

5.6 Deelexperiment Hansje Brinker: Vormverandering: terrestrische laserscanning

Auteurs: Astrid Humme (Hansje Brinker), Freek van Leijen (Hansje Brinker / TU Delft), Ramon Hanssen (Hansje Brinker / TU Delft)

5.6.1. Inleiding

Tijdens het macrostabiliteitsexperiment van de IJkdijk zal door de toenemende belasting het dijklichaam mogelijk vormveranderingen (deformatie) ondergaan. De deformatie is relevant, aangezien deze als vroegtijdige indicator kan fungeren bij werkelijke extreme belasting van het dijklichaam. Tevens geeft de deformatie meer inzicht in de geomechanische mechanismen achter het falen van de dijk. De deformatie is over het algemeen echter waarschijnlijk klein en vaak niet met het blote oog waarneembaar. Om deze reden is het van belang deze deformatie kwantitatief vast te stellen. Hansje Brinker meet de deformatie van werkelijke waterkeringen in Nederland met millimeternauwkeurigheid met behulp van satellietgegevens.

Een catastrofale dijkdoorbraak zoals gesimuleerd tijdens de macrostabiliteitsproef doet zich zeer zelden (hopelijk nooit) voor, waardoor een validatie van het traject van belasting en vervorming tot bezwijken nagenoeg onmogelijk is. Met het macrostabiliteitsexperiment wordt het echter mogelijk gemaakt om de vormverandering van een dijklichaam gedurende het traject tot doorbraak te meten en te analyseren, waardoor hopelijk de waardevolle kennis in te toekomst gebruikt kan worden om werkelijke zwakke plekken vroegtijdig te detecteren en zo doorbraken te voorkomen.

De zeer korte duur van de proef, van uren tot enkele dagen, in combinatie met de herhalingsfrequentie van een radar satelliet van (op dit moment) minimaal 6 dagen, maakt het niet mogelijk om de zeer snelle deformatie van de IJkdijk te meten met satellietdata. Om het deformatiepatroon toch te kunnen vaststellen is om deze reden een andere techniek aangewend. In samenwerking met de Technische Universiteit Delft, Rijkswaterstaat en Leica heeft Hansje Brinker de vervormingen van de IJkdijk gemeten met behulp van een terrestrische laserscanner.

De doelstelling van de experimentele bijdrage is:

Het meten en analyseren van het mogelijke deformatiegedrag van de IJkdijk ten gevolge van de uitgeoefende belasting op de dijk aan de hand van terrestrische lasermetingen uitgevoerd op opeenvolgende tijdstippen.

5.6.2. Aanpak en werkwijze

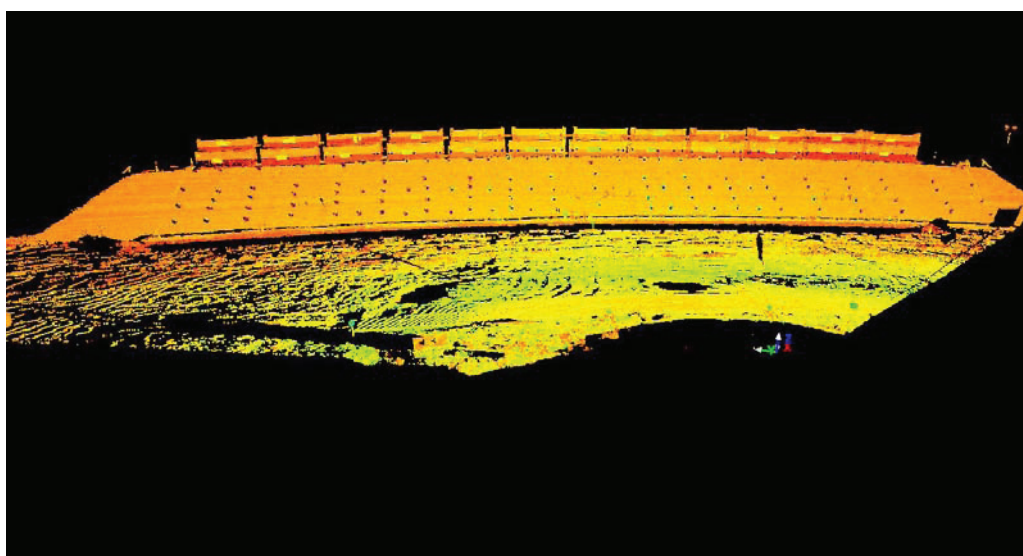
Met terrestrische laserscanning is het mogelijk om de geometrie van objecten tot in detail vast te leggen. De scanner meet met een laserpuls de afstand tot punten in de omgeving. De metingen resulteren in een puntenwolk van miljoenen punten, welke elk een positie (x , y , z) en een reflectiewaarde hebben. Een voorbeeld van een scan van de IJkdijk is weergegeven in fig. 1. De laserscanner zal tijdens de proef gesitueerd zijn aan de binnenzijde van de dijk en stelt een 3D beeld van het oppervlak van de IJkdijk op. Door de geometrie op verschillende tijdstippen te vergelijken kan vormverandering worden bepaald.

5.6.2.1. Instrumentatie

De terrestrische laserscans zijn opgenomen met de pulsscanner ScanStation 2 van Leica Geosystems¹. Ongeveer 250.000 metingen beschrijven het dijklichaam op het moment van opname. De originele metingen in bolcoördinaten (afstand, horizontale en verticale hoek) worden door de scanner geleverd in cartesische coördinaten (x , y , z), gegeven in meters. Per positie is de bijbehorende intensiteit vastgelegd, uitgedrukt op een schaal van –2000 tot 2000.

5.6.2.2. Metingen

Tijdens de macrostabiliteitsproef heeft het meten van het dijklichaam geresulteerd in 183 bruikbare laserscans². Hiervan is de geometrie van de dijk vastgelegd in 179 scans en de overige 4 scans bevatten de geometrie van de dijk na doorbraak gemeten vanuit verschillende posities. Figuur 1 toont een voorbeeld van een scan van de dijk. De kleurenschaal geeft in dit geval de intensiteit van de reflecties weer.



Figuur 1 Laserscan van de IJkdijk. De kleurenschaal geeft de intensiteit van de reflecties weer.

Resolutie

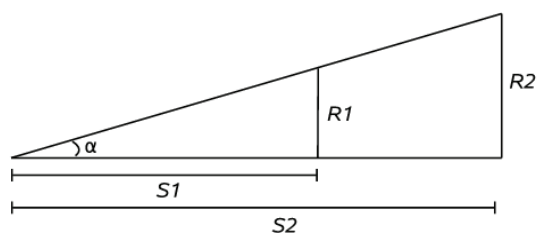
Een puntenwolk wordt opgebouwd door stapsgewijs de horizontale en verticale hoek van de laser aan te passen. De stapgrootte van de hoeken geeft de resolutie in bolcoördinaten. Indien de metingen geprojecteerd worden op een orthogonaal verticaal vlak is de resolutie in cartesische coördinaten (x , y , z) ook afhankelijk van de afstand tussen scanner en het vlak, zie fig. 2.

De keuze van instelling van een laserscan gaat gepaard met een afweging tussen scantijd en resolutie. Daarnaast speelt de registratienauwkeurigheid een rol. Zie tabel 1 voor een illustratie van de toename van scantijd bij een bepaalde resolutie. Een toename van het aantal metingen veroorzaakt een toename in de benodigde scantijd.

¹ www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs_62189.htm

² Bij de uitwerking van de resultaten bleek dat laserscans opgenomen tijdens perioden van mist niet bruikbaar zijn.

Het aantal metingen is kwadratisch afhankelijk van de resolutie (indien de resolutie in horizontale en verticale hoek gelijk is), hierdoor is ook de scantijd kwadratisch afhankelijk van de resolutie. Tijdens de macrostabiliteitsproef is de stapgrootte van de horizontale en verticale hoek gezet op 0.057 graden, wat resulteert in een resolutie van 4.7 cm in het centrum van de dijk tot 8 cm aan de uiteinden van de dijk. Met deze resolutie is een scan voltooid in 8 minuten.



Figuur 2 Relatie tussen resolutie en afstand orthogonaal verticaal vlak. De stapgrootte van de hoeken in bolcoördinaten (α) en de afstand tot een verticaal vlak ($S1$, $S2$) bepalen de resolutie ($R1$, $R2$) ter plaatse van het vlak.

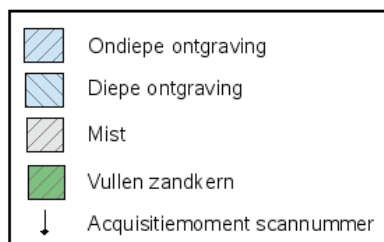
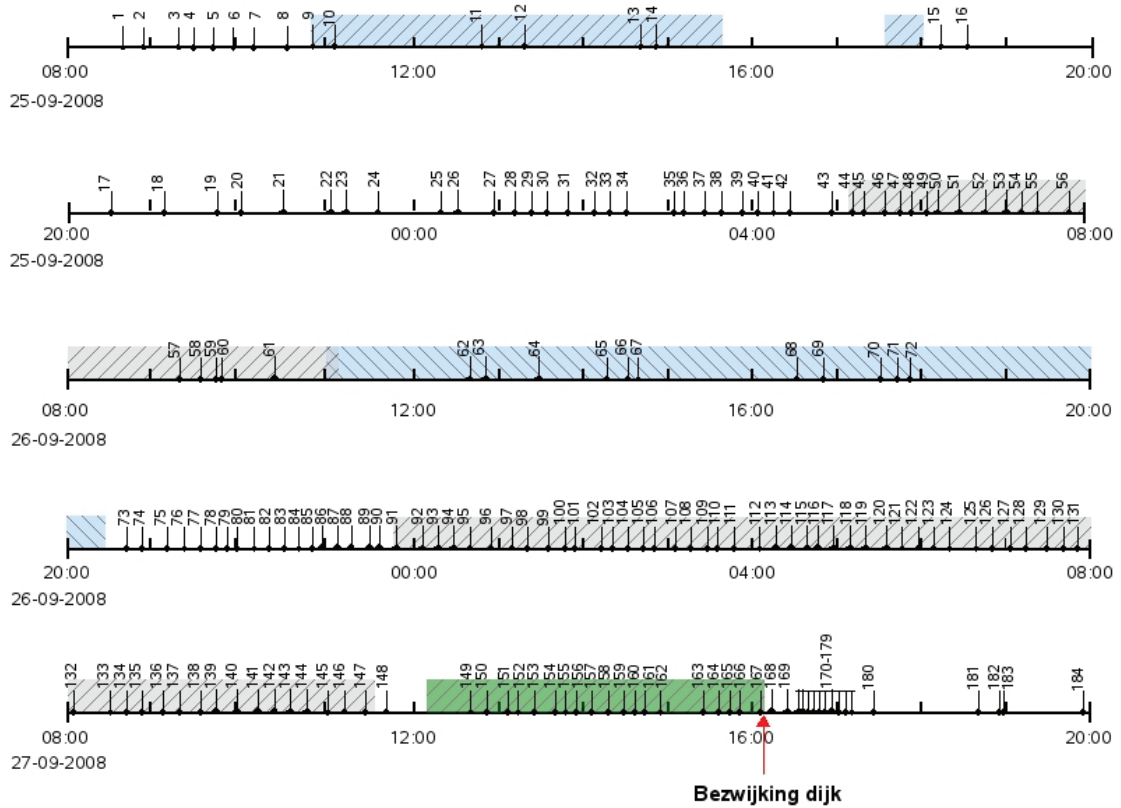
Resolutie [cm]	Scantijd [min]
7.5	3.5
5	8
2.5	32

Tabel 1 Resoluties op 50 meter afstand van de dijk met bijbehorende scantijden.

Meetfrequentie

Acquisitie van een scan neemt rond de 8 minuten in beslag. Een buffer van enkele minuten na acquisitie veroorzaakt een semicontinu meetproces. Gezien mogelijke veiligheidsrisico's zijn de metingen niet uitgevoerd indien mensen aanwezig waren in het meetgebied van de scanner.

Dit kwam voornamelijk voor tijdens werkzaamheden en controles van de dijk. Door de meetstops is de meetfrequentie onregelmatig, zie de tijdlijn in fig. 3 en appendix A in de oorspronkelijke rapportage die als bijlage is opgenomen. Indien het aantal beelden en de totale meetperiode van 55:41 uur gebruikt wordt om de meetfrequentie te bepalen, resulteert deze in een gemiddelde frequentie van 3.25 scans per uur.



Figuur 3 Tijdlijn macrostabiliteitsexperiment

5.6.2.3. Installatie meetapparatuur

De ScanStation 2 heeft een bereik tot 300 meter voor objecten met een albedo waarde van 90% of meer en 134 meter voor objecten met een albedo waarde van 18%³. Het albedo van klei benadert de 18% waardoor de afstand tot de dijk de 134 meter niet mag overschrijden. De reflectie-intensiteit is afhankelijk van de afstand tussen scanner en object. Een kleinere afstand gaat gepaard met een hogere intensiteit en daardoor een grotere kans op een goede afstandsmeting. Daarom is een zo klein mogelijk afstand tot het te meten object gewenst. Echter maakte de proefopstelling van de macrostabiliteitsproef het niet mogelijk om de laserscanner dichterbij dan 47 meter van de dijk op te stellen. Hierbij speelden zowel veiligheidsvoorschriften, risico's voor de apparatuur, als uit te voeren werkzaamheden tijdens de proef een rol. Met de positionering van 47 meter vanaf de dijk is de maximale afstand tot de uiteinden van de dijk 84 meter, ruim binnen de maximaal toegestane afstand van 134 meter. De opstelling van de ScanStation 2 is zichtbaar in fig. 4.



Figuur 4 Opstelling terrestrische laserscanner. De opstelling stond op een afstand van 47 meter t.o.v. het centrum van de dijk.

De scanner is geplaatst op een driepoot op ongeveer 1.8 meter boven het aardoppervlak. Een behuizing, opgebouwd uit een houten balkconstructie en licht plastic, geeft de scanner bescherming tegen hevige regenval, wind, vocht, en invallend zonlicht, zie fig. 5.

Installatie referentieobjecten

Vijf referentiepunten zijn ingezet om verschuivingen tussen de coördinatenstelsels van de scans te kunnen elimineren. Voor drie meetpunten zijn steigerbuizen, variërend van 4.5 tot 6 meter, in de grond gedrukt totdat de buizen 1 meter boven de grond uitstaken. In deze buizen zijn borden geplaatst.

³ www.leica-geosystems.com/hds/en/lgs_62189.htm

Er is gekozen voor een plaatsing in de grond om zo verschuivingen van de targets door vervormingen van het oppervlak te minimaliseren. De overige twee referentiepunten zijn meetbollen geïnstalleerd op driepoten. De referentiepunten zijn geplaatst tussen de scanner en het dijklichaam op een afstand van 5 tot 15 meter van de scanner. De keuze voor mogelijke locaties voor de referentiepunten werd beperkt door randvoorwaarden voortkomend uit de opzet van de macrostabiliteitsproef.



Figuur 5 Opstelling terrestrische laserscanner ScanStation 2. De scanner is geplaatst onder een afdak geïnstalleerd op vier driepoten. Het afdak bood bescherming tegen regenval, wind, vocht en invallend zonlicht.

5.6.3. Meetresultaten

Gemiddeld is het dijklichaam vastgelegd door 250.000 meetpunten. De aanwezigheid van mist op vrijdagavond, vrijdagochtend, zaterdagavond en zaterdagochtend heeft het aantal meetpunten verminderd. Reflectoren op de dijk en objecten met een hoge albedo zijn zichtbaar op de scans, maar van objecten met een laag albedo, zoals klei, zijn op deze tijdstippen geen metingen beschikbaar. De scans opgenomen tijdens de mist zijn niet gebruikt bij de berekening van de vervorming.

De scans zijn ingedeeld in de groepen: dag en scanworld (zie Appendix A). Deze groepen vormen een hiërarchische structuur. Dag 1 is de dag waarop het macrostabiliteitsexperiment is begonnen, namelijk 25 september 2008. Dag 2 en 3 zijn respectievelijk 26 en 27 september 2008. Binnen de dagen vallen de *scanworlds*⁴. Wegens technische redenen zijn verschuivingen van de initiële laserpositie ontstaan.

⁴ Van een scanworld kan aangenomen worden dat alle scans gemaakt zijn vanuit een vergelijkbare initiële laserpositie

Ondanks dat de scanner niet verplaatst is vallen hierdoor *niet* alle scans in één scanworld. De verschillende scanworlds dienen daardoor geregistreerd te worden.

Na de registratie van de laserscans kan de deformatie bepaald worden. De eerste scan op de eerste dag van de macrostabiliteitsproef is gekozen als referentiebeeld (do 25/09/08, 08:49:24 (start scan)). Het verschil tussen de overige scans en dit referentiebeeld geeft de deformatie tijdens de proef weer. De scans zijn weergegeven in bolcoördinaten, dus een stelsel van horizontale en verticale hoeken. Omdat de locaties van de scanpunten van de verschillende scans niet exact overeenkomen, is er een lineaire interpolatie naar een grid toegepast. Dit grid heeft een verticale en horizontale bemonstering van 0.0682 graden Dit komt overeen met een maximale bemonsteringsafstand van 10 cm aan de uiteinden van de dijk. In het centrum van de dijk is de bemonstering kleiner dan 10 cm. De resultaten van de deformatieanalyse worden hieronder weergegeven aan de hand van de meest representatieve scans. Het totale deformatieverloop is tevens gevisualiseerd in een animatie⁵.

Tijdens de proef zijn een aantal maatregelen genomen om het bezwijken van de dijk te forceren. De belangrijkste momenten en overige gebeurtenissen zijn weergegeven in tabel 2, zie ook fig. 3.

Datum	Tijd	Maatregel/gebeurtenis
do 25/9/08	9:41	start vullen basin
do 25/9/08	10:50 - 18:00	ondiepe ontgraving
vr 26/9/08	5:10 - 10:57	mist
vr 26/9/08	10:58 - 20:15	diepe ontgraving
za 27/9/08	23:45 - 11:30	mist
za 27/9/08	12:07	start vullen zandkern
za 27/9/08	16:02	bezwijken dijk

Tabel 2 Overzicht belangrijkste maatregelen om het bezwijken van de dijk te forceren en overige gebeurtenissen.

Meetnauwkeurigheid

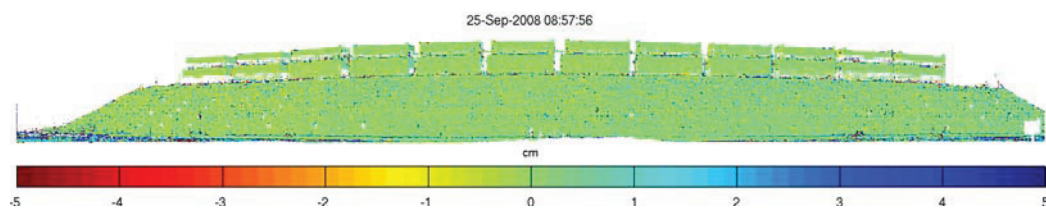
Zoals aangegeven is een deformatie tijdserie opgebouwd relatief ten opzichte van de afstanden in de eerste scan van de eerste dag van de proef. Als gevolg hiervan zal meetruis uit deze scan in elk deformatiebeeld terugkeren. Om dit te illustreren is in fig. 6 het deformatiebeeld na de tweede scan weergegeven. Omdat er op dat moment nog geen maatregelen gestart waren om het bezwijken van de dijk te forceren, kan aangenomen worden dat er nog geen deformatie heeft plaatsgevonden. Dit beeld geeft daarom een indruk van het ruisniveau voor het verschil tussen twee scans.

Het ruisniveau is gekwantificeerd door de nauwkeurigheid van de metingen te schatten uit de eerste zes scans. Vergelijking van de scans toont dat geen deformatie aanwezig is tussen de scans. De initiële positie van de laser is gelijk

⁵ Zie www.hansjebrinker.net

waardoor de beelden niet geregistreerd dienen te worden, en de beelden direct met elkaar vergeleken kunnen worden. De hieruit geschatte standaarddeviatie van de metingen op de dijk is 5 mm.

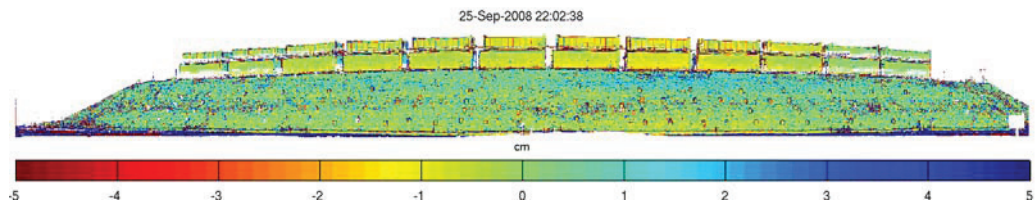
De noodzakelijke registratie- en interpolatieprocedure tussen de scans, met de daarbij behorende onzekerheid, zorgt voor een toename in de standaarddeviatie. Deze onnauwkeurigheid is geschat door vervorming van de gridcellen op één m² op drie verschillende locaties in de tijd te analyseren. De onnauwkeurigheid wordt hiermee geschat op 1.5 cm in de kijkrichting van de scanner.



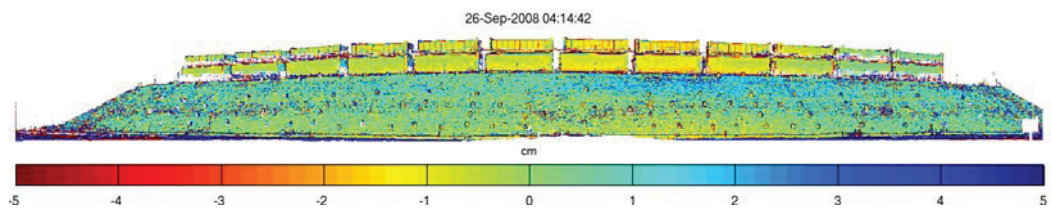
Figuur 6 Deformatiebeeld na de tweede scan van de eerste dag. Dit beeld geeft een indruk van het ruisniveau voor het verschil tussen twee scans, door zowel instrumentele als interpolatiefouten. De geschatte standaarddeviatie van de metingen in dezelfde scanworld is 5 mm.



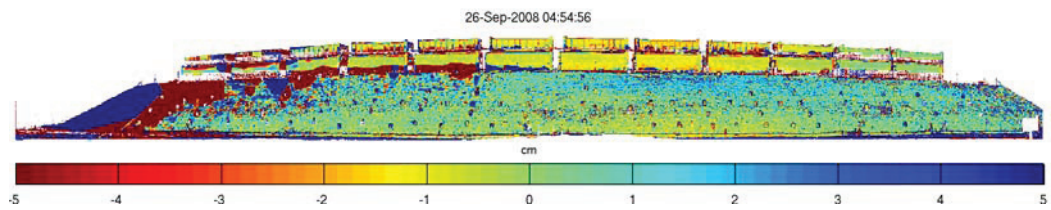
Figuur 7 Eerste (ondiepe) greppel aan de voet van de dijk.



Figuur 8 Deformatiebeeld 4 uur na de eerste ontgraving. Ten opzichte van de containers aan de uiteinden van de dijk zijn de middelste containers 0.6 cm naar voren gekomen. Ook is een lichte deformatie van 1 cm bij de kruin en de voet van de dijk zichtbaar.



Figuur 9 Deformatiebeeld 10 uur na de eerste ontgraving.



Figuur 10 Deformatiebeeld bij beginnende mist.



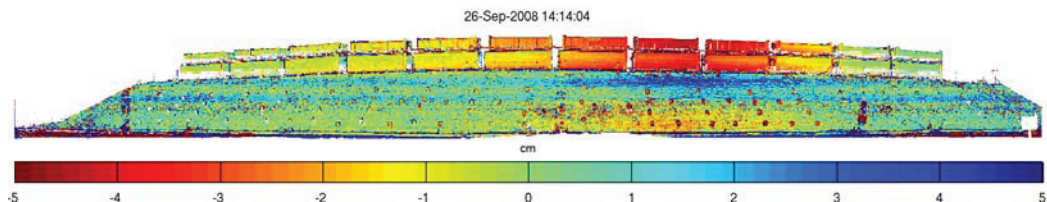
Figuur 11 Diepe ontgraving van de greppel aan de voet van de dijk.

Gemeten deformaties

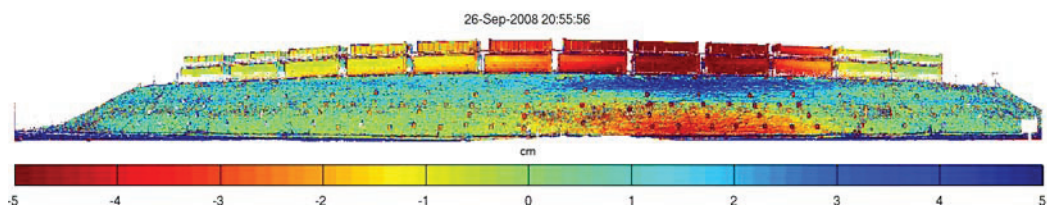
Op de eerste dag is een eerste greppel gegraven aan de voet van de dijk (de zogenaamde *ondiepe ontgraving*), zie fig. 7. Het deformatiebeeld 4 uur na deze ontgraving is weergegeven in fig. 8. Ten opzichte van de containers aan de uiteinden van de dijk zijn de middelste containers ongeveer 0.6 cm naar voren gekomen (negatieve afstand betekent een verschuiving in de richting van de scanner). Ook is een lichte deformatie van 1 cm bij de kruin en de voet van de dijk zichtbaar.

Zo'n 10 uur na de eerste ontgraving is de deformatie nog iets toegenomen, zie fig. 9. Vlak na deze scan kwam de mist sterk opzetten. De mist resulteerde in grote verstoringen van de afstandsmetingen, waardoor deze scans niet bruikbaar zijn voor de deformatieanalyse. In fig. 10 is een voorbeeld van een deformatiebeeld met beginnende mist opgenomen.

Op vrijdag 26 september is de greppel verder verdiept (de zogenaamde *diepe ontgraving*, zie fig. 11). In fig. 12 is een deformatiebeeld tijdens deze ontgraving weergegeven. De deformatie rechts van het midden van de dijk is verder doorgezet. De containers en de voet van de dijk zijn naar voren gekomen met respectievelijk 0.9 cm en 1.4 cm, het stuk van de dijk onder de containers is met 1.8 cm van de scanner verwijderd. Dit komt door een verzakking in verticale richting, waardoor de horizontale afstand groter wordt. Na het voltooiën van de graafwerkzaamheden is de dijk verder gedeformeerd. In fig. 13 is te zien dat de maximale deformatie inmiddels meer dan 5 cm bedraagt.

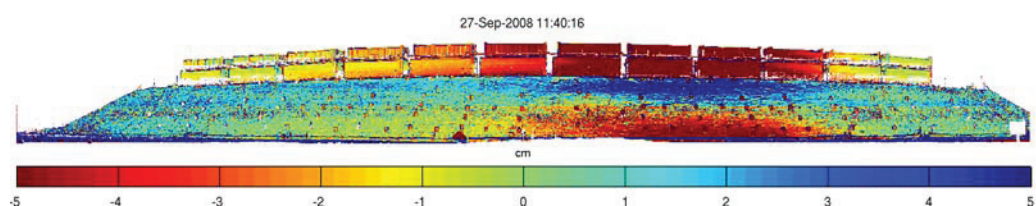


Figuur 12 Deformatiebeeld tijdens de diepe ontgraving van de greppel aan de voet van de dijk. De deformatie rechts van het midden van de dijk is verder doorgezet. De containers en de voet van de dijk zijn naar voren gekomen met respectievelijk 0.9 cm en 1.4 cm, het stuk van de dijk onder de containers is met 1.8 cm van de scanner verwijderd.

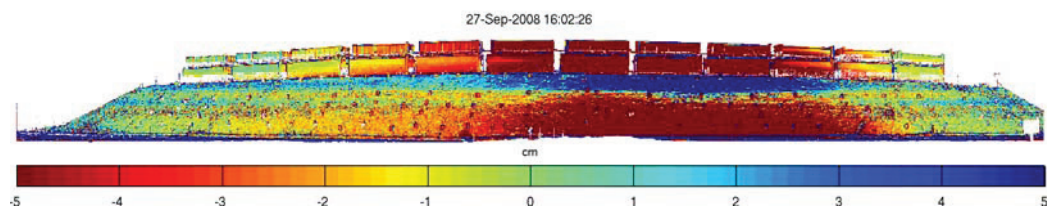


Figuur 13 Deformatiebeeld na de diepe ontgraving. De maximale deformatie bedraagt inmiddels meer dan 5 cm.

Om het bezwijken van de dijk te stimuleren is op zaterdag 27 september na het optrekken van de mist begonnen met het vullen van de zandkern van de dijk met water. De deformatie vlak voor het vullen van de zandkern wordt getoond in fig. 14. Het water in de kern van de dijk heeft voor verdere deformatie gezorgd. De vervorming in de kijkrichting van de scanner ter plaatse van de containers is nu 6 cm naar de scanner toe. De vervorming van de kruin is 8.5 cm van de scanner af, en de vervorming bij de voet is -9.8 cm naar de scanner toe. In fig. 15 is het deformatiebeeld vlak voor het bezwijken van de dijk opgenomen. De maximale vervorming vindt plaats bij de containers en is 24 cm. De voet en kruin zijn tegen de 20 cm gedeformeerd.

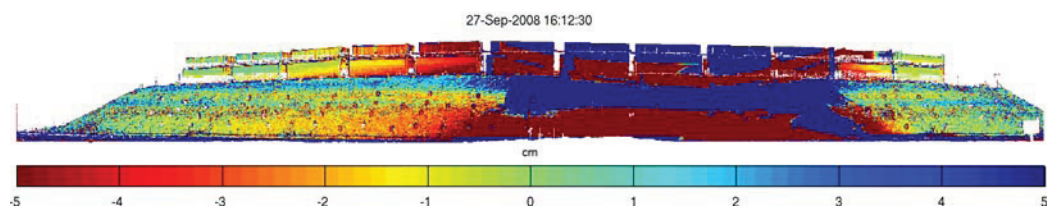


Figuur 14 Deformatiebeeld voor de start van het met water vullen van de zandkern van de dijk. De leurenschaal is verzadigd. De maximale deformatie is -9.8 cm ter plaatse van de voet.

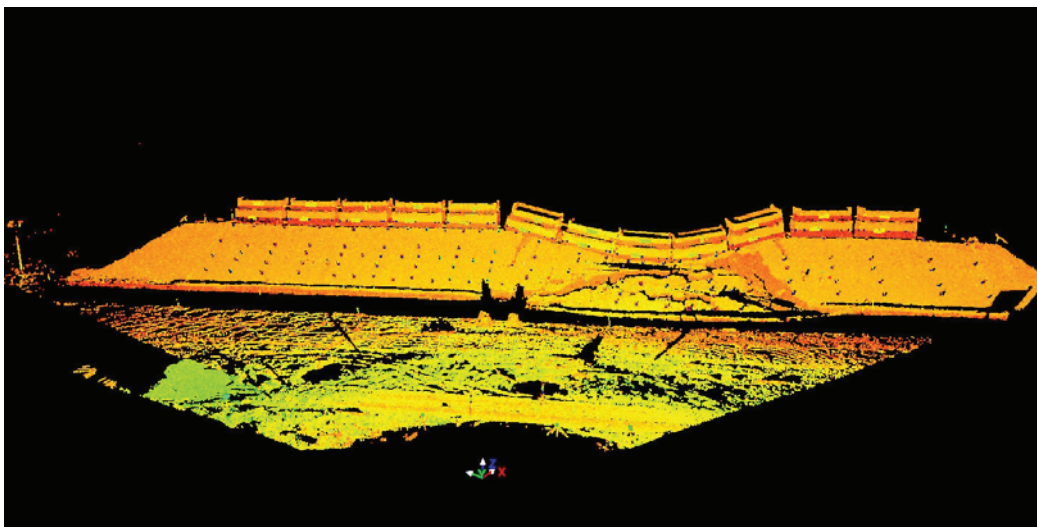


Figuur 15 Deformatiebeeld vlak voor het bezwijken van de dijk. De maximale deformatie is -24 cm ter plaatse van de container. De voet en kruin zijn tegen de 20 cm gedeformeerd.

Op zaterdag 27 september om 16:02 is de dijk bezweken. Het resultaat is weergegeven in fig. 16. In fig. 17 is de scan gemaakt na doorbraak van de dijk te zien. De totale tijdserie van de periode vlak voor het bezwijken van de dijk wordt getoond in fig. 18. De kleurenschaal is verruimd naar ± 20 cm, zodat meer detail zichtbaar is.



Figuur 16 Deformatiebeeld na het bezwijken van de dijk. Het figuur laat de vervorming na doorbraak ten opzichte van de eerst genomen scan zien. In de eerste scan stonden de containers op een lijn. Nadat de dijk doorgebroken was, waren de containers ruim een meter gezakt. Omdat het een verschilplot van de afstand op twee tijdstippen is, is de initiële positie van de containers nog zichtbaar in het figuur.

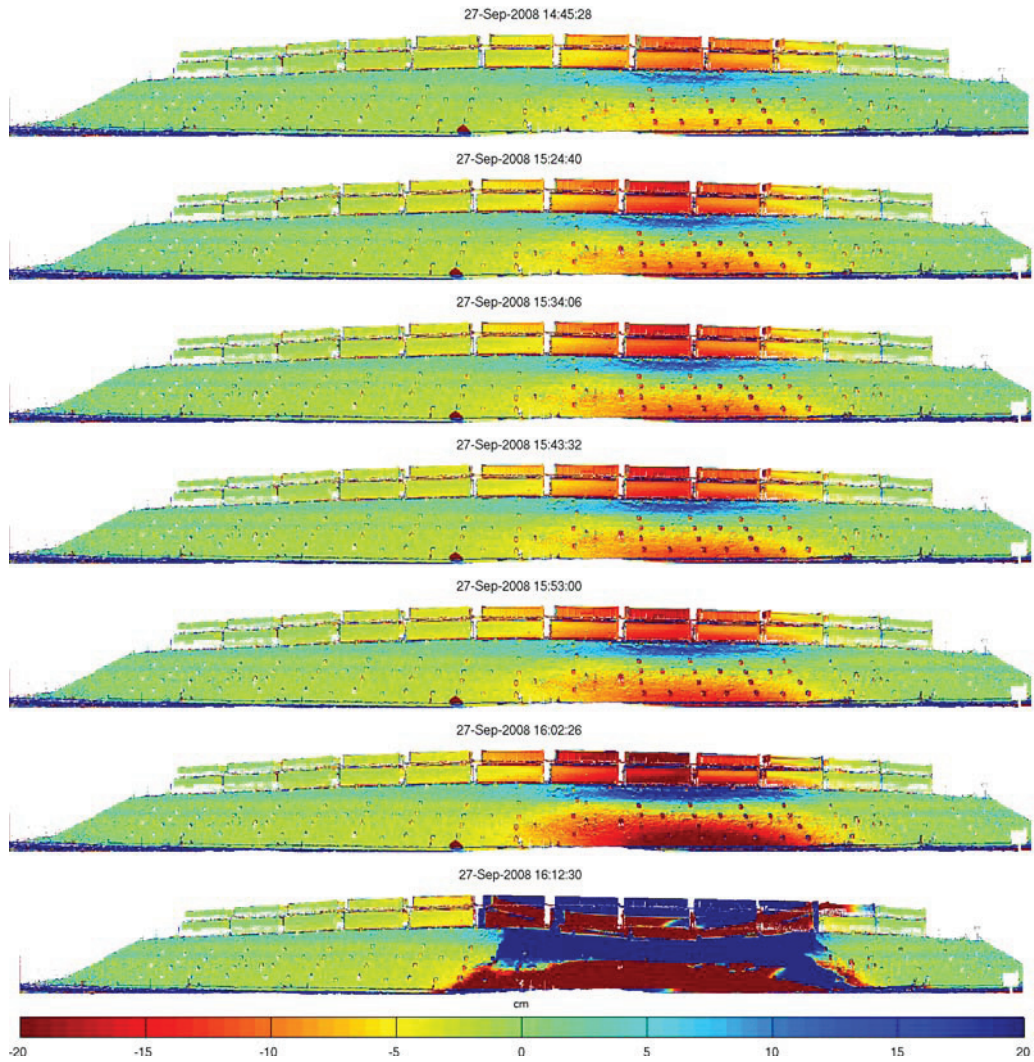


Figuur 17 Laserscan van de IJkdijk na de doorbraak. De kleurschaal geeft de intensiteit van de reflecties weer.

