

Inpassen van geofysische methoden in de evaluatie van de gevoeligheid voor falen van de Vlaamse dijken

Ir. Leen Vincke
Vlaamse overheid
afdeling
Geotechniek



Ir. Ronny Van Looveren
International Marine
and Dredging
Consultants (IMDC)



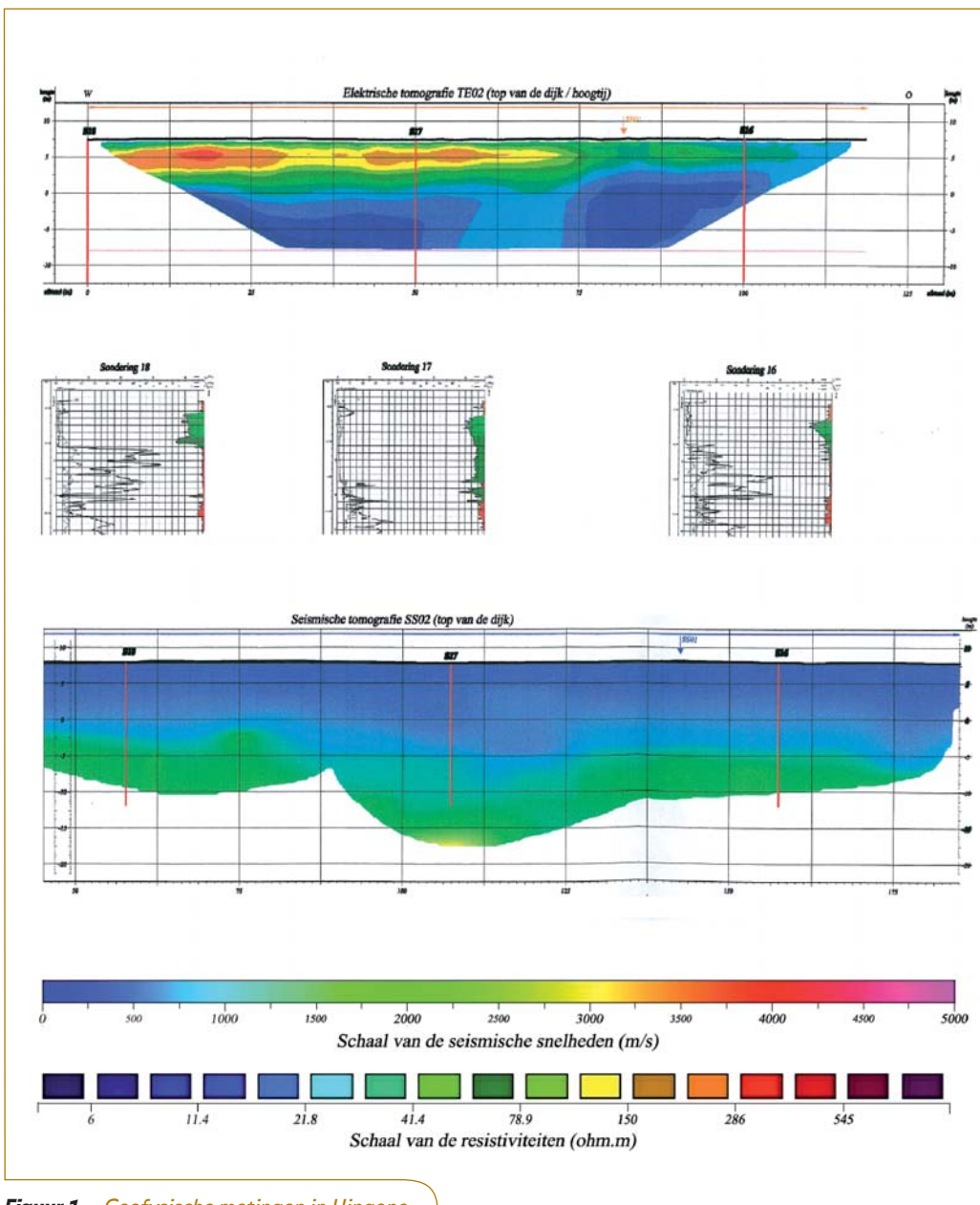
Ir. Patrik Peeters
Vlaamse overheid
Waterbouwkundig
Laboratorium



Ir. Marc Luyten
Vlaamse overheid
afdeling
Geotechniek



Dr. Davy Depreiter
G-tec Marine
Environment n.v.



