

Eemsgolaan 3
9727 DW Groningen
Postbus 1416
9701 BK Groningen

www.tno.nl

T +31 88 866 70 00
F +31 88 866 77 57

TNO-rapport

Eindrapport LiveDijk Utrecht



Datum 11 augustus 2015

Hoofdauteur(s) Gjalt Loots (TNO), Bernard van der Kolk (Deltares)
Met bijdragen van Wouter Zomer (FloodControl IJkdijk), Irma Metaal (RWS),
Wouter Egas (Provincie Utrecht), Sienke Lodiers (HDSR)

Exemplaarnummer <copy no>
Oplage <no.of copies>
Aantal pagina's 44
Aantal bijlagen <number of appendices>
Opdrachtgever Stichting FloodControl IJkdijk
Projectnaam LiveDijk Utrecht
Projectnummer 055.01599

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2015 TNO

Inhoudsopgave

Management samenvatting.....	4
Voorwoord	8
1 Inleiding	9
1.1 Inleiding	9
1.2 Aanleiding	9
1.2.1 LiveDijken	9
1.2.2 LiveDijk Utrecht.....	10
1.3 Doelstellingen	11
1.4 Uitvoering op hoofdlijnen	12
1.5 Uitvoering deelprojecten in meer detail	12
1.5.1 Grechtdijk.....	13
1.5.2 Voorhavendijk.....	13
1.6 Systemen en toekomstvisie	13
2 Uitvoering project.....	15
2.1 Inleiding	15
2.2 Installatie.....	15
2.2.1 Glasvezelkabel	16
2.2.2 GeoBeads.....	17
2.3 Overzicht metingen.....	17
2.3.1 Voorhavendijk.....	17
2.3.2 Grechtdijk.....	17
2.4 Analyse metingen	18
2.4.1 Insteltijd	18
2.4.2 Datacontinuïteit.....	19
2.4.3 Verloop	21
2.4.4 Correctheid metingen Voorhavendijk	22
2.4.5 Correctheid metingen Grechtdijk	24
2.4.6 Temperatuurmetingen Grechtdijk	25
3 Berekeningen	30
3.1 Inleiding	30
3.2 Schematisatie	30
3.3 Resultaten.....	30
3.3.1 Doorvoeren van metingen in de berekeningen	31
3.3.2 Correctheid glijcirkel	32
3.3.3 Correctheid van de schematisatie	33
3.4 Conclusie en samenvatting	33
4 Conclusies en aanbevelingen	34
4.1 Conclusies	34
4.2 Aanbevelingen	36
5 Evaluatie	37
5.1 Kennis.....	37
5.1.1 Gedrag van de dijk.....	37
5.1.2 Functionaliteit van het monitoringssysteem	37

5.1.3	Implementatie in het beheerproces	38
5.2	Proces.....	39
Bijlage 1 Plaatsingsgegevens.....		41
Bijlage 2 Schematisaties		43

Management samenvatting

In 2010 zijn de provincie Utrecht, Rijkswaterstaat Dienst Utrecht (later Midden Nederland) en Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) een samenwerking aangegaan met de Stichting IJkdijk (later FloodControl IJkdijk) en STOWA.

Provincie, Rijkswaterstaat en HDSR wilden een actieve bijdrage leveren aan innovatie en ontwikkeling van nieuwe technieken op het gebied van waterveiligheid en droogtemonitoring van waterkeringen. Daarnaast wilden zij ook ervaring op doen wat deze innovaties kunnen betekenen voor de inspecties van waterkeringen. Stichting IJkdijk heeft als doelstelling dijk- en sensortechnologie te ontwikkelen, te integreren en te valideren om zo te komen tot algemeen toepasbare meetsystemen voor waterkeringen. Hiervoor voert zij – in samenwerking met kering beheerders - grootschalige praktijkexperimenten uit. STOWA is betrokken omdat zij zich onder meer ten doel stelt ontwikkeling en implementatie van innovatieve kennis en kunde op het gebied van hoogwaterkering beheer te stimuleren.

Deze samenwerking is bekrachtigd in een overeenkomst die eind 2011 door alle partijen is ondertekend.

Daarna zijn de markt (Custodia, later AGT International) en kennisinstituut (TNO) bij dit project betrokken. Voorts werkten de bedrijven Alert Solutions, Ten Cate en Koenders Instruments voor het project. Deltares bracht haar geotechnische expertise in.

Deze “gouden driehoek” (overheid, bedrijven, kenniscentra) heeft vervolgens op basis van wensen van de waterkering beheerders een plan van aanpak opgesteld. Alle betrokken partijen hebben bijgedragen aan de financiering van deze pilot. Ook is een deel ingezet van de cheque van 3 miljoen euro die de toenmalig Staatssecretaris I&M Atsma tijdens de innovatie estafette op 4 oktober aan de stichting IJkdijk heeft overhandigd.

Op 19 september 2012 heeft een starthandeling plaatsgevonden door de bestuurders van de betrokken partijen op de Prinses Beatrixsluis in Nieuwegein.

Eind 2012 is dit project genomineerd voor de waterinnovatieprijs. Uit de 156 inzendingen behoorde dit project tot 1 van de 3 kanshebbers in de categorie overheden maar viel helaas niet in de prijzen.

Juryoordeel:

De jury belooft graag de inzet van Stichting IJkdijk binnen het LiveDijk-concept. De stichting is de motor achter het verbinden van traditionele waterbouwkundige kennis met de onbegrensde mogelijkheden van de sensortechnologie en ICT. Hiermee staat het aan de wieg van een ‘revival’ van het meten en monitoren (modern schouwen) van de daadwerkelijke toestand van onze waterkeringen. Ook is de jury van mening dat hierdoor weer nieuwe inzichten en kennis ontwikkeld wordt die benut kan worden in de ontwerp en toets richtlijnen. Het innovatief monitoren van dijken vindt de jury van groot belang. LiveDijk Utrecht is een interessante innovatie die vooralsnog gericht is op



onderzoek, maar een geweldige potentie heeft om tot de ontwikkeling te komen van betere beheer concepten en early warning systemen.

Uitvoering

Voor het project LiveDijk Utrecht zijn twee locaties bepaald om ervaring met sensortechnologie op te doen. Het betreft de westelijke Voorhavendijk aan de rivier de Lek nabij de Prinses Beatrixsluis (Rijkswaterstaat) en de Grechtdijk (HDSR), een boezemkade nabij Woerden. Op basis van de voor deze dijken relevante bezwijkingsmechanismen is voor beide locaties een monitoringssysteem op maat gemaakt.

Het ontworpen meetsysteem is daarna geïnstalleerd in beide dijken, op basis van in de markt verkrijgbare sensoren en communicatie-infrastructuur.

Gedurende een periode van 2½ jaar zijn via het monitoringssysteem waardevolle meetgegevens verzameld die realtime - door middel van een live dashboard – beschikbaar waren voor de kering beheerders van de HDSR en Rijkswaterstaat. De meetgegevens zijn ook opgeslagen in het Dijk Data Service Center (DDSC) voor analyse doeleinden. Hierbij worden gegevens van LiveDijk Utrecht vergeleken met die van andere dijken.

Het is tijdens de pilot niet gelukt om de verkregendata en informatie te gebruiken voor bijvoorbeeld ander beheer en onderhoud (invoering in de dagelijkse praktijk van dijkbeheer binnen de bestaande organisaties). Hiervoor bleek de projectperiode te kort. Het lag daarmee niet aan enthousiasme bij de gebruikers van het systeem, maar het werkelijk verankeren in de organisatie als een erkende aanvulling op de huidige manier van werken blijkt langere tijd nodig te hebben. Deels is dit een gevolg van het tijdsbeslag dat nodig is geweest om te zorgen dat het systeem betrouwbaar in werking was en door het innovatieve karakter van het project bleek aansluiting op de primaire processen nog niet mogelijk.

Tijdens de pilot is veel tijd en energie gestoken in het opstellen van het plan van aanpak en het regelen van de financiën en inzet voor de pilot. Na de starthandeling zijn de contacten minder intensief geweest. Hier hadden de verschillende partijen scherper op kunnen zijn. Dit heeft echter geen gevolgen voor het eindresultaat van de pilot.

Op maandag 16 maart 2015 hebben opdrachtgevers en opdrachtnemers een evaluerende bijeenkomst gehouden van 2 jaar LiveDijk Utrecht. In het LEF futurecentre(RWS Westraven) zijn de betrokkenen in 2 groepen uiteengegaan om antwoord te krijgen op de vragen: wat ging goed, wat kan beter en wat is blijven liggen. Aansluitend hebben de bestuurders in een plenair deel hun reflectie op de 1e sessie gegeven en aangevuld met hun eigen reactie.

Uitkomst van deze bijeenkomst was dat de pilot nog met een half jaar is verlengd om een aantal korte termijn acties verder te kunnen realiseren. De resultaten hiervan zijn verwoord in de eindrapportage.

Doelstelling en resultaten pilot

De doelstelling van het onderzoekstraject was te laten zien hoe nieuwe technologieën en kennis te introduceren voor specialisten op het gebied van waterbeheer door middel van een “LiveDijk” pilot. Daarbij werd gestreefd om aan te tonen hoe dit kan leiden tot besparingen van kosten bij het onderhoud van waterkeringen binnen de daarvoor bestaande processen van de stakeholders en

beheerders en het verkrijgen van meer inzicht in het gedrag van de dijk met als doel het vergroten van de waterveiligheid.

Deze pilot is daarnaast ook vernieuwend voor crisismanagement en rampenbestrijding in de provincie Utrecht. Vertaling naar de praktische waarde moet echter nog plaatsvinden.

De resultaten van deze pilot en andere LiveDijk projecten stelt de beheerders van de waterkeringen in staat om ontwikkelde kennis en technologie praktisch toe te passen en te gebruiken bij de uitvoering van hun primaire taken.

Aanvullende op de hoofddoelstelling zijn de volgende doelstellingen gerealiseerd:

1. Inzicht krijgen in welke mechanismen welk effect hebben op dijklichamen. Het gaat daarbij om de mechanismen: (macro)stabiliteit, piping en zetting.
2. Kennis verkrijgen over welke monitoringssystemen met succes toe te passen zijn bij welk bezwijkmechanisme.
3. Kennis krijgen over hoe gegevens uit de monitoring geïnterpreteerd moeten/kunnen worden en daaraan beheersprocessen te koppelen. Hieronder valt ook de implementatie in de beheerorganisatie en de kennisborging.
4. Bewaken van de veiligheid (early detection) van de dijken tot deze zijn verbeterd.
5. Leveren van aanvullende informatie over de opbouw van bodem en dijk, ten behoeve van de verbeterwerken.
6. De werking van een geavanceerd systeem voor dijk monitoring te demonstreren.

Met de pilot zijn we er in geslaagd een systeem te implementeren, met een live dashboard waarop onder andere de volgende aspecten zichtbaar zijn:

- De waterspanningen, live komend uit in de dijk geïnstalleerde sensoren: dit zijn de meest relevante dijk-technische parameters voor de specifiekgekozen beheerders.
- Stabiliteitsberekeningen verkregen door gebruik te maken van actueel ingewonnen meetdata;
- Early warning door middel van alarmen bij grenswaarde overstijgende veiligheidsniveaus;

Conclusies en aanbevelingen

De pilot LiveDijk Utrecht kan als geslaagd worden gezien. Met behulp van deze pilot is bevestigd dat de techniek van sensormonitoring werkt en meerwaarde levert voor dijkbeheerders. De pilot meer inzicht opgeleverd inzake dijkstabiliteit van zowel de Voorhavendijk als de Grechtkade.

Het antwoord op de vraag of sensormonitoring het beheer en onderhoud van dijken goedkoper maakt, is niet te beantwoorden op basis van de uitgevoerde pilot. Voor het beantwoorden voor deze vraag moeten ook de resultaten van de andere LiveDijk projecten worden beschouwd. De resultaten van de LiveDijk projecten worden integraal gerapporteerd waaruit ook best practices worden geformuleerd voor het gebruik van meetsystemen. Duidelijk is echter wel dat het inwinnen van data en informatie leidt tot een nauwkeuriger en betrouwbaarder waterveiligheidsoordeel. Het geeft daarmee de beheerder een beter handelingsperspectief.

Wanneer sensoren breder en integraal worden ingezet in het beheersgebied van Rijkswaterstaat, HDSR en de waterschappen, kan pas echt de waarde voor de beheerder over de gehele levenscyclus worden gekwantificeerd. Daarbij moet echter duidelijk per situatie worden afgewogen of de investering de moeite waard is. Daarbij kan besparing door efficiencyvergroting in de levenscyclus spelen, maar ook het feitelijk vergroten van waterveiligheid voor Nederland. Het te beschermen land wordt immers steeds meer waard.

Voorwoord

De provincie Utrecht, Rijkswaterstaat Dienst Utrecht (later Midden Nederland) en Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) hadden in 2010 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, thans FloodControl IJkdijk. Binnen deze ontwikkeling worden zogenaamde LiveDijken opgezet, waar gevalideerde technologieën in de beheerpraktijk worden toegepast. 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 (Rijkswaterstaat) en de Grechtdijk (HDSR), nabij Woerden. Deze laatste locatie betreft een boezemkade.

In Nederland wordt vanaf 2005 ervaring opgedaan met innovatief meten en monitoren in en om dijken. Binnen de diverse IJkdijk en FloodControl 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 waterkering beheerders wordt aangetoond. Om die reden is ook het project LiveDijk Utrecht opgestart.

Dit rapport beschrijft de belangrijkste conclusies en aanbevelingen die kunnen worden gedaan nu de meetperiode is afgelopen. Aan bod komen niet alleen de dijktechnische aspecten, maar wordt ook inzicht geboden in de mate waarin de algehele doelstellingen die het project zichzelf gesteld had zijn gehaald en de samenwerking tussen projectpartners.

1 Inleiding

1.1 Inleiding

Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden (HDSR), de Provincie Utrecht en Rijkswaterstaat Dienst Utrecht (RDU) hebben samen met haar samenwerkingspartners STOWA en Stichting FloodControl IJkdijk in 2011 een consortium opgericht met als doel het in uitvoering brengen van het project LiveDijk Utrecht. De LiveDijk projecten zijn een voortvloeisel van de macrostabiliteit- en pipingexperimenten en de LiveDijk Eemshaven bij Delfzijl.

Binnen hun systeem van waterkeringen hebben HDSR en RWS dijkenbeschikbaar gesteld waarop het LiveDijk concept is toegepast voor het project LiveDijk Utrecht. Vanuit HDSR is een regionale waterkering, de Grechtdijk bij Woerden, beschikbaar gesteld en vanuit RDU is een primaire waterkering, de westelijke Voorhavendijk bij Nieuwegein, ingebracht. Deze waterkeringen zijn 2½ jaar lang bemeten door een sensor systeem dat specifiek voor deze dijken is ontworpen en aangelegd.

