

Monitoring van de krachtswerking in verticale beschoeiingswanden d.m.v. optische vezeltechnologie

Leen De Vos, afdeling Geotechniek, Vlaamse Overheid

Gust Van Lysebetten, afdeling Geotechniek, WTCB

1 Inleiding

De toepassing van de observational method bij het ontwerp van structuren (toegelaten binnen EC7), laat een kostenefficiëntere uitvoering toe zonder in te boeten aan veiligheid. Dit vereist echter wel dat de belangrijke parameters die een rol spelen bij het ontwerp van een constructie (vervormingen en krachtswerking) tijdens en na de uitvoering gemonitord worden.

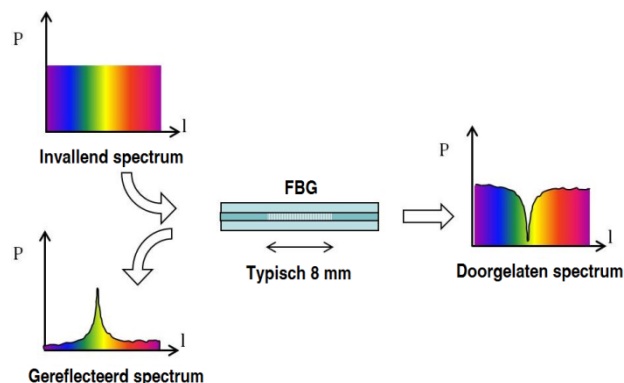
In dit artikel wordt beschreven hoe met behulp van innovatieve optische vezeltechnologie de rekken (en door berekening, de krachtswerking) in verticale beschoeiingen kunnen begroot worden. Het meetprincipe wordt kort toegelicht, waarna aan de hand van een praktijkvoorbeeld de meerwaarde van deze innovatieve meettechniek aangetoond wordt. Uit de toepassing blijkt dat deze nieuwe techniek zeer geschikt kan zijn, maar dat er ook enkele aandachtspunten zijn bij de uitvoering en interpretatie die men in beschouwing moet nemen. Deze aandachtspunten worden hier ook kort toegelicht.

2 Meettechniek

Twee verschillende technieken die op het principe van lichttransmissie en/of -reflectie door een optische vezel gebaseerd zijn, worden hier kort toegelicht: Fiber Bragg Grating (FBG) en Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA). Beide technieken maken gebruik van een optische vezel met een uiterst dunne cilindrische kern (8 μm).

2.1 FBG (Fiber Bragg Grating) en BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis)

Bij een Fiber Bragg Grating sensor wordt een kleine markering op de glasvezel aangebracht. Deze markering reflecteert een specifieke golflengte van het licht (Figuur 1), die varieert met de rek (en de temperatuur) van de vezel ter hoogte van de sensor. Op deze manier kunnen rekken met een nauwkeurigheid van 1 μstrain (10^{-6} m/m) worden opgemeten. De FBG is een puntsensor (8 mm lengte), die ofwel rechtstreeks op de structuur kan worden verkleefd, ofwel volgens het extensometerprincipe over een grotere meetbasis kan worden bevestigd. Verschillende sensoren met een verschillende reflectiegolflengte kunnen serieel op 1 glasvezel aangebracht worden. Omdat de tussenafstand tussen de verschillende FBG-golflengtes groot genoeg dient te zijn om onderlinge interferentie van de gereflecteerde golflengtes te vermijden, is het aantal sensoren voor de meeste geotechnische toepassingen beperkt tot 16 à 20 sensoren per sensorlijn. De tussenafstand tussen de sensoren en de lengte van de totale sensorlijn kan vrij gekozen worden.



Figuur 1. Principe van de FBG-techniek. Elke FBG-sensor reflecteert een welbepaalde golflengte, die varieert met de rek en temperatuur van de vezel (bron: FBGS).

BOTDA is een continue meettechniek, gebaseerd op de Brillouin scattering. De reflectie wordt op elke locatie langsheen de glasvezel opgemeten. Praktisch meet men elke 5 à 20 cm een waarde op voor de rek. Deze wordt uitgemiddeld over een afstand van 0.5 – 1 m.

