistocene zand zich bevindt.

In Figuur 4.44 is de locatie van het proefvak weergegeven alsmede het ontgravingsmodel.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)



Figuur 4.44 Weergave ligging proefvak en ontgravingsmodel

Het rode vak in Figuur 4.44 geeft de ligging van het diepste gedeelte van het proefvak aan (op -6,40 meter NAP). De zwarte stippen rondom de locatie geven de geplaatste peilbuizen weer, en vormen de meetraai. De referentierai is op deze tekening niet zichtbaar, en bevindt zich ten zuidwesten van deze locatie op (circa 1 kilometer afstand). De inzet toont

een schematisering van het gekozen ontgravingsprofiel, met daarin de laagsgewijze ontgraving van de locatie weergegeven.

Om de stijghoogtes in zowel het eerste watervoerend pakket als het freatisch vlak gedurende de verwijdering van bodemslib en vaste bodem zo goed mogelijk te kunnen monitoren, is een meetnet gerealiseerd.

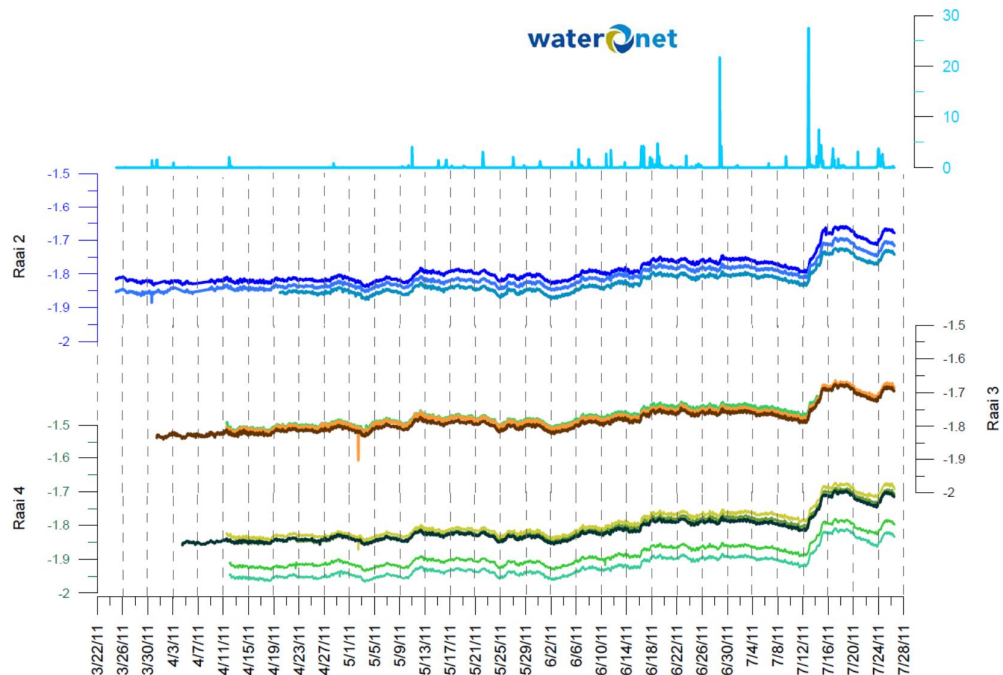
Dit meetnet bestaat uit drie raaien met peilbuizen, voorzien van loggers die de stijghoogte met een ingesteld interval meten en online (realtime) ontsluiten. Op één kilometer afstand van het proefvak is een referentieraai geplaatst om de natuurlijke variaties van het freatisch vlak en de stijghoogte te registreren.

Het meetnet bestaat uit 17 filters in het eerste watervoerend pakket op een gemiddelde diepte van 12 meter min NAP. Monitoring van het freatisch vlak gebeurt d.m.v. 12 ondiep geplaatste filters (gemiddeld -2,42 m NAP). De waterstanden in de peilbuizen zijn gemeten met leveltrack 30 dataloggers met drukopnemers, (nauwkeurigheid < 0,1% FS, VEGABAR sensoren, module en online omgeving; ontwikkeld door Realsense), en GeoBeads (ontwikkeld door Alert Solutions). Het meetinterval van de sensoren is tijdens de graafwerkzaamheden ingesteld op maximaal 15 minuten. Voorafgaand en tijdens de proef zijn de slootbodems periodiek ingemeten, waarmee eventuele veranderingen als gevolg van een toenemende grondwaterstroming in beeld gebracht worden. Dit is gedaan om tijdig te kunnen ingrijpen, indien nodig.

De ontgravingsdiepte is bepaald aan de hand van 22 mechanische boringen, beschikbare geotechnische profielen en voor dit doel speciaal uitgevoerde geologische interpretatie van de ondergrond door TNO [Deltares, 2011]. Om het effect van het saneren in de Vecht op stijghoogten in de omgeving en de stabiliteit van het bodemprofiel achter de dijk te voorspellen is bij Waternet een 2D rekenmodel in Matlab ontwikkeld [Waternet, 2010B].

Wat is het eindresultaat van de metingen?

In Figuur 4.45 zijn de metingen uitgezet zoals geregisterd in de periode vanaf 24 maart t/m 2 augustus.



Figuur 4.45 Meetreeks diepe filters.

Toelichting Figuur 4.45:

Op de horizontale as is het verloop van de tijd weergegeven van 22 mrt t/m 28 juli 2011. Het einde van de graafwerkzaamheden is ~5 mei. De Stijghoogte staan op de verticale assen uitgezet, met de stand in meter min NAP. Te zien is dat in raai 3 (direct naast het proefvak) geen duidelijk zichtbare verhooging in de stijghoogte is als gevolg van de ontgraving. Vanaf 12/7 is er een stijging in de filters zichtbaar. Dit is veroorzaakt door de aanvulling van het neerslagtekort van de maanden ervoor als gevolg van hevige regenval.

De saneringswerkzaamheden zijn in april en mei 2011 uitgevoerd. In de meetreeks is een duidelijke toename in stijghoogte in het diepe pakket waargenomen, noch een verandering in de grondwaterstand die is toe te schrijven aan de graafwerkzaamheden in het proefvak. Volgens de 'Leidraad Veiligheid regionale waterkeringen' moet rekening gehouden worden met een stijghoogtetoe name onder de waterkering tot aan boezempeil (toename: ~1,30 meter). Het rekenmodel van Waternet voorspelde een toename van 0,4 meter. Het wordt duidelijk dat de stijghoogten in de filters in het eerste watervoerend pakket veel minder reageren op de graafwerkzaamheden in de Vecht (streefpeil van NAP -0.40 m) dan op basis de LTV moet worden aangehouden en door het 2D rekenmodel is voorspeld. De werkelijke grootte van de stijghoogtetoe name als gevolg van de afnemende hydraulische weerstand bedraagt 0 tot 3 centimeter.

Verandering aanbrengen in een parameter (zoals het weghalen van bagger en sediment boven een zandlaag) van een systeem wat bestaat uit vergelijkbare fluviale sedimenten zal niet noodzakelijk leiden tot een extreme situatie waarbij de waterdruk tot ontoelaatbare waarden stijgt. In dit geval zijn de geohydrologische omstandigheden zo dat kortsluiting binnen de stroomgeul geen groot effect heeft op de waterdrukken buiten de stroomgordel. Zonder nader geohydrologisch onderzoek had kortsluiting volgens de LTV wel moeten

worden meegenomen als extreme belastingssituatie. Met kortsluiting laten de uitkomsten van de geotechnische berekeningen lage waarden voor de sterkte van dijkveiligheid zien welke nu, bij uitsluiten van kortsluiting veel hoger zijn.

De belangrijkste conclusie die uit deze studie getrokken kan worden is dan ook dat er een duidelijke koppeling gemaakt moet worden tussen de geotechnisch onderzoek en geohydrologisch onderzoek in vergelijkbare situaties. De ondergrond waar geotechnici mee rekenen gedraagt zich in de praktijk veelal anders dan in een aantal parameters is samen te vatten in een geotechnisch model. Het blijft belangrijk om de gebruikte modellen te toetsen aan meetwaarden uit het veld.

Tevens is het zeer waardevol gebleken om de te verwachte stijghoogte eerst te modelleren in een geohydrologisch model, alvorens over te gaan naar de validatie en calibratie van dit model aan de praktijk.

Een andere conclusie is dat dit experiment aantoont dat rekenmodellen en vereenvoudigde rekenregels een benadering geven van de werkelijkheid in het algemeen, maar in bepaalde situaties niet altijd goed aansluiten op locatiespecifieke aspecten. Het met een groter detailniveau kijken naar de lokale geohydrologische situatie kan leiden tot een aanzienlijke winst in termen van toetsresultaat.

Zijn er bijzonderheden te melden?

Geen.

4.16 Ringdijk Watergraafsmeer - metingen tbv EU UrbanFlood

De informatie is voornamelijk afkomstig van Rob van Putten (Waternet).

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

De locatie van het project ligt langs de Ringdijk van de Watergraafsmeer, nabij het Amstelstation, op een steenworp afstand van het hotel Casa400. Nabij één van de meetraaien wordt een groot kantoorgebouw gerealiseerd met een diepe kelder. Ten behoeve daarvan is voorlopig nog een retourbemaling geïnstalleerd.

Ook dit monitoringsproject wordt uitgevoerd in opdracht van het EU-project Urban Flood in samenwerking met Waternet. Er wordt sinds juni 2011 gemeten.

Het doel van de monitoring is het meten aan een Urban kade en bewezen sterkte onderbouwing. Verder is het een pilot om te koppelen aan de Deltares software DAM live aan het DDSC³ (Dijk Data Service Centrum).

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

³ Het Dijk Data Service Centrum (DDSC) is een platform voor de opslag van meetdata in en rond dijken en waterkeringen. Dit systeem is opgebouwd rond een landelijke database. Het gaat zowel om de opslag van real-time als historische meetdata. Door de koppeling van de gegevens van meerdere waterschappen, bestaat de mogelijkheid om data van soortgelijke dijken in de tijd te vergelijken.

De dijk is geïnstrumenteerd met drie dwarsraaien met elk twee verticale strengen met elk drie GeoBeads, in totaal 18 GeoBeads. Met deze GeoBeads worden waterspanningen, lokale tilt (t.o.v. verticaal, in twee onderling loodrechte richtingen) en temperatuur gemeten

Wat is het eindresultaat van de metingen?

De dijk is sterker dan we denken. In december 2013 zal een artikel verschijnen over deze pilotlocatie en de behaalde resultaten in het geotechnisch vakblad "Geotechniek" over bewezen sterkte. Het blijkt dat de dijk eigenlijk al gedurende zijn normale gebruik bijna maatgevend belast wordt.

De metingen zijn verder gebruikt in een publicatie over 'machine learning' in het kader van het Urban Flood project.

Zijn er bijzonderheden te melden?

Ten tijde van de installatie was een bouwkuip aanwezig. De toename van de grondwaterspanning na uitzetten drainage is zeer goed te zien (ruim 2m stijging) en heeft geen gevolgen gehad op de verplaatsingen en de stabiliteit van de waterkering.

4.17 Grebbedijk (Vallei en Eem), piping en stabiliteit,

De informatie is voornamelijk afkomstig van Bernadette Wichman (Deltares), [Deltares, 2012] en [Deltares, 2013]

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Deltares heeft in opdracht van Waterschap Vallei en Eem een meetconfiguratie voor het monitoren van waterspanningen opgesteld voor twee locaties langs de Grebbedijk, te weten bij Blauwe Kamer en bij Bowlespark. Deze monitoring is bruikbaar voor analyses van de mechanismen piping en binnenwaartse macrostabiliteit.

Er zijn bij de meetlocatie Blauwe Kamer in het verleden zandmeevoerende wellen geconstateerd, ook tijdens het hoogwater in 2011. Hier is nog geen goede verklaring voor gevonden, aangezien de dijk in de laatste toetsronde op piping de score goed kreeg. Om een verklaring voor dit verschijnsel te vinden wordt deze monitoring uitgevoerd.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Bij Bowlespark is de binnenwaartse macrostabiliteit een aandachtspunt, aangezien de dijk hier een steiler binnentalud heeft. De monitoring is zo ingericht dat voor beide locaties het risico op piping kan worden bepaald, alsmede de binnenwaartse stabiliteit.

Aan de hand van de waterspanningsmetingen tijdens hoogwater kan de schematisatie te zijner tijd worden verbeterd; iets wat gebruikt kan worden om de actuele sterkte van de dijk te bepalen en t.z.t. de toetsing te verbeteren. Er zijn grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd voor de hoogwatergolf uit 2011, met als doel een eerste inschatting te maken van de te hanteren alarmwaarden voor de te meten waterspanningen. Dit is in een eerder rapport toegelicht, zie [Deltares, 2012]. Deltares heeft ook de interpretatie van de metingen in de periode februari 2012 tot en met 15 maart 2013 uitgevoerd (vooralsnog voor het geval van geen hoogwater). Rapport [Deltares, 2013] geeft de bevindingen.

Er is een serie van 3 rapporten/memo's opgesteld in het kader van de aan Deltares verleende opdracht. Als eerste product is door Deltares een memo opgesteld met een instructie aan Alert Solutions met de gewenste inrichting van de monitoring. Daarna is een tweede rapport opgesteld waarin verslag is gedaan van hoe het hele monitoringssysteem werkt en met voorlopige alarmwaarden voor de waterspanningen die uit de berekeningen voor een hoog water golf uit 2011 volgen, zie [Deltares, 2012]. Rapport [Deltares, 2013] bevat een evaluatie van de metingen uitgevoerd in de periode na installatie (begin 2012) tot en met 11 maart 2013. De werking van de sensoren is beoordeeld, evenals de mate van bruikbaarheid van de meetwaarden voor een eerste analyse. Er worden aanbevelingen gedaan om de performance van de GeoBeads nog beter te testen en het monitoringssysteem verder te verbeteren. Er is nog geen analyse van de metingen aan de hand van grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd. De metingen tijdens de hoog water golf van einde 2012 zijn echter wel bruikbaar voor zo een analyse.

De locaties

Locatie bij Blauwe Kamer:

De eerste locatie is aan de Grebbedijk ter hoogte van natuurgebied De Blauwe Kamer, dijkpaal 43,7 voor de keten op de binnenkruinlijn. In Figuur 4.46 is met BK-A t/m BK-D de posities van de geplaatste GeoBeads-ketens aangegeven.



Figuur 4.46 Locatie Blauwe Kamer. Raai met posities GeoBeads-ketens BK-A t/m BK-D

Het betreft een grotendeels kleiige dijk waar in het verleden in het kader van een dijkversterking op het binnentalud een extra kleilaag is aangebracht. Het profiel bestaat uit een watervoerende zandlaag met daarboven een 2,5 a 3 meter dikke kleiige deklaag met daarop een dijk van klei.

Op de dijk ligt een verkeersweg en onder aan het binnentalud liggen de weilanden. Aan de teen van de dijk was vroeger een parallelsloot en nabij keten BK-D was een sloot die dwars op de dijk ligt. Deze sloten zijn nu gedempt, maar de contouren zijn nog zichtbaar (nabij keten BK-D). Verderop uit de dijk is de dwarssloot nog aanwezig.

Er worden metingen gedaan met GeoBeads (waterspanning, temperatuur en lokale inclinatie) en ter controle op enkele locaties en diepten met peilbuizen (stijghoogte). De GeoBeads staan in de buitenteen, in de dijk, aan de binnenteen en 53 meter in het achterland. In de watervoerende zandlaag staan de GeoBeads op twee diepten: 0,2 meter en 2,2 meter in de zandlaag.

Locatie Bowlespark

De tweede locatie is aan de Grebbedijk ter hoogte van Bowlespark, dijkpaal 5,7 voor de keten op de binnenkruinlijn. In figuur 2 is met BP-E t/m BP-H de posities van de geplaatste GeoBeads-ketens aangegeven.



Figuur 4.47 Locatie Bowlespark. Raai met posities GeoBead-ketens BP-E t/m BP-H

Het betreft een grotendeels kleiige dijk, waar in het verleden in het kader van een dijkversterking op het binnentalud een extra kleilaag is aangebracht. Het profiel bestaat uit een watervoerende zandlaag met daarboven een 2,5 a 3 meter dikke kleiige deklaag met daarop een dijk van klei.

Op enige afstand van de binnenteen ligt de stadsgracht van Wageningen. Voor de dijk ligt een ondiepe greppel en verderop richting rivier ligt een nevengeul (op ca. 350 meter afstand van de buitenteen). Het totale voorland tot aan de Nederrijn is erg breed.

Er worden metingen gedaan met GeoBeads (waterspanning, temperatuur en lokale inclinatie) en ter controle op enkele locaties en diepten met peilbuizen (stijghoogte).

De GeoBeads staan in de buitenteen, in de dijk, aan de binnenteen en aan de overzijde van de stadsgracht. In de watervoerende zandlaag staan de GeoBeads op twee diepten: 0,2 meter en 2,2 meter in de zandlaag.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

De metingen op beide locaties zijn eerst nagelopen op mogelijke bijzonderheden die duiden op een onjuiste werking en daarna is er gekeken naar mogelijke verklaringen voor sommige opvallende trends in meetwaarden, in het bijzonder trends in de waterspanningsmetingen in de hoogwaterperiode van einde 2012-begin 2013.

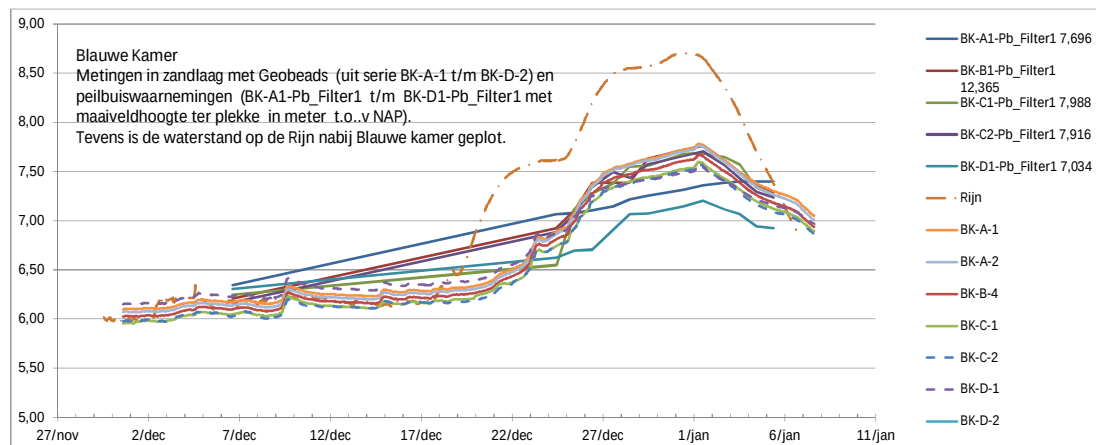
Alle GeoBead-sensoren blijken gevoelig genoeg te zijn om veranderingen ten gevolge van de waterstand op de rivier, substantiële neerslag en buitentemperatuur waar te nemen. Verder kan indirect uit het soms grillige verloop van de waterspanningen worden afgeleid dat deze opnemers waarschijnlijk droog hebben gestaan. De drukvariaties in dit grillige verloop zijn waarschijnlijk niet reëel.

Locatie Blauwe kamer

Alle waterspanningsopnemers in de zandlaag reageren sterk op de stijging in de rivierwaterstand, zie Figuur 4.48. Er is wel enige vertraging (1 á 2 dagen) in de gemeten stijghoogten, wat deels het gevolg zou kunnen zijn van de afstand tussen de locatie waar de rivierwaterstand is gemeten (paar kilometer verder stroomopwaarts?) en de positie van de meetraai. Verder kan deze vertraging natuurlijk ook fysisch zijn, d.w.z. het gevolg van de dempende werking van de zandlaag. Dit moet worden onderzocht aan de hand van grondwaterstromingsberekeningen. Deze berekeningen zijn nog niet uitgevoerd, maar zijn wel gepland.

Daarnaast valt op dat de stijghoogte verder achter de dijk (BK-D-1) relatief hoog oploopt. Dit effect treedt in mindere mate op in de peilbuismetingen. Mogelijk staat het peilbuisfilter in de kleilaag, wat een verklaring kan zijn voor deze lagere stijghoogte.

De stijghoogte is hoger dan werd verwacht op basis van verkennende grondwaterstromingsberekeningen met een bepaalde aanname van de doorlatendheden zoals die voor de laatste toetsing op veiligheid is gebruikt. Als de rivierwaterstand afneemt, nemen de waterspanningen ook weer af, met mogelijk enige vertraging.



Figuur 4.48 De naar stijghoogten omgerekende waterspanningen per uur in de periode einde 2012-begin 2013 in de zandlaag tezamen met het verloop in rivierwaterstand zoals gemeten nabij Blauwe Kamer

Noot: er zijn weinig peilbuismetingen in de aanloop tot hoogwater.

Locatie Bowlespark

De stijghoogte, zoals gemeten met de GeoBeads en de peilbuizen, loopt maar heel geleidelijk oploopt tijdens de hoogwaterperiode einde 2012. Een mogelijke oorzaak kan zijn dat er een breed voorland aanwezig is, wat wel deels onder water stond, maar met kwelwater. Verder is er direct achter de dijk de stadsgracht, met een waterpeil dat vrijwel constant is gehouden. Deze gracht zorgt ervoor dat het water weg kan en zo loopt de waterdruk in het zand minder op. Ook fungeert de rioolbuisconstructie achter de dijk mogelijk ook als een drain naar maaiveld. Uit grondonderzoek volgt dat de deklaag hier meer doorlatend is.

Kwaliteit metingen

Geconcludeerd wordt dat het resultaat van de metingen van goede kwaliteit zijn, behoudens een aantal kort durende storingen en uitval van een waterspanningssensor BK-D-2 en mogelijk een defecte temperatuursensor BK-A-2 bij Blauwe Kamer. Enkele GeoBeads-modules lijken te kantelen in het boorgat, gezien de gemeten hoekverdraaiingen van meer dan 1 graad of één keer zelfs 3,5 graden.

Er is enige ruimte tussen de binnenwand van het boorgat en de sensormodule, zodat deze kan gaan kantelen. Tevens zou een ongelijkmatige zwelling van de zwelklei een lichte kanteling kunnen veroorzaken.

Voor meer informatie m.b.t. de meetresultaten, zie [Deltares, 2013].

Zijn er bijzonderheden te melden?

Bij Blauwe Kamer is vooral het stijghoogteverloop bij hoog water anders dan verwacht, d.w.z. de stijghoogten achter de dijk blijken hoger dan verwacht op basis van berekeningen voor hoogwater in 2011 zie [Deltares, 2012]. Dit kan veroorzaakt zijn door de waterstand op de rivier in combinatie met een hogere doorlatendheid van het watervoerende zand, maar het is niet uitgesloten dat er aan de landzijde enige extra stijghoogte aanwezig is ten gevolge van regenwater dat afstroomt van de Grebbedijk. Door de hoge rivierwaterstand zou dit water niet goed afstromen, en dus loopt de waterdruk enigszins op. Dat dit de enige verklaring is voor de hoog oplopende waterdruk is onwaarschijnlijk.

4.18 Monitoring bodemdaling in kustgebieden (Subcoast)

De informatie is voornamelijk afkomstig van Victor Hopman (Deltares) en <http://www.subcoast.eu/>

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

SubCoast is een samenwerkingsproject onder THEMA FP7-SPACE-2009-1 van het zevende kaderprogramma van de Europese Commissie. SubCoast is gericht op de ontwikkeling van een GMES-downstream service voor beoordeling en monitoring van bodemdaling gevaren in laaggelegen kustgebieden rond Europa. SubCoast ontwikkelt GMES-downstream-diensten op basis van satellietgegevens, in-situ metingen en geowetenschappelijke modellen. SubCoast bouwt voort op de ESA-GMES Service Element Terrafirma en maakt gebruik van de volledige capaciteit van PSI (Persistent Scatterer interferometrie).

Laaggelegen kustgebieden zijn zeer kwetsbaar voor de gevolgen van klimaatverandering, met name stijging van de zeespiegel en veranderingen in de afvoer van de rivieren, maar ook

onderhevig aan druk door het aanpassen van de stroomgebieden en landgebruik van de delta's door menselijk handelen.

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

SubCoast zal worden gebouwd op GMES Service Element TerraFirma en gebruik maken van de volledige capaciteit van PSI (Persistent Scatterer interferometrie) als een aardobservatie-technologie om grootschalige bodemdaling in te kaart brengen en om op lokale schaal waterkeringen te monitoren. De metingen zullen worden verkregen door middel van satellieten, waardoor de optredende bodemzakking zichtbaar zal worden.

Wat is het eindresultaat van de metingen?

Centraal in het SubCoast-project stond de ontwikkeling van de pilots op verschillende locaties in Europa. Deze werden zowel gebruikt als een testomgeving voor de verschillende technieken, alsmede als de bron van data om te delen met de verschillende deelnemers en eindgebruikers. In SubCoast werden vier pilots gekozen als testlocaties, twee op regionale schaal, een op nationale schaal en een op Europese schaal om zo aan te tonen dat de verschillende deelnemers actief zijn op verschillende niveaus. Deze pilotstudies zijn in de volgende gebieden bedacht:

- Rijn-Maas-Delta
- Zuidelijk Emilia Romagna (Italië)
- Oostzee
- Europa

De resultaten van deze pilot-studies zijn te vinden op <http://www.subcoast.eu/>.

De resultaten voor de Rijn-Maas delta zijn hieronder opgenomen.

De Rijn-Maas delta is een gebied dat bijzonder kwetsbaar voor bedreigingen in verband met klimaatverandering, met name die met betrekking tot overstromingsrisico. Dit gebied ligt deels onder de zeespiegel en bestaat uit een dikke laag van niet-geconsolideerd zand, klei en veen. Bodemdaling wordt erkend als een probleem op verschillende schalen.

Gelokaliseerde bodemdaling is bekend om zwakke zones in natuurlijke en kunstmatige waterkering structuren te creëren of te versterken. Regionale schaal verzakkingen op dit gebied tredt op als gevolg van drainage, veenoxidatie -en olie- en gasproductie, dit heeft aanzienlijke gevolgen voor de regionale watersystemen, natuurlijke wetlands en getijden habitats.