Figuur 1 – Geofysische metingen in Hingene.

Probleemstelling

Om een inschatting te kunnen maken van de stabiliteit en gevoeligheid voor falen van de Vlaamse dijken, is er in eerste instantie een groot pakket geotechnische informatie nodig. Deze grondmechanische parameters zijn namelijk onontbeerlijk om de faalmechanismen meer gedetailleerd te kunnen becijferen. Met behulp van grootschalige onderzoekscampagnes, waarin voornamelijk de klassieke geotechnische technieken zoals sonderingen en boringen de hoofdrol spelen, kunnen de meeste benodigde grondmechanische gegevens worden verkregen. Aangezien voor lange dijktrajecten de vereiste tijd en middelen hiertoe niet steeds voorhanden zijn en aangezien de volledige opbouw van de dijk niet altijd volledig kan afgeleid worden uit een standaard geotechnisch proevenprogramma, heeft de Vlaamse overheid beslist een studie uit te schrijven om de bruikbaarheid en betrouwbaarheid van diverse (niet-destructieve) geofysische technieken te evalueren in het kader van het inschatten van de dijkstabiliteit van de Vlaamse dijken.

Bruikbaarheid en betrouwbaarheid geofysische technieken

In een eerste fase van de studie werden diverse geofysische technieken toegepast op een aantal proefsites. Daarnaast werden stabiliteitsmodelleringen uitgevoerd op de dijkprofielen zodat de interpretaties zouden kunnen worden uitgedrukt in termen van dijkstabiliteit.

De bruikbaarheid en betrouwbaarheid van de toegepaste geofysische methoden werden geëvalueerd. Hiertoe werd getracht correlaties op te stellen tussen de geofysische meetwaarden en de benodigde geotechnische karakteristieken. De resultaten werden afgetoetst met de beschikbare geotechnische gegevens.

Samenvatting

Om de gevoeligheid voor falen van dijken te kunnen inschatten zijn een groot aantal geotechnische gegevens noodzakelijk die niet steeds voorhanden zijn. Klassieke geotechnische (destructieve) proeven zoals sonderingen en boringen zijn onontbeerlijk maar arbeidsintensief voor lange dijktrajecten. Ze leveren ook niet steeds alle gewenste informatie. Een studie werd uitgeschreven door de Vlaamse overheid om de bruikbaarheid en betrouwbaarheid van diverse niet-destructieve (geofysische) technieken na te gaan. Na evaluatie van een brede waaier aan technieken, bleek dat geofysisch onderzoek bijkomend inzicht kan verschaffen in de dijkstructuur én het klassiek geotechnische onderzoek ook ge-

richter kan sturen. Hieruit volgend werd een voorstel tot stappenplan uitgewerkt dat tot doel heeft voldoende gegevens te verzamelen en te interpreteren om de stabiliteit van de dijk volledig te kunnen inschatten. Dit stappenplan omvat onder andere de uitvoering van zowel geotechnische als geofysische proeven (standaardstrategie). Indien nodig kan ook gericht per relevant faalmechanisme specifiek grondonderzoek worden uitgevoerd. Dit stappenplan moet toelaten om voor de bestaande Vlaamse dijken op een snelle en betrouwbare manier na te gaan waar dijkverstevigingen nodig zijn. Voor dijken waar werken gepland zijn, kan de verzamelde informatie toelaten het ontwerp te optimaliseren.

In ref. [1] wordt voor de verschillende proefsites een uitgebreid overzicht gegeven van de verschillende toegepaste geofysische technieken en de resultaten van de correlaties met de beschikbare geotechnische gegevens.

In tabel 1 worden de verschillende geofysische technieken die werden toegelicht in deze studie kort opgelijst.

De technieken aangeduid met een * zijn in deze studie effectief uitgetest op één of meerdere proefsites. Achtergrondinformatie betreffende de geofysische technieken kan gevonden worden in ref. [1] en [2].