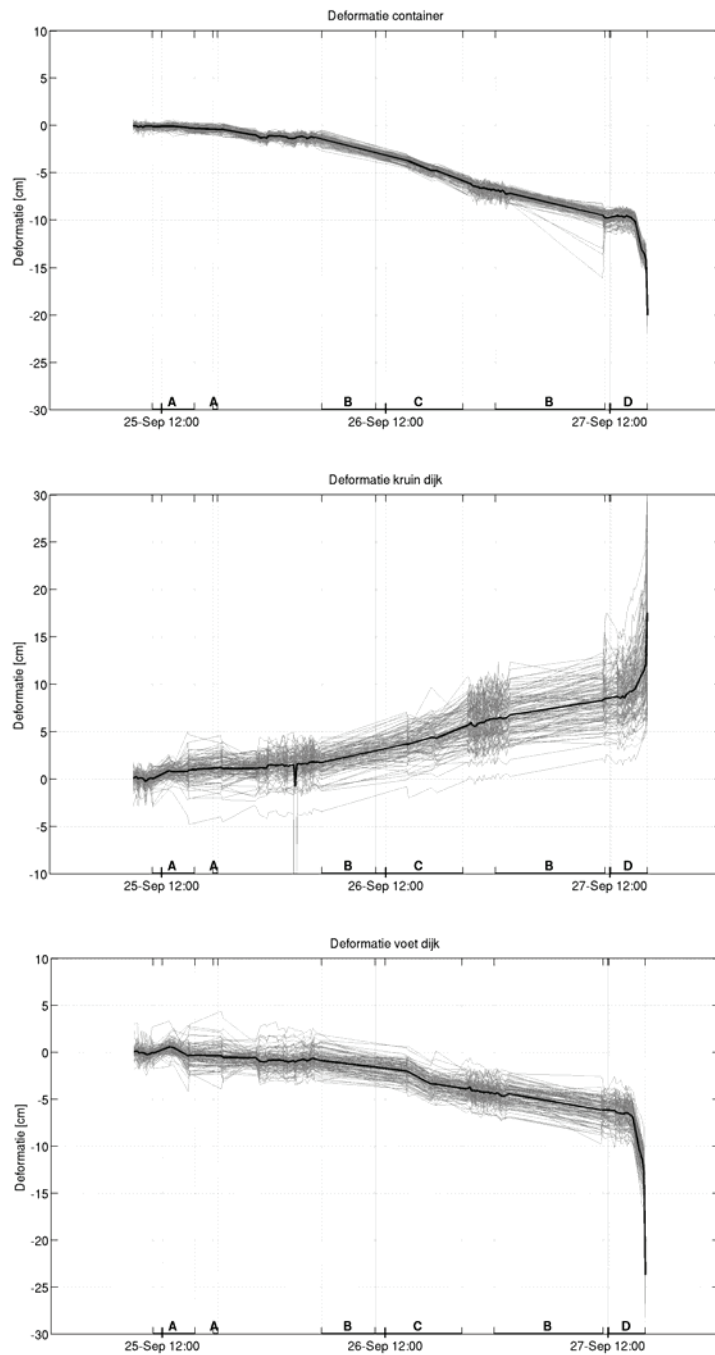
In figuur 19 zijn de deformatie tijdseries weergegeven voor de voet van de dijk, de kruin van de dijk en de container op de dijk in het gebied met maximale deformatie. De vervorming in het figuur is in de kijkrichting van de scanner. De grijze lijnen laten de vervorming zien van alle gridcellen in een gebied van ongeveer 1x1 meter (100 gridcellen). De zwarte lijn toont het gemiddelde. De maximale deformatie van de dijk voor bezwijking bedraagt zo'n 20 tot 30 centimeter.

De meetpunten in de m^2 ter plaatse van de container laten een positieve richtingscoëfficiënt zien net voor de inzet van de doorbraak. De richtingscoëfficiënt wordt hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door het vullen van de zandkern. De dijk zet uit door het water, waardoor de containers omhoog komen. Omdat de containers gedurende de proef waarschijnlijk licht gekanteld zijn, resulteerde dit inderdaad in een langere afstand tot de scanner.

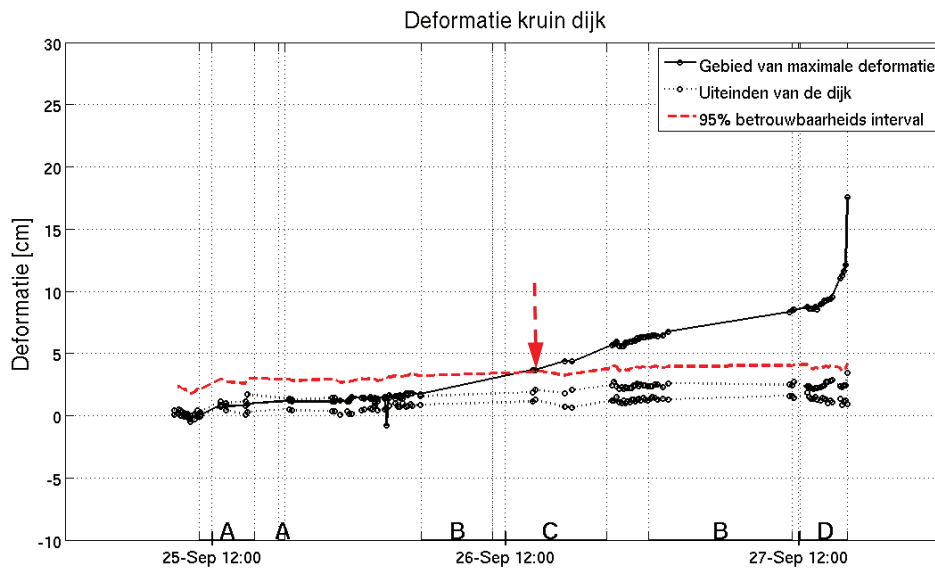
De verschilplots van de volledige dijk tonen rond 25 september 22:00, krap twee dagen voor de doorbraak van de dijk, deformatie op de locatie waar de dijk uiteindelijk is doorgebroken. Uit de tijdserieplots in fig. 19 is het moment waarop de zwakke locatie in de dijk zich vormt minder duidelijk af te lezen. Indien de tijdseries van de kruin aan de uiteinden van de dijk geploteerd worden in hetzelfde figuur als de tijdserie van de kruin in het gebied van maximale deformatie, is het moment waarop de deformatie doorzet te identificeren, zie fig. 20. In het figuur geeft de rode lijn de bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval aan. Deze lijn is opgesteld door tweemaal de standaardafwijking (1 cm) op te tellen bij de gemiddelde deformatie van de uiteinden. Als de deformatie boven deze grens uitkomt, kan met 95% zekerheid gesteld worden dat de deformatie afwijkt van de deformatie van de uiteinden, die stabiel worden verondersteld.



Figuur 18 Deformatie tijdserie een uur voor het bezwijken van de dijk tot 10 minuten na doorbraak van de dijk. De kleurenschaal is verruimd naar ± 20 cm. De figuren geven de vormverandering aan ten opzicht van de eerste scan. Om deze reden is de originele locatie van de containers zichtbaar in het onderste figuur.



Figuur 19 Deformatie tijdseries voor verschillende onderdelen van de dijk in het gebied met maximale deformatie. Deformaties tot het moment van bezwijken zijn weergegeven. De vervorming in de grafieken is in de kijkrichting van de scanner. Boven) container, midden) kruin dijk, onder) voet dijk. De grijze lijnen laten de deformatie zien van alle ruimtelijk geïnterpoleerde gridcellen in een gebied van ongeveer 1x1 meter (100 gridcellen). De zwarte lijn toont het gemiddelde. De maximale deformatie van de dijk voor bezwijking bedraagt zo'n 20 tot 30 centimeter. De evenementen worden aangeduid met een letter. A: ondiepe ontgraving, B: mist, C: diepe ontgraving, D: vullen zandkern.



Figuur 20 Deformatie tijdseries voor de kruin van de dijk in het gebied met maximale deformatie en aan de uiteinden van de dijk. De cirkels representeren de opnametijden van de scans. Ter plaatse van de rode pijl, 26 september 14:14, kan met 95% betrouwbaarheid gesteld worden dat de deformatie afwijkt van de deformatie van de uiteinden, die stabiel zijn verondersteld. Deformaties tot het moment van bezwijken zijn weergegeven. De vervorming in de grafieken is in de kijkrichting van de scanner. De evenementen worden aangeduid met een letter. A: ondiepe ontgraving, B: mist, C: diepe ontgraving, D: vullen zandkern.

Het moment waarop de deformatie boven de grens uitkomt, is gelijk aan 26 september 14:14, 26 uur voor de doorbraak. Echter was in fig. 8 de locatie van doorbraak al om 25 september 22:03 zichtbaar, 42 uur voor de doorbraak. Enkele oorzaken voor dit verschil kunnen zijn:

- de standaarddeviatie is onderschat. Door ruimtelijke correlatie is de standaarddeviatie lager dan de berekende 1 cm. Een hogere nauwkeurigheid van de monitoringstechniek zorgt voor een verschuiving van het 95% betrouwbaarheidsinterval, waardoor het moment van ingrijpen eerder aantoonbaar zou zijn.
- De deformatie op 25 september 22:03 was daadwerkelijk niet significant. De deformatie bevond zich inderdaad onder de 95% betrouwbaarheidsgrens.
- De geselecteerde locatie van de gevisualiseerde tijdseries in fig. 20. Indien in fig. 20 een afwijkende locatie was gevisualiseerd waar deformatie eerder plaats vond, zou het moment van ingrijpen ook eerder aantoonbaar zijn. Dit toont de relevantie van de keuze van de meetlocaties. Indien een meetlocatie enkele meters van het centrum van maximale deformatie vandaan zit, zal het moment van ingrijpen later plaatsvinden dan wanneer de meetlocatie zich exact in het centrum van maximale deformatie bevindt.

Transformatie naar satellietkijkrichting

Hansje Brinker meet de deformatie van werkelijke waterkeringen in Nederland met behulp van satellietgegevens. Voor zowel de lasertechniek als de satelliettechniek zijn de kijkrichting van de meetsensor en de richting van de deformatie van belang. Voor de terrestrische laserscanner geldt dat de kijkrichting praktisch horizontaal is waardoor de horizontale deformatie nauwkeuriger bepaald kan worden dan de verticale deformatie. Voor de satelliet geldt het omgekeerde, gezien deze van 800 km hoogte onder een hoek van 23° vanuit de verticaal naar de aarde kijkt. De richting van de deformatie bepaalt dus de gevoeligheid van de sensor. Tijdens het macrostabiliteitsexperiment zakte de kruin van de dijk (verticale beweging) en bukte de teen van de dijk uit (horizontale beweging). Hierdoor is de beweging van de kruin nauwkeuriger met de satelliet meetbaar en de beweging van de teen van de dijk nauwkeuriger met de laserscanner. Gezien de precisie van de meettechnieken (5 mm voor een enkele meting met satelliet radarinterferometrie en 10 mm voor een enkele meting met terrestrische laser) kan de deformatie van de IJkdijk dus ook met de radarsatelliet gemeten worden. De gevoeligheid is voor beide meettechnieken afhankelijk van de richting van de deformatie, en daardoor afhankelijk van de locatie van de meting op de dijk.

Casestudies aan dijklichamen in Nederland hebben aangetoond dat deformaties daadwerkelijk gemeten kunnen worden met de satelliet. Hierbij zijn de herhalingsfrequentie van de satelliet (momenteel ongeveer 6 dagen, in de toekomst bijna dagelijks) en de ruimtelijke resolutie in relatie tot de kwaliteit van de radarreflectie van belang. Daarnaast passeert een satelliet een gebied in klimmende baan (van zuid naar noord) en dalende baan (noord naar zuid). Hierdoor wordt de deformatie vanuit minimaal twee kijkrichtingen gemeten, waardoor de werkelijke richting van de deformatie bepaald kan worden.

5.6.4. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Binnen dit experiment is vastgesteld dat de *deformatie* een cruciale en significante parameter van het dijklichaam is, die ver voor het eventueel bezwijken al indicatief blijkt voor zwakke plekken. Deformatie is een parameter die nauwkeurig en met non-invasieve technieken kan worden bepaald. Deformatiemetingen, zoals hier met een terrestrische laserscanner maar ook op systematische wijze met satellietradarmetingen, geven daarmee cruciale informatie over een dijklichaam wanneer dit aan belasting wordt blootgesteld.

De deformatie van de dijk is met de lasermethodiek significant waarneembaar vanaf een grootte van 1 cm. Deze deformatie trad reeds 42 uur voor het uiteindelijke bezwijken op, en was ook gelokaliseerd op de plek van het uiteindelijke bezwijken.

De deformatiemetingen zijn uitgevoerd in de kijkrichting van de laser. Hoewel het nagenoeg zeker is dat de deformatievector zowel een horizontale als een verticale component zal hebben, orthogonaal aan de lengterichting van de dijk, is slechts de projectie van deze vector in de richting van het laserinstrument te meten.

De eerste deformatie is opgetreden bij de eerste ontgraving aan de voet van de, in de orde van een centimeter. Bij de daarop volgende tweede (diepere) ontgraving is verdere deformatie waargenomen, waarbij de voet van de dijk uitzakte (zo'n 5 cm richting het instrument) waardoor de hoge flank van de dijk zo'n 4-5 cm van het instrument af bewoog. Het benodigde volume voor het uitzakken is klaarblijkelijk afkomstig van de hogere gedeelten van de dijk.

Door het met water vullen van de zandkern van de dijk treedt een zeer significante vormverandering op. Deze loopt op tot 2 decimeter uitzetting aan de onderkant van de dijk, en een vergelijkbare hoeveelheid verdunning aan de hoge flanken. Daarna bezwijkt de dijk.

Beperkende factoren in de meetopzet waren laaghangende mist en de graafwerkzaamheden. Ook was de opstelling van het laserinstrument wat aan de lage kant, waardoor de verschilmetingen behept zijn met (kleine) parallaxverschillen. De locatie van de referentiepunten was suboptimaal; deze zouden dicht bij het te meten object geplaatst moeten worden.

Analyse wijst uit dat wanneer de belasting over langere tijd zou zijn opgebouwd, zoals in werkelijkheid waarschijnlijk is, de veroorzaakte deformaties zeer wel vanuit het perspectief van de radarsatellieten waargenomen zou kunnen worden. De waarnemingsprecisie van de radar is, alhoewel deze vanaf veel grotere afstand meet, bijna een orde van grote beter. Het verlies aan ruimtelijke resolutie zou hierdoor ten dele kunnen worden gecompenseerd.

Aanbevelingen

Uit het experiment blijkt dat de deformatie een indicatieve, significante en kosteneffectieve parameter is om te monitoren. Voor de vervolgprouwen van de IJkdijk dient te worden overwogen om de vervorming wederom te meten. Hiervoor blijkt terrestrische laserscanning een geschikte techniek. Een hoger instrumentstandpunt en een betere plaatsing van de referentiepunten kan daarbij de resultaten sterk verbeteren.

De resultaten van de deformatiemetingen dienen te worden gecombineerd met andere waargenomen parameters, om daarmee een fysisch model van het deformatiemechanisme te maken.

Gegeven de resultaten van dit experiment dient te worden onderzocht of de waargenomen effecten zich in de afgelopen jaren ook hebben voorgedaan op andere locaties van waterkeringen in Nederland. Satelliet radar zou daarvoor een geschikte techniek zijn, aangezien daarmee met terugwerkende kracht een nationale analyse kan worden uitgevoerd. Hansje Brinker neemt zich voor om dit verder te onderzoeken.

5.7 Deelexperiment Koenders Industrie: Slimme Dijkmonitoringsysteem

Auteurs: ir. J.K. Haasnoot, M.C. de Jong (Koenders Instruments)

DEEL A SPECIFICATIES INSTRUMENTATIE EN INSTALLATIE

5.7.1 Algemeen

Het doel van Koenders Instruments is het in de praktijk beproeven van het "Slimme Dijk" monitoringsysteem op basis van het stappenplan uit het haalbaarheidsonderzoek "Slimme Dijken". In de onderstaande tabel zijn de maatgevende parameters met de benodigde typen meetinstrumenten weergegeven. De gearceerde parameters en meetinstrumenten zijn in het macrostabiliteitsexperiment ingezet in de Slimme Dijk Probes (SDP's).

Maatgevende parameter	Meetinstrument
deformatie in de X en Y richting:	inclinometer X en Y
waterspanning in en bij de waterkering:	Piëzometer
zetting / verzakking:	Extensometer, deformatie Z richting
waterstand voor / achter de waterkering:	Waterniveau-opnemer
neerslag:	Regenmeter

Op basis van de beschikbare informatie van de opbouw van het dijklichaam, de sondeerstaten en de predictie van het bezwijkmechanisme is de keuze gemaakt om op drie raaien sensoren aan te brengen. De twee buitenste raaien worden ieder voorzien van één gecombineerde "Slimme Dijke Probe (SDP)", die boven op de dijk, aan de rand van het verwachte bezwijkvlak aangebracht worden. De middelste raai wordt voorzien van twee SDP's, waarvan er één boven op de dijk en in de teen van de dijk geplaatst wordt. De sensorposities in de SDP's zijn bepaald zodat in de relevante lagen gemeten wordt.

5.7.2 Instrumentatie

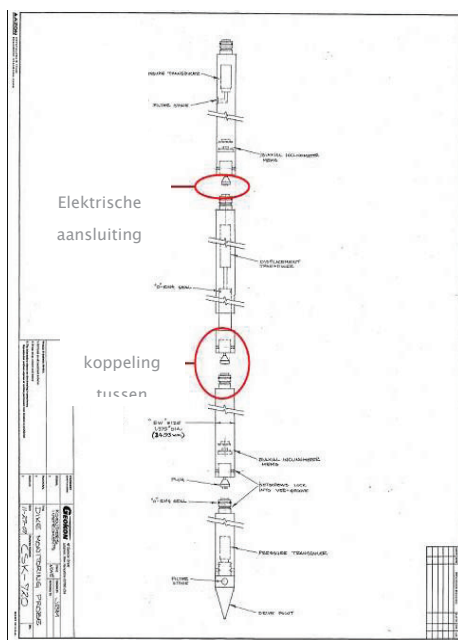


Foto 1a Voorbeeld ontwerp SDP



Foto 1b SDP's in werkelijkheid

Maatgevende parameter	Meetbereik	Nauwkeurigheid	Resolutie
<i>Te meten parameters</i>			
Waterspanning	100kPa	0,1% (0,1kPa)	0,1kPa
Deformatie X en Y	± 10 graden	0,1% (0,01graad)	± 0,01mm/m
Deformatie Z	+10...-40cm	0,1% (0,5mm)	0,1mm
Temperatuur	-20...+50 grC	0,1%	0,1 graad C
Waterstand			

Tabel 1 Maatgevende parameters met benodigde meetbereiken en nauwkeurigheden

Op basis van de installatieplanning zijn de prototype SDP's gemaakt. Iedere SDP is opgebouwd uit sensormodules en verbindingdelen. Op deze wijze kan met standaard sensor modules en verbindingdelen een unieke, voor die locatie opgebouwde probe geconfigureerd worden.

De **piëzometer** heeft de volgende specificaties:

- piëzoresistieve sensor
- meetbereik 0 ... 240kPa
- nauwkeurigheid 0,1% FS
- uitgangssignaal 0 ... 5V
- voorzien van individuele kalibratie
- meetwaarden in kPa's
- meetfrequentie 1 meting per seconde
- registratiefrequentie 1 registratie per seconde

De **X/Y tilsensoren** hebben de volgende specificaties:

- MEMS sensoren voor X en Y richting
- meetbereik +/- 10 graden
- nauwkeurigheid 0,1% FS
- uitgangssignaal - 3,0V ... + 3,0V
- voorzien van individuele kalibratie
- meetwaarden in graden
- meetfrequentie 1 meting per seconde
- registratiefrequentie 1 registratie per seconde

De sensoren zijn in de probe doorverbonden zodat de probe met een kabel op het data-acquisitiesysteem aangesloten kan worden. Het concept gaat uit van een geheel gepreconfigureerd systeem, dat op locatie middels een sondering geplaatst wordt. Het standaard bij de SDP horende data-acquisitiesysteem gaat uit van een zeer compacte, volledig autonome module.

5.7.2.1 Noordraai SDP in kruin van de dijk in het verwachte bezwijkvlak

Veenmeting:

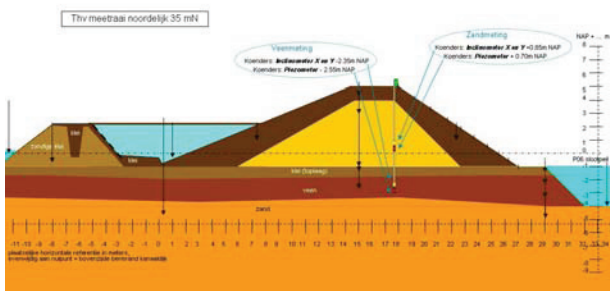
Piëzometer op -2,55m NAP

XY tiltsensor op -2,35m NAP

Zandmeting:

Piëzometer op +0,70m NAP

XY tiltsensor op +0,95m NAP



5.7.2.2 Middenraai SDP in kruin van de dijk in het verwachte bezwijkvlak

Kleimeting:

Piëzometer op -1,50m NAP

XY tiltsensor op -1,30m NAP

Zandmeting:

Piëzometer op +1,75m NAP

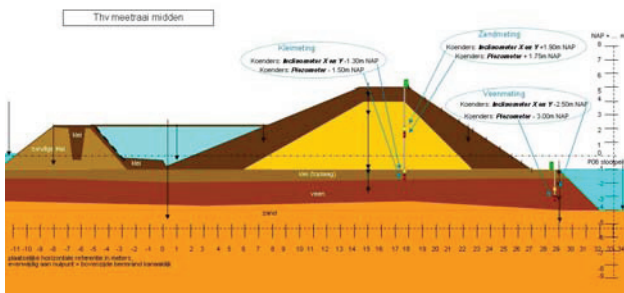
XY tiltsensor op +1,90m NAP

SDP in de teen van de dijk

Veenmeting:

Piëzometer op -3,00m NAP

XY tiltsensor op -2,50m NAP



5.7.2.3 Zuidraai SDP in kruin van de dijk in het verwachte bezwijkvlak

Veenmeting:

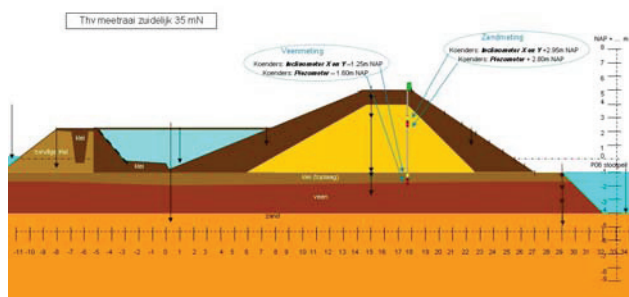
Piëzometer op -1,60m NAP

XY tiltsensor op -1,25m NAP

Zandmeting:

Piëzometer op +2,80m NAP

XY tiltsensor op +2,95m NAP



5.7.2.4 Data-acquisitiesysteem

Het standaard systeem is zeer flexibel en is gebaseerd op een intelligente data-acquisitie en controle module. Voor dit experiment is deze uitgerust met een netvoeding, accu back-up en LAN interface om aan de gewenste functionaliteit te voldoen. De data wordt on-line ter beschikking gesteld aan TNO-ICT. Hiervoor is een lokale controlemodule nodig, die tevens de functionaliteit heeft om de data in .csv formaat aan de database van TNO-ICT door te geven.

5.7.3 Installatie

De SDP's zijn ontworpen om in bestaande infrastructuur middels sondering te installeren. Deze installatiemethode wordt op de IJkdijk door Deltares helaas niet toegestaan en moest een alternatieve installatiestrategie toegepast worden. In eerste instantie is toen gericht op het sonderen van het onderste deel en tijdens de bouw opbouwen van het systeem parallel aan de opbouw van de dijk. Dit is niet gelukt vanwege de productietijd van de SDP's. Hierom is uiteindelijk besloten een geperforeerde casing voor de SDP's te plaatsen en deze op te hogen met de bouw van de dijk. Bij gereedkomen van de dijk zijn de SDP's hierin geplaatst en met een betoniet mix afgedicht.

De probes in de kruin zijn niet op de voorgestelde plaatsen geïnstalleerd. Op locatie zijn de werkelijke locaties aangewezen op basis van tekening CO-420612, hierop zijn de gewenste locaties niet juist ingetekend. Bij het installeren van het eerste deel van de casing is dit niet onderkend door onze technische dienst omdat de uiteindelijke vorm van de dijk toen nog niet zichtbaar was. Bij gereedkomen van de dijk bleek dat de SDP's aan de "verkeerde" kant van de kruin terecht zijn gekomen, hierdoor zijn de SDP's waarschijnlijk buiten het te verwachten bezwijkvlak geplaatst.

De SDP's zijn in de geplande meetraaiën geïnstalleerd. De installatiediepten van de SDP's zijn als volgt gerealiseerd:

5.7.3.1 Noordelijke meetraai, SDP in kruin van de dijk (bassinzijde)

Veenmeting:

Piëzometer op -2,55m NAP
XY tiltsensor op -2,35m NAP

Zandmeting:

Piëzometer op +0,70m NAP
XY tiltsensor op +0,95m NAP

5.7.3.2 Middelste meetraai, SDP in kruin van de dijk (bassinzijde)

Kleimeting:

Piëzometer op -1,50m NAP
XY tiltsensor op -1,30m NAP

Zandmeting:

Piëzometer op +1,75m NAP
XY tiltsensor op +1,90m NAP

Middelste meetraai, SDP in de teen van de dijk (slootzijde)

Veenmeting

Piëzometer op -3,00m NAP
XY tiltsensor op -2,50m NAP

5.7.3.3 Zuidelijke meetraai, SDP in kruin van de dijk (bassinzijde)

Veenmeting:

Piëzometer op -0,60m NAP
XY tiltsensor op -0,25m NAP

Zandmeting:

Piëzometer op +2,80m NAP
XY tiltsensor op +2,95m NAP



Foto 2 SDP's in kruin aan bassinzijde

5.7.4 Programmering en definitie outputstring

De data is met 1 seconde interval geregistreerd. De volgende instellingen zijn toegepast voor de output string:

5.7.4.1 S2617 Meetsysteem noordraai

Units batt_Volt = Vdc
Units Druk_laag_kPa = kPa
Units Druk_hoog_kPa = kPa
Units Tilt_laag_A_grd = graden
Units Tilt_laag_B_grd = graden
Units Tilt_hoog_A_grd = graden
Units Tilt_hoog_B_grd = graden

5.7.4.2 S2618 Meetsysteem middenraai

Units batt_Volt = Vdc
Units Druk_laag_kPa = kPa
Units Druk_hoog_kPa = kPa
Units Druk_sloot_kPa = kPa
Units Tilt_laag_A_grd = graden
Units Tilt_laag_B_grd = graden
Units Tilt_hoog_A_grd = graden
Units Tilt_hoog_B_grd = graden
Units Tilt_sloot_A_grd = graden
Units Tilt_sloot_B_grd = graden

5.7.4.3 S2619 Meetsysteem zuidraai

Units batt_Volt = Vdc
Units Druk_laag_kPa = kPa
Units Druk_hoog_kPa = kPa
Units Tilt_laag_A_grd = graden
Units Tilt_laag_B_grd = graden
Units Tilt_hoog_A_grd = graden
Units Tilt_hoog_B_grd = graden

5.7.5 Controle instrumentatie voor bezwijken

Op vrijdag 26 september zijn de systemen gecontroleerd op functioneren. Er bleek toen dat door een storing in de stroomvoorziening het systeem gestopt was. Ook de back-up accu's waren geheel leeg. De voeding is hersteld en er zijn nieuwe back-up accu's geplaatst. Hierna heeft het systeem probleemloos gefunctioneerd.

In de week na het bezwijken zijn de SDP's opgehaald. Bij eerste inspectie blijkt dat alle sensoren het bezwijken overleefd hebben, wel is er enige schade aan de koppelingen tussen de sensormodules en verbindingstaven.



Foto 3 Controle van de systemen op de vrijdag voor bezwijken

DEEL B ANALYSE EN RAPPORTAGE MEETGEGEVENS

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Door CRUX Engineering BV zijn in opdracht van Koenders Instruments de meetgegevens geanalyseerd van het macrostabiliteitsexperiment bij de IJkdijk. De resultaten van de analyse zijn weergegeven in dit rapport. In deel A van het rapport zijn de specificaties van het meetinstrumentarium van Koenders gegeven.

1.2 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de uitgangspunten behandeld. Hoofdstuk 3 gaat in op de data verwerking en analyse. De resultaten zijn gegeven in grafiekvorm in en systematisch geanalyseerd in Bijlage 2. In hoofdstuk 4 worden de resultaten conform het beoordelingskader gerapporteerd.

2 Uitgangspunten

De volgende informatie is gehanteerd bij de totstandkoming van dit rapport:

- [1] Koenders Instruments, *bestanden S2618 IJkdijk Noord_meetwaarde.dat; S2618 IJkdijk Midden_meetwaarde.dat; S2618 IJkdijk Zuid_meetwaarde.dat;*
- [2] GeoDelft, bestand *Uitwerking metingen containers.xls*
- [3] GeoDelft, bestand *Logboek visuele inspectie.xls*
- [4] GeoDelft, bestand *IJkdijk.dwg*
- [5] Koenders Instruments, rapport "Project IJkdijk – Macrostabiliteitsexperiment", deel A.

Op basis van [3] is bepaald dat de IJkdijk is bezweken op 27 september 2008, 16:15 uur.

Een uitleg van de lay-out en specificaties van de instrumentatie is gegeven in [5].

3 Data verwerking en analyse

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten van Koenders Instruments in grafiekvorm verwerkt en geanalyseerd. In paragraaf 3.2 zijn de metingen in grafiekvorm verwerkt, de grafieken zijn gegeven in bijlage 1. De analyse van de meetresultaten is gegeven in paragraaf 3.3. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen het moment voorafgaand aan bezwijken en het moment van bezwijken. De meetresultaten na bezwijken zijn buiten beschouwing gelaten omdat het bezwijkmechanisme hiervoor een te "chaotisch" karakter heeft.

3.2 Meetresultaten

De meetresultaten zijn in grafiekvorm gepresenteerd in bijlage 1. In de grafieken is onderscheid gemaakt tussen meetraaien Noord, Midden en Zuid. De tiltmeters en waterspanningmeters zijn in separate grafieken gepresenteerd.

Bij de Midden doorsnede is ter referentie de meting van de container in de grafiek gevoegd [2].

De metingen zijn met een frequentie van 1 seconde opgeslagen. Voor het opstellen van de grafieken en om de dataverwerking in Excel te beheersen is deze frequentie teruggebracht naar 1 minuut. Ten tijde van het bezwijken is ook de hoogfrequente data beschouwd. Hieruit blijkt dat geen vitale informatie verloren is gegaan.

Het aantal meetfouten in de data is zeer beperkt geweest. Deze uiten zich in het ontbreken van een waarde of een alleenstaande hoge waarde. Deze kwamen echter zeer sporadisch voor en zijn dan ook handmatig uit de dataset verwijderd.

Als gevolg van een storing in de stroomvoorziening van het systeem is geen data geregistreerd in de volgende perioden:

Noord raai:	25 september 16:19 – 26 september 15:30
Middenraai:	24 september 20:15 – 26 september 15:30
Zuid raai:	25 september 18:06 – 26 september 16:08

3.3 Analyse van de meetresultaten

De analyse van de meetresultaten is systematisch uitgevoerd en gerapporteerd in tabelvorm in bijlage 2. Bij deze analyse is onderscheid gemaakt tussen de fase voorafgaand aan bezwijken en welke reacties in het meetsysteem daarbij waar te nemen zijn alsmede de fase van bezwijken van de IJkdijk. De fase na bezwijken is niet geanalyseerd omdat in die fase veel uitgangspunten niet meer vast staan, zoals de locatie van de sensoren, de grondsoort, etc. Overigens zijn wel alle sensoren metingen blijven registreren na bezwijken. Hierbij zijn geen extreme waarden waargenomen zodat de meetwaarden na bezwijken als aannemelijk kunnen worden beschouwd.

In de waterspanningsmeter (zand, kruin) van de middenraai is voorafgaand aan bezwijken nog een opmerkelijke meetreeks waargenomen. In de dag voorafgaand aan bezwijken is een zich herhalende toename/afname in waterspanning te zien. De toename is ca. 0,3 kPa, De herhalingsperiode is circa 2,5 uur. Dit fenomeen is wellicht gerelateerd aan een geleidelijke aanzet tot bezwijken van de dijk. Op basis van de uitgebreide analyse in bijlage 2 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

Ten aanzien van de kwaliteit van de metingen:

1. De magnitude van de reacties is in overeenstemming met de afstand tot het bezwijkvlak. De noord- en middenraai hebben beperkte reacties laten zien, zowel voor als tijdens bezwijken. De sensoren ter plaatse van het bezwijkvlak hebben een aanzienlijk grotere reactie gegeven. Dit geldt zowel voor de fase voor als tijdens bezwijken en voor de waterspanning en tilt sensoren.
2. De ruis in de metingen is voldoende klein zodat deze ondergeschikt is aan de reacties als gevolg van spanningsveranderingen of verplaatsingen.

Ten aanzien van de Tiltmeters:

3. De verdraaiingen vinden plaats in logische richting. Zo wordt in meetraai Noord een verdraaiing richting het zuiden gevonden, dus naar het bezwijkvlak toe en in meetraai Zuid is deze logischerwijs tegengesteld.
4. De tiltmeters vertonen geen zichtbaar onderscheid tussen de grondsoort waar deze in geplaatst zijn. Het niveau van de sensor is wel van belang. Hoe hoger deze in de dijk is geplaatst, naast het bezwijkvlak, hoe duidelijker de reactie is.

Ten aanzien van de Waterspanningmeters:

5. Tijdens bezwijken laten alle waterspanningsmeters een piek van positieve waterspanning zien. Deze waarde is logisch ten aanzien van grondsoort en afstand tot het bezwijkvlak. In zand is de piek kleiner, in klei en veen is deze groot. In de middenraai is de piek groot, daarentegen is de reactie in de noord- en zuidraai kleiner.
6. De absolute waarde van de waterspanningsmeter is niet altijd logisch. In meetraai zuid wordt een negatieve waarde gevonden, waar een positieve waarde verwacht wordt. De waterspanning in de teen van de dijk (middenraai) is negatief voorafgaand aan bezwijken. Dit kan een effect van de optredende instabiliteit zijn. Na bezwijken wordt een positieve waarde gevonden.