Onder leiding van Deltares, zijn zettingsparameters van het gebied van de Rijn-Maas delta geschat met behulp van PSI - technologie. Het omgaan met de verschillende schalen werd behandeld door een aantal duidelijke doelstellingen.

- Ontwikkeling en toepassing van een op absolute schaal bodemzakkingkaart.
- Ontwikkeling en toepassing van een PSI - afgeleide structurele dijkbeoordeling.
- Aanpassing van de absolute grote schaal bodemzakkingkaart in beschikbare geo - mechanische modellen om ondiep en diep oorzaken van bodemdaling schatten.
- Aanpassing van absolute schaal bodemzakkingen kaart met GNSS, getijmeters en overige gegevens om de relatieve zeespiegelstijging in te schatten.

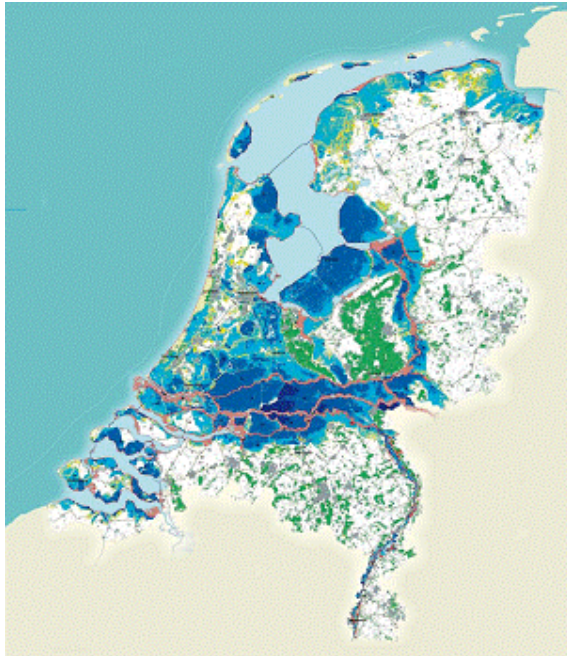
Drie afzonderlijke case studies zijn ondernomen:

- Het Nederlandse Noordzee kustgebied.
- De Zuid Holland regio.
- landsdekkende bodemzakkingkaart.

Voor de landsdekkende bodemverzakkingskaart van de Rijn-Maas Delta (20.000 km²) werden samengevoegd de ERS 1/2 en de Envisat radar datasets en verder uitgebreid met nieuwe hoge-resolutie radarsensoren (Radarsat-2). Bovendien werden deze geassimileerd met GNSS positioneringgegevens van de continue Nederlandse Active GNSS Reference System (AGRS), de fundamentele kernnet van GPS kalibratie punten (kernnet) infrastructuur, en nivelleringsgegevens. De kaart voor de regionale en lange termijn landstijging of -daling werd gecorrigeerd door het opnemen van de zwaartekrachtdata.

In de twee lokale schaalcasestudies, werd de PSI-afgeleide landsdekkende bodemdaling kaart gecombineerd met de zwaartekrachtmetingen, geo(hydro)logische gegevens, gegevens over gaswinning of injectie, en informatie over gebouwen en bouwprojecten om de volgende resultaten op te kunnen leveren:

- Verbeteringen aan bestaande modellen die van invloed zijn op klink, gaswinning en bodeminjectie op verzakkingen door de aanpassing van PSI afgeleide verzakkingen.
- Oorzaken van bodemdaling worden onderscheiden tussen ondiepe- en diepe gaswinningeffecten.
- Onderscheid tussen verzakking van de radar targets (grotendeels kunstmatige structuren) en de feitelijke verzakking van de aarde door het toevoegen van geomechanische informatie uit geologische onderzoeken.
- Een impactstudie, waarbij interpretaties van overstromingsrisico's en de impact op de gevoelige stedelijke gebieden wordt geschat. Zie ook Figuur 4.49.
- Voor dijklichamen, werd een gedetailleerde radar gebaseerde schatting (ERS - 1/2 en Envisat) uitgevoerd. Dit product was anders dan de wide-area PSI -analyse , omdat het geschatte resultaat directe veiligheidsgerelateerde parameters, bijv. stabiliteit van het dijklichaam, een rol speelde.
- Een aantal specifieke locatie geïntegreerde sensoren met verschillende golflengtes en nogmaals (ERS , Envisat , Radarsat en TerraSAR - X) om de voordelen van deze aanpak te beoordelen.



Figuur 4.49 Overstromingsrisicokaart van Nederland

Zijn er bijzonderheden te melden?

Geen bijzonderheden.

4.19 Pilot Dayulan langs de Yellow River China

De informatie is voornamelijk afkomstig van Frans van den Berg (Deltares) en [Van den Berg, 2012]

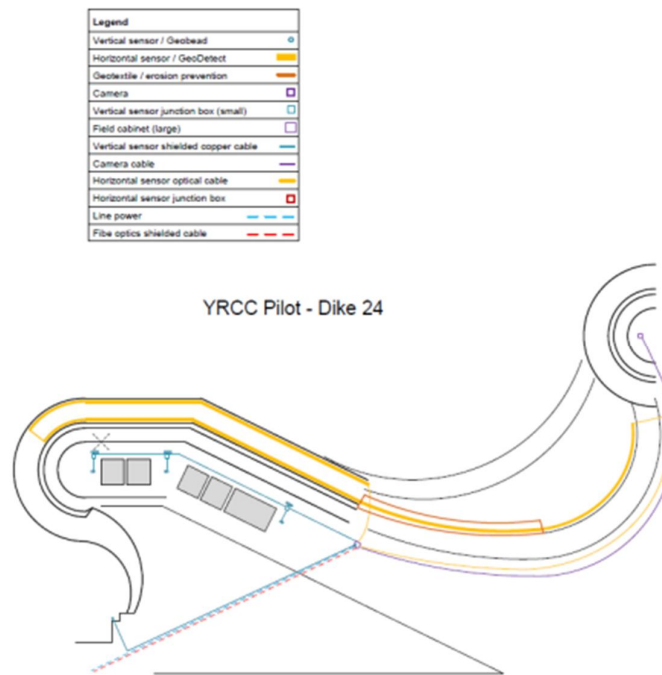
Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Dit pilotproject is uitgevoerd door AGT Nederland, Deltares en TNO in samenwerking met de Chinese overheid, de YRCC (Yellow River Conservancy Commission)

De locatie van dit pilotproject is langs de Yellow River (黄河) en is in 2012 uitgevoerd. De pilot werd uitgevoerd op krib #24 bij de Dayulan werken in Wuzhi County juist ten noordoosten van Zhengzhou in de provincie Henan.

Het grootste gedeelte van de tijd staat het waterniveau op deze locatie laag (ongeveer 8 m minus de kruin van de krib), maar vanaf medio juni stijgt het waterpeil van de Yellow river tot 4 m minus de hoogte van de kruin van de krib. Het rivierniveau op dit punt van de Yellow river zal stijgen als gevolg van de opening van het reservoir stroomopwaarts (Xiaolangdi dam) tijdens het begin van het regenseizoen.

In Figuur 4.50 is het bovenaanzicht afgebeeld van de pilot locatie inclusief de plaats van de verschillende sensoren.



Figuur 4.50 Bovenaanzicht van de pilot-locatie, waaronder de locatie van de sensors

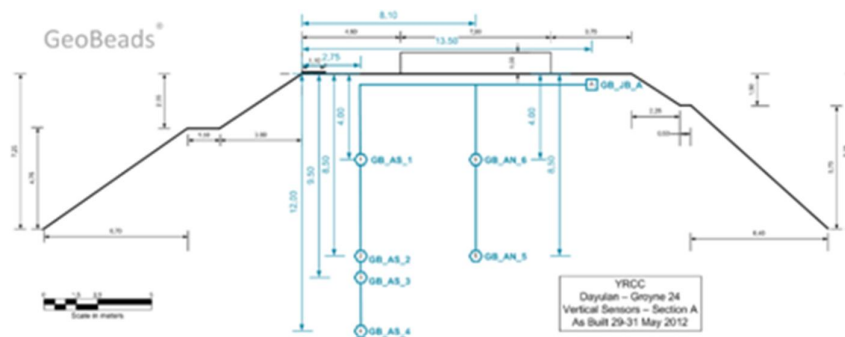
Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

In eerste instantie is een analyse uitgevoerd van alle faalmechanismen die relevant zijn voor deze locatie. Het resultaat van de analyse is dat er twee bedreigingen van deze locatie zijn erosie aan de teen van de dijk en macrostabiliteit.

Om deze zijn faalmechanismen te monitoren zijn er op deze locatie verschillende sensoren geplaatst:

- Waterspanningsmeters van het type GeoBeads (Alert Solutions) om de waterspanningen te meten, op de verschillende diepten en locaties binnen de dijk.
- Optische glasvezels ingeweven in een geotextiel van het type GeoDetect (TenCate) Hiermee kunnen al in een vroeg stadium de kleinste vervormingen in de grond en veranderingen in temperatuur en spanning worden geregistreerd.

De GeoBeads-sensoren (zie ook paragraaf A.21) worden geïnstalleerd op drie verschillende dwarsdoorsneden. Elke doorsnede bestaat uit 6 sensorlocaties. Deze komen overeen met de posities die nodig zijn om de dijk stabiliteit "real time" te kunnen monitoren. In Figuur 4.51 zijn de locaties weergegeven.



Figuur 4.51 Locations GeoBeads in cross section A Groyne #24

Naast de sensors in de dijk is er ook een sensor in de rivier geplaatst om de hoogte van het rivierpeil te meten.

De GeoBeads zijn met behulp van een sondeerwagen geïnstalleerd. Zie Figuur 4.52.



Figuur 4.52 Installatie methode van de GeoBeads op de krib

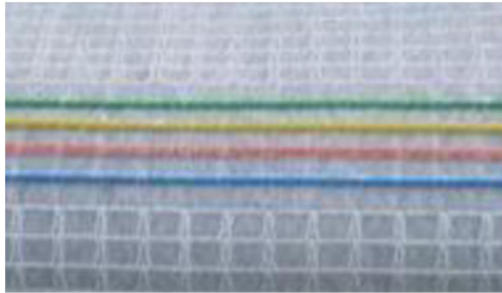
Dijkstabiliteit

De metingen van uit de GeoBeads dienen als input voor de Dijk Analyse Module (DAM), een platform van Deltares welke automatisch berekent wat de sterkte van de dijk is, gegeven een hydraulische belasting (in dit geval "real time"). Het gaat om een semi 3-dimensionale bepaling van de sterkte van de dijk. Dit betekent dat doorsneden worden geschematiseerd van een driedimensionaal terreinmodel en aangevuld met puntobservaties van de bodemstructuur. Uit deze doorsneden kan de stabiliteit worden bepaald.

Voor dit project zijn elke tien minuten de stabiliteitsberekeningen voor de verschillende dwarsprofielen uitgevoerd.

Optische glasvezel-systeem in geotextiel.

Het optische glasvezel systeem (type: TenCate GeoDetect ®) combineert een geotextiel waarin sensoren zijn verwerkt middels het insluiten van optische kabels. Een foto van de glasvezel geweven in geotextiel wordt gegeven in Figuur 4.53. Zie ook paragraaf A.14.



Figuur 4.53 Optische glasvezel-systeem in geotextiel

De gecombineerde meting van spanning en temperatuur in een enkele strook geotextiel helpt de opsporing van kritieke gebeurtenissen langs de dijk:

- Spanningsveranderingen treden op wanneer er grondinstabiliteit optreedt.
- Temperatuurschommelingen kunnen een waterstroom detecteren in de dijk.

De resolutie van de sensor is 1 meting per 1 m.

Het doel van de optische sensoren is vooral de detectie en de lokalisatie van beweging van grond en stenen beweging langs de teen van de dijk, vanwege de grote erosie van de rivier.

Andere kribben naast de pilotplaats hebben reeds aangetoond dat externe erosie resulteert in verplaatsing van de stenen aan de teen van de dijk.

Het meest kritische gebied is het bij een hoge waterstand , wanneer de watersnelheden en de turbulenties het hoogst zijn , en als er niets zichtbaar is vanwege de hoge troebelheid van het water.

Er zijn op twee niveaus sensoren geïnstalleerd:

- Een overeenkomstig met de hoogste waterstand op het tussenliggende platform.
- Een langs het geërodeerde deel van de hoofddijk, in de oksel van de kribben tussen # 23 en # 24 . De helling van dit deel wordt herbouwd (helling 1V: 2H) en bedekt met een laagdikte van 50 cm stenen voor beschoeiing. De helft van de sectie is beschermd met een geotextiel voor bodemfiltratie, overeenkomend met de standaard ontwerpregels.

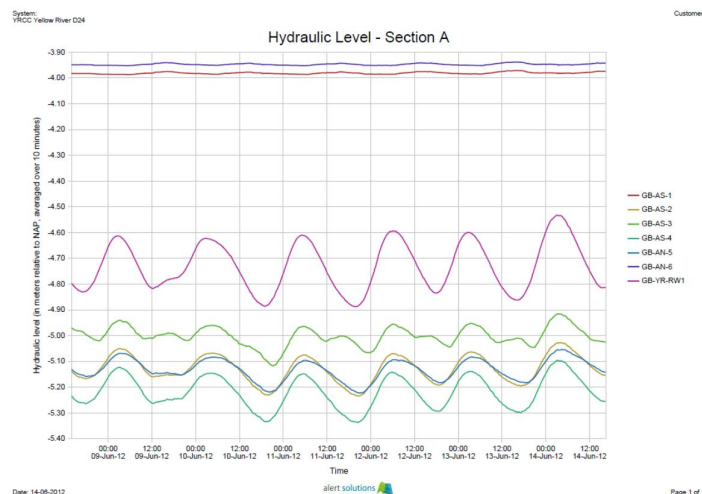


Figuur 4.54 Installatie van de optische kabel in de geotextiel en de sondeerwagen op de krib voor de installatie voor de GeoBeads

Wat is het eindresultaat van de metingen?

GeoBeads

Op basis van de huidige beschikbare tijdreeksen van de GeoBeads, blijkt dat de infiltratiediepte zeer hoog is. De krib reageert zeer direct op de verandering van het waterpeil in de rivier. Zie Figuur 4.55. Dit wordt veroorzaakt door de zeer zanderige lagen (conusweerstand > 4 MPa) lagen van de onderste lagen van de krib en de zanderige ondergrond.



Figuur 4.55 Stijghoogte metingen, dwarsprofiel A

Optische glasvezel

De eerste resultaten van de GeoDetect toont bij het begin van het project, een verhoging van de vervorming van het tussenplatform. De oorzaak van de aanvankelijke vervorming wordt voornamelijk veroorzaakt door het aanbrengen van de stenen onmiddellijk na de installatie van de sensoren.

De data dient nog verder geanalyseerd te worden.

Zijn er bijzonderheden te melden?

Er zijn plannen om deze pilot uit breiden over een gebied van circa 70 km.

4.20 Grand Sluice, Boston,

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

De locatie is langs de westelijke dijk langs 'The Haven', direct stroomafwaarts van Grand Sluice in Boston (Groot Brittannië). Dit is op de grens van een betrekkelijk groot gebied dat in de 17^e eeuw met Nederlandse kennis in cultuur is gebracht. De dijken, kanalen en de waterhuishouding zijn daarom redelijk vergelijkbaar met de Nederlandse situatie, maar met wat grotere afmetingen dan hier gangbaar en een getijverschil van 3 tot 6 meter. Daarnaast liggen de huidige veiligheidsstandaarden lager dan tegenwoordig in Nederland.

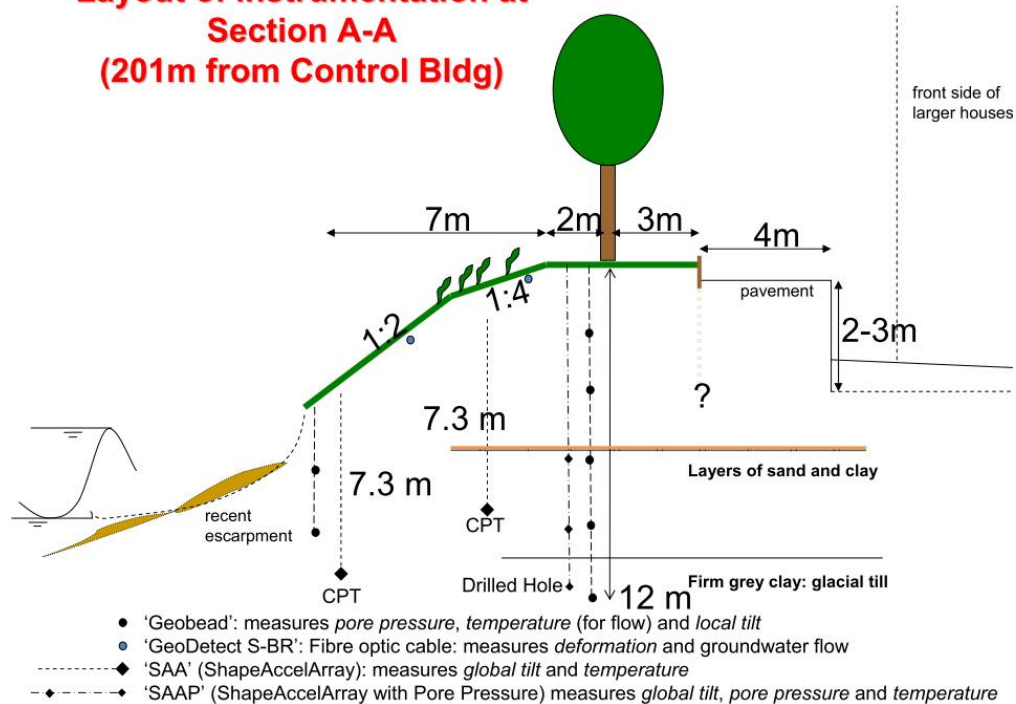
De betreffende dijk vertoont problemen met kleinschalige afschuiving aan de buitenteen; regelmatig schuift een moot grond met een volume van enkele tientallen kubieke meters af. Het belangrijkste onderzoeksdoel was om te bepalen om het hier betreft om lokale ondiepe afschuivingen of dat er ook sprake is van gevaar op dieper afschuivingen.



Figuur 4.56 De betreffende dijk langs "The Haven"

De metingen worden verricht in opdracht van EU project Urban Flood met medewerking van Environment Agency (East Anglia).

Layout of instrumentation at Section A-A (201m from Control Bldg)



Figuur 4.58 Locatie van de geplaatste instrumenten in de dijk langs "The Haven"

De metingen zijn uitgevoerd in de periode april/juni 2011 (verschilt per leverancier).

Wat is het eindresultaat van de metingen?

De meetresultaten van de verschillende instrumenten zijn geïnterpreteerd en hebben uiteindelijk aangetoond dat er geen gevaar is voor diepere glijcirkels.

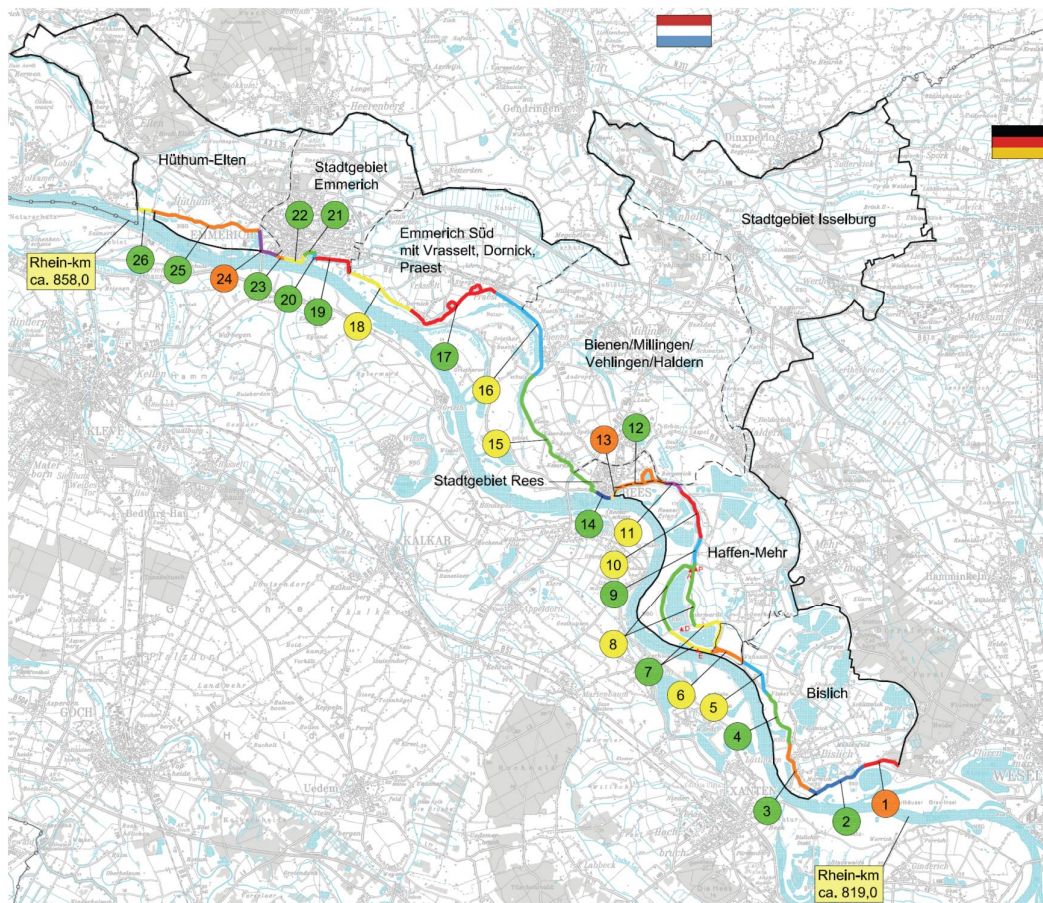
Zijn er bijzonderheden te melden?

Bij dit meetproject, onderdeel van Urban Flood, worden veel parameters dubbel gemeten, waterspanningen lokaal zelfs drievoudig. Dit biedt in principe zéér goede mogelijkheden tot cross-validatie van de verschillende meettechnieken.

4.21 Rheindeich (K7), Rees, Duitsland (EU FP7 UrbanFlood)

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Als onderdeel van het Europese UrbanFlood-project is langs de Rijn nabij Emmerich, bij het waterschap Bislich-Landesgrenze, een locatie gezocht voor monitoring op piping. Uit een vijftal locaties is er een gekozen net stroomopwaarts van de stad Rees, in sectie 10 in Figuur 4.59.



Figuur 4.59 Rijndijk (rechteroever) in Duitsland tussen Bislich en de Nederlandse grens

De dijk, met een regionale ontsluitingsweg op de kruin, heeft hier een hoogte van 5 tot 6 meter en taluds van 1:3, zie ook Figuur 4.60. Het waterschap meldt problemen met kwel en stabiliteit. Om problemen met zandmeevoerende wellen te vermijden wordt bij hoogwater het binnendijkse gebied niet of slechts beperkt bemalen, hetgeen plaatselijk tot ernstige wateroverlast zorgt.

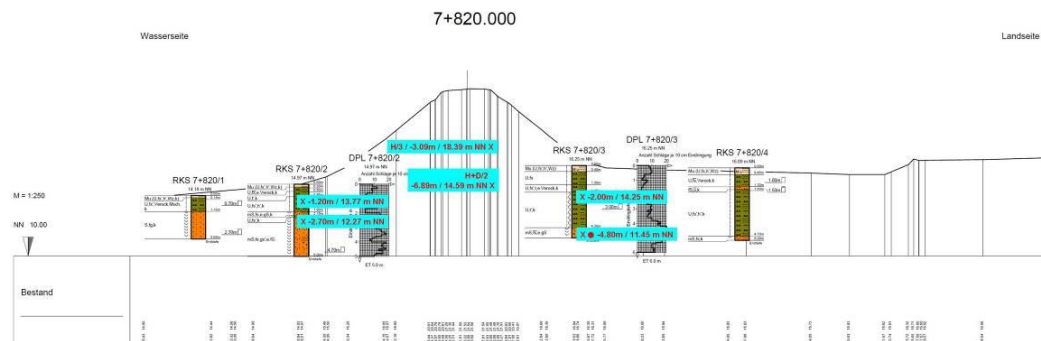


Figuur 4.60 Dijk bij laagwater (links: binnendijks, rechts: buitendijks, let op de vijver)

Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

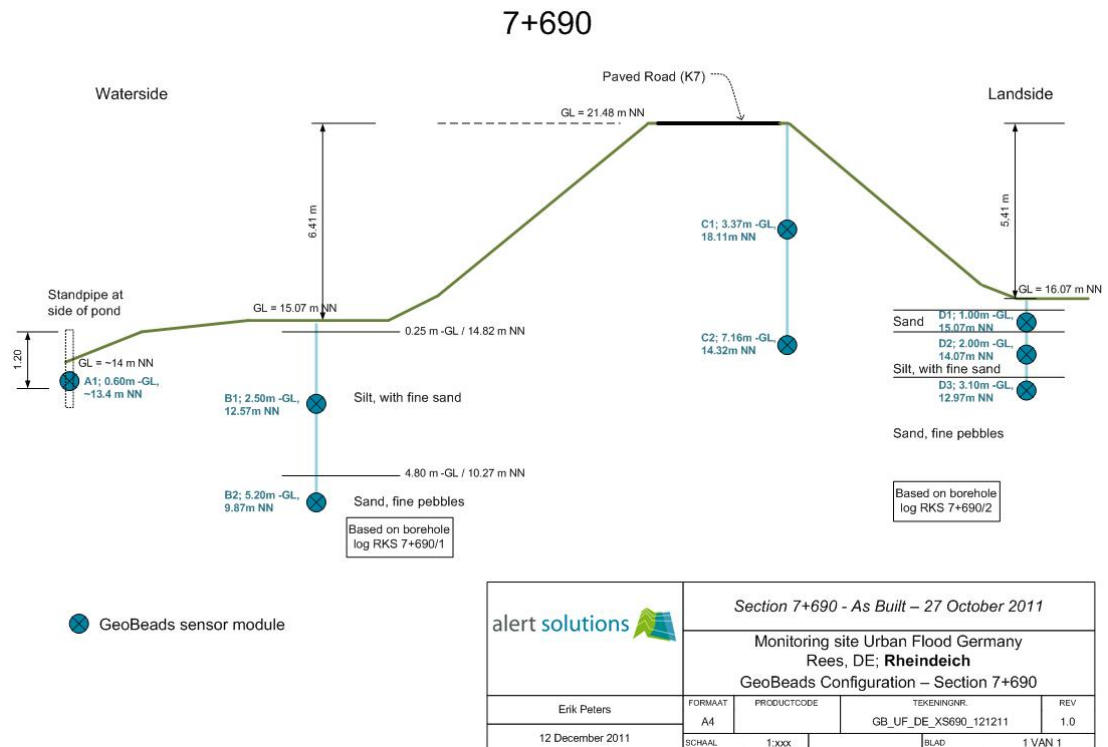
Ter voorbereiding op een dijkversterking is grondonderzoek uitgevoerd waarbij gemiddeld iedere paar honderd meter enkele boringen en sonderingen zijn gemaakt in een dwarsprofiel. Bij het onderhavige dijkvak is dat in twee doorsneden gebeurd, zie Figuur 4.61. Figuur 4.62 en Figuur 4.63 tonen de betreffende dwarsprofielen.