Op figuur 1 wordt een voorbeeld gegeven van de meerwaarde van het uitvoeren van geofysische metingen. Op de Scheldedijk in Hingene werden in langsrichting resistiviteitsstomografieën opgesteld en werd P- golfrefractie toegepast.

De hoge resistiviteiten die bovenaan werden opgemeten in het eerste gedeelte van het lengteprofiel (oranje-rode kleur) wijzen op een zandige laag bovenaan. Deze zandige laag wordt ook teruggevonden op de sondering S17 rond het peil TAW +4m (TAW = Tweede Algemene Waterpassing = referentiepeil hoogtemetingen België). Dankzij de resistiviteitsstomografie kan de uitgestrektheid van deze zandige laag tussen de beschikbare sonderingen beter worden ingeschat.

In de seismische metingen vinden we de overgang tussen het kleipakket (lage seismische snelheden) en de onderliggende zandlagen (hogere snelheden) terug. Op de seismische tomografie is duidelijk te zien dat de kleiige laag zich dieper uitstrekt tussen 100 en 125m. Dit wordt ook bevestigd in het sondeerdiagram S17.

De geofysische metingen zorgen hier dus voor een meer continue beeldvorming tussen de klassieke geotechnische proeven in.

Het uitvoeren van geofysische methoden dwars op de dijk kan ook in dwarsrichting zorgen voor een meer continue beeldvorming, bijvoorbeeld ter onderkenning van de locatie van een oude klei-

Tabel 1 Oplijsting types geofysische technieken

<i>Elektrische methodes</i>	<i>Resistiviteitsstomografie *</i> <i>Spontane polarisatie *</i>
<i>Elektromagnetische methodes</i>	<i>Grondradar (GPR) hoogfrequent *</i> <i>Grondradar (GPR) laagfrequent *</i> <i>Frequentiedomein elektromagnetisme *</i> <i>Tijdsdomein elektromagnetisme (metaaldetectie)</i> <i>Capacitief gekoppelde resistiviteitsmetingen *</i>
<i>Magnetische methodes</i>	<i>Magnetische gradiometrie (metaaldetectie)</i>
<i>Seismische methodes (op land)</i>	<i>P- golven refractie *</i> <i>S-golven refractie *</i> <i>MASW (meerkanaalsanalyse oppervlaktegolven) *</i>
<i>Akoestische methodes (op water)</i>	<i>Side scan sonar *</i> <i>Sector scanner *</i> <i>Multibeam bathymetrie</i>

Tabel 2 Bruikbaarheid en betrouwbaarheid van de toegepaste geofysische technieken

<i>Inzetbaarheid en betrouwbaarheid</i>	<i>Methodes</i>	<i>Opmerkingen</i>
<i>Courant inzetbaar, betrouwbaar</i>	<i>FDEM (frequentiedomein elektromagnetisme)</i>	<i>Exploratief, voor een eerste verkenning</i>
	<i>Resistiviteitsstomografie</i>	<i>Beeldvorming, nuttig t.b.v. correlatie met CPT's</i>
	<i>Hoogfrequente GPR</i>	<i>Controle bekleding</i>
	<i>Side Scan Sonar</i>	<i>Controle onderwatergedeelte</i>
	<i>Sector Scanner</i>	<i>Controle onderwatergedeelte</i>
	<i>Multibeam Bathymetrie</i>	<i>Bewezen technologie voor controle onderwatermorfologie</i>
	<i>TDEM (tijdsdomein elektromagnetisme)</i>	<i>Bewezen technologie voor controle metaaldetectie tot 2 m</i>
<i>Hoog potentieel, verder te evalueren</i>	<i>Magnetische gradiometrie</i>	<i>Bewezen technologie voor controle metaaldetectie</i>
	<i>MASW</i>	<i>Veelbelovend en hoge geotechnische relevantie: indicatie glijdingsmodulus, S-golfsnelheid. Verder te evalueren op dijken voor 2D/3D effecten en efficiëntie</i>
<i>Aanvullend</i>	<i>Capacitief gekoppelde resistiviteitsmeter</i>	<i>Aanvullend op resistiviteitsstomografie, of op met asfalt beklede dijken</i>
	<i>Spontane polarisatie</i>	<i>Aanvullend, opsporing doorstroming dijken</i>
	<i>P-golven refractie</i>	<i>Indicatie compactie grondlagen</i>
<i>Te mijden</i>	<i>Laagfrequente GPR</i>	<i>Niet standaard inzetbaar door frequente aanwezigheid van kleilagen</i>
	<i>S-golven refractie</i>	<i>Onbetrouwbaar, diverse problemen</i>

