

Toepassing van optische vezeltechnologie voor de lange termijn monitoring van vernagelde taluds te Ottignies (GEN)

Ir. Noël Huybrechts en Dr. Ir. Patrick Ganne (WTCB)

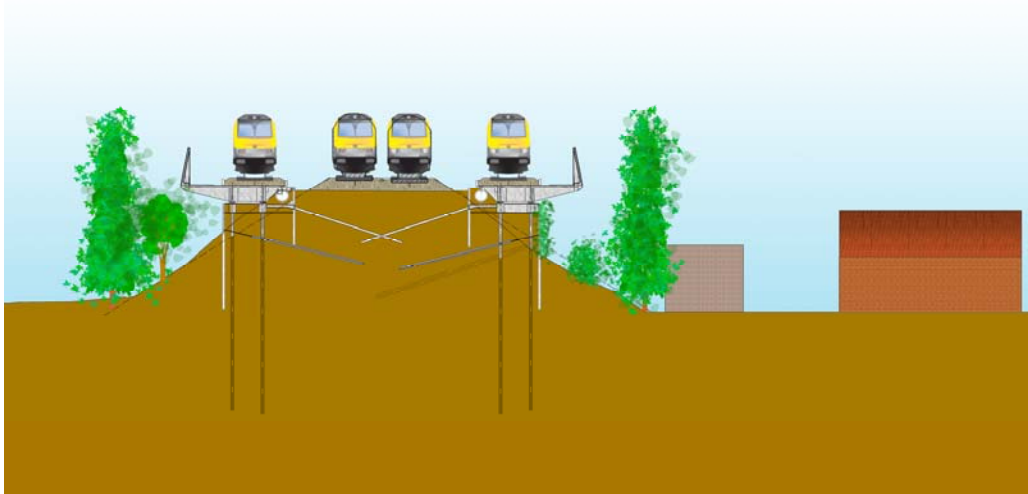
Dr. Johan Vlekken (FOS&S)

Ir. Wim Maekelberg (TUC RAIL n.v.)

Prof. Jan Maertens (KULeuven & Jan Maertens & Partners bvba)

1. Inleiding en problematiek

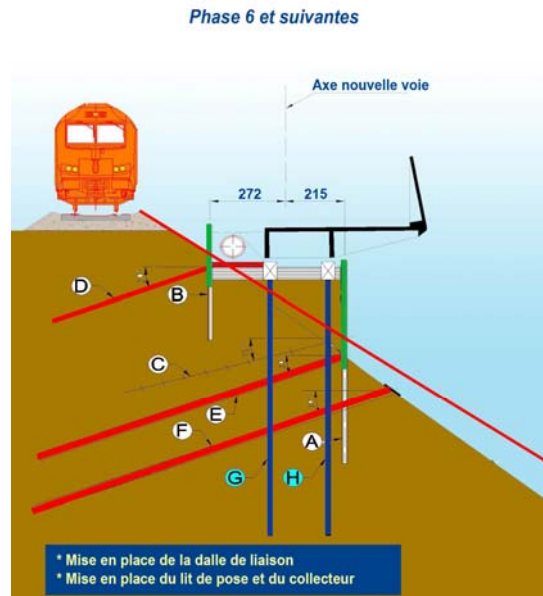
Voor de aanleg van het Gewestelijk Express Netwerk (GEN) rond Brussel, wordt het bestaande spoorwegnet aanzienlijk uitgebreid. Op de verbinding L161 Watermael - Louvain-La-Neuve betekent dit concreet dat naast de bestaande lijn twee bijkomende sporen aangelegd worden op de bestaande spoorwegtaluds. Figuur 1 geeft een typische dwarsdoorsnede van de finale situatie te Ottignies.



Figuur 1. Dwarsdoorsnede : finale situatie GEN te Ottignies (bron TUC RAIL n.v.)

Om deze uitbreidingsconstructie te realiseren is een innovatieve verstevigings- en funderingsconstructie bedacht waarbij tal van geotechnische technieken worden toegepast, o.a. berlinerwanden, mechanische schroefverankering, vernageling, micropalen, enz. Figuur 2 illustreert dit. Voor meer details in verband met de uitvoering en de fasering van deze constructie wordt echter verwezen naar Maekelberg e.a. (2008).

Specifiek voor het verstevigen van de bestaande taluds, die veelal uit ophoogmateriaal bestaan met relatief lage conusweerstand (1 à 3 MPa), wordt de techniek van vernageling aangewend. De nagels worden hierbij uitgevoerd met behulp van holle wapeningsstangen en hoge druk injectie (300 bar) van een water-cement mengsel (jet-grout nagels). Deze jet-grout nagels worden in Figuur 2 aangeduid met de letters E en F.