Ten aanzien van de fase voorafgaand aan bezwijken:

7. Voorafgaand aan bezwijken laten relevante sensoren, dus die binnen het invloedsgebied van het bezwijkvlak, een geleidelijke reactie zien, welke parallel loopt aan de verplaatsingen van de containers.
8. De nulmeting van de sensoren is echter te kort om te beschouwen in welke mate de reacties voorafgaand aan bezwijken significant afwijken van de "natuurlijke" trend.

Ten aanzien van het moment van bezwijken:

9. Alle sensoren, op een sensor na, laten in meer of mindere mate een reactie zien tijdens bezwijken. De uitzondering is de tiltmeter in het veen (laaggeplaatst) in de noordelijke meetraai, de nabijgelegen waterspanningsmeter laat echter een zeer duidelijke reactie zien.

De reacties in het bezwijkvlak zijn uiteraard zeer duidelijk en extreem in vergelijking tot de overige meetwaarden. Voor de tiltmeters buiten het bezwijkvlak geldt dat deze binnen een zeer kort tijdsbestek van ca. 10 minuten een sprong in de metingen maken met een blijvende verdraaiing tot gevolg, waarna de situatie snel stabiliseert. Voor de waterspanningsmeters buiten het bezwijkvlak geldt dat deze een duidelijke piek vertonen, met name in de grondlagen met een lage permeabiliteit. Deze piek dissipeert echter relatief snel weg, binnen enkele uren, tot de normale waarden.

4 Beoordeling

De beoordeling van de meetresultaten is uitgevoerd conform opgave in het beoordelingskader. In de onderstaande opsomming wordt onderscheid gemaakt tussen tiltmeters en waterspanningsmeters

Waarom is het meetinstrument ingezet?
Tiltmeter: Om de verdraaiingen en dus de verplaatsingen in de dijk waar te nemen
Waterspanningsmeter: Om de verandering in waterspanning in grondlagen waar te nemen.
Wat had gemeten moeten worden? a Is dat ook gemeten b Waarvoor is die meting relevant c In hoeverre worden de meetwaarden ondersteund danwel bevestigd door andere meetwaarden of waarnemingen? – Hoe zijn discrepanties te verklaren?
Tiltmeter: - hoekverdraaiing a Ja b Een tiltmeting geeft aan of de dijk beweegt c De tiltmetingen worden bevestigd door de metingen aan de containers bovenop de dijk. Uit de analyse blijkt dat de relatieve meetwaarden in oriëntatie en richting logisch zijn (zie hoofdstuk 3).
Waterspanningsmeter: - waterspanning a Ja b Waterspanning is een indicator voor een verandering in stabiliteit van de dijk c De waterspanningsmeters zijn niet direct vergelijkbaar met andere metingen. Wel is duidelijk dat de trend in waterspanning overeen kan komen met de gemeten verplaatsingstrend van de containers. Waterspanningsmeters in cohesieve lagen geven op grote afstand een duidelijke reactie tijdens bezwijken.

Waar is het meetinstrument ingezet?

- a In hoeverre is hiermee een volledig beeld verkregen?
- Welke dichtheid wordt nagestreefd bij een "echte dijk" van vergelijkbare omvang en samenstelling
- b Was dit een goede plaats, of (eventueel met de achteraf beschikbare wijsheid) was een andere locatie beter geweest?

Tiltmeter:

- Het meetinstrument is in de kruin van de dijk ingezet, in drie raaien, in twee grondlagen, ter plaatse van het bezwijkvlak ook in de teen van de dijk? Overigens zijn de sensoren in de kruin van de dijk, op aangeven van derden, aan de verkeerde zijde van de dijk geplaatst
- a Hiermee is een voldoende volledig beeld gekregen van het benodigd verplaatsingsveld verkregen.
- De dichtheid van plaatsing in een echte dijk is afhankelijk van de omvang en type van het te verwachten bezwijkmechanisme. Voor het geobserveerde bezwijkmechanisme bij de IJkdijk is de toegepast omvang voldoende en kan wellicht zelfs wat minder zijn.
- b Omdat de sensoren in de kruin van de dijk verkeerd geplaatst zijn is de locatie niet goed geweest. Indien de sensoren aan de andere kant van de kruin worden geplaatst is de locatie in orde. De locatie in de teen van de dijk zal waarschijnlijk vaker worden ingezet.

Waterspanningsmeter:

zie reacties bij de Tiltmeter

Wanneer is gemeten?

- a Wanneer is begonnen, wanneer is gestopt?
- Is er een betrouwbare nulmeting?
 - Is er lang genoeg doorgemeten?
- b Met welke frequentie is gemeten?
- Was dit voldoende of eigenlijk zelfs teveel, leidend tot een irrelevante stroom van data?
 - Zijn er mogelijkheden gezien om de frequentie aan te passen aan de meetwaarden?

Tiltmeter:

- a Er is van 24 september tot 1 oktober gemeten. De nulmeting is relatief beperkt omdat het natuurlijk gedrag van de dijk hierdoor niet goed bekend is. Bij een dergelijk experiment zal dit echter altijd het geval zijn of de dijk moet eerst jaren in ruste zijn voordat deze tot bezwijken wordt gebracht. Na bezwijken is lang genoeg doorgemeten.
- b Er is met een frequentie van 1 seconde gemeten. Dit is te hoog frequent, echter voor een proef kan beter te hoog dan te laag frequent worden gemeten. Bij een echte dijk kan de frequentie omlaag naar een orde van minuten.

Waterspanningsmeter:

zie reacties bij de Tiltmeter

In welke mate is er gemeten?

- a Is dezelfde meting met verschillende methoden uitgevoerd
- b In hoeverre zijn metingen meervoudig uitgevoerd
 - Was dat in het licht van potentiële uitval of onnauwkeurigheid van instrumenten terecht
- c In hoeverre zijn instrumenten daadwerkelijk uitgevallen?
 - Wanneer is dat gebeurd?
 - Is daardoor essentiële informatie gemist?

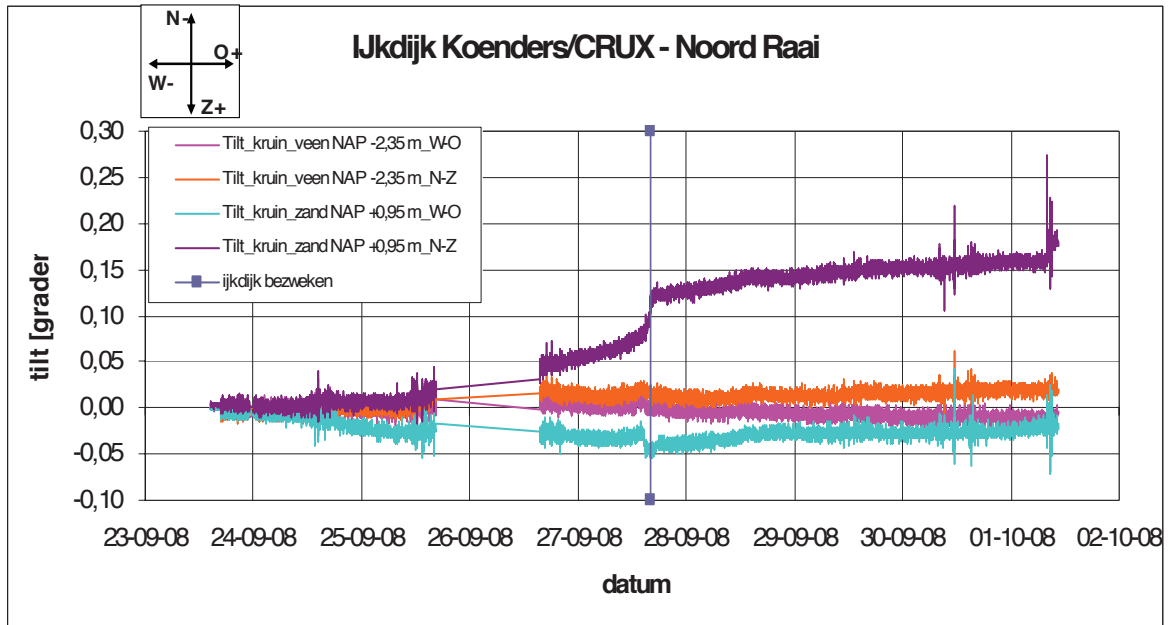
Tiltmeter:

- a De metingen van de containers zijn als referentie gebruikt,
- b De metingen zijn in drie meetraaien, op verschillende niveaus en in verschillende lagen uitgevoerd. Dit is gedaan om op verschillende locaties de reactie te meten.
- c Als gevolg van een stroomstoring zijn de instrumenten uitgevallen in de periode voorafgaand aan bezwijken. Hierdoor is geen essentiële informatie gemist. Na bezwijken functioneerden alle meetinstrumenten.

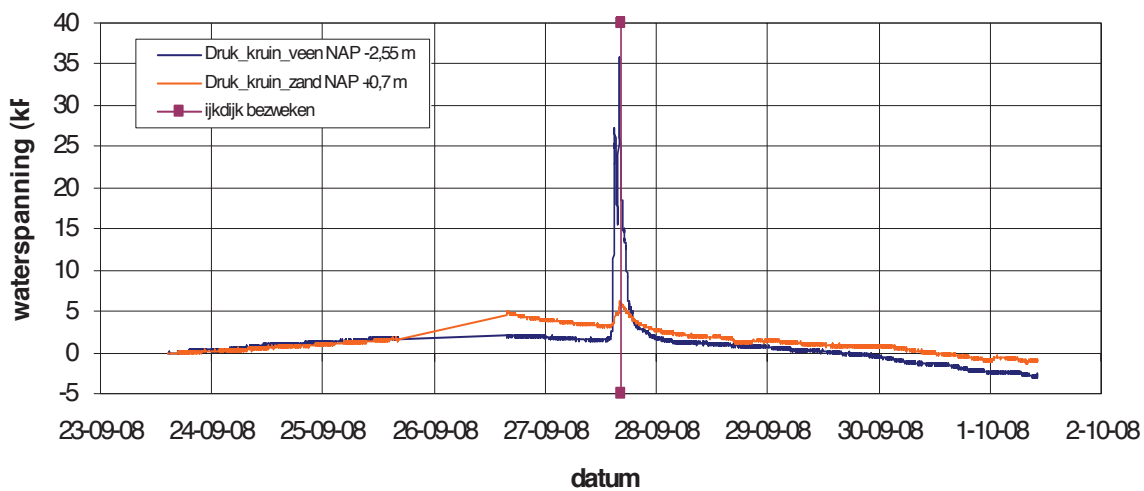
Waterspanningsmeter:

- a Nee
- b De metingen zijn in drie meetraaien, op verschillende niveaus en in verschillende lagen uitgevoerd. Dit is gedaan om op verschillende locaties de reactie te meten.
- c Als gevolg van een stroomstoring zijn de instrumenten uitgevallen in de periode voorafgaand aan bezwijken. Hierdoor is geen essentiële informatie gemist. Na bezwijken functioneerden alle meetinstrumenten.

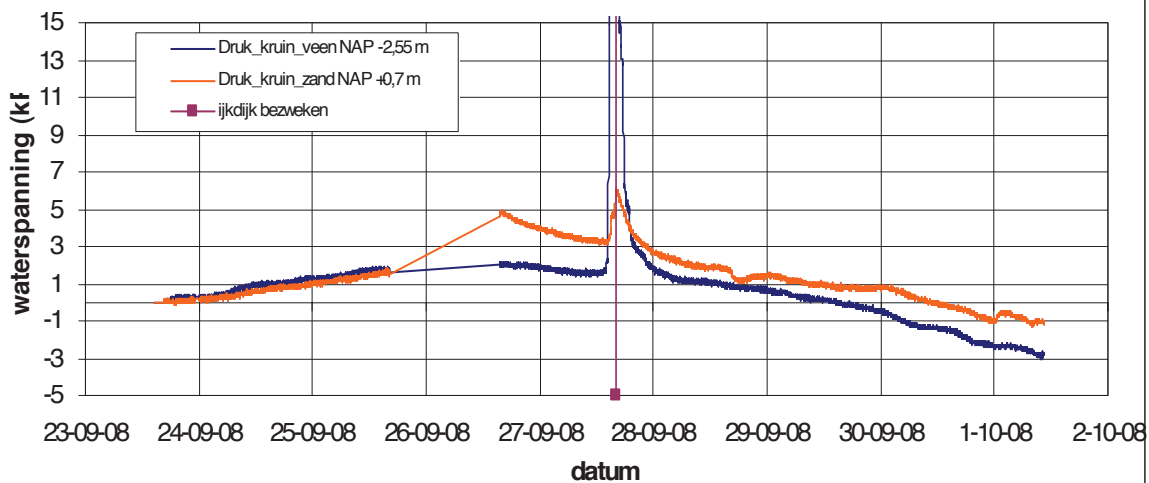
Bijlage I Meetresultaten in grafiekvorm: Noord Raai



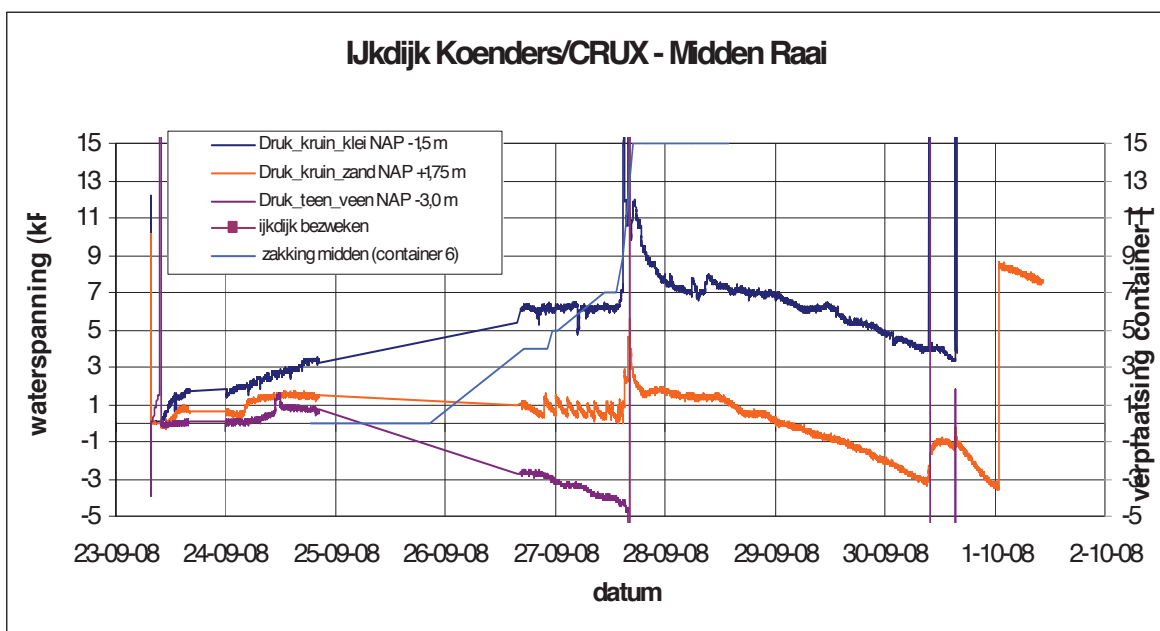
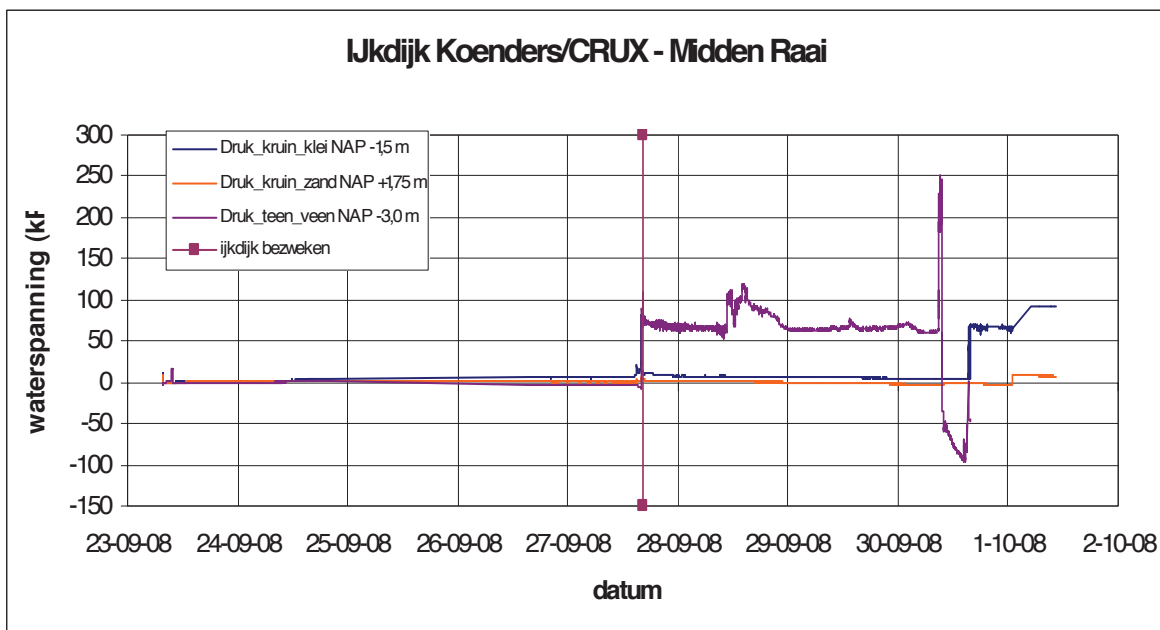
IJkdijk Koenders/CRUX - Noord Raai

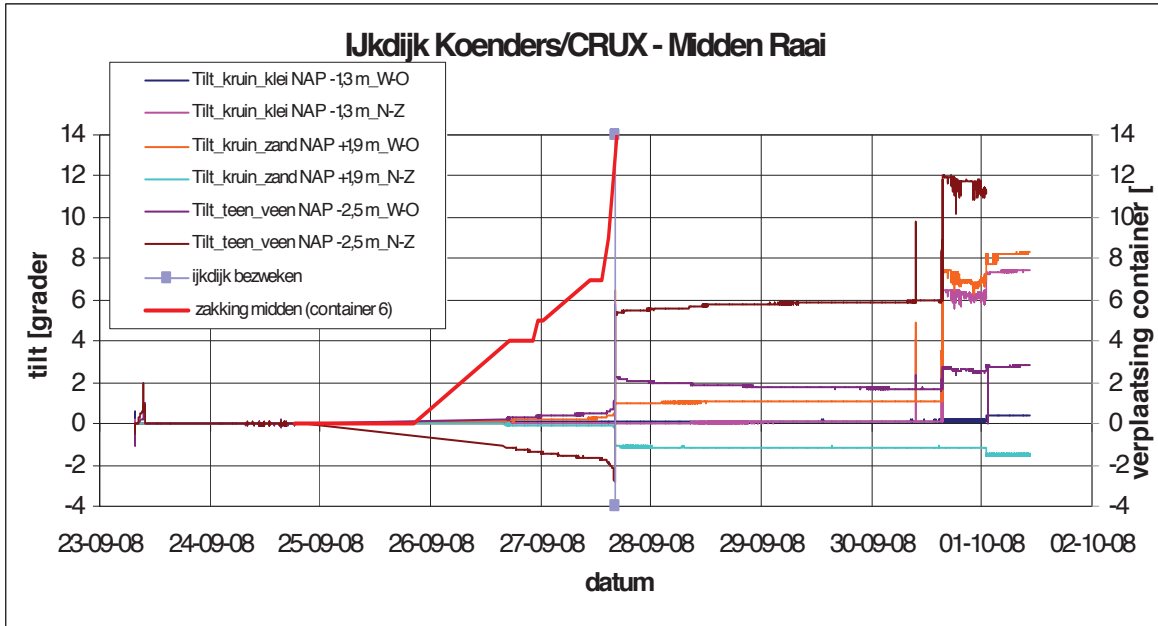
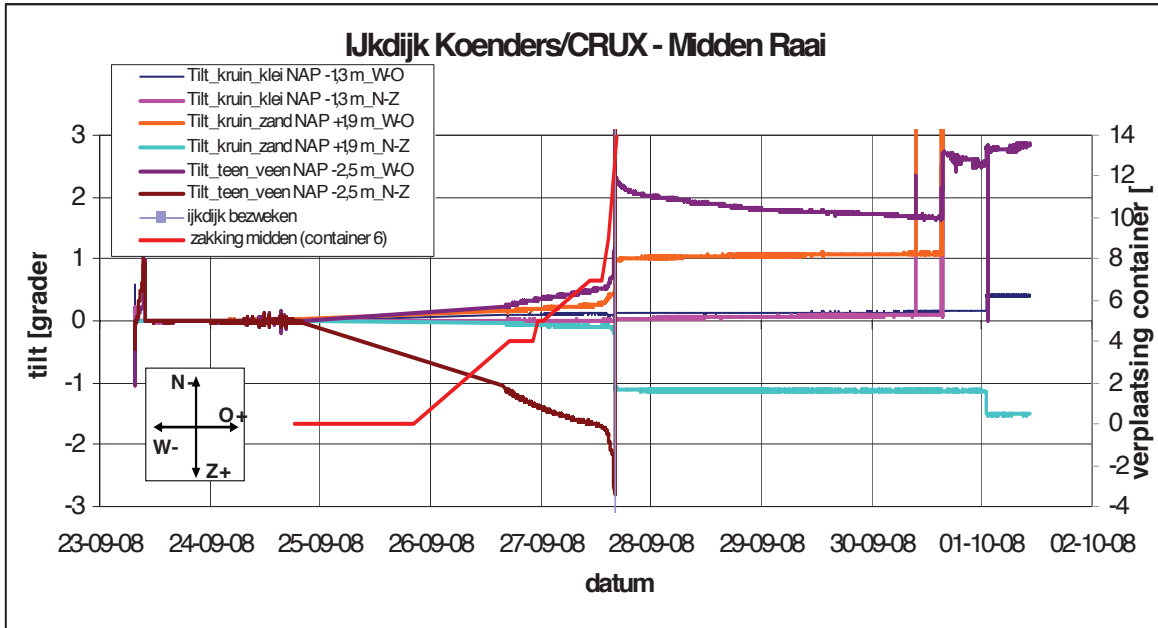


IJkdijk Koenders/CRUX - Noord Raai

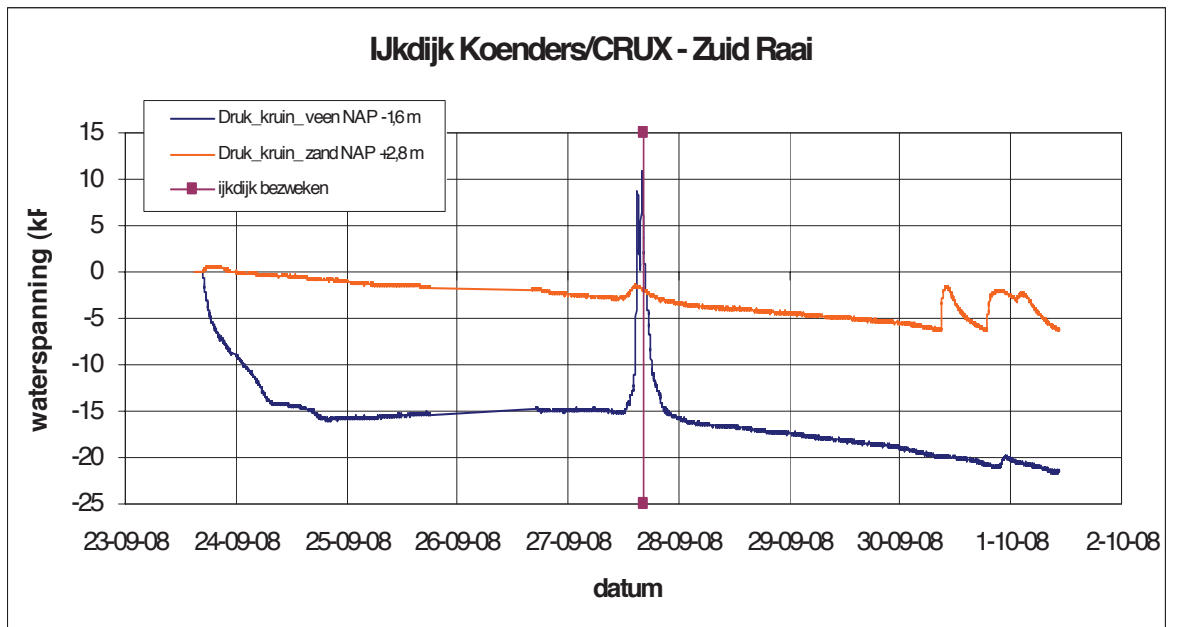
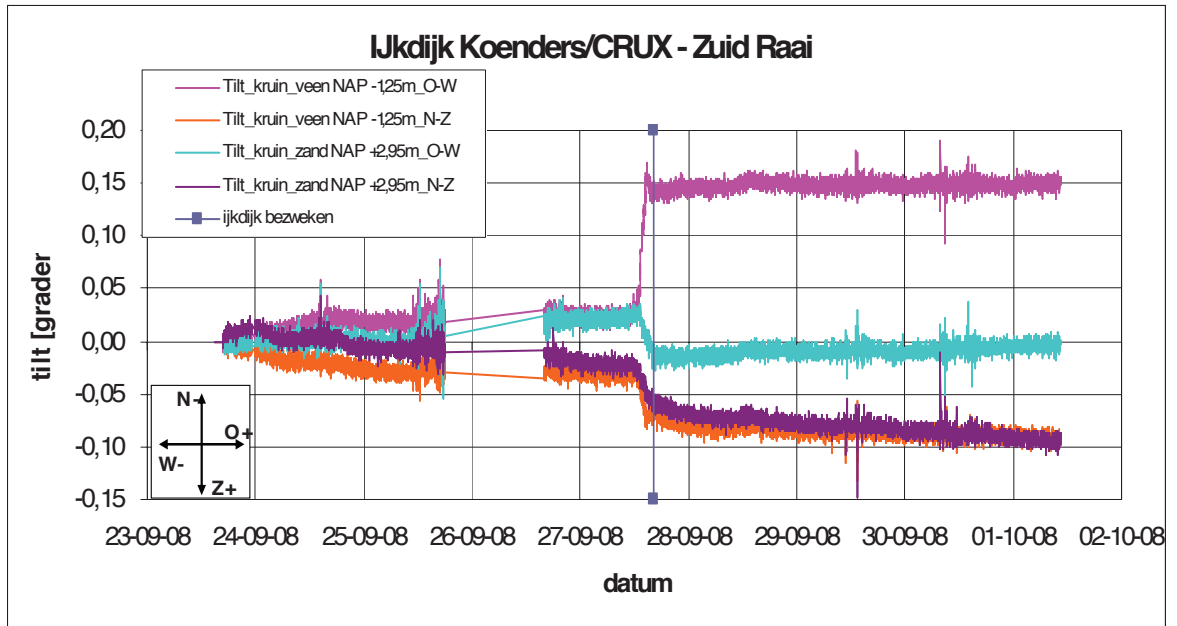


Bijlage II Meetresultaten in grafiekvorm: Midden Raai





Bijlage III Meetresultaten in grafiekvorm: Zuid Raai



5.8 Deelexperiment Luisterbuis VWT / Landustrie / TNO

Auteurs: Tom Basten, Peter Kunst (TNO); Harry Bos (Volker Wessels Telecom); Henk Wiering (Landustrie)

5.8.1 Inleiding

Een consortium bestaande uit Volker Wessels Telecom, Landustrie en TNO heeft in de macrostabiliteitsdijk geëxperimenteerd met de zogenaamde "luisterbuis". Het doel van deze experimenten was tweeledig namelijk;

- het onderzoeken of met behulp van akoestische instrumenten in een buissysteem een beeld gevormd kan worden van de conditie waarin een dijk verkeerd en
- het onderzoeken of dit buissysteem tegelijkertijd gebruikt kan worden om een dijk te kunnen conditioneren.

Het doel is om belanghebbenden een systeem te kunnen verschaffen wat kan dienen als een early warning- en conditionerings-systeem voor dijken

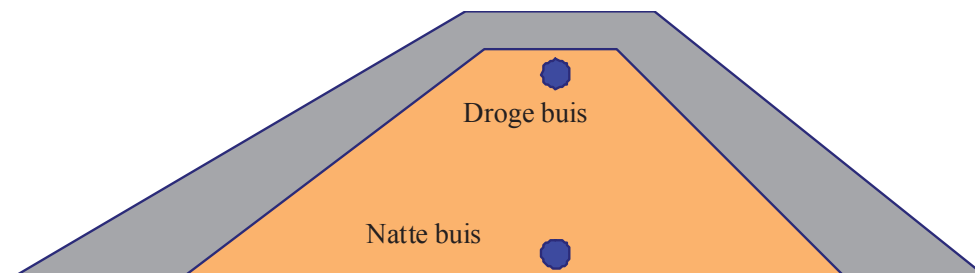
Deze paragraaf beschrijft een deel van de akoestische experimenten die zijn uitgevoerd tijdens de macrostabiliteitsproef die in september 2008 heeft plaatsgevonden op de IJkdijklokatie in Groningen. Daarnaast wordt een eerste aanzet gegeven van de analyse van de resultaten. De akoestische experimenten bestonden uit drie onderdelen:

1. Passieve metingen met microfoons en hydrofoons in de IJkdijk en losse microfoons op de kanaaldijk;
2. Arraymetingen met een streamer in de dijk en een serie luidsprekers bovenop de dijk;
3. Akoestische metingen met een optische sensor in de natte buis.

5.8.2 Beschrijving experiment

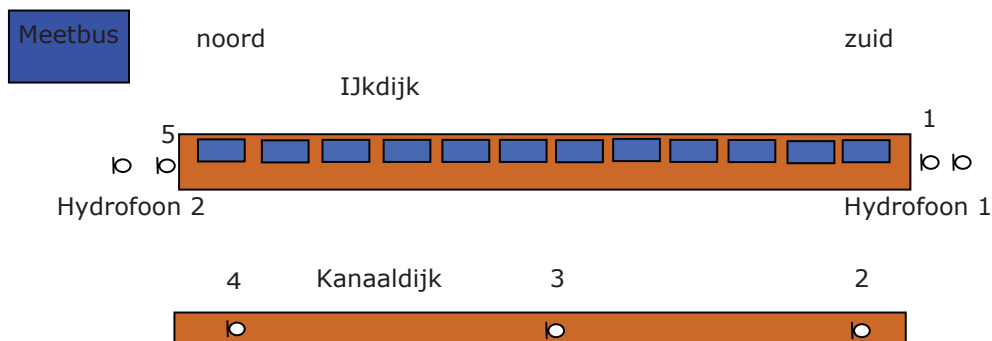
Passieve metingen

Voor de passieve akoestische metingen zijn geluidsignalen in en rondom de dijk opgenomen met microfoons en hydrofoons. Twee microfoons zijn aan de beide uiteindes van de droge buis aan de bovenzijde van de IJkdijk geplaatst. Daarnaast zijn twee hydrofoons aan de beiden uiteindes van de natte buis in het lager gedeelte van de IJkdijk geplaatst, zie Figuur 5.8.1 en Figuur 5.8.2.



Figuur 5.8.3 Dwarsdoorsnede met daarin aangegeven de natte en droge buis in de IJkdijk

Daarnaast zijn drie microfoons als referentie geplaatst op de kanaaldijk die parallel aan de IJkdijk ligt. De locaties en nummering van de sensoren is weergegeven in Figuur 5.8.4.



Figuur 5.8.4 Bovenaanzicht met positionering en nummering van de sensoren.

Details over de gebruikte sensoren staan weergegeven in Tabel 5.8.2. Elke sensor is voor en na het experiment gekalibreerd.

Id	Type+serienummer	Gevoeligheid	Voorversterker +serienummer	positie
Mic1	B&K 4193 (1863898)	12.5 mV/Pa	B&K 2669 (2082095)	Droge buis zuid
Mic2	B&K 4193 (1918583)	12.5 mV/Pa	B&K 2669 (2646480)	Kanaaldijk zuid
Mic3	B&K 4193 (2516186)	12.5 mV/Pa	B&K 2669 (2082097)	Kanaaldijk midden
Mic4	B&K 4193 (2413694)	12.5 mV/Pa	B&K 2669 (1866140)	Kanaaldijk noord
Mic5	B&K 4193 (1863896)	12.5 mV/Pa	B&K 2669 (2569346)	Droge buis noord
Hyd1	B&K 8101 (817926)	631 uV/Pa		Natte buis zuid
Hyd2	B&K 8101(?)	631 uV/Pa		Natte buis noord
Trigger				

Tabel 5.8.2 Overzicht van de signalen en de bijbehorende sensoren.

Het trigger signaal is gebruikt om de arraymetingen te kunnen koppelen aan de passieve metingen.

Alle signalen zijn volledig synchroon opgenomen met B&K Pulse data-acquisitiesystemen met sample frequentie 16.384 Hz. Dit maakt analyse van de signalen mogelijk tot 6.4 kHz. Alle signalen, behalve het trigger signaal, zijn opgenomen met een high pass filter (7 Hz). De signalen zijn opgenomen vanaf het begin van het experiment tot enige dagen na het falen van de dijk. Elke minuut data is weggeschreven in een afzonderlijke file (.dat). Elke file bevat de data van alle signalen.

Een overzicht van de weggeschreven files is weergegeven in Tabel 5.8.3.

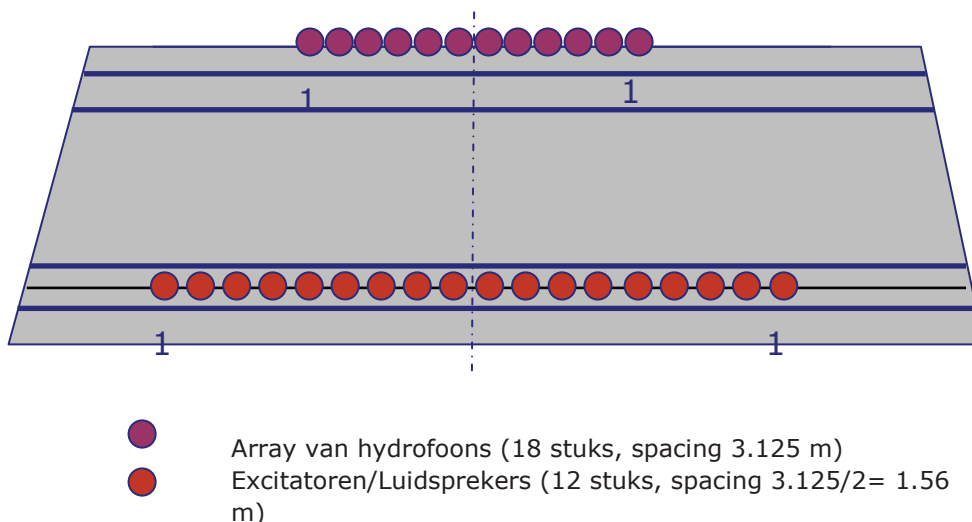
Map	file	Datum	Tijdstip
Opname1	Opname1_1	25 september	8:43
Opname1	t/m opname1_226	25 september	12:28
Opname	Opname_1	25 september	12:29
Opname	t/m Opname_1832	26 september	19:03
Opname2	Opname2_1	26 september	20:37
Opname2	Opname2_3661	29 september	9:48

Tabel 5.8.3 Overzicht van de opgenomen meetfiles

Zoals uit dit overzicht blijkt is gedurende een korte periode geen data opgenomen vanwege het uitvallen van de acquisitieapparatuur. Elke meetfile heeft een omvang van 30.1 MB. De totale omvang van de 5719 meetfiles is 168.2 GB. De opgenomen .dat files kunnen vervolgens worden omgezet naar .mat of .wav files voor verdere verwerking in matlab. Dit is slechts voor een klein aantal metingen uitgevoerd, zie resultaten.