1.2 Aanleiding

Het concept LiveDijk staat voor in beheer zijnde dijken bij waterschappen of Rijkswaterstaat die worden gemonitord met sensortechnologie en waarvoor actuele en prognostische sterkteberekeningen worden uitgevoerd. De eerste LiveDijk pilot is in 2009 gestart in 600 meter dijk van waterschap Noorderzijlvest in de Eemshaven. De doorontwikkelingen van het LiveDijk concept vindt plaats in een aantal meerjarige ontwikkelprogramma's. LiveDijk Utrecht is uitgevoerd als een onderdeel van het tweede IJkdijk ontwikkelprogramma.

1.2.1 LiveDijken

Het Tweede IJkdijk-ontwikkelprogramma bestaat uit vier delen:

1. Het eerste deel zijn de validatie-experimenten. In deze experimenten zijn meet- en sensorsystemen gevalideerd voor de toepassing op specifieke dijkfaalmechanismen.
2. Indien gevalideerd, zijn deze toegepast in LiveDijk projecten van beperkte omvang.
3. Voor toepassing op grote schaal is een LiveDijk XL-project gerealiseerd in samenwerking met Waterschap Noorderzijlvest. De uitdagingen van opschaling van de toepassing van meetsystemen zijn hierin aan bod gekomen.
4. Ten slotte worden de ingewonnen gegevens opgeslagen in het Dijk Data Service Centrum dat specifiek hiervoor is ontwikkeld in samenwerking met de waterschappen (Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden, Noorderzijlvest, Waternet/AGV, Wetterskip Fryslân, Vallei en Veluwe, Rivierenland) en Rijkswaterstaat.

In de LiveDijk projecten zijn gevalideerde sensor- en meetsystemen voor het eerst toegepast in een pilotproject onder reguliere omstandigheden; in echte dijken voor meerdere jaren. Hiermee is kennis opgedaan over het langjarig functioneren van de systemen maar ook over het gedrag van dijken. Verwacht werd dat het langjarig meten van dijken aanvullend inzicht zou opleveren in het gedrag van deze dijken. Alle LiveDijk projecten hebben de volgende doelstellingen gemeen:

- Het meten van dijken ten behoeve van early warning

- Het verkrijgen van data en informatie over de dijk om versterkingsontwerpen te kunnen optimaliseren
- Het met ingewonnen data en informatie op termijn kunnen optimaliseren van het beheer

Al deze doelen passen onder doelmatig en efficiënt levenscyclusbeheer of assetmanagement.

1.2.2 LiveDijk Utrecht

AGT International, TNO en de stichting IJkdijk, thans FloodControl IJkdijk, hebben zich ten doel gesteld het bewaken van waterkeringen op een hoger niveau te brengen door middel van innovatieve ICT-toepassingen. Het schouwen van waterkeringen vindt nu nog op traditionele wijze plaats, waarbij alleen de buitenzijde van de waterkering wordt geïnspecteerd. De opgetreden kadebreuk bij Wilnis en later bij Stein illustreren de noodzaak om verder te kijken en ook de actuele conditie in en onder de waterkering te kennen om een betere uitspraak over de veiligheid te kunnen doen. Daarnaast dient er aansluiting gevonden te worden bij het bestuursakkoord water waarin uitdrukkelijk wordt verwezen naar innovatieve programma's als IJkdijk en LiveDijk. Moderne monitoringstechnieken zijn een veelbelovend middel om de traditionele schouw aan te vullen met informatie over processen die in en onder een dijk afspelen.

FloodControl IJkdijk werkt met diverse partners uit de driehoek bedrijfsleven, overheden en kennisinstellingen, met steun van ondermeer de ministeries van Economische Zaken (EZ), Infrastructuur en Milieu (I&M) en diverse waterschappen, aan de ontwikkeling van bouwstenen voor monitoringssystemen voor waterkeringen. Het macrostabiliteitsexperiment (2008), de pipingexperimenten (2009-2010), het overslagexperiment (2010-2011) en de LiveDijk Eemshaven (2009 – 2011) zijn lopende en gerealiseerde onderdelen van deze ontwikkeling. De resultaten hiervan worden door de sector als waardevol en veelbelovend beschouwd. De verwachting is dat de gevalideerde technologieën en de ontwikkelde kennis en methodieken zullen leiden tot veiligheidsverhoging en efficiëntievergroting binnen het beheer, de toetsing en het versterken van waterkeringen door reductie van onzekerheden door gebruik van nauwkeurige en betrouwbare data en informatie in voldoende kwantiteit. Daarnaast werkt het ondersteunend bij de voorspelling van de sterkte van waterkeringen onder hoogwatersituaties. De gezamenlijke investeringen (overheid, bedrijven en kennisinstellingen) in de reeds uitgevoerde ontwikkelingen van IJkdijk en FloodControl 2015 bedragen inmiddels meer dan 40 miljoen euro. LiveDijk Utrecht maakt onderdeel uit van het Tweede IJkdijk-ontwikkelprogramma en past daarmee met de behaalde resultaten ook in dit brede kader.

AGT International en TNO onderzoeken in LiveDijk Utrecht naar besparingsmogelijkheden bij het beheer van waterkeringen door de inzet van innovatieve, op sensortechnologie en real time stabiliteitsmodellen gebaseerde informatie voor dijkbeheerders. Dit vindt plaats op basis van de volgende criteria:

- Afgekeurd in het kader van de toets op veiligheid, en met reden om dit te monitoren voor een betere onderbouwing;
- Het beheerdersoordeel dient/kan nader (te) worden onderbouwd
- Hydraulische randvoorwaarden wijzigen nog significant in het kader van Deltaprogramma ontwikkelingen;
- Trajecten die zijn afgekeurd op faalmechanismen waarvan wordt verwacht dat door kennisontwikkeling in de komende jaren het toets oordeel nog significant kan

veranderen (piping, zettingsvloeiing, stabiliteit slappe ondergrond) en daarmee de noodzaak voor versterking.

Op dijktracé'strajecten/strekkingen met bovenstaande kenmerken worden in samenwerking met de beheerders in Utrecht LiveDijk locaties ontwikkeld. LiveDijk locaties zijn "echte" dijken die worden gemonitord met sensoren en software voor het voorspellen en signaleren van mogelijke verstoringen/risico's. Uit de ervaringen die in de afgelopen periode zijn opgedaan in IJkdijk en LiveDijk projecten blijken de verwachtingen en resultaten van positieve waarde voor het dagelijks beheer van waterkering beheerders voor zowel efficiency vergroting van bestedingen als inzicht in de waterveiligheid.

De doelstelling van het onderzoekstraject, zoals opgemaakt in de samenwerkingsovereenkomst daterend uit augustus 2011, van LiveDijk Utrecht is te laten zien hoe nieuwe technologieën en kennis te introduceren voor specialisten op het gebied van waterbeheer door middel van een "LiveDijk" pilot. Het succesvol toepassen van de pilot stelt de beheerders van de waterkeringen in staat om landelijk en inhoudelijk mee te werken aan verder onderzoek en ontwikkeling op dit gebied en ook om deze kennis en technologie praktisch toe te passen en te gebruiken bij de uitvoering van hun primaire taken.

1.3 Doelstellingen

Het project LiveDijk Utrecht was gericht op het bereiken van elf volgende doelstellingen:

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

Voor deze doelstellingen geldt dat ze de belangen van de verschillende belanghebbenden sterk overlappend afdekken.

1.4 Uitvoering op hoofdlijnen

TNO heeft het project uitgevoerd met partner AGT.

- TNO was overall projectleider, en heeft zorg gedragen voor de totale totstandkoming van het monitoringsysteem. Alle in het veld geplaatste sensoren zijn aangesloten voor analyse en opslagdoeleinden op het TNO AnySenseConnect platform.
- AGT heeft het dashboard genaamd ReadyMind geleverd binnen het project.

Binnen het project zijn een aantal toeleveranciers geselecteerd die het benodigde kennis sensorsystemen hebben geleverd. De toeleveranciers waren:

- Deltares: heeft voor het project op basis van ondergrondinformatie, inspecties en sonderingen een faalmechanisme analyse gemaakt en sensor systemen geselecteerd en begeleid bij installatie. Daarnaast heeft Deltares ook modellen ontwikkeld waarmee de sensorgegevens werden gebruikt om actuele stabiliteitsberekeningen uit te voeren.
- AlertSolutions: heeft voor zowel de Voorhavendijk als de Grechtdijk een sensorsysteem geleverd genaamd GeoBeads, waarmee op alle grondlagen de temperatuur, de hoekverdraaiing en poriëndruk is gemeten. Op de Voorhavendijk is ook een GeoBead module geplaatst om het waterpeil te kunnen meten.
- TenCate: heeft voor de Grechtdijk een sensorsysteem geleverd genaamd GeoDetect. Hiermee is onder de oppervlakte van de dijk over lange lengte de temperatuur geregistreerd.
- Koenders Instrument: heeft een neerslagmeter geplaatst bij de Grechtdijk om regen nauwkeurig over de tijd te registreren. De meetgegevens bleken echter in de analyse niet te correleren aan de temperatuurmetingen van het GeoDetect van Ten Cate en zijn verder niet betrokken in de analyse.

1.5 Uitvoering deelprojecten in meer detail

Het project LiveDijk Utrecht kende een aantal fasen en deelprojecten die samen het geheel vormden. Deze zijn als volgt te benoemen.

- a. Selectie van waterkeringen, rekening houdend met kaders die van toepassing waren
- b. Bodemonderzoek en sonderingen van de gekozen waterkeringen om te komen tot een goed inzicht in de opbouw van de dijken.
- c. Opstellen meetplan (door Deltares) waarin faalmechanismen, te meten grootheden en sensortypes werden onderbouwd
- d. Selectie en toewijzen levering sensorsysteem door leveranciers
- e. Vergunningsaanvraag bij gemeenten
- f. Installatie sensorsystemen
- g. Koppeling sensorsystemen aan dataopslag en sterkteberekeningsmodellen
- h. Koppeling systemen aan realtime dijkmonitoringsdashboard
- i. Uitrol en ingebruikname dijkmonitoringsdashboard door HDSR, RWS, en provincie Utrecht.
- j. Evaluatie, na 2 jaar meten. Is uiteindelijk na 2 ½ jaar gedaan omdat beide dijken 6 maanden langer hebben doorgemeten dan in de oorspronkelijke opdracht geborgd was.

Het overall aansturen en op elkaar laten aansluiten van de genoemde stappen werden gecoördineerd door TNO.

1.5.1 Grechtdijk

De Grechtdijk is op advies van Deltares op de volgende grootheden bemeten:

- Hoekverdraaiing, in twee meetraaien, op alle bodemlagen van de dijk
- Temperatuur, in twee meetraaien, op alle bodemlagen van de dijk
- Poriëndruk, in twee meetraaien, op alle bodemlagen van de dijk
- Temperatuur, continue gemeten onder het oppervlak van de dijk over 500 meter, te weten onder de kruin en aan de teen van de binnenkant van de dijk.
- Waterpeil in de Grecht
- Neerslag

Hoekverdraaiing, temperatuur, en poriëndruk zijn door het GeoBeads systeem van de AlertSolutions gemeten. Neerslag is gemeten door een regenmeter geleverd door de firma Koenders Instruments. En tot slot is de continue temperatuurmeting verzorgd door een sensorsysteem genaamd GeoDetect door de firma TenCate.

1.5.2 Voorhavendijk

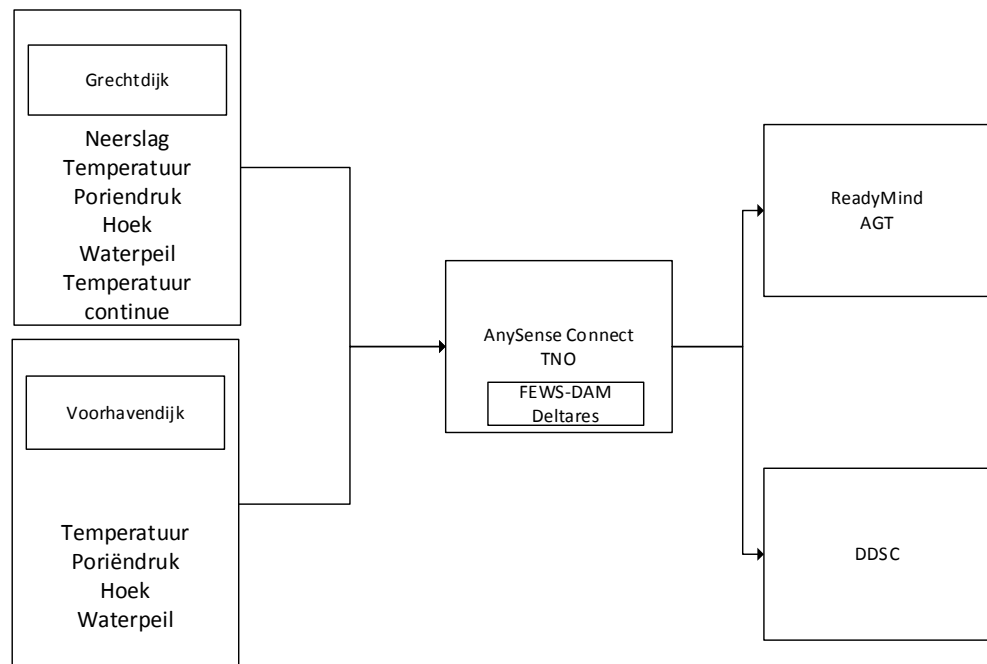
De Voorhavendijk is op advies van Deltares op de volgende grootheden bemeten:

- Hoekverdraaiing, in twee meetraaien, op alle bodemlagen van de dijk
- Temperatuur, in twee meetraaien, op alle bodemlagen van de dijk
- Poriëndruk, in twee meetraaien, op alle bodemlagen van de dijk
- Waterpeil in het Lekkanaal

Alle gegevens zijn ingewonnen door een sensorsysteem genaamd GeoBeads geleverd door AlertSolutions.

1.6 Systemen en toekomstvisie

Het ontwikkelde monitoringssysteem voor de LiveDijk Utrecht kan als volgt worden geschetst.