Figuur 2. Detail versterkings- en funderingsconstructie uitbreidingswerkzaamheden GEN te Ottignies (bron : TUC RAIL n.v.)

Omwillen van het belang voor de spoorlijn, en de specificiteit van het ontwerp, - waarbij men dient te benadrukken dat de taludveiligheid van de bestaande ophoging slechts ± 1.05 bedroeg en de taludveiligheid van de toekomstige constructie licht verhoogd werd tot ongeveer 1.15 -, bestond er bij TUC RAIL de wens om lange termijn metingen uit te voeren van de taludverplaatsingen enerzijds en de krachtswerking over de volledige lengte van de jet-grout nagels anderzijds. Dit met de bedoeling om het bestaande ontwerp te valideren, en desgevallend deze gegevens aan te wenden voor het optimaliseren van toekomstige ontwerpen. Door de combinatie met de voorziene monitoring kan de berekende veiligheid in definitieve situatie bovendien als aanvaardbaar beschouwd worden.

Gezien de gestelde problematiek werd al vrij snel duidelijk dat dit voor wat betreft de krachtswerking in de nagels niet mogelijk is met klassieke meettechnieken. Vandaar dat het WTCB, in het kader van het door het IWT gesteunde TIS project "Speciale FunderingsTechnieken – SFT" (WTCB, 2006-2008), een aantal actoren heeft samengebracht om een innovatieve oplossing uit te werken op basis van de optische vezel technologie.

Hierbij werd er vertrokken van de volgende randvoorwaarden en uitdagingen:

- Het meetsysteem dient na de installatie in de holle sectie van de nagels aangebracht te worden.
- Het meetsysteem dient hierbij rekening te houden met de geometrische beperkingen van de holle wapeningselementen, meer bepaald een interne diameter van 24 mm, met vernauwingen tot 15 mm ter hoogte van de mofverbindingen.

- De instrumentatie moet een gemiddelde meetwaarde geven over een zekere meetbasis, typisch 0.5 m à 1 m (=extensometerprincipe).
- De instrumentatie moet voorzien in een perfecte samenwerking met het wapeningselement.
- De instrumentatie mag de bestaande stijfheid van de nagel zo min mogelijk beïnvloeden.
- Omwille van de moeilijke werkomstandigheden op een talud, dient de plaatsing snel en eenvoudig uitvoerbaar te zijn. Het meetsysteem moet bovendien voldoende robuust te zijn om niet beschadigd te worden tijdens de installatie. De plaatsingseffecten mogen de metingen daarenboven minimaal beïnvloeden.
- De uitlezing van de instrumenten moet snel en eenvoudig zijn.

Op basis van deze randvoorwaarden werd er geopteerd voor een systeem waarbij de verschillende sensoren zich op één drager en/of keten bevinden, en waarbij deze in de holle wapeningselementen worden vastgezet met een water-cement mengsel. Voor wat betreft de optische vezel technologie werd er in overleg met FOS&S geopteerd voor de FBG (Fibre Bragg Grating) optische vezel technologie. Het meetprincipe van de FBG optische vezeltechnologie werd hierbij, volgens het extensometerprincipe, aangepast zodat het geschikt is voor geotechnische toepassingen. Bovendien werd de bescherming van de vezel aangepast, zodat deze niet beschadigd wordt tijdens de installatie in de holle wapeningsstang.

Daarnaast werd er in het labo een samenstelling van een cement-mengsel op punt gesteld waarmee de vezel vastgezet kan worden in de holle wapeningsstang. De samenstelling is hierbij aangepast om enerzijds krimp van het mengsel zoveel als mogelijk te beperken of zelfs te vermijden, en anderzijds om een goede samenwerking tussen de holle wapeningsstang en de FBG sensoren te garanderen.

Tenslotte werd er een systeem gerealiseerd om de optische vezel op (grote) diepte te krijgen, voor te spannen en vast te zetten (via injectie) in de holle wapeningsstang.

Aan de effectieve installatie van het optisch meetsysteem te Ottignies gingen heel wat brainstormings, laboproeven en systeemtesten vooraf.

Een beschrijving van deze voorafgaande proeven, het concept dat uiteindelijk op punt gesteld werd en de effectieve installatie te Ottignies wordt hierna verder toegelicht.