dijk. In praktijk blijkt de uitvoering en interpretatie van deze proeven dwars op de dijk niet steeds zo evident te zijn. De bekleding van het talud zorgt er vaak voor dat niet alle types geofysische metingen kunnen worden uitgevoerd. Daarnaast wordt de interpretatie van de metingen bemoeilijkt door het niet- horizontale maaiveld in dwarsrichting.

Geofysische technieken in kader van de verschillende faalmechanismen

In een volgende studiefase werd nagegaan welke

geotechnische parameters van belang zijn voor het becijferen van de verschillende faalmechanismen en welke geofysische technieken hiertoe nuttige informatie kunnen aanleveren.

Volgende faalmechanismen werden bekeken (zie ook ref. [5])

- macrostabiliteit langs riviertalud en langs land;
- microstabiliteit langs riviertalud en langs landtalud;
- erosie, zowel van de bekleding riviertalud als landtalud;

- piping.

Voor elk van de faalmechanismen werden berekeningen uitgevoerd op een dijk met standaardgeometrie, gecombineerd met een tijreeks. In ref. [3] wordt dit uitgebreid behandeld. Hieronder wordt kort schematisch samengevat wat de belangrijkste conclusies hieromtrent zijn.

Verder kan niet-destructief onderzoek helpen bij het inschatten van mogelijke zettingen en bij het opsporen van damplanken, leidingen of andere structuren in de dijk.

MACROSTABILITEIT

● Ingeval zeer flauwe taludhellingen en/of zeer geringe dijkhoogtes is er in principe geen onderzoek nodig.

● Bij steilere taludhellingen en/of grotere dijkhoogtes: FDEM metingen (= frequentiedomein elektromagnetisme) zijn aangewezen, aangevuld met resistiviteitstomografieën, zowel in de langsrichting als (indien mogelijk) in de dwarsrichting.

● Als hieruit blijkt dat de dijk kern overwegend zandig is: dan beperkt aantal sonderingen (boringen) uitvoeren ter controle en validatie.

● Als hieruit blijkt dat de dijk kern overwegend kleiig is: groter aantal sonderingen (boringen) nodig voor goede inschatting consistentie klei (bijkomend eventueel seismische technieken: refractie en MASW)

MICROSTABILITEIT

● Bij flauwe taludhellingen en kleine waterpeilver verschillen tussen land- en rivierzijde is er in principe geen onderzoek nodig.

● In de andere gevallen: FDEM metingen zijn aangewezen eventueel aangevuld met resistiviteitstomografieën.

● Als dijklichaam overwegend kleiig is: voldoende.

● Als dijklichaam overwegend zandig is:

● Waterdichte plaatbekleding:

● aan landzijde en aan rivierzijde boven water: grondradar (in geval zoet water);

● aan rivierzijde: side scan sonar en de sector scanner.

● Kleiige toplaag: capacitief gekoppelde resistiviteitsmeting aan land- en rivierzijde, met eventueel lokale ondiepe handboringen.