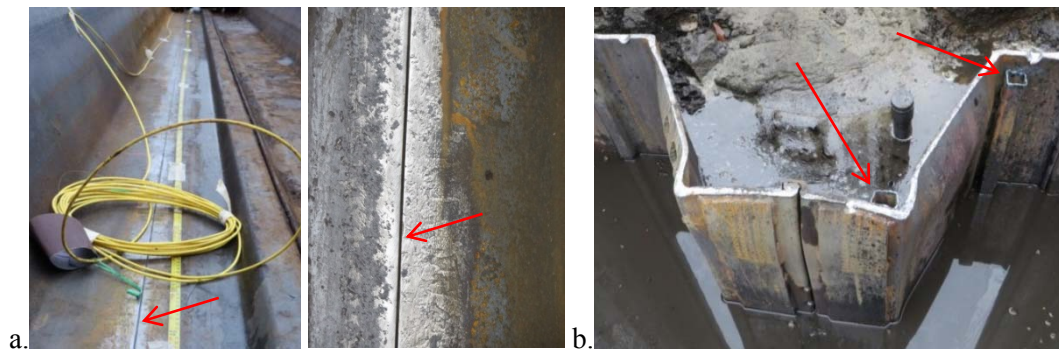
Met deze techniek kan een nauwkeurigheid van 10 – 30 μ strain gehaald worden. Een vereiste is dat de kabel langs beide uiteinden geconnecteerd moet worden met de uitleesunit, en dat men steeds een ononderbroken lus moet hebben. Het grote voordeel van de techniek is dat deze een continu signaal geeft langsheen de volledige vezel en dat de lengte quasi onbeperkt is (1 km).

2.2 Installatie van de optische vezel

Typische buitenafmetingen van een optische vezel zijn 200 – 900 μ m. Dit betekent dat deze zeer fragiel zijn en dat er extra aandacht besteed moet worden aan de installatie en bescherming van de vezel. Het betekent echter ook dat de vezels gemakkelijk verwerkt kunnen worden in een structuur zonder grote structurele impact. Mogelijke installatiemethodes zijn:

- Verlijmen van de vezel rechtstreeks op de structuur (bv. op wapeningselement te plaatsen in sliwbwand/soilmix)
- Verlijmen van de vezel in een geslepen groef (bv. damwand, I-profiel (Figuur 2.a))
- Aanbrengen van de vezel in een reservatiebuis en ingrouten (Figuur 2.b).

Elk van deze methodes heeft zijn voor- en nadelen, waarbij men vooral aandacht moet besteden aan de mogelijke beschadiging bij installatie (bv. inheien damwand), de goede connectie met de structuur en de kennis van de exacte positie van de sensoren t.o.v. de neutrale lijn.



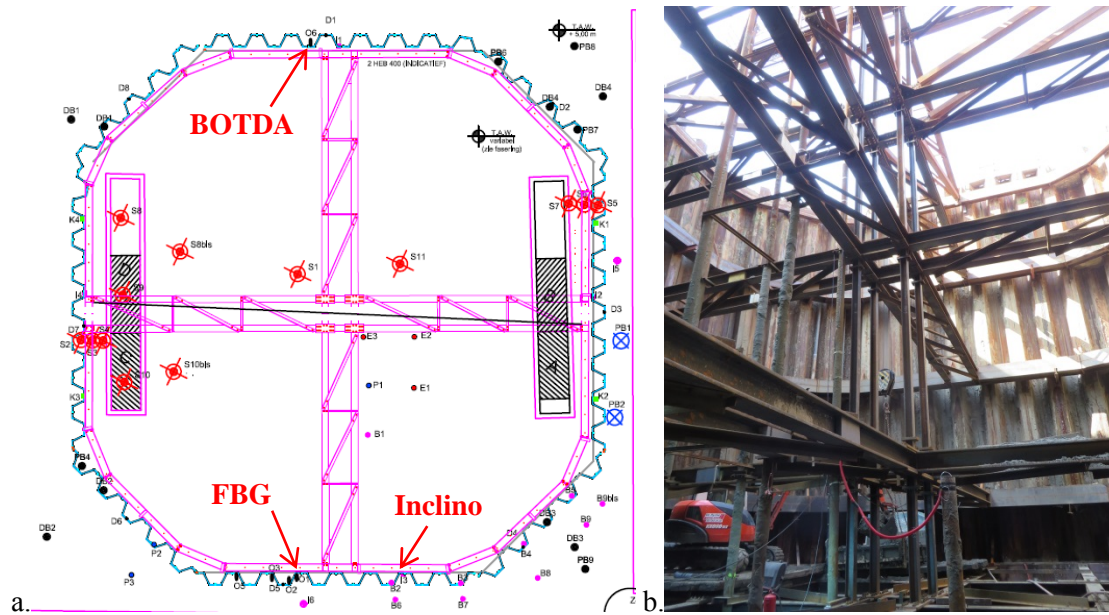
Figuur 2. (a) Geslepen groef vóór verlijming van de sensorlijn. (b) Gelaste reservatiebuizen voor sensorinstallatie.