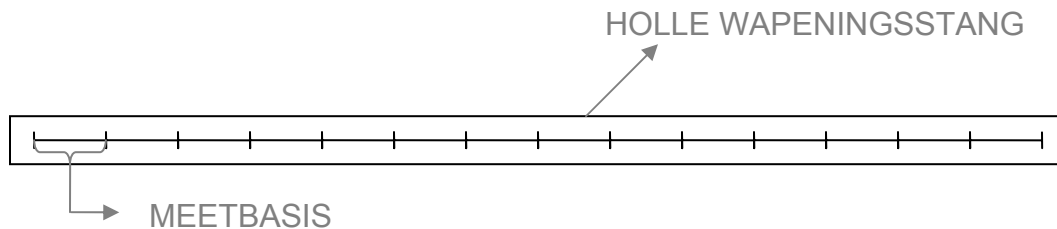
Hierbij dient er nog opgemerkt te worden dat het experimentele proefgedeelte gefinancierd werden door WTCB, FOD-Economie, en FOS&S.

2. Concept en installatieprocedure van optische vezeltechnologie

De doelstelling is het monitoren op lange termijn van de vervormingen van een geïnstalleerde nagel. Naast de geometrische beperkingen (vernauwingen in de

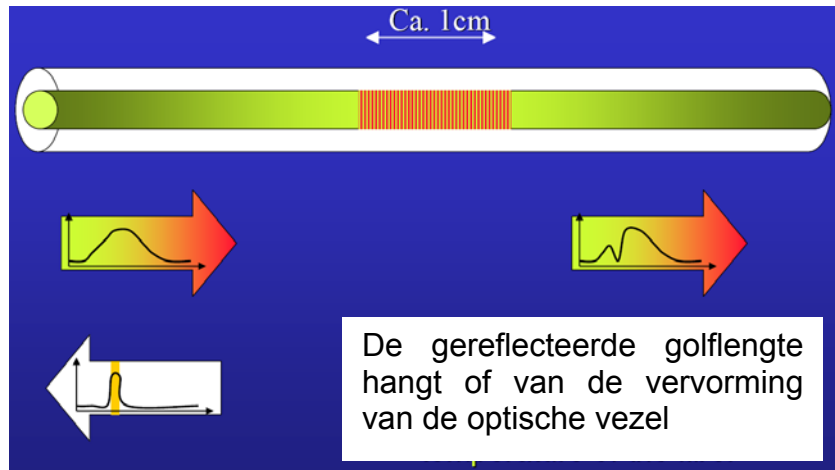
holle wapeningsstangen tot een diameter van 15 mm) dient het meetprincipe tevens eenvoudig te installeren en robuust te zijn.

Op basis van ervaring met andere geotechnische meetsystemen wordt er gekozen voor het extensometerprincipe: verschillende vervormingssensoren worden in de holle wapeningsstang geplaatst. Elke sensor meet een gemiddelde vervorming over een bepaalde meetbasis. De meetbasissen van de sensoren sluiten achter elkaar aan. Door de lengte van de meetbasis en het aantal sensoren te variëren wordt een zo groot mogelijke lengte van de holle wapeningsstang gedekt (Figuur 3). Dankzij dit principe heeft een kleine lokale vervorming van de nagel, ten gevolge van heterogeniteiten in de grond en in het staal, slechts een beperkte invloed op de metingen.



Figuur 3. Schets van de achter elkaar aansluitende meetbasissen in de holle wapeningsstang.

Voor de effectieve meting van de vervormingen wordt geopteerd voor het gebruik van FBG (Fibre Bragg Grating) sensoren, en meer specifiek van het DGT type (Draw Tower Grating). FBG sensoren, waarvan het principe geïllustreerd wordt in Figuur 4, werken op basis van de reflectie van licht. Ze worden verwerkt in een optische vezel. De gebruiker dient een breedbandig lichtsignaal (1520 tot 1600 nm) te sturen doorheen de optische vezel. De FBG sensor reflecteert een bepaalde golflengte van het lichtspectrum. Deze golflengte verandert in functie van de vervorming ter hoogte van de FBG sensor. Door de meting van de verandering van de golflengte van het gereflecteerde licht wordt de vervorming gemeten met een nauwkeurigheid van 1 μ Strain. Deze technologie wordt niet beïnvloed door eventuele elektrische of electromagnetische stralingen, elektrische zwerfstromen (cfr. spoorwegomgeving), noch door de aanwezigheid van water en heeft daarenboven een levensduurte van meer dan 20 jaar.