Links in deze figuur staan schematisch de aangesloten sensorsystemen van beide dijken. Die leveren alle informatie aan het sensoropslagplatform AnySense Connect van TNO. AnySense Connect zorgt vervolgens voor synchronisatie met dijksterkteberekeningsmodellen die Deltares heeft gemaakt, genaamd FEWS-DAM. De uitvoer van deze modellen en ook de sensorwaarden zelf worden middels het realtime dashboard genaamd ReadyMind van AGT International beschikbaar gesteld. AnySense Connect exporteert ook de data naar het DDSC, waarmee de data kan worden toegevoegd aan de informatie die uit andere LiveDijk projecten wordt verkregen voor verdere analyse en kennisontwikkeling over het gedrag van dijken en het optreden van faalmechanismen buiten het LiveDijk Utrecht project.

2 Uitvoering project

2.1 Inleiding

In LiveDijk Utrecht zijn verschillende grootheden direct of indirect gemeten met als doel om informatie te verzamelen over de relevante faalmechanismen die op de twee dijkstrekkings van toepassing zijn. In het meetvoorstel (zie rapport Deltares 1205904-000-GEO-0004) zijn de relevante faalmechanismen en bijbehorende parameters benoemd en beschreven. Hieronder zijn deze faalmechanismen en parameters nogmaals vermeld:

Relevante faalmechanismen:

Voorhavendijk:

- Macrostabiliteit;
- Microstabiliteit
- Stabiliteit Bekleding;
- Piping.

Grechtdijk

- Macro Stabiliteit binnenwaarts;
- Verlies aan stabiliteit ten gevolge van verdroging

Relevante Parameters:

Voorhavendijk:

- Waterspanningen
- Vervorming

Grechtdijk:

- Waterspanningen
- Temperatuur
- Vervorming

De genoemde parameters zijn gemeten met de meetsystemen van Ten Cate en van AlertSolutions. Vanwege financiële beperkingen konden vervormingsmetingen niet worden uitgevoerd.

In dit hoofdstuk worden de uitgevoerde metingen besproken. Alvorens de metingen te bespreken wordt eerst de installatie van de meetinstrumenten besproken.

2.2 Installatie

Dit hoofdstuk beschrijft de wijze van installeren en de bevindingen daarbij. Overigens is er bij de Grechtdijk ook nog een regenmeter geplaatst zodat de actuele neerslag ook bekend is.

2.2.1 Glasvezelkabel

In de Grechtdijk is een glasvezelkabel ingegraven in de binnenteen en in de kruin van de dijk. Gepland was om de sleuven in de binnenteen en halverwege het talud te graven, maar dit is vermoedelijk om uitvoeringstechnische redenen gewijzigd naar de kruin en binnenteen. Het plaatsen is gebeurd door met een graafmachine een sleuf van ongeveer een halve meter breed en halve meter (teen) tot ca. 1 meter diep (kruin) te graven. In de sleuf is vervolgens de glasvezelkabel geplaatst en daarna weer aangevuld met grond.

De gehanteerde werkwijze heeft een aantal nadelen. Ten eerste wordt zowel in de kruin als in de teen van de dijk de grond geroerd. Hierdoor beschadigd de grasmat en de toplaag en wordt de sterkte van de dijk (tijdelijk) aangetast. Echter door voorzichtig te ontgraven, bij aanvullen de sleuf weer goed te verdichten en de afgestoken grasplaggen weer sluitend aan te brengen zal de schade aan de dijk beperkt tot verwaarloosbaar zijn.

Overigens is de gehanteerde werkwijze zowel uitvoeringstechnisch als prijstechnisch op dit moment de meest voor de hand liggende werkwijze.

De ligging van de glasvezelkabel is door TenCate ingemeten met GPS, de ligging is van belang om de metingen te kunnen interpreteren.

Navolgende foto geeft een indruk van de installatie van het geotextiel met daarin de glasvezelkabel.



Figuur 2.1 Installatie GeoDetect (foto van TenCate)

2.2.2 GeoBeads

De GeoBeads zijn in beide dijkstrekkings geplaatst. Om de exacte plaatsingsdiepte van de sensoren te bepalen is eerst een sondering gemaakt waarmee de bodemopbouw ter plaatse inzichtelijk is gemaakt. De plaatsing van de GeoBeads is tijdens installatie beschouwd en hierbij zijn de volgende opmerkingen gemaakt.

De GeoBeads zijn verloren geplaatst door de instrumenten met een buis weg te drukken en vervolgens de buis weer omhoog te trekken en het overgebleven gat te vullen met kleispoeling. Dit maakt dat naderhand diepteligging van het instrument niet meer te controleren is (wat in geval van zetting of twijfel wenselijk kan zijn) en verwijderen en herplaatsen van het instrument is ook niet mogelijk.

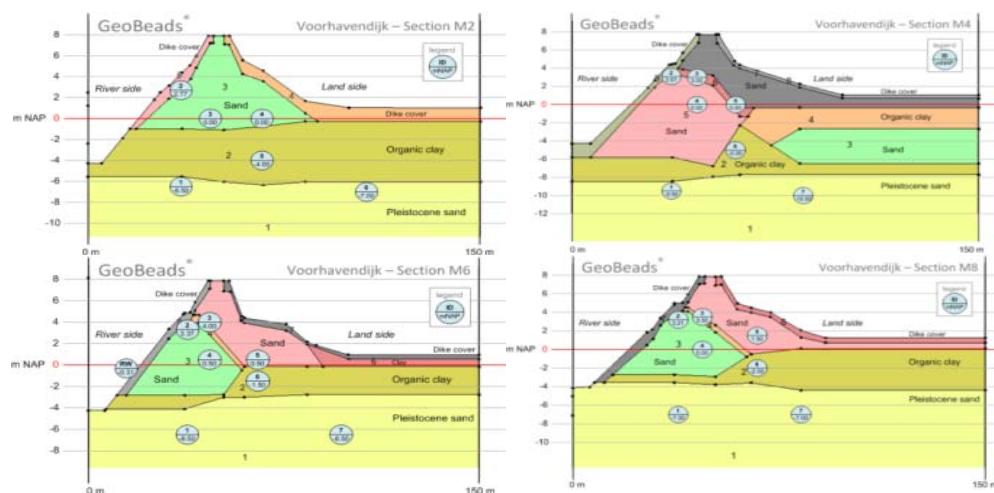
Met betrekking tot het instrument zelf wordt opgemerkt dat het filter van het instrument in een gat in het instrument is geplaatst waarbij het filter ca 1cm tov de buitenwand naar binnen is geplaatst. Hierdoor ontstaat het risico dat er in de ca 1cm diepe ruimte tussen en filter en schacht luchtinsluiting ontstaat en dit de werking van het instrument en of de nauwkeurigheid negatief beïnvloed. Het valt echter niet met zekerheid te zeggen of dit wel of niet gebeurd is.

2.3 Overzicht metingen

2.3.1 Voorhavendijk

De metingen in de Voorhavendijk zijn uitgevoerd met GeoBeads. In deze instrumenten worden drie grootheden gemeten. Temperatuur, (water)druk en lokale inclinatie (hoekverdraaiing). Er zijn vier meetraaien geïnstrumenteerd met elk 6 of 7 instrumenten. Bijlage 1 geeft een overzicht van de plaatsingsgegevens.

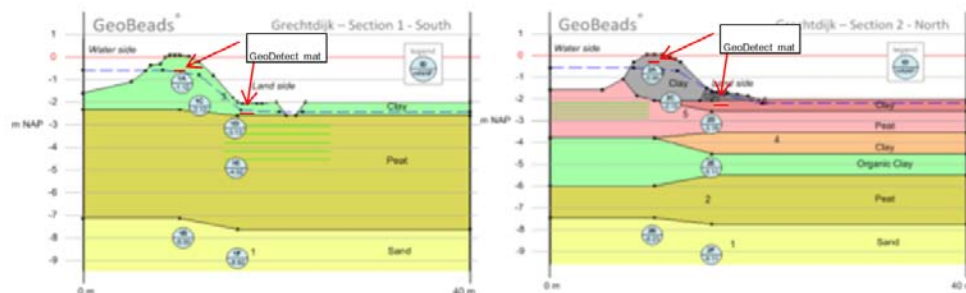
Navolgende figuren laten (bij benadering) de locatie van de sensoren in de verschillende raaien zien.



2.3.2 Grechtdijk

In de Grechtdijk zijn twee raaien geïnstrumenteerd en zijn waterspanningen, temperatuur en lokale inclinatie gemeten met GeoBeads die in de grond zijn gedrukt en zijn verbonden met een datalogger. Bijlage 1 geeft een overzicht van de plaatsingsgegevens.

Navolgende figuren laten de locatie van de sensoren in de verschillende raaien zien.



Verder is er in de Grechtdijk een geotextiel aangebracht in de teen van de dijk en een deel van de kruin. In dit textiel is een glasvezelkabel verwerkt waarmee temperatuur van de kabel gemeten kan worden en er is een kabel in verwerkt waarmee lokale rekken gemeten kunnen worden. Er zijn alleen, temperatuurmetingen uitgevoerd. Omdat de glasvezelkabel omsloten ligt door grond is deze temperatuur gelijk aan de temperatuur van de grond. Het meten van temperatuur met glasvezelkabel is vooral geschikt om nauwkeurig relatieve verandering in temperatuur waar te nemen. Een verandering in temperatuur zou kunnen duiden op een verandering in de gesteldheid van de dijk.

2.4 Analyse metingen

De metingen zijn technisch geanalyseerd om te beoordelen of de metingen betrouwbaar en correct zijn. Een aantal zaken zijn van belang bij geotechnische monitoring, vooral als het gaat om monitoring die eventueel in calamiteiten situaties moet worden toegepast. Beoordeeld zijn de insteltijd van de sensoren, hoe lang duurt het voordat een geplaatste sensor betrouwbare meetwaarden geeft. Er is gekeken naar de data continuïteit. Komen de metingen continue binnen of zijn er hiaten en zo ja hoeveel, hoelang en waarom. Verder is er beoordeeld of er verloop of drift in de metingen zit. Gaan meetinstrumenten ineens of in de loop van de tijd meetwaarde geven die gaan verlopen naar een hogere of lagere waarde zonder dat daarvoor een aanwijsbare reden is. Als laatste is onderzocht of de metingen betrouwbaar zijn. Geeft het meetinstrument een waarde af die daadwerkelijk weergeeft hoe de toestand van de dijk daar ter plaatse is.

2.4.1 Insteltijd

Onder insteltijd wordt de tijd verstaan tussen het aanbrengen van de meetapparatuur en het moment dat er betrouwbare metingen worden gegeven. De insteltijd is afhankelijk van de wijze van aanbrengen, de grondsoort waarin wordt aangebracht en de parameter die gemeten dient te worden. Van 'traditionele', met een sondeerstelling weggedrukte waterspanningsmeters is bekend dat de insteltijd varieert van hooguit enkele uren in zand tot enkele dagen in zeer ondoorlatende klei. Deze insteltijd is afhankelijk van de consolidatie snelheid van de grond.

Voor een project als de LiveDijk Utrecht is de insteltijd van niet zo groot belang, zolang de insteltijd tot een paar dagen beperkt blijft. In het geval dat sensoren

worden geplaatst om een dreigende calamiteit of aankomend extreem hoogwater te monitoren is het van belang dat de insteltijd zeer kort is.

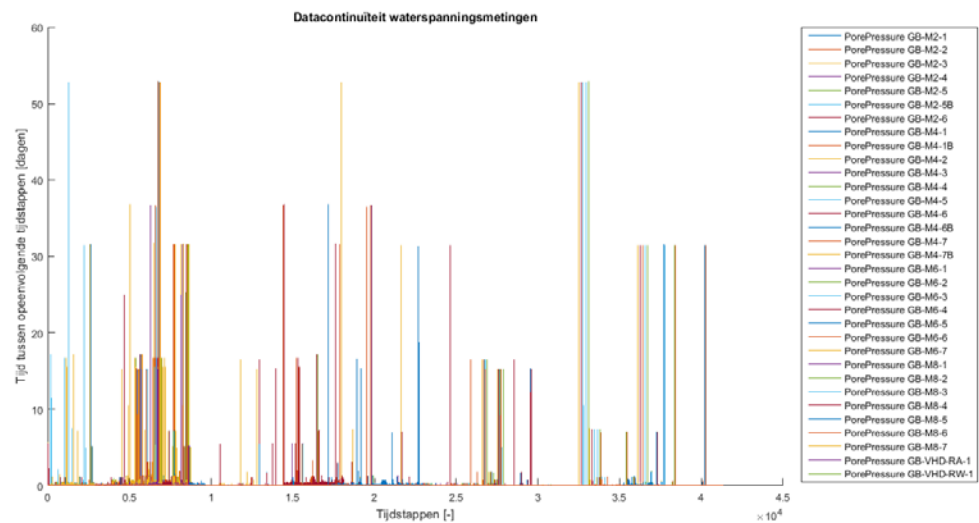
Ondanks dat de insteltijd voor de LiveDijk Utrecht van minder groot belang is, is deze ook niet te beoordelen. Dit komt doordat de tijd tussen het plaatsen van de instrumenten en het beschikbaar komen van de eerste metingen dusdanig lang is dat een verloop in de metingen ten gevolge van het installeren niet waarneembaar is.

2.4.2 Datacontinuïteit

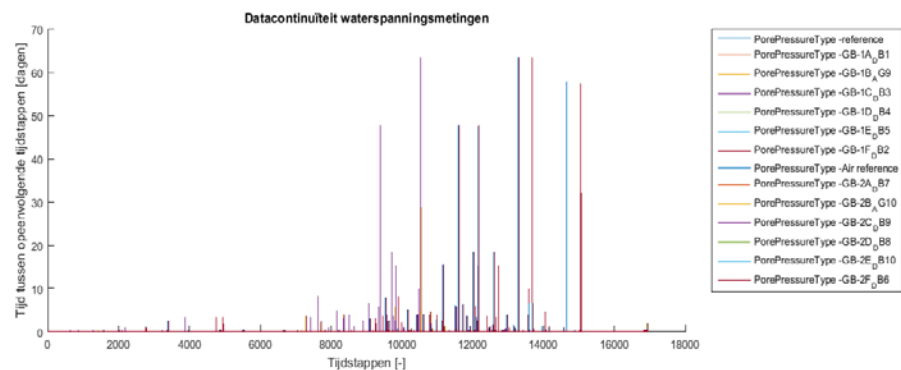
In de meetreeksen zijn op verschillende momenten gaten waar te nemen. In deze gaten zijn geen metingen uitgevoerd of zijn de metingen niet bij de dataserver binnengekomen. Afhankelijk van het gebruiksdoel van de metingen en de lengte van de gaten zijn deze gaten meer of minder problematisch. In het geval dat sensordata wordt gebruikt voor calamiteitenbeheersing is het zeer onwenselijk dat er onderbrekingen optreden. De meting in de Voorhavendijk zijn op een aantal momenten onderbroken. Ook de temperatuurmeting in de Grechtdijk kent ook onderbrekingen. De exacte oorzaak van de onderbrekingen in de metingen is niet onderzocht, maar van de onderbrekingen op de Voorhavendijk is bekend dat daar sensoren kapot zijn gegaan en dat er een onderbreking is geweest van de stroomvoorziening waardoor er geen metingen werden uitgevoerd. De oorzaak van de onderbreking op de Grechtdijk is onbekend, maar vermoedelijk heeft het te maken met een storing in de meetunit van de glasvezelkabel of transfer van data naar de server.