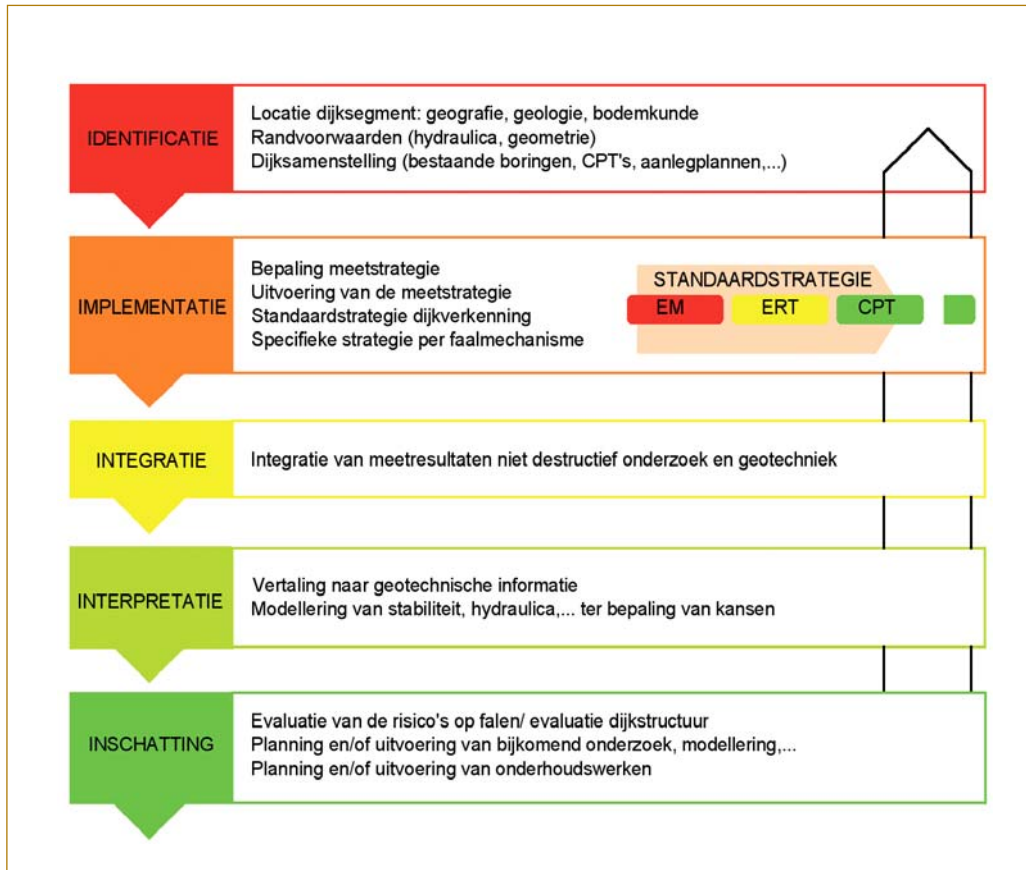
● Algemene controle doorsijpeling aan landzijde: visueel, eventueel spontane polarisatie.

● Algemene controle rivierzijde: side scan sonar en de sector scanner

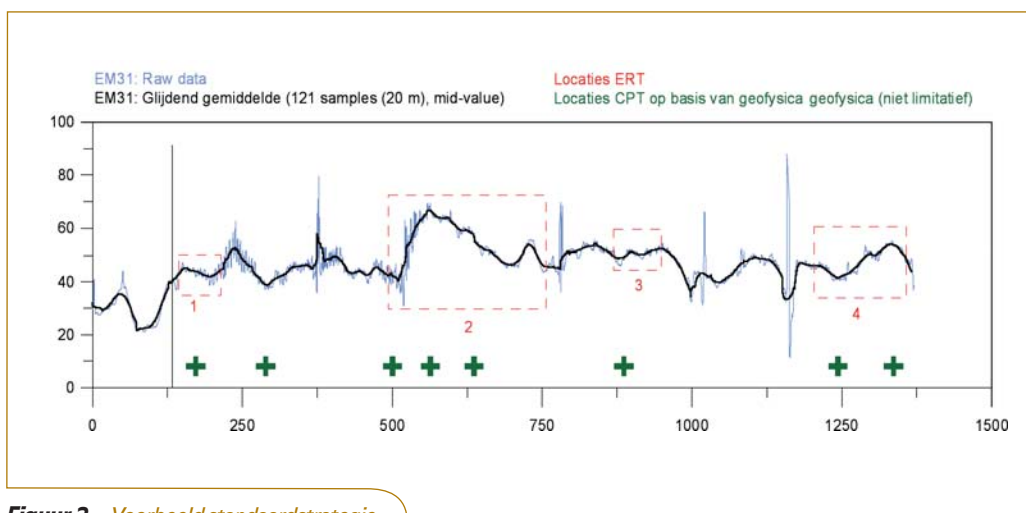
EROSIE

● Bij lage belasting (stroomsnelheden, wind- en scheepsgolven voor riviertalud, overloop en overslag voor het landtalud) is er in principe geen onderzoek nodig.