Figuur 4. Principe van Fibre Bragg Grating sensoren

Het belangrijkste voordeel van FBG sensoren in deze toepassing is de mogelijkheid tot multiplexing. Verschillende FBG sensoren worden namelijk op één enkele optische vezel verwerkt. De verschillende FBG sensoren krijgen dan een andere referentiegolflengte. De vervormingen (ϵ in μStrain) worden dan berekend aan de hand van de verandering van de opgemeten gereflecteerde golflengte ten opzichte van de referentie golflengte:

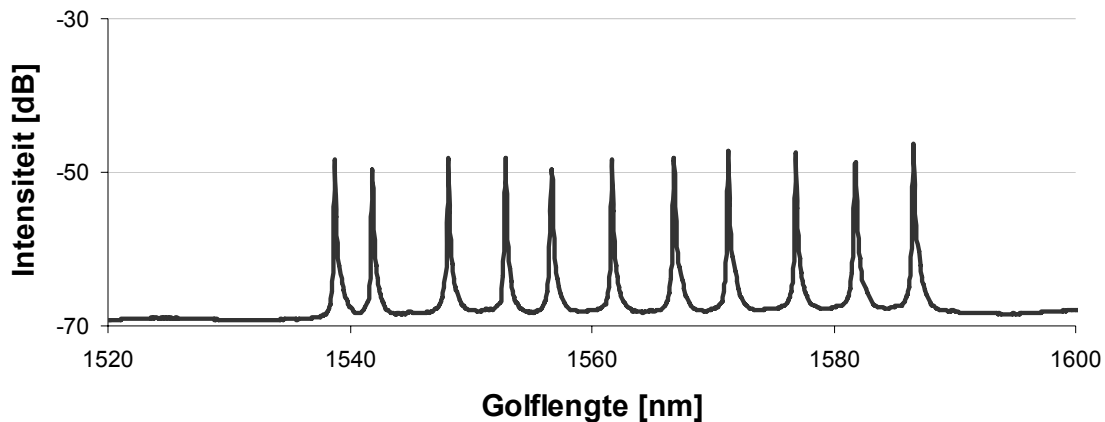
$$\epsilon = \frac{\lambda - \lambda_{ref}}{0.0012} \pm 1 \mu\text{Strain} ,$$

met λ [nm] de opgemeten golflengte en λ_{ref} [nm] de referentiegolflengte. Een toename van ϵ komt overeen met een rek door verlenging.

De verschillende FBG sensoren op éénzelfde optische vezel worden tegelijkertijd opgemeten.

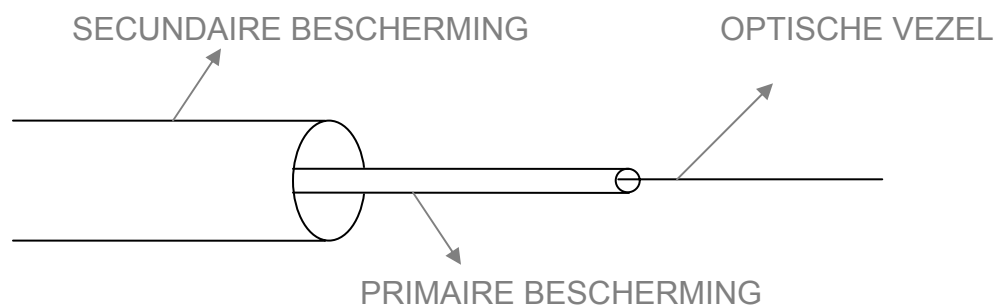
Figuur 5 geeft een voorbeeld van het spectrum van het gereflecteerde licht in een optische vezel met 11 FBG sensoren (nagel 109F, zie verder). De 11 reflectiepieken zijn duidelijk zichtbaar tussen 1538.735 nm (sensor 1) en 1586.531 nm (sensor 11).

Reflectiespectrum - nagel 109F - dag 1

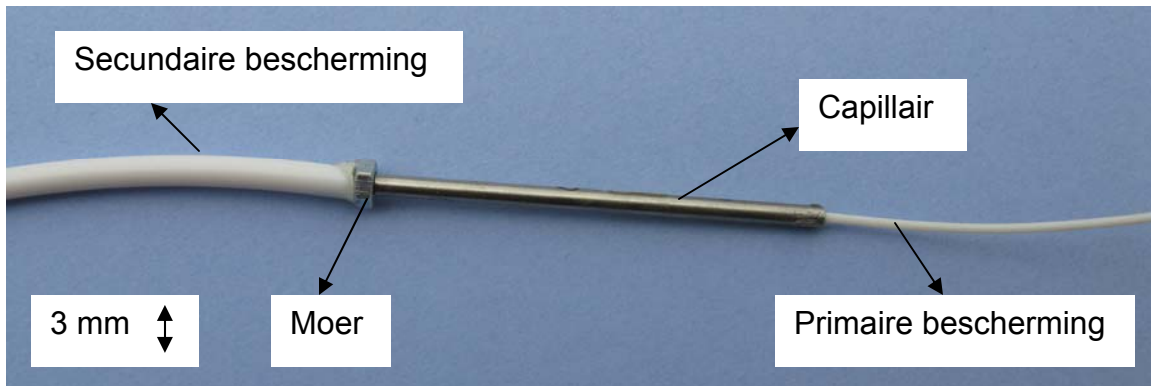


Figuur 5. Het spectrum van het gereflecteerde licht in de optische vezel in nagel 109F op dag 1 (zie volgende paragraaf).