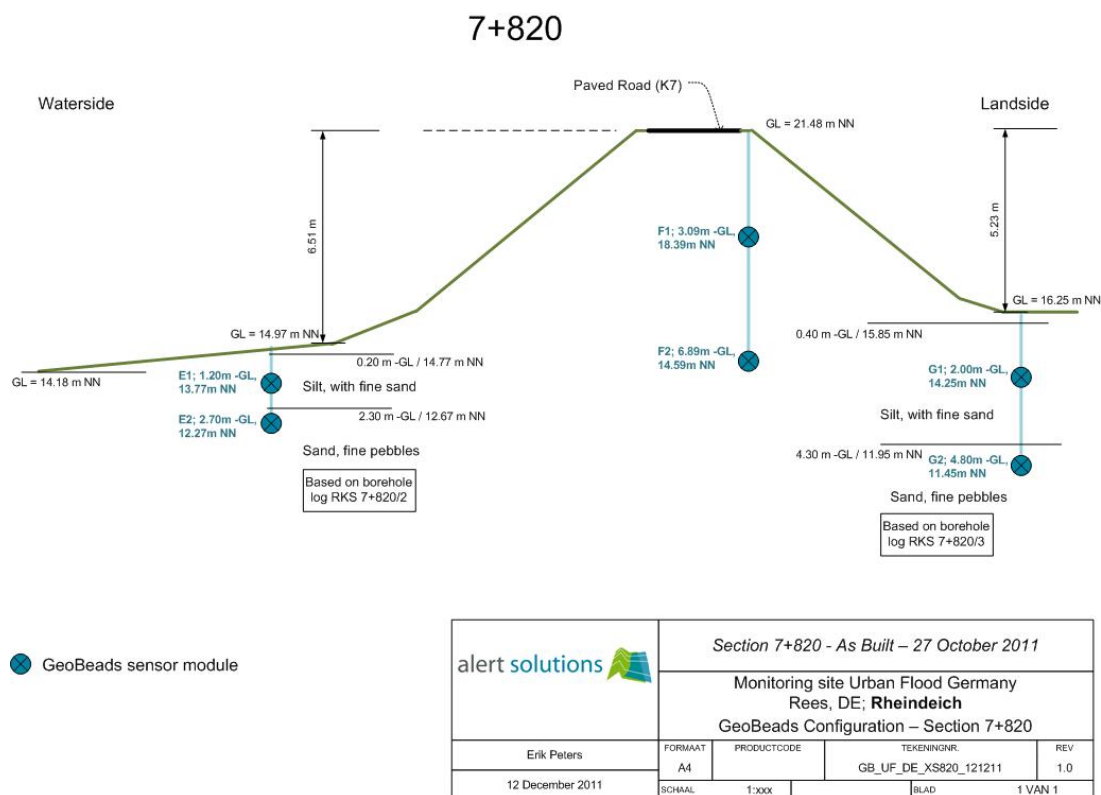


Figuur 4.63 Dwarsprofiel bij km 7,820

Als monitoring zijn er gecombineerde waterspannings-, temperatuur- en tiltmeters geplaatst in beide doorsneden, zie Figuur 4.64 en Figuur 4.65. Daarbij is in elke doorsnede een luchtdrukmeter geplaatst als referentie. Verder is binnendijks met een gestuurde een verwarmbare glasvezelkabel (zie ook §8 in bijlage A en bijlage B) aangebracht in de zandlaag, nabij de bovenkant daarvan, volgens het tracé aangegeven met de gestreepte lijn in Figuur 4.61, op variabele diepte. Het buitendijkse waterniveau wordt gemeten in de vijver die ook zichtbaar is in Figuur 4.60, via de grindlagen wordt deze verondersteld in contact te staan met de rivier. Volgens omwonenden valt deze vijver slechts zelden droog.



Figuur 4.64 Posities integrale sensoren in dwarsprofiel 7,690



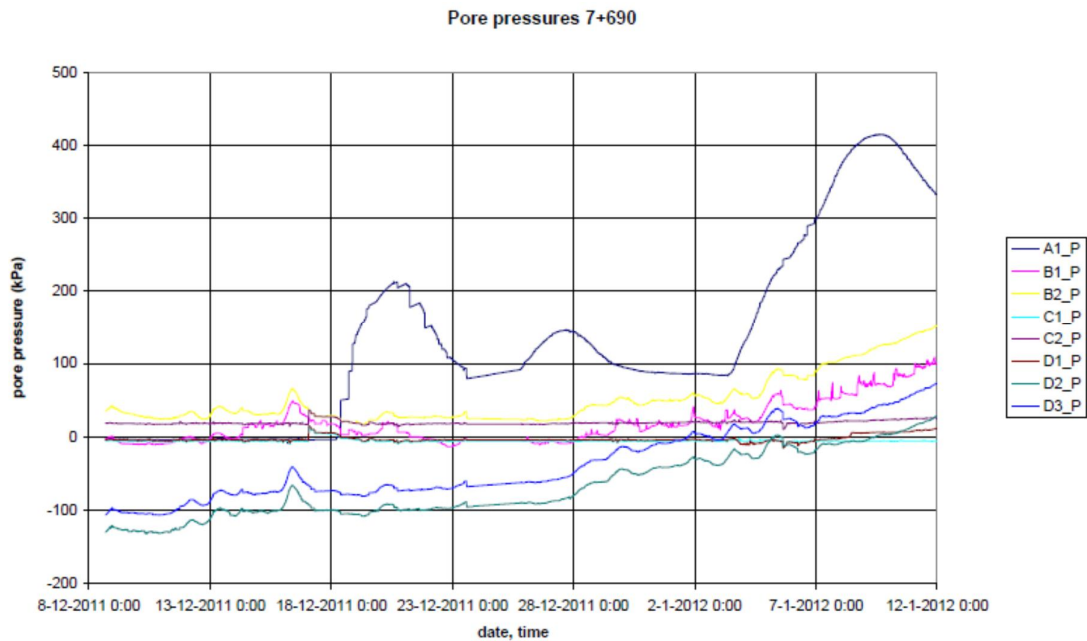
Figuur 4.65 Posities integrale sensoren in dwarsprofiel 7,820

Het doel van de metingen is om de grondwaterstroming te traceren met behulp van de temperatuurmetingen, met aan de binnenkant van de dijk eventuele variaties daarin met behulp van de glasvezelkabel. Dit kan dan gecontroleerd worden aan de hand van de waterspanningen, die ook gebruikt kunnen worden voor stabiliteitsanalyses. Met de tiltmetingen kunnen eventuele vervormingen worden gemeten, waarvoor de stabiliteitsanalyses ook weer ondersteuning kunnen bieden.

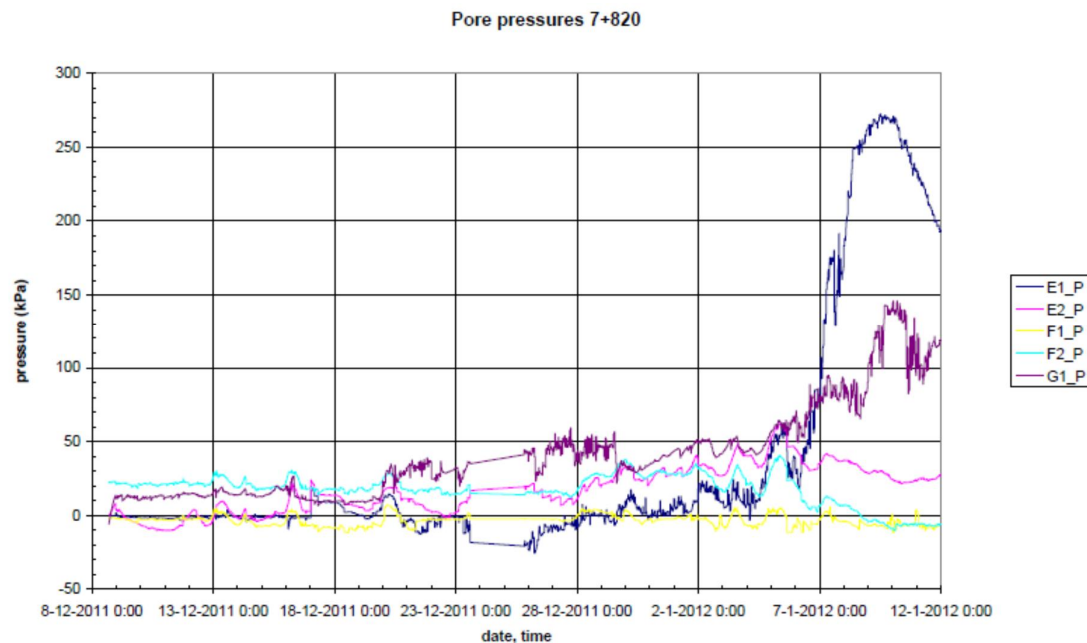
Wat is het eindresultaat van de metingen?

De waterspanningsmetingen rond de jaarwisseling 2011/2012 zijn weergegeven in Figuur 4.66 en Figuur 4.67. De glasvezelmetingen zijn uiteindelijk niet uitgevoerd en de overige metingen zijn grotendeels niet gepresenteerd vanwege de twijfels die de waterspanningsmetingen oproepen, zie onder het volgende kopje.

In een deel van de metingen is de invloed zichtbaar van de pompactiviteiten iets stroomafwaarts van de meetlocaties. Dit blijkt uit een betrekkelijk hoogfrequente 'zaagtandcurve'. De positionering roept echter vragen op, zie onder het volgende kopje.



Figuur 4.66 Waterspanningsmetingen in dwarsprofiel 7,690 rond de jaarwisseling 2011/2012.

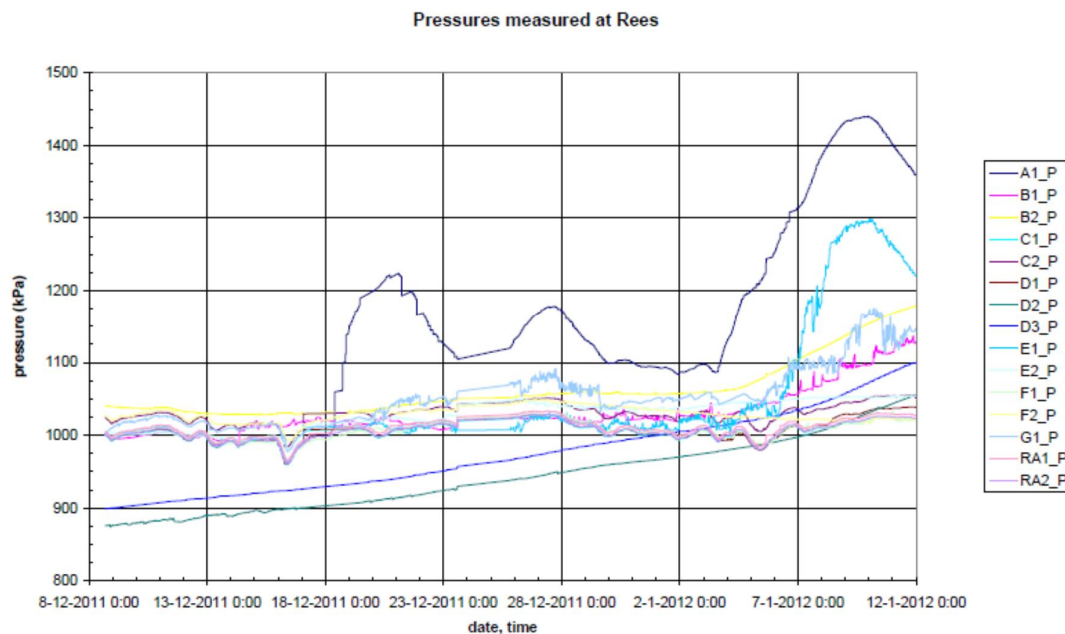


Figuur 4.67 Waterspanningsmetingen in dwarsprofiel 7,820 rond de jaarwisseling 2011/2012.

Zijn er bijzonderheden te melden?

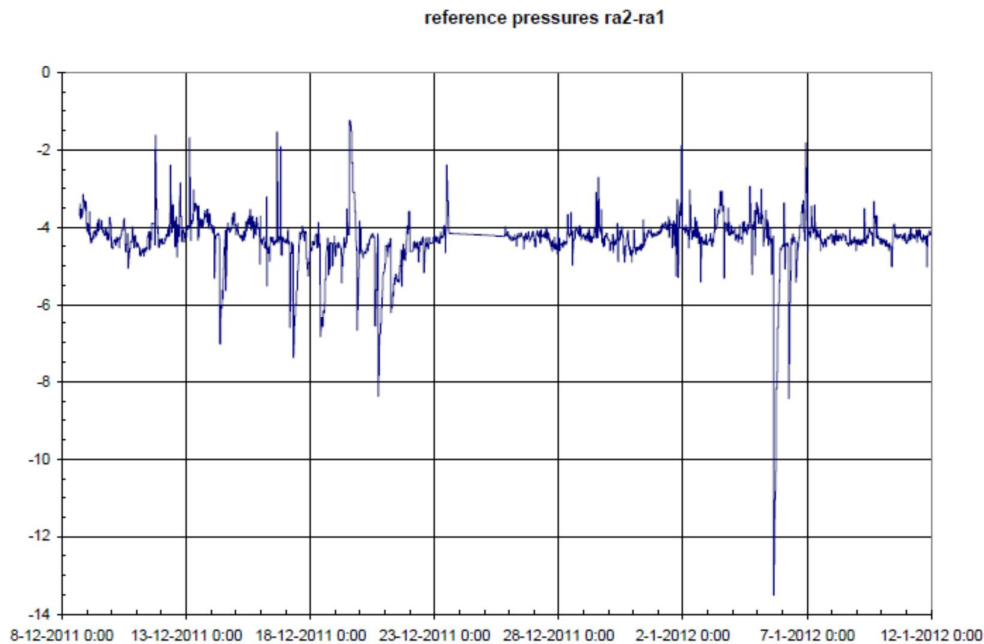
Het ontbreken van de metingen met de geïnstalleerde glasvezelkabel is op zichzelf al eigenaardig. Daarnaast zijn er diverse bijzonderheden te melden over de data die wel beschikbaar is: de metingen van de atmosferische druk zijn strijdig, er lijken instrumenten verwisseld te zijn en de meting van het waterpeil is onbetrouwbaar.

In Figuur 4.68 zijn alle gemeten drukken getoond voor dezelfde periode als hiervoor. In aanvulling op de eerdere grafieken staan hier ook de beide luchtdrukmetingen in, aangeduid als RA met het cijfer van de betreffende raai. Instrument G2 ontbreekt hierin, dat was kennelijk uitgevallen. Merkwaardig is ook dat de druk in diverse instrumenten gedurende langere tijd beduidend lager is dan de atmosferische druk. Overigens zijn alle waterspanningsmetingen die in deze paragraaf gecorrigeerd voor de luchtdruk zijn weergegeven, gecorrigeerd voor de luchtdruk in de eerste meetraai.



Figuur 4.68 Gemeten absolute (totaal)drukken voor alle instrumenten

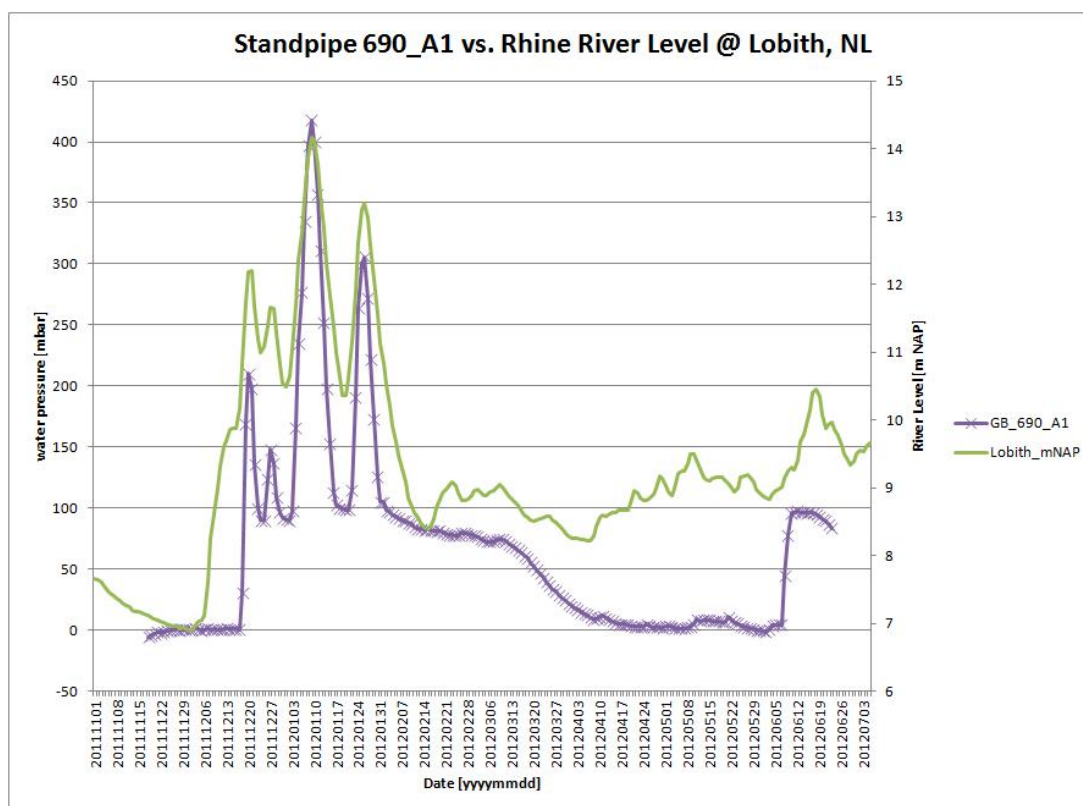
De beide luchtdrukmetingen lijken nagenoeg over elkaar heen te vallen. Figuur 4.69 toont de verschillen tussen beide instrumenten. Deze zijn aanzienlijk: gemiddeld 4 kPa, met vrij veel variatie en uitschieters tot meer dan 10 kPa, ofwel 10 cm waterkolom. Wanneer deze metingen accuraat zijn, dan zou er permanent een storm met heftige windstoten staan. Dit komt niet overeen met de werkelijkheid en is een onnodige bron van onnauwkeurigheid. Merk op dat dit hier alleen ontdekt is doordat er meerdere luchtdrukmetingen zijn uitgevoerd.



Figuur 4.69 Verschillen tussen beide luchtdrukmetingen (ruim 100 meter uit elkaar)

Wat betreft de waterspanningsmetingen onderling is het onduidelijk hoe de respons van met name instrument G1 ten opzichte van E1 en A1 kan worden verklaard, terwijl heel raai D meer achterblijft. Ook de sterke verandering in E1 na 7 januari is moeilijk te verklaren, gelet op de geringe veranderingen in E1 daarvoor. Voor wat betreft de respons op de pompactiviteiten benedenstrooms (dus voorbij km 7,82) is het moeilijk te begrijpen waarom dit ter plaatse van B1 zo groot is, zeker in vergelijking met het meer nabijgelegen E2. Het lijkt er op dat er verscheidene instrumenten met elkaar verwisseld zijn. Instrument B1 zou dan eigenlijk één van de instrumenten in een zandlaag in de andere raai kunnen zijn. Dergelijke achterafredeneringen dienen echter vermeden te worden.

Tot slot: de meting van het waterpeil. In Figuur 4.70 zijn de metingen in A1 uitgezet over een langere periode en vergeleken met de waterstand bij Lobith, een kleine 30 kilometer stroomafwaarts (gemeten langs de rivier). Het instrument A1 is regelmatig drooggevallen. Dit lijkt te gebeuren bij een waterstand van ongeveer NAP+11m bij Lobith. Na het verlies van contact met het open buitenwater zakt het peil langzaam, om bijvoorbeeld begin juni 2012, bij een waterstand onder de NAP+11m, weer gedeeltelijk te stijgen. Opmerkelijk is dat een dergelijke stijging zich niet voordeed bij een vergelijkbare waterstand rond 10 december 2011. Het lijkt er op dat de buis met het instrument op een betrekkelijk hoog niveau bij de vijver geplaatst is. Eenduidigheid in de metingen ontbreekt, mogelijk is hercalibratie na iedere keer droogvallen noodzakelijk, ondanks de stelling van de leverancier dat dit niet zo is.



Figuur 4.70 Vergelijking van waterpeilmeting (instrument A) en peil bij Lobith

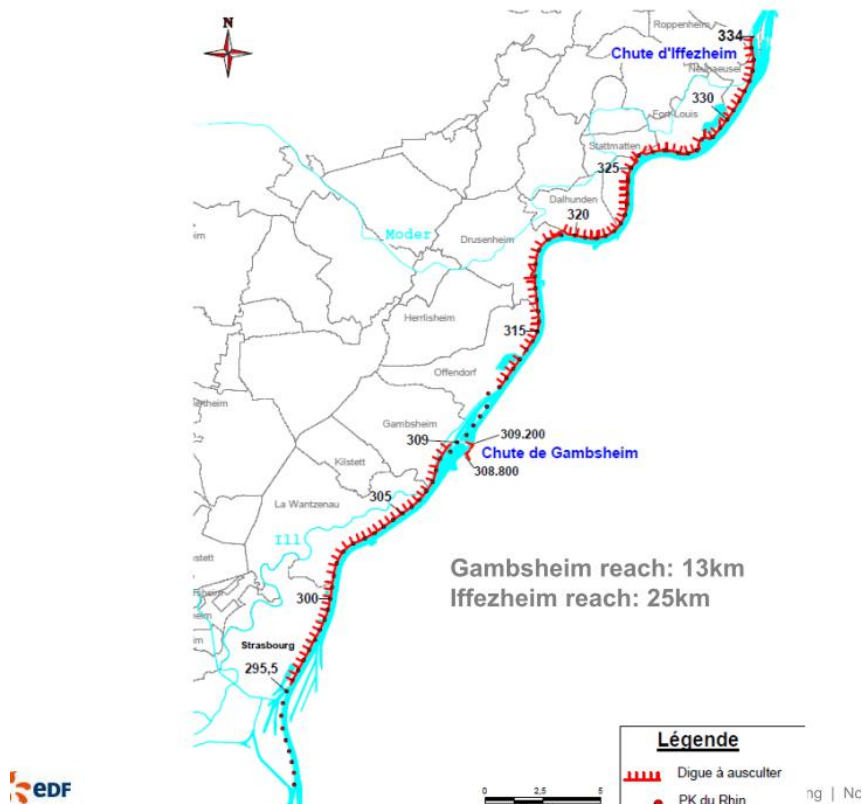
4.22 Gamsheim, Frankrijk monitoren van de Rijndijken

Korte omschrijving project (locatie, doel van de monitoring, opdrachtgever)

Aan de Franse kant van de Rijn tussen Straatburg en Iffezheim word circa 38 km dijk gemonitord middels glasvezelkabels. Zie Figuur 4.71.

VNF (Voies Navigables de France) is de eigenaar van de Franse waterwegen. VNF werkt en onderhoud het grootste Europese waterwegennet, waaronder 6.700 km kanalen en bevaarbare rivieren en 4.000 kunstwerken (stuwen, sluizen ...). Aan de Franse kant van de Rijn, is VNF de eigenaar van de linkeroever dijken tussen Gamsheim en Iffezheim

In 2006 is in Frankrijk de Waterwet van kracht geworden en deze betiteld deze dijken als categorie B dijken.⁴ Deze wet zegt dat deze dijken een efficiënt toezicht/monitoringssysteem moeten hebben om afwijkingen op te sporen in de vorm, het gedrag en in de tijd.



Figuur 4.71 Monitoringslocatie met glasvezelkabel langs de Franse kant van de Rijn

De doelstellingen van het nieuwe monitoringssysteem zijn de volgende:

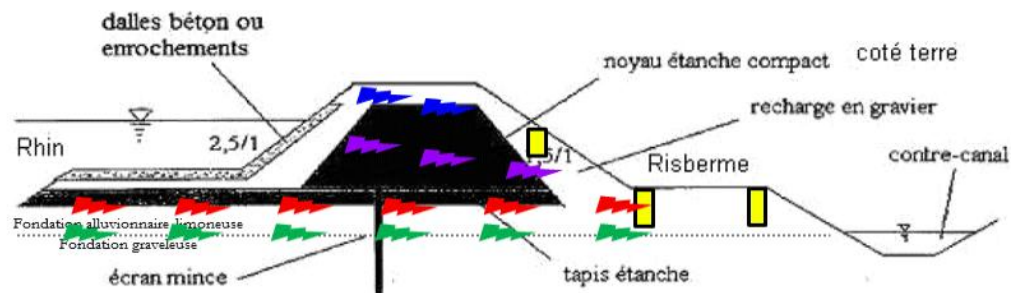
⁴ Categorie B dijken zijn als volgt gedefinieerd

- $10\text{ m} < H < 20\text{ m}$

- $H^2 \times V^{1/2} > 200$

m = dijkhoogte [m], V = stroomsnelheid [m/s]

- Het inzetten van een monitoringssysteem dat zowel mechanische als op lange termijn het hydraulische gedrag van de dijken monitort om hun veiligheid te garanderen.
- Het optimaliseren van onderhoudswerkzaamheden door het onderhoud te verminderen
- Een waarschuwingssysteem om de dikeigenaar te waarschuwen bij mogelijke calamiteiten



Figuur 4.72 Te verwachten waterstromen door de dijk

In Figuur 4.72 zijn de te verwachten waterstromen opgenomen.