Arraymetingen

Voor de arraymetingen is een streamer in de natte buis getrokken. Deze streamer bevat 18 hydrofoons. Bovenop de dijk is een twaalftal luidsprekers aangebracht, voor het opwekken van akoestische signalen die zich door de dijk voortplanten. Het was de bedoeling om de arrays in het midden van de IJkdijk te plaatsen, zie Figuur 5.8.5. Echter, door vervorming van de natte buis tijdens de bouw bleek het niet mogelijk om het array in de gewenste positie te krijgen. De streamer is daarom via de zuidzijde in de natte buis getrokken tot dat deze niet meer verder kon. Vervolgens is in deze configuratie gemeten waarbij de luidsprekers zo goed mogelijk boven het hydrofoonarray is geplaatst.



Figuur 5.8.5 Schematisch overzicht van de arraymetingen.

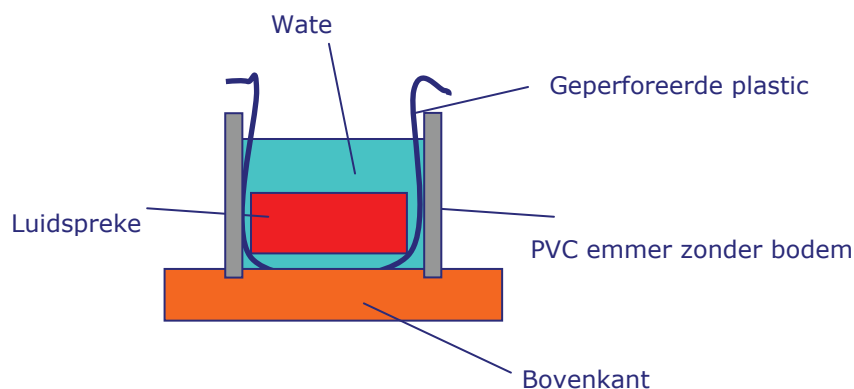
De gebruikte hardware voor het arrayexperiment staat hieronder weergegeven:

- Array geleend van Deltares, 18 hydrofoons, type?, spacing 3.125 m, zie Figuur 5.8.6.8.4
- Amplifier
- Data acquisitiesysteem Geode
- Luidsprekers, onderwaterluidsprekers type Electro-voice UW30 (30 Watt, diameter 18 cm), zie Figuur 5.8.6.



Figuur 5.8.6 Array met hydrofoons gewikkeld op een klos en luidspreker type UW30.

Om een geschikte inkoppeling van de signalen in de dijk te krijgen is de volgende procedure toegepast, zie Figuur 5.8.7. Een emmer zonder bodem is ongeveer 5 cm in de grond gedrukt. Een geperforeerde plastic zak is in de emmer geplaatst, daarin is de luidspreker geplaatst. De zak is gevuld met water en via de perforaties werd de grond onder de luidspreker bevochtigd, benodigd voor optimale inkoppeling van signalen in de dijk. Omdat het water weglekte via de perforaties is voor elke meting automatisch een pomp gestart die elke emmer vulde met water, via een relaischakeling en een stelsel van tuinslangen.



Figuur 5.8.7 Luidsprekerconfiguratie aan de bovenkant van de dijk

De luidsprekers zijn sequentieel aangestuurd met sweeps, frequency range: 10 - 300 Hz en tijdsduur 2 seconden. Om het uur is een volledig experiment uitgevoerd.

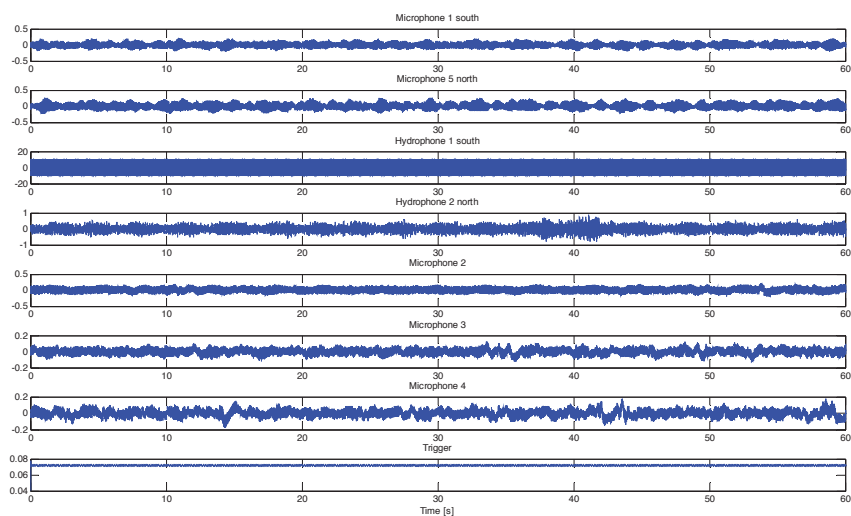
Voor aanvang van het experiment in Groningen is door middel van een kleinschalig experiment in Delft vastgesteld dat de uitgestuurde signalen voldoende niveau genereren in de dijk. Hierbij is een bron geplaatst in een met water gevuld gat in de grond. Vervolgens is de geluiddruk op verschillende posities bepaald vanaf de bron. Bij maximale uitsturing was de druk +/- 30.0 Pa (peak) op 2 meter, 5.0 Pa op 4 meter, 2.5 Pa op 6 meter. Verzwakking van de signalen treedt op door geometrische uitbreiding en materiaaldemping

5.8.3 Resultaten

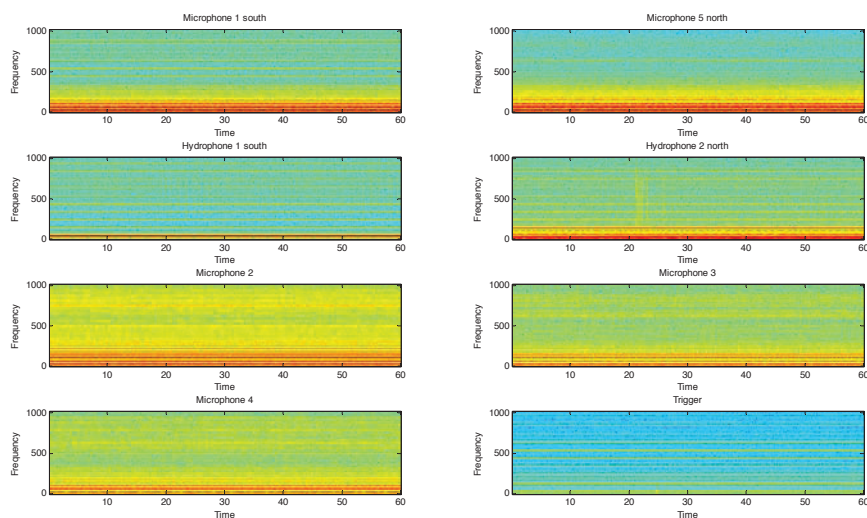
Resultaten van de passieve metingen

Tijdens de metingen zijn van elke minuut data voor demo doeleinden de level histories, tertsbandspectra en spectrogrammen gepresenteerd. Deze zijn niet opgeslagen, wel de tijddata. Deze data is per minuut opgeslagen en kan naderhand worden verwerkt en afgeluisterd. In deze paragraaf zullen enkele stukken data worden beschouwd, waaronder het moment van falen van de dijk.

Een typische minuut data opgenomen tijdens de nacht is te zien in Figuur 5.8.8 en Figuur 5.8.9. In Figuur 5.8.8 zijn de tijdsignalen weergegeven. In Figuur 5.8.9 zijn de spectrogrammen weergegeven. De signalen lijken te worden gedomineerd door de aggregaten voor de verlichting rondom de IJkdijk.



Figuur 5.8.8 Typische tijdsignalen tijdens de nacht (opname_780). Meetwaarden druksignalen in Pa



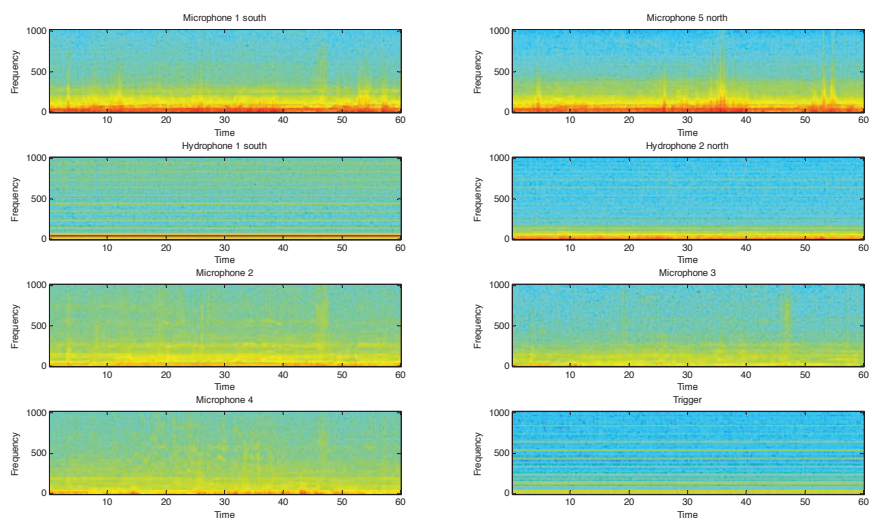
Figuur 5.8.9 Spectrogrammen van de tijdsignalen weergegeven in Figuur 5.8.8 (opname_780)

Verder is te zien dat hydrofoon 1 zuid een sterke 50 Hz verstoring heeft, veroorzaakt door de voedingsspanning. Het is niet gelukt om voor aanvang van de proef deze verstoring te elimineren. Bij nadere analyse blijken ook hogere ordes van 50 Hz sterk bij te dragen dus het toepassen van een hoogdoorlaatfilter op de data heeft weinig zin.

Gedurende een aantal keren tijdens de metingen bleek ook 50 Hz verstoring op te treden op de overige sensoren. Dit bleek samen te hangen met het starten van een aggregaat, bedoeld voor metingen van GTC Kappelmeyer. Naderhand is een overzicht ontvangen van de keren dat het aggregaat is gestart (ElectricHeating.xls). De daarin opgenomen tijden bleken inderdaad samen te hangen met de optredende verstoring in de akoestische signalen.

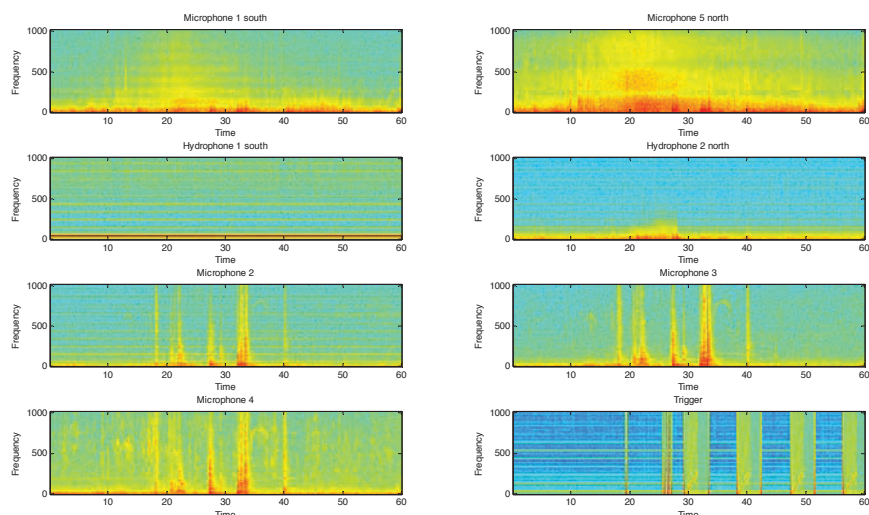
Verder is in Figuur 5.8.9 op hydrofoon 2 noord te zien dat er tussen 20 en 30 seconden kleine events optreden. Dergelijke events zijn vaak ook op andere sensoren in de IJkdijk te zien en heeft te maken met gebeurtenissen in de dijk.

Een typische minuut data gedurende de dag is te zien in Figuur 5.8.10.



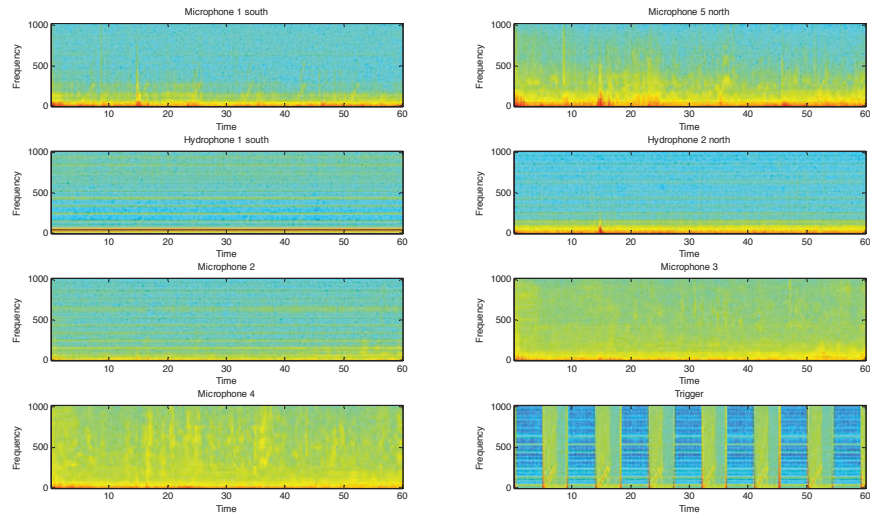
Figuur 5.8.10 Typisch signalen gedurende de dag (opname_14). Er zijn duidelijk veel werkzaamheden en er is ook veel spraak te horen.

Vooral overdag waren er veel activiteiten rondom de dijk. Vooral de graafwerkzaamheden geven behoorlijke geluidsniveaus. Ook spraak van mensen rondom de dijk geeft veel signaal op de sensoren. Dit is in de signalen duidelijk waarneembaar. Het is moeilijk om visueel vast te stellen welk signaal waarvan afkomstig is. Daarom is het ook lastig vast te stellen of er signalen waren betreffende het instorten van de dijk. Er is hiervoor echter nog geen uitgebreide analyse uitgevoerd. Wel is het moment van doorbreken van de dijk duidelijk vastgelegd. De signalen tijdens doorbreken zijn te zien in Figuur 5.8.11. Een aantal sterke pieken treden hierbij op ten gevolge van het botsen van de containers. Daarnaast is te horen en te zien dat het moment van doorbreken enthousiast wordt ontvangen door de omstanders.



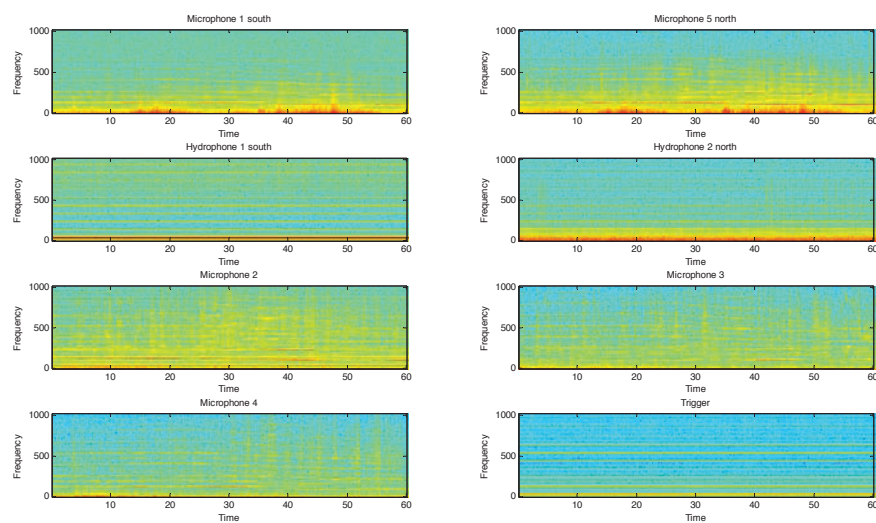
Figuur 5.8.11 Signalen tijdens doorbraak (opname2_1104).

Op het trigger signaal tijdens doorbreken is te zien dat tijdens doorbreken de luidsprekers werden aangestuurd. Dit luidsprekersignaal is ook hoorbaar en zichtbaar, zij het minimaal, op microfoon 1 zuid, maar ook op microfoon 5 noord en hydrofoon 1 zuid en zelf op de kanaaldijk (microfoon 2) Dit is ook te zien in de eerste minuut na instorten, zie Figuur 5.8.12.



Figuur 5.8.12 Signalen tijdens de eerste minuut na doorbraak (opname2_1105)

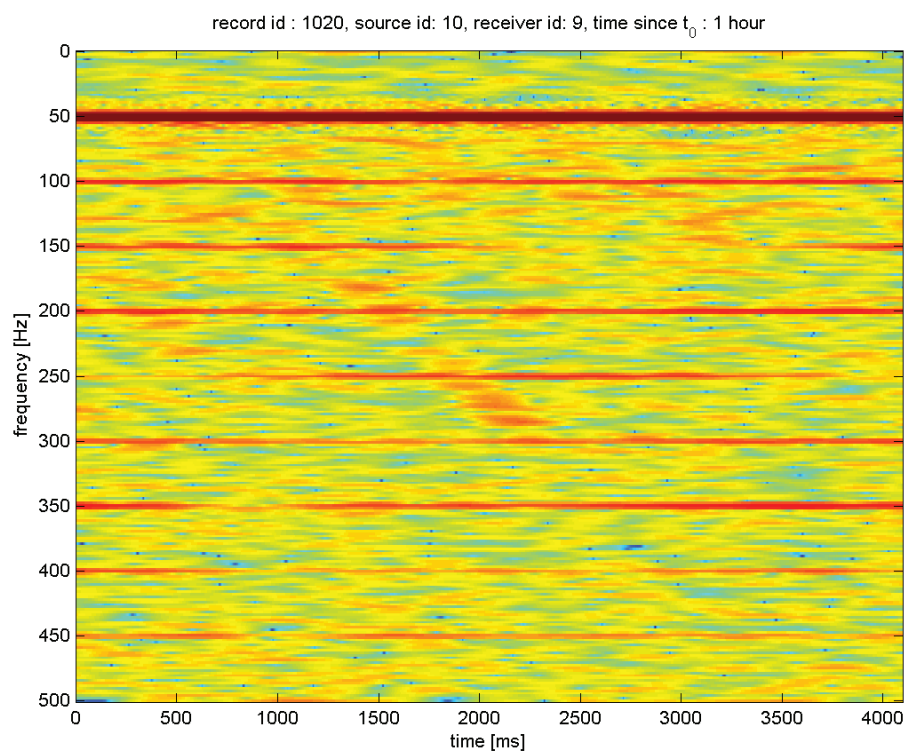
Er zijn ook interessante andere zaken te horen tijdens de metingen. Zo is vijf minuten voor doorbraak te horen dat een propellorvliegtuig overvliegt. De typische tonale componenten van het vliegtuig zijn duidelijk te zien in Figuur 13. Ook het optreden van de dopplerverschuiving is duidelijk zichtbaar.



Figuur 13 Signalen vijf minuten voor doorbraak. Het overvliegen van een propellorvliegtuig is duidelijk hoor- en zichtbaar (opname2_1099).

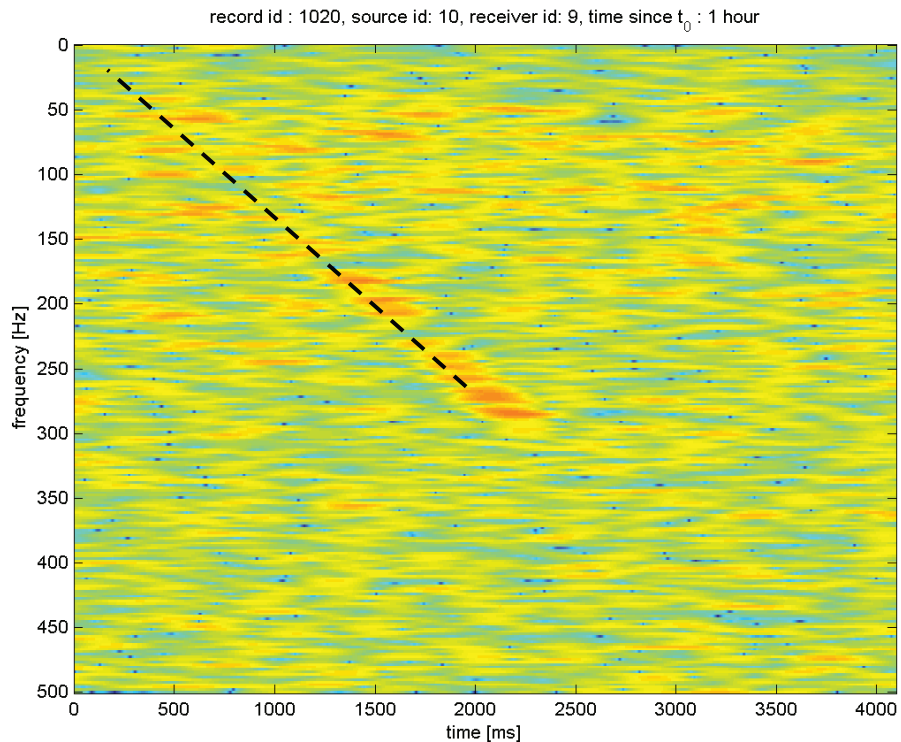
Resultaten van de arraymetingen

De array metingen zijn uitgevoerd met een sweep van 10 tot 300 Hz, de lengte van de sweep is 2 seconden en wordt 0,25 seconde na de trigger uitgestuurd. De sample frequentie van de sweep en het acquisitie systeem is beide 4 kHz. In het algemeen kan gesteld worden dat de data kwaliteit niet erg goed is. Dit wordt veroorzaakt door de relatief lage gevoeligheid van de hydrofoons in de streamer, de aankoppeling van de bronnen en de sterke 50 Hz ruis in de hydrofoon recordings. Figuur 5.8.14 toont een spectrogram van de ruwe data. Hierin is de 50 Hz met boventonen duidelijk waarneembaar.



Figuur 5.8.14 Spectrogram voor preprocessing, de 50 Hz ruis is in deze figuur duidelijk zichtbaar

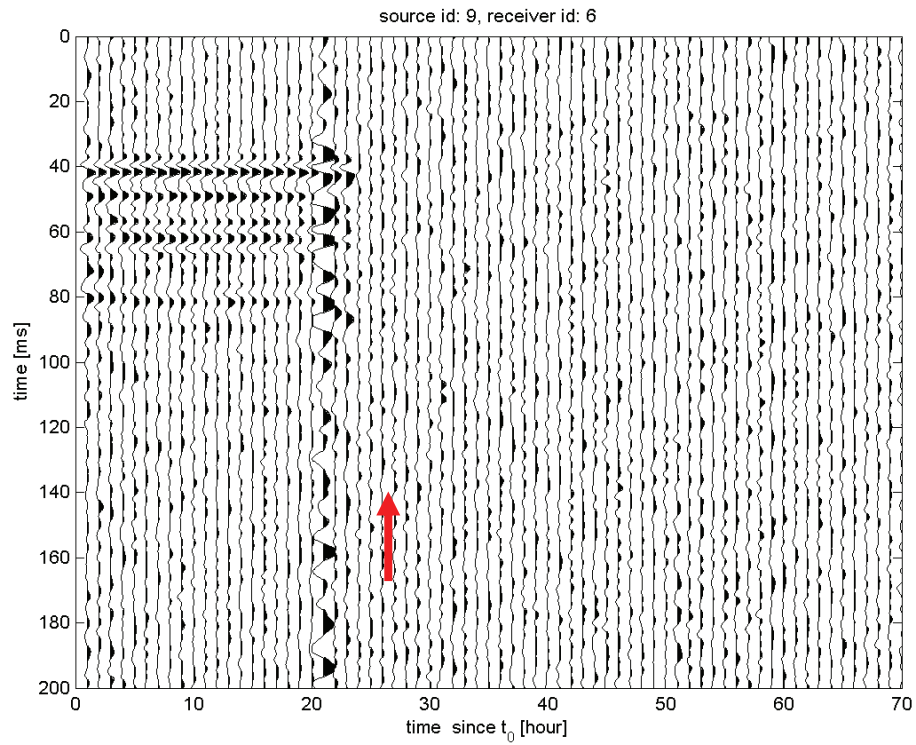
Door gebruik te maken van geavanceerde filter technieken op basis van singuliere waarde decompositie blijkt het mogelijk de ruis zeer sterk te onderdrukken en laat het spectrogram wel het sweep signaal zien (zie Figuur 5.8.15)



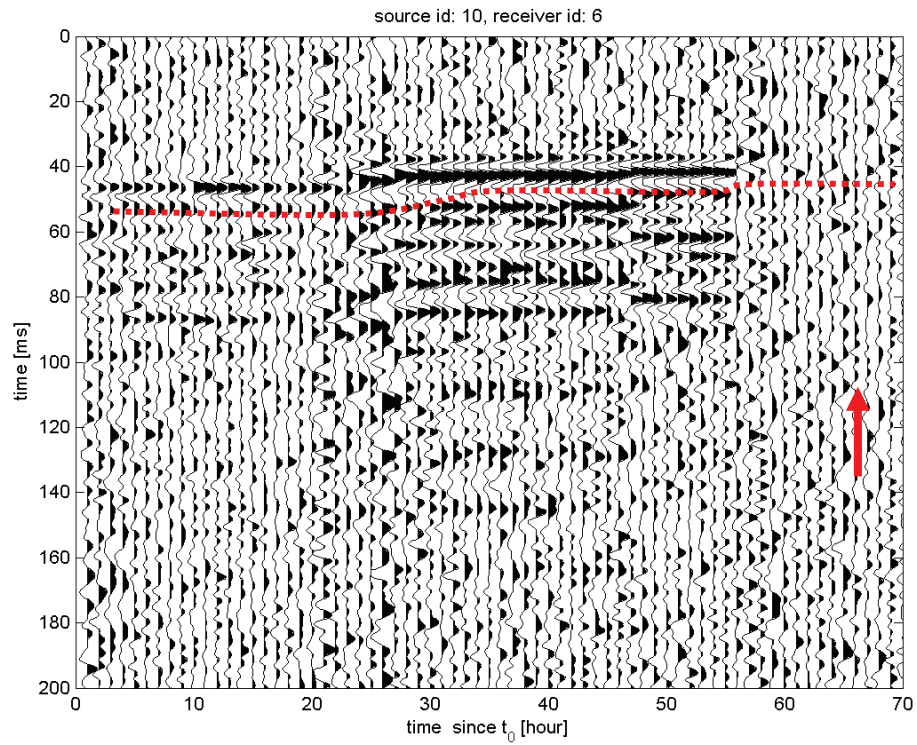
Figuur 5.8.15 Spectrogram na preprocessing om de 50 Hz ruis te verwijderen. De sweep is in deze data zichtbaar.

De 50 Hz ruis is door deze filtering met meer dan 50 dB onderdrukt. Opvallend is dat de signalen met toenemende frequentie sterker lijken te worden. De bronnen zijn niet erg effectief bij lage frequenties. Dit impliceert dat een groter frequentiebereik mogelijk geweest zou zijn. Vervolgens wordt het gefilterde signaal gecorreleerd met de uitgezonden sweep zodat puls-vormige signalen ontstaan.

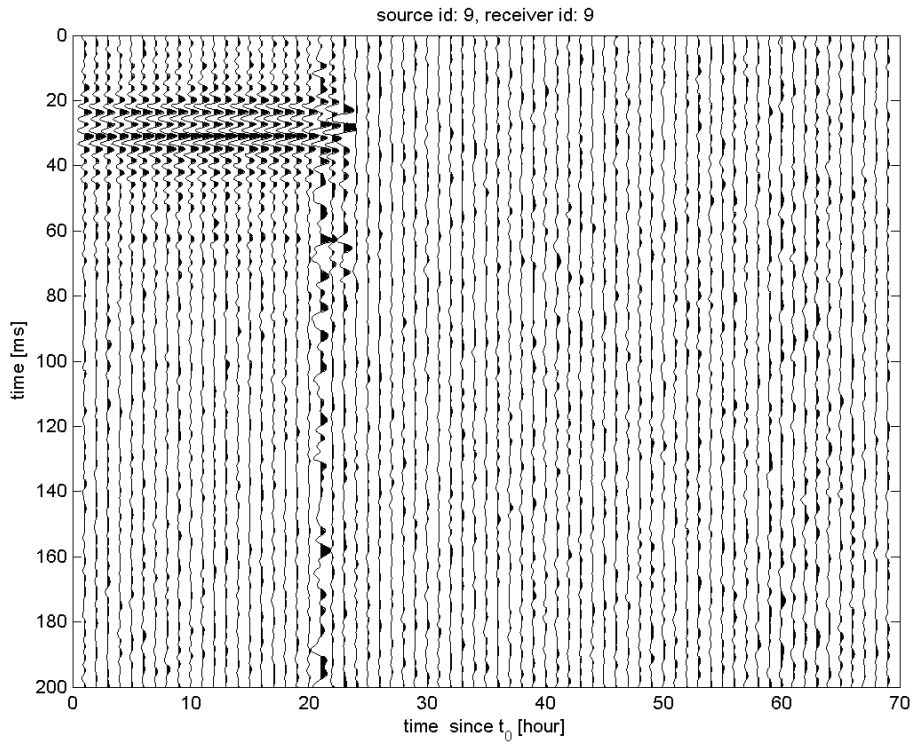
De signalen van bron 9 en 10 zijn duidelijk waarneembaar op hydrofoon 6 en 9. Elk uur is een meting uitgevoerd gedurende 70 uur. Deze signalen kunnen dus als functie van de tijd weergegeven worden. Deze signalen worden in Figuur 5.8.16 t/m Figuur 5.8.19 weergegeven. In deze figuren wordt het tijdsignaal verticaal geplott als functie van de opeenvolgende metingen, dus elk uur. De signalen van hydrofoon 9 zijn duidelijk hoog-frequenter en komen eerder aan. Dit komt omdat de afstand tot de bronnen veel korter is.



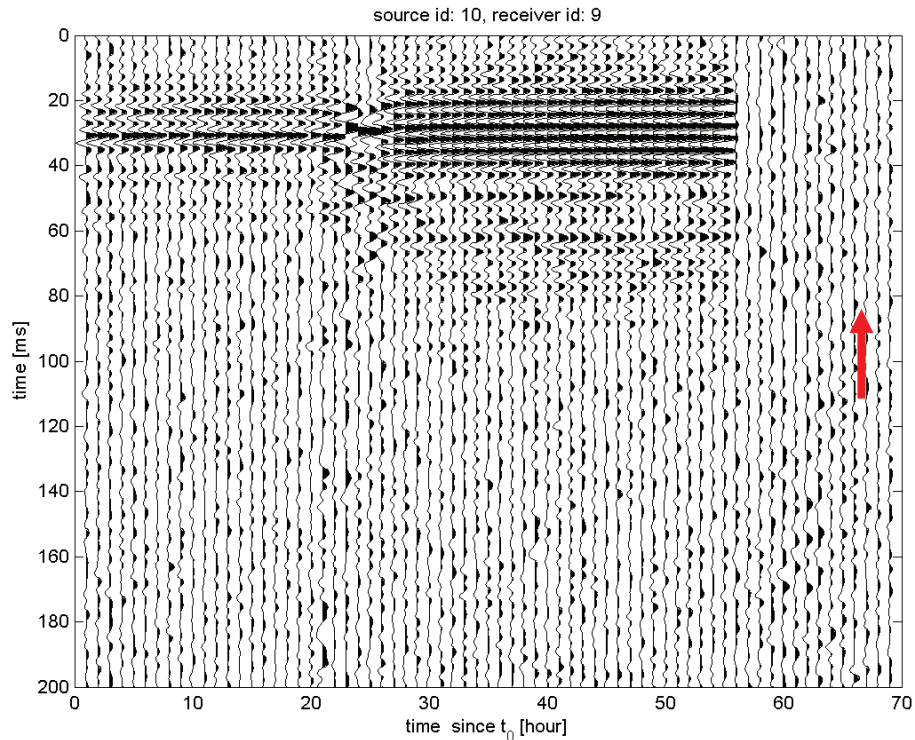
Figuur 5.8.16 Opgenomen signaal van bron 9 in hydrofoon 6. De signaalsterkte is redelijk constant, na seismische activiteit gaat de koppeling van de bron met de dijk verloren waardoor geen verder signalen opgenomen worden.



Figuur 5.8.17 Opgenomen signaal van bron 10 in hydrofoon 6. De signaalsterkte neemt toe en de looptijd neemt af als indicatie van het toenemen van de hoeveelheid water in de dijk. De rode pijl geeft het moment van bezwijken.



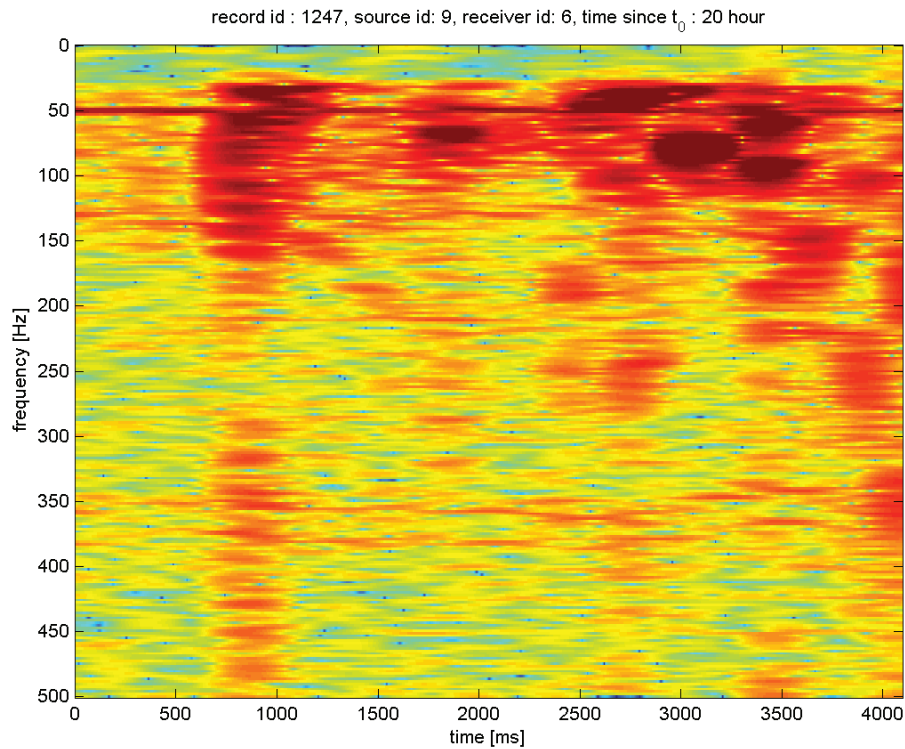
Figuur 5.8.18 Opgenomen signaal van bron 9 in hydrofoon 9. De signaalsterkte is redelijk constant, na seismische activiteit gaat de koppeling van de bron met de dijk verloren waardoor geen verder signalen opgenomen worden.