De optische vezel met een diameter van 195 μm wordt beschermd door een primaire bescherming (uitwendige diameter 900 μm) en een secundaire bescherming (uitwendige diameter 3 mm) die over elkaar worden geschoven. De wrijving tussen de primaire en de secundaire bescherming is beperkt, zodat er geen spanningen of vervormingen kunnen worden overgebracht doorheen de bescherming (Figuur 6). Deze bescherming wordt onderbroken ter hoogte van een capillair, die volgens een specifiek procedé verkleefd is met de optische vezel. Op dit capillair is een moer voorzien (Figuur 7), waarmee vervormingen worden overgebracht naar de optische vezel. Met deze configuratie worden de vervormingen enkel via de capillairen overgedragen naar de optische vezel. De positie van de capillairen definiëren aldus de hoger vermelde meetbasissen. Een belangrijk voordeel van het gebruik van FBG sensoren, is de mogelijkheid om meerdere vervormingssensoren (tot meer dan 30) in één keer op te meten aan één enkele optische vezel (totale diameter = 3 mm). Dit is een eenvoudig principe waarbij de uitvoering van de meting (van vele sensoren) weinig tijd vergt.



Figuur 6. Schets van de optische vezel (diameter 195 μm) met een primaire (diameter 900 μm) en een secundaire bescherming (3 mm).



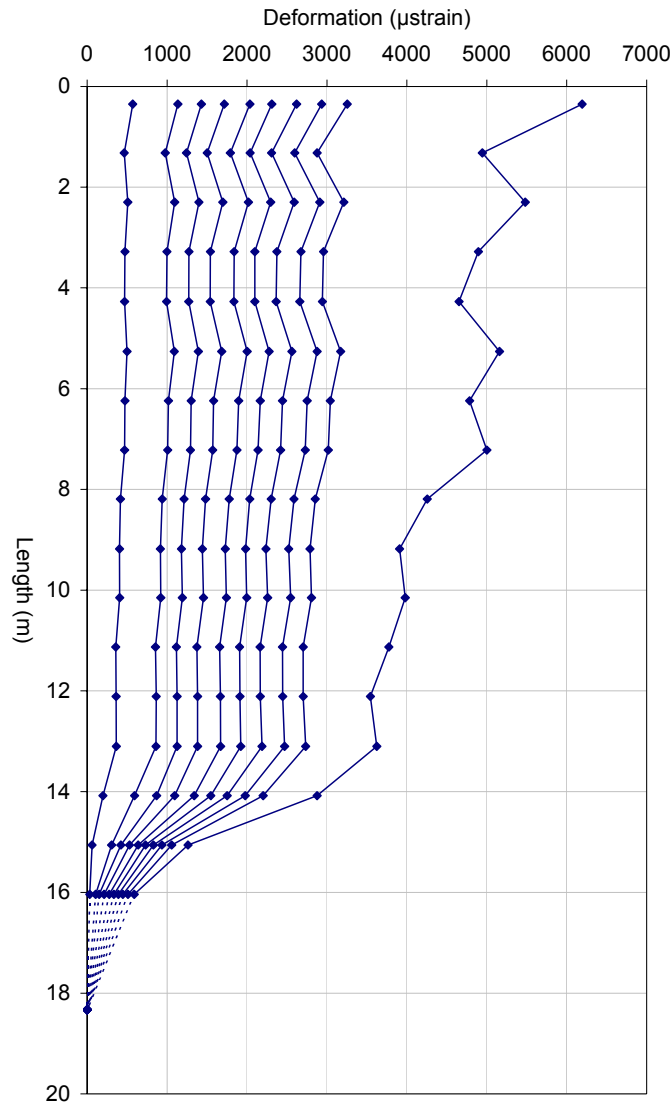
Figuur 7. Foto van een deel van een optische vezel met zicht op de primaire en secundaire bescherming, een capillair en een moer.