In onderstaande figuren is, ter illustratie, het aantal onderbrekingen in de waterspanningsmetingen van de Voorhavendijk en de Grechtdijk weergegeven. Deze waterspanning zijn gemeten door GeoBeads. Op de x-as is het aantal tijdstappen (meetmomenten) uitgezet en op de y-as de tijd in dagen tussen de opeenvolgende tijdstappen. Opvallend is er een zeer groot aantal opeenvolgende tijdstappen zijn waar meerdere dagen tussen de opeenvolgende metingen zit. De tijd tussen de metingen kan oplopen tot ruim boven de 50 dagen. Dit is zeer lang en zeer onwenselijk. Figuur 2.4 laat, als voorbeeld, de waterspanningen in raai M2 van de Voorhavendijk weer. In de figuur zijn meerder 'data gaten' te onderscheiden doordat in de metingen een rechte lijn zichtbaar is. De getekende ellips duidt een van deze gaten aan.

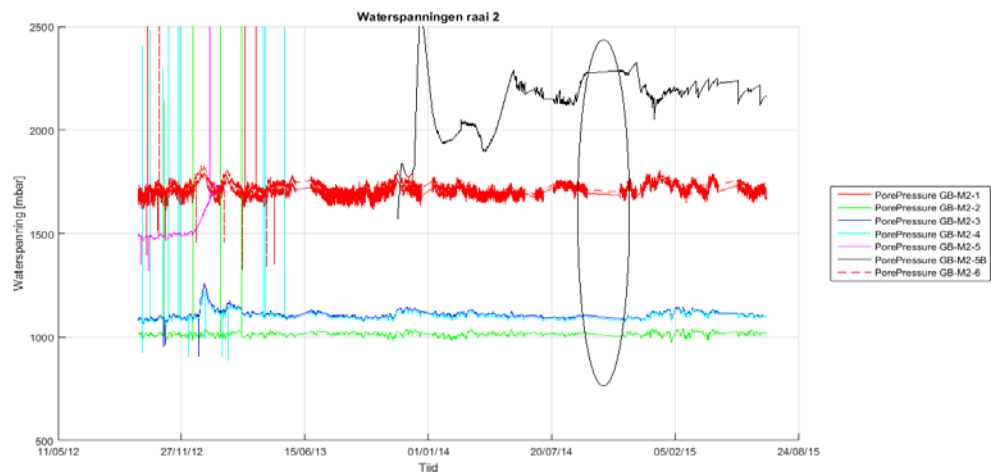
Er is in al deze figuren geen onderscheid gemaakt in oorzaak van de onderbreking. De oorzaken zijn overigens ook niet allemaal bekend, echter zijn er een aantal onderbrekingen geweest in verband met haperende instrumenten. Er zijn storingen geweest in de data verbinding van het gehele systeem en er zijn onderbrekingen geweest vanwege stroomuitval door lege dan wel kapotte accu's. Het definitief uitvallen van een instrument is alleen in de Figuur 2.4 te zien.



Figuur 2.2 Onderbrekingen in meetreeks Voorhavendijk



Figuur 2.3 Onderbrekingen in meetreeks Grechtdijk



Figuur 2.4 Dataonderbrekingen Voorhavendijk raai M2

Uit analyse van de metingen blijkt dat er bij de Voorhavendijk net voor het hoge water sensoren uitvallen. Afgezien van het feit dat het hoogwater niet zo bijzonder hoog was, is het wel illustratief in meer generieke zin: wat is de betekenis van een eventuele garantie van een leverancier van de doorgifte van data? Stel dat deze

een bedrijfszekerheid van 99,98% garandeert. Is die 0,02% uitval (1/5000 van het totaal) willekeurig verspreid in de tijd? Of zou er ten dele een verband kunnen zijn met extreme omstandigheden, zoals zeer zware storm, extreme regenval, extreem hoogwater? Dat is op zichzelf goed voorstelbaar, maar in feite onacceptabel gelet op de toepassing. Vervolgens is het de vraag wat kan gebeuren indien een afgegeven garantie niet wordt nagekomen. Op juridisch vlak kan een overeenkomst dan wel goed in elkaar zitten (zelfs in het geval van verwijtbare aansprakelijkheid bij een dijkdoorbraak), maar meer praktisch gezien is er toch sprake van een probleem wanneer dit samenvalt met extreme omstandigheden. Ten slotte is er de mogelijkheid van uitval van de sensoren zelf, zodat er geen data meer beschikbaar komt om door te geven. Hoe dient daar mee te worden omgegaan? Het aanbrengen van meerdere sensoren voor hetzelfde doel kan hier ten dele een oplossing bieden, maar ook daar zitten beperkingen aan. Verder is het is aan te bevelen om in project als LiveDijk Utrecht afspraken te maken om storingen binnen een vooraf bepaalde termijn op te lossen.

Opgemerkt wordt dat in het najaar van 2013 kapotte GeoBeads zijn vervangen door nieuwe. In deze nieuwe GeoBeads zijn technische wijzigingen aangebracht, die naar verwachting van de leverancier de levensduur moeten vergroten. De metingen hebben inderdaad tot het eind van de meetperiode gemeten.

2.4.3 Verloop

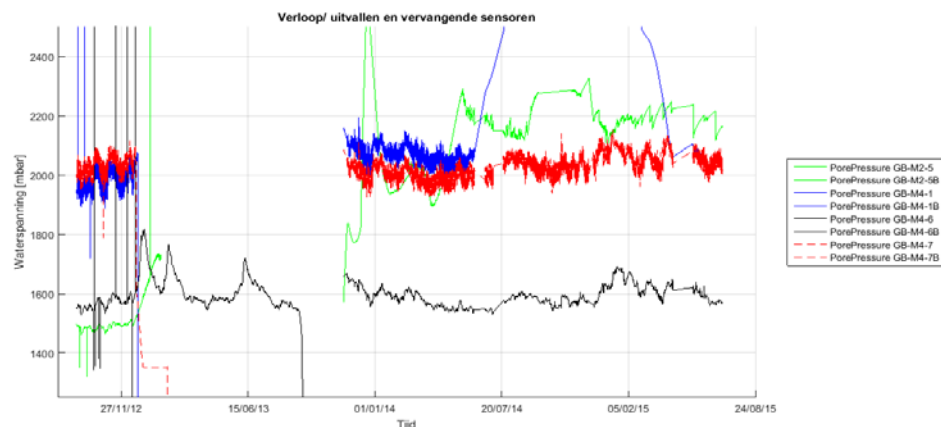
Met verloop in metingen wordt bedoeld het verlopen van de meetwaarde als temperatuur of druk zonder dat de temperatuur of druk daadwerkelijk veranderd. De doorgegeven waardes zijn daardoor niet meer betrouwbaar. Verloop in meetwaardes kan verscheidene oorzaken hebben. Zo kan het meetinstrument technisch (mechanisch, elektronisch of softwarematig) niet goed functioneren. Verder is het ook mogelijk dat er in het instrument gasvorming ontstaat waardoor de druk in het instrument oploopt en de gemeten druk niet representatief is voor de omliggende grond.

Figuur 2.5 is een weergave van de 4 waterspanningsmeters in de Voorhavendijk die verloop en uitval laten zien. De metingen van de vervangende instrumenten is ook opgenomen in de grafiek. In deze meting is te zien dat een aantal sensoren af en toe een onrealistische meting uitvoert met een piek in de meting tot gevolg. Daarnaast is te zien dat een aantal metingen verloopt, dit is vooral goed te zien in meting M4-1B. Verloop is onwenselijk. Vooral omdat het zo kan zijn dat er in eerste instantie een ogenschijnlijk correcte meting wordt doorgegeven die pas na het uitvallen van de gehele sensor in twijfel wordt getrokken. Dit is bijvoorbeeld het geval bij meting M2-5. Dit pleit ervoor om nooit op een sensor af te gaan maar te kijken naar het bredere beeld van meerdere sensoren.

Verloop, ook wel drift genoemd, van instrumenten is een bekend probleem. Oorzaken zoals gasvorming is in een groot aantal van de gevallen te voorkomen. Technische mankementen zijn niet altijd te voorkomen, er kan de pech zijn dat een instrument niet naar behoren functioneert. Echter mag er van een leverancier wel verlangd worden dat slechts een zeer beperkt percentage van de instrumenten storing heeft of uitvalt. In de Voorhavendijk zijn 4 van de 27 instrumenten voortijdig uitgevallen. Dit is 14.8%. Van de herplaatste instrumenten geven 2 instrumenten

vervolgens onbetrouwbare/ foutieve waterspanningsmetingen. Of dit uitvalpercentage acceptabel is of niet is afhankelijk van het aantal sensoren, de belangrijkheid van de betreffende sensoren en de wens en/of eis van de opdrachtgever. Uitval van sensoren is minder problematisch als er snel vervangende sensoren geplaatst kunnen worden.

Het uitvallen of verlopen van metingen heeft in het geval van waterspanning niets te maken met het innovatieve karakter van het LiveDijk Utrecht project, omdat de meting op zichzelf niet innovatief is. Verwacht had mogen worden dat er minder uitval en/of verloop van de metingen had plaatsgevonden.

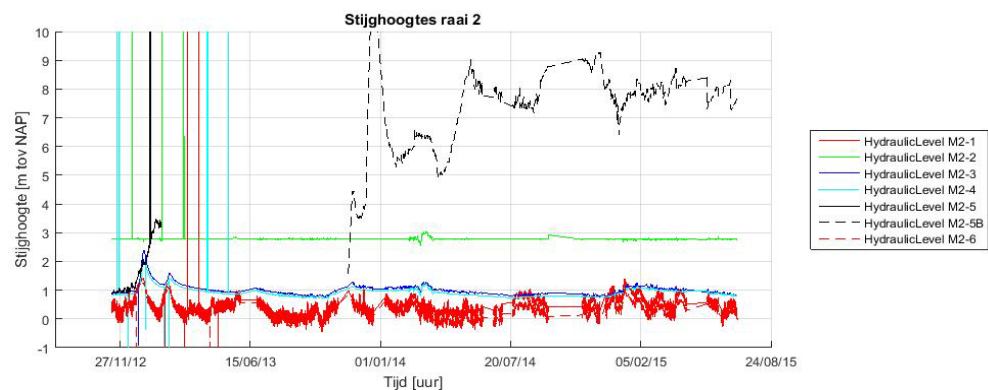


Figuur 2.5 Waterspanningsmetingen Voorhavendijk met daarin 'verloop' en uitval van de metingen

2.4.4 Correctheid metingen Voorhavendijk

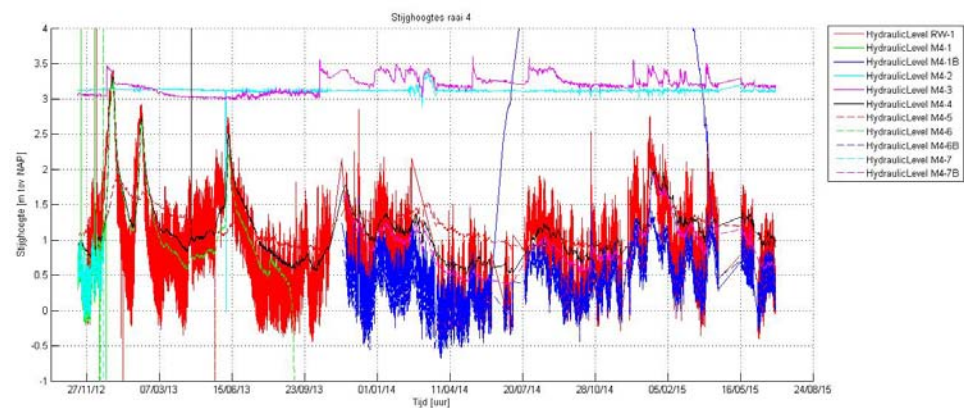
Beschouwd is of de gemeten waardes enigszins realistisch zijn. Navolgende grafieken geven de stijghoogtes weer van de vier meetraaien op de Voorhavendijk met daarbij ook de waterstand gemeten in de Voorhaven. In voorgaande paragraaf is al aangegeven dat een aantal sensoren geen correct beeld geven en defect gaan. Daarnaast is echter in de grafieken goed te zien dat de sensoren die in contact staan met het buitenwater reageren op de verhoging in het buitenwater. Dit is zoals verwacht. Verder is er een aantal sensoren die een groot deel van de tijd droog staan omdat op de locatie van de sensor geen contact is met het buitenwater. Echter bij het hoogwater op de Lek in de winter van 2012/2013 is te zien dat de piek van het hoogwater ook een aantal sensoren die anders droog staan laat toenemen.

In Raai 6 is de bovenste lijn onbetrouwbaar omdat er geen overeenkomst in patroon met de andere lijnen is. Daarnaast is de gegeven waarde voor een groot deel van de tijd lager dan de plaatsingsdiepte. Dit is onmogelijk. Overigens dient opgemerkt te worden dat sensoren die boven de grondwaterstand geplaatst zijn, gevoeliger zijn voor foutieve weergave doordat er lucht of gas in het filter komt en dit niet of niet direct verdwijnt als er water bij het filter komt. Hierdoor wordt mogelijk de waterdruk niet goed doorgegeven.



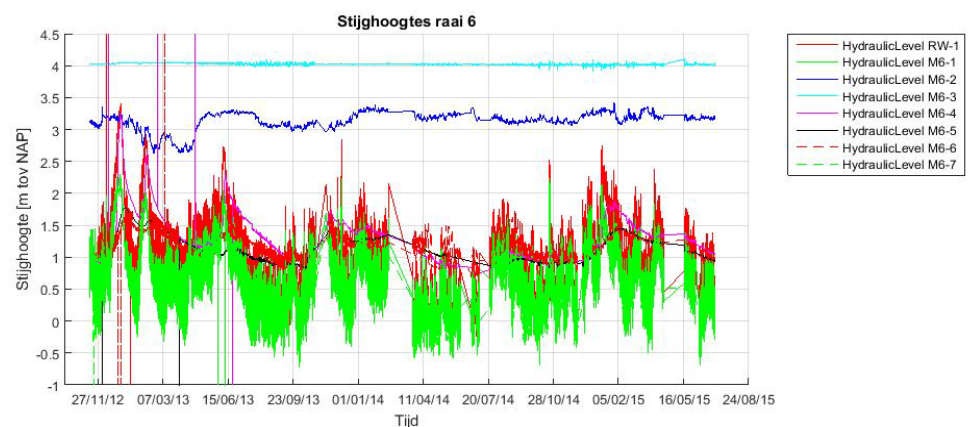
Figuur 2.6 Stijghoogtes in raai M2, Voorhavendijk

Opvallend in raai M2 zijn de resultaten van sensor 5B. Dit is een vervangende sensor nadat sensor 5 kapot was gegaan. De weergegeven waarden van 5B zijn niet correct. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door het niet correct plaatsen van het instrument of ook deze sensor is defect.