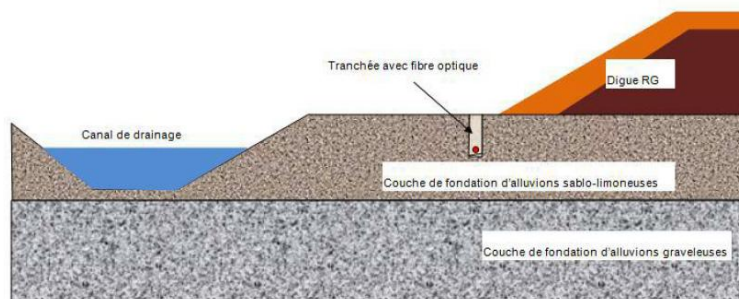
Wat is er gemeten? (parameters, meetinstrumenten)

Om de verschillende waterstromen te meten in de dijk is een voor onderzoek uitgevoerd, waarbij alle mogelijk faalmechanismen zijn beoordeeld op mogelijk voorkomen. Tevens is een historisch onderzoek naar de dijk uitgevoerd om de kwetsbare locaties uit het verleden in kaart te brengen. Een van de randeisen van de opdrachtgever was dat er maar op een locatie een glasvezelkabel in de dijk mocht worden aangebracht.

Op basis van het vooronderzoek is besloten om de glasvezelkabel aan te brengen in de binnenberm op 1 meter diepte.

Er is gekozen voor Distributed temperatuurmetingen (DTS) (zie ook bijlage B) door optische vezels met de passieve methode (geen verwarming van de glasvezelkabel). Deze glasvezelkabel zal zorgen voor een continue lekkage detectie en een vroegtijdige opsporing van interne erosie.

Verder worden er elke 10 jaar bathymetrische en topografische metingen uitgevoerd van de waterkering. Hiermee wordt het mechanisch gedrag van de waterkering bepaald.



Figuur 4.73 Locatie glasvezelkabel in de binnenberm van de dijk

Wat is het eindresultaat van de metingen?

De kabels zijn in november 2013 gelegd en er zijn nog geen metingen uitgevoerd.

Zijn er bijzonderheden te melden?

De kabels zijn gelegd met een speciaal voor dit doel aangepaste sleuvengraver. Hierdoor was het mogelijk om circa 1300 meter kabel per dag aan te leggen.

4.23 Lessons learned proeftuinen

In de voorgaande paragrafen van dit hoofdstuk is een twintigtal verschillende proeftuinen beschreven. In deze paragraaf worden de “lessons learned” beschreven van deze proeftuinen.

De proeftuinen verschillen in grootte van sensordichtheid en sensorvariatie, Van een locatie met een lage sensordichtheid en lage sensorvariatie (DMS, Colijnsplaat) tot een locatie met een hoge sensordichtheid en een hoge sensorvariatie (All-in-one sensor validatietest).

Deze proeftuinen zijn alle opgezet met een duidelijk meetdoel. Er is sprake van een vraagarticulatie. Immers, zonder vraag geen instrumentatie zie §2.3.

In de monitoringsfilosofie zoals die in de voorgaande hoofdstukken besproken is, zijn vier verschillende opeenvolgende fasen gedefinieerd. Deze fasen zijn:

1. Waarom & wat moet er gemonitord worden? (monitoringsfilosofie).
2. Het monitoren zelf.
3. analyse van de metingen.
4. Toepassen van de meetresultaten en herijken van 1).

Er kan vastgesteld worden dat voor een aantal proeftuinen alle fasen doorlopen zijn. De overige proeftuinen hebben niet alle fasen doorlopen, omdat ze nog niet afgerond zijn.

IJkdijkprojecten

De piping- en zettingsproeven op de IJkdijk hadden naast de state-of-the art validatie-experimenten, ook tot doel om kennis op te bouwen over sensortechnologie voor waterkeringen.

De All-in-one sensorvalidatietest had tot doel om inzicht te verkrijgen in de functionaliteit en prestaties van full service dijkmonitoringssystemen. Hierbij is gefocused op het real-time voorspellen van de dijksterkte ten aanzien van meerdere faalmechanismen. Een aantal lessen valt uit deze proeven te trekken [de Vries et al., 2013a]:

- *In het algemeen wordt met behoorlijke precisie zichtbaar wat er met de proefdijk gebeurt.* Alhoewel dit als een “open deur” kan worden opgevat is het echter wel een belangrijke constatering dat gerichte monitoring zinvol is om bepaalde faalmechanismen te identificeren..
- *Bij de meeste meetpartijen is een gebrek aan geotechnisch inzicht.* Dit pleit voor een nauwere samenwerking tussen de geotechnische bureau's en de meetpartijen.
- *Gedurende het proces van de metingen, worden de voorspellingen beter.* Het blijkt dus dat er een bepaalde aanlooptijd nodig is voordat men het “meetsysteem” begrijpt en op de juiste manier heeft ingesteld. Wellicht vindt dit zijn oorzaak in het gebrek aan geotechnisch inzicht.
- *Voor wat betreft de visualisatiesystemen geldt dat de combinatie van meetdata uit verschillende bronnen de kwaliteit van de voorspellingen ten goede komt.* In de loop van de proeven wordt ook voor de visualisatiesystemen de meeste voorspellingen steeds beter, waarbij vaak een volledig beeld wordt gegeven.

Op basis van de uitgevoerde proeven kan worden gesteld dat het mogelijk is om met de huidige kennis van zaken het mogelijk moet zijn om tot een full service dijkmonitoringssysteem te komen. Dit systeem bestaat uit de volgende componenten:

- Diverse meettechnieken;
- Data verwerkingssysteem;
- Visualisatiesysteem.

Om dit systeem succesvol te maken en om nauwkeurige en betrouwbare voorspellingen van de dijksterkte te kunnen geven is het van belang om de juiste aanpak van de genoemde componenten te hanteren, alsmede voldoende expertkennis in te brengen. De in hoofdstuk 2 en 3 beschreven monitoringsfilosofie zal hierbij een waardevol hulpmiddel zijn.

Overige Nederlandse projecten

Aan waterkeringen wordt al vele jaren gemeten om onder andere de veiligheid van de kering in kaart te brengen. Bij de Nederlandse proeftuinen wordt vooraf het monitoren vaak een uitgebreide analyse gemaakt van het probleem voordat men met meten begint. Het meetdoel staat vaak helder voor ogen.

Een aantal lessen die uit deze Nederlandse proeftuinen zijn getrokken staan hieronder beschreven:

- Het is niet altijd mogelijk om snelle conclusies te trekken uit de meetdata omdat deze in een zodanig formaat ter beschikking worden gesteld dat databewerking en -verwerking (onnodig) veel tijd kost.
- Een andere belangrijke constatering is dat er significante verschillen in stijghoogte gemeten worden tussen overeenkomstige instrumenten in een gelijke dijkopbouw. Dit kan oplopen tot meerdere decimeters. Hieruit blijkt de potentieel sterke invloed van inhomogeniteiten binnen eenzelfde grondlaag. Dit vergroot de potentiële onzekerheid ten aanzien van de waterspanningen in een dijk, zelfs in geval er in beperkte mate gemeten wordt; pas bij meerdere gelijksoortige en gelijke metingen zal deze onzekerheid verkleind kunnen worden.
- Bij opschaling naar grotere dijktrajecten zal zeer zorgvuldig gekeken moeten worden naar de meetfrequenties, de wijze van dataopslag en de benaderbaarheid van de data, evenals de databewerkingsmogelijkheden, kwaliteit van installatie. Hierbij kan ook gebruik gemaakt worden van de ervaring die is opgedaan bij de All-in-one sensorvalidatietest zoals hiervoor is beschreven.

5 Smart sensor kit

5.1 Inleiding

De smart sensor kit is een project in het kader van de Digitale Delta. In paragraaf 5.2 zal de Digitale Delta worden beschreven en in paragraaf 5.3 de Smart Sensor Kit (SSK) zoals deze bij het Hoogheemraadschap van Delfland zal worden toegepast.

5.2 Digitale Delta

In juni 2013 is door Rijkswaterstaat, IBM, Hoogheemraadschap Delfland, TU Delft en Deltares de Digitale Delta van start gegaan. Gedurende een periode van 12 maanden zullen deze partijen gezamenlijk onderzoeken hoe met behulp van betere informatiedeling en slim hergebruik van ICT toepassingen het waterbeheer in Nederland verbeterd kan worden. Een bijkomend doel hiervan is om tegelijkertijd de economische positie van de Nederlandse watersector in het buitenland te vergroten.

Nederland heeft wereldwijd het best functionerende watermanagementsysteem maar door onder andere snel veranderende weersomstandigheden stijgen de kosten voor waterbeheer in Nederland jaarlijks. Volgens het Bestuursakkoord Water geeft de Nederlandse overheid jaarlijks 7 miljard Euro uit aan waterbeheer en die kosten zullen zonder ingrijpen de komende 7 jaar stijgen met 1 tot 2 miljard Euro. Gebleken is dat partijen in de watersector beter kunnen samenwerken en beschikbare informatie op grotere schaal kunnen delen.

Het project Digitale Delta wil de gegevens van verschillende waterprojecten daarom samenvoegen en eenvoudig beschikbaar maken. Dit kunnen gegevens zijn over regenval, waterstanden, waterkwaliteit, dijksensoren, maar ook radardata, voorspellingsmodellen en gegevens van sluizen, gemalen en dammen

Beter analyseren en benutten van data

Na het samenvoegen wordt er gekeken hoe ICT-toepassingen helpen bij het analyseren van al die gegevens om risico's op overstroming, droogte en waterkwaliteit beter te kunnen voorspellen. Door het beter analyseren en door het benutten van de grote hoeveelheden beschikbare data biedt Digitale Delta straks mogelijkheden om een antwoord te formuleren op de toenemende uitdagingen van wateroverlast en -tekort.

Onderzoek en nieuwe oplossingen stimuleren

De betrokken partijen willen met de Digitale Delta voornamelijk het onderzoek naar waterbeheer stimuleren. Het project maakt data openbaar en leesbaar, waardoor allerlei relevante partijen in het waterbeheer tot nieuwe oplossingen kunnen komen én onderzoeken sneller en goedkoper kunnen worden uitgevoerd. Dat geldt niet alleen voor waterschappen en Rijkswaterstaat, maar ook voor waterexperts en onderzoekers. Bovendien kan de Digitale Delta door Nederlandse onderzoekers en ondernemers ook in andere delen van de wereld ingezet worden om mensen tegen het water te beschermen.

Betrokken projecten

Digitale Delta richt zich in eerste instantie op waterprojecten binnen de regio van Hoogheemraadschap van Delfland en van Rijkswaterstaat. Een van deze proeven is de Smart Sensor Kit. Deze zal in de volgende paragraaf nader worden beschouwd.

Als de proef succesvol is, wordt overwogen om op landelijk niveau informatiedeling binnen de watersector te optimaliseren. Een voorbeeld:

- *Voorspellen van waterhoeveelheden*

Rijkswaterstaat en waterschappen zullen in het kader van Digitale Delta de gegevens over waterstanden gaan optimaliseren. Informatie wordt vaak nog doorgebeld of gemaïld. Via één centraal IT platform zullen die gegevens eenvoudiger op te vragen zijn. Voorspellingsmodellen zullen dankzij het real-time delen van gegevens accurater worden, waardoor sneller kan worden ingegrepen bij te hoge of te lage waterstanden. Hoog water zal op een zo optimaal mogelijke manier afgevoerd kunnen worden, terwijl water bij lange droogtes langer vastgehouden wordt om verzilting en schade aan de landbouw te voorkomen.

5.3 Smart sensor kit

Binnen het beheergebied van het Hoogheemraadschap van Delfland werken partijen actief samen aan het realiseren van een gebruikssituatie die is toegespitst op het regionale waterbeheer. Hierin wordt met ondernemingen als Hydrologic en IBM gewerkt aan de ontwikkeling van een nieuw waarschuwingssysteem voor overstromingen. Door grote hoeveelheden real-time data van waterafvoersystemen en waterstanden te combineren met meteorologische data en simulatiemodellen, zijn watermanagers beter in staat zijn om de beschikbare capaciteit van wateropslag te monitoren. Hierdoor kan in geval van een naderende overstroming sneller worden gehandeld. Daarnaast zullen deze gegevens via het digitale platform beschikbaar worden gesteld voor andere partijen die met behulp hiervan hun eigen waterprojecten kunnen starten. Om dit te realiseren heeft Delfland haar beheergebied als experimenteelgebied ter beschikking gesteld.

Momenteel worden de voorbereidingen getroffen voor deze proeftuin. Contactpersoon voor deze proeftuin bij het Hoogheemraadschap Delfland is Esther Klinkum.

6 Samenvatting en conclusies

6.1 Algemeen

Deze rapportage is een handreiking voor het monitoren van waterkeringen, geïllustreerd met recente praktijkvoorbeelden.

Monitoren is hier gedefinieerd als het geheel van tijdsafhankelijke metingen aan een constructie (al dan niet herhaald) en de verwerking daarvan, om indien nodig tot onderbouwde wijzigingen ten aanzien van de constructie, het beheer ervan of de monitoring zelf te kunnen besluiten. Het is met name zinvol om bestaande onzekerheden in de belasting en sterkte te verkleinen, waardoor er een beter zicht ontstaat op de werkelijke veiligheid tegen overstromingen. Dit kan in diverse fasen gebeuren (tussen haakjes elementen uit de dijkbeheercyclus):

- Bij aanleg of versterking (beleid, verbetering);
- Ten behoeve van de periodieke toets op veiligheid (toetsing);
- Na afkeuring van dijken in de loop van het toetsingsproces (inspectie, buitengewoon onderhoud);
- Als hulpmiddel bij het beheer (inspectie, beleid, planvorming, buitengewoon onderhoud en vergunningverlening);
- Als waarschuwingssysteem bij dreigende calamiteiten (calamiteitenbestrijding).

Kennis opgedaan in de ene fase wordt idealiter beschikbaar gemaakt voor de andere fasen, ter verhoging van de efficiëntie en om inconsistenties te vermijden.

6.2 Monitoringsfilosofie

Monitoring dient te worden ingezet om specifieke vragen te beantwoorden ten aanzien van het gedrag van de waterkering. Dit leidt in het algemeen tot verkleining van onzekerheden en vergt vooraf een goede analyse van het te verwachten gedrag onder uiteenlopende omstandigheden: dagelijkse en extreme omstandigheden.

De inzet van instrumentatie (of visuele inspectie) dient hier op te worden gebaseerd. Als er geen vraag is, dan zou instrumentatie overbodig moeten zijn. Wanneer er wel een vraag, dan moet beoordeeld worden welke vorm van monitoring geschikt is om die op doelmatige wijze te beantwoorden. De gedragsanalyse kan vervolgens regelmatig en bij bijzondere omstandigheden worden geactualiseerd.

Omdat bij onvoldoende bekendheid met de werkelijke waarden er conservatieve aannames gedaan behoren te worden, zal verbeterde kennis van de werkelijkheid *over het algemeen* leiden tot gunstiger uitkomsten.

Bij monitoring – op welke wijze dan ook – dient een adequaat systeem voor de verwerking van meetdata te worden opgesteld opdat eventueel benodigde maatregelen tijdig kunnen worden genomen.

6.3 Systematische opzet en uitvoering van monitoring

Een systematische aanpak voor monitoring is weergegeven in Tabel 6.1. De diverse paragrafen uit het gelijknamige hoofdstuk zijn hier ten dele gegroepeerd, zodat een overzichtelijk stappenplan is ontstaan.

Tabel 6.1 Systematische opzet en uitvoering van monitoring

Stap	Omschrijving
I	Verzamel en beoordeel informatie over de dijk Baken het project af (§3.2) Verzamel historische gegevens (§3.3) Bepaal maatgevende belastingen (§3.4)
II	Identificeer uiterste grenstoestanden Identificeer de maatgevende faalmechanismen (§3.5) Identificeer de maatgevende parameters (§3.6)
III	Kies een monitoringsstrategie (§3.7)
IV	Specificeer het monitoringssysteem Kies te monitoren parameters (§3.8) Bepaal de orde van grootte van veranderingen (§3.9) Stel waarschuwings- en alarmwaarden vast (§3.10) Bepaal interventiemogelijkheden (§3.11) Registreer relevante omgevingsinvloeden (§3.12) Kies de locaties van de metingen (§3.13) Benoem specifieke doel(en) van elk instrument (§3.14) Stel verwachtings-, waarschuwings- en alarmwaarden vast per instrument (§3.15)
V	Stel eisen aan instrumenten Beschrijf de functionele eisen aan te selecteren instrumenten (§3.16) Stel procedures op om correct functioneren van de instrumenten te bepalen (§3.17) Plan regelmatige calibratie en onderhoud (§3.18) Plan installeren van de instrumenten (§3.19) Stel aankoopspecificaties op voor de instrumenten (§3.20)
VI	Plan omgang met data Plan de verzameling van meetgegevens (§3.21) Plan de verwerking van meetgegevens (§3.22) Verdeel verantwoordelijkheden (§3.23)
VII	Rond het ontwerp af Stel de (voorlopige) begroting op, <i>ga desnoods één of meer stappen terug</i> (§3.24) Leg het systeem vast in een toegankelijk ontwerpverslag (§3.25)
VIII	Installeer het monitoringssysteem en bed het in de organisatie in (§3.26)
IX	Gebruik (en herzie) het monitoringssysteem (§3.27)

6.4 Proeftuinen

Het monitoren van waterkeringen door middel van sensors in de waterkeringen wordt al tientallen jaren uitgevoerd, echter sinds de uitvoering van het eerste IJkdijkexperiment is er een kentering ontstaan en is er een toename te zien van het aantal monitoringsprojecten.

De laatste jaren neemt de ontwikkeling van de algemeen toepasbare monitoringssystemen voor waterkeringen toe. Binnen de geotechniek worden al vele jaren uitgebreide monitoringstechnieken ontwikkeld en regelmatig toegepast, denk hier bij aan de Betuweroute, HSL en de Noordzuidlijn. Voor de bepaling van de actuele sterkte van de waterkeringen was dit echter nog niet algemeen toepasbaar. Met de methode WASPAN (rode en groen lijntjes)

van GeoDelft, was het echter wel mogelijk om de sterkteontwikkeling tijdens het ophoogproces te monitoren.

In dit rapport is een geselecteerd overzicht gegeven van de proeftuinen die van belang zijn voor deze verdere ontwikkeling van de monitoringssystemen voor waterkeringen. Een van de eerste grote monitoringsprojecten met real time metingen aan waterkeringen in Nederland was het baggerdepot Ketelmeer in 1999. Hierbij werden 3 jaar lang 78 meetlocaties met waterspanningsmeters gemonitord. In 2008 werd vervolgens een aanvang gemaakt met de verschillende IJkdijk experimenten (Macrostabiliteit en piping). In onderstaande tabel is een overzicht gemaakt van een aantal proeftuinen.

§	Naam	IJkdijk gerelateerd	Periode van uitvoering	Land van uitvoering	Gebruikte Techniek
4.2	IJkdijk projecten Overslagproef, macrostabiliteit en piping	Ja	2007- 2009	NL	Diversen
4.3	Livedijk Eemshaven	Ja	2008	NL	WSM ¹⁾ en glasvezel
4.4	Droogteproef Veenderij	Ja	2011- 2012	NL	Remote sensing, WSM glasvezel
4.5	Livedijk Utrecht	Ja	2011- 2013	NL	WSM en glasvezel
4.6	Livedijk XL	Ja	2011- 2013	NL	WSM, glasvezel en DMC
4.7	All in one sensor validatie test	Ja	2012	NL	Diversen
4.7	Livedijk Ameland	Ja	2012- 2013	NL	WSM en glasvezel
4.9	Livedijk Piping Rivierenland	Ja	2014	NL	Nog te bepalen
4.10	Baggerspecie depot Ketelmeer		1999	NL	WSM
4.11	Vlaardingsekade		2008- 2012	NL	WSM en peilbuizen
4.12	Stammerdijk		2009- 2010	NL	WSM
4.13	Lekdijk		2010	NL	WSM en hellingmeetbuis
4.14	Colijnplaat		2010	NL	DMC
4.15	Vechtkade		2011	NL	WSM, peilbuizen
4.13	Ringdijk Watergraafsmeer		2011- 2013	NL	WSM
4.17	Grebbedijk		2011- 2013	NL	WSM
4.18	Subcoast		2010- 2013	NL/ Europa	Satellietmetingen
4.19	Dayulan, langs Yellow River		2011- 2012	China	WSM, Glasvezel
4.20	Grand Sluice		2011	Engeland	WSM, glasvezel en SAA(P)
4.21	Rheindeich		2011- 2012	Duitsland	WSM
4.22	Gambshheim		2013	Frankrijk	Glasvezel

¹⁾ WSM = waterspanningsmetingen

Tabel 6.2 Verschillende proeftuinen

Sindsdien is er als spin-off van deze IJkdijkprojecten ook een groot aantal andere IJkdijkprojecten opgestart. Zoals Livedijk Utrecht, Livedijk Eemshaven en op een grotere schaal de Livedijk XL in Noordoost Groningen.

Conclusies ten behoeve van dijkmonitoring: LiveDijken

Meer algemeen kan worden geconcludeerd dat er bij opschaling naar grotere dijktrajecten zeer zorgvuldig gekeken zal moeten worden naar de meetfrequenties, de wijze van dataopslag en de benaderbaarheid van de data, evenals de databewerkingsmogelijkheden, kwaliteit van installatie.

Een andere belangrijke constatering is dat er kennelijk significante verschillen in stijghoogte kunnen bestaan tussen overeenkomstige instrumenten in een overigens gelijke dijkopbouw. Dit kan oplopen tot meerdere decimeters. Hieruit blijkt de potentieel sterke invloed van inhomogeniteiten binnen eenzelfde grondlaag. Dit vergroot de potentiële onzekerheid ten aanzien van de waterspanningen in een dijk, zelfs in geval er in beperkte mate gemeten wordt; pas bij meerdere gelijksoortige en gelijke metingen zal deze onzekerheid verkleind kunnen worden.

In 2012 heeft de All-in-one Sensor ValidatieTest (AIO-SVT) plaatsgevonden waarbij meer inzicht is verkregen in de functionaliteit en de prestaties van de dijkmonitoringssystemen. De belangrijke onderdelen van de dijkmonitoringssystemen zijn de meettechnieken en de visualisatiesystemen. Voor de AIO-SVT zijn negen meettechnieken en drie visualisatiesystemen beoordeeld.

Uit deze proef kan geconcludeerd worden dat de combinatie van meetdata uit verschillende bronnen de kwaliteit van de voorspellingen blijkbaar duidelijk ten goede komt. In de loop van de proeven worden de meeste voorspellingen steeds beter, waarbij vaak een volledig beeld wordt weergegeven.

Verder kan geconcludeerd worden dat met de integratie van meetsystemen, data verwerkingssystemen en een visualisatiesysteem tot nauwkeurige en betrouwbare voorspellingen van de dijksterkte binnen de All-in-one Sensor Validatie Test is gekomen. Met een juiste aanpak, expert kennis en een zorgvuldige combinatie van meettechnieken zijn full service dijkmonitoringssystemen voor waterkeringen dan ook zeker haalbaar.

De concrete invulling hangt daarbij uiteraard mede af van de dijk(en) waarvoor het full service dijkmonitoringssysteem gemaakt moet worden. Dit zal altijd maatwerk zijn

Verschillende Waterschappen hebben ook zelf proeftuinen al dan niet in samenwerking met andere partijen. Een aantal van deze proeftuinen bij onder andere Waternet, HH Delfland en Waterschap Rivierenland zijn beschreven. Behalve in Nederland zijn er ook proeftuinen/pilots in het buitenland aanwezig. Een aantal hiervan zijn beschreven; Boston (Groot Brittannië), Gambsheim (Frankrijk), Rheindeich (Duitsland) en Dayulan (China).

Als laatste grote IJkdijkexperiment staat een zettingsvloeiingsexperiment op de lat. Momenteel worden de voorbereiding hiervoor getroffen. Het laat zich aanzien dat de ontwikkelingen van de sensors/ dijkmonitoringssystemen en visualisatiesystemen de komende jaren nog verder sterk zal ontwikkelen.

Bij het opzetten van proeftuinen moet er rekening mee worden gehouden dat het combineren van theorie en praktijk niet altijd een positieve invloed heeft gehad op het plaatsen van de

veld instrumenten. Er zijn verschillende voorbeelden te noemen waarbij de monitoring buiten proportie groeide doordat degene die de leiding hadden het verschil niet konden maken tussen wat *nodig* is en wat *aardig is om te weten* uit onderzoeksoogpunt. Hierdoor willen dijk eigenaren soms niet hun dijk beschikbaar stellen voor dijkonderzoeken [DiBiagio, 1999]. Doordat de grote IJkdijkprojecten niet op bestaande dijken zijn uitgevoerd, maar op speciaal opgeworpen grondlichamen is dat probleem deels verholpen.

De Waterwet geeft ook mogelijkheden om metingen mogelijk te maken. De vrijwilligheid is dan minder vanzelfsprekend. Verder heeft de beheerder ervaring met het betrekken van de omgeving. Dit is mensenwerk en dit moet ook goed uitgevoerd worden.

Gesteld kan worden dat deze veldmetingen significant hebben bijgedragen aan de vooruitgang van de state-of-the-art geotechnische ontwikkelingen. Denk hierbij onder andere aan de pipingonderzoek op de IJkdijk, deze heeft verschillende nieuwe inzichten opgeleverd.