Figuur 5.8.19 Opgenomen signaal van bron 10 in hydrofoon 9. De signaalsterkte neemt toe en de looptijd neemt af als indicatie van het toenemen van de hoeveelheid water in de dijk. De rode pijl geeft het moment van bezwijken.

Deze resultaten laten duidelijke dynamische effecten zien. Na ca. 20 uur neemt de looptijd sterk af en de signaal amplitude sterk toe. Dit is een indicatie dat de hoeveelheid water in de dijk toeneemt, na 45 uur is wederom een verandering zichtbaar. Helaas gaat de koppeling van bron 9 na 20 uur verloren en hetzelfde gebeurt met bron 10 na 55 uur. Dit valt samen met het bezwijken van de dijk. Verder lijken deze metingen een goede correlatie te geven met het inzakken van de containers.

De bronnen waren redelijk dicht naast de containers geplaatst, mogelijk door dynamica van de toplaag van de dijk is de aankoppeling verloren gegaan. Dit is een duidelijk verbeterpunt voor toekomstige experimenten. Het spectrogram van het moment juist voordat de aankoppeling met bron 9 verloren gaat, wordt in Figuur 5.8.20 getoond.



Figuur 5.8.20 Spectrogram met grote seismische activiteit, waarna het signaal van bron 9 afwezig is.

Naast dit coherente signaal is in sommige spectrogrammen ook signaal aanwezig door andere activiteiten (zoals in Figuur 5.8.20). Dit leidt echter niet tot verstoring van de metingen. De interpretatie hiervan is erg lastig i.v.m. de verschillende activiteiten rondom de dijk.

5.8.4 Conclusies

Tijdens de overslagproef zijn uitgebreide akoestische experimenten uitgevoerd. Dit memo beschrijft de uitgevoerde passieve akoestische metingen en de arraymetingen en een beperkte analyse van de resultaten. Deze analyse laat zien dat veel gebeurtenissen tijdens de metingen zijn vastgelegd. Uit de passieve akoestische metingen is echter nog geen voorspellende waarde gebleken voor het falen van de dijk. Enerzijds is de uitgevoerde analyse nog te beperkt om hier een definitieve uitspraak over te doen. Echter is het de verwachting dat door de invloed van alle externe verstoringen in de signalen het erg moeilijk zal zijn om gebeurtenissen in de dijk te scheiden van gebeurtenissen rondom de dijk. Een uitgebreidere analyse biedt mogelijk meer inzichten. Deze uitgebreidere analyse zal begin 2009 worden uitgevoerd.

De arraymetingen laten effecten zien die gekoppeld kunnen worden aan verschijnselen die de dijk bedreigen en correleren met de gemeten verzwakkingen van de containers op de dijk. De voornaamste invloed die gedetecteerd kan worden is het vullen van de dijk met water. Dit heeft tot gevolg dat de signaalamplitude toeneemt en de looptijd van het signaal korter wordt. Deze verschijnselen zijn duidelijk waargenomen.

Daarnaast is tijdens de experimenten veel ervaring opgedaan die zal helpen bij een volgende serie experimenten. Vooral de invloed van externe verstoringen zal tijdens een volgende sessie drastisch moeten worden gereduceerd.

Voor de array metingen zijn de belangrijkste verbeterpunten de aankoppeling van de bronnen en de gevoeligheid van het hydrofoonarray. De metingen met de enkele hydrofoon laat een duidelijk betere signaal-ruis verhouding zien.

5.9 Deelexperiment RPS-BCC / IFCO: IS-Systeem en de IJkdijk

Auteurs: dr. O. van Dam (RPS), ing. S. Essink (RPS); ir. J. Bakker (IFCO)

5.9.1. Inleiding

5.9.1.1. Algemeen

Het "Intelligent Sensor" systeem, ofwel het IS-systeem, is een compleet systeem dat stand-alone toegepast kan worden ter verbetering van het beheer, onderhoud en monitoring van waterkeringen.

RPS BCC BV (RPS) en IFCO Funderingsexpertise BV (IFCO) hebben samen gewerkt om het IS systeem te toetsen in het onderzoeksproject Macrostabieleit in de IJkdijk te Bellingwolde.

RPS wordt veelvuldig ingeschakeld door waterschappen en Rijkswaterstaat voor landmeetkundig werk zoals 3D terreinmetingen, deformatie- en zettingsmetingen, hoeveelheidmetingen, inventarisaties watersystemen, maaiveldmetingen, AHN-referentiemetingen en profielmetingen. Naast deze landmeetkundige projecten werken de adviseurs van RPS in projecten gericht op watersysteemanalyse en waterkeringen, waterbodembodem en milieu, geo-informatie en GIS, kabels en leidingen en ruimtelijke inrichting.

IFCO is een geotechnisch ingenieursbureau dat direct betrokken is geweest bij het onderzoek naar het falen van de waterkering te Wilnis. Met haar geotechnische achtergrond is zij zodoende goed in staat om te beoordelen op welke wijzen de verschillende bezwijkmechanismen van waterkeringen gedetecteerd zouden kunnen worden. Daar komt bij dat IFCO als één van de weinige bedrijven in Nederland kennis heeft in de ontwikkeling, verkoop en toepassing van geotechnische meetsystemen in combinatie met een gedegen geotechnische achtergrond.

5.9.1.2. Doelstelling

De werelden van de sensorindustrie en de dagelijkse praktijk van de waterschappen sluiten op dit moment nog niet goed op elkaar aan. Een vertaalslag is nodig om de kansrijke technologische ontwikkelingen uit de sensorindustrie toepasbaar te maken voor de waterschappen. Tevens is het noodzakelijk om de waterschappen te tonen welke meetsystemen momenteel al toegepast zouden kunnen worden. In de (inter-)nationale testfaciliteit de IJkdijk is door aanbieders van sensortechnologie in het macrostabieleitsexperiment de kans gegeven om in een relevante maar gecontroleerde omgeving de werkelijke waarde van bestaande meetsystemen en technologische innovaties voor het waterkeringenbeheer in te schatten.

Er is onderzoek gedaan naar verschillende nieuwe technologieën. Technologieën die in theorie kunnen bijdragen aan het efficiënt onderhouden van waterkeringen, of waarmee watermanagement infrastructures van seconde tot seconde bewaakt kunnen worden. Daarnaast is bepaald hoe de informatie die dat oplevert is te vertalen naar weloverwogen acties en accurate planningen op korte, middellange en lange termijn. Het monitoren richt zich vooral op de veiligheids garanties waarmee in de toekomst economische catastrofes zoals in Wilnis en Stein zijn te voorkomen.

Het toetsen van het IS-systeem binnen het IJkdijk project heeft verschillende specifieke doelstellingen:

1. Eenvoudige registratie
De registratiegegevens, die uit de bestaande onderdelen van het systeem komen worden op een geïntegreerde manier gepresenteerd en toegankelijk gemaakt voor de gebruiker. Dit maakt het (kunnen) beoordelen van het gedrag van het dijklichaam onder verschillende omstandigheden beter en eenvoudiger. De toegevoegde waarde en de onderlinge samenhang van gegevens uit verschillende sensoren wordt duidelijk. Bovendien kan gekeken worden naar de optimale vorm waarin gegevens toegankelijk kunnen worden gemaakt (conveniënte voor de - ook niet-technische - gebruiker).
2. Toetsing van het volwaardige meetsysteem
Er wordt gekeken naar het functioneren van het totaalsysteem onder praktijkomstandigheden. Daarbij is gekeken naar de:
 - 'Veld' robuustheid van het systeem (weersbestendigheid, stroomvoorziening, veiligheid van elektronica etc.).
 - Betrouwbaarheid (aanwezigheid van versturende externe factoren, stabiliteit van de elektronica in de meetopstelling en de op afstand uitleesbaarheid van de data etc.).
 - Onderhoud (handmatige vervanging van onderdelen is mogelijk).
 - Vandalisme proof (onderdelen blijven uit het zicht).
 - Begrijpelijk en eenvoudig meetprincipe, dat goedkoop is in realisatie, gebruik en onderhoud.
3. Beoordeling van de stand alone functionaliteit
Het observeren in hoeverre er eventuele knelpunten aan het licht komen tijdens het zelfstandig functioneren van het systeem. Daarbij zal tevens de uitwisselbaarheid van gegevens met andere meetopstellingen worden bekeken.

5.9.1.3. Rapportage

Dit rapport beschrijft de opzet van het experiment, plaatsing en meetprotocollen van de verschillende sensoren, en de resultaten van de metingen. De metingen worden beoordeeld per afzonderlijke sensor, per type sensor, tussen type sensoren en in een ruimtelijke en temporele context.

Dit rapport beschrijft het experiment, de bouw van de ijk en de uiteindelijk afglijding, niet in detail, maar alleen in hoofdlijnen welke nodig zijn om de plaatsing van de sensoren te begrijpen en de resultaten te kunnen interpreteren. Voor een nauwkeurige beschrijving van het experiment verwijzen we naar de rapportages van Deltares (in voorbereiding).

Deze rapportage is opgezet om als afzonderlijk document te lezen, maar ook zodanig dat onderdelen in het eindrapport van het experiment kunnen worden opgenomen.

5.9.2. Het IS-systeem

5.9.2.1. Componenten IS-systeem

Eigenschappen IS-systeem

IS staat voor Intelligent Sensor. Hiermee wordt bedoeld dat de toe te passen sensoren reeds de digitale omzetting van de meetgegevens voor hun rekening nemen, waardoor zij niet langer millivolts of milliampère afgeven, maar de gemeten waarden in de juiste eenheden.

Druksensoren meten de druk in bars of in meters waterkolom, een zettingssensor geeft de verticale verplaatsing in mm, een peilbuis sensor geeft het waterniveau in meters t.o.v. NAP. Een ander voordeel is dat met dergelijk type sensoren zeer eenvoudig complexe netwerken zijn aan te leggen waarbij alle sensoren op slechts één enkele (4-aderige) netwerkkabel zijn aangesloten. Dit maakt de aanleg en onderhoud van dergelijke netwerken 'kinderspel'. Kenmerkende eigenschappen van het systeem zijn:

1. Draadloze (GSM) en batterijgevoede stand alone uitvoering van het systeem
2. Automatische dataregistratie
3. Robuust en betrouwbaar meetsysteem dat onder extreme omstandigheden blijft functioneren.
4. Standaard Windows PC configuratie voor datacollectie en verwerking
5. Ruimtelijke visualisatie via webportaal vereenvoudigt interpretatie en beoordeling

Cruciaal in een calamiteiten situatie bij het (bijna) bezwijken van een waterkering is een 'early-warning'-systeem, waarin de interpretatie van de meetgegevens eenduidig, adequaat en snel worden uitgewisseld tussen de beheerder van de waterkering en rampenbestrijdingsdiensten. Het voorliggende projectvoorstel beoogt het verwerken en on-line presenteren van de meetgegevens. Dit bevordert de acceptatie van het IS-systeem voor waterkeringbeheerders en de betrokkenheid van het publiek bij het IJkdijkproject en het algemeen belang van veilige dijken.

Sensoren IS-systeem

Alle sensoren kunnen (direct) aangesloten worden op het IS-netwerk, dat weer kan worden verbonden met andere netwerken en sensoren. De werking van de verschillende componenten is nader beschreven in de bijlage.

- Inverted Pendulum (IP)

Een inverted pendulum is een type sensor waarmee het mogelijk is zeer nauwkeurig de horizontale verplaatsing van een dijklichaam te meten. In principe kan deze meting in twee richtingen uitgevoerd worden maar het spreekt voor zich dat de richting haaks op de waterkering het meest relevant is.

- Inplace Inclinometers (II)

Een Inplace Inclinometer (II) bestaat uit een verticale string van onafhankelijk werkende inclinometers. Door de gemeten hellingshoeken te vermenigvuldigen met de lengte van de inclinometers en deze bij elkaar op te tellen wordt een horizontaal verplaatsingsprofiel verkregen.

- Liquid Level Settlement sensor (LLS)

Een elegante en zeer nauwkeurige techniek om verticale zettingen en met name zettingsverschillen te meten, is door middel van een vloeistof-waterpassysteem. Deze metingen kunnen op twee plaatsen in een waterkering uitgevoerd worden: op de kruin van de waterkering (om zodoende nauwkeurig te controleren of de waterkering aan zettingen onderhevig is en zodoende niet langer voldoet aan de vereiste kerende hoogte) en in de teen van het talud om in een vroeg stadium afschuivingen / instabiliteiten te detecteren.

- Waterspanningsmeters (BAT-systeem)

Om de stabiliteit van een waterkering te bewaken is het van belang om op verschillende niveaus in de waterkering de optredende waterspanningen te meten. Het grote voordeel van het BAT-systeem is dat de waterspanningsmeters handmatig gecontroleerd cq. vervangen kunnen worden.

- Waterniveau Absolute Druksensoren (AP)

Met Absolute druksensoren kunnen grote verplaatsingen worden gemeten. Deze sensoren zijn een ander type zettingsstreng waarmee grotere verplaatsingen kunnen worden geregistreerd. De AP wordt gezamenlijk geïnstalleerd met de LLS om de twee systemen onderling te vergelijken.

5.9.2.2. Datacollectie

Alle IS-sensoren zijn zodanig ontworpen dat zij op 4 manieren ingezet kunnen worden:

- a. Handmatige metingen.
Een sensor kan handmatig in het veld worden aangebracht en uitgelezen worden door de sensor (handmatig) aan te sluiten op een IS Fieldunit. Het betreft dan een discontinue meting.
- b. Data-logger.
IS-sensoren (hardwarematig) zijn voorzien van een datalogger. Sensoren kunnen worden voorzien van een voeding (batterijhouder). De IS-sensoren kunnen nu automatisch (continu) meten waarbij de meetgegevens in het interne geheugen van de sensor worden opgeslagen.
- c. GSM unit.
Met behulp van een GSM unit kunnen kleine IS netwerken (5 tot 10 sensoren) worden samengesteld. Eens per dag (of zoveel vaker als dit nodig is) wordt de data automatisch door de GSM unit verstuurd naar een data-server die de meetgegevens verwerkt en middels een e-mail aan de diverse partijen verstuurd.
- d. Powersupply.
Tevens bestaat de mogelijkheid om grote IS netwerken aan te leggen door middel van een Powersupply, die wordt aangesloten op een standaard Windows computer die dienst doet als data-server. Communicatie geschiedt via een (draadloze) internetverbinding dan wel via GSM.

5.9.2.3. Dataverwerking

De meetgegevens die uit de verschillende sensoren van het IS-systeem komen worden in een vroegtijdig stadium geanalyseerd en op een eenduidige geautomatiseerde wijze continu verwerkt.

De verwerking richt zich op een viertal terreinen:

- a. Tijdreeksanalyses per IS-meetsysteem en per sensor.
- b. Ruimtelijke analyse tussen sensoren van hetzelfde IS-meetsysteem.
- c. Onderzoek naar verbanden tussen de verschillende IS-meetsystemen ofwel de fysische parameters die hiermee worden gemeten.
- d. Modelleren van de bovengenoemde analyses om voorspellingen te kunnen doen naar het gedrag van één of meerdere parameters.

5.9.3. Inverted Pendulum (IP)

5.9.3.1 IP sensor

De horizontale vervorming van een waterkering kan op twee manieren worden gemeten: met behulp van een 'inverted pendulum' en door middel van Inplace Inclinometers (II). Inverted Pendulums zijn nauwkeuriger dan II's maar hebben de beperking dat de horizontale vervorming slechts op één niveau gemeten wordt. II's zijn duurder dan inverted pendulums en minder nauwkeurig. Ze hebben het voordeel dat een volledig vervormingsprofiel met de diepte wordt verkregen.

Een inverted pendulum is een type sensor waarmee het mogelijk is zeer nauwkeurig de horizontale verplaatsing van een dijklichaam te meten. In principe kan deze meting in twee richtingen uitgevoerd worden maar het spreekt voor zich dat de richting haaks op de waterkering het meest relevant is.

De sensor bestaat uit een verticale stalen of kunststof buis die tot diep in de ondergrond wordt aangebracht. De diepte tot waar deze buis reikt hangt samen met de diepte waarop men mag veronderstellen dat zich daar geen horizontale bewegingen voordoen (bijv. het Pleistocene zand). Onderin de buis wordt een trekdraad verankerd die naar de bovenzijde van de buis wordt geleid (tot op / net boven maaiveld). Daar wordt de draad verbonden met een 'dobber' die in een bak met vloeistof drijft. De draad zal zuiver verticaal gaan staan zodat de afstand van de dobber tot de binnenkant van de buis nauwkeurig kan worden gemeten.

Zodra de grond rondom de buis horizontaal beweegt, zal deze de buis meenemen (immers de krachten die de grond op de buis uitoefent zijn veel groter dan de weerstand die de buis kan leveren). De 'dobber' zal echter niet verplaatsen. E.e.a. resulteert in een wijziging van de afstand van de 'dobber' tot de binnenzijde van de buis.

Met deze meettechniek is het mogelijk om met een nauwkeurigheid tot 1/100 mm de horizontale vervorming van een dijklichaam te meten. Deze parameter is van belang om de 'overall' stabiliteit van de dijk te controleren.

5.9.3.2. Plaatsing IP

Er zijn 3 IP's geplaatst ter hoogte van de meetraaien in de IJkdijk in het talud van de kering, op 3 m van de teen. Door ruimtegebrek op die locatie zijn de buizen net buiten de eigenlijke raai geplaatst: Noord op ong. 6 m ten zuiden van raai, Midden en Zuid op ong. 6 m ten noorden van raai.

De 6 m lange HDPE buis is aangebracht tot op – 5 m NAP voor de eigenlijke aanleg van de dijk door middel van een boring tot in het zand (diepte onderkant buis t.o.v. maaiveld N:5,93m, M:5,20m en Z:4,38m). Hierdoor stak de buis ong. 2-2,5 m boven het maaiveld uit. Rondom de buis is het profiel weer opgebouwd conform de opbouw van de ondergrond: zand bij zand, bentoniet klei bij veen en klei. Na plaatsing stonden de buizen nagenoeg verticaal en ruim binnen de vereiste marges.



De sensoren zijn op 23 en 24 september 2008 geïnstalleerd en aangesloten op het IJkdijk IS-netwerk van IFCO/RPSBCC enkele dagen voor aanvang van het eigenlijke experiment, nadat de aanleg van de dijk was voltooid.

Belangrijke constatering na installatie

Bij controle metingen na de voltooiing van de aanleg van de dijk is gebleken dat alle buizen een aanzienlijke verplaatsing van de dijk af hadden ondergaan. Voorafgaand aan het opbouwen van het dijklichaam zijn alle meetbuizen nagenoeg verticaal aangebracht. Gezien de preferente richting van vervorming wordt aangenomen dat de geconstateerde scheefstand het gevolg is van horizontale vervormingen in het veenpakket alsmede het dijklichaam zelf.

Door de scheefstand van de buis zijn de ankers niet onderin de buis bevestigd en functioneert het systeem minder optimaal dan had gekund. De dijk is ter plaatse van de buizen 2 m hoog. Dat betekent dat de ankers van alle buizen ter hoogte van het veen zijn geplaatst en niet zoals was voorzien in de zandlaag. Het anker ("vaste punt") van de IP is geplaatst op ca. -4 m (Noord), -3,5 (Midden) en -3 m (Zuid) beneden bovenkant buis. Hierdoor zijn de metingen niet optimaal, aangezien het ankerpunt niet een vast punt is, maar zelf ook kan bewegen. De metingen zijn onderling ook minder goed te vergelijken, omdat ze bewegingen in verschillende delen van de dijk registreren. Deze installatie doet niets af aan de gevoeligheid van de sensoren en of en hoe de sensoren reageren op bewegingen in de dijk (talud). De absolute verplaatsing en verplaatsingsrichting zijn wel onderhevig aan deze wijze van installeren.

5.9.3.3. Meting IP

Het IS-netwerk is aangesloten op het IJkdijk systeem en de IP's registreren bruikbare meetwaarden elk kwartier vanaf 23 september 2008 18:00 tot 27 september 16:00 (systeemtijd). De dijk is bezweken op 16:02.

Alle instrumenten hebben waarden gemeten:

- de IP in de Noord-raai komt op 26/9/08 om 20:00 in de dwarsrichting (haaks op de kering, de te verwachten richting van de verschuiving) buiten z'n meetbereik. De meetserie die hieraan vooraf gaat maakt duidelijk dat de dijk op dit punt het meest actief in beweging is.
- de IP in de midden-raai registreert alle bewegingen en slaat op 27/9/08 om 16:00 door.
- de IP in de Zuid-raai registreert alle bewegingen, maar deze zijn geringer dan in de andere buizen.

Er is sprake van kanteling van de buis in westelijke richting. Dit betekent derhalve dat de voet van de buis eerst gegaan is, zodat geconcludeerd kan worden, dat de verankering in het zand niet in voldoende mate heeft plaatsgevonden.



Foto 3.2 Bovenaanzicht afglijding waarin de verplaatsing van de midden IP zichtbaar is (bron foto: Deltares)

5.9.3.4. Resultaten IP Algemeen

De resultaten van de IP (grafieken) zijn opgenomen in bijlage 1. De midden en Noord IP bevonden zich in het afglijdingsvlak. De midden IP is over ong. 5 m verplaatst in de richting van de gegraven teensloot en is hierbij waarschijnlijk afgebroken. De Noord IP is niet verplaatst, maar bevindt zich wel in de scheuren van de afglijding.

De verplaatsing van alle IP's gebeurt echter ook naar de dijk toe. Dit kan alleen worden verklaard door een ondergrondse beweging van de buis: een beweging op de locatie van het ankerpunt of daaronder. Dit kan wederom worden verklaard door het wegdrukken van het veen tussen de zandlaag in de diepe ondergrond en het kleidek op het veen.



Foto 3.3 Middenraai met IP en II (oranje buis) (bron foto: Deltares)

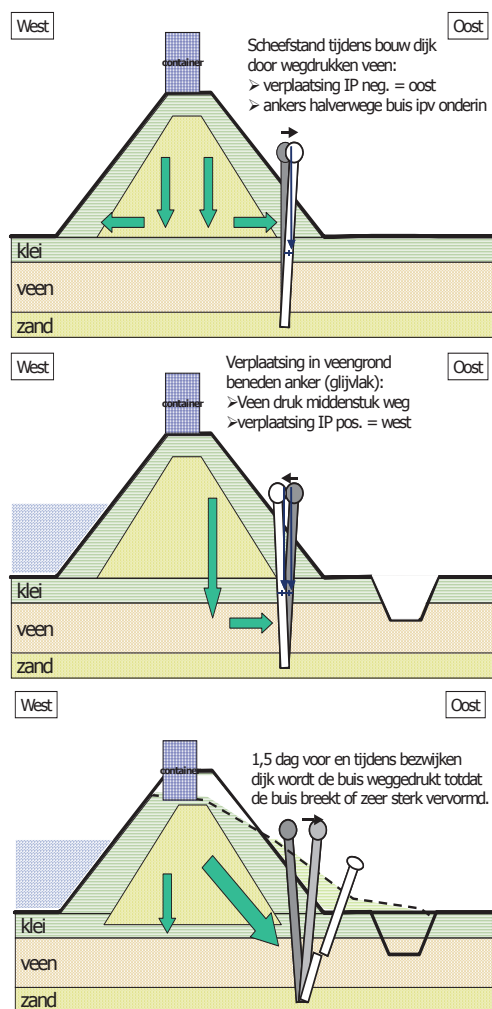
Zuid IP

De Zuid IP is continu in beweging. De activiteiten van het experiment zijn wel waarneembaar, maar niet zo sterk als bij de andere twee IP's. Ook hier vindt er een groter verplaatsing van de IP plaats in de richting van de dijk (pos.), wat tegengesteld is aan de verwachtingen.

Op 24-09-08 is er een verplaatsing die geassocieerd kan worden met het plaatsen van de containers. Op 25-09-08 is er een verplaatsing van ongeveer + 1 mm, gelijktijdig het vullen van het bassin. Op 26-09-08 is er een verplaatsing van ongeveer - 0.5 mm gedurende het uitgraven van de teensloot. Op 27-08-09 is er een geleidelijke verplaatsing van +1,5 mm totdat de dijk bezwijkt. Positieve waarden impliceren een verplaatsing in westelijke richting, derhalve naar de dijk toe. Voor Zuid wordt dus per saldo een verplaatsing van de dijk af geconstateerd.

Midden IP

Vanaf meetpunt 0 (23-09-08 18:00) verplaatst de bovenkant van de buis zich van de dijk af. Dit gebeurt continu en met sprongen op de momenten dat er meer belasting op het dijklichaam wordt uitgeoefend: vullen bassin, graven teensloot en vullen zandkern.



De bewegingen in de eerste 1,5 dag, voordat de dijk onder wordt belast, zijn een indicatie dat de dijk niet stabiel is. Het gewicht van de dijk en de containers drukt het onderliggende veen weg, waardoor de dijk als geheel dieper komt te liggen en waarschijnlijk aan de onderkant ook iets breder wordt.

Tijdens het experiment vindt er een continue verplaatsing van de IP's plaats. Vermoedelijk wordt de gehele buis verplaatst, in ieder geval verplaatst de onderkant van de buis zich op momenten sneller dan de bovenkant, waardoor er een relatieve beweging naar de dijk toe kan worden gesignaleerd.

De onderkant van de buis is onvoldoende verankerd in de zandondergrond. Echter, alle activiteiten van het experiment zijn zeer duidelijk te zien in verplaatsingen van maximaal $-1,5$ mm.

Op de avond voor het eigenlijke bezwijken van de dijk begint de buis zeer sterk te verplaatsen. In 24 uur tijd is er een verplaatsing van $+10$ mm, waarna er een verplaatsing van $-0,5$ mm optreedt, gevolgd door een abrupte verplaatsing in 4 uur tijd van $+2$ mm tot bezwijken en het afbreken van de buis.

Wederom vindt de grootste verplaatsing in de ondergrond plaats, waardoor de onderkant van de buis kantelt ten opzichte van de bovenkant van de buis.

Figuur 3.1 Schematische verklaring van de bewegingen van de IP. De pijlen geven een indicatie van de mogelijke grondbewegingen. Onderzoek van de consortiumpartners en hun sensoren moet uitwijzen hoe en waar grondverplaatsing heeft plaatsgevonden

Noord IP

De Noord IP reageert heftiger dan de Midden en Zuid IP. De verplaatsing op 24/09/08 is -2 mm (containers), op 25/09/08 is deze $-2,5$ mm (graven ondiepe sloot) en op 26/09/08 is de verplaatsing -1 mm (diepe ontgraving). Aan het eind van de dag (26/09/08) heeft de IP zijn maximale uitslag bereikt ($+7,5$ mm) en zijn er geen waarnemingen meer tot bezwijken.

De Noord IP gedraagt zich op hoofdlijnen anders dan de andere 2 IP's. De buis kantelt van de dijk af tot tijdens het vullen van het bassin, maar vanaf de middag van 24/09/08 is de verplaatsing naar de dijk toe (pos., west). Deze verplaatsing wordt telkens onderbroken door het kantelen van de buis gedurende activiteiten van het experiment. Deze verplaatsingen zijn wederom groter dan bij de andere IP's.

sensor	start beweging voorafgaand aan bezwijken	maximale verplaatsing	opmerking
noord	26/9/08 12:00	6.10 mm	maximale utslag bereikt op 26/9/08 23:30
midden	26/9/08 11:00	11.35 mm	
zuid	27/9/08 5:30	0.94 mm	

Tabel 3.1: resultaten IP

5.9.4 Inplace Inclinometers (II)

5.9.4.1. II sensor

De horizontale vervorming van een waterkering kan op twee manieren worden gemeten: met behulp van een 'inverted pendulum' en door middel van Inplace Inclinometers (II). Inverted Pendulums zijn nauwkeuriger dan II's maar hebben de beperking dat de horizontale vervorming slechts op één niveau gemeten wordt. II's zijn duurder dan inverted pendulums en minder nauwkeurig. Ze hebben het voordeel dat een volledig vervormingsprofiel met de diepte wordt verkregen.



Een II bestaat uit een verticale string van onafhankelijk werkende hellingshoekmeters of inclinometers. Deze string wordt in een speciale verticale buis in de grond aangebracht. Deze buis reikt meestal tot de draagkrachtige zandlaag om dienst te doen als 'vast punt' in horizontale zin. De inclinometers zijn aan elkaar gekoppeld en leveren zodoende een 'hellingshoek-profiel met de diepte van de waterkering. Door de gemeten hellingshoeken te vermenigvuldigen met de lengte van de inclinometers en deze bij elkaar op te tellen wordt een verplaatsingsprofiel met de diepte verkregen.

Een II bestaat zodoende uit een aantal sensoren, e.e.a. afhankelijk van de diepte waarop de draagkrachtige zandlaag wordt aangetroffen.

Foto 3.4 Inplace Inclinator in IJkdijk

De II's zijn elk 1 m lang en zijn in een PVC buis met een diameter van 70 mm geplaatst. Per buis zijn vijf gekoppelde II's op verschillende diepten geïnstalleerd. De II's zijn haaks op de waterkering georiënteerd en meten daarmee de verplaatsing in de verwachte afschuivingsrichting. Door de gemeten hellingshoeken te vermenigvuldigen met de lengte van de inclinometers en deze bij elkaar op te tellen wordt een verplaatsingsprofiel met de diepte verkregen.

5.9.4.2. Plaatsing II

Er zijn 3 II's geplaatst ter hoogte van de meetraaien in de IJkdijk in het talud van de kering, op 3 m van de teen. Door ruimtegebrek op die locatie zijn de buizen net buiten de eigenlijke raai geplaatst: Noord op ong. 4 m ten zuiden van raai, Midden en Zuid op ong. 4 m ten noorden van raai.

De PVC buizen zijn aangebracht tot op – 5 m NAP voor de eigenlijke aanleg van de dijk door middel van een boring tot in het zand. Het systeem bestaat uit koppelbare buizen van 1 m, waardoor er tijdens de aanleg van de dijk een geringe lengte boven het maaiveld uitstak. De buizen zijn tijdens de aanleg van de dijk opgelengd. In de buizen is een groef aangebracht waarin het geleidewiel van de II-sensoren past. De oriëntatie van deze geleiderail is haaks op de waterkering. Na plaatsing stonden de buizen nagenoeg verticaal en ruim binnen de vereiste marges.

De sensoren van elke 1 m lengte, in totaal 5 per buis, zijn op 23 en 24 september 2008 geïnstalleerd en aangesloten op het IJkdijk IS-netwerk van RPS/IFCO enkele dagen voor aanvang van het eigenlijke experiment, nadat de aanleg van de dijk was voltooid.

Belangrijke constatering na installatie

Bij controle metingen na de voltooiing van de aanleg van de dijk is gebleken, dat alle buizen een aanzienlijke verplaatsing van de dijk af hebben ondergaan. Voorafgaand aan het opbouwen van het dijklichaam zijn alle meetbuizen nagenoeg verticaal aangebracht. Gezien de preferente richting van vervorming wordt aangenomen dat de geconstateerde scheefstand het gevolg is van horizontale vervormingen in het veenpakket alsmede het dijklichaam zelf.

De hellingmeetbuizen in zowel de Noord-, Midden als de Zuidraai konden volledig geïnstrumenteerd worden met de daarvoor bedoelde II. Echter, in alle buizen loopt de op-één-na onderste II buiten het gekalibreerde bereik ($\pm 5^\circ$) in verband met de geconstateerde scheefstand.

5.9.4.3. Meting II

Het IS-netwerk is aangesloten op het IJkdijk systeem en de II's registreren bruikbare meetwaarden elk kwartier vanaf 23 september 2008 18:00 tot 27 september 16:00 (systeemtijd). De dijk is bezweken op 16:02.

Alle instrumenten hebben waarden gemeten:

- de II in de Noord- en middenraai registreren alle bewegingen en slaan op 27/9/08 om 16:00 door;
- de II in de Zuidraai registreren alle bewegingen, maar deze zijn relatief gering;
- er zijn duidelijke verplaatsingen in de dijk op 25/09/08 rond 12:00 uur, 26/09/08 rond 12:00 uur en op 27/09/08 rond 15:00 uur.

5.9.4.4. Resultaten II

Algemeen

De buis is geïnstrumenteerd met 5 inclinometers, waarvan de diepste op 5 m beneden bovenkant buis en de laatste op 1 meter beneden bovenkant buis. Er wordt aangenomen dat de onderkant van de buis (dus 5 m beneden bovenkant buis) verankerd zit in het zand en dus geen verplaatsing zal ondergaan. De inclinometer op 5 m beneden bovenkant buis meet dan eigenlijk de verplaatsing op 4 m beneden bovenkant buis (0+II5), met behulp van de inclinometer op 4 m beneden bovenkant buis kan vervolgens de verplaatsing op 3 m beneden bovenkant buis bepaald worden (0+II5+II4), enzovoorts.)

De resultaten (grafieken) zijn weergegeven in bijlage 2. De grafieken geven verplaatsingen ten opzicht van de "nulmeting" aan. Er is niet zo'n groot verschil in gedrag tussen midden en noord (en eigenlijk ook zuid). De grootste verplaatsing is opgetreden tussen 3 en 4 m beneden bovenkant buis en daarboven is de buis relatief rechtstandig van de dijk af verplaatst.

Alle drie de II's hebben de verplaatsing van de dijk geregistreerd (tabel 3.2). Hierbij is de grootste verplaatsing geconstateerd bij de midden raai (ong. 40 mm), terwijl de Zuid raai maximaal 10 mm registreerde en de Noord raai maximaal 25 mm.

sensor	14.00 uur 27/9/08: direct voorafgaand aan laatste versnelling	laatste registratie
zuid	6 mm	10 mm
midden	40 mm	60 mm
noord	20 mm	30 mm

Tabel 3.2 Overzicht resultaten II.

De sensoren in de 3 meetbuizen registreren de activiteiten rondom de dijk: graven sloot en vullen zandkern. De scheefstand in de diepte is bij elke raai verschillend. Wel hebben ze allen als overeenkomst dat de diepste II, met de bovenkant van de sensor op -4 m beneden bovenkant buis (ong. -3 m NAP, 2 m beneden maaiveld) de geringste scheefstand heeft plaatsgevonden. Het glijvlak heeft dus hierboven gezeten.

Op enkele sensoren in de Zuid raai na zijn alle verplaatsingen van de dijk af. Dit is een indicatie voor een glijbeweging, waarbij de ondiepere lagen sneller verplaatsen ten opzichte van diepere lagen.

II Zuid

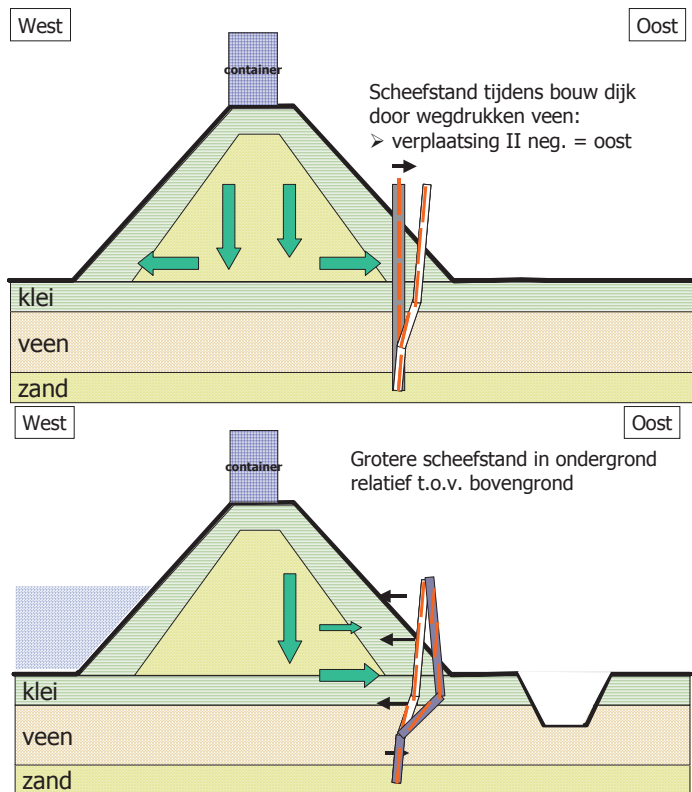
De diepste II op -4m reageert alleen op het graven van de diepe sloot op 26-09-08 en op het uiteindelijke bezwijken van de dijk met een verplaatsing van ong. 1 mm van de dijk af.