Opdat de FBG sensoren dezelfde vervormingen zouden ondergaan als de nagel, wordt de optische vezel (met bescherming, capillair en moer) in de wapeningsstaaf vastgECEmenteerd. Hierbij dienen krimpverschijnselen van het cement-mengsel te worden beperkt zonder de adhesiekrachten tussen het cement-mengsel en de holle wapeningsstang te verliezen.

Ter optimalisatie van het cement-mengsel, werden verschillende labotesten uitgevoerd. Hierbij werden vergelijkbare holle wapeningsstangen (lengte 0.75 m) geïnstrumenteerd met een optische vezel, vastgECEmenteerd met verschillende cement-mengsels. Hierbij werden er verschillende water-cementverhoudingen en additieven beschouwd. Tijdens een uniaxiale trektest werden de vervormingsmetingen met de optische vezel vergeleken met de opgemeten vervormingen aan de hand van klassieke DEMEC punten. Er werd vastgesteld dat het verschil tussen de opgemeten vervormingen kleiner was dan 3% bij hetzelfde belastingsniveau.

Na validatie van het meetprincipe en het optimaliseren van het cement-mengsel in het laboratorium, is de installatieprocedure verder geoptimaliseerd aan de hand van in situ systeemtesten.

Hiertoe is dit principe o.a. ook toegepast bij de instrumentatie van vier holle stang ankers op de proefsite van het WTCB te Limelette, die vervolgens statisch proefbelast werden (WTCB, 2004-2008). Hierbij is gebleken dat de opgemeten vervormingen met de optische vezels vergelijkbaar zijn met de vervormingen opgemeten met klassieke extensometers in andere ankers. Een voorbeeld van de resultaten van een dergelijke systeemtest in een holle stang anker te Limelette is gegeven in Figuur 8. Het betreft hierbij metingen met een optische vezel over een totale lengte van 18 m met in totaal 18 FBG sensoren. De holle stang werd hierbij belast tot voorbij de elasticiteitsgrens van het staal.



Figuur 8. Belastingsproef (herbelasting t.e.m. stap 9) op holle stang anker te Limelette; vervormingsmetingen met optische vezel met 18 FBG sensoren

Voor de installatie van de optische vezels wordt momenteel volgende procedure gevolgd:

1. Na de installatie van de nagel dient de wapeningsstaaf te worden uitgespoeld met water om eventuele aanwezigheid van cement te verwijderen. Afhankelijk van het uitvoeringsprocedé van de nagel, is de wapeningsstaaf inderdaad gedeeltelijk of volledig gevuld met een boorvloeistof op basis van cement. Deze boorvloeistof dient volledig te worden uitgespoeld voordat deze uitgehard is.
2. De optische vezel wordt in de holle wapeningsstaaf geschoven met behulp van een holle injectiebuis uit roestvrij staal (Figuur 9). Hiervoor is het noodzakelijk dat het onderste deel van de optische vezel met tape wordt vastgemaakt aan het onderste deel van de injectiebuis.

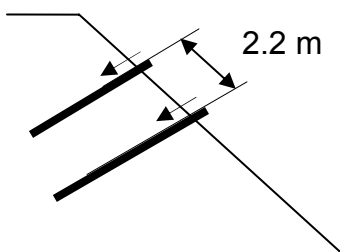
3. Wanneer de injectiebuis, met de optische vezel, zich op diepte bevindt, wordt de optische vezel licht voorgespannen. Dit gebeurt door manueel aan de optische vezel te trekken. De veroorzaakte vervorming (overeenkomstig met ongeveer 1 nm golflengte) wordt real-time gemeten met de FBG sensoren. Het einde van de optische vezel aan de oppervlakte wordt vastgetaped aan de injectiebuis om de voorspanning te behouden.
4. Vervolgens wordt doorheen de injectiebuis een specifiek cement-mengsel geïnjecteerd. Dankzij de opening aan de onderzijde van deze injectiebuis wordt de holle wapeningsstaaf met het cement-mengsel van onderuit gevuld. Hierdoor worden grote luchtinluitsels vermeden.
5. In de uren en dagen die volgen op de installatie van de optische vezel wordt het niveau van het cement-mengsel gevolgd en eventueel bijgevuld. Het gebeurt namelijk soms dat een beperkt deel van het cement-mengsel uit de holle wapeningsstaaf vloeit.



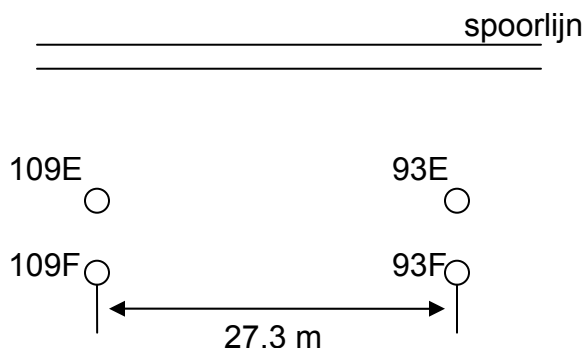
Figuur 9. Installatie van optische vezel en injectiesysteem in een jet-grout nagel te Ottignies.