6.5 Smart sensor Kit

De Digitale Delta is een project waarbinnen Rijkswaterstaat, IBM, Hoogheemraadschap van Delfland, TU Delft en Deltares gezamenlijk onderzoeken hoe met behulp van betere informatiedeling en slim hergebruik van ICT toepassingen het waterbeheer in Nederland verbeterd kan worden.

Een onderdeel van de Digitale Delta is het project/ proeftuin de Smart sensor Kit (SSK).

Binnen dit project van SSK wordt met ondernemingen als Hydrologic en IBM gewerkt aan de ontwikkeling van een nieuw waarschuwingssysteem voor overstromingen. Door grote hoeveelheden real-time data van waterafvoersystemen en waterstanden te combineren met meteorologische data en simulatiemodellen, zijn watermanagers beter in staat zijn om de beschikbare capaciteit van wateropslag te monitoren. Hierdoor kan in geval van een naderende overstroming sneller worden gehandeld. Daarnaast zullen deze gegevens via het digitale platform beschikbaar worden gesteld voor andere partijen die met behulp hiervan hun eigen waterprojecten kunnen starten. Om dit te realiseren heeft Delfland haar beheergebied als experimenteel gebied ter beschikking gesteld.

Momenteel worden de voorbereidingen getroffen voor deze proeftuin. Verwacht wordt dat in 2014 met dit project kan worden begonnen.

6.6 Conclusie en aanbevelingen

Expertmeeting

Op 10 juli 2013 is er een expertmeeting bij Deltares gehouden met als doel om de huidige inzichten van de experts vanuit de verschillende disciplines te kunnen gebruiken voor onderhavige rapportage. Uit de expertmeeting zijn waardevolle adviezen naar voren gekomen die in deze rapportage zijn opgenomen.

Discussie monitoringsfilosofie

Bij deze discussie werden de volgende items van belang geacht:

- De juiste plaats van de metingen(x,y,z) met een vastgelegde nauwkeurigheid dient bekend te zijn en opgeslagen; ook de juiste datum dient aan de metingen gekoppeld te worden.
- Tevens bepalen of de sensor niet verschuift/ verzakt.
- Rekening houden met vandalisme (sensors en behuizing).
- Ook aandacht besteden aan anomaliedetectie.

Kostenoptimalisatie door monitoring

Hoe kun je door het slim inzetten van monitoring kostenoptimalisatie verkrijgen. De onderstaande overwegingen dienen hierbij in acht te worden genomen:

Door IBM is een studie uitgevoerd bij het eiland van Dordrecht om alle dijken te voorzien van een sensor om zo alle dijken continu te monitoren. Uit deze studie is gebleken dat dit maar voor 20% van de dijken een verwacht positief rendement heeft. Hieruit mag geconcludeerd worden dat het niet zinvol is om "zomaar" alle dijken vol te stoppen met instrumenten.

Hoe een dijk is opgebouwd is meestal niet meer bekend, omdat de as-built tekeningen niet meer voorhanden zijn. Voordat deze dijken gemonitord worden dient eerst de juiste opbouw van de waterkering bekend te zijn.

Lifecycle monitoring is gewenst. Direct na de versterking van de dijk wordt de monitoring er meestal te snel uitgethaald. Het zou wenselijk zijn om de monitoring langer in de dijk te laten, zodat ook tijdens de "gehele levensduur" van de dijk "er metingen worden uitgevoerd.

Nadat een dijk is afgekeurd zou er direct een spoor moeten worden ingezet met monitoring.

Het afkeuren van een dijktraject is over het algemeen lastig uit te leggen (publiek, politiek). Er wordt al zoveel geïnvesteerd in waterkeringen en toch wordt een dijktraject afgekeurd. Het zou verstandig zijn om dit te objectiveren en de monitoring hier een rol bij laten spelen.

"Waterschappen behoren monitoring uit te voeren. Inspectie (monitoring) is er juist om onzekerheden op te vangen en om de ontwikkelingen van de dijk in de tijd te volgen." Niet iedereen is het met deze uitspraak eens. Meestal is (visuele) inspectie voldoende.

Wie bepaalt of de dijk niet voldoende sterk is. De experts zitten meestal binnen en de beheerders lopen vaak buiten. Er kan sprake zijn van kennisasymetrie. Met monitoren alleen ben je er niet, er dient oog te zijn voor de organisatie(structuur).

Het concept van meten dient eerder ingezet te worden. Welke informatie heb je nodig? Bij de systemen dient ook het handelingsperspectief meegenomen te worden.

Systemen hebben pas meerwaarde als er de juiste mensen achter zitten. Deze mensen zijn schaars en duur. Dit kan een nadeel zijn voor een Waterschap.

Bij de meeste vakgebieden wordt monitoring al veel vaker ingezet. Binnen de dijkenwereld zou het veel meer kunnen zijn.

Gesteld kan worden dat het monitoren van dijken zinvol is als de metingen daadwerkelijk worden gebruikt om schematisaties en modellen van de situatie te kalibreren en te verbeteren. Momenteel worden de voorbereidingen getroffen voor deze proeftuin.

Om tot falen van een waterkering te komen is er meestal een keten van gebeurtenissen nodig. Door monitoring van de waterkering kan eerder herkenning van een ongewenste of zelfs gevaarlijke situatie plaatsvinden, bovendien is er beter inzicht mogelijk in het fysisch gedrag onder wisselende omstandigheden daar waar eenmalig grondonderzoek slechts een momentopname betreft (met doorgaans wel een groter detailniveau en ook andere informatie).

Aanbevelingen

- Het ontwerp van een monitoringssysteem moet bepaald worden op basis van de wijze waarop de meetgegevens zullen worden gebruikt. Ook de aanbrengmethode, insteltijd, meetnauwkeurigheid en meetfrequentie moeten hierop worden afgestemd.
- Waarborging van de datacontinuïteit vereist een passend protocol dat ook gehanteerd wordt, samenhangend met het doel van de monitoring.
- Bijzondere gebeurtenissen op de meetlocatie moeten worden bijgehouden in een logboek, zodat merkwaardige (veranderingen in de) metingen achteraf verklaard kunnen worden.
- Geconditioneerd onderzoek in een geotechnisch laboratorium, aangevuld met consolidatieberekeningen, zal het inzicht vergroten in de praktische bruikbaarheid van instrumenten die met nieuwe installatiemethoden in de grond worden aangebracht, waarbij zinvol gebruik kan worden gemaakt van het vele onderzoek dat mede ten grondslag heeft gelegen aan de installatiemethoden voor 'traditionele' instrumenten.
- Voor implementatie van betrouwbare dijkmonitoring in de praktijk is dringend behoefte aan een Technische Richtlijn Monitoring. Deze richtlijn kan duidelijkheid verschaffen op het gebied van kwaliteit, transparantie en biedt de mogelijkheid om tijdens het aanbestedingstraject specificaties op te stellen. Een dergelijke richtlijn kan de betrouwbaarheid en kwaliteit van dijkmonitoring vergroten. Er bestaat consensus tussen het bedrijfsleven, de kennisinstituten en dijkbeheerders over het nut van een dergelijke richtlijn.
- Een compleet monitoringsplan maakt meetcampagnes efficiënter. Afspraken ten aanzien van datamanagement vergemakkelijken de interpretatie van meetdata.

7 Literatuur

[Adams, 1999]

Adams, M.L., Philpot, W.D., Norvell, W.A., 1999. Yellowness index: An application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (18). DOI: 10.1080/014311699211264. pp. 3663-3675.

[Alipoor & Hadinejad, 2011]

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

[van Baars, 2005]

S. van Baars, The horizontal failure mechanism of the Wilnis peat dyke, *Géotechnique*, 55(4):319-323.

[Barends & van Hoven, 2007]

Barends, F.B.J. & Hoven, A. van, Internal setup in porous dams and dikes, *14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Cuéllar, V., Dapena, E., Alonso, E., Echave, J.M., Gens, A., Justo, J.L. de, Oteo, C., Rodríguez-Ortiz, J.M., Sagaseta, C., Sola, P. & Soriano, A. (editors), Millpress, Rotterdam, 821-826.

[Beck et al., 2010]

Y.L. Beck, A.A. Khan, P. Cunat, C. Guidoux, O. Artières, J. Mars & J.J. Fry, Thermal monitoring of embankment dams by fiber optics, *Proc. 8th ICOLD European Club Symposium*, TU Graz, 2010, pp. 444-448.

[van Beek et al., 2011]

Beek, V.M. van, Knoeff, H. & Sellmeijer, H. 2011. Observations on the process of backward erosion piping in small-, medium- and full-scale experiments, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 15(8), 1115-1137.

[Berg, van den, 2012]

F.P.W. van den Berg, Deltares, Real time monitoring of levees through sensor technology along the Yellow River, *5th IYRF*, Zhengzhou, China

[Berg, van den, 2013]

Frans van den Berg, *Verslag expertmeeting 'Veiligheid als basis' - 10 juli 2013*, rapportage 1207933-000-VEB-0005, Deltares, Delft, 12 augustus 2013.

[Bersan et al., 2013]

Silvia Bersan, Cristina Jommi, André Koelewijn & Paolo Simonini, Applicability of the Fracture Flow Interface to the Analysis of Piping in Granular Material, *Proc. COMSOL Conference 2013 Rotterdam*, 8 pp.

[Bezuijen et al., 2005]

Adam Bezuijen, Gerard A.M. Kruse & Meindert A. Van, Failure of peat dikes in the Netherlands, *Proc. XVI Int. Conf. Soil Mech. Geot. Eng.*, Osaka, Millpress, Rotterdam, 1857-1860.

[Broderick & Marr, 2012]

William Broderick & W. Allen Marr, *Dam safety performance monitoring and data management – best practices*, CEATI report no. T082700-0210, Dam Safety Interest Group, CEATI international, Montreal, October 2012

[Calle, 2011]

Ed Calle, *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*, rapportage 1001411-010-GEO-0007, Deltares, Delft, april 2011.

[Deltares, 2011]

Rapport “Opdracht Nigtevecht”, K.M. Cohen, (Deltares/TNO) 2011, projectnr. 1204182

[Deltares, 2012]

Rapport “Inrichting monitoringsysteem voor Grebbedijk; voorbereidingen voorafgaande aan eerstvolgend hoog water” (Deltares 2012, nummer 1204397-000-0011, definitieve versie).

[Deltares, 2013]

Rapport “Jaaroverzicht monitoring Grebbedijk; evaluatie meetgegevens” (Deltares 2013, nummer 1204397-000-GEO-0014, definitieve versie).

[DiBiagio, E., 1999]

E. DiBiagio, Field Measurements and instrumentations in the 20 th century . In: *Field measurements in geomechanics*, Leung, Tan & Phoon, editors, Balkema, Rotterdam, 1999, 3-12

[Dunnicliff, 1993]

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

[Dunnicliff, 1999]

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

[Fest & van den Berg, 2013]

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

[Floodcontrol, 2013]

2012.09.05.2 Technische Workshop Dijkmonitoring, C.K.E. ter Brake, Floodcontrol, 2013

[GeoDelft, 2007]

‘Hoofdrapport quickscan Regionale Waterkeringen Waternet met DAM / RRD
ir J.G. Knoeff, ing H.T.J De Bruijn GeoDelft , september 2007, kenmerk: 426090.0022

[Hopman, 2008]

V. Hopman, *Praktijkonderzoek gasvorming waterspanningsmeters, locatie Zederik en Noordmolendijk*, concept-rapportage 14133-364 v01, Deltares, Delft, juni 2008.

[Jones et al., 2012]

Cathleen E. Jones, Gerald Bawden, Steven Deverel, Joel Dudas, Scott Hensley & Sang-Ho Yun, Study of movement and seepage along levees using DINSAR and the airborne UAVSAR instrument, *SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XII* (Claudia Notarnicola, Simonetta Paloscia & Nazzareno Pierdicca, Proc. of SPIE, vol. 8536, 85360E, 2012, 8 pp.

[Koelewijn, 2001]

A.R. Koelewijn, *Monitoringsfilosofie HerMes, Waarom, Wat, Waar, Wanneer en in Welke mate meten & verwerken*, rapportage CO-710107/53, GeoDelft, Delft, 30 januari 2001.

[Koelewijn & Van, 2003]

A.R. Koelewijn & M.A. Van, 'Monitoring of the test on the dike at Bergambacht: design and practice', Proc. 13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Prague, August, Volume 1, pp. 755-760. Prague: CGTS, August 2003.

[Koelewijn et al., 2010]

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

[Koelewijn, 2011]

Andre Koelewijn, *Verkennde notitie veiligheidsfilosofie KPP CIP SMIT deelproject "Veiligheid als basis: inbedding (dijk)meten en monitoring"*, Deltares memo 1204819-003-VEB-0002-v01-m, Delft, 29 november 2011.

[Koelewijn, 2012]

A.R. Koelewijn, *IJkdijk AIO-SVT Geotechnical Analysis*, report no. 2012.09.05.6, Flood Control 2015, Delft, 28 December 2012.

[Van der Kolk, 2011]

Bernard van der Kolk, *Livedijk eemshaven, analyse metingen*, Deltares memo 1200888-000-GEO-0006-v01-m, Delft, september 2011.

[van der Kolk et al., 2011]

Bernard van der Kolk, John van Esch & André Koelewijn, *KPP CIP SMIT deelproject "Veiligheid als basis: inbedding (dijk)meten en monitoring"*, Deelproduct "Analyse meetdata pilot", rapportnr. 1204819-003-VEB-0001-v03, Deltares, Delft, september 2011, 57 pp.

[Lemmers et al]

H.T. Lemmers, MSc; R.H.R Bolt, BSc.; Drs. J.G.R. Beemster "De effecten van hydraulische kortsluiting op de stijghoogte onder waterkeringen: een praktijkproef in de Utrechtse Vecht". Waternet, z.d,

[Lindenberg et al., 2002]

J. Lindenberg, M.A. Van, A.R. Koelewijn, C. Zwanenburg, J.W.M. Lambert, M.T. van der Meer & P.A.A.Teunissen, *Proefvak Bergambacht Evaluatierapport*, rapportage CO-710301/334, GeoDelft, Delft, juni 2002.

[Mc Rae, 1991]

John B. Mc Rae & Tony Simmonds, Long-term stability of vibrating wire instruments:

One manufacturer's perspective, *Field Measurements in Geotechnics*, p. 283 – 293, 1991
Balkema Rotterdam

[van der Meide et al, 2006]

Van der Meijde, M., Van der Werff, H.M.A., Van der Meer, F.D., 2006. Detection of anomalous vegetation related to pipeline leakages using airborne hyperspectral measurements : final report. University Twente, ITC, Enschede. p. 25.

[Moser & Zomer, 2006]

Moser, W.M. & Zomer, W.S. (2006) *Inspectie van waterkeringen. Een overzicht van meettechnieken* (2006-10). Utrecht: STOWA.

[Peters et al, 1999]

Waterspanningsmeters controleren, in Land+Water, nummer 4, 1999, A.J.M. Peters (Laboratorium voor Grondmechanica), P. Kraaijenbrink (Laboratorium voor Grondmechanica) en K.A. van den Hoek (Rijkswaterstaat).

[de Rooij, 2013]

Jolein de Rooij, *Supersoftware, fouten opsporen in programmatuur*, De Ingenieur 125(19):24-29, 22 november 2013.

[STOWA, 2007]

'Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen', STOWA 2007.

[STOWA, 2010a]

Addendum op de leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen betreffende de boezemkaden', STOWA 2010.

[STOWA, 2010b]

Inspectie waterkeringen, STOWA Utrecht 2010, rapportnummer 2010-31, ISBN 90.5773.486.1.

[Tigchelaar, 2012]

ir. J.Tigchelaar, *Toepassen innovatieve monitoring Delfland. Verkenning aan de hand van pilot Vlaardingsekade met GeoBeads*, Hoogheemraadschap van Delfland, Sector Beleid & Onderzoek, team waterkeringen, Versie 1.0, Definitief, April 2012.

[TAW, 1994a]

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, *Handreiking Constructief Ontwerpen*, TAW, Delft, april 1994.

[TAW, 1994b]

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, *Handreiking Constructief Ontwerpen, bijlagen 2-5*, TAW, Delft, april 1994.

[TAW, 2004]

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, *Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken*, Rijkswaterstaat, Delft, 1 september 2004, ISBN 978-90-369-5565-3.

[van Vliet et al., 2012]

L. van Vliet, A.R. Koelewijn & M. van der Vat, Sensors, Stowa, Amersfoort, augustus 2012. Beschikbaar via <http://deltaproof.stowa.nl/Publicaties/deltafact/Sensors.aspx?pld=41>, laatst bezocht 4 juli 2013.

[de Vries, 2011]

Goaitske de Vries, Monitoring droogteonderzoek veenkaden, Deltares 1203255-006-GEO-0001-gbh, Delft, december 2012.

[de Vries et al., 2013a]

Vries, de, G., Brake, ter, C.K.E., Bruijn, de, H., Koelewijn, A.R., Langius, E.A.F., Zomer, W.S. (2013) Dijkmonitoring: beoordeling van meettechnieken en visualisatiesystemen. Groningen: Stichting IJkdijk.

[de Vries et al., 2013b]

Vries, G. de, Koelewijn, A.R. & Bruijn, H.T.J. de, 2013. Inzicht in functionaliteit van dijkmonitoringssystemen, *Land+Water* 53 (11):24-25.

[V&W]

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, *Addendum op het Voorschrift Toetsen op Veiligheid 2006 m.b.t. primaire waterkeringen van de categorie c*, z.p., z.d.

[V&W, 2007]

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, *Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (VTV 2006)*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Delft, september 2007, ISBN 978-90-369-5762-5.

[Waternet, 2010A]

'Invloed baggerwerkzaamheden de Vecht op dijkveiligheid', R.H.R. Bolt, K.M. Heijn, Waternet 2010, kenmerk 10.037362

[Waternet, 2010B]

'Risico's voor bodeminstabiliteit bij baggeren Vecht', J. Beemster en T. Olsthoorn, (Waternet) 2010

[Weijers et al., 2009]

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

[Zeghal et al., 2010]

Zeghal, M., Abdoun, T., Yazici, B., Lv, X., Bennett, V., Mercado, V. & Marr, A., Health Assessment of Levees Using Remote Sensing and Field Monitoring, beschikbaar via https://blume.stanford.edu/sites/default/files/RS_Zeghal-Workshop_on_Remote_Sensing_0_0.pdf, laatst bezocht op 16 januari 2014.

[Zwanenburg et al., 2012]

Zwanenburg, C., Haan, E.J. den, Kruse, G.A.M. & Koelewijn, A.R. 2012. Failure of a trial embankment on peat in Booneschans, the Netherlands. *Géotechnique* 62 (6), 479-490.

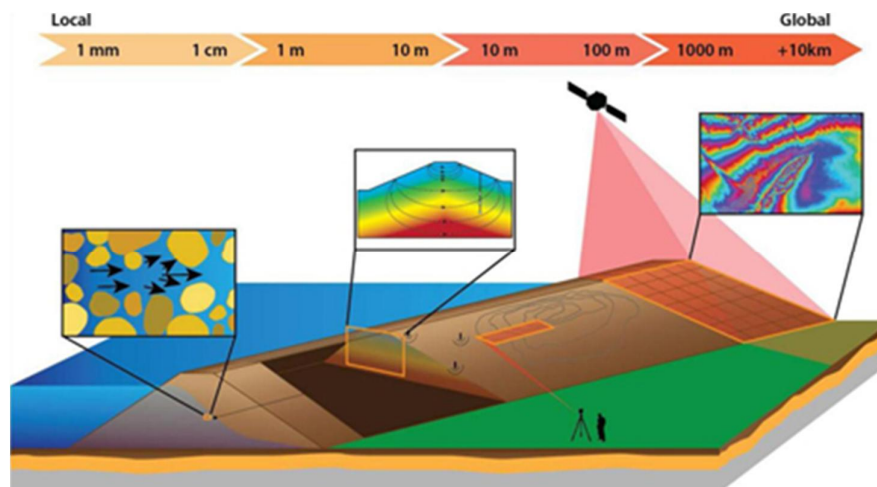
Alle foto's zonder bronvermelding zijn foto's genomen door Deltares medewerkers.

A Meettechnieken

A.1 Inleiding

Deze bijlage geeft een overzicht van op dit moment gangbare monitoringstechnieken, waarbij een aantal voorbeelden van technieken worden uitgelicht. Met het uitlichten van een aantal van deze technieken wordt door de auteurs geen voorkeur voor deze technieken uitgesproken. De gekozen technieken zijn gebaseerd op het voorkomen van deze technieken in de besproken proeftuinen en op basis van het frequent voorkomen van deze technieken bij het dijkmonitoren. In het eindrapport van de IJkdijk All-in-one Sensor ValidatieTest [de Vries, 2013] wordt een overzicht én waardering gegeven van de verschillende meettechnieken die in die proeven zijn toegepast, op grond van het functioneren tijdens die proeven. Op basis van de monitoringstrategie en de kosten kan een juiste keuze worden gemaakt voor de juiste meettechniek met de bijbehorende eisen.

De laatste 100 jaar zijn de monitoringsinstrumenten veranderd van eenvoudige mechanische apparatuur en elektromechanische apparaten naar de geavanceerde elektronische systemen die nu worden gehanteerd. Het meten aan waterkering vindt op verschillende schaalniveaus plaats. In onderstaande figuur is een overzicht gegeven van de verschillende schaalniveaus van sensormetingen.



Figuur A.1 Monitoring van waterkeringen op verschillende schaalniveaus [Mooney, 2011]

Schematische weergave

Binnen de technische monitoringssystemen kan een onderscheid worden gemaakt tussen twee typen monitoringssystemen: lokale/in-situ (in de dijk) en remote sensing/ ex situ (op afstand van de dijk). In-situ zijn instrumenten die in de grond worden aangebracht en doorgaans op één punt of langs een lijn meten. Onder remote sensing (ex-situ) wordt verwezen naar methoden waar vanaf afstand gemeten wordt (aan land verbonden, vanuit de lucht of vanuit de ruimte), bijvoorbeeld om vervormingen vast te stellen, die als indicatie kunnen dienen voor het gedrag van de dijk. Sensoren aan het oppervlak van de dijk worden soms geschaard onder in-situ en soms onder remote sensing. Metingen op de dijk zelf zoals bijvoorbeeld vervorming en scheuringen aan het oppervlak zijn in-situ, maar geofysische metingen vanaf het oppervlak waarmee dieper in de dijk gemeten wordt, worden doorgaans

tot remote sensing gerekend, omdat daarmee dan immers verschijnselen worden gemeten op enige afstand van het instrument.

A.2 Indeling van de verschillende soorten meettechnieken

In de volgende tabel zijn 23 van de meest gangbare technieken opgenomen. Deze worden in dezelfde volgorde in de paragrafen hierna nader toegelicht. Per techniek is kort aangegeven welke parameters er doorgaans mee worden gemeten, voor welke dijkfaalmechanismen deze vooral toepasbaar zijn, of het om een in-situ techniek gaat of om remote sensing, wat de typische meetfrequentie bij bekende toepassingen is, en tot slot de voornaamste toepassingen in de dijkbeheercyclus (zoals benoemd in §1.2).

Techniek	Parameter(s)	Relevante faalmechanismen	Type	Typische frequentie	Toepassingen in dijkbeheercyclus
Zakbaak	Verticale deformatie	Macrostabiliteit, microstabiliteit	In-situ	Dagelijks	Verbetering, buitengewoon onderhoud
Zettingsmeet-slang	Verticale deformatie	Macrostabiliteit, microstabiliteit	In-situ	Elke seconde tot dagelijks	Verbetering, calamiteitenbestrijding
Total station	Deformatie	Macrostabiliteit, microstabiliteit, heave	Remote sensing	Meerdere punten, één per 10 sec.	Verbetering
Laseraltimetrie	Deformatie	Macrostabiliteit, microstabiliteit, heave	Remote sensing	Vele punten, jaarlijks	Verbetering, buitengewoon onderhoud, toetsing, inspectie
Scheurmeter	Deformatie	Macrostabiliteit, microstabiliteit, heave, bekleding	In-situ	Elke minuut tot jaarlijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding
Convergentie-opnemer	Deformatie	Macrostabiliteit, microstabiliteit, heave, bekleding	In-situ	Elke minuut tot jaarlijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding
GPS	Deformatie	Macrostabiliteit, microstabiliteit, heave, bekleding, hoogte	In-situ	Elke minuut tot jaarlijks	Verbetering, buitengewoon onderhoud, inspectie, calamiteitenbestrijding
Inverted Pendulum	Horizontale deformatie	Macrostabiliteit	In-situ	Eens per minuut	Verbetering, buitengewoon onderhoud
Extensometer	Verticale deformatie	Macrostabiliteit, hoogte	In-situ	Eens per minuut	Verbetering, buitengewoon onderhoud
Hellingmeetbuis	(horizontale) deformatie	Macrostabiliteit, microstabiliteit	In-situ	Eens per 10 seconden	Verbetering, toetsing
Hellingmeter	Lokale hoek-verdraaiing	Macrostabiliteit, microstabiliteit	In-situ	Elke seconde	Verbetering, buitengewoon onderhoud
Glasvezel	Temperatuur, rek, druk	Piping, heave, macrostabiliteit, microstabiliteit, instabiliteit bij overslag	In-situ	Eens per 10 seconden	Verbetering, toetsing, inspectie, buitengewoon onderhoud
Dichtheidsmeter	Erosie	Piping, microstabiliteit, overloop en overslag	In-situ	Eens per 10 seconden	Calamiteitenbestrijding

Digitale camera Voor Stereoscopie	Vervorming, bijzonderheden	Macrostabiliteit, microstabiliteit, heave, algemeen	Remote sensing	Elke seconde tot dagelijks	Verbetering, toetsing, inspectie, buiten- gewoon onderhoud, calamiteitenbestrijding
Multispectrale fotografie	Gewaskwaliteit	Overloop en overslag	Remote sensing	Dagelijks tot maandelijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding
Infrarood camera	Temperatuur	Piping	Remote sensing	Elke seconde tot dagelijks	Inspectie, calamiteitenbestrijding
Vochtmetr	Vochtgehalte	Overloop en overslag	In-situ	Eens per 10 seconden	Toetsing, calamiteitenbestrijding
Self potential	Elektrische potentiaal	Piping, microinstabiliteit	In situ	Eens per 10 minuten	Toetsing
Water- spanningsmetr	Totale druk of waterspanning, soms ook temperatuur	Piping, heave, ma- crostabiliteit, micro- stabiliteit, instabili- teit bij overslag	In-situ	Elke seconde tot dagelijks	Verbetering, toetsing, inspectie, buiten- gewoon onderhoud
Drukopnemer	Gronddruk	Macrostabiliteit	In-situ	Elke seconde	Verbetering
Seismiek	Trillingen, grondwater	Piping, macrostabiliteit verweking	In situ	Hoogfrequent	Verbetering, toetsing
Akoestische emissie	Geluid	Macrostabiliteit, microstabiliteit	in situ	Hoogfrequent	Calamiteitenbestrijding
Satellite?Radar	Deformatie, vochtgehalte, gewaskwaliteit	Piping, heave, ma- crostabiliteit, micro- stabiliteit, overloop en overslag, insta- bilititeit bij overslag	Remote sensing	Wekelijks tot maandelijks	Verbetering, toetsing, inspectie, buiten- gewoon onderhoud

Tabel A.1 Overzicht verschillende meettechnieken

A.3 Zakbaak

Een zakbaak is een meetpaal die als hulpconstructie gebruikt wordt om veranderingen in hoogte van dieper gelegen bodemlagen te bepalen. De gangbare uitvoering is een mechanische zakbaak, zie figuur A.2. Deze bestaat uit een vierkante of ronde stalen plaat van een halve tot twee meter doorsnede. Hierop wordt zuiver verticaal een metalen pijp gemonteerd. De onderplaat wordt horizontaal geplaatst onder een toekomstige aanvulling (die op de foto al is aangebracht). Deze aanvulling zorgt ervoor dat er zetting plaatsvindt in de ondergrond. De onderkant van de zakbaak zakt mee, waarmee de zetting meetbaar is aan de bovenzijde van de zakbaak.