De II's op de overige dieptes gaan ook schever staan bij het graven van de ondiepe sloot. Het uiteindelijke bezwijken gaat zeer plotseling.

De verplaatsing is het grootst bij de II op -3m en het minste bij de II op 0m van bovenkant buis. Met uitzondering van de onderste II zijn de scheefstanden vanaf 26-09-08 naar de dijk toe. Dit is een indicatie voor een glijbeweging, waarbij de diepere lagen sneller verplaatsen ten opzichte van ondiepere lagen.

Doordat de totale scheefstand van de Zuidraai het geringst is (maximaal ong. 10 mm) zijn geringe verstoringen in de dijk ook zichtbaar in de grafiek. Zo is het opvallend dat de scheefstand van alle sensoren behalve de diepste fluctuaties vertonen tot maximaal 0,5 mm juist wanneer er door de graafmachine rondom de dijk werd gegraven of gereden. Deze fluctuaties zijn ook aanwezig bij de midden en Noordraai, maar niet meer zichtbaar in de grafiek.

II Midden



Alle II's op de diepste na registreren de ondiepe en de diepe ontgraving. Na de diepe ontgraving is de toename in scheefstand gering, maar gaat wel continu door tot bezwijken, wat heel plotseling is. De toename in scheefstand als gevolg van de ondiepe ontgraving is gemiddeld ong. 15 mm. Deze verloopt in eerste instantie vrij stijl, waarna de toename in scheefstand afvlakt, maar wel continu doorgaat tot het begin van de diepe ontgraving. Aan het begin van de diepe ontgraving is er een zeer plotselinge zeer sterke toename in scheefstand: gemiddeld 15 mm in 15 min. Hierna stabiliseert de toename in scheefstand tot bezwijken.

Figuur 3.2 Schematische verklaring van de bewegingen van de II

De diepste II op -4 m ondervindt een geringe scheefstand naar de dijk toe tot het moment van bezwijken. De andere II's ondervinden verplaatsingen van de dijk af. De verplaatsing is het grootst bij de II op -3m beneden bovenkant buis en het minste bij de II op 0m van bovenkant buis. Met uitzondering van de onderste II is dit een indicatie voor een glijbeweging, waarbij de diepere lagen sneller verplaatsen ten opzichte van ondiepere lagen.

II Noord

De diepste sensor meet een scheefstand op 4 m beneden bovenkant buis van maximaal slechts 2,5 mm van de dijk af, ten opzichte van een maximale verplaatsing van de sensor in de bovenkant van de buis van 20 à 30 mm.

De II in de Noord raai reageert op vergelijkbare wijze als de midden raai: toename scheefstand bij ondiepe en diep ontgraving. Het verschil zit in de periode ertussenin. In de middenraai is er een plotselinge toename in verplaatsing bij het begin van het graven van de diepe sloot. Deze plotselinge toename is ook aanwezig bij de Noord-raai, alleen de uitslag is slechts 5 mm t.o.v. 15 mm in de middenraai.

Daarentegen blijven de sensoren in de Noord-raai een blijvende toename in scheefstand noteren tot bezwijken, terwijl die in de midden-raai stabiliseren tot bezwijken. De toename in de Noord-raai tot bezwijken is gemiddeld 10 mm.

Nog een verschil tussen de Noord en midden-raai is in de maximale verplaatsing bij de ondiepe ontgraving: deze is bij de Noord-raai relatief gering, 2mm, terwijl dit in de midden-raai rond de 10 mm was. Hierdoor is de totale maximale verplaatsing van de midden-raai 48 mm op -3m bovenkant buis, terwijl dit in de Noord-raai 18 mm is.

Een andere belangrijk verschil tussen de twee raaien is het proces dat plaatsvond. In de middenraai is een duidelijk glijvlak waarneembaar, met de grootste verplaatsing op -3m t.o.v. de bovenkant buis . In de Noord-raai is de grootste verplaatsing op 0 en -1 m ten opzichte van de bovenkant buis. Dit geeft aan dat het materiaal op het talud van de kering is gaan bewegen en dat er zich minder een glijvlak heeft gevormd in de lagen onder de dijk.

5.9.5. Waterspanningsmeters (BAT)

5.9.5.1. BAT sensor

Om de stabiliteit van een waterkering te bewaken is het van belang om op verschillende niveaus in de waterkering de optredende waterspanningen te meten. Enerzijds kan hiermee gedetecteerd worden indien de waterkering 'lek' raakt en de waterdrukken in de dijk toenemen, anderzijds heeft dit te maken met het optreden van wateroverspanningen op het moment dat de binnenzijde van een waterkering onderhevig is aan afschuiving / instabiliteit. Ten slotte kan het van belang zijn, e.e.a. afhankelijk van de bodemopbouw ter plaatse, om de waterspanningen in een tussenzandlaag of de draagkrachtige zandlaag te meten.

Een BAT-waterspanningsmeter meet de waterspanning of poriën druk op de diepte waarop het BAT-filter is geplaatst. Om de stabiliteit van een waterkering te bewaken is het van belang om op verschillende niveaus in de waterkering de optredende waterspanningen te meten. De BAT-waterspanningsmeters bestaan uit gasbuizen van ongeveer 1 inch diameter met een BAT filtertip aan het einde van de buis op de diepte waar de waterspanning moet worden gemeten.

Het grote voordeel van het BAT-systeem is dat de waterspanningsmeters handmatig gecontroleerd cq. vervangen kunnen worden (geen equipment nodig).

Dit geeft de mogelijkheid om de waterspanningssensoren om de zoveel jaar te kalibreren hetgeen noodzakelijk is voor sensoren waarmee absolute metingen worden verricht. Een ander belangrijk voordeel van de BAT-sensor is dat exact bekend is, ook na vele jaren, op welk niveau het meetelement zich bevindt. De meetresultaten kunnen eenvoudig gecorrigeerd worden voor variaties in de luchtdruk. Voor een juiste interpretatie en nauwkeurigheid van de meetdata zijn beide gegevens essentieel.

5.9.5.2. Plaatsing BAT



Er zijn 3 BAT-filters opgelengd met gasbuizen geplaatst ter hoogte van de meetraaien in de IJkdijk in het talud van de kering, op 3 m van de teen. Door ruimtegebrek op die locatie zijn de buizen net buiten de eigenlijke raai geplaatst: Noord op ong. 3 m ten zuiden van raai, Midden en Zuid op ong. 3 m ten noorden van raai.

De filters zijn aangebracht tot op 0,75 m boven de zandlaag, op ong. – 3,75 m NAP voor de eigenlijke aanleg van de dijk door middel van het wegdrukken van de buis met filter. Het systeem bestaat uit koppelbare buizen van 1 m, waardoor er tijdens de aanleg van de dijk een geringe lengte boven het maaiveld uitstak. De buizen zijn tijdens de aanleg van de dijk opgehoogd. Na plaatsing stonden de buizen nagenoeg verticaal en ruim binnen de vereiste marges.

Foto 3.5 BAT Sensor in IJkdijk

De sensoren zijn op 23 en 24 september 2008 geïnstalleerd en aangesloten op het IJkdijk IS-netwerk van IFCO/RPS enkele dagen voor aanvang van het eigenlijke experiment, nadat de aanleg van de dijk was voltooid.

Belangrijke constatering na installatie

Bij controle metingen na de voltooiing van de aanleg van de dijk is gebleken dat alle buizen een aanzienlijke verplaatsing van de dijk af hebben ondergaan. Voorafgaand aan het opbouwen van het dijklichaam zijn alle meetbuizen nagenoeg verticaal aangebracht. Gezien de preferente richting van vervorming wordt aangenomen dat de geconstateerde scheefstand het gevolg is van horizontale vervormingen in het veenpakket alsmede het dijklichaam zelf.

De buizen in de Noord- en Middenraai konden worden voorzien van instrumentatie. De buis in de Zuidraai is niet voorzien van een BAT-sensor. Op ca. 4 m beneden bovenkant buis kwam de sensor bij het neerlaten vast te zitten door een te grote horizontale vervorming van de stalen buis.

5.9.5.3. Meting BAT

Het IS-netwerk is aangesloten op het IJkdijk systeem en de BAT-sensoren registreren bruikbare meetwaarden elk kwartier vanaf 23 september 2008 18:00 tot 27 september 16:00 (systeemtijd). De dijk is bezweken op 16:02.

Alleen de Noord- en Middenraai hebben meetwaarden opgeleverd:

- de BAT in de Midden raai registreert geringe drukverschillen en slaat op 27/9/08 om 16:00 door;
- de BAT in de Noord-raai registreert drukverschillen 26/09/08 rond 12:00 uur en op 27/09/08 rond 15:00 uur.

5.9.5.4. Resultaten BAT

Algemeen

Het grote verschil tussen de Noord en de Midden raai is het absolute verschil in stijghoogte. De Noord raai zit het grootste deel van de tijd voor de diepe ontgraving op -1,28 m NAP en de Midden raai op 0,54 m NAP. De midden raai blijft op dit niveau, terwijl de Noord raai tijdens de diepe ontgraving op -1,76 m NAP komt te liggen.

Middenraai

De middenraai registreert een continue afname van stijghoogte welke het gevolg kan zijn van een verdere zetting en consolidatie van de venige ondergrond na het aanbrengen van het laatste materiaal van de dijk (of de containers).

Tijdens het graven van de ondiepe sloot heeft er een afname van de stijghoogte plaatsgevonden van 74 mm in een half uur. Daarvoor en daarna fluctueert de stijghoogte met enkele mm tot ong. 2 uur voor bezwijken. De stijghoogte neemt gedurende 1 uur voor bezwijken met 70 mm toe, waarna de stijghoogte zeer snel met 550 mm daalt tot bezwijken.

Noordraai

Er is geen verandering in stijghoogte waarneembaar tot halverwege het graven van de diepe sloot. Hier daalt de stijghoogte met 400 mm in 1,5 uur, waarna de stijghoogte weer toeneemt met 70 mm en hierop blijft staan tot een uur voor bezwijken. Een uur voor het bezwijken van de dijk neemt de stijghoogte toe met 73 mm.

Conclusies

De BAT-sensoren functioneren als systeem dat bewegingen in keringen kan detecteren. Echter, de interpretatie van de gegevens zijn niet eenduidig door de grote verschillen tussen beide locaties. Het is mogelijk dat niet beide filters zich binnen het bereik van het (dunne) veenpakket bevonden. Op beide locaties, de Noord en Midden-raai is de uiteindelijke afglijding en het bezwijkproces dat daar bij hoort ook anders geweest, maar een vertaalslag naar een monitoringssysteem is lastig. De gegevens helpen echter wel om het proces in het dijklichaam, met opbouwende en wegvallende waterspanningen, beter te begrijpen en te verklaren.

5.9.6. Liquid Level Settlement Sensor (LLS)

5.9.6.1. LLS sensor

Een elegante en zeer nauwkeurige techniek om verticale zettingen en met name zettingsverschillen te meten, is door middel van een vloeistof-waterpassysteem. Een dergelijk systeem maakt gebruik van het principe van communicerende vaten waardoor een bepaald niveau over afstanden van vele kilometers zeer nauwkeurig doorgegeven kan worden. Inmiddels is er recent een derde generatie van een dergelijk meetsysteem beschikbaar gekomen waarbij de meetnauwkeurigheid is geoptimaliseerd tot ca. $\pm 0,1$ mm. De sensoren zijn door middel van 2 kleine diameter slangetjes en 1 kabel met elkaar verbonden: één slangetje dat gevuld is met vloeistof, één slangetje dat gevuld is met lucht (t.b.v. de luchtdrukcompensatie) en één IS netwerkkabel voor de voeding en het doorgeven van de meetdata.

Enkele kenmerken van deze laatste generatie LLS:

- een gesloten systeem waardoor het systeem aanzienlijk sneller reageert op optredende zettingen;
- luchtdruk-gecompenseerd zodat kleine variaties in luchtdruk (bijv. a.g.v. wind of tocht) geen invloed meer hebben op de meetresultaten;
- temperatuur-gecorrigeerd – in elke sensor is een gevoelige temperatuursensor aangebracht zodat de meetresultaten direct met behulp van een 3^{de} graads polynoom worden gecorrigeerd.

Deze metingen kunnen op twee plaatsen in een waterkering uitgevoerd worden: op de kruin van de waterkering om zodoende nauwkeurig te controleren of de waterkering aan zettingen onderhevig is en in de teen van het talud om in een vroeg stadium afschuivingen of instabiliteit te detecteren.

Een LLS meet verticale zettingen en met name zettingsverschillen door middel van een vloeistofwaterpassysteem. De LLS bestaat uit zeer gevoelige (relatieve) druksensoren, die met elkaar verbonden zijn door middel van een vloeistofslang, een luchtdrukcompensatieslang en een datakabel. De eigenlijke sensoren zitten in de vloeistofslang en zijn onderling met elkaar verbonden. Het systeem compenseert automatisch voor de luchtdrukverschillen. Deze metingen zijn in dit experiment alleen in de kruin van de waterkering uitgevoerd.

5.9.6.2. Plaatsing LLS

De LLS zijn geplaatst in de kruin van de dijk op 25 cm diepte aan de oostzijde van de kering. De containers zijn geplaatst tussen de strengen en het "zwembad". De sensoren zijn geplaatst ter hoogte van de Noord-, Midden- en Zuid-raai. Tevens is aan de Noordkant van de kering, in de compartimeringsdijk een extra sensor geplaatst ter referentie (vast punt voor deze meting).

5.9.6.3. Meting LLS

Het IS-netwerk is aangesloten op het IJkdijk systeem en de LLS'en registreren bruikbare meetwaarden elk kwartier vanaf 23 september 2008 18:00 tot 27 september 16:00 (systeemtijd). De dijk is bezweken op 16:02.



Foto 3.6 LLS in kruin IJkdijk

De metingen laten zien dat er een duidelijk verzakking begint op te treden in de midden raai vanaf 26/09/08 vanaf ong. 12:00 uur. Alle raaien laten vervolgens duidelijke bewegingen zien op 27/09/08 vanaf ong. 14:00 uur.

5.9.6.4. Resultaten LLS

Algemeen

De zakkingsstrengen LLS reageren op alle activiteiten rondom de dijk: vullen bassin, ondiepe en diepe sloot. Doordat de met water gevulde slangen aan elkaar zijn gekoppeld, meten de sensoren alle verticale bewegingen van elke sensor ten opzichte van de referentiesensor op een bekend en vast punt. In figuur 3.3 is een detailopname weergegeven van het graven van de ondiepe sloot. De bewegingen van de LLS-sensoren worden waarschijnlijk veroorzaakt door de activiteiten van de bouwkraan zoals rondrijden en graven.

Het is duidelijk dat de grootste zakking plaatsvindt in de middenraai. De zakking is continu vanaf het begin van het experiment, maar er is een plotselinge toename in de zakkingsnelheid waarneembaar vanaf het begin van het graven van de diepe sloot. Zoals ook al bij andere sensoren is geconstateerd, is het eigenlijke bezwijken van de dijk in gang gezet bij het graven van de diepe sloot.

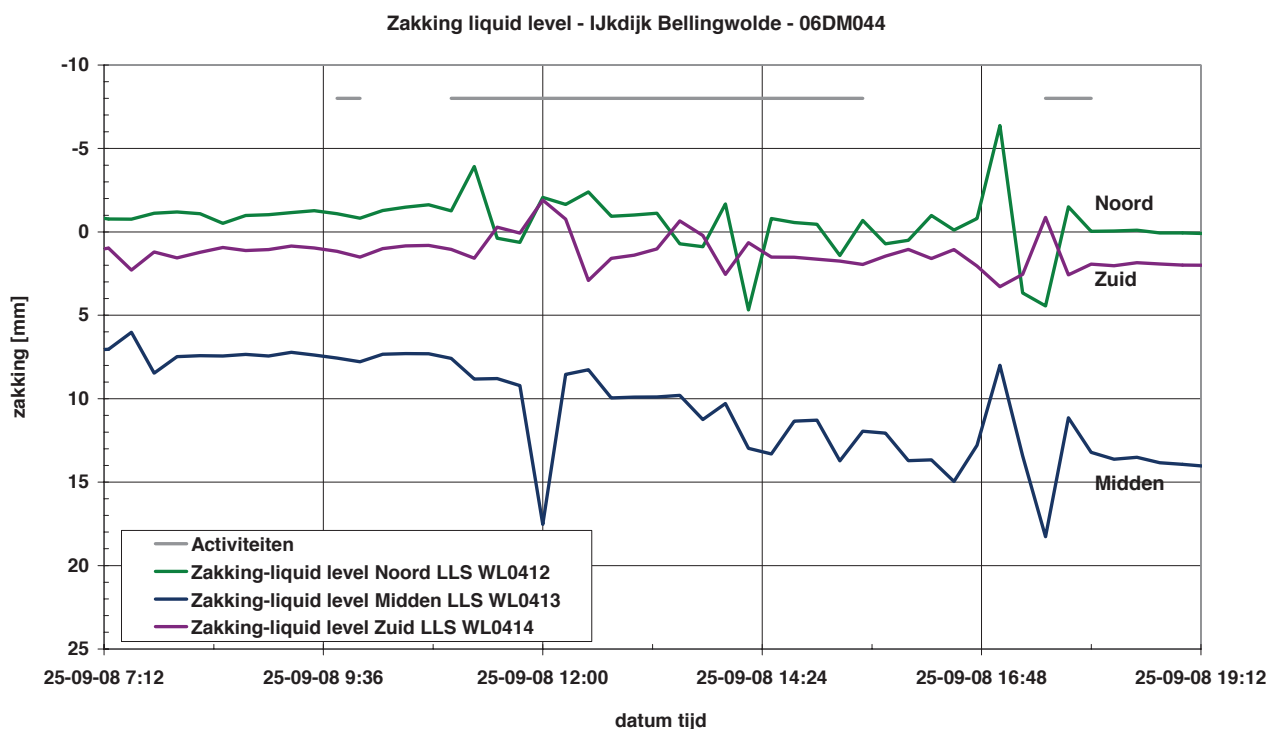
Tijdens de ondiepe ontgraving zijn verticale bewegingen van 10 mm in een kwartier opgetreden in de periode dat de graafmachines het lek in de compartimeringsdijk aan het dichtten waren. Alle overige resultaten zijn weergegeven in bijlage 4.

Zuid raai

De Zuid-sensor heeft een maximale zakking tot 2 uur voor bezwijken van 8,5 mm, waarna er een stijging van de zakkingsnelheid is tot aan bezwijken. Op dat moment bedraagt de zakking 13,5 mm. Er zijn sterke fluctuaties waarneembaar tijdens activiteiten rondom de dijk. De LLS zakken niet alleen, maar komen ook weer omhoog. Het is op dit moment niet duidelijk of het vaste punt mogelijk ook heeft bewogen, maar het is niet waarschijnlijk dat dat zo snel gebeurde.

Midden raai

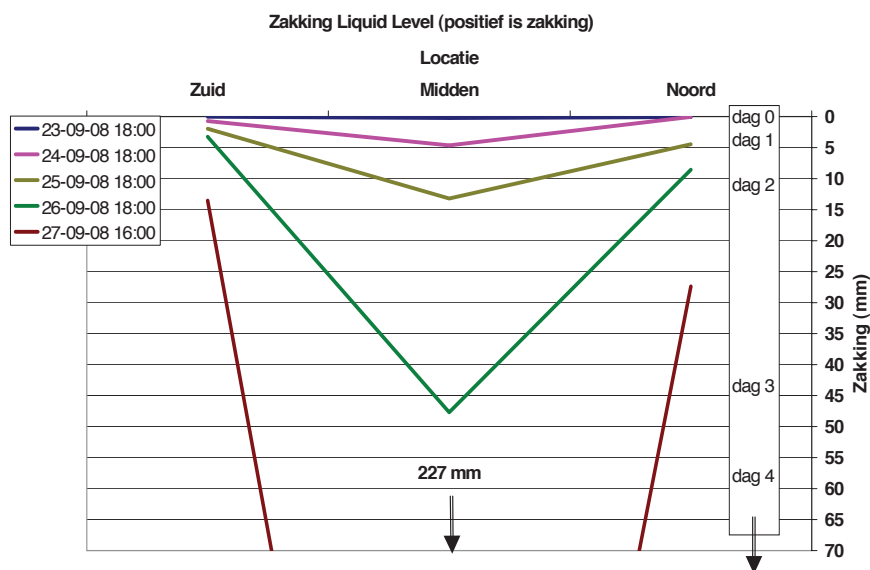
De sensoren in de middenraai zakken continu en lineair tot 21 mm ten opzichte van het oorspronkelijke niveau tot de start van het graven van de diepe sloot (26-09-08 11:00). Dat is een zakkingsnelheid van 0,3 mm per uur. Hierna neemt de zakkingsnelheid toe naar 3,7 mm per uur. De zakking is in deze periode wederom nagenoeg lineair. Een kwartier voor het bezwijken van de dijk is de finale zakking reeds begonnen met een toename van bijna 100 mm.



Figuur 3.3: detail van de resultaten van de zakkingstreng LLS tijdens de ondiepe ontgraving.

Noord raai

De sensoren in de Noord raai zakken sneller dan in de Zuid raai, maar op een half uur voor bezwijken is de zakking nog slechts 20 mm ten opzichte van het begin van het experiment, wat een fractie is van de 129 mm die bij de midden raai is gemeten. De knik in zakkingsnelheid bij het begin van het graven van de diepe sloot, zoals bij de midden raai zo duidelijk is te zien, is ook waarneembaar bij de Noord raai. Tot dat moment was de zakking nagenoeg afwezig en fluctueert de sensor waarde rond de 0. De zakkingstreng begint pas echt te zakken bij het begin van het graven van de diepe sloot.



Figuur 3.4: ruimtelijk interpretatie zakking LLS

sensor	start beweging voorafgaand aan bezwijken	maximale zakking	zakking na start beweging
noord	26/9/08 15:00	27,38 mm	23,11 mm
midden	26/9/08 11:30	226,90 mm	204,79 mm
zuid	26/9/08 21:00	13,55 mm	9,65 mm

Tabel 3.3: resultaten LLS

5.9.7. Absolute Waterniveau-sensoren (AP) of zakkingstreng

5.9.7.1. AP sensor

Een AP is een druksensor die drukverschillen in een HDPE-slang meet, welke het gevolg kunnen zijn van bewegingen van kering. De sensoren zijn onderling met elkaar verbonden via de vloeistof in de slang. De sensoren meten de absolute druk in de HDPE vloeistofslang, welke wordt omgezet naar absolute zakking. Dit type sensor wordt ook wel de zakkingstreng genoemd.

5.9.7.2. Plaatsing AP

De AP zijn geplaatst in de kruin van de dijk op 25 cm diepte aan de oostzijde van de kering. De containers zijn geplaatst tussen de strengen en het "zwembad". De sensoren zijn geplaatst op de Noord-, Midden- en Zuid-raai. Tevens is aan de Noordkant van de kering, in de compartimeringsdijk een extra sensor geplaatst aan een zakbaak, wat het vaste punt voor deze meting is.

5.9.7.3. Meting AP

Het IS-systeem is aangesloten op het IJkdijk systeem en de AP'en registreren meetwaarden elk kwartier vanaf 23 september 2008 18:00 tot 27 september 16:00 (systeemtijd). De dijk is bezweken op 16:02.

5.9.7.4. Resultaten AP

De sensoren zijn temperatuur gecorrigeerd en zullen daardoor niet waarneembare afwijkingen opleveren als gevolg van temperatuurwisselingen. De waterstand in de slang zal afwijkingen vertonen (uitzetten of krimpen) door temperatuurverschillen. Het is een relatieve meting en de afwijkingen worden van elkaar afgetrokken. Echter, als er een luchtinsluiting in de slang aanwezig is, zal de waterstand ter weerszijden van de luchtbel anders reageren op temperatuurwisselingen. Deze type sensoren worden vooral ingezet bij locaties met grote zettingen tot 2 m.

Beide sensorlocaties nemen in eerste instantie een rijzing waar. In de Noord-raai tot maximaal 18 cm en in de midden raai tot maximaal 7 cm. Deze rijzing kan op dit moment nog niet worden verklaard anders dan veroorzaakt door een luchtinsluiting. Er wordt op beide locaties een zakking geregistreerd tussen het vullen van het bassin en de ondiepe ontgraving. Hierna is wederom een rijzing tot aan het einde van de ondiepe ontgraving, waarna de sensoren continu zakken tot het moment van bezwijken.

In de Noord raai wordt een totale zakking geregistreerd van 27 cm en in de midden raai van 23 cm. De absolute zakking ten opzichte van het oorspronkelijke niveau is het hoogst in de midden raai: 17 cm. De sensoren meten continue bewegingen in de dijk, waardoor de meetwaarden continu fluctueren rondom de algehele trend van $\pm 0,5$ cm.

De resultaten moeten nog nader worden bestudeerd en eventueel gecorrigeerd. Als de uiteindelijke conclusies niet anders kan zijn dan een luchtinsluiting, zullen de resultaten van deze sensor niet verder kunnen worden gebruikt.

5.9.8. Conclusies IS-systeem

5.9.8.1. Algemeen experiment

Het doel van het macrostabiliteitsexperiment was het creëren van een afglijding van ten minste 20 cm die werd veroorzaakt door macroinstabiliteit met als gevolg een glijvlak tot in de ondergrond. Deze doelstelling is geslaagd. Alle sensoren in de dijk hebben derhalve een realistische situatie van het falen van de dijk kunnen meten.

Bij het bestuderen van de resultaten van de metingen zijn er enkele aandachtspunten in relatie tot de experimentele dijk die eerst moeten worden toegelicht, voordat de eigelijke meetresultaten objectief kunnen worden beoordeeld. Hierbij is alleen gekeken naar het signaal uit de sensoren dat verklaard moet worden en de werkwijze van het bouwen van de dijk. Er is niet gekeken naar de vorm en dimensies van de dijk zelf, aangezien deze juist was ontworpen om te bezwijken.

1. Uit alle metingen blijkt dat het dijklichaam en de ondergrond voorafgaand aan het bezwijken niet stabiel was. Een ideale situatie zou een stabiele dijk zijn, zodat ook een stabiele situatie door de sensoren kan worden geregistreerd. Hierbij zouden ook verschillen in seizoenen en vochttoestand van de dijk in het meetsignaal kunnen worden meegenomen, om meer te weten te komen over de natuurlijke variatie van het sensorsignaal. Uiteraard was dit niet mogelijk in de huidige experimentele opzet. Deze situatie kan nu het beste worden uitgevoerd in pilotprojecten in bestaande waterkeringen.
2. De onstabiele toestand van de dijk heeft voor ons aandeel in het experiment zeer nadelige gevolgen gehad. De aard van de installatiewerkzaamheden van de Inverted Pendulum, InPlace Inclinator en BAT-waterspanningsmeters noodzaakte het om de buizen waarin de sensoren werden geplaatst aan te brengen voor aanvang van de bouw van de dijk. In bestaande dijken kunnen deze sensoren zonder problemen worden aangebracht. Deze buizen zijn gedurende bouw van de dijk allen vervormd, waardoor de sensoren niet of ten minste niet optimaal hebben kunnen functioneren. Dit heeft met name gevolgen gehad voor de interpretatie van de absolute meetresultaten.
3. De meeste sensoren blijken zeer gevoelig zijn geweest voor de activiteiten van de kraanmachine rondom de dijk. De trillingen die deze graaf- en rijwerkzaamheden hebben veroorzaakt geven een getande signatuur van de sensoren te zien. Aan de ene kant bemoeilijkt dit de interpretatie van de meetwaarden. De algehele trend van verzakking en knikpunten gedurende de verzakking is echter veelal wel terug te zien. Aan de andere kant geeft dit mogelijk een situatie weer wanneer sensoren worden geïnstalleerd in de dijklichaam waarop ook een weg ligt met verkeer. Dit is een situatie waarmee terdege rekening moet worden gehouden in een productieomgeving van dijksignaleringsensoren.
4. Onderzoek door Deltares na het bezwijken van de dijk heeft aangetoond dat de opbouw van de ondergrond, met name de dikte en structuur van de veenlaag en de diepte van de zandlaag, bij de drie meetraaien zeer uiteenlopend was. Dit was voor aanvang van het experiment niet bekend. Hierdoor zijn de resultaten tussen de raaien lastiger met elkaar te vergelijken.

5.9.8.2. Conclusies IS-systeem

Inverted pendulum

De IP's hebben geen optimale registratie van de bewegingen in de dijk kunnen registreren, doordat:

- de dijk nog niet stabiel was en daardoor de buizen scheef drukte;
- hierdoor de ankers van de dobbers halverwege de buis moesten worden geplaatst in plaats van onderin, waardoor de optimale registratie van de IP niet mogelijk is;
- het meetbereik van de inverted pendulums is beperkt door de initiële scheefstand van de buizen;
- de ankers niet stabiel zaten relatief ten opzicht van de omliggende grond (= geen verankering van de buis in de grond op het punt van het anker).

De IP's registreren wel zeer nauwkeurig alle bewegingen in de dijk. De IP's zijn van alle geteste sensoren het gevoeligst voor bewegingen in en rondom de dijk. De maximale verplaatsing die kan worden geregistreerd, geredeneerd vanuit een dijk in stabiele toestand, is 7,5 mm.

De verplaatsingen van de IP kunnen zeer indicatief zijn voor het mogelijk bezwijken van een waterkering. In het geval van de IJkdijk is de instabiliteit van het middenstuk ruim 1,5 dag voor het eigenlijke bezwijken ingezet. De IP kan een zeer bruikbaar instrument zijn als waarschuwingssysteem.

De relatief geringe verplaatsing van de IP in de Zuid-raai, waar uiteindelijk geen verzakking heeft plaatsgevonden, geeft aan dat het ruimtelijke meetbereik van de IP gering is.

Inplace inclinometer

De II's werken goed en nauwkeurig en kunnen uitstekend het bezwijkproces verklaren. Ze zijn zeer gevoelig en registreren bodembeweging nauwkeurig en in een vroeg stadium voor bezwijken. De II's kunnen uitstekend fungeren als waarschuwingssysteem, aangezien ze alle belasting- en sterkte reducerende factoren op de dijk registreren.

Door de scheefstand van de buizen zijn enkele II wel buiten hun gekalibreerde meetbereik geraakt. Het effect hiervan op de uitkomsten moet nog nader worden onderzocht.

BAT-sensor

Door problemen tijdens het opbouwen van de dijk, zijn alleen de midden en de Noord-raai uitgerust met BAT-sensoren. De BAT-sensoren hebben de toename en plotselinge afname in waterspanning goed geregistreerd. De afsluitende gyttja-laag in de Noord-raai heeft een duidelijk effect op de maximale waterspanning die kan ontstaan.

De BAT-sensoren ondersteunen de interpretatie van de meetresultaten van de anderen sensoren, aangezien ze direct informatie geven over het bezwijkmechanisme in de dijk: macroinstabiliteit door verhoogde waterspanning. De resultaten kunnen in dit stadium nog onvoldoende worden gebruikt om de BAT-sensoren als waarschuwingssysteem te gebruiken.

Liquid Levelling sensor

De zakkingstrengen nemen alle activiteiten rondom de dijk waar, maar de eerste activiteiten zijn nog geen waarschuwing dat de dijk het gaat bezwijken, althans voor de Noord en de Zuid raai. De midden raai is duidelijk wel continu aan het zakken.

Wat de normale fluctuaties van de LLS kunnen zijn in een stabiele dijk, of een dijk met verkeer, moet nader worden onderzocht. De fluctuaties in de metingen ten tijde van activiteiten geven aan dat de sensoren waarschijnlijk gevoelig zijn voor bijvoorbeeld het bouwverkeer, de kraan, en daarmee in een praktijk situatie voor gewoon verkeer.

Het kan mogelijk zijn om per sensor en per locatie een drempelwaarde vast te stellen, op basis waarvan een waarschuwingssysteem een geautomatiseerd alarm zou moeten laten afgaan. Een methode kan zijn:

- bereken de gemiddelde zakking van de voorgaande 3 uur (om de fluctuatie tussen de individuele metingen als gevolg van lokale bedrijvigheid eruit te filteren);
- bereken het verschil in zakking over een dag (om een trend in de zakking te bepalen);
- wanneer dit verschil groter is dan 5 mm is er sprake van een substantiële continue zakking.

	kwartier fluctuatie midden raai	fluctuatie per uur midden raai	fluctuatie per 3 uur midden raai	fluctuatie per 3 uur Noord raai	fluctuatie per 3 uur Zuid raai
min	-9,00	-1,91	-0,52	-0,42	-0,25
max	8,32	2,49	1,16	0,76	0,30
gem	0,23	0,23	0,23	0,04	0,02

Tabel 4.1: overzicht indicatiewaarde LLS

Met deze analyse zou de LLS zakkingstreng op de volgende tijdstippen een waarschuwing hebben laten afgaan: Midden op 25/09/08 om 01:00, Noord op 26/09/08 om 17:30 en Zuid op 27/09/08 om 13:00.

Zakkingstreng

De resultaten van deze proef zijn onbetrouwbaar. Er heeft waarschijnlijk een luchtbel in de slang gezeten, welke bij aanvang van het experiment niet was geconstateerd en derhalve niet kon worden gerepareerd.

5.9.8.3. Vergelijking met sensoren andere meetpartijen

Door een aantal meetpartijen zijn metingen verricht die vergelijkbare grootheden meten:

- zakking: bewegingen van de containers in vergelijking met de LLS;
- inclinatie en verplaatsing: SAAF met IP en II;
- inclinatie en verplaatsing: Geobeads met IP en II;
- waterspanning: referentiemonitoring met BAT-sensor.

De huidige data die voorhanden is, de GEF-bestanden, zijn nog niet in detail geanalyseerd. Uit de presentaties van de verschillende partijen blijkt wel dat:

- de tijdstippen waarop de belangrijkste bewegingen in gang zijn gezet door de meetpartijen op 1 tot 1,5 dag voor bezwijken liggen;
- het afglijdingsvlak ook door de SAAF-sensoren wordt waargenomen;
- opbouw en ontlasting van waterspanning is vergelijkbaar tussen BAT-sensor en referentiemonitoring.

5.9.8.4. Inzetbaarheid IS-systeem

In de voorgaande hoofdstukken zijn de individuele resultaten van de sensoren besproken. Deze kunnen op hoofdlijnen als volgt worden samengevat:

- De sensoren zijn zeer gevoelig. Activiteiten rondom de dijk, zoals het graven van de sloot, wordt geregistreerd en het effect op de stabiliteit van de dijk is veelal direct meetbaar door een toename van de verzakking. Dit is met name het geval in de midden raai en minder in de Noord raai. Deze gevoeligheid kan ook een probleem zijn bij de inzet van de sensoren rondom wegen. Dit moet nader worden onderzocht in een praktijkproef.
- De eerste tekenen voor het uiteindelijke bezwijken van de dijk, herkenbare knikpunten in de trendlijnen, worden 2,5 dag van te voren waargenomen. Op 1,5 dag voor bezwijken is wederom een knikpunt waarneembaar, welke doorzet tot het uiteindelijke bezwijken. De meetreeksen kunnen worden vertaald naar rekenformules voor een waarschuwingssysteem.
- De ruimtelijke invloedssfeer van de individuele sensoren is beperkt. De sensoren zijn vooral in te zetten in dijksegmenten waarvan bekend is dat deze instabiel zouden kunnen zijn.