● In de andere gevallen:



Figuur 2 - Schema stappenplan.



Figuur 3 - Voorbeeld standaardstrategie.

- Bekleding landtalud.
 - Gras: visuele inspectie van de kwaliteit van de grasmat.
 - Plaat/asfaltbekleding: grondradar in combinatie met kernstalen.
 - Bekleding riviertalud
- Boven water.
 - Gras, gestorte bekleding: visuele inspectie.
 - Plaatbekleding: grondradar in combinatie met kernstalen (niet bij brak water).
- Onder water.
 - Side scan sonar, sector scanner.
- Reststerkte: FDEM metingen eventueel aangevuld met resistiviteitsstomografie.
 - Als dijklichaam overwegend kleiig is: voldoende.
 - Als dijklichaam overwegend zandig is: capacitef gekoppelde resistiviteitsmeting aan land- en rivierzijde, met eventueel lokale ondiepe handboringen

PIPING

- Als dijkbreedte teen veel groter is dan waterpeilverschil tussen rivierzijde en landzijde: in principe geen onderzoek nodig (cfr. Bligh).
- In het andere geval: FDEM metingen eventueel aangevuld met resistiviteitsstomografie.
 - Bij overwegend zandige opbouw: voldoende.
 - Bij overwegend kleiige opbouw: sonderingen (boringen), eventueel seismisch onderzoek (P-golven of MASW).

ZETTINGEN

- FDEM metingen eventueel aangevuld met resistiviteitsstomografie, aangevuld met sonderingen/boringen/laboratoriumonderzoek, eventueel seismische technieken

DAMPLANKEN, LEIDINGEN, STRUCTUREN IN DE DIJK

- FDEM metingen.
- Niet uitgevoerd in dit onderzoek, maar het bevozen nut van de magnetische gradiometrie of TDEM (=tijdsdomein elektromagnetisme) ten opzichte van FDEM kan wel vermeld worden. De FDEM-metingen leveren natuurlijk bijkomende informatie over de geleidbaarheid van de bodem indien geen damplanken aanwezig zijn.
- Kleinere anomalieën (bijvoorbeeld graverijen van konijnen, cracks,...) kunnen met deze technieken niet opgespoord worden. Hiervoor kunnen eventueel technieken met hogere resolutie zoals 3D grondradar een oplossing bieden.

Stappenplan

Op basis van alle vergaarde informatie werd een voorstel tot stappenplan uitgewerkt. Dit algemeen stappenplan heeft tot doel om voldoende gegevens te verzamelen voor een controle van de



Figuur 4 – Meetstrategie faalmechanisme macrostabiliteit.

dijken. Dit moet toelaten om het (preventief) onderhoud aan de dijken te optimaliseren, het toekomstig gedetailleerd geotechnisch onderzoek gericht te sturen en ook de input aan te leveren voor de toetsing van het faalgedrag van de dijken.

Het algemeen stappenplan omvat steeds de combinatie van zowel geofysische als geotechnische technieken. Het geofysisch onderzoek moet gezien worden als een aanvulling op en een sturing van het geotechnisch onderzoek. Het geofysisch onderzoek kan ook een aantal zaken bevestigen die men verwachtte op basis van vaststellingen in het vooronderzoek. Geotechnische metingen zijn steeds nodig ter kalibratie.

Wanneer het doel is om de algemene dijkopbouw snel en betrouwbaar in beeld te brengen over lange afstand en het geotechnisch onderzoek meer gericht uit te voeren, dient men de zogenoemde ‘standaardstrategie’ te volgen. Dit omvat elektromagnetische metingen (EM) in combinatie met geo-elektrische metingen (elektrische resistiviteitsstomografie = ERT).