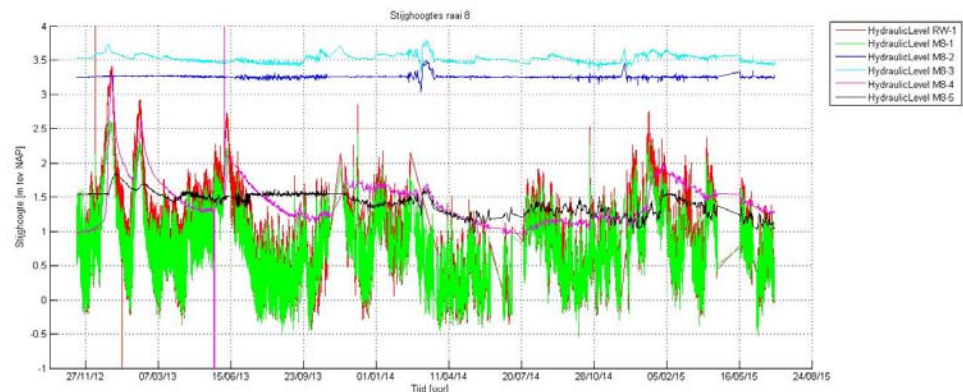


Figuur 2.7 Stijghoogtes in raai M4, Voorhavendijk

In raai M4 volgen de meeste sensoren de waterstand in de Voorhaven. De bovenste lijnen reageren pas als de buitenwaterstand wat hoger wordt. De vervangende sensor 1B heeft vanaf half 2014 tot mei 2015 een bijzonder en onrealistisch verloop (omhoog en weer terug), maar volgt daarna de andere sensoren



Figuur 2.8 Stijghoogtes in raai M6, Voorhavendijk

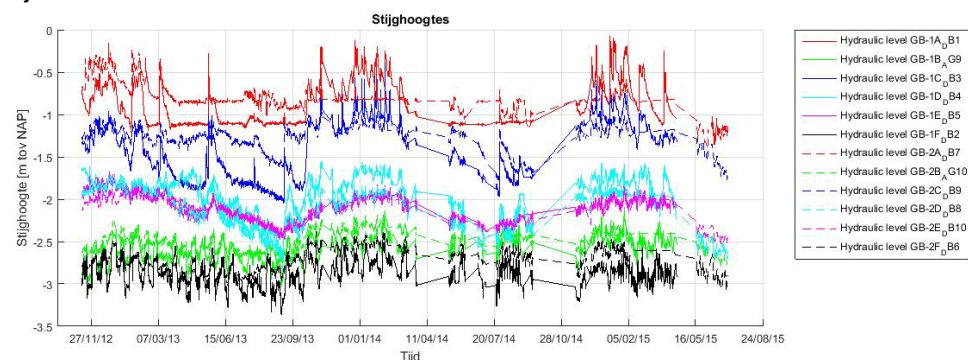


Figuur 2.9 Stijghoogtes in raai M8, Voorhavendijk

2.4.5 Correctheid metingen Grechtdijk

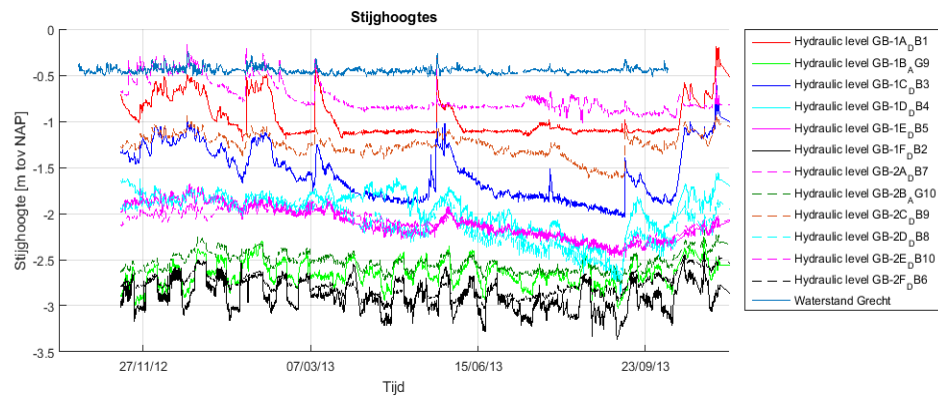
De correctheid van de gemeten waterspanningen door de GeoBeads en de temperatuur door de glasvezelkabel in de Grechtdijk is beoordeeld.

Figuur 2.11 is een weergave van de gemeten stijghoogtes in de tijd voor de gehele tijdreeks.



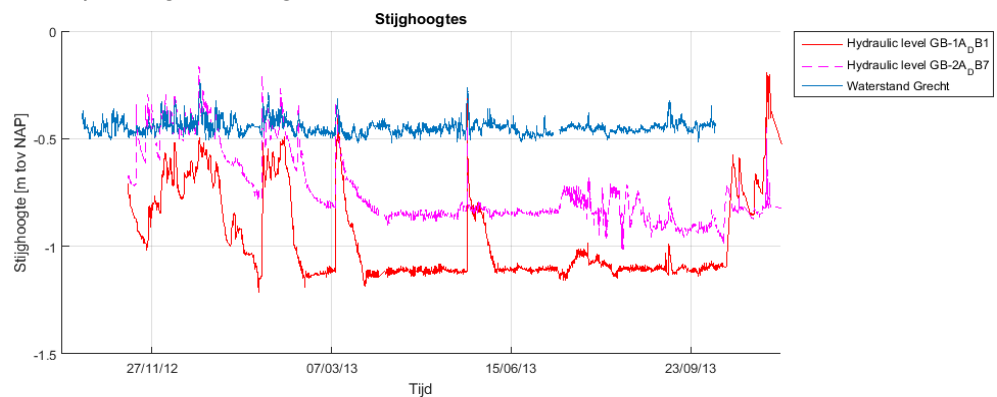
Figuur 2.10 Stijghoogtes in Grechtdijk

De waterspanningsmetingen in de Grechtdijk geven in de eerst meetperiode een continu beeld zonder onderbrekingen, in de tweede helft van de meetperiode zijn wel onderbrekingen te zien (rechte lijnen). Figuur 2.11 is een weergave van alleen het eerste gedeelte van de meetperiode. Voor deze periode is door het waterschap de meetwaarden van de waterstand in de Grecht aangeleverd. De waterstand in de Grecht is ook opgenomen in de grafiek.



Figuur 2.11 Stijghoogtes in Grechtdijk en waterstand in Grecht

In de figuur is waar te nemen dat pieken in de waterstand van de Grecht ook in een aantal waterspanningsmetingen wordt terug gezien. Dit is goed en betekend dat de waterspanningsmeters goed functioneren.



Figuur 2.12 Close ups stijghoogtes in Grechtdijk en waterstand in Grecht

In Figuur 2.12 is te zien dat de meting van sensor 2A boven de waterstand in de Grecht lijkt uit te pieken. Dit kan te maken hebben met het onnauwkeurig inmeten van de sensoren of een klein peilverschil in de Grecht op de plek van de GeoBeads en de locatie van de sensor die de stand in de Grecht meet. Sensor 2A zit in de dijk. Dit betekend dat de waterstand in de dijk over algemeen lager is dan boezempeil, maar min of meer gelijk wordt aan boezempeil bij een verhoogde waterstand in de Grecht. Een aantal andere metingen reageert ook sterk op een toename van de waterstand in de Grecht en je ziet daar ook een vertraagde afname naar een lager peil. Verder valt op dat alle metingen in de zomerperiode lagere waardes gaan aangeven en vervolgens tijdens de winter weer wat toenemen.

2.4.6 Temperatuurmetingen Grechtdijk

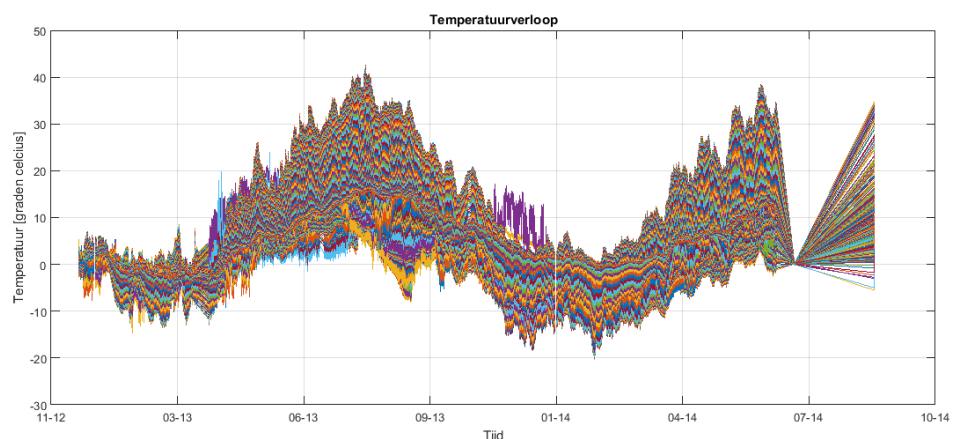
In de Grechtkade wordt zowel door de GeoBeads als door de GeoDetect glasvezelkabel temperatuur gemeten. Temperatuurmetingen zijn in veel vakgebieden gemeengoed, maar nog niet in de monitoring van Nederlandse dijken. Er is in de Grechtkade temperatuur gemeten door middel van metingen in een glasvezelkabel. In deze kabel is om de 80 cm een virtueel meetpunt ingesteld waar de temperatuur wordt gemeten. De geplaatste GeoBeads meten ook temperatuur binnenin de geplaatste modules.

Allereerst wordt opgemerkt dat van de GeoDetect metingen niet de gehele meetperiode beschikbaar is voor analyse. Tijdens een aanpassing aan de meetkast is er vermoedelijk een instelling veranderd waardoor foutieve temperatuurwaardes werden berekend. Alle meetwaardes na juni 2014 zijn daardoor niet bruikbaar.

De temperatuurmetingen zijn geanalyseerd. Allereerst wordt opgemerkt dat er zeer veel temperatuurmetingen zijn geproduceerd, omdat de glasvezelkabel iedere 80cm, over een lengte van meer dan 1550 meter, elke uur, 4 jaar lang, een metingen genereert. Dit maakt analyse tijdsintensief en bewerkelijk, vooral omdat er nog weinig ervaring is met temperatuurmetingen in dijken en het niet bij voorbaat vast staat waarop gelet moet worden in de metingen. Daarnaast is geconstateerd dat niet de volledige meetperiode is gedekt met goede metingen. In 2015 zijn meetwaarde gegenereerd die variëren tussen de -100 en +250. Dit is dusdanig ongeloofwaardig dat deze metingen niet zijn gepresenteerd.

In de analyses van een van de Piping proeven die op de IJkdijklocatie in Groningen zijn uitgevoerd is in de analyse gekeken naar de temperatuurgradiënt van naast elkaar gelegen meetpunten. Dit is ook gedaan voor de temperatuurmetingen in de Grechtdijk. In de analyse van de IJkdijkproef waren ook andere, in het bijzonder, visuele waarnemingen beschikbaar waardoor opvallende gradiënten aan visuele waarnemingen gekoppeld konden worden en er geconstateerd werd dat op het moment dat de gradiënt veranderd er ook daadwerkelijk wat in het veld gebeurde. Helaas zijn er geen visuele waarnemingen van de Grechtdijk beschikbaar. Gedurende het LiveDijk Utrecht project is wel aanbevolen om het meetsysteem te wijzigen en op basis van veranderende temperatuurgradiënten buiten in het veld te gaan kijken, maar deze verandering is niet doorgevoerd.

In de analyse van de temperatuurmetingen is gezocht naar trends of eigenaardigheden in de metingen die kunnen duiden op een gebeurtenis in de dijk of op ruis of foutieve metingen. Allereerst wordt in Figuur 2.13 een overzicht gegeven van de temperatuurmetingen gemeten door de TenCate glasvezelkabel.

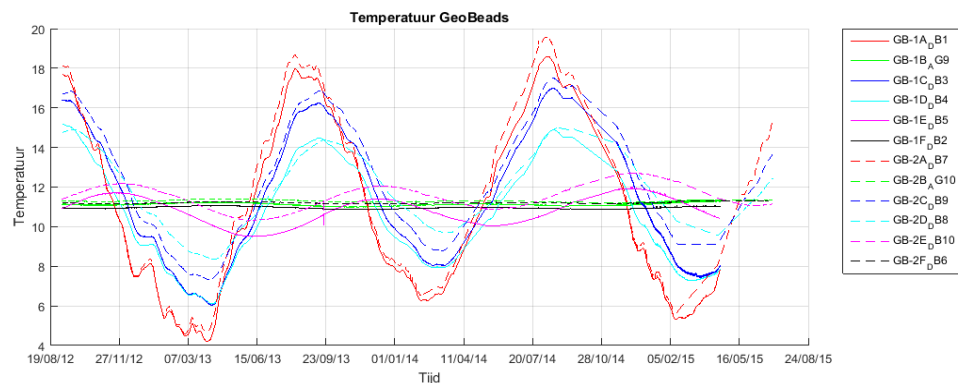


Figuur 2.13 Temperatuurmetingen in de tijd van alle metingen in de teen en kruin van de Grechtdijk

In Figuur 2.13 is te zien dat de temperatuur in de winter laag is en richting de zomer toeneemt en in de zomer hoog is. De absolute waarde van de metingen zijn niet betrouwbaar omdat er geen correctie op de metingen is uitgevoerd voor de

absolute temperatuur. De metingen zijn vooral geschikt voor het waarnemen van relatieve temperatuursveranderingen.

Figuur 2.14 is een weergave van de temperatuurmetingen uitgevoerd door de GeoBeads. Ook hierin is duidelijk het seizoen zichtbaar. Verder is waar te nemen dat hoe dieper de sensor in de grond is geplaatst, hoe minder gevoelig deze is voor invloed van de buitentemperatuur.