5.10 Deexperiment Inventec B.V. / Ten Cate

5.10.1 Instrumentatie

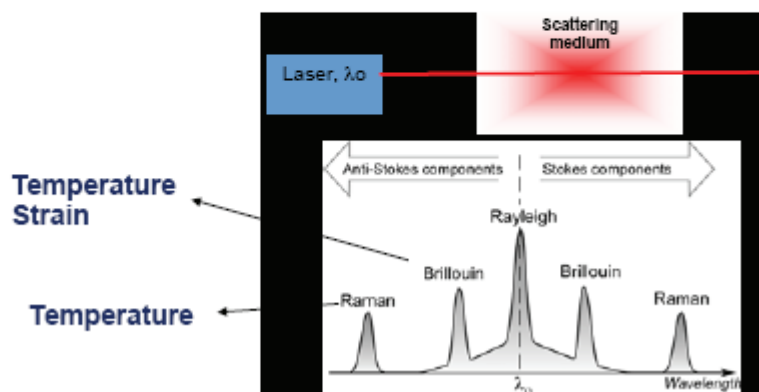
Voor het experiment is Geodetect toegepast, een doorlatend geotextiel met geïntegreerde optische glasfibers. In totaal werden vier stroken Geodetect op verschillende hoogten over de lengte van de dijk aangebracht.

Een uitleesunit stuurt continu een lichtpuls door de fibers. Het door de fibers terugverstrooide licht (Stimulated Brillouin effect) wordt door de uitleesunit geanalyseerd. Als op enig punt langs de fiber rek of verkorting optreedt, verschuift de zogenaamde Brillouin shift (zie figuur 5.10.1).

Geotextile filter including Fiber Optic Sensors (FOS)

Parameters measured :

- Strain : stability, sliding, settlement
- Temperature : leaks and internal erosion



Figuur 5.10.1 Meetprincipe Geodetect-systeem.

De uitleesunit (zie figuur 5.10.2) vertaalt de Brillouin shift naar de daadwerkelijke lengteverandering van de fiber en geeft ook precies aan op welke locatie langs de fiber dit optreedt. Door op deze wijze continu en real-time elk 0,50m van de fiber uit te lezen ontstaat het volledige integrale / gedistribueerde lengteverandering over de gehele lengte van de fiber en dus het deformatiegedrag van de dijk waarin de fiber is aangebracht.



Figuur 5.10.2 Uitleesunit Geodetect

Als de dijk op een bepaalde plek (meer) vervormt, wordt de glasfiber daar (meer) uitgerekt wat onmiddellijk zichtbaar is als een piek in de uitlezing.

Het geotextiel waarin de glasfibers geïntegreerd zijn bevordert een goede verankering met de omliggende grond en daarmee een goede overbrenging van de beweging van de grond naar het eigenlijke meetelement (sensor): de optische glasfiber.

Voor het macrostabiliteitsexperiment werd automatisch elke 30 minuten een uitlezing over de gehele geïnstalleerde fiberlengte gedaan.

Calibratie is voor dit systeem niet vereist: de metingen zijn relatief ten opzichte van de nulmeting bij de start van de metingen. Bovendien treedt in de tijd geen "drift" op bij de hier toegepaste optische glasfibertechnologie.

De nauwkeurigheid van de voor het experiment toegepaste uitvoering van de uitleesunit was:

- relatieve rek in de fiber: minder dan 0,01%
- plaatsbepaling (spatial resolution): 1,00m

5.10.2 Installatie

In totaal werden vier Geodetect strips in de dijk aangebracht en wel op de volgende locaties in de dijkdoorsnede aan de landzijde:

- Aan de teen van de dijk op het grensvlak van het zandlichaam en de kleibekleding (zie figuur 5.10.3);
- Halverwege het talud op het grensvlak zand/klei (zie figuur 5.10.4);
- Op de kruin van de dijk aan de landzijde, eveneens op het grensvlak zand/klei (zie figuur 5.10.5);
- Op het maaiveld, net vóór de teen van de dijk. Deze strip werd afgedekt met een 0,3m dikke zandlaag (zie figuur 5.10.6).

Alle ongeveer 0,4m brede Geodetect stroken liepen over de volledige 100m dijk lengte. Nadat alle strips waren aangebracht werden ze door middel van veldlassen met elkaar doorverbonden zodat ze als één loop op de uitleesunit konden worden aangesloten.

TenCate HydroDetect : T0002GFP (Toe)



Figuur 5.10.3 Installatie van de eerste Geodetect-strip in de teen van de dijk.

TenCate HydroDetect : T0003GFP (Middle)



Figuur 5.10.4 Installatie van de tweede Geodetect-strip langs het binnentalud van de dijk.

TenCate HydroDetect : T0004GFP (Top)



Figuur 5.10.5 Installatie van de derde Geodetect-strip op de zandkern, onder de kruin van de dijk.

TenCate HydroDetect : T0001GFP (Field)



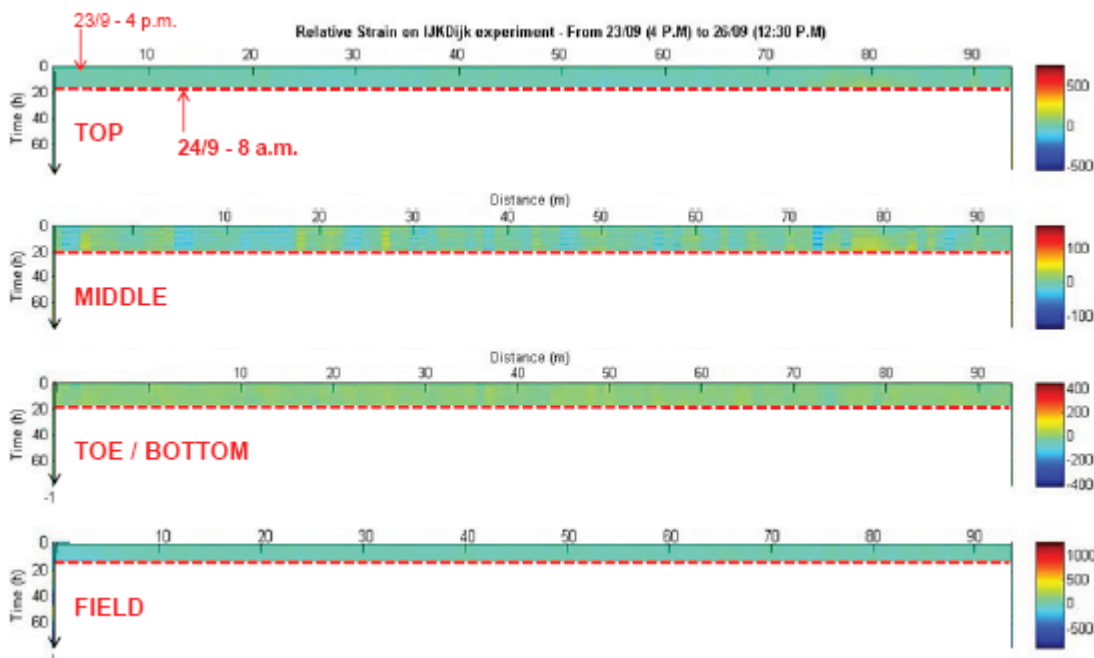
Figuur 5.10.6 Installatie van de vierde Geodetect-strip op de berm, aan de rand van de tijdens de proef te graven sloot (onderaan de dijk).



Figuur 5.10.7 Stabiliteitsdijk met indicatie van de locatie van alle strips.

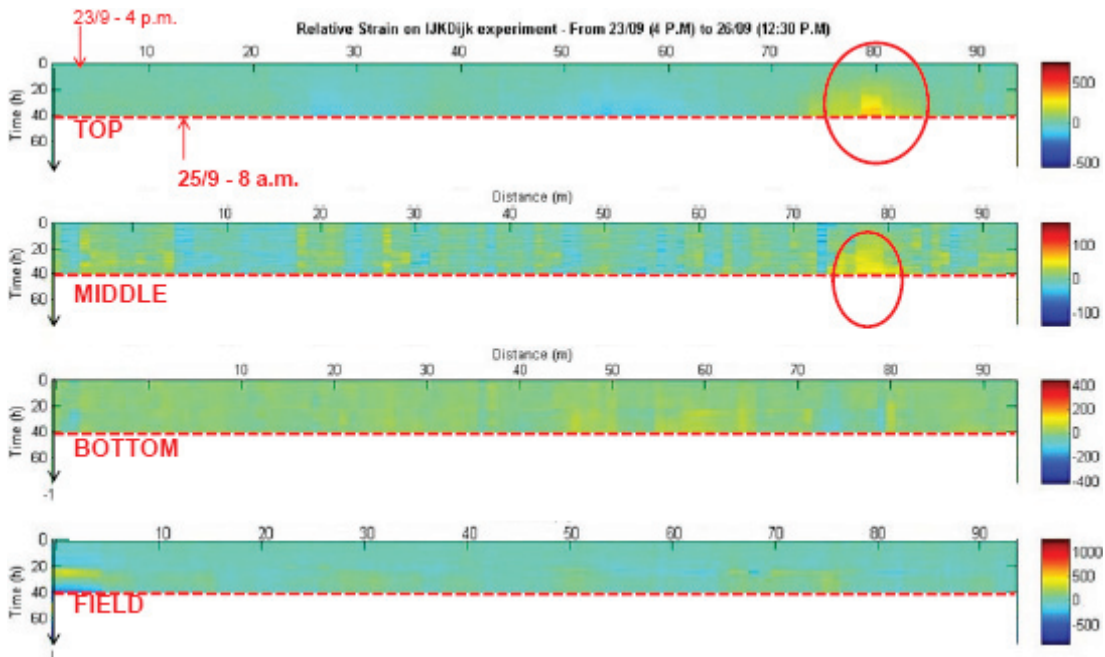
5.11.3 Meetresultaten

De metingen zijn gestart op dinsdag 23 september 16:00 uur. Na 16 uur waren er geen significante vervormingen, zie figuur 5.10.8.



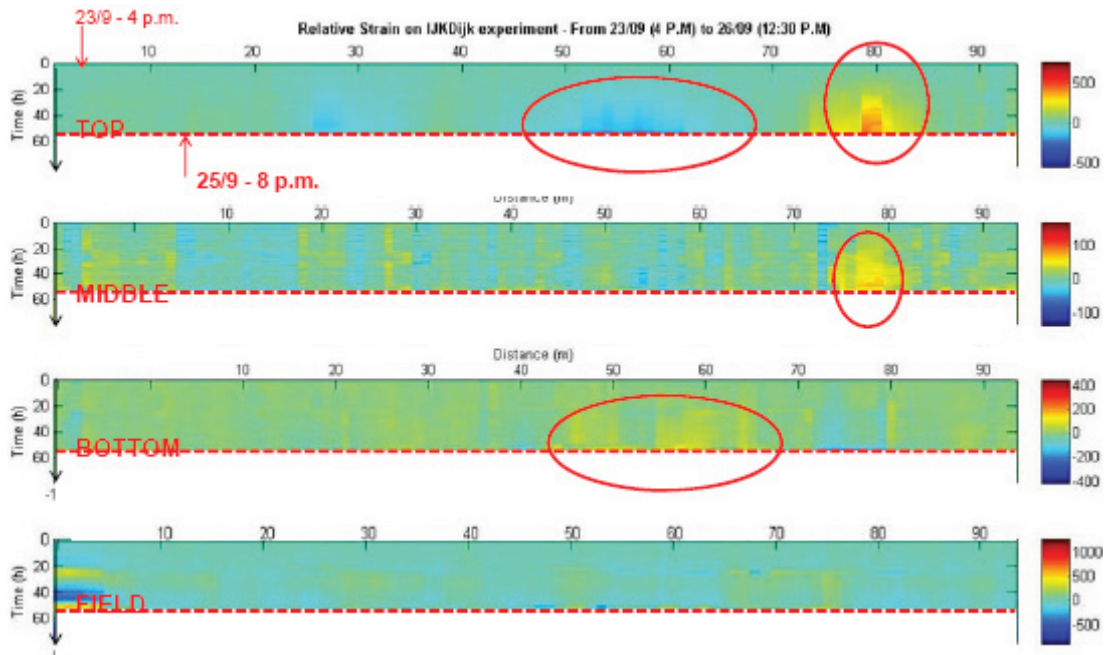
Figuur 5.10.8 Rekken in Geodetect-strips tot 24 september 8:00 uur.

Al kort voor de start van het experiment, op donderdag 25 september om 8:00 uur werd een toename van relatieve rek waargenomen in de strip in de kruin van de dijk (0,03%) en de strip halverwege het dijktalud (0,05%), zie figuur 5.10.9. Dit indiceerde het optreden van vervorming respectievelijk scheurvorming op een afstand van ongeveer 20 meter vanaf het noordelijke uiteinde van de dijk. Dit moet worden toegeschreven aan vertraagde vervormingen door consolidatie en kruip naar aanleiding van de plaatsing van de tweede rij containers en, vooral, de bouw van de dijk.



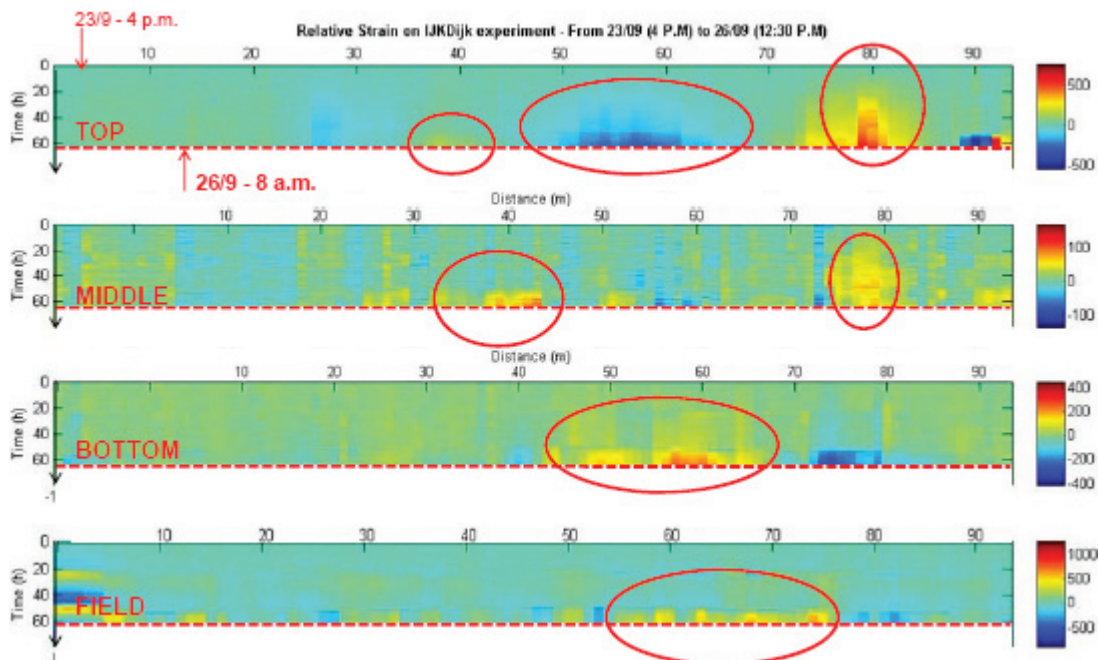
Figuur 5.10.9 Rekken in Geodetect-strips tot 25 september 8:00 uur.

Twaalf uur later, op donderdag 25 september om 20:00 uur, is de maximale rek verder toegenomen, zie figuur 5.10.10.



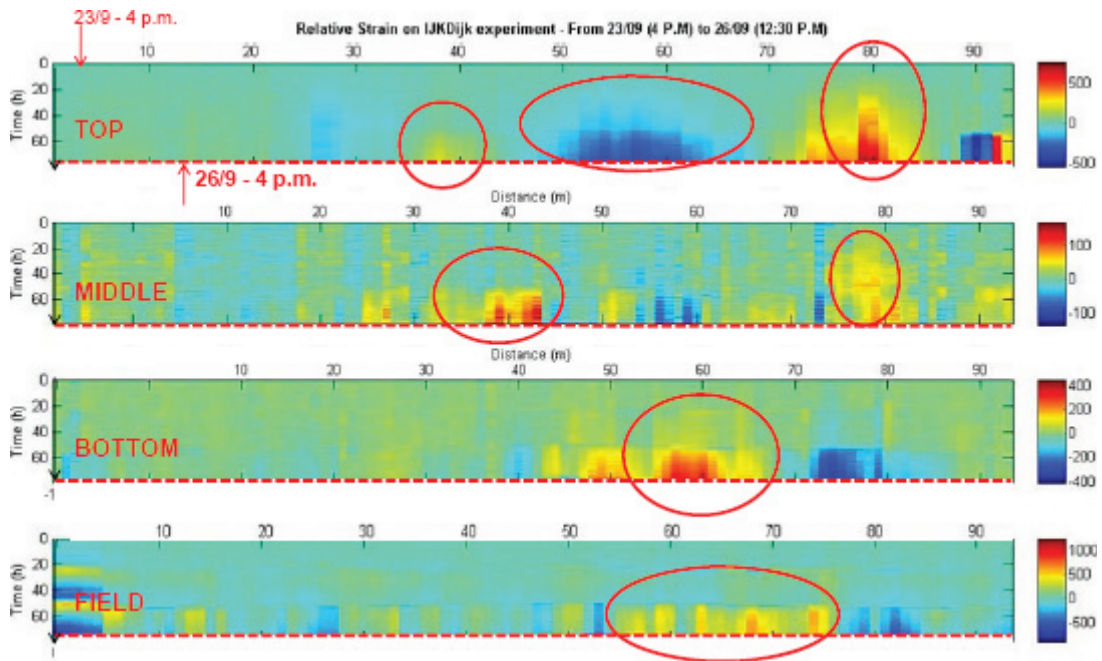
Figuur 5.10.10 Rekken in Geodetect-strips tot 25 september 20:00 uur.

Nog eens twaalf uur later, op vrijdag 26 september om 8:00 uur, is de deformatie op die plek al dermate toegenomen dat deze door alle vier Geodetect strips wordt waargenomen. Bovendien wordt tegelijkertijd 40 meter verderop een tweede scheurvorming waargenomen, zie figuur 5.10.11.

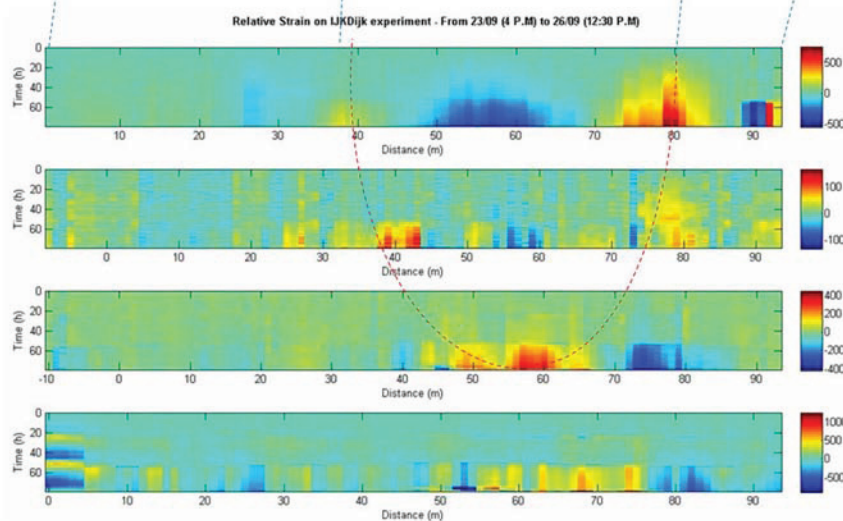


Figuur 5.10.11 Rekken in Geodetect-strips tot 26 september 8:00 uur.

Om 16.00 uur op vrijdag 26 september is duidelijk zichtbaar waar de dijk moet en zal bezwijken (zie figuur 5.10.12), dat wil zeggen zo'n 24 uur voordat de dijk daadwerkelijk op die plek bezweek (zie figuur 5.10.13). Bij stom toeval liep de meetcomputer toen echter vast, hetgeen pas na afloop van de proef werd opgemerkt, waardoor metingen van de laatste 24 uur ontbreken. Geconcludeerd kan worden dat het Geodetect-systeem de uiteindelijke zwakke plek in de dijk al betrekkelijk lang van tevoren heeft gedetecteerd en daarom beslist geschikt is om als early warning systeem te worden ingezet.



Figuur 5.10.12 Rekken in Geodetect-strips tot 26 september 16:00 uur.



Figuur 5.10.13 Relatie tussen Geodetect-metingen en werkelijkheid.

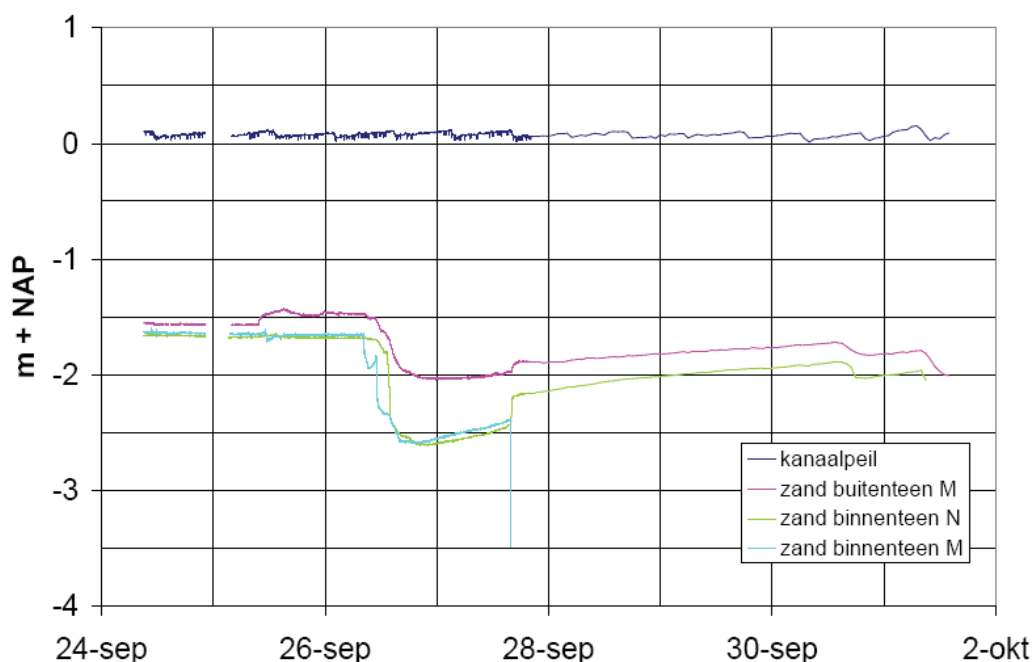
5.11 Referentiemonitoring Deltares

Voor de referentiemonitoring geldt bij uitstek dat de details te vinden zijn in de bijlagen, met name in deel 6 van de rapportenreeks van Deltares.

5.11.1 Waterspanningsmetingen

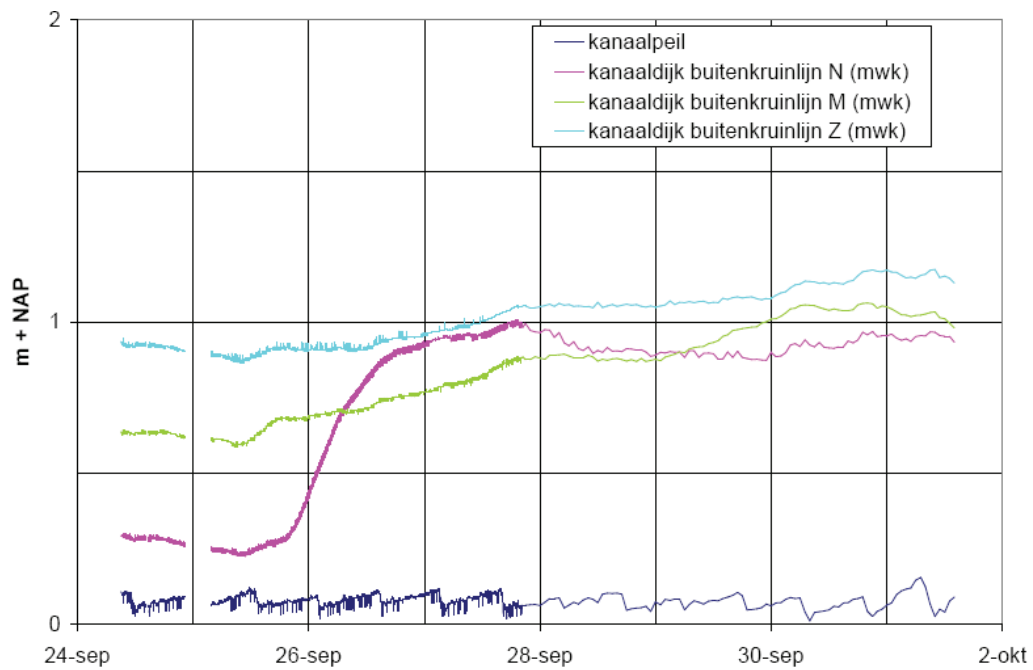
In deze paragraaf wordt een selectie weergegeven van de metingen met waterspanningsmeters en peilbuizen. Hierbij wordt meestal de meting getoond van de hele proefperiode vanaf woensdag 24 september tot het einde van de metingen, in enkele gevallen van een kleinere tijdsperiode. De metingen met de instrumenten die nog functioneerden na het optreden van de afschuiving zijn gestopt in de middag van 2 oktober.

Figuur 5.11.1 toont de gemeten stijghoogte in de zandlaag onder het dijklichaam en het kanaalpeil. De grafiek laat zien dat tijdens het ontgraven de stijghoogte in de zandlaag ter hoogte van de peilbuizen afneemt. De ontgraving bereikt in de loop van vrijdag 26 september de zandlaag. Hoewel de hoeveelheid water dat de ontgraving instroomt beperkt is, leidt dit tot een duidelijke daling van de stijghoogte in de zandlaag.

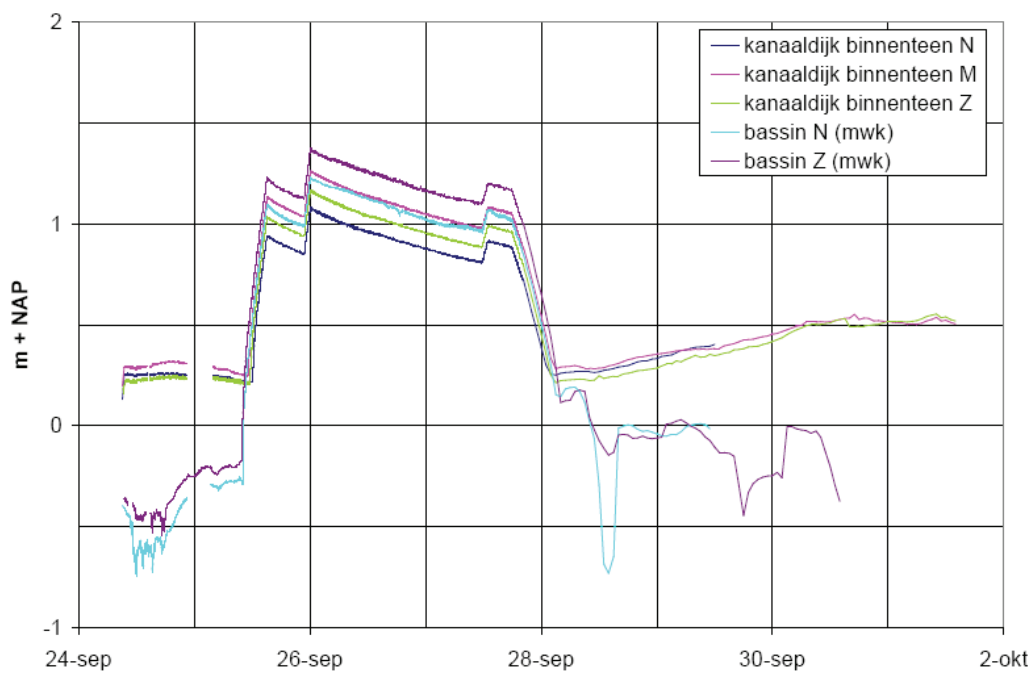


Figuur 5.11.1 Stijghoogte in zandlaag onder dijklichaam.

Figuren 5.11.2 en 5.11.3 tonen de gemeten stijghoogten in de kanaaldijk, waterbassin en kanaal. De gemeten stijghoogten aan de binnenzijde van de kanaaldijk lopen op met het vullen van het waterbassin, zie figuur 5.11.3. Als gevolg van lekkage loopt het bassin geleidelijk leeg. Het bassin is tijdens de proef tweemaal bijgevuld. Dit leidt tot het zaagtand-verloop. De stijghoogten in de buitenzijde van de kanaaldijk lopen geleidelijk op gedurende proef. Dit geldt met name aan de noordzijde.

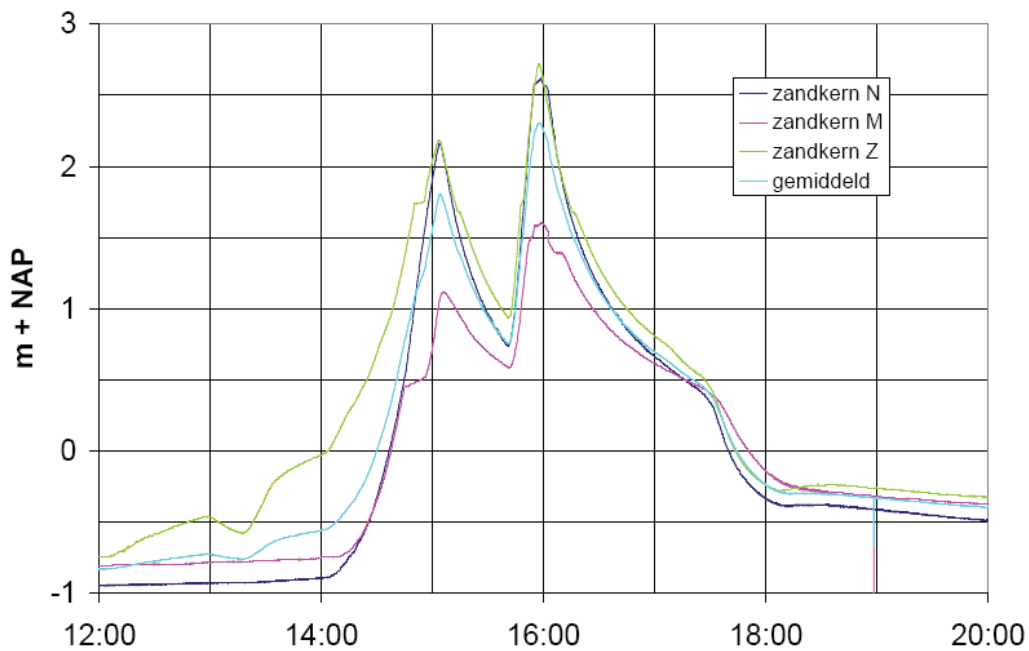


Figuur 5.11.2 Peilen in kanaal en kanaaldijk buitenzijde.



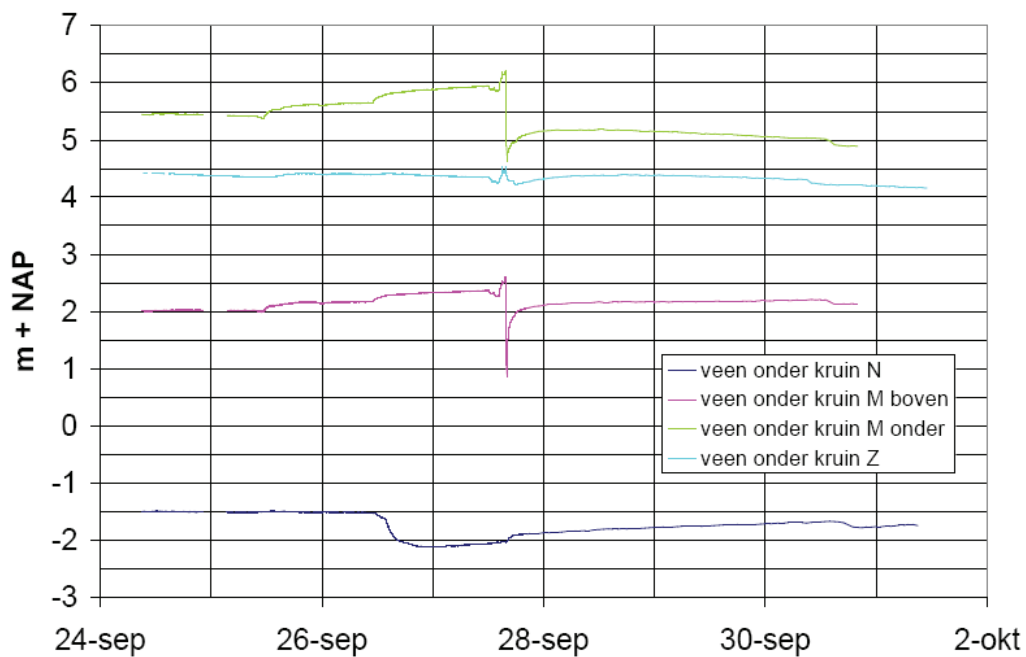
Figuur 5.11.3 Peilen in kanaaldijk binnenzijde en bassin.

Figuur 5.11.4 toont de gemeten waterdrukken in de zandkern tijdens de laatste fase van de proef. Tijdens het vullen neemt de stijghoogte aan de zuidzijde sneller toe dan aan de noordzijde. Vanaf de zuidzijde wordt het water ingepompt. Zichtbaar is dat eerst met een klein debiet vanuit de onderste Luisterbuis wordt gevuld. Later, vanaf 14:00 uur wordt ook via het vulsysteem gevuld en kan een groter debiet worden toegepast. De waterdrukken nemen dan ook sneller toe. Rond 15:00 uur is gestopt met vullen om de waterspanningen te laten nivelleren, waarna het vullen is hervat tot kort voor het moment waarop bezwijken optrad.