3. Case study: in situ lange termijn monitoring met optische vezel technologie

Zoals aangegeven in de inleiding, worden er te Ottignies nagels voorzien ter stabilisatie van het spoorwegtalud. Vier nagels worden voorzien van een optische vezel: nagels 93E, 93F, 109E en 109F. De nagels 109E en 109F bevinden zich onder elkaar met een tussenafstand van 2.2 m (Figuur 10). De nagels 93E en 93F bevinden zich tevens onder elkaar met een tussenafstand van 2.2 m (gemeten volgens de helling van de talud). De afstand tussen nagels 93E en 109E en tussen nagels 93F en 109F bedraagt 27.3 m (gemeten volgens de richting van het spoor, zie Figuur 11).



Figuur 10. Schets van de inplanting van de nagels (profielzicht) met de aanduiding van de gedefinieerde dieptemeting.



Figuur 11. Schets van de inplanting (bovenaanzicht) van de geïnstrumenteerde nagels (O).

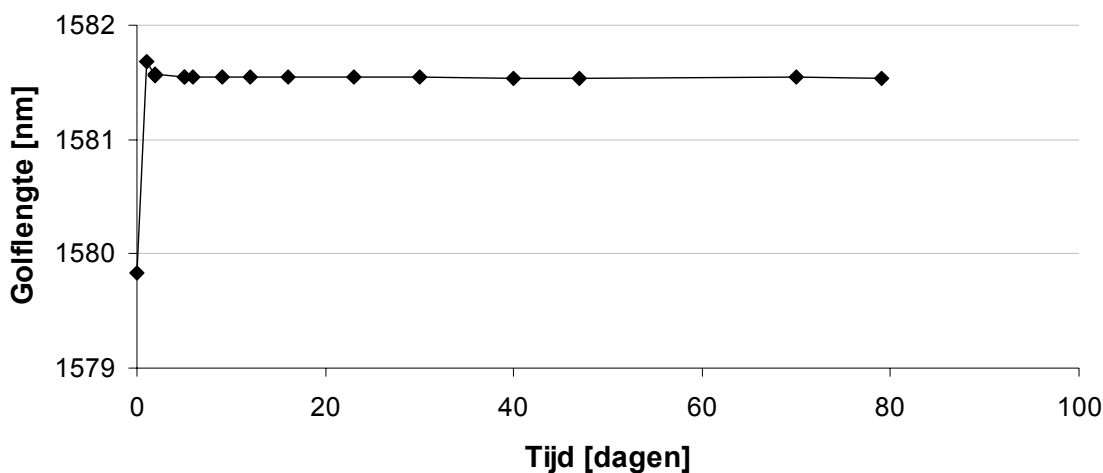
De lengte van de nagels bedragen 11.9 m (nagels 93E en 109E) en 14.6 m (nagels 93F en 109F).

In elke nagel bevindt zich één optische vezel die de relatieve vervorming van de nagel volgens het extensometerprincipe opmeet. In de optische vezel zitten namelijk meerdere FBG-sensoren verwerkt, die elk de gemiddelde vervorming over een meetbasis van 1.03 m volgt. Tabel 1 geeft de diepteposities van de meetbasissen van de aanwezige FBG-sensoren in de verschillende nagels.

Tabel 1. Overzicht van de dieptepositie van de meetbasissen van de FBG-sensoren in nagels 93E, 93F, 109E en 109F.

	Nagel 93E	Nagel 93F	Nagel 109E	Nagel 109F
Sensor 1	0.41 — 1.44	0.21 — 1.24	0.06 — 1.09	2.55 — 3.58
Sensor 2	1.44 — 2.47	1.24 — 2.27	1.09 — 2.12	3.58 — 4.61
Sensor 3	2.47 — 3.50	2.27 — 3.30	2.12 — 3.15	4.61 — 5.64
Sensor 4	3.50 — 4.53	3.30 — 4.33	3.15 — 4.18	5.64 — 6.67
Sensor 5	4.53 — 5.56	4.33 — 5.36	4.18 — 5.21	6.67 — 7.70
Sensor 6	5.56 — 6.59	5.36 — 6.39	5.21 — 6.24	7.70 — 8.73
Sensor 7	6.59 — 7.62	6.39 — 7.42	6.24 — 7.27	8.73 — 9.76
Sensor 8	7.62 — 8.65	7.42 — 8.45	7.27 — 8.30	9.76 — 10.79
Sensor 9	8.65 — 9.68	8.45 — 9.48	8.30 — 9.33	10.79 — 11.82
Sensor 10	9.68 — 10.71	9.48 — 10.51	9.33 — 10.36	11.82 — 12.85
Sensor 11		10.51 — 11.54	10.36 — 11.39	12.85 — 13.88
Sensor 12		11.54 — 12.57		
Sensor 13		12.57 — 13.60		