Figuur 2.14 Temperatuurmetingen door de GeoBeads

De temperatuurmetingen van GeoDetect geven meer schommelingen weer dan de metingen van de GeoBeads. Dit wordt vooral veroorzaakt het verschil in diepte ligging van de sensoren en daardoor de gevoeligheid voor temperatuurschommelingen in de buitenlucht.

In navolging van onderzoek aan de IJkdijkmetingen is doormiddel van het bepalen van gradiënten tussen naast elkaar gelegen meetpunten onderzocht of er afwijkingen in de metingen optreden die duiden op een verandering in de situatie op de dijk. De gradiënt is als volgt bepaald:

$$\Delta = \frac{T_2 - T_1}{x_{T_2} - x_{T_1}}$$

Waarin:

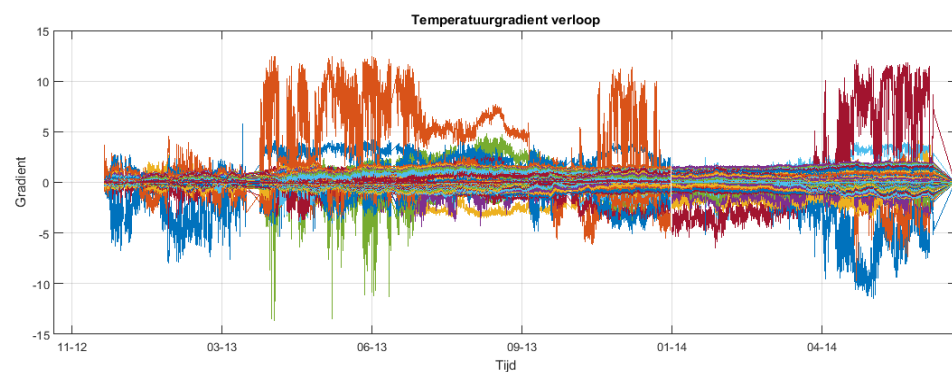
- Δ gradiënt [-]
- T_1 temperatuur in meetpunt 1
- T_2 temperatuur in meetpunt 2
- x_{T_1} locatie meetpunt 1
- x_{T_2} locatie meetpunt 2

Bij de analyse van de IJkdijkmetingen kon achteraf een grenswaarde voor de gradiënt worden aangegeven door een verandering in gradiënt te koppelen aan veldwaarnemingen. Bij het ontstaan van zand meevoerende wellen werd een significante verandering in gradiënt tussen meetpunten waargenomen. De gradiënt van de metingen in de teen nemen gedurende het jaar toe naar een maximale waarde van ca. 2. De gradiënten in de kruin geven voor een groot deel van de meetpunten een vergelijkbaar beeld met een gemiddelde maximale waarde van ca. 2,5. Echter zijn er in de kruin ook een aantal meetpunten met een beduidend hogere gradiënt tot ca. -13. Daarbij valt op dat een aantal van de grote gradiënten zowel positief als negatief aanwezig zijn, het gaat dan om 1 meetpunt met een

grote temperatuur afwijking ten opzichte van de naburige meetpunten. Daarnaast zijn er ook grote gradiënten zichtbaar die niet een negatieve dan wel positieve tegenwaarde hebben. In die gevallen zijn er meerdere meetpunten die een verhoging dan wel verlaging in temperatuur hebben ten opzichte van een verderop gelegen meetpunt.

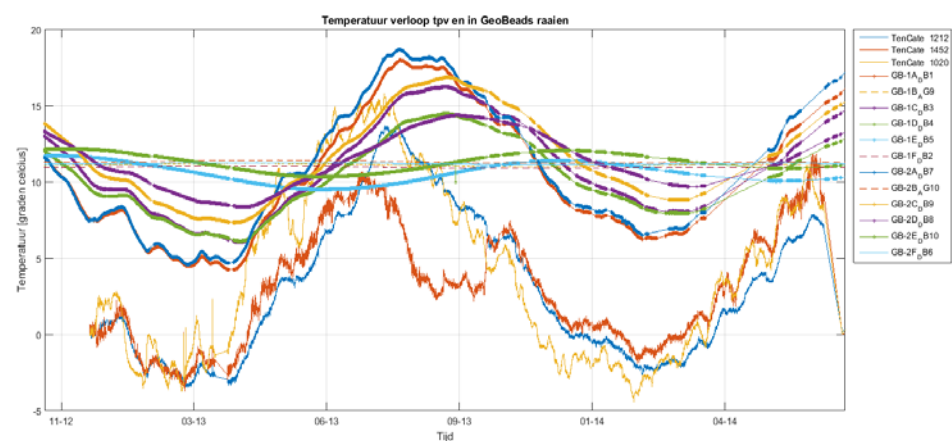
Om onbekende reden zijn de meetpunten waar grote gradiënten worden waargenomen gevoeliger voor temperatuurschommeling. Of dit uniek is voor deze dijk is niet onderzocht. Er wordt opgemerkt dat de toename in gradiënt vooral optreedt in de zomermaanden en toevallig ook na een 'datagat' waarop er tijdelijk geen metingen worden uitgevoerd, opgeslagen of verwerkt. Een verklaring voor gevoeligheid voor temperatuurschommeling kan gezocht worden in scheurvorming door het droger worden van de kade. Maar dit is niet met zekerheid vast te stellen omdat er geen veldwaarnemingen beschikbaar zijn.

Navolgende figuur is een weergave van het gradiëntverloop in de tijd, behorend bij eerdergenoemde waarnemingen.



Figuur 2.15 Gradiëntverloop in de tijd

De glasvezelmat passeert de twee meetraaien met GeoBeads. De GeoBeads meten ook temperatuur. Deze is vergeleken met de metingen van GeoDetect en weergegeven in onderstaand figuur.



Figuur 2.16 Vergelijking temperatuurmetingen GeoBeads en GeoDetect (glasvezelkabel)

De metingen van GeoDetect en GeoBeads geven, kijkend naar het trendverloop, een vergelijkbaar beeld, met het verschil dat de Geobead metingen een constanter verloop hebben dan de GeoDetect metingen. Dit heeft zeer waarschijnlijk te maken

van het verschil in diepteligging in de grond en dat de temperatuur in de GeoBeads in de stalen module wordt gemeten. Verder is ook waar te nemen dat de GeoBeads metingen in waarde wat van elkaar verschillen maar in trendverloop nauwelijks. Op basis van deze vergelijking kan gesteld worden dat de metingen niet voor elkaar onderdoen, vooral als de gemeten temperatuur van de GeoDetect niet te letterlijk wordt genomen, maar vooral wordt gebruikt om optredende verandering te detecteren. Helaas zijn er geen veldwaarnemingen uitgevoerd waardoor optredende veranderingen in de temperatuurmetingen niet gerelateerd kunnen worden aan gebeurtenissen in het veld.

3 Berekeningen

3.1 Inleiding

In LiveDijk Utrecht is behalve gemeten ook berekend. De gemeten waterspanningen zijn gebruikt voor het berekenen van de actuele stabiliteitsfactor. In dit hoofdstuk worden de uitgevoerde berekeningen geëvalueerd. In eerste instantie werden in het LiveDijk Utrecht project alleen de berekende stabiliteitsfactoren opgeslagen. Omdat de grootte en ligging van de berekende glijcirkel (het theoretische bezwijkvlak in de dijk) belangrijk is, is gedurende het project het systeem aangepast zodat ook de afbeeldingen van de berekening worden opgeslagen en opvraagbaar zijn. Voor het analyseren van de berekeningen is dit niet voldoende en zijn de rekenbestanden van belang. Omdat die niet worden opgeslagen, zijn voor een aantal tijdreeksen nogmaals berekeningen uitgevoerd met de bijbehorende meetdata zodat die tijdreeks gebruikt kan worden voor analyse. Op zichzelf is het niet noodzakelijk om complete berekeningen op te slaan, als de berekening maar opnieuw met de gewenste meetwaarde uitgevoerd kan worden. In het LiveDijk Utrecht project was dit niet mogelijk maar in andere projecten wordt aan die mogelijkheid gewerkt.

De analyse in dit hoofdstuk is gericht op:

- Doorvoeren van metingen in de berekeningen.
- De schematisatie.
- Locatie glijcirkel.

3.2 Schematisatie

Voor het maken van stabiliteitsberekeningen is een theoretische schematisatie van de dijkprofielen nodig. In deze schematisatie is aangegeven hoe de geometrie van de dijk eruitziet (hoogte en breedte), welke grondlagen er te onderscheiden zijn in en onder de dijk en hoe de waterstanden in de dijk liggen. Deze schematisaties zijn opgesteld of gebaseerd op basis van aanwezig grondonderzoek of eerder gemaakte profielschematisaties.

In de berekeningen verandert in de tijd alleen maar de hoogte en het verloop van de waterstandlijnen. Al het overige blijft constant. In de profielen zijn twee waterstandlijnen gedefinieerd die op basis van de metingen veranderen. De schematisaties zijn gemaakt in het softwareprogramma D-GeoStability. De automatische berekeningen zijn uitgevoerd met een voorloper van het programma DAM-Live. Hierin worden automatisch stabiliteit berekeningen gegenereerd en berekend. Ten tijde van het begin van het LiveDijk Utrecht project was het nog niet mogelijk om alle sensoren te koppelen aan de software. Per profiel zijn twee 'waterstandlijnen' opgegeven. Eén voor de freatische grondwaterstand en één voor de stijghoogte in de 'diepe' zandlaag. Deze waterstandlijnen zijn gebaseerd op een aantal verschillende sensoren in de dijk. De theoretische schematisaties van de dijk zijn opgenomen in de bijlage van dit rapport.

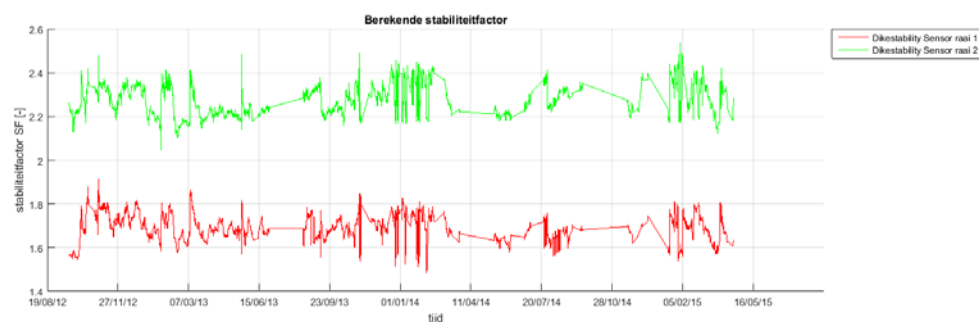
3.3 Resultaten

Van alle profielen wordt de stabiliteit berekend op basis van de op dat moment actuele meetwaarde voor de waterspanningen. Navolgende figuren laten het

verloop van de berekende stabiliteitsfactor in de tijd zien. In de figuren is waar te nemen dat de berekende stabiliteitsfactoren hebben maar zeer geringe waarde fluctueren. De kleine fluctuaties worden veroorzaakt door kleine waterstandverschillen in de invoer van de berekening. Uit analyse van de berekening blijkt dat de vorm en locatie van de glijcirkel niet verandert, maar dat alleen de stabiliteitsfactor fluctueert. Aangenomen wordt dat bij grotere fluctuaties ook locatie en/of grootte van de glijcirkel verandert.



Figuur 3.1 Berekende stabiliteitsfactoren Voorhavendijk



Figuur 3.2 Berekende stabiliteitsfactoren Grechtdijk

In de metingen van de Voorhavendijk is een golfbeweging waar te nemen die samenvalt, maar tegengesteld gericht is met de waterstand op de rivier. Dit is logisch, want een hogere waterstand betekent over het algemeen een dalende stabiliteitsfactor. Al de berekende stabiliteitswaarden zijn van een dusdanige orde dat er geen indicaties van instabiliteit van de dijk is. Voor de Voorhavendijk is dit naar verwachting. Macrostabiliteit was volgens de toetsing geen probleem. De Grechtdijk is wel afgekeurd op macrostabiliteit binnenwaarts. De berekende stabiliteitsfactoren ondersteunen die toetsing niet. Echter moet wel opgemerkt worden dat voor beide dijken is gerekend met een gemeten waterstand en dat deze lager kan zijn dan het MHW.

3.3.1 Doorvoeren van metingen in de berekeningen

De gemeten waarden worden automatisch ingevoerd in geotechnische software die vervolgens de stabiliteit van de dijk berekend. De koppeling tussen meting en berekening is gecontroleerd en correct. Dat betekent dat de gemeten waarde ook in de berekening is terug te zien. Omdat de metingen zonder bewerking in de berekening worden ingevoerd, worden ook niet correcte/ geloofwaardige metingen ingevoerd. Hierdoor kan berekende stabiliteitsfactor ook ongeloofwaardig zijn, ondanks dat berekende stabiliteitsfactor geloofwaardig lijkt. Het is niet zondermeer

mogelijk om dit probleem automatisch te voorkomen, vooral omdat voorkomen moet worden dat er resultaten worden gefilterd die sterk afwijkend, maar wel correct zijn. Het is dus noodzakelijk dat er altijd met kennis van zaken naar de resultaten van de metingen en berekeningen wordt gekeken.

In onderstaand figuur is ter illustratie een correcte berekening met ongeloofwaardige invoer weergegeven.

Figuur 3.3 Niet correcte berekening door verkeerde meting. SF = 1.50 (Profiel M4)

3.3.2 Correctheid glijcirkel

De stabiliteit van de dijk wordt berekend met behulp van een cirkelvormig glijvlak. In een berekeningsrun worden veel verschillende cirkels doorgerekend en daarvan is de cirkel met het kleinste evenwicht maatgevend. Echter kan het soms gebeuren dat er cirkels rekenkundig maatgevend zijn, maar voor de beschouwing van de dijkveiligheid minder van belang zijn. Zo komt het vaak voor dat de stabiliteit van het talud maatgevend is ten opzichte van grotere glijvlakken. Echter is bij het bezwijken van een klein deel van het talud niet per se de dijkveiligheid in gevaar. Voor het 'bewaken' van de dijk willen we daarom graag de stabiliteit van grotere glijvlakken weten.