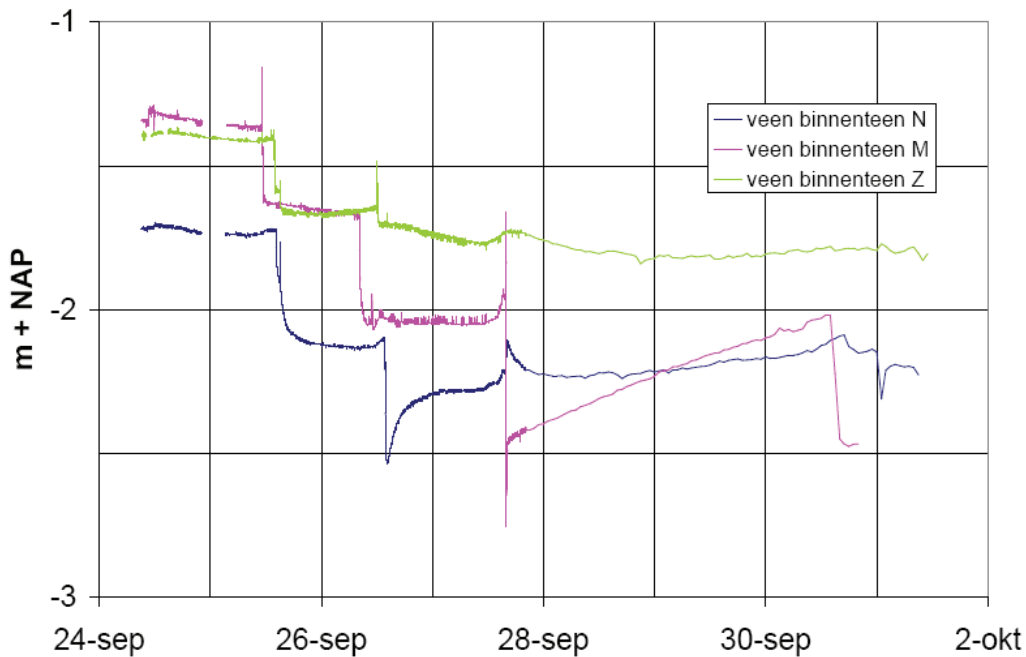
Figuur 5.11.4 Gemeten waterdrukken in de zandkern van de proefdijk op 27 september 2008.

Figuur 5.11.5 toont de stijghoogte in de veenlaag onder de proefdijk. Zichtbaar is dat aan de noordzijde de stijghoogte wordt beïnvloed door het graven van de sloot. Immers tijdens het graven van de sloot neemt de stijghoogte af. In de midden- en zuidraai zijn de waterspanningen de waterspanningen hoog. De stijghoogte gemeten in de middenraai toont een duidelijke sprong tijdens bezwijken. Deze meters stonden in de nabijheid van het glijvlak. Met het starten van het vullen van de zandkern gingen drainagebuizen lopen. Dit is zichtbaar in een geringe verlaging van de stijghoogte in de veenlaag ter plaatse van de midden- en zuidraai.



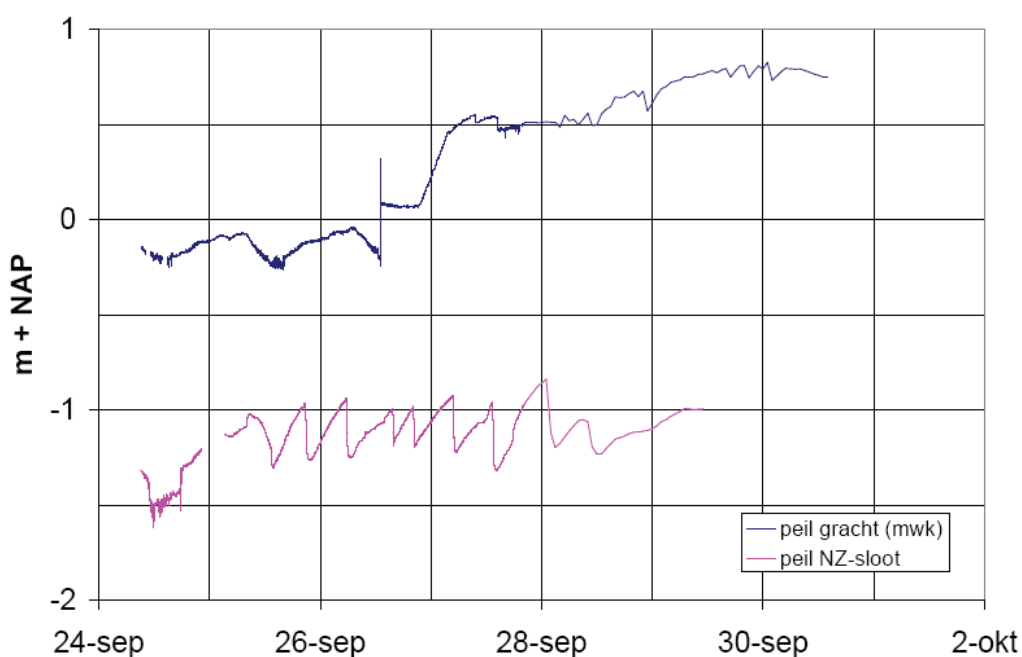
Figuur 5.11.5 Waterspanningen in de veenlaag onder de kruin van de dijk.

Figuur 5.11.6 toont de stijghoogten in de veenlaag aan de binnenteen van de proefdijk. In deze metingen zijn de graafwerkzaamheden te herkennen in de gemeten afname van de gemeten stijghoogte.



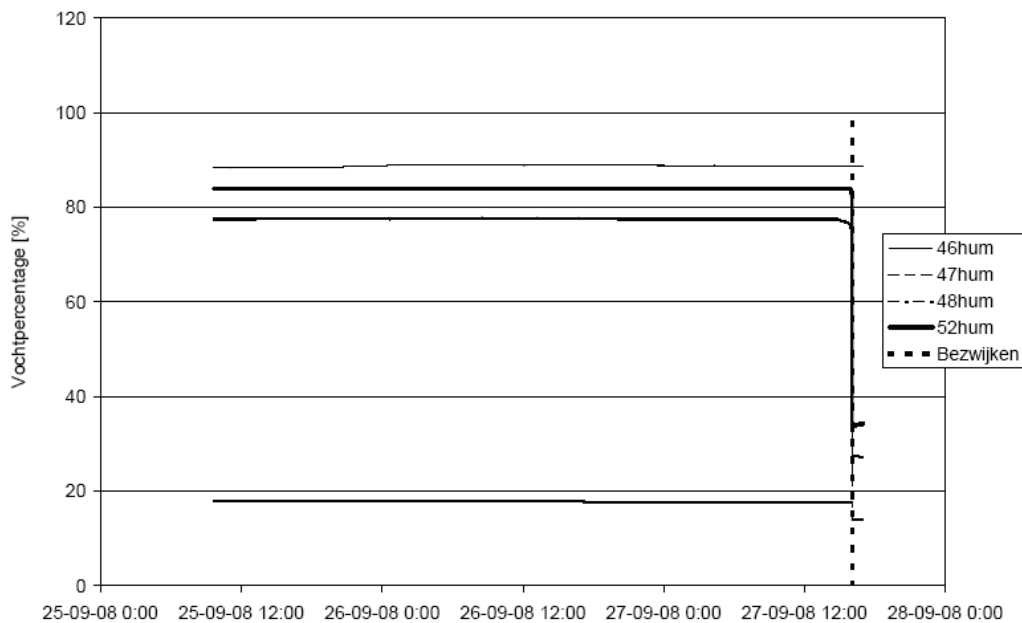
Figuur 5.11.6 Waterspanningen in de veenlaag nabij de teen van de dijk.

Figuur 5.11.7 toont de gemeten waterstand in de ontgraving, hier gracht genaamd. Omdat de opnemer later is geplaatst, is de exacte hoogte niet beschikbaar en is hier alleen de stijghoogte in meter waterkolom gepresenteerd. De opnemer is in de loop van vrijdag 26 september geplaatst. Sinds plaatsen is de waterstand in de ontgraving met ca 1 m toegenomen. Daarnaast geeft deze figuur de gemeten stijghoogte in de noord-zuidsloot. Deze sloot werd gebuikt om het kwelwater uit het waterbassin op te vangen en af te voeren. Het water werd van uit de sloot over de omringdijk gepompt. Hiertoe is met enige regelmaat een pomp aangezet om de waterstand te verlagen, waarna de sloot weer geleidelijk aan volliep. Hierdoor ontstond het gemeten zaagtand-verloop.



Figuur 5.11.7 Oppervlaktepeilen in het proefterrein.

Figuur 5.11.8 toont de gemeten verzadigingsgraad in het dijklichaam in de middenraai. Aan de noord- en zuidzijde is weinig verandering gemeten. In de klei varieert de verzadigingsgraad van 75 tot 88%. In de zandkern varieert deze tussen de 17 en 24%. In de middenraai is zowel in de zandkern als in de kleiafdekking een sterke afname van de verzadigingsgraad zichtbaar. De afname treedt op het moment van de afschuiving op, waarschijnlijk ten gevolge van blootstelling aan de buitenlucht ten gevolge van scheurvorming.



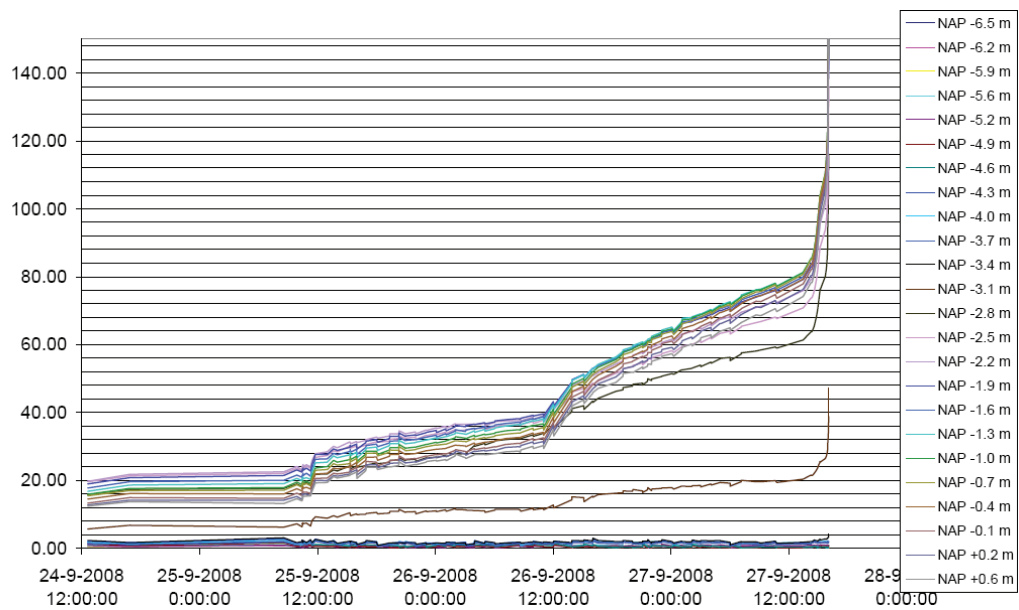
Figuur 5.11.8 Verzadigingsgraad middenraai.

5.11.2 Hellingmetingen

Tijdens de aanleg van het dijklichaam zijn reeds enige horizontale verplaatsingen opgetreden. Hierdoor is bij aanvang van de proef de horizontale verplaatsing 5 à 6 mm. De hellingmeters zijn geplaatst op ca 1/3 van het talud. De exacte locatie is in deel 5 van de rapportenreeks van Deltares gepresenteerd. Voor elk van de drie metingen is de overgang van het zand, waar weinig vervorming is opgetreden, naar de veenlaag waar een grote vervorming is opgetreden goed zichtbaar.

De maximale horizontale verplaatsing tijdens de proef is aan de noord- en zuidzijde beperkt gebleven tot ca 3 cm. In de middenraai is een maximale gemeten verplaatsing van 3,8 m. De maximaal opgetreden horizontale verplaatsing is buiten de meetraai opgetreden en is ca 5 m.

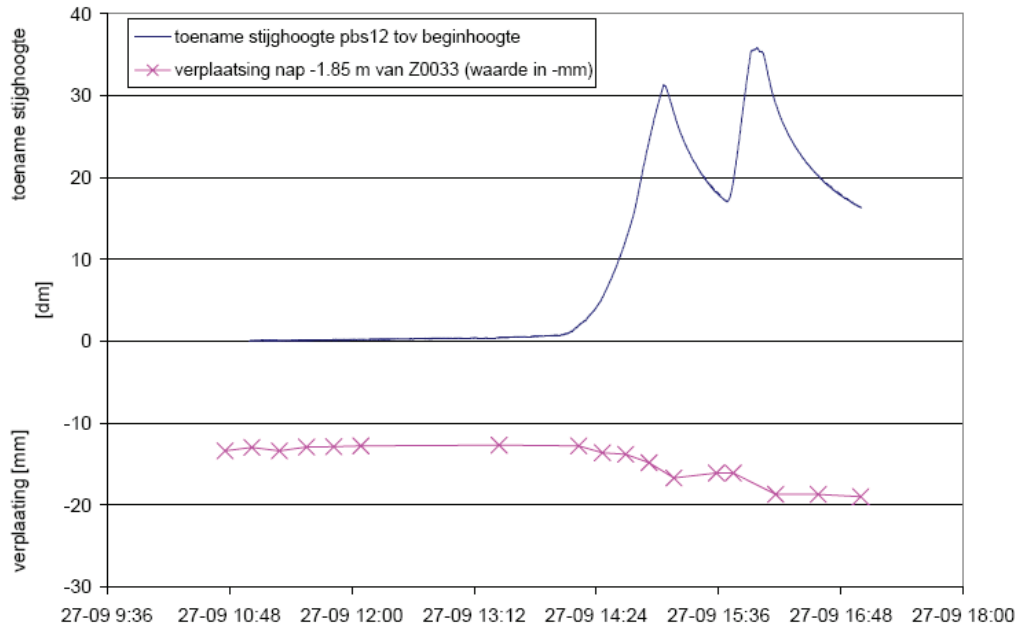
Figuur 5.11.9 toont het verloop van de horizontale verplaatsingen op verschillende diepten in de ondergrond ter hoogte van de middenraai. In de zandlaag zijn nauwelijks horizontale verplaatsingen waargenomen. Dit zijn de horizontale lijnen aan de onderzijde van de grafiek. In de veenlaag zijn grotere vervormingen opgetreden. Zichtbaar is dat vanaf de start van de ontgraving zich horizontale verplaatsingen ontwikkelen. De horizontale verplaatsingen die ontstaan na de ondiepe ontgraving lijken voor de start van de volgende fase weer tot rust te zijn gekomen. Na het uitvoeren van de ondiepe ontgraving versnellen de verplaatsingen zich en lijken niet meer tot rust te komen voordat de volgende fase start.



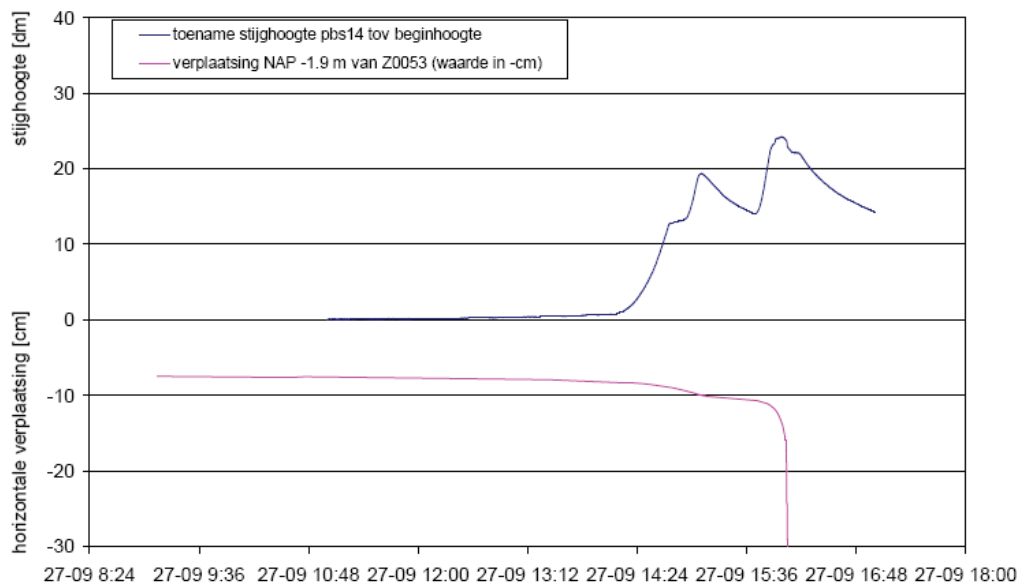
Figuur 5.11.9 Horizontale verplaatsingen (in mm) in de middenraai.

Bij de start van de vierde fase, het vullen van de zandkern, treedt een grote versnelling van de horizontale verplaatsingen op.

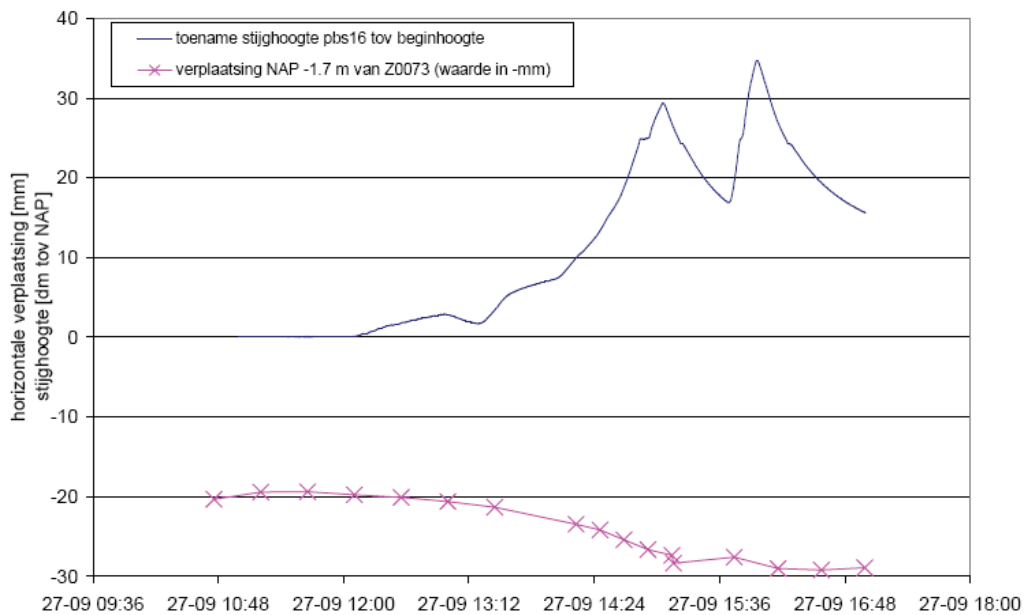
Figuren 5.11.10 t/m 5.11.12 geven een indruk van de relatie tussen het vullen van de zandkern en het optreden van de horizontale verplaatsingen. Voor alle drie de meetraaien is zichtbaar dat tijdens het tussentijds stoppen van het vullen van de zandkern om 15:00 uur de vervormingsnelheid sterk afneemt. Na het hervatten van het vullen neemt de vervormingsnelheid in de middenraai dramatisch toe tot bezwijken optreedt.



Figuur 5.11.10 Stijghoogte in zandkern en horizontale verplaatsing t.p.v. noordraai.



Figuur 5.11.11 Stijghoogte in zandkern en horizontale verplaatsing t.p.v. middenraai.



Figuur 5.11.12 Stijghoogte in zandkern en horizontale verplaatsing t.p.v. zuidraai.

5.11.3 Metingen weerstation

Op de locatie zijn vooraf en tijdens uitvoering van de proef weerkundige metingen uitgevoerd. Gemeten zijn de stralingsintensiteit, windsnelheid en windrichting, temperatuur, luchtvochtigheid en neerslag. De metingen zijn gemiddeld over een periode van 5 minuten. Behalve een gemiddelde waarde zijn ook de maximale en minimale waarde in deze periode van 5 minuten gemeten.

Het weer tijdens de uitvoering van de proef kan worden gekarakteriseerd als rustig nazomerweer. De windsnelheden waren gering. De windrichting draaide van oost bij aanvang van de proef naar het zuidwesten. Vanaf vrijdag begonnen de ochtenden met mist, die mede door de geringe wind pas aan het einde van de ochtend optrok. Nadat de mist was opgetrokken was het zicht goed en lucht onbewolkt, zoals ook blijkt uit de stralingsintensiteitsmetingen. De neerslag gedurende de proef was verwaarloosbaar. Na afloop van de proef kwam er een weersverandering. Op 28 september, de dag na de proef, was de stralingsintensiteit lager, er was bewolking, de dagtemperatuur was lager, het gemeten luchtvochtigheidspatroon veranderde en er viel 's middags enige neerslag. Maandag 29 september was het weer omgeslagen met harde zuidwestenwind en regelmatig flinke regen.

Het weer heeft de uitvoering van de proeven beïnvloed door de dichte ochtendmist. Hierdoor is start van zowel fase 3 als 4 uitgesteld. Anderzijds was het een geluk dat de proef al voorbij was voordat het weer omsloeg, omdat dit de uitvoering van de proef beslist zou hebben gehinderd.

6. Conclusies en discussie

In deze paragraaf worden de samenvattende conclusies beschreven en worden de metingen ten opzichte van elkaar bediscussieerd. De resultaten worden besproken aan de hand van de diverse gemeten parameters, te weten beweging, trillingen, temperatuur, vochtigheid en waterspanning.

6.1 Conclusies per gemeten parameter

Beweging

Beweging is verreweg de meest gedetecteerde parameter. Twee meetpartijen hebben gebruik gemaakt van MEMS (Micro Electronical Mechanical Sensors). Daarnaast zijn diverse optische systemen toegepast zoals glasvezel, laserscan en video-opnames, alsmede inverted pendulum en liquid level methodes.

Beweging en deformatie lijken cruciale en significante parameters te zijn die ver voor het bezwijken al indicatief zijn voor zwakke plekken. De deformatie van de dijk is met de lasermethodiek significant waarneembaar vanaf een grootte van 1 cm. Deformatie trad reeds 42 uur voor het uiteindelijke bezwijken op, en was ook gelokaliseerd op de plek van het uiteindelijke bezwijken. Dit tijdstip van 42 uur voor bezwijken wordt bevestigd door de resultaten van visuele inspectie, de metingen van RPS-BCC/IFCO en de rekmetingen van Ten Cate. De rekmetingen geven al vanaf dag 1 een indicatie van de plaats van de uiteindelijke afschuiving. De GeoBeads geven een fractie eerder al bewegingen te zien, met name in de diepere lagen. Dit wordt bevestigd door de referentiemonitoring door middel van de SAAF's. Ook daar bewegen de onderste lagen eerder dan de hoger gelegen lagen. Het lijkt er dan ook sterk op dat de afschuiving in de onderste lagen is begonnen.

Dike Survey constateert een soort "ademen" van de dijk, dat wil zeggen langzame fluctuerende bewegingen van één à twee centimeter, ieder etmaal. Een trendbreuk in deze bewegingen is te constateren ongeveer twee en een half uur voor het bezwijken. Ook Koenders Instruments rapporteert een trendbreuk in de detectie van bewegingen ongeveer twee uur voor het bezwijken. Tot slot geven de liquid level metingen in de middenraai geleidelijke zakkingen tot maximaal 22,7 centimeter tot 2 minuten voor bezwijken.

Overigens kan geconcludeerd worden dat het beoogde doel met betrekking tot beweging, namelijk ten minste 20 centimeter vervorming langs een diep glijvlak, bij deze proef wel geslaagd is.

Trillingen

Trillingen zijn gemeten door twee partijen, het Luisterbuis consortium en Dike Survey.

Het Luisterbuis consortium heeft meerdere typen akoestische metingen gedaan (droge microfoons, hydrofoons en glasvezelmicrofoons). De analyse van de resultaten heeft echter een tijd stilgelegen, waardoor de correlaties met het bezwijken nog niet zijn vastgesteld.

Dike Survey rapporteert een soort grondtoon van 1,81 Hz die regelmatig wordt gemeten en lijkt op een soort "eigenfrequentie" van de grond. Deze grondtoon treedt meestal op voorafgaande aan bewegingen van het dijklichaam.

Correlaties met de resultaten van de akoestische metingen van TNO moeten nog uitwijzen in hoeverre er een relatie is met bijvoorbeeld grondverzet.

Temperatuur

Temperatuurmetingen zijn gedaan met behulp van glasvezel (GTC Kappelmeijer), GeoBeads (Alert Solutions) en thermografische camera's (Intech).

GTC Kappelmeijer meet ongeveer anderhalf uur voor het bezwijken een temperatuursverandering. Deze is ook geconstateerd door de GeoBeads van Alert Solutions. Ook Intech registreert een temperatuursverandering die aangeeft dat het dijklichaam wordt gevuld.

Behalve het constateren dat de zandkern gevuld raakt met water lijkt er bij geen van de metingen een duidelijke relatie te zijn tussen het temperatuurverloop en het bezwijken van de dijk.

Vochtigheid

Vochtmetingen zijn gedaan door Alert Solutions (GeoBeads), het Flood Control consortium en Deltares (als onderdeel van de referentiemonitoring). De vochtmetingen geven geen van alle afwijkingen te zien van de te verwachten waarden, bijvoorbeeld droger worden als gevolg van plotselinge blootstelling aan de lucht direct na het bezwijken van de dijk.

Waterspanningen

De waterspanningen zijn gemeten door Alert Solutions (GeoBeads), Koenders Instruments en Deltares (als onderdeel van de referentiemonitoring). Daarnaast zijn de drukmetingen die Landustrie heeft gedaan tijdens het volpompen van de dijk eveneens relevant.

Ook de waterspanningsmetingen geven min of meer de te verwachten ontwikkelingen weer, zoals het toenemen van de waterspanning bij het volpompen van de zandkern. Een uitzondering is de sterke stijging die enkele GeoBeads meten aan de zuidkant bij het volpompen. Daar wordt op maaiveldniveau een waterspanning gemeten van 4 meter waterdruk, terwijl bij de metingen op 3 en 4 meter hoogte de waterspanning nog vrijwel nul is. Dit inhomogeen beeld wordt overigens min of meer bevestigd door de referentiemonitoring en de drukmetingen van Landustrie. Dit komt waarschijnlijk door de doorlatendheid van de zandkern, die ten eerste niet oneindig groot is (zoals veelal impliciet wel wordt aangenomen) en ten tweede niet overal hetzelfde is.

Een andere afwijking is de zeer hoge waterspanning die wordt gemeten in de veenlaag onder het midden van de dijk, zowel in het midden als aan de zuidzijde (tot 6,5 meter wateroverspanning). Dit is het gevolg van de gewichtstoename van de dijk tijdens de bouw en de verdere belasting tijdens de proef, in combinatie met de beperkte doorlatendheid van deze laag en mogelijk ook de aanwezigheid van een zeer slechtdoorlatend Allerødlaagje onder een deel van het veen. Op basis van de resultaten van de ingelaste kleine veldproef in januari 2008 was dit niet verwacht. Deze hoge wateroverspanningen onder de dijk waren echter wel een belangrijke oorzaak van het betrekkelijk vroege bezwijken van de dijk.

6.2 Discussiepunten

Het experiment

- Vroegtijdige metingen kunnen zijn beïnvloed door zetting van de dijk
- De proef omvatte een relatief snelle opeenvolging van bijzondere gebeurtenissen die tot het bezwijken van de dijk hebben geleid. Deze gebeurtenissen zijn stuk voor stuk te vertalen naar de werkelijkheid van dijken onder extreme omstandigheden (zie paragraaf 4.2). De Stabiliteitsdijk was een relatief hoge, steile dijk op een relatief dun slappe-lagenpakket, die echter wel degelijk als representatief voor de Nederlandse situatie mag worden geacht.

De meetsystemen

Een aantal vragen is in de loop van het experiment opgekomen over de inzet van diverse meetsystemen voor waterkeringen. Deze zijn:

- Invasief versus non invasief meetsystemen oftewel remote sensing versus in situ. Wat zijn de criteria waarop een beheerder de afweging maakt voor het gebruik van al dan niet in de dijk te installeren technieken? Dit zou gerelateerd kunnen zijn aan de kwaliteit van de dijk, maar ook aan de omstandigheden rondom de dijk. Denk hierbij aan eigenschappen van het achterland en bijvoorbeeld de neiging tot opdrijven van het achterland. Ook speelt de afweging of bij historisch problematisch gebleken plekken, ook na versterking, bij een nieuw versterkingsproject inspectietechnologie zou kunnen worden geïnstalleerd.
- De kosteneffectiviteit van de meetsystemen moet in juiste verhouding staan tot het versterken van dijken. Hierbij moet worden gedacht aan 5 tot 15% van de kosten die het verbeteren of versterken van een dijk met zich meebrengt. Als de kosten hoger worden weegt het al gauw niet meer op tegen versterking van het betreffende dijkdeel.
- Indien meetsystemen worden geïnstalleerd in dijken, dienen deze uitermate duurzaam of eenvoudig te vervangen te zijn (glasvezel lijkt wat dat betreft goed te scoren, wat, nadrukkelijk vermeld, niets wil zeggen over de duurzaamheid van andere technologie)

6.3 Overall conclusies

Geotechnisch

- De afschuiving volgt vrij goed het verwachte patroon en was ook te voorspellen vanuit modelmatige berekeningen. Dit geldt zowel voor de berekeningen voor de uitvoeringsbegeleiding als voor de inzendingen voor de internationale predictiecompetitie, met name die inzendingen waaraan geotechnische berekeningen ten grondslag lagen
- Een aantal metingen wijst er op dat de afschuiving begonnen is in de ondergrond. Dit is bevestigd door de observaties van een ervaren geoloog bij het afgraven van een gedeelte van de afschuiving.

Meetsystemen

- De meetsystemen van de participanten geven circa twee dagen van te voren aan dat er een zwakke plek is. Verwacht wordt dat indien (actuele) stabiliteitsberekeningen zouden zijn uitgevoerd het bezwijken van de dijk had kunnen worden voorspeld.
- De belangrijkste parameter daarbij lijkt deformatie te zijn die op een groot aantal manieren is gemeten.
- Voor het verschijnsel macrostabiliteit lijken de parameters temperatuur en trillingen slechts indirect relevant. Overigens zijn dat parameters die bij het bezwijkmechanisme piping waarschijnlijk weer uiterst relevant zijn.
- De gegevens uit de verschillende meetsystemen ondersteunen elkaar zeer behoorlijk. Er zijn weinig onverklaarbare discrepanties geconstateerd.
- De in het experiment gevalideerde meetsystemen geven belangrijke aanvullende informatie over in de dijk optredende actuele processen.
- Het is nog te vroeg om aan te geven welke systemen superieur zijn. Daarbij zal rekening moeten worden gehouden met diverse criteria, bijvoorbeeld: hoeveel en welke parameters worden gemeten, met welke betrouwbaarheid, met welke levensduur, tegen welke kosten?

7. Toekomstblik

De resultaten van het gehele macrostabiliteitsexperiment laten zien dat de toegepaste sensoren elkaar ondersteunen in de metingen naar het vroegtijdig optreden van verzakking van de dijk. De bewezen toepasbaarheid van meetsensoren levert naar verwachting belangrijke aanvullende informatie over actuele processen in dijken die van invloed zijn op de sterkte van de waterkering. Hiermee kunnen beheerders aanvullend en in de nabije toekomst *real time* inzicht verkrijgen in actuele sterkte van keringen.

Dijkmonitoring in de praktijk zal in de toekomst vrijwel zeker bestaan uit een combinatie van methoden. Het ligt voor de hand om daarbij een getrapte benadering te kiezen. Met behulp van remote sensing technieken (satelliet, airborne of terrestrial) inzoomen op verdachte plekken en daar, naast visuele inspectie, werken met in situ sensoren (in de dijk).

Een monitoringssysteem dat voor waterkeringen geschikt is, dient over een langere periode gegevens te verzamelen om het "normale" gedrag van waterkeringen te leren kennen. Indien het gedrag bij belasting van de kering afwijkt, kan samen met gegevens over bijvoorbeeld weersvoorspelling, verwachte golfbelasting, etc. een voorspelling worden gemaakt van de ontwikkeling van de actuele sterkte. Hiermee kan de beheerder voor waterkeringen waarvoor deze informatie noodzakelijk is, op tijd maatregelen treffen indien de prognoses hiertoe aanleiding geven.

De ontwikkeling van systemen die de actuele sterkte kunnen bepalen samen met prognostische modellen vindt in de komende jaren plaats. Hierbij wordt nauwe samenwerking nagestreefd met beheerders, Flood Control 2015 en FLIWAS, bedrijfsleven en kennisinstellingen. Tevens wordt hierbij aansluiting gerealiseerd bij ontwikkelingen in en bij het vigerend beleid zoals daar zijn onder andere de commissie Veerman/Deltacommissie en (ontwerp) Nationaal Waterplan. Pilotprojecten waarbij sensorsystemen in de beheerpraktijk van waterbeheerders worden toegepast zullen een belangrijke rol innemen in de voorgestane ontwikkeling.

De ontwikkeling van dergelijke systemen kan niet worden gebaseerd op het macrostabiliteitsexperiment alleen. Het zal gepaard moeten gaan met verdergaande validatie van sensortechnologie voor andere faalmechanismen. Het doel is om uiteindelijk een voor alle type waterkeringen algemeen toepasbaar monitorings- en prognosesysteem te ontwikkelen. Hierbij dient de kennis die wordt opgedaan te worden gebruikt van projecten zoals LiveDijk (digitaal gemonitorde, gediagnosticeerde/geprognoseerde sterkte van dijken) die op korte termijn worden gerealiseerd. In verdere experimenten met de IJkdijk zal moeten worden vastgesteld wat de belangrijkste parameters zijn voor het voorspellen van dijkfalen, hoe die het beste kunnen worden gemeten en hoe dat tegen de laagste kosten kan worden gerealiseerd.

De vraag dient zich al gauw aan of alle waterkeringen in Nederland uitgerust zouden moeten worden met een monitoringssysteem. Het antwoord hierop is: nee. De meeste waterkeringen voldoen veruit aan de gestelde normen, de meeste keringen zijn dermate sterk dat aanvullende informatie niet nodig is. Er zijn echter keringen en omstandigheden die wel vragen om aanvullende monitoring. Juist voor deze locaties kunnen monitoringssystemen van grote aanvullende waarde zijn op traditionele inspectietechnieken.

Dankbetuiging

Het macrostabiliteitsexperiment werd mogelijk gemaakt door de samenwerkingsovereenkomst tussen het **Rijkswaterstaat Innovatie Test Centrum** en de **Stichting IJkdijk**, met ondersteuning door het **Samenwerkingsverband Noord-Nederland**.

DIT PROJECT WORDT MEDEGEFINANCIERD DOOR HET EUROPEES FONDS VOOR REGIONALE ONTWIKKELING EN DOOR HET MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN, PIEKEN IN DE DELTA.



Verder verleende een breed scala aan organisaties hun steun en betrokkenheid. Deze organisaties willen we hiervoor hartelijk bedanken.

Dit project werd mede mogelijk gemaakt door:

- Waterschap Hunze en Aa's
- Staatsbosbeheer
- Rijkswaterstaat, Dienst Noord Nederland, Waterdistrict Waddenzee
- Gemeente Bellingwedde
- Gemeente Reiderland



Ook bedanken we alle betrokkenen bij de inhoudelijk uitvoering van het project:

- Rijkswaterstaat, Dienst Verkeer en Scheepvaart, Innovatie Test Centrum
- De Stichting IJkdijk, en de partners die de Stichting IJkdijk vormen:
 - TNO
 - Deltares
 - NV NOM
 - STOWA
 - Stichting IDL
- Alert Solutions BV
- Intech Dike Security Systems
- DikeSurvey VOF
- IBM BV (mede namens Flood Control 2015)
- GTC Kappelmeijer GMBH
- Hansje Brinker Dijkmonitoring,
- Koenders Instruments BV
- Luisterbuis-consortium (bestaande uit TNO, Landustrie Sneek BV en Volker Wessels Telecom Infra BV)
- RPS-BCC BV/IFCO
- Inventec BV/Ten Cate



Tenslotte gaat onze hartelijke dank uit naar de omwonenden van de IJkdijk-locatie.



Dit is een uitgave van
Rijkswaterstaat

in opdracht van
Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Kijk voor meer informatie op
www.rijkswaterstaat.nl

