

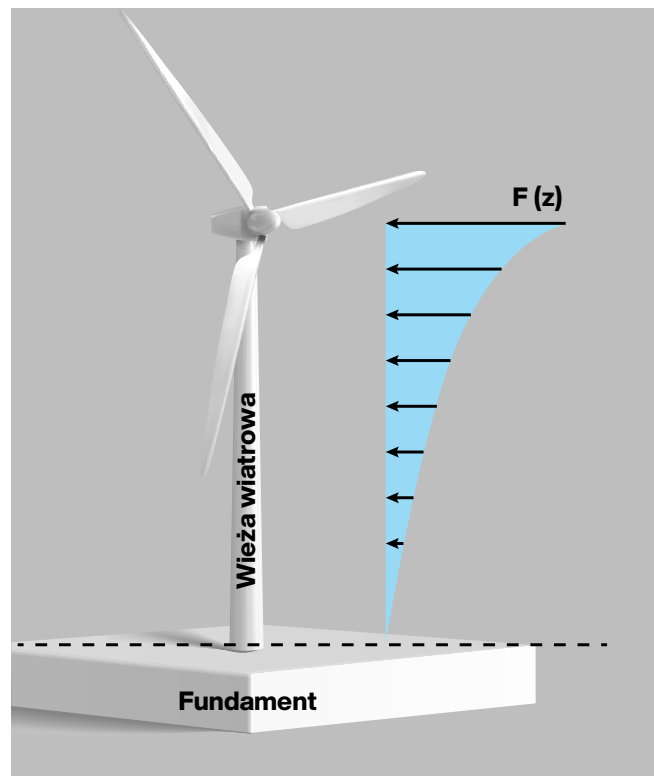
Przyszłość technik
monitorowania stanu
technicznego konstrukcji -
**okiełznaj moc
światłowodów**

Duńskie studium przypadku

Niski koszt, szybki czas zrealizowania budowy i jednocześnie jak najwyższy poziom bezpieczeństwa, a wszystko to jednocześnie – klasyczny szatański trójkąt napotykanym przez każdego generalnego wykonawcę. Wraz ze wzrostem oczekiwań inwestorów rośnie też presja wywierana na wykonawców. Niezależnie od tego, czy realizowany projekt to farma wiatrowa, most czy też wieżowiec, **zarówno inwestorzy i firmy wykonawcze w tym samym stopniu muszą bardzo uważnie wybierać stosowane technologie, tak aby zmaksymalizować efektywność i bezpieczeństwo**, i to nie tylko podczas samej fazy budowy, ale również (być może nawet w większym stopniu) w trakcie eksploatacji, przez dziesiątki lat od oddania inwestycji.

Dlatego też **dla każdego wymagającego projektu wybór systemu monitorowania staje się absolutnie krytyczną decyzją**. Dla większości budowli, najistotniejszym parametrem do monitorowania są naprężenia – wystarczy wziąć pod uwagę tamy, wiadukty, wieżowce i ich fundamenty, czy też wiatraki. Od wszystkich tych struktur oczekiwane jest zachowanie stabilności mechanicznej w bardzo szerokim zakresie obciążeń, z tego też powodu monitorowanie naprężeń w elementach konstrukcyjnych (ang. SHM – *Structural Health Monitoring*) jest tak istotne. Tradycyjne techniki monitorowania naprężeń wykorzystywały czujniki strunowe i tensometry, które (jakkolwiek sprawdzone w boju) cechowały się wieloma niedoskonałościami, w tym przede wszystkim ograniczoną rozdzielczością przestrzenną (jako czujniki dyskretne), czy też długim czasem odpowiedzi. Ograniczenia te zawsze pociągały za sobą kompromisy – jeżeli

czujnik jest dyskretny jak można mieć pewność, że umieszczony został dokładnie nad lokalizacją przyszłego potencjalnego pęknięcia? Jeśli układ pomiarowy jest powolny jak monitorować np. odpowiedź konstrukcji na podmuchy wiatru? Ile niezależnych kanałów pomiarowych należałoby zaimplementować, aby uzyskać przynajmniej przybliżone monitorowanie w czasie rzeczywistym, przy jednoczesnym zachowaniu zadowalającej rozdzielczości przestrzennej?