De uitgevoerde stabiliteitsberekeningen zijn niet opgeslagen. Alleen het resultaat en een afbeelding van het maatgevende glijvlak. Om een beeld te krijgen of de berekening correct zijn, zijn voor een klein gedeelte van de meetperiode de berekening nogmaals uitgevoerd zodat ook het rekenbestand zelf beschikbaar is. De volgende periodes zijn nogmaals doorgerekend:

- Voorhavendijk: van 28-12-2012 tot 6-1-2013
- Grechtdijk: van 10-3-2013 tot 17-3-2013 en 13-5 tot 22-5-2013

Uit de analyse van de beschikbare berekeningen volgt dat in, op twee na, alle profielen betrouwbare en 'gezochte' glijcirkels worden berekend en weergegeven. Alleen in Voorhavendijk profiel M4 en M6 zijn oppervlakkige glijcirkels maatgevend. In profiel M6 is een oppervlakkige taludinstabiliteit maatgevend en worden de waterstanden correct weergegeven. In dit geval zou het met het toepassen van zonering mogelijk moeten zijn om ook de stabiliteit van een dieper glijvlak te presenteren. Voor profiel M4 komt dit doordat de sensor in het diepe zand onder de kruin een onrealistische waarde geeft die de berekening verstoort. Wanneer daar een correcte waarde zou worden gemeten en doorgegeven is de stabiliteit van het talud niet meer maatgevend. Het voorkomen van dit soort problemen vergt dat het LiveDijk systeem actiever wordt beheerd. Kapotte sensor zullen tijdig vervangen

moeten worden en onrealistische meetwaardes uitgefilterd. Dit is onvoldoende gebeurd. Het is aan te bevelen voor toekomstige projecten afspraken te maken over beheer en onderhoud van het systeem.

3.3.3 Correctheid van de schematisatie

Nog voordat er metingen werden verricht in de LiveDijk Utrecht zijn de dwarsdoorsneden van de dijken geschematiseerd en zijn de sensoren toegekend aan de profielen. Geëvalueerd is of de berekeningen waarheidsgetrouw zijn en of de toegekende sensoren ook een realistisch beeld van de werkelijkheid in de geschematiseerde profielen laat zien.

Zoals ook al eerder is geconstateerd worden de gemeten waterspanningen goed als input voor de berekening doorgegeven. Echter in het geval van de Voorhavendijk is de schematisatie van de waterspanningen in de dijk niet volledig correct. In de schematisatie staat het achterland onder water, terwijl dat in werkelijkheid niet zo is. Oorzaak hiervan is dat de sensor in de berm van de dijk ook gebruikt wordt om de waterstand aan het eind van het profiel, het achterland, te bepalen. De waterstand in de berm is echter hoger dan het maaiveld achter de dijk. Om een beter verloop van de freatische lijn weer te geven moet er een polderpeil toegevoegd worden aan de schematisatie. Dit polderpeil wordt echter niet gemeten door LiveDijk sensoren en zal op basis van aannames bepaald moeten worden. Een ander optie zou het toevoegen van metingen/ instrumenten aan het systeem die het polderpeil registreren.

Behoudens deze afwijking, is de schematisatie van de Voorhavendijk verder correct.

Ook de schematisatie van de Grechtdijk is geëvalueerd en deze zijn correct.

3.4 Conclusie en samenvatting

Behalve dat er in de LiveDijk Utrecht metingen worden uitgevoerd zijn er ook met de gemeten waterspanningen berekeningen gemaakt. Het algemene beeld is dat de metingen correct worden ingevoerd en dat er goede berekeningen worden uitgevoerd. Daarbij wordt opgemerkt dat foutieve metingen ook worden ingevoerd en een onbetrouwbaar berekeningsresultaat geven. In de berekeningen van de Grechtdijk zijn geen bijzonderheden gevonden. Voor de Voorhavendijk is de weergave van de freatische lijn in het achterland niet correct.

Voor de Voorhavendijk ondersteunen de berekeningen het beeld uit de dijktoetsing dat macrostabiliteit binnenwaarts geen probleem vormt. Voor de Grechtdijk geven de berekeningen geen aanleiding te veronderstellen dat macrostabiliteit een probleem vormt, dit in tegenstelling tot de toetsing. Er kan echter niet zomaar op basis van de werkzaamheden die in het dit LiveDijk Utrecht project zijn uitgevoerd worden gesteld dat de Grechtdijk voldoende veilig is. Daar waren de werkzaamheden in dit project niet op gericht.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Het project LiveDijk geeft een antwoord en inzicht op deelf doelstellingen genoemd in sectie 1.3. Per doelstelling staat hieronder de conclusies vermeld:

1. Inzicht krijgen in welke mechanismen welk effect hebben op dijklichamen. Het gaat daarbij om de mechanismen: (macro)stabiliteit, piping en zetting/verzakking.

Het LiveDijk Utrecht project heeft geen nieuw inzicht opgeleverd in hoe de gemonitordedijken van de Grecht en de Voorhavendijk van de Beatrixsluizen zich gedragen op invloed van hoogwater of neerslag. De temperatuurmetingen hebben opvallendheden laten zien, maar deze hebben nog niet geleid tot nieuw inzicht. Nader onderzoek is nodig om de invloed van eb- en vloed op de Voorhavendijk te kwantificeren.

2. Kennis verkrijgen over welke monitoringssystemen met succes toe te passen zijn bij welk bezwijkmechanisme.

Ten aanzien van deze doelstelling is geconcludeerd dat de glasvezelmeteringen in de geotextielmatten zoveel data opleveren dat het interpreteren hiervan niet eenvoudig en bewerkelijk is. Uit de IJkdijk-bezuikexperimenten die zijn uitgevoerd blijkt echter dat temperatuurmetingen wel degelijk nut hebben bij de detectie van grondwaterstromingen en piping. De verwachting is dan ook dat als de data uit de geotextielmatten overzichtelijk kan worden gepresenteerd meer over de waarde voor het dijkbeheer van deze metingen gezegd kan worden. Aanbevolen wordt dat Ten Cate hier de benodigde zaken voor ontwikkelt. De GeoBeads hebben voor de uitgevoerde berekeningen noodzakelijke informatie aangeleverd.

3. Kennis krijgen over hoe gegevens uit de monitoring geïnterpreteerd moeten/kunnen worden en daaraan beheersprocessen te koppelen. Hieronder valt ook de implementatie in de beheerorganisatie en de kennisborging.

Vanuit de beheerders is er met name door RWS actief gebruik gemaakt van het LiveDijk Utrecht systeem. Het systeem is niet ingezet voor de beheerpraktijk van de organisaties. De gebruikers hebben pro-actief kennis opgedaan van hoe het systeem werkt door het niet alleen te gebruiken zoals bij lancering beschikbaar is gesteld, maar hebben ook wensen op tafel gelegd die zijn meegenomen in doorontwikkeling van het dashboard. Rijkswaterstaat heeft door gebruik te maken van het systeem aanvullend inzicht gekregen in de doorlatendheid van de Voorhavendijk. Door actueel inzicht te krijgen in stabiliteitsberekeningen is het handelingsperspectief van de beheerder vergroot volgens Rijkswaterstaat.

4. Op termijn voldoende kennis (+ uitvoering), techniek en materiaal in huis te hebben om zelf te monitoren, bij gebleken nut voor het beheer van de waterkering.

Alhoewel het project LiveDijk Utrecht bij twee waterkering beheerders is

uitgevoerd, kan niet worden geconcludeerd dat het pilotproject heeft geleid tot de kennis bij waterkering beheerder voor het nemen van beslissingen voor geavanceerde dijkmonitoringsprojecten in algemene zin. Hiervoor zijn ook de ervaringen benodigd die ook in andere LiveDijk projecten zijn opgedaan. FloodControl IJkdijk bundelt anno 2016 deze resultaten en gaat deze ontsluiten via www.smartlevee.nl en een hiervoor in ontwikkeling zijnde training bij de stichting Wateropleidingen.

5. Bewaken van de veiligheid (early detection) van de dijken tot deze zijn verbeterd;

Gedurende het project is het systeem niet gebruikt voor het bewaken van de veiligheid omdat er geen bijzondere of calamiteuze situaties optraden. Na de nodige aanpassingen is het systeem voor de beide dijkstrekkings toepasbaar als concept veiligheidssysteem met betrekking tot macro-stabiliteit.

6. Leveren van aanvullende informatie over de opbouw van bodem en dijk, ten behoeve van de verbeterwerken;

De van de Voorhavendijk verkregen gegevens kunnen worden gebruikt bij het ontwerpen van verbeterwerken, zoals dat ook plaatsvindt bij Waterschap Noorderzijlvest bij de LiveDijk XL. Ingewonnen data geeft meer inzicht in het gedrag van dijken, hun bodemeigenschappen en levert daarmee aanvullende gegevens voor versterkingsprojecten.

7. Bewaken van de veiligheid tijdens en na de verbeterwerken.

Er zijn geen verbeterwerken uitgevoerd waardoor deze doelstelling niet aan de orde is geweest.

8. De werking van een geavanceerd systeem voor dijk monitoring te demonstreren

Dit doel is geslaagd door toepassing van meetsystemen, interpretatiesoftware en presentatiesoftware.

9. Een nieuwe aanpak te onderzoeken van uitvoerings- en onderhoudsprocedures van dijken evenals de effecten hiervan op informatievoorziening voor rampenbestrijding.

De beschikbare financiering en de omvang van met name de monitoring en analyses binnen het project verhinderde het realiseren van deze doelstelling. Er is in het project niet aangetoond dat in de specifieke gevallen van de Voorhavendijk en de Grechtdijk ook werkelijk kosten zijn bespaard door aanleg en ingebruikname van het meetsysteem. Dit hangt samen met het ontbreken van concrete versterkingsprojecten in de uitvoeringsperiode van het project en het feit dat de gemonitorde dijken zich niet heel anders bleken te gedragen dan werd verwacht. Dit laatste in tegenstelling tot andere gemonitorde dijken van het Tweede IJkdijk-ontwikkelprogramma waarbij bleek dat de dijk op basis van metingen en analyses sterker bleek voor bepaalde faalmechanismen dan gedacht en soms juist gevoeliger bleek voor faalmechanismen dan berekend. De resultaten worden over het algemeen betrokken in versterkingsprojecten.

4.2 Aanbevelingen

Uit het project komen een aantal aanbevelingen naar voren. Deze luiden als volgt:

- Begrijpelijk en inzichtelijk presenteren van temperatuurmetingen van Ten Cate zodat op de informatie uit het systeem direct kan worden geacteerd.
- Nader onderzoek naar de effecten op efficiencyvergroting van het levenscyclusbeheer bijbehorende *lifecyclecosts*.
- Combineer de resultaten uit LiveDijk Utrecht met andere LiveDijken en rapporteer deze integraal waarbij best practices worden geformuleerd.
- Verspreiden van ontwikkelde kennis uit alle LiveDijken zodat de opgedane kennis ook toegepast kan worden door andere waterkeringsbeheerders.
- Maak de slag van bewezen technologie naar toepassing in de beheerpraktijk.
- LiveDijk Utrecht was eerste LiveDijk project in het tweede IJkdijk-ontwikkelprogramma dat startte. Ervaringen uit dit project zijn gebruikt in andere LiveDijk projecten en hebben ertoe geleid dat leerpunten zijn gebruikt om niet twee keer dezelfde fouten te maken, waaronder:
 - o Realistischer begroten van doelstellingen
 - o Minder maar scherper gekwantificeerde(SMART) doelstellingen geformuleerd
 - o De koppeling met de beheerpraktijk is anders gelegd: meer zekerheid van gebruik van ingewonnen data en directe koppeling met toepassing in beheerpraktijk is hierbij gerealiseerd.
- Voer aanvullende op *high tech* metingen ook veldwaarnemingen uit. Dit zou mogelijkvoor de opvallende temperatuurmetingen uit de LiveDijk Utrecht tot aanvullend inzicht hebben geleid.
- Projectorganisatie-aanbeveling: neem de conclusies en aanbevelingen uit dit project mee in de overall analyse en rapportage van alle LiveDijk projecten in Nederland en betrek deze bij het formuleren van de *best practices*.

5 Evaluatie

Evaluerend wordt gekeken naar drie aspecten: kennis, proces, en conclusies.

5.1 Kennis

De ontwikkelde kennis en ervaring die met de pilot is opgedaan gedurende twee jaar sensormonitoring laat zich in drie thema's clusteren:

1. Het gedrag van de dijk onder normale en meer extreme omstandigheden;
2. De functionaliteit van het monitoringssysteem;
3. De implementatie in het beheerproces.

5.1.1 Gedrag van de dijk

In depilot is het gelukt om de beheerder actueel inzicht te verschaffen over het gedrag van de dijk. Het gedrag van de dijk zegt iets over de veiligheidstoestand van de waterkering en is inzichtelijk gemaakt door interpretatie van parameters. De benodigde parameters zijn vooraf bepaald in een monitoringsplan. Op beide locaties zijn waterspanning en temperatuur gemeten. Met behulp van waterspanningsmeters is de grondwaterstand in het dijklichaam af te leiden. In de Voorhavendijk is zo bijvoorbeeld de invloed van eb en vloed terug te zien in de grondwaterstand. Een andere belangrijke afgeleide van de waterspanning is de stabiliteitsfactor. Aan de hand van waterspanningen in de dijk is de stabiliteit berekend. De beheerder kreeg hierdoor een actueel inzicht in de sterkte van de dijk. Het verschaft hem aanvullend inzicht in de doorlatendheid van de Voorhavendijk waardoor het handelingsperspectief van de beheerder is vergroot.

De extreme neerslag van 28 juli 2014 bleek voor de Grechtdijk invloed te hebben op de grondwaterstanden. De grondwaterstand is een belangrijke parameter voor de stabiliteit en de veiligheidsfactor van een waterkering. Er bleek, zelfs met zoveel gevallen regen (meer dan 80mm in 48uur) dat de Grechtdijk nog steeds een erg hoge veiligheidsfactor heeft. Uit de analyse van de temperatuurmetingen in de Grechtdijk werd op een aantal plekken in de kruin grote temperatuursverschillen ontdekt. De oorzaak van deze verschillen is onduidelijk, maar de verschillen zouden kunnen duiden op scheuren in de dijk ter hoogte van de kruin. Dit dient met veldwaarnemingen al dan niet gestaafd te worden.

5.1.2 Functionaliteit van het monitoringssysteem

Het monitoringssysteem bestaat op beide locaties uit drie onderdelen: meetinstrumenten, data-verwerkingssysteem en een visualisatiesysteem. Meetinstrumenten bestaan uit Geobeads (waterspanning en temperatuur) en TenCate Geodetect (temperatuur). Data afkomstig van de meetinstrumenten werd verwerkt door Anysense Connect van TNO en het Dijk Data Service Centrum. Data van beide locaties werd gevisualiseerd door ReadyMind van AGT. Een monitoringssysteem functioneert alleen indien alle onderdelen vertegenwoordigd zijn.

De meetinstrumenten leverden een betrouwbaar beeld van de werkelijkheid. Echter halverwege de meetperiode bleek een groot deel van de waterspanningsmeters defect. De oorzaak hiervan is onduidelijk. Uitval door defecten levert een probleem op voor toepassingen als continue bewaking van de veiligheid.