3 Praktijkcase

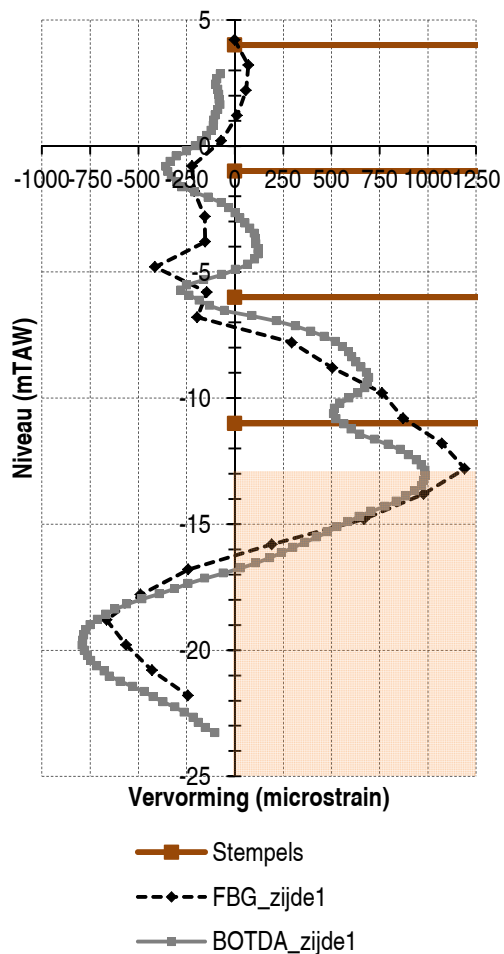
Beide optische vezeltechnieken werden succesvol toegepast voor de monitoring van een proefput die in opdracht van BAM nv in het kader van de Oosterweelverbinding werd verwezenlijkt. De proefput is een bouwput met afmetingen $b \times d \times h = 20 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 24 \text{ m}$. De wanden van de bouwput werden uitgevoerd met damwandprofielen AZ36-700N. Op 5 verschillende niveaus werden stempels geplaatst door middel van een stempelraam met gordingen (Figuur 3.a en b). Verschillende van de bijna 30m lange damplanken werden geïnstrumenteerd met optische vezels. Deze werden tijdens de uitgraving continu opgemeten en samen met de inclinometingen regelmatig geëvalueerd. In wat volgt, worden enkele resultaten vergeleken van FBG-vezels geïnstalleerd in een reservatiekoker en BOTDA-vezels die in een geslepen groef werden verlijmd.

Figuur 4 toont de opgemeten vervormingen in een FBG- en BOTDA-vezel bij een uitgravingsdiepte van ongeveer 20 m. Beide vezels bevinden zich aan de zijde van de uitgraving t.o.v. de neutrale lijn (Figuur 3.a) en tonen over het algemeen een sterk gelijkend beeld. Toch valt het bijvoorbeeld op dat de stempellagen minder tot uiting komen bij de FBG-metingen. Dit kan verklaard worden door een combinatie van meerdere factoren:

- ze zich op een andere locatie bevinden in de bouwput en de afstand tot de centrale stempelramen niet exact dezelfde is,
- de opening tussen de gordingen en de damplanken over de omtrek van de bouwput niet overal even stijf is uitgevuld,
- de FBG-metingen de rek meten in dit geval over een meetbasis van 1 m, de BOTDA-metingen met een meetbasis van 20 cm,
- de afstand tot de neutrale lijn met een factor 1.1 verschilt,
- de mobiele bovenbelasting ook verschilt per vezel.



Figuur 3. (a) Bovenaanzicht van de BAM proefput met aanduiding van de FBG- en BOTDA-sensoren en de inclinometer gebruikt voor toetsing met de FBG-metingen. (b) Een impressie van de BAM proefput tijdens uitgraving.