Naarmate de ophoging verder vordert kan de buis verder worden verlengd. Het systeem is in de praktijk vrij gevoelig voor beschadiging door materieel gebruikt bij het aanbrengen van de ophoging. De uitlezing vindt meestal handmatig plaats.



Figuur A.2 Mechanische zakbaak [bron: www.zakbaken.com]

Een alternatief voor de hierboven beschreven mechanische zakbaak is de elektronische zakbaak. Deze zakbaak is in de ondergrond geplaatst, zonder de uitstekende meetpaal. De metingen kunnen continue worden uitgelezen. Waar mechanische zakbaken aan het eind van het project worden verwijderd, kunnen elektronische zakbaken blijven zitten om de monitoring ook na het voltooien te kunnen voortzetten. Ook is de monitoring nauwkeuriger door het ontbreken van handmatig inmeten.



Figuur A.3 Elektronische zakbaak [bron: www.bannelisderuiter.com]

Deze meetmethode kan worden toegepast bij zetting, opbarsten, bewegen van de ondergrond door belasting, krimp en uitzetting.

A.4 Zettingsmeetslang

Een zettingsmeetslang is een holle flexibele buis die in de ondergrond kan worden aangebracht voordat de ophoging plaatsvindt. Na ophoging zal de buis meebewegen met de zakking in de ondergrond. Wanneer de buis gevuld is met vloeistof kan een druksensor door de buis heen worden gehaald. Met de resultaten van de hydrostatische druk in de buis kan een hoogteprofiel van de zettingsslang worden gemaakt. Met periodieke herhaling kan de zakking in de tijd worden weergegeven.



Figuur A.4 Zettingsslangen direct op de wapeningsmat [rapport Deltares: "Monitoring paalmatras Woerden A12/N204"]

De techniek kan ook worden toegepast om vervormingen te meten die niet direct met een ophoging samenhangen. Doordat de slang snel is aan te brengen zonder insteltijd kan hiermee efficiënt de vervorming langs een lijn (of kromme) worden bepaald, bijvoorbeeld om te zien of een beginnende afschuiving tot rust is gekomen.

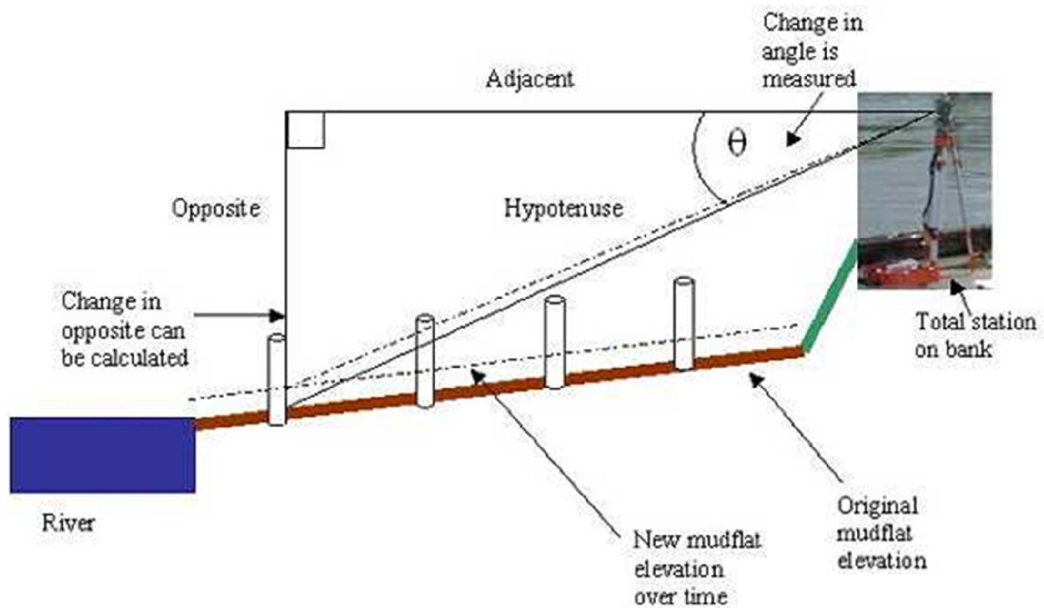
A.5 Total station

Een total station, ook wel tachymeter genoemd, bestaat uit een theodoliet (een hoekmeetinstrument uit de landmeetkunde) in combinatie met een afstandsmeter. Dit apparaat meet de horizontale richting, verticale hoek en de (schuine) afstand. Vanuit de schuine afstand kan de horizontale afstand worden berekend. De horizontale afstand in combinatie met de horizontale richting leveren een poolcoördinaat dat kan worden omgezet in een x/y coördinaat. Ook is het mogelijk om de hoogte te bepalen met een total station, door middel van een trigonometrische berekening. Met deze drie coördinaten (x, y en z) kan een 3D afbeelding worden gegenereerd van de ingemeten coördinaten.



Figuur A.5

Voorbeeld van een total station [bron: <http://www.surveyequipment.com>]



Figuur A.6

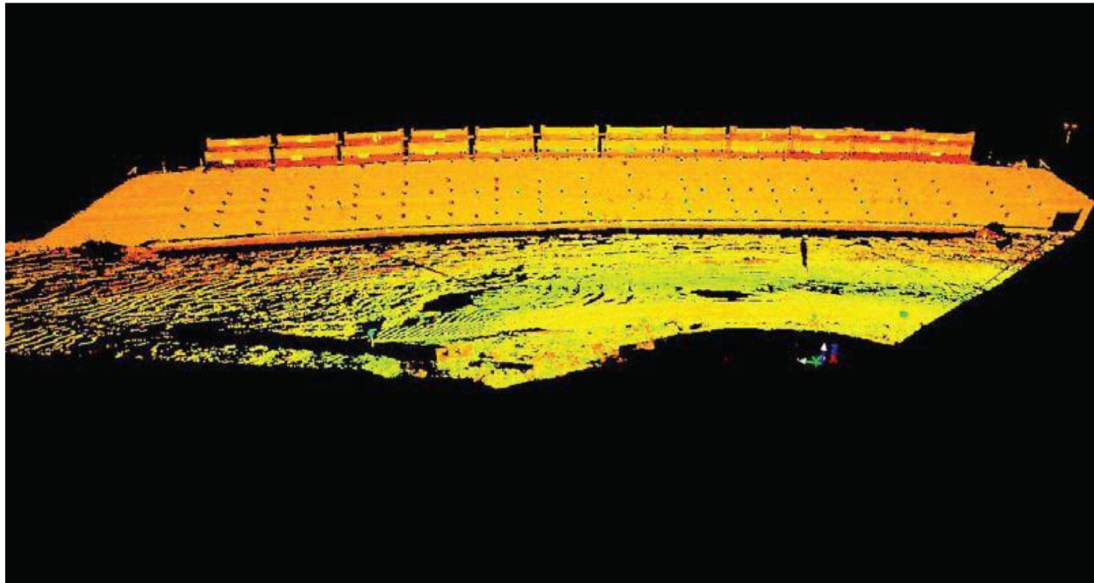
Werking van de total station [bron: <http://www.sussex.ac.uk/geography/>]

De meettechniek wordt meestal ingezet om deformaties in het horizontale en verticale vlak te bepalen. Het tijdig signaleren van deformaties kan schade voorkomen. Vooraf wordt het meetobject voorzien van een aantal meetpunten, die tijdens het proces worden gemonitord.

Er bestaat ook een automatisch total station, ook wel Robotic Total Station Monitoring System genoemd. Dergelijke total stations kunnen stand alone meten, met een continue monitoring. De maximaal toegestane deformaties kunnen hierbij opgegeven worden. Zo kan een melding worden gemaakt wanneer de maximaal toegestane deformaties optreden.

A.6 Laseraltimetrie

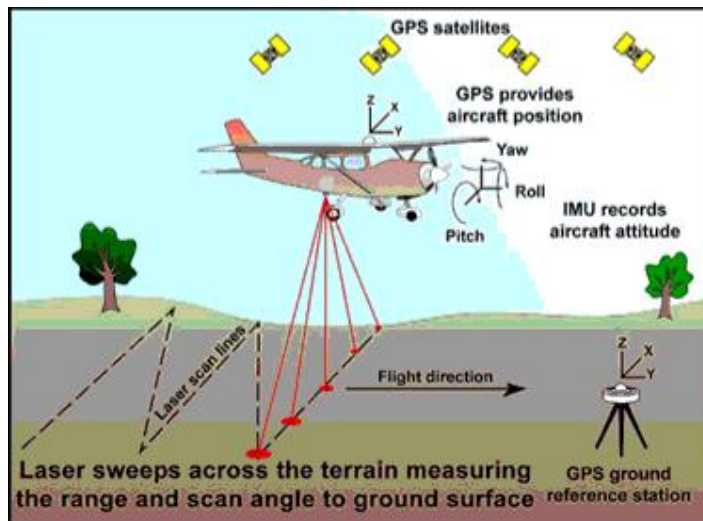
Aan de vorige methode verwant is laseraltimetrie. Daarbij worden lasermetingen gebruikt om vervormingen in een waterkering op afstand te kunnen meten. Het is een van de meest gebruikte remote sensing-technieken voor het inspecteren van waterkeringen. Hierbij worden laserpulsen uitgezonden door een scanner die vervolgens van de teruggekaatste lasers een samengesteld beeld vormt van de meetpunten. De teruggekaatste lasers bieden namelijk informatie over de afstand in x, y en z richting. Wanneer deze geometrie door de tijd wordt vergeleken, worden vervormingen zichtbaar. De doorlooptijd van een scan is laag, waardoor acuut kan worden opgetreden in het geval van optredende vervormingen.



Figuur A.7 Laserscan van de IJkdijk [STOWA, 2010b]

De intensiteit van de teruggekaatste laserstraal kan aanvullende informatie leveren over het type grond.

Vaak wordt deze methode aangeboden onder de term LiDAR. Dit staat voor “Light Detection And Ranging”. Deze techniek maakt meestal gebruik van een vliegend platform, dus een vliegtuig of helikopter. Deze methode kan toegepast worden om deformaties te monitoren. Afstanden worden gemeten met behulp van een laser en met behulp van GPS informatie kunnen deze afstanden worden omgezet in een gedetailleerde kaart. Door middel van de reflecties (backscatter) kan er ook bekeken worden welke grondsoorten er aan het oppervlak liggen. De verplaatsingen kunnen met een nauwkeurigheid van circa 1 centimeter worden gemonitord.



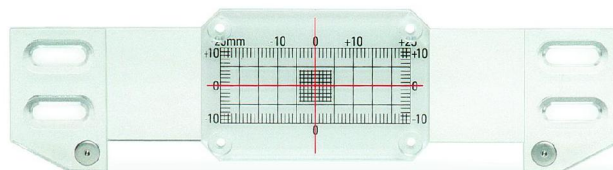
Figuur A.8 Principe werking van LiDAR (bron:www.beg.utexas.edu)

A.7 Scheurmeter

Een scheurmeter meet het verschil in breedte in een reeds ontstane scheur. Op die manier kan de groei of krimp worden gemeten. Dit kan op twee manieren. De eerste manier gebruikt een tweetal ankers met daartussen een elektronische verplaatsingsopnemer. De ankers worden aan weerszijden van de scheur geplaatst en de verplaatsingsopnemer wordt bevestigd op de verbinding tussen de twee ankers en kan zo de verplaatsingen monitoren, zowel in situ als remote. De tweede manier gebruikt twee plastic plaatjes, met daarop een grid. Door middel van overlapping kan handmatig worden afgelezen of de scheur groeit, krimpt of hetzelfde blijft. Ook bij deze methode worden twee ankers geplaatst met daartussen het overlappende grid.



Figuur A.9 Elektronische scheurmeter (bron:)



Figuur A.10 Handmatige scheurmeter, voorzien van overlappend meetgrid [bron: www.shop.coudere.be]

A.8 Convergentie-opnemer

Deze 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 het kunstwerk kan dan de relatieve verplaatsing worden gemonitord.

A.9 GPS

Met GPS-ontvangers is het ook mogelijk om plaatsveranderingen aan het oppervlak te meten met een nauwkeurigheid van 1 à 2 mm. Dit wordt al enige jaren toegepast in aardbevingsgebieden in het westen van de Verenigde Staten en sinds 2010 in een proefproject in New Orleans [Zeghal et al., 2010]. Bij dat laatste project zijn de kosten per meetunit teruggebracht van ongeveer US\$ 12.000 naar ongeveer US\$ 1500.

A.10 Inverted Pendulum

De omgekeerde slinger/pendule wordt gebruikt om zijwaartse beweging te monitoren. Hierbij wordt een stalen draad aan een vast punt bevestigd waarbij het andere uiteinde aan de bovenkant vrij kan bewegen. Door middel van een boei in een bak met vloeistof blijft de draad op spanning en verticaal. Deze methode wordt toegepast om de zijwaartse interne bewegingen van waterkeringen te meten. De monitoring kan ook op afstand worden uitgevoerd met gebruik van een telependule.

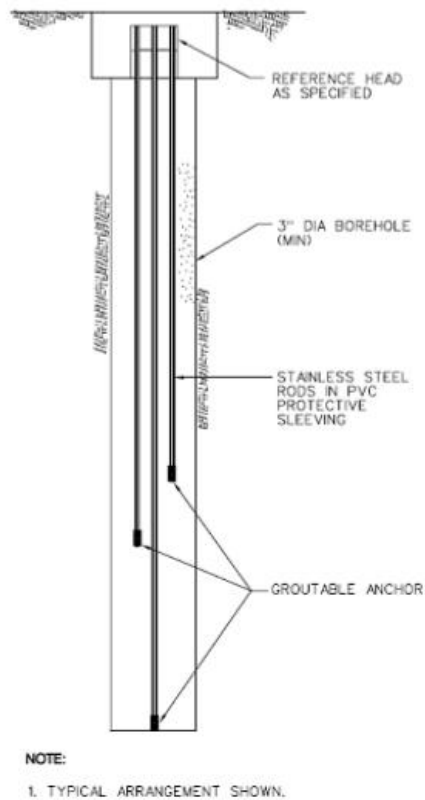


Figuur A.11 Een inverted pendulum bij de IJkdijk [STOWA, 2006]

A.11 Extensometer

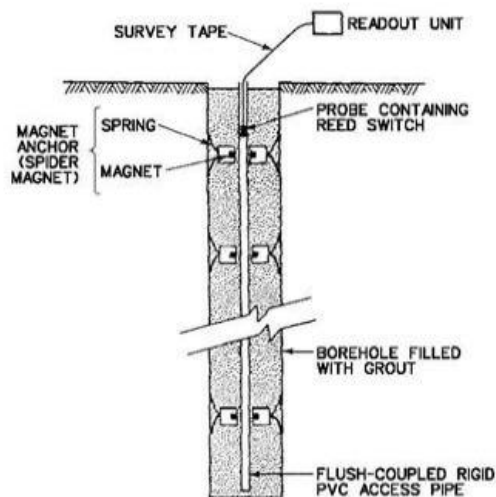
Om de verticale verplaatsing te meten kan gebruik gemaakt worden van een extensometer. Deze meet op verschillende dieptes het verschil in verticale verplaatsing. Dit kan op twee manieren, namelijk met een staaf-extensometer of een sonde-extensometer.

De staaf-extensometer gebruikt een aantal roestvrij stalen stangen in een boorgat gevuld met een groutmengsel. De staven zijn van verschillende lengtes en geplaatst in een plastic buis gevuld met vet, zodat de wrijving tussen staaf en omhulsel geminimaliseerd zijn. De staven bewegen in verticale richting als er zetting of zwel plaatsvindt.



Figuur A.12 Typisch voorbeeld van een staaf-extensometer [bron:www.fhwa.dot.gov]

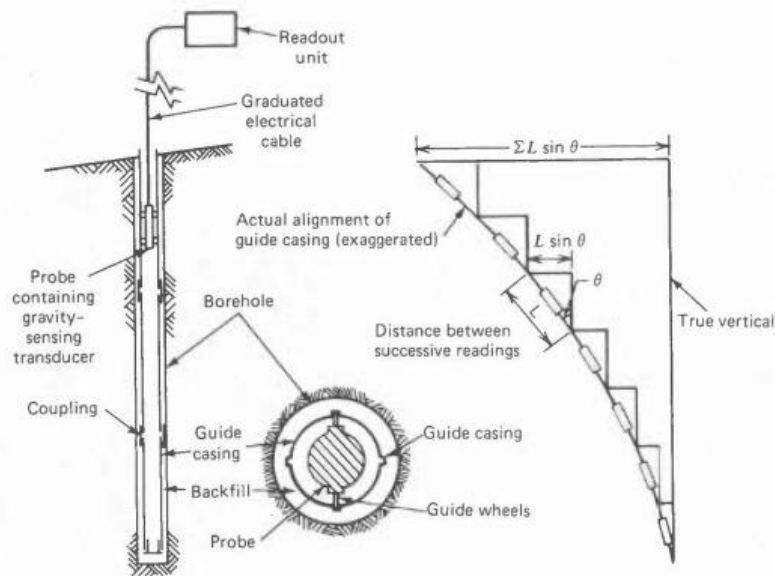
De sonde-extensometer maakt gebruik van magneten in een buis, die onafhankelijk van elkaar op verschillende niveaus kunnen bewegen. Door met een sonde langs de magneten te bewegen wordt de positie van de magneten opgeslagen. Deze posities zeggen vervolgens iets over de onderlinge verticale verplaatsingen van de lagen tussen de magneten in. Zo kan zetting of zwel gemonitord worden.



Figuur A.13 Standaard voorbeeld van een sonde-extensometer [bron:www.fhwa.dot.gov]

A.12 Hellingmeetbuis

Een hellingmeetbuis is een monitoringsapparaat om vervorming in de horizontale richting te meten. Hiertoe wordt een verticale pijp in de ondergrond aangebracht tot in een onvervormbare laag, in Nederland meestal een Pleistocene zandlaag. Door middel van een sonde wordt de toename van de hoekverdraaiing bepaald per lengte-eenheid en zodoende de verplaatsing per lengte-eenheid. Door meerdere metingen in de tijd uitvoeren kan de totale verplaatsing worden bepaald. De Engelse term voor dit instrument is inclinometer, een term die vaak ook in het Nederlands wordt gebruikt.

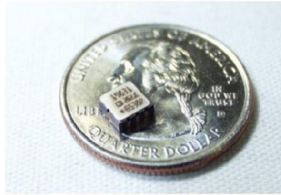


Figuur A.14 Principe hellingmeetbuis [Dunncliff, 1993]

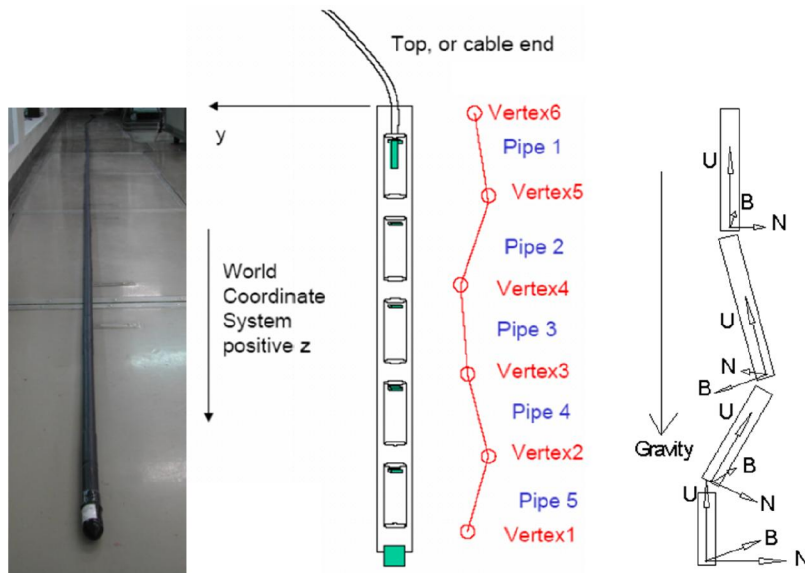
De casing van een inclinometer kan worden geplaatst in een boorgat met grout of weggedrukt worden door een sondeermachine. Wanneer de casing wordt geplaatst in een boorgat, zal de grout zo samengesteld zijn dat het de samenstelling van de grond eromheen nabootst. Dit is niet nodig bij wegdrukken. De punt van de inclinometer wordt dusdanig diep geïnstalleerd dat deze niet wordt beïnvloed door het verplaatsen van de grond.

Grondverplaatsing zorgt voor de verplaatsing van de inclinometer. Deze meet de snelheid, diepte en grootte van deze verplaatsing door de huidige data te vergelijken met de startwaarden uit het begin toen de inclinometer werd geplaatst.

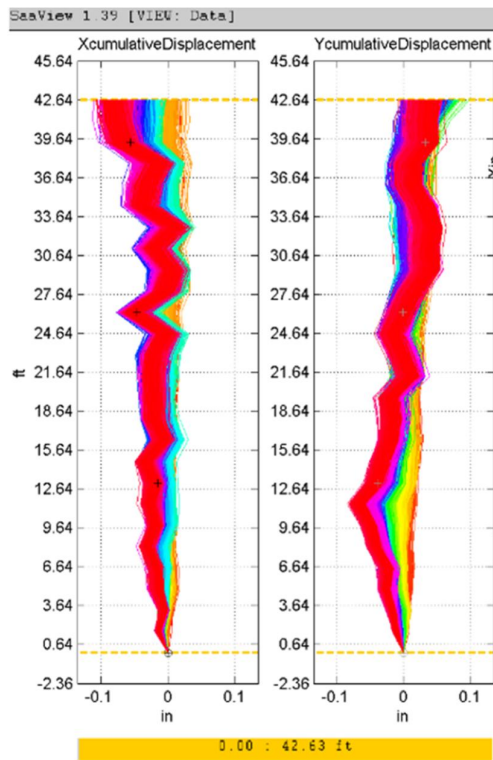
Hellingmeetbuis met micro-elektronica: SAA-Inclinometers worden gebruikt om de helling in twee onderling loodrechte richtingen te kunnen meten. Dit wordt voornamelijk toegepast in de monitoring van laterale groundbeweging. Vooraf wordt een buis met daarin een inclinometer in de grond geplaatst. Wanneer de grond eromheen beweegt zal de inclinometer uitslaan en verplaatsing detecteren. Deze kunnen worden toegepast bij grondverschuivingen, instabiele hellingen, dammen, oevers, ophogingen en het meten van afwijkingen in kunstwerken. Trillingen en bewegingen kunnen op deze manier real-time (in situ) of near-real time (over internet) worden gevolgd.



Figuur A.15 Grootte van de opnemer ten opzichte van een munt van een kwart dollar



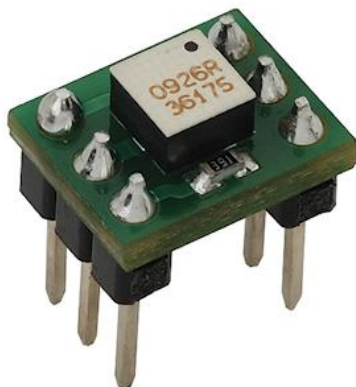
Figuur A.16 Hellingmeetbuis met micro-elektronica



Figuur A.17 Resultaten van de metingen bij een pilot in New Orleans. [NB: niet diep genoeg geplaatst!]

A.13 Hellingmeter

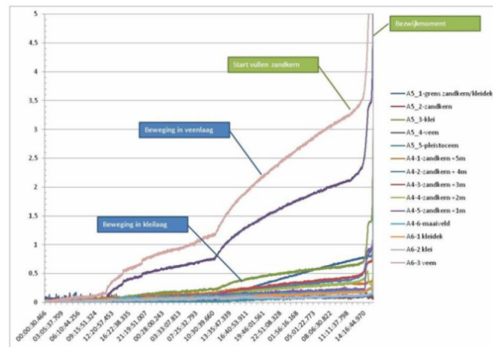
Een hellingmeter wordt gebruikt om lokaal in twee axiale vlakken de helling te meten. De vlakken staan hierbij loodrecht op het oppervlak van de grondplaat van het meetinstrument. Deze meettechniek kan worden toegepast bij zetting van de grond en ook bij het monitoren van de vervorming in waterkeringen tijdens uitvoeren van werkzaamheden.