Voor wat betreft de temperatuurmetingen is er nog een slag te maken in de interpretatie. Het TenCate Geodetect-systeem geeft temperatuurmetingen op zeer veel punten, waardoor lokale veranderingen moeilijk zichtbaar zijn.

De metingen in de LiveDijk Utrecht zijn onderzocht op correctheid en bijzonderheden. Er zijn kanttekeningen te plaatsen bij de invloed van de vormgeving van de GeoBeads met betrekking tot luchtinsluiting. Op beide dijken zijn er storingen en onderbrekingen geweest in de metingen, ook van lange duur. Een aantal sensoren is defect geraakt binnen een jaar. Wanneer dijken met behulp van sensoren worden bewaakt is het zeer onwenselijk dat sensoren niet langer dan een jaar meegaan en dat er lange onderbrekingen zijn in de meetreeks. In toekomstige LiveDijk projecten dient hiermee rekening gehouden te worden.

Ook de temperatuurmetingen in de Grechtdijk door TenCate hebben onderbrekingen van meerdere dagen. Lange onderbrekingen zijn onwenselijk en dienen zo snel mogelijk verholpen te worden. In vervolgprojecten zou hier meer aandacht voor moeten zijn en zou afgesproken moeten worden hoe om te gaan met storingen.

Op een paar sensoren na geven de metingen een realistisch beeld en zie je van de metingen in de Voorhavendijk dat de buitenwaterstand volgen.

De temperatuurmetingen met de GeoDetect glasvezelkabel geven een betrouwbaar beeld. Uit analyse van de metingen volgt dat er in de teen van de dijk geen bijzonderheden zijn waargenomen, maar dat in de kruin van de dijk op een aantal plekken grote verschillen in temperatuur optreden. De oorzaak van deze verschillen is onduidelijk, maar het zou veroorzaakt kunnen worden door scheuren in de kruin van de dijk. Om te onderzoeken of scheurvorming de oorzaak is van het verschil in temperatuur tussen naast elkaar gelegen meetpunten zou het nuttig zijn om de temperatuurmeting en analyse waar mogelijk te automatiseren en actiever te volgen en in het geval van een opvallende meting in het veld te bekijken of er een verandering aan de dijk waarneembaar is.

Het visualisatiesysteem maakte het mogelijk om data te veranderen in informatie. Ondersteuning bij het gebruik van de software en interpretatie van de data door deskundigen is (nog) nodig en wenselijk.

5.1.3 Implementatie in het beheerproces

Met het softwarepakket ReadyMind van AGT zijn de sensormetingen vertaald naar informatie over gedrag en sterkte van de dijk. Dit heeft geresulteerd in overzichten met de glijcirkels en de veiligheidsfactoren die voor zowel HDSR als RWS erg waardevol zijn gebleken. De interpretatie van dit systeem bleek voor menig gebruiker toch niet zo simpel. De aansluiting van sensormonitoring bij de dagelijkse praktijk is in de pilot lastig gebleken. Om het door te voeren in de beheerprocessen moeten er nog wel stappen worden gemaakt, zowel op software matig vlak als om het 'tussen de oren van beheerders te krijgen'.

Deze pilot heeft aangetoond dat er meer kennis is verkregen over de dijk, dat de veiligheid met sensoren kan worden bewaakt en dat het kan helpen in de ondersteuning in beheer en onderhoud. Maar na twee jaar meten is het nog te vroeg om dit kwantificeerbaar te maken. Het is wel de inschatting is dat meer inzicht

in de sterkte van de waterkering zal leiden tot optimalisatie van beheer en onderhoud, een betere risicobeheersing en uiteindelijk ook zal leiden tot een betere toetsing van de waterkeringen. Daarnaast betreft het twee locaties waar gemeten is. Wanneer dit daadwerkelijk tot optimalisatie leidt zal er op meer locaties moeten worden gemeten en wellicht met verschillende meettechnieken om informatie te combineren en integraal moeten worden opgenomen in de beheersprocessen.

5.2 Proces

Vele partijen hebben aan de pilot deelgenomen: overheid, kennisinstellingen en bedrijfsleven, de zogenoemde gouden driehoek. LiveDijk Utrecht leert ons dat een langlopend samenwerkingsverband continue inspanning en inzet vraagt om het goud van de driehoek duurzaam te laten blinken. Van idee naar project en uitvoering is een lang proces geweest. Doordat er middelen uit verschillende bronnen zijn ingebracht om de financiering van het project te realiseren, is het een puzzel geweest op welke manier dat effectief het beste gedaan kon worden. Dat vergde creativiteit en doorzettingsvermogen van alle betrokken partijen.

Binnen het projectteam, bestaande uit de opdrachtgevers (RDU, Provincie Utrecht, HDSR, STOWA en Stichting FloodControl IJkdijk), en opdrachtnemers (TNO, AGT) is regelmatig contact geweest tijdens het project om te rapporteren over de voortgang en realisatie van de planning. Na ingebruikname van het monitoringssysteem, dus tijdens de meetperiode van twee jaar, is de overlegfrequentie lager geweest; het project was in uitvoering en het wachten was op de resultaten van de monitoring. Het ook in deze periode blijven betrekken op plenaire wijze van alle betrokken partijen is echter als aandachtspunt en aanbeveling op te tekenen.

De samenwerking tussen die verschillende partijen hebben betrokkenen als waardevol ervaren. Door de nauwe contacten tussen waterbeheerders en leveranciers was het mogelijk snel in te spelen op vragen en problemen. Dit deed zich onder andere voor bij storingen van het monitoringssysteem en bij de optimalisatie van het softwarepakket ReadyMind.

Alle partijen zetten zich in dit project in voor het gezamenlijke doel om ervaring op te doen met sensormonitoring. Daarbij heeft ook iedere partij een eigen belang. Het bleek een uitdaging om de goede balans tussen de gezamenlijke en de individuele belangen te behouden. Een duidelijke regie en helderheid over ieders rollen zijn daarbij essentieel.

De verwachtingen bij de aanvang van de pilot waren hoog. Elf ambitieuze doelstellingen waren geformuleerd. Achteraf blijkt de pilot niet geschikt om op al deze doelstellingen een concreet antwoord te geven. De tussentijdse evaluatie is sterk op de techniek gericht geweest waardoor die onvoldoende benut kon worden om bij te sturen op implementatie van de monitoring in de bedrijfsvoering. De realiseerbare inzet van de waterbeheerders bleek in enkele gevallen tot knelpunten in de uitvoering van het project te leiden. Door een goede samenwerking zijn deze echter steeds opgelost. Binnen de projectgroep is altijd uiterst plezierig en open samengewerkt in de driehoek tussen overheid, bedrijfsleven en onderzoeksinstituten. Wat dit project succesvol maakte is dat er een gezamenlijk belang is nagestreefd door alle betrokkenen, en dat de

individuele belangen van de betrokken partijen niet problematisch en onoplosbaar conflicterend zijn gebleken.

De bestuurlijke vertegenwoordigers van de opdrachtgevers en opdrachtnemers zijn betrokken bij de formele ingebruikname van LiveDijk Utrecht in augustus 2012. Gedurende de twee jaren daarna is door de projectleden individueel naar haar de betreffende bestuurder binnen de eigen organisatie gerapporteerd. Nadat de ruim twee jaar meten was afgerond zijn de bestuurders wederom bij elkaar gekomen om terug te kijken op het project. De bestuurders bleken de behoefte te hebben gehad om vaker tijdens de uitvoering van het project bij elkaar te komen. Dit had bij kunnen dragen aan een betere inbedding van de toegepaste technologie; de tussentijdse rapportages focusten op de technische aspecten en niet op de bestuurlijke. Inbedding in de organisatie vergt immers ook een verregaande bereidheid op politiek-bestuurlijk niveau naast technisch succesvolle realisatie van het project.

Bijlage 1 Plaatsingsgegevens

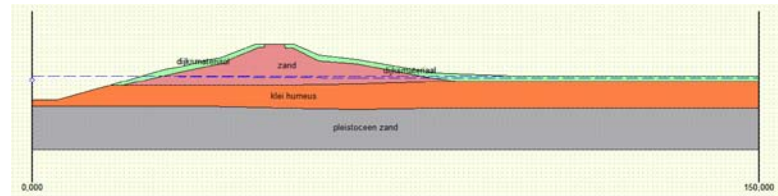
Plaatsingsgegevens Voorhavendijk

Raai	Naam	Horizontale locatie	Plaatsingsdiepte [m tov NAP]	Sensor id
2	M2-1	Buitentalud	-6.5	0201400C71B1050E
	M2-2	Buitentalud	2.77	0201400C71B11A24
	M2-3	Kruin	0	0201400C71B1E237
	M2-4	Binnenberm	0	0201400C71B15E72
	M2-5	Binnenberm	-4	0201400C71B14C96
	M2-6	Binnenteen	-7	0201400C71B10AB8
4	M4-1	Buitentalud	-9.5	0201400C71B1C30C
	M4-2	Buitentalud	3.07	0201400C71B1EBCA
	M4-3	Kruin	3	0201400C71B16392
	M4-4	Kruin	0	0201400C71B138CF
	M4-5	Binnenberm	0	0201400C71B17FDC
	M4-6	Binnenberm	-5	0201400C71B1A6F6
	M4-7	Binnenteen	-10	0201400C71B1A834
6	M6-1	Buitentalud	-6.5	0201400C71B10F32
	M6-2	Buitentalud	3.37	0201400C71B15201
	M6-3	Kruin	4	0201400C71B19AFA
	M6-4	Kruin	0.5	0201400C71B14DBB
	M6-5	Binnenberm	0.5	0201400C71B1D02B
	M6-6	Binnenberm	-1.5	0201400C71B1DCE3
	M6-7	Binnenteen	-6.5	0201400C71B1A202
	RW-1	Buitenwaterstand		0201400C71B14F4B
8	M8-1	Buitentalud	-7	0201400C71B1D3BE
	M8-2	Buitentalud	3.21	0201400C71B1C5E5
	M8-3	Kruin	3.5	0201400C71B14555
	M8-4	Kruin	0	0201400C71B177C4
	M8-5	Binnenberm	1.5	0201400C71B1CF2E
	M8-6	Binnenberm	-2	0201400C71B14F13
	M8-7	Binnenteen	-7	0201400C71B19B35

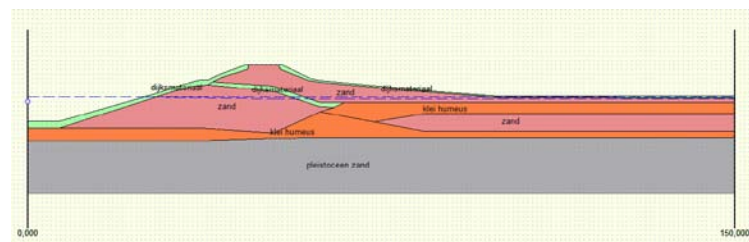
Plaatsingsgegevens Grechtdijk

Raai	Naam	Horizontalelocatie	Plaatsingsdiepte [m tov NAP]	Sensor id
Raai 1	1A	kruin	-1,12	GB-DB-1
	1B	kruin	-8,00	GB-AG-9
	1C	talud	-2,12	GB-DB-3
	1D	teen	-3,13	GB-DB-4
	1E	teen	-4,92	GB-DB-5
	1F	teen	-8,45	GB-DB-2
Raai 2	2A	kruin	-0,86	GB-DB-7
	2B	kruin	-8,23	GB-AG-10
	2C	talud	-2,15	GB-DB-9
	2D	teen	-3,18	GB-DB-8
	2E	teen	-5,11	GB-DB-10
	2F	teen	-9,11	GB-DB-6

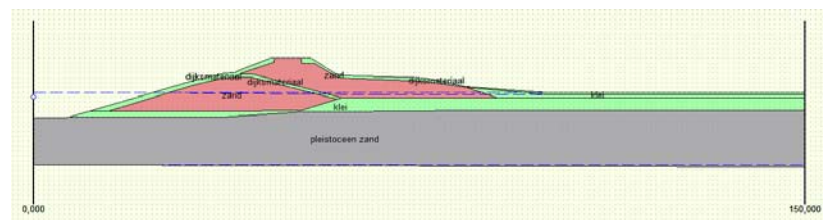
Bijlage 2 Schematisaties



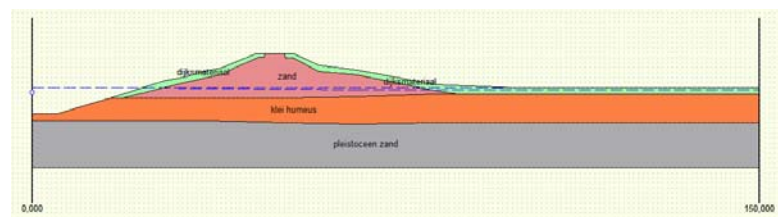
Figuur 0.1 profiel M2, Voorhavendijk



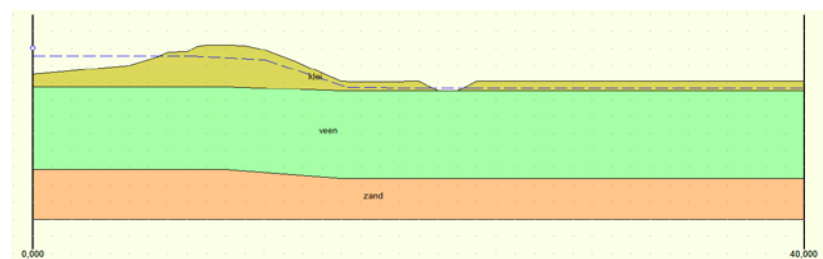
Figuur 0.2 profiel M4, Voorhavendijk



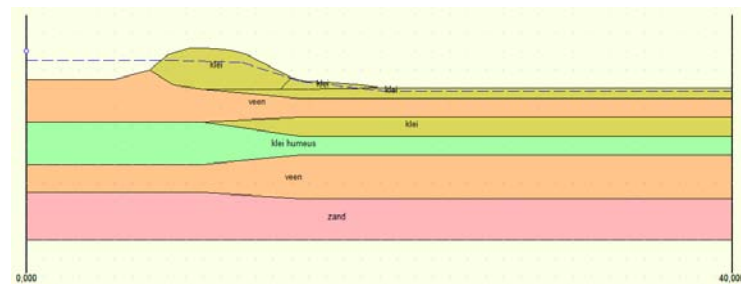
Figuur 0.3 profiel M6, Voorhavendijk



Figuur 0.4 profiel M8, Voorhavendijk



Figuur 0.5 Raai1, Grechtdijk



Figuur 0.6 Raai2, Grechtdijk