Nagel 109F - Sensor 10



Figuur 12. Evolutie van de metingen van de golflengte [nm] van sensor 10 in nagel 109F in functie van de tijd [dagen] na installatie (installatie = dag 1).

Figuur 12 geeft de evolutie van de golflengte [nm] van sensor 10 in nagel 109F. De golflengte op dag 0 is de geconcipeerde golflengte van de sensor (in rust). De weergegeven golflengte op dag 1 is gemeten na de installatie van de optische vezel. Het verschil tussen de golflengte op dag 0 en dag 1, is veroorzaakt door de manueel aangelegde voorspanning tijdens de installatie. In de komende dagen verlaagt de golflengte terug, hetgeen het gevolg is van hydratatiekrimp van het cement-mengsel. Na 3 dagen is 90% van de vervorming ten gevolge van krimp reeds opgetreden. Na ongeveer 30 dagen zijn de variaties van de golflengte gestabiliseerd. Indien de referentiemeting van de FBG sensoren na 3 dagen wordt uitgevoerd, dan kunnen deze sensoren gebruikt

worden voor lange termijnmetingen met een relatieve nauwkeurigheid van 25 μ Strain (ter vergelijking: indien de referentiemeting wordt uitgevoerd na 30 dagen, is de relatieve nauwkeurigheid voor lange termijnmetingen 10 μ Strain)

De vervormingsmetingen in de nagels te Ottignies worden momenteel op regelmatige tijdstippen opgemeten. Het is in elk geval de bedoeling om vanaf heden deze metingen te blijven uitvoeren tot en met de ingebruikname van deze nieuwe spoorweginfrastructuur.

4. Conclusie

In deze bijdrage werd een overzicht gegeven van de laboproeven en de systeemtesten die geresulteerd hebben in het op punt stellen van een meetsysteem op basis van optische vezeltechnologie en dit ten behoeve van de lange termijn monitoring van de vervormingen van jet-gout nagels te Ottignies. Deze ontwikkeling vond plaats naar aanleiding van een specifieke vraag van TUC RAIL en in het kader van het door het IWT gesteunde project TIS-Speciale FunderingsTechnieken (www.tis-sft.wtcb.be).

Het systeem dat op punt gesteld werd leidt tot een betrouwbare oplossing voor het meten van vervormingen in geotechnische constructies. Hierbij dient in het bijzonder opgemerkt te worden dat deze technologie o.a. het zeer grote voordeel biedt dat er op één drager met zeer beperkte afmetingen zeer veel sensoren geïntegreerd kunnen worden.

De auteurs zijn er van overtuigd dat dit meetsysteem naar de toekomst toe een groot potentieel biedt. Vandaar dat er momenteel op basis van deze ervaringen de nodige stappen ondernomen worden om het meetsysteem nog te verfijnen en te verbeteren. Hierbij is het vooral de bedoeling om een gestandaardiseerd systeem te ontwikkelen dat op een economische en eenvoudige manier aangewend kan worden in verscheidene geotechnische en/of andere civieltechnische constructies.

Zeker in het kader van het optimaliseren van de huidige ontwerpmethodes en/of het stimuleren van nieuwe en meer economische ontwerpmethodes, zoals bvb. de Observational Method, kan dit een grote toegevoegde waarde leveren.

5. Referenties

Maekelberg, W., Bollens, Q., Verstraelen, J., Theys, F., De Clercq, E., Maertens, J. Practical Experience of TUC RAIL with Ground Anchors and Micro-piles, proceedings of the International Symposium "Ground Anchors" – Volume 1, 14.05.2008, Brussels

WTCB 2006-2008, Thematische Innovatiestimulering – Speciale FunderingsTechnieken, TIS-SFT, Project gesubsidieerd door het IWT, project nr. 050586

WTCB 2004-2008. Grondankers – opstellen van een genormaliseerde berekeningsmethode in functie van de uitvoeringswijze. Onderzoeksproject gesubsidieerd door het FOD Economie & NBN, Conventies CC CCN-119 & CC CCN-169