Figuur 4. Rek opgemeten in FBG- en BOTDA- vezel gelegen aan de grondzijde van de uitgraving (positief = trek). De rekken zijn gecorrigeerd voor de temperatuur. De uitgravingsdiepte bedraagt ongeveer 20 m (-13.00 mTAW)

De verticale vervorming ε kan algemeen geschreven worden in functie van de normaalkracht N en het buigend moment M :

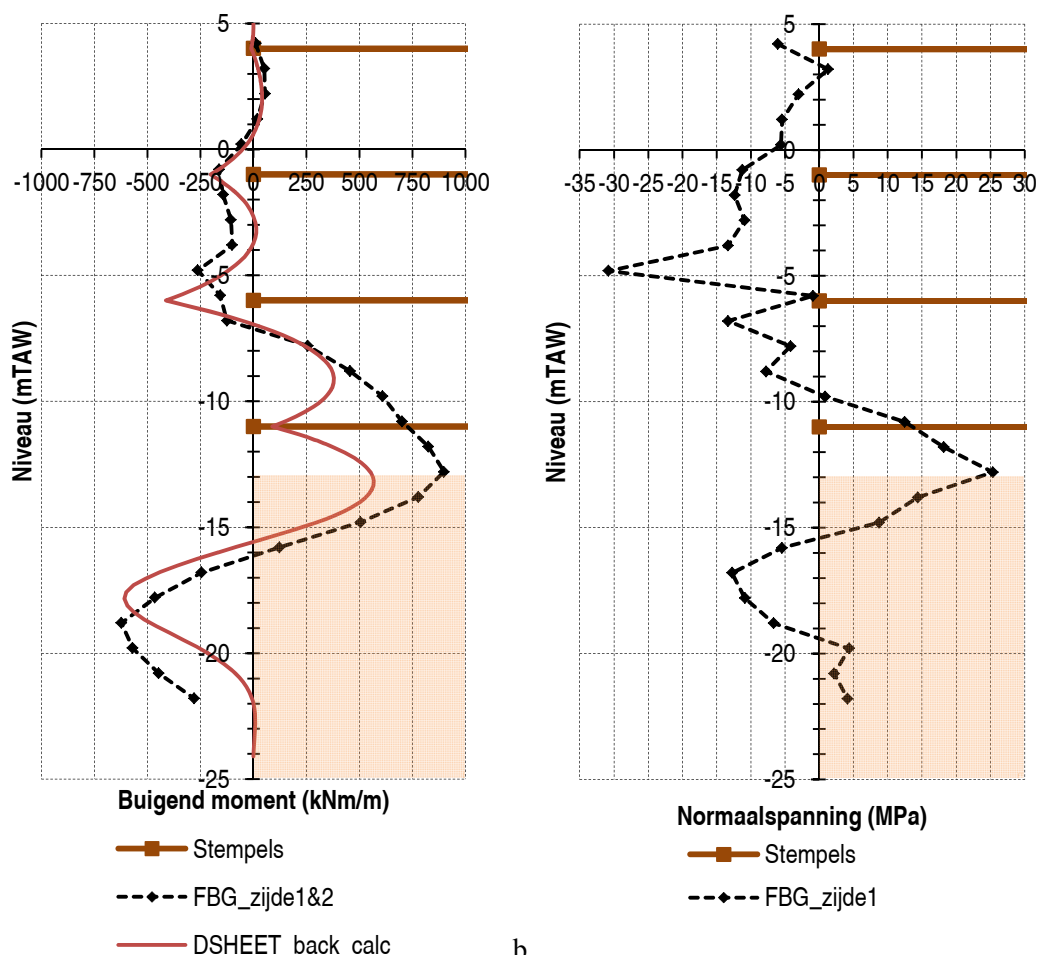
$$\varepsilon(y) = \frac{N}{E \cdot A} \pm \frac{M \cdot y}{E \cdot I}$$

met E de stijfheidsmodulus van de wand, A de oppervlakte van de wand, I het traagheidsmoment en y de afstand tot de neutrale lijn. Op basis van rekmetingen aan beide zijden van de neutrale lijn van de damplank (ε_1 en ε_2) kan uit deze uitdrukking het buigend moment M afgeleid worden:

$$M = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cdot \frac{E \cdot I}{y}$$

Figuur 5.a toont het buigend moment berekend op basis van de FBG-metingen aan weerszijden van de neutrale lijn samen met de resultaten van een DSHEET back-calculation uitgevoerd door Denys nv en WTCB (opnieuw bij een uitgravingsdiepte van ongeveer 20 m). Ook hier valt op dat de invloed van de stempelingen op de FBG-metingen beperkt is. Naast het buigend moment kan ook de normaalkracht N , of normaalspanning σ_N , uit de algemene afdrukking afgeleid worden (ter illustratie getoond in Figuur 5.b):

$$\sigma_N = \frac{N}{A} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \cdot E$$



a. **Figuur 5. (a) Buigend moment zoals berekend op basis van de FBG-rekmetingen en resulterend uit DSHEET back-calculations (uitgravingsniveau = -13.00 mTAW). (b) Normaalspanning in damplank berekend op basis van 2 FBG-vezels gelegd aan weerszijden van de neutrale lijn van de damplank.**