Figuur A.18 Voorbeeld van een tiltsensor die in twee richtingen de hellingen meet [bron: www.parallax.com]

Soms worden dergelijke instrumenten aangeboden als “inclinometers”, maar wanneer er een reeks hellingmeters op korte afstand van elkaar met een flexibele kabel worden gekoppeld, dan vormt dit nog geen hellingmeetbuis (zie vorige paragraaf). Dit kan alleen bij rigide

koppelingen. Overigens kunnen de metingen nog steeds bruikbaar zijn als indicatie van beweging, zie bijvoorbeeld de volgende figuur afkomstig van het IJkdijk-experiment uit 2008.

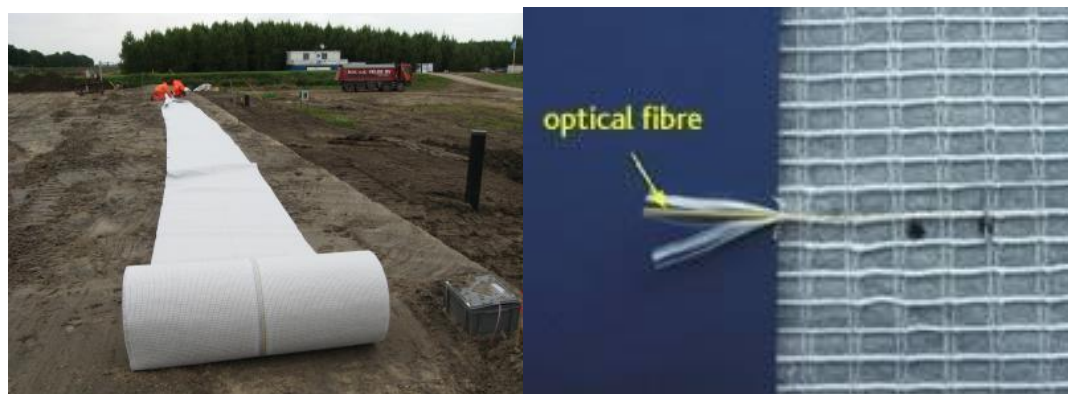


Figuur A.19 Resultaten inclinometers in IJkdijk

A.14 Glasvezel

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. De glasvezelkabel wordt in een lus aangelegd in de waterkering. Door te kijken naar verandering in de frequentie van de lichtbundel die erdoor heen wordt gestuurd, kan er berekend worden door een computer waar de vervorming plaatsvindt en hoe groot deze is. In Bijlage B is een uitgebreidere beschrijving weergegeven van de werking van de glasvezeltechniek – dit omdat een dergelijke actuele overzichtstekst in de literatuur ontbrak.

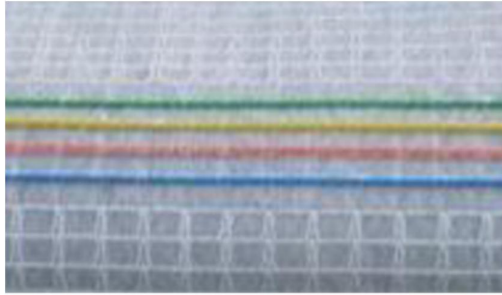
Wanneer de relatieve verplaatsing sterk afwijkt, worden maatregelen in werking gesteld om de waterkering beter te monitoren. Om de glasvezelkabel beter te kunnen laten functioneren, kan hij ook in een geotextielmat worden geplaatst, zodat de kabel niet door de slappe grond kan snijden. Hierbij kunnen de vervormingen nauwkeuriger gemeten worden en levert de mat tevens een extra versteviging aan de waterkering. Een nadeel is wel dat alleen een betrekkelijk dunne coating kan worden ingewoven, waardoor er altijd een betrekkelijk kwetsbare kabel moet worden toegepast.



Figuur A.20 Gebruik van een glasvezelmat door Ten Cate bij de IJkdijk met daarnaast een detail van de mat
[bron: <http://www.tencate.com/>]

In Figuur A.21 is bijvoorbeeld de geotextielmat met glasvezelkabels van TenCate weergegeven. Deze sensoren die bestaan uit een strook van 2x2 optische kabels, 2x1 voor temperatuurmeting (licht- en donkerblauw) en 2x1 voor spanningsmeting (geel en oranje).

Een optische kabel voor de spanning en een optische kabel voor temperatuurmeting worden gebruikt voor dit project. De twee andere kabels zijn als reserve (redundancy).



Figuur A.21 Optisch glasvezel-systeem in geotextiel

Voor waterkeringen wordt soms gebruik gemaakt van een glasvezelkabel om vervormingen te meten, maar de glasvezel kan ook worden gebruikt als temperatuurmeter. Door temperatuurverschillen te meten kan er worden gemonitord waar water door de waterkering stroomt. Hiermee kan kwel, en ook overmatige kwel leidend tot erosie (piping) worden aangetoond.

A.15 Dichtheidsmeter

Een dichtheidsmeter kan worden gebruikt om te bepalen hoeveel deeltjes er in water rondzweven. Dit zegt iets over erosie. Door een lichtstraal op het te onderzoeken water te richten, kan met behulp van twee andere sensoren gemeten worden hoeveel licht er wordt gereflecteerd en hoeveel licht er aan de andere kant van het water doorschijnt. Dit kan gecorreleerd worden aan de hoeveelheid vaste deeltjes in het water. Indien na het nemen van verschillende monsters in de tijd een toename van vaste deeltjes optreedt, kan dit duiden op piping onder de waterkering.

A.16 Digitale camera

Met een digitale camera kunnen van een vast punt op gezette tijden of continu opnamen worden gemaakt waarmee veranderingen of bijzonderheden kunnen worden vastgelegd. Voor het vastleggen van bijzonderheden kan een camera ook gemakkelijk worden ingezet bij visuele inspecties.

De digitale camera kan als een tweetal worden ingezet, om met behulp van markers op de waterkering de verplaatsingen te kunnen monitoren. Deze opstelling levert een stereobeeld op. Deze methode wordt vaak gebruikt als de te verwachten verplaatsingen groot zijn. De locaties van de markers in x,y,z-formaat leveren een driedimensionaal beeld op van de verplaatsing als de registraties van de camera in de tijd verwerkt zijn.

A.17 Multispectrale fotografie

Multispectrale fotografie is een meetmethode voor het opsporen van vegetatiestress, nog voordat met het blote oog effecten van stress zichtbaar zijn. Bij de meting wordt het door de vegetatie weerkaatste zonlicht in 4 kleuren (blauw, groen, rood en nabij-infrarood (onzichtbaar voor het menselijk oog)) separaat digitaal gefotografeerd. De reflectie in het nabij-infrarode domein is een gevoelige maat voor de vitaliteit van de vegetatie. Vitale vegetatie reflecteert veel nabij-infrarood licht, gestreste vegetatie weinig. Metingen kunnen bijvoorbeeld uitgevoerd worden met een onbemand vliegtuig (zie figuur A.22) of van een vast punt.



Figuur A.22 GeoHawk in actie (links) met controle-laptop en bediening) [bron: <http://www.vb-ecoflight.nl>]

A.18 Infrarood camera

Infrarode straling is elektromagnetische straling die voor het oog niet zichtbaar is, met golflengten tussen de 780 nanometer en 1 millimeter. Binnen de remote sensing techniek wordt meestal gebruik gemaakt van het spectrum van 8 tot 13 micrometer. Een meetmethode om deze straling zichtbaar te maken is thermografie, waarbij gebruik wordt gemaakt van een camera met optiek voor infrarood straling en een detector voor golflengte. De camera levert dan een visuele weergave van de heersende temperaturen. Hierin zijn de helderste tonen de warmste objecten en de donkerste tonen de minst warme. Door gebruik te maken van een kunstmatig kleurschema, kunnen de warmteverschillen inzichtelijk gemaakt worden. In een waterkering kunnen op deze manier kwelstromen of fauna worden gedetecteerd.



Figuur A.23 Infrarood camera van Intech Dike Security systems, gebruikt bij de IJkdijk [STOWA, 2010b]

A.19 Vochtmeter

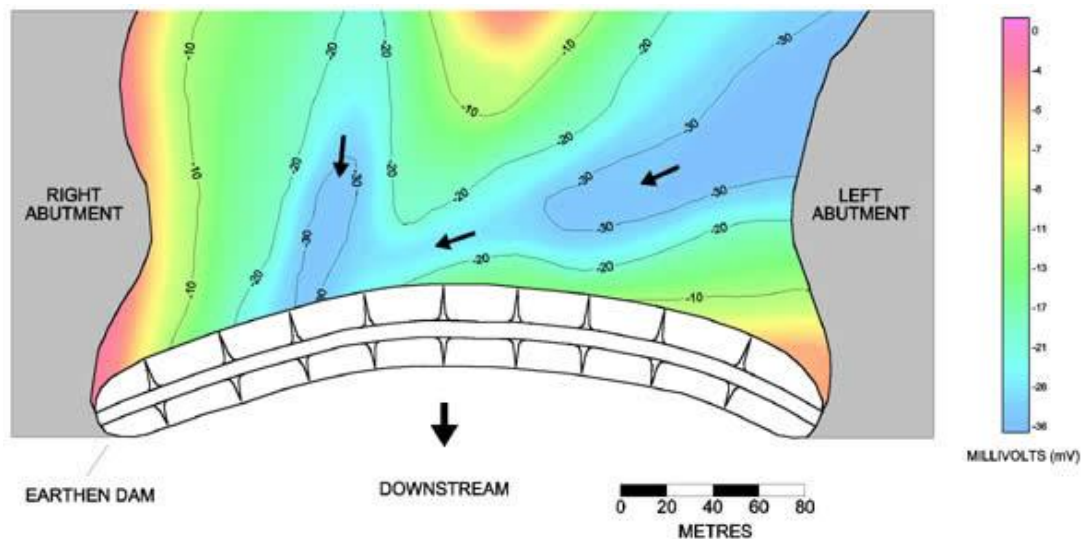
Bodemvocht heeft invloed op de afschuifsterkte van de ondergrond. Een methode om het vochtgehalte van de ondergrond te meten is met behulp van een vochtmeter. Deze meet het vochtgehalte van de grond. De vochtmeter kan worden aangesloten op een datalogger om zo de bodemeigenschappen continu te kunnen monitoren.



Figuur A.24 Vochtmetr [bron: www.koenders-instruments.com]

A.20 Self potential

Traditioneel zijn self potential, of eigenpotentiaal in het Nederlands, onderzoeken gebruikt voor de exploratie van mineralen. Deze onderzoeken waren het meest succesvol waar een sterke oxidatie-reductiepotentieel aanwezig was. Naast deze geleidende minerale afzettingen zelf, kunnen de mogelijke afwijkingen ook worden toegeschreven aan de stroming van fluïdum ondergrond of warmte.



Figuur A.25 Voorbeeld van een resultaat van selfpotential metingen [bron : http://www.frontiergeo.com/self_potential.html]

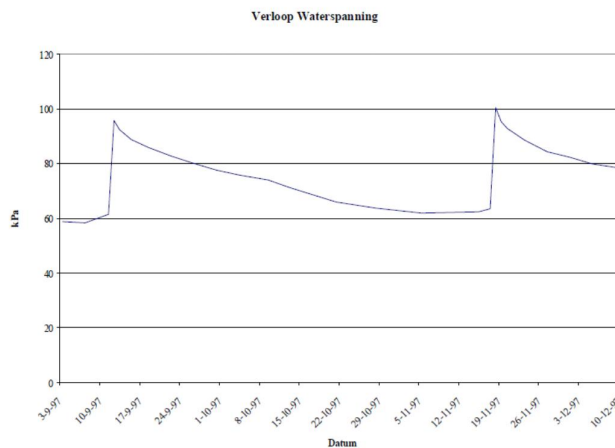
Metingen van eigenpotentiaal kunnen metingen aan het oppervlak zijn, net onder het oppervlak of in het water. De positie van de elektroden is hierbij van belang. Deze dienen hierbij goed ingegraven te worden en beschermd tegen z.c.q. warmte.

De eigenpotentialen zijn erg klein; in de praktijk wordt niet alleen deze potentiaal gemeten, maar ook andere potentialen zoals redox en diffusie potentialen. Dit maakt het juist meten van de waarde lastig. Wanneer de opnemers in de ondergrond worden geplaatst kunnen de voorkeursstroming worden bekeken in het grondlichaam. Met behulp van deze methode kunnen aan de oppervlakte waterstromingen in kaart worden gebracht.

A.21 Waterspanningsmeters

Eén van de meest voorkomende meettechnieken aan waterkeringen is het gebruik van waterspanningsmeters of piëzometers. De term piëzometer wordt gebruikt om een sensor aan te duiden die afgedicht geplaatst is in de ondergrond, zodanig dat deze alleen reageert op het omringende grondwater en niet op het grondwatervniveau op andere diepten.

Deze input van deze sensors is van essentieel belang voor stabiliteitsmetingen en stabiliteitsmonitoring. Ook voor het monitoren van de effecten van grondverbetering zoals verticale of zanddrains kan de VW-Piëzometer gebruikt worden.



Figuur A.26 Weergave van waterspanning tegen tijd. Zichtbaar zijn twee ophoogslagen van zand

In figuur A.26 wordt de waterspanning gepresenteerd tegen de tijd. In dit voorbeeld zijn twee slagen van een zandophoging zichtbaar.

Een voorbeeld van een piëzometer is het vibrating wire type. De optredende grondwaterdruk wordt gemeten met behulp van een 'trillende snaar' (vibrating wire) drukelement dat is ingebouwd in een conus.

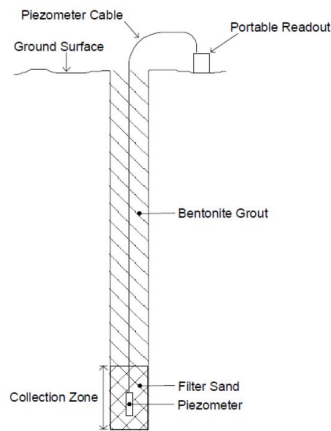


Figuur A.27 Voorbeeld van een vibrating wire waterspanningsmeter

Via twee filters in de conus wordt het poriënwater in contact gebracht met het membraan van het drukelement. Aan de binnenzijde van het drukelement zit een snaar gespannen tussen het membraan en de vaste zijde van het drukelement. De verplaatsing van het membraan door verschillen in de waterspanning zorgt voor een meetbaar spanningsverschil in de snaar. De opnemer kan met standaard wegdrukmaterieel op de gewenste diepte worden geplaatst.

Om voor de invloed van temperatuurvariaties te compenseren, is de waterspanningsmeter voorzien van een temperatuursensor. De waterspanningsmeter meet absolute waterdrukken, zodat deze meter gevoelig is voor luchtdrukvariaties. Om deze reden dient gelijktijdig met de uitlezing van de waterspanningsmeter de heersende luchtdruk te worden bepaald.

Bij plaatsing van de waterspanningsmeter is het vaak wenselijk ook de verplaatsing van het instrument te controleren. Via een 4-aderige elektrische kabel kan het signaal direct worden uitgelezen met een standaard uitleesunit. Ook is het mogelijk om onder andere via een GSM-modem vanuit kantoor de data binnen te halen.



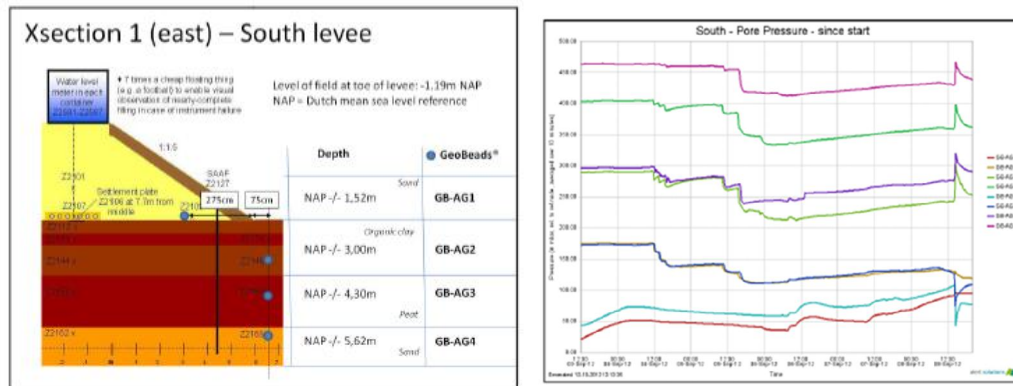
Figuur A.28 Waterspanningsmeter in een boorgat gevuld met grout

Een ander voorbeeld van waterspanningsmeter is die van het type GeoBeads. Deze waterspanningsmeters zijn toegepast in bijvoorbeeld het IJkdijkexperiment en inmiddels op veel meer locaties.

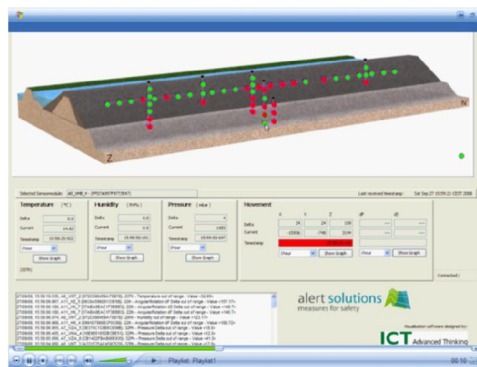
GeoBeads multi-sensor modules meten gelijktijdig de waterdruk, de temperatuur van de directe omgeving en de helling (zijnde de hoek van de sensormodule ten opzichte van het verticale zwaartekrachtveld, zie §A.13).



Figuur A.29 Waterspanningsmeter van het type GeoBeads (Alert Solution)



Figuur A.30 De locatie van de waterspanningsmeters in de waterkering met rechts de resultaten van de metingen



Figuur A.31 locatie GeoBeads-multisensoren in het IJkdijk-experiment in 2008.

A.22 Drukopnemer

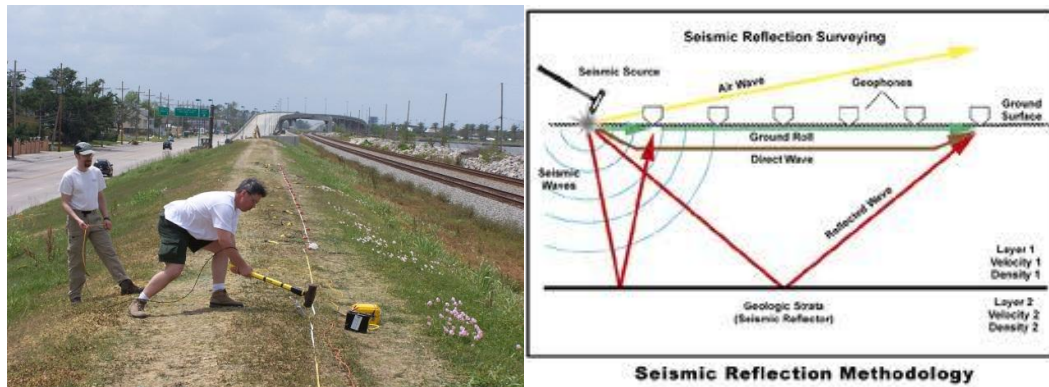
Een drukopnemer meet de normaalkracht in een vlak in de grond. Ze kunnen bijvoorbeeld worden toegepast om de horizontale verplaatsingen te kunnen volgen. Ze bestaan uit twee ronde stalen platen met een vloeistof ertussen. Als er veranderingen plaatsvinden in de druk dan zullen de platen de vloeistofdruk veranderen. Deze drukverandering wordt via een krachtopnemer vertaald naar verplaatsingen.



Figuur A.32 Voorbeeld van een drukopnemer [bron:www.keller-holland.nl]

A.23 Seismiek

Een methode om seismiek in te zetten bij monitoring is door actief een trilling te genereren en te registreren.. Er worden verschillende golven gegenereerd. Oppervlakte golven bewegen deels door de ondergrond en geven zo tot ongeveer 30 meter diepte (diepte van het Pleistoceen in West Nederland) een grondprofiel, wanneer ze aan het oppervlak worden gemeten. Diverse afzettingen (veen, klei, zand) beïnvloeden namelijk het verloop van de golfbeweging. Op deze manier kunnen oude geulen in de ondergrond worden opgespoord. Deze oude geulen zijn gevuld met zand. Hierdoor kunnen deze geulen in voorkomende gevallen voor interne erosie zorgen waardoor piping kan ontstaan.



Figuur A.33 Voorbeeld van het uitvoeren van seismisch onderzoek bij een waterkering, met daarnaast de werking van het principe. [links: ©US Geological Survey office of groundwater, branch of geophysics, rechts: bron: www.rri-seismic.com]

Voor de bovengrondse monitoring wordt gebruik gemaakt van microfoons zoals de gefoon, Voor ondergrondse monitoring kan ook een hydrofoon worden gebruikt. Een hydrofoon werkt volgens hetzelfde principe als een microfoon, alleen is deze geschikt om onder water te gebruiken.



Figuur A.34 Array met hydrofoons gewikkeld op een klos [STOWA, 2010b]

A.24 Akoestische emissie

Akoestische emissie meet de geluiden die karakteristiek horen bij de energie die vrijkomt bij plotselinge scheurvorming binnen een materiaal. Oorspronkelijk werd deze methode gebruikt voor het opsporen van gaslekkages.

De hoeveelheid, grootte en frequentie zegt iets over de scheurvorming. Dit is echter een complex proces. De emissie wordt gemeten met gevoelige microfoons die strategisch geplaatst zijn binnen en op de waterkering. Door de tijd te vergelijken tussen de verschillende opnemers, kan de locatie van de scheurvorming worden bepaald. Het achtergrondgeluid kan met computer analyse worden weggefilterd.

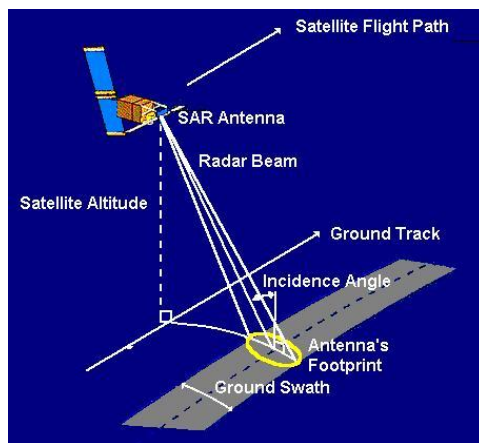
A.25 Radar

Synthetic-aperture radar (SAR) is een vorm van radar waar het gebruik van relatieve beweging tussen antenne en het meetobject centraal staat. Deze meetmethode levert een onderscheidend signaal, dat over de lange termijn een samenhangend beeld geeft. Hierdoor is de resolutie van het meetobject veel fijner dan bij conventionele scan-methoden op basis van straling. Dit komt door de frequentieband.

Er wordt een radarbundel uitgezonden door middel van een enkele antenne op een bewegend object, zoals een vliegtuig of een ruimtevaartuig, waarvandaan het meetobject herhaaldelijk wordt belicht door radiogolven met een golflengte variërend van ongeveer een meter tot enkele millimeters. De verschillende echogolven die worden ontvangen door de antenne worden samengevoegd en verwerkt tot een afbeelding van het meetobject.

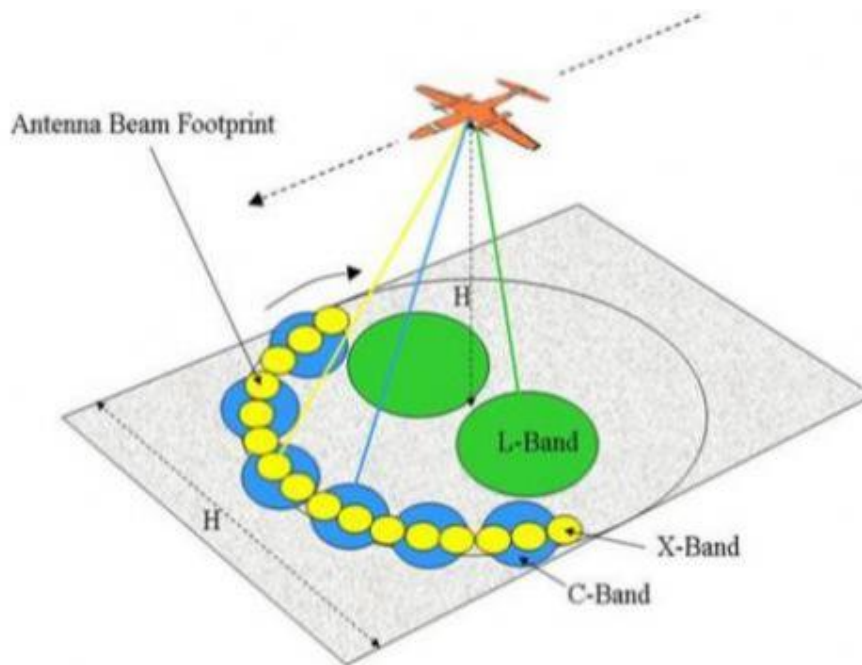
De meetmethode die wordt gebruikt bij het monitoren van waterkeringen kan ook omgekeerd werken. Hierbij is de antenne op een vaste locatie geplaatst en kan deze over een bepaald tijdframe de vervormingen vastleggen, ook wel Inverse SAR genoemd (ISAR).

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. De toegankelijkheid van de waterkering speelt hierbij geen rol, zoals bij handmatige metingen wel het geval is. Nadeel van deze methode is dat je van tevoren niet weet waar de reflectiepunten zich bevinden.