Wanneer specifiek voor een faalmechanisme

bijkomende relevante informatie moet worden verkregen, dient de uitvoeringsstrategie specifiek voor het beschouwde faalmechanisme te worden gevolgd. Deze ‘specifieke uitvoeringsstrategieën’ omvatten meestal de standaardstrategie aangevuld met bijkomende technieken. De specifieke uitvoeringsstrategieën worden meer in detail behandeld in een volgende paragraaf.

Zoals eerder vermeld kaderen de standaard- of specifieke uitvoeringsstrategieën in een algemeen stappenplan. Dit stappenplan bevat steeds de volgende 5 deelstappen:

- Identificatie: het identificeren en beschrijven van de dijk op basis van de huidige kennis. Het resultaat is de identificatie van een specifiek geotechnisch faalmechanisme of de nood voor een algemene dijkverkenning.
- Implementatie: het opstellen en uitvoeren van een meetcampagne op basis van de standaardstrategie of een specifieke strategie in kader van een individueel faalmechanisme. In veel gevallen kan de standaardstrategie gevolgd worden als onderdeel van de specifieke strategie. De evaluatie van de resultaten kan dan leiden tot de uit-

voering van bijkomende metingen waardoor het stappenplan een iteratief karakter krijgt.

- **Integratie:** verwerking van de uitgevoerde geofysische metingen en kalibreren en correleren met de geotechnische gegevens die al dan niet al op voorhand beschikbaar waren of ook uitgevoerd zijn in de implementatiestap. Hieruit volgt een dataset van gegevens die toelaat een beeld te vormen over de dijkstructuur en/of een schatting of identificatie van diverse geotechnische en andere parameters.
- **Interpretatie:** interpretatie van de geïntegreerde dataset moet leiden tot resultaten die geotechnisch relevant zijn voor de kennis van de dijkstructuur en voor de inschatting van het risico op falen.
- **Inschatting (evaluatie):** het resultaat is een evaluatie in termen van dijkstructuur en faalmechanismen. Op basis hiervan kan men besluiten trekken aangaande benodigde dijkwerken en/of benodigd bijkomend grondonderzoek.

De stappen implementatie, integratie en interpretatie kunnen simultaan gebeuren waardoor er kan bijgestuurd worden tijdens de uitvoering van de meer gedetailleerde metingen.

Het stappenplan wordt geschematiseerd weergegeven in *figuur 2*.

Standaardstrategie

De standaardstrategie omvat elektromagnetische metingen in combinatie met geo-elektrische metingen (elektrische resistiviteitsstomografie).

De elektromagnetische metingen moeten een indicatief beeld van de dijkopbouw geven, waarna de geo-elektrische metingen op geselecteerde plaatsen de inwendige structuur van de dijk beter in beeld brengen. De meetresultaten kunnen betrouwbaar geïnterpreteerd worden indien ze in een 3de fase gecombineerd worden met gerichte sonderingen.

Door het voorafgaand uitvoeren van de elektromagnetische en geo-elektrische metingen kunnen de sondeerlocaties meer gericht worden ingepland. Dit houdt in dat er minder sonderingen zullen worden ingepland in homogene zones en meer sonderingen in heterogene zones. Het totaal aantal sonderingen kan normaal ook iets minder worden genomen dan standaard gangbaar.

Na evaluatie van alle proefresultaten kan nog beslist worden om bijkomend een aantal sonderingen, boringen en/of geofysische metingen uit te voeren waardoor het stappenplan een iteratief karakter krijgt.

In de *figuur 3* wordt een voorbeeld geschetst van het uitvoeren van zowel elektromagnetische metingen (FDEM), geo-elektrische metingen (ERT) als

gerichte sonderingen (CPT) in het kader van de standaardstrategie.