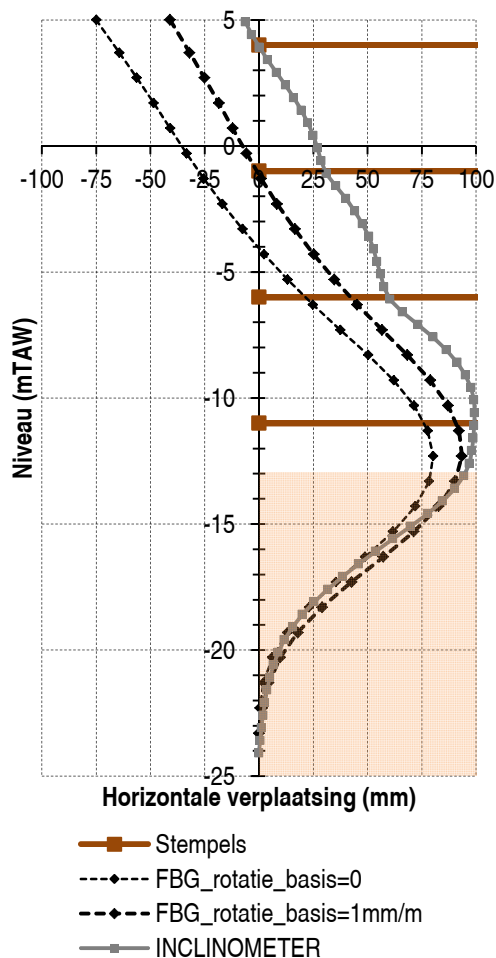
4 Uitdagingen

Hoewel de buigende momenten in de damwanden zeer nauwkeurig kunnen bepaald worden met deze techniek, zijn er toch een aantal zaken waar men zich bewust van moet zijn:

- Een verandering in temperatuur heeft een invloed op de gemeten rekwaarde. Dit komt enerzijds omdat een temperatuursverandering invloed heeft op het staal (uitzetten of krimpen), maar ook

omdat de rekmetingen een invloed ondervinden bij een temperatuursverandering. Bij het gebruik van een rekmeting aan weerszijden van de neutrale vezel, wordt de invloed van de temperatuur bij de berekening van de buigende momenten eruit gefilterd (indien men aanneemt dat de temperatuur aan beide zijden van de wand gelijk is), maar voor de berekening van de normaalkrachten dient men de rekken te compenseren voor de temperatuurinvloed.

- Glasvezels blijven vrij fragiel. Het optimaliseren van de instrumentatie om slaagkansen verder te vergroten blijft een uitdaging voor de nabije toekomst. Het verlijmen van de BOTDA-vezel (met 2-componentenlijm) in een gefreesde groef bleek een goede bescherming te bieden voor de kabel, maar de overgang gelijmde vezel naar losse vezel bovenaan de damplank brak af tijdens het inheien van de damplanken.
- De glasvezels dienen voorgespannen te worden om naast trek ook druk te kunnen meten. Voor de BOTDA-vezel is het aangewezen om het voorspannen in 1 keer te realiseren. Anders veroorzaakt de sprong in de voorspanning een afwijking in de momentenlijn.
- Wanneer een damwand gebruikt wordt als kerende wand, is het eenvoudig om de stijfheid van de wand in te schatten. Wanneer men echter met samengestelde wanden te maken heeft, waarvan men de stijfheid niet zo goed kan inschatten (bv. soilmixwanden), dan is het bepalen van de stijfheid een uitdaging.
- Door dubbele integratie van het buigend moment kan in principe de horizontale verplaatsing van de damwand bepaald worden (Figuur 6). Hierbij dient een aanname gemaakt te worden voor de verplaatsing en rotatie van de basis van de damwand. Door deze rotatie gelijk te stellen aan de rotatie opgemeten in een nabijgelegen inclinometer (zie Figuur 3.a), wordt een iets betere overeenkomst verkregen met de vervormingslijn van deze inclinometer. Het blijft echter moeilijk de verplaatsing exact te berekenen enkel op basis van de rekmetingen.



Figuur 6. Horizontale verplaatsingen opgemeten in een inclinometerbuis en berekend op basis van de FBG-metingen en het daaruit afgeleid moment, voor een rotatie aan de basis van de damplank gelijk aan 0 en 1 mm/m.

5 Dankwoord

Ten slotte nog een dankwoord voor de technische ploegen van onze afdelingen, voor de instrumentatie van de damplanken bij de BAM proefput in weer en wind.