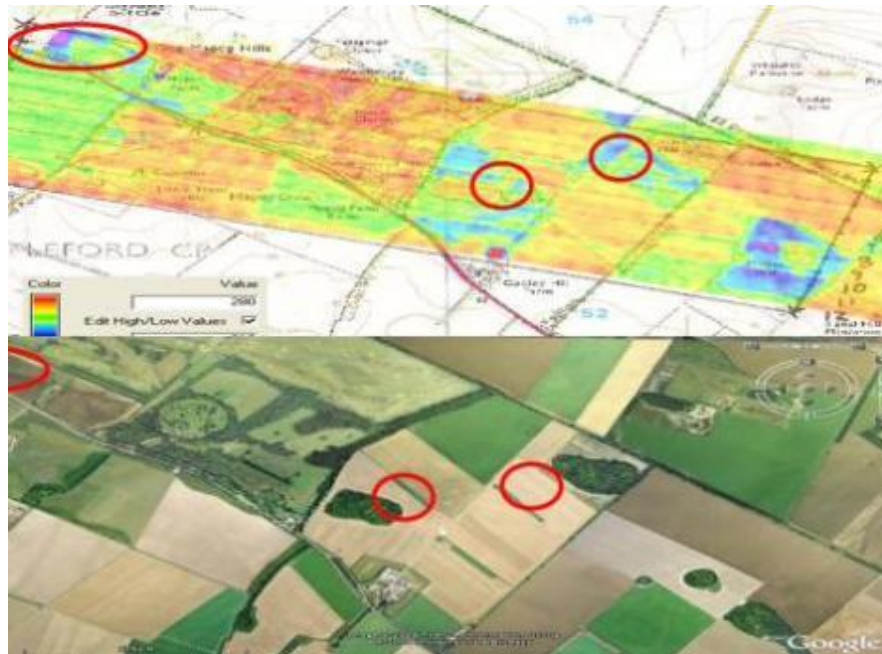


Figuur A.35 Overzicht werking van SAR meetmethode [©"Precision Agriculture" Prof. Tamás János (2008)]

Radar kan ook worden gebruikt om het vochtgehalte in de ondergrond te meten. Met behulp van de passieve methode met microgolfstraling van circa 1-200 GHz wordt de elektrische geleidbaarheid van materialen gemeten. Hiermee kunnen de materialen aan de hand van de eigen intrinsieke elektrische constante worden bepaald en kan het vochtgehalte worden bepaald. Met deze gegevens kan kwel of droogte in het dijklichaam worden gemonitord. Het gebruik van multi-polarisatie SAR geeft goede resultaten met het opsporen van kwel in waterkeringen, zie bijvoorbeeld [Jones et al., 2012].



Figuur A.36 Werking van passieve microgolf radiometrie [bron: www.miramap.com)



Figuur A.37 Uitkomst van een meting, er is verschil in vochtgehalte te zien binnen de omcirkelde gebieden [bron:www.Miramap.com]

B Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing (DTS)

Silvia Bersan, Padua University (Italy) & Deltares (Netherlands)

B.1 Fundamentals

An optical fiber is a glass or plastic waveguide with a diameter in the order of 0.1mm that enables conveying light upon kilometer range distances.

A large variety of FOS (Fiber Optic Sensors) have been successfully commercialized in the past three decades essentially based on Bragg-gratings and Fabry-Perot cavities (FP), providing one or several, localized measurements. These technologies require a specific, localized treatment of the fiber, for example localized surface grating, to create a localized, sensitive element susceptible to produce a measurable signal.

The term *distributed sensor* designates the case in which the optical fiber itself becomes a sensor. It is thus no longer necessary to implement anticipated sensor positions since measurements are being performed all along the optical fiber connected to the reading device. A DTS system comprises an opto-electronics unit and fibre optic sensor(s).

Various techniques may be utilized to develop a continuously distributed measurement system within an optical fiber. The most common would be OTDR (for Optical Time Domain Reflectometry), which could eventually be combined with a study of light-matter interactions such as the Raman effect (temperature-dependent) and the Brillouin effect (temperature and deformation-dependent) as depicted afterwards. Initially created to analyze losses inside optical telecommunication lines, OTDR consists in injecting a laser pulse within an optical fiber and then measuring the backscattered intensity versus time: a period Δt corresponds to a pulse round-trip between the lead and a given point on the fiber located at $c/(2n \cdot \Delta t)$ from the lead, where c is the speed of the light in the fiber and n the number of loops.

As shown in Figure 1, the light backscattered by an optical fiber segment without any defects or abnormal characteristics is spectrally decomposed into three distinct peaks corresponding to three outstanding phenomena. The first relates to Rayleigh scattering, originated from interaction between the electromagnetic wave propagating in the fiber core and silica impurities. Intensity variations in the backscattered signal at the same wavelength as the injected wave are related with local modifications of the optical properties, for example a damage on the fiber. Beyond detection, to conduct temperature or strain measurements, the value of the Rayleigh backscattering signal in optical fibers must be associated with another technique, the simplest being an association with punctual sensors. In this case, the continuously-distributed aspect of the measurement would be lost.

As sketched in Figure 1a, an inelastic phenomenon occurs when an optical pulse is launched into an optical fiber, called Brillouin scattering. This Brillouin frequency shift ν_B is proportional to temperature (ΔT) and strain (ϵ) variations as in:

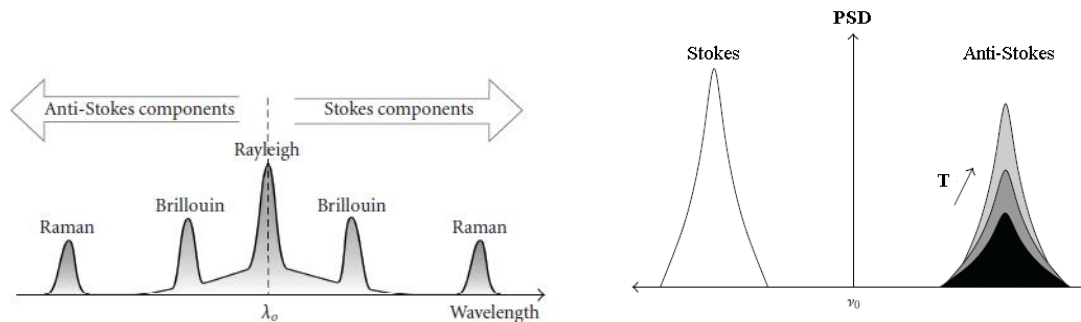
$$\Delta \nu_B = C_T \Delta T + C_\epsilon \epsilon$$

C_T and C_ϵ are characteristics of the optical fiber type. Measuring temperatures by using Brillouin scattering requires that the optical fiber does not experience any strain that could be misinterpreted as a temperature change due to the cross-sensitivity between strain and temperature.

To perform distributed temperature measurement, Raman scattering is the most common technology. Raman scattering originates from laser light photon interaction with thermal vibration of silica molecules (thermal phonons). More precisely, as sketched in Figure 1b, the anti-Stokes absorption mainly depends on temperature. As a consequence, Raman distributed sensing systems may use OTDR pulsed technique to perform distributed intensity measurement of the anti-Stokes backscattered light. However, the anti-Stokes intensity evolution must be augmented with a reference measurement since optical fiber losses vary with time (increase with fiber aging, connector dirt, or optical fiber curvatures, etc.). A number of commercially available distributed temperature sensing devices automatically compensate for this loss by analysing the ratio between the Anti-Stokes and Stokes absorption line intensities. The ratio of the two then allows for the calculation of the temperature of the fiber based on the following relation

$$I_{AS}/I_S \propto \exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right)$$

where h is the Planck constant, k is the Boltzmann constant, T is the absolute temperature, and $\Delta\nu$ is the separation between Raman anti-Stokes and Stokes light frequencies.



Figuur B.1 Backscattering spectrum of a monochromatic wave within an optical fiber (a); Raman scattering sensitivity to temperature ("PSD" stands for power spectral density) (b). From Henault et al. (2010)

B.2 Resolution

The temporal width of the pulse necessitates an OTDR spatial resolution; a 10-ns width corresponds to a resolution of 1 m. The spatial resolution is also influenced by the sampling frequency of the Analogue to Digital converter (ADC) used to convert into a digital signal the electrical signal representing the backscattered light.

Paired with multimode fibers and OTDR localisation techniques, repeatability of Raman distributed temperature devices are on the order of 0.1°C for distance ranges of several kilometres and spatial resolution of 1 m. It degrades with increasing distance but can be maintained by increasing the device acquisition time. Maximal distance range is 30 km (Henault et al., 2010).

A spatial resolution of 0.25 m can be achieved in the field for cables up to 2.5 km (Thomas et al., 2012). Recently a new Raman based DTS system has been patented that allows spatial resolutions up to 2.5 cm (Barfoot et al., 2010).

Precision of the measure, cable length, spatial-averaging interval and time-averaging interval are strongly interrelated.

As reported in Tyler et al. (2009), achieving 1 m spatial resolution requires truncation of the signal. For example, most commercial fibers have an index of refraction close to 1.5, so the speed of light in the fiber is about 0.2 m/ns and the backscatter from any particular meter arrives spread out over a 5-ns period. To avoid temperature distortions due to dispersion of light within the fiber, the first and last 1–2 ns of the pulse return must be trimmed. This leads to greater signal loss for finer spatial resolution: assuming a 1-ns trimming, 1-m resolution loses 40% of the signal (2 ns of the 5-ns signal), while 2-m resolution would lose only 20% (2 ns of a 10-ns signal).

A longer spatial-averaging interval can therefore significantly improve the quality of the DTS temperature measurements and can compensate for the attenuation that affects the signal when the cable is very long.

Tyler et al. (2009) also reported that, since only a small fraction of the incident light is scattered in an optical fiber, signal strengths are very low, which limits the precision of DTS measurement and makes the sensor accuracy to decrease with distance along the fiber. Greater signal strength may be achieved by longer integration time. Fundamentally, the precision of the method is a function of the Stokes to anti-Stokes backscatter ratio precision. Since this factor is proportional to the number of photons collected by the detectors (linear in time), the precision of this ratio follows the central limit theorem and thus is proportional to the square root of time. All other things being equal, a longer time-averaging period will provide a more precise temperature measurement. Temperature resolution of 0.1 °C over 1 m spatial resolution can be achieved with a 1-min integration time, but precision approaching 0.01 °C is possible with long integration times if the DTS device itself is protected from changes in temperature (Selker et al., 2006a).

While the precision of observing changes in temperature is a function of the DTS system and acquisition parameters, the accuracy of the measures (capability of measuring the absolute temperature) depends only on the calibration process, that is carried out by placing the cable in an environment of known constant temperature, attaching the cable to the DTS, and taking a long-time integration data set. Details on the procedures of calibration can be found in Hausner (2011).

B.3 Installation

For field applications, the optical fiber cannot be used wrapped in its standard coatings. First, the cable has to be robust in order to endure real civil engineering works conditions: handling, soil compaction, and so forth. Moreover, it must resist to chemical aggressive environment (water and salinity). Inside dikes, rodents happened to destroy a cable, which can be solved by metallic protections. As a consequence, it is recommended to choose hybrid telecommunication cables meant for soil embedment. However coatings developed by the telecommunication industry isolate the fiber from its environment.

Selker et al. (2006) have demonstrated that for a stainless-steel housed fiber the time to adapt to temperature changes is very acceptable. In laboratory tests monitoring abrupt step-wise changes in temperature with time, it was found that more than 95% of the real change in temperature was apparent within the 15 seconds minimum time between readings.

By knitting optical cables into a geotextile fabric it is possible take advantage of the high soil-textile interface friction properties to transfer very small strains from the soil to the fiber. Some commercial products (see Figure xxx for an example) couple fiber optics using Stimulated Brillouin Scattering for strain monitoring and fibers using Raman Scattering for temperature monitoring and for compensating the temperature effects on the Brillouin Scattering.



Figuur B.2 Geotextile-integrated fiber optic sensors (GeoDetect®)

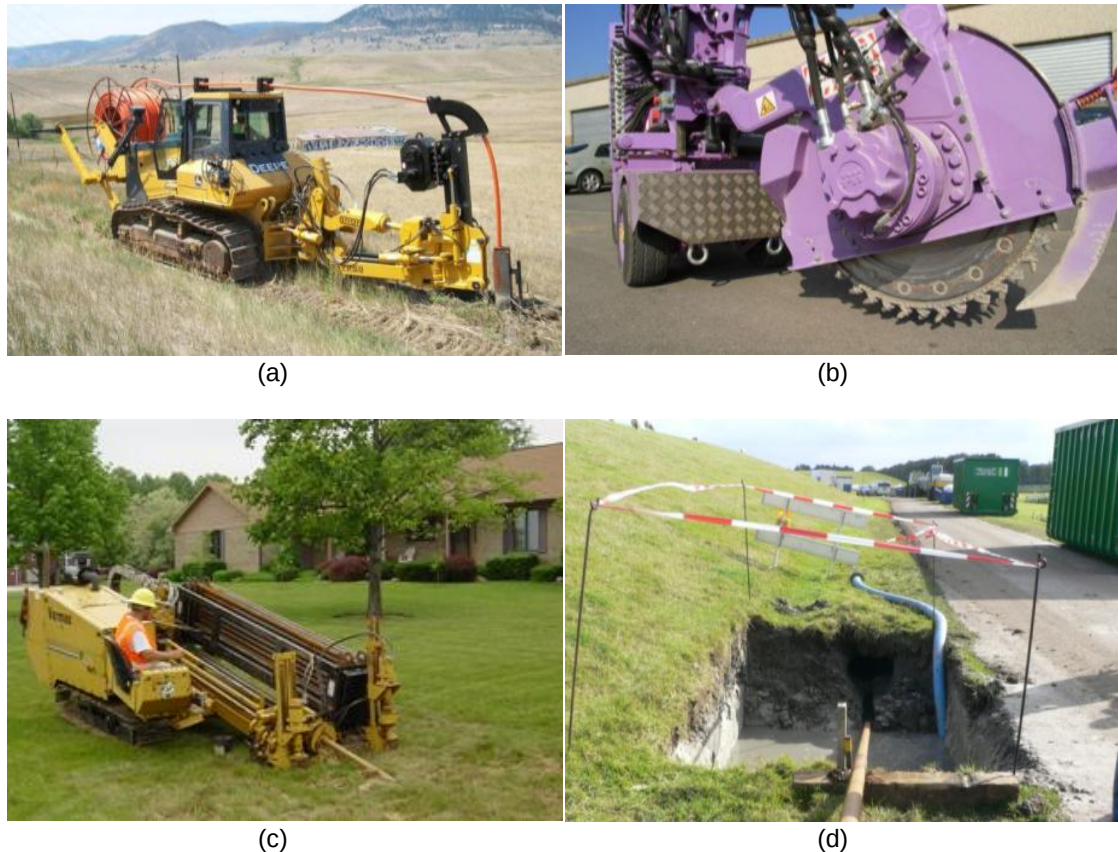
It has to be remembered during installation that the fiber rigidity strongly limits the bending radius.

Fiber optic cables can be buried in the ground by plowing, trenching, microtrenching or directional drilling (figure xxx).

Plowing needs dedicated equipment and operators. Plows for copper cables may not meet fiber requirements for cable support, bending radius, tension or vibration. Operator and crew should be properly trained as plowing in fiber optic cables is a process that demands care and experience. When there are no obstacles for the movement of heavy equipment, direct burial is a fast method of installation.

Trenching involves digging a trench with a backhoe or trencher, laying the cable and then filling the trench. All sizes of trenchers are available fiber specific equipment unlike is not needed.

Microtrenching is much faster than trenching: a groove is sawed in the pavement or soil, some centimeters wide and up to 1 m deep, cables are dropped and the groove is refilled, often with the same material vacuumed up when the sawing occurs.

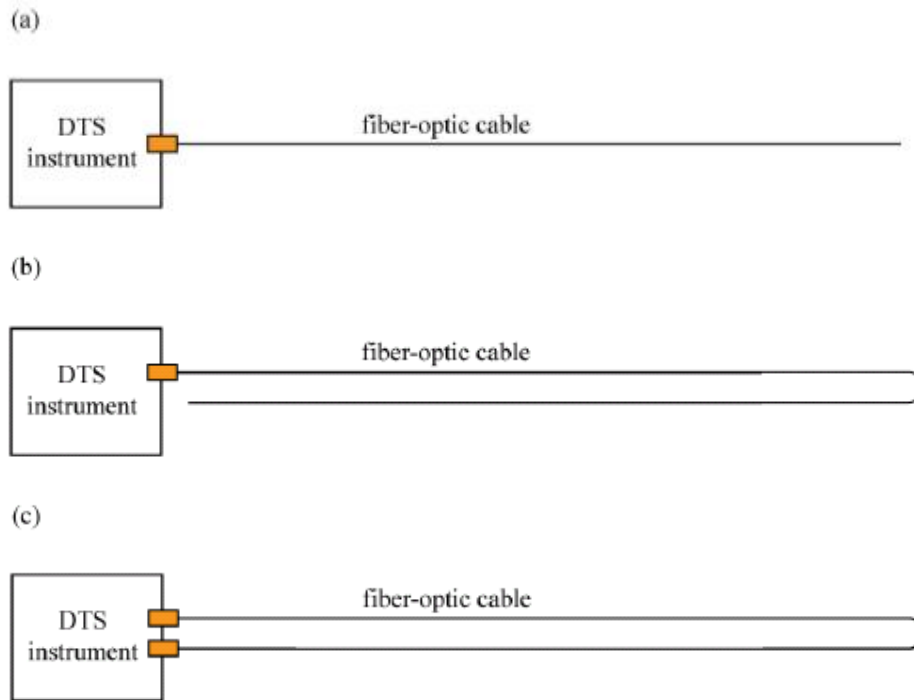


Figuur B.3 Installation techniques for fiber optic cables. Plowing (a), microtrenching (b), directional drilling (c, d).

B.4 Configurations

Fiber-optic cables for DTS studies can be deployed in a number of different configurations (Figure 1). In a pure single-ended installation laser pulses are both injected and monitored at only one end of the fiber optic cable. A duplexed single-ended installation uses two co-located fibers following the same path which are connected at the end away from the DTS to allow two temperature observations at every point along the measuring line (one going away from the instrument, and one coming back towards the instrument). In a double-ended installation, pulses are injected and monitored from both sides, alternating after each measurement interval.

The main motivation for double ended measurements is that it allows for direct calculation of the differential attenuation along the cable. Differential attenuation refers to different absorption rates of Stokes and anti-Stokes along the optical path, which may erroneously be interpreted as temperature signals. For homogenous cables that are not spliced, stressed, or bent, this may not be required, but when such conditions exist, direct observation of the differential attenuation is almost essential to obtaining accurate measurements (van de Giesen, 2012).



Figuur B.4 Typical DTS experimental designs. (a) Simple single-ended configuration; (b) Duplexed single-ended configuration; (c) Double-ended configuration. From Hausner et al. (2011)

B.5 Applications

Raman spectra fiber-optic distributed temperature sensing (DTS) technology was originally developed by the oil and gas industries, and has been used since the late 1980s for pipeline monitoring, fire detection and protection, and other industrial applications (Hausner, 2011).

Their use for geo-environmental applications started in the 90s with when temperature in boreholes was monitored for fluid logging, i.e. the identification of flow zones in the subsurface and the assessment of their hydraulic properties (Hurtig et al., 1994). In the same years its applicability to leakage detection in dams was demonstrated. As cited in Johansson (2004) a first test installation in a dyke was made in France in 1995 by EdF (Albalat and Garnero (1995); Fry (1997)). Johansson (1997) and Dornstädter (1997) further described the concept. Optical fibres are now installed at several dam sites in Sweden, but also in Germany, France, Turkey, China and Canada.

In the middle of the 2000s, DTS systems, after achieving acceptable levels of spatial and temporal resolution, along with high temperature accuracy and resolution, became an important tool in the environmental sciences.

Distributed temperature measurements have been used as a tracer of convection for detection and quantification of groundwater inflow in streams (Westhof et al., 2007, Selker et al., 2006b, Hoes et al., 2009), estimation of seepage rates in losing streams (Vogt et al., 2010), detection of illicit connections in sewers (Hoes et al., 2009).

Based on the fact that soil moisture influences soil thermal properties, DTS has also been used for monitoring large-scale variability of soil moisture. Steele-Dunne et al. (2010) deployed several fiber optic cables in a vertical profile, measuring propagation of temperature

changes due to the diurnal cycle (passive method). Results from their preliminary study demonstrate that passive soil DTS can detect changes in thermal properties; however deriving soil moisture is complicated by the uncertainty and nonuniqueness in the relationship between thermal conductivity and soil moisture. Strieg et Loheide (2012) used the active approach for estimating soil moisture. A heat pulse is generated within the fiber optic cable and along its entire length, causing the cable temperature to rise, and the resulting temperature response is monitored. For homogeneous soil conditions the temperature rise during heating is expected to be lesser in wet soils, and greater in dry soils due to the presence of more conductive pathways (i.e., water bridges between soil particles) and the greater heat capacity in wet soils.

The same principle has been applied to assess evapotranspiration by means of DTS on a vertical profile (Koonce et al., 2011).

DTS has been also employed for estimation of thermal properties of soils and thermal wall resistance for geothermal energy production (Günzel and Wilhelm, 1999). Other applications include temperature logging in snowpacks and in lakes, ecohydrology, interaction between ground surface and atmosphere. A comprehensive review of the fields of application can be found in Selker et al. (2006a) and Suarez (2011).

B.6 References for this Annex

Fundamentals, Resolution, Installation

Fiber Optic Association Online Reference Guide. www.thefoa.org

<http://www.nksystems.jp/english/catalog/c02.html>

Hausner, M.B.; Suarez, F.; Glander, K.E.; van de Giesen, N.; Selker, J.S.; Tyler, S.W. (2011) Calibrating single-ended fiber-optic raman spectra distributed temperature sensing data. *Sensors*, 11, 10859–10879.

van de Giessen N, Steele-Dunne SC, Jansen J, Hoes O, Hausner MB, Tyler S, Selker J. (2012) Double-Ended Calibration of Fiber-Optic Raman Spectra Distributed Temperature Sensing Data. *Sensors*. 12(5):5471-5485.

Jean-Marie Henault, Gautier Moreau, Sylvain Blairon, et al. (2010), "Truly Distributed Optical Fiber Sensors for Structural Health Monitoring: From the Telecommunication Optical Fiber Drawling Tower to Water Leakage Detection in Dikes and Concrete Structure Strain Monitoring," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2010, Article ID 930796, 13 pages, 2010. doi:10.1155/2010/930796

C.K. Thomas et al.(2012) High-Resolution Fibre-Optic Temperature Sensing: A New Tool to Study the Two-Dimensional Structure of Atmospheric Surface-Layer Flow, , volume 142, issue 2, pp 177-192

Tyler SW, Selker JS, Hausner MB, Hatch CE, Torgersen T, Thodal CE, Schladow SG (2009) Environmental temperature sensing using raman spectra DTS fiber-optic methods. *Water Resour Res* 45:W00D23 doi:10.1029/2008wr007052

Barfoot David, Kalar Kent Jaaskelaine, Kari-Mikko (2010) High Sampling Resolution DTS System and Method, Patent n. WO2010144129 A2,

<http://www.google.com/patents/WO2010144129A2?hl=it&cl=en>

Applications

Koonce, J.; Young, M.; Devitt, D.; Yu, Z.; Wagner, A.; (2011) Soil Water and Thermal Gradients in the Vadose Zone: Assessing Evapotranspiration, Recharge Rates and Shifts in Phreatophytic Water Source, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2011*

Günzel, U. and Wilhelm, H., 1999: "Estimation of the in-situ thermal resistance of a borehole using the Distributed Temperature Sensing (DTS) technique and the Temperature Recovery Method (TRM)". *Geothermics*.

Selker, J.S. et al., 2006a. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research* 42 (12), 8

Francisco Suárez, Mark B. Hausner, Jeff Dozier, John S. Selker and Scott W. Tyler (2011). Heat Transfer in the Environment: Development and Use of Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing, *Developments in Heat Transfer*, Dr. Marco Aurelio Dos Santos Bernardes (Ed.)

Westhoff, M.C. et al., 2007. A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (4), 1469–1480.

Hoes, O.A.C, Schilperoort, R.P.S., Luxemburg, W.M.J., Clemens, F.H.L.R. & van de Giesen, N.C. (2009a). Locating illicit connections in storm water sewers using fiber-optic distributed temperature sensing. *Water Research*, Vol.43, No.20, (December 2009), pp. 5187-5197, ISSN 0043-1354

Hoes, O.A.C., Luxemburg, W.M.J., Westhoff, M.C., van de Giesen, N.C. & Selker, J.S. (2009b). Identifying seepage in ditches and canals in polders in the Netherlands by distributed temperature sensing. *Lowland Technology International*, Vol.11, No.2, (December 2009), pp. 21-26, ISSN 1344-9656

Hurtig, E., S. Großwig, S., Jobmann, M., Kühn, K. & Marschall, P. (1994). Fibre-optic temperature measurements in shallow boreholes: experimental application for fluid logging. *Geothermics*, Vol.23, No.4, (August 1994), pp. 355-364, ISSN 0375-6505

Selker, J.S., van de Giesen, N.C., Westhoff, M., Luxemburg, W. & Parlange, M.B. (2006b). Fiber optics opens window on stream dynamics. *Geophysical Research Letters*, Vol.33, No.L24401, (2006), 4 pp., ISSN 0094-8276

2. Johansson, S. and Sjö Dahl, P., "Downstream Seepage Detection using Temperature Measurements and Visual Inspection – Monitoring Experiences from Røsvatn Field Test Dam and Large Embankment Dams in Sweden", *Proceedings - Stability and Breaching of Embankment Dams*, EBL Oslo, 2004.

Dornstädter J. (1997). Detection of internal erosion in embankment dams. - *ICOLD, Florence. Q.73R.7. 2:87-101*, International Commission on Large Dams, Paris. (In Johansson, 2004)

Albalat, C., Garnero E., (1995) *Mesure de fuites sur le canal de Jonage avec un capteur de température à fibre optique continûment sensible*. Rapport EDF-D4007/23/GC/95-3018. (In Johansson, 2004)

Johansson, S. (1997), *Seepage Monitoring in Embankment Dams*, Doctoral Thesis, TRITA-AMI PHD 1014, ISBN 91-7170-792-1, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Fry, J.-J. *"Internal erosion and surveillance"*, ICOLD 19th Congress, Volume V, pp 255-268, Florence 1997. (In Johansson, 2004)

Johansson S. and Watley, D.; 2005, "Distributed sensing of seepage and movements using optical fibres-Results from some embankment dams in Sweden, International Water Power and Dam Construction, 2005