Specifieke uitvoeringsstrategie per faalmechanisme

Indien het optreden van een bepaald faalmechanisme vermoed wordt, is het aangewezen om specifiek hiertoe bijkomende proeven uit te voeren. Zoals vermeld werd er per faalmechanisme een 'specifieke uitvoeringsstrategie' vooropgesteld. Deze specifieke strategie omvat meestal de standaardstrategie. Aan het uitvoeren van specifieke meettechnieken zijn meestal wel bepaalde randvoorwaarden gekoppeld. Zo is het bijvoorbeeld niet nodig om voor een niet-cohesief dijkmateriaal verder geotechnisch /geofysisch onderzoek uit te voeren in het kader van het faalmechanisme piping.

Voor elk faalmechanisme werd een flowchart opgesteld van de te volgen stappen voor de specifieke meetstrategie. Deze flowcharts worden allen weergegeven en toegelicht in ref. [4].

Hieronder wordt als voorbeeld de flowchart van het faalmechanisme macrostabiliteit voorgesteld in *figuur 4*.

Het hierboven vermelde stappenplan met de standaard- en specifieke uitvoeringsstrategieën is geen gids die blind kan worden gevolgd. Het dekt namelijk niet alle specifieke gevallen die zich in werkelijkheid kunnen voordoen.

Geotechnisch en geofysisch inzicht en expertise blijven nodig om de dijk te beoordelen en de metingen te sturen. Bijzondere omstandigheden zullen daarenboven ook een bijzondere meetstrategie vereisen.

Besluit

De bruikbaarheid en betrouwbaarheid van diverse niet-destructieve (geofysische) meettechnieken werd nagegaan in het kader van het inschatten van de gevoeligheid voor falen van de Vlaamse dijken. Verschillende geofysische technieken bleken een meerwaarde te bieden om te komen tot een meer continue beeldvorming van het beschouwde dijkvak. Aangezien de praktische uitvoering van deze technieken en de interpretatie van de resultaten vaak moeilijk is, dient dit steeds in handen te worden gegeven van gespecialiseerde firma's.

Deze geofysische metingen kunnen gezien worden als aanvulling op de klassieke geotechnische proeven, welke steeds noodzakelijk blijven. Ze kunnen ook zorgen voor een gericht uitvoeren van de geotechnische sonderingen en boringen. Daaropvolgend werd per faalmechanisme vastgesteld welke geofysische technieken nuttige informatie aanleveren.

Tenslotte werd een stappenplan vooropgesteld om te komen tot een volledige dataset aan geotechnische gegevens. Hiermee kan een meer continu beeld van de dijkstructuur worden verkregen en kan men komen tot een inschatting van de gevoeligheid voor falen van de dijk.

Het stappenplan omvat een standaardpakket aan geofysische en geotechnische proeven eventueel aangevuld met specifieke benodigde proeven per relevant faalmechanisme.

Dit stappenplan kan vanzelfsprekend niet zomaar blind worden gevolgd. Geotechnische en geofysische expertise blijven noodzakelijk.

Referenties

- [1] G-tec & IMDC (2010a). *Evaluatie niet-destructieve methoden, in het bijzonder geofysische methoden voor onderzoek van de bresgevoeligheid van Vlaamse dijken langs de waterwegen. Deelopdracht 1: Geofysische metingen*. In opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium ism. de Afdeling Geotechniek.
- [2] Kearey P.; Brooks M.; Hill I. *An introduction to geophysical exploration*.
- [3] G-tec & IMDC (2010b). *Evaluatie niet-destructieve methoden, in het bijzonder geofysische methoden voor onderzoek van de bresgevoeligheid van Vlaamse dijken langs de waterwegen. Deelopdracht 2: Evaluatie bruikbaarheid en betrouwbaarheid niet-destructieve methoden*. In opdracht van het Waterbouwkundig Laboratorium ism. de Afdeling Geotechniek.
- [4] Depreiter, D.; Van Looveren, R.; Vincke, L.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2010). *Evaluatie geofysische methoden voor onderzoek bresgevoeligheid van Vlaamse dijken: Deelopdracht 3: Voorstel tot monitoring. Versie 2_0. WL Rapporten, 706_08a. G-tec en IMDC iov. Waterbouwkundig Laboratorium ism. Afdeling Geotechniek: Antwerpen, België.*
- [5] *Conceptuele methode voor een snelle diagnose van het faalgedrag van de Vlaamse dijken*. Geotechniek, juli 2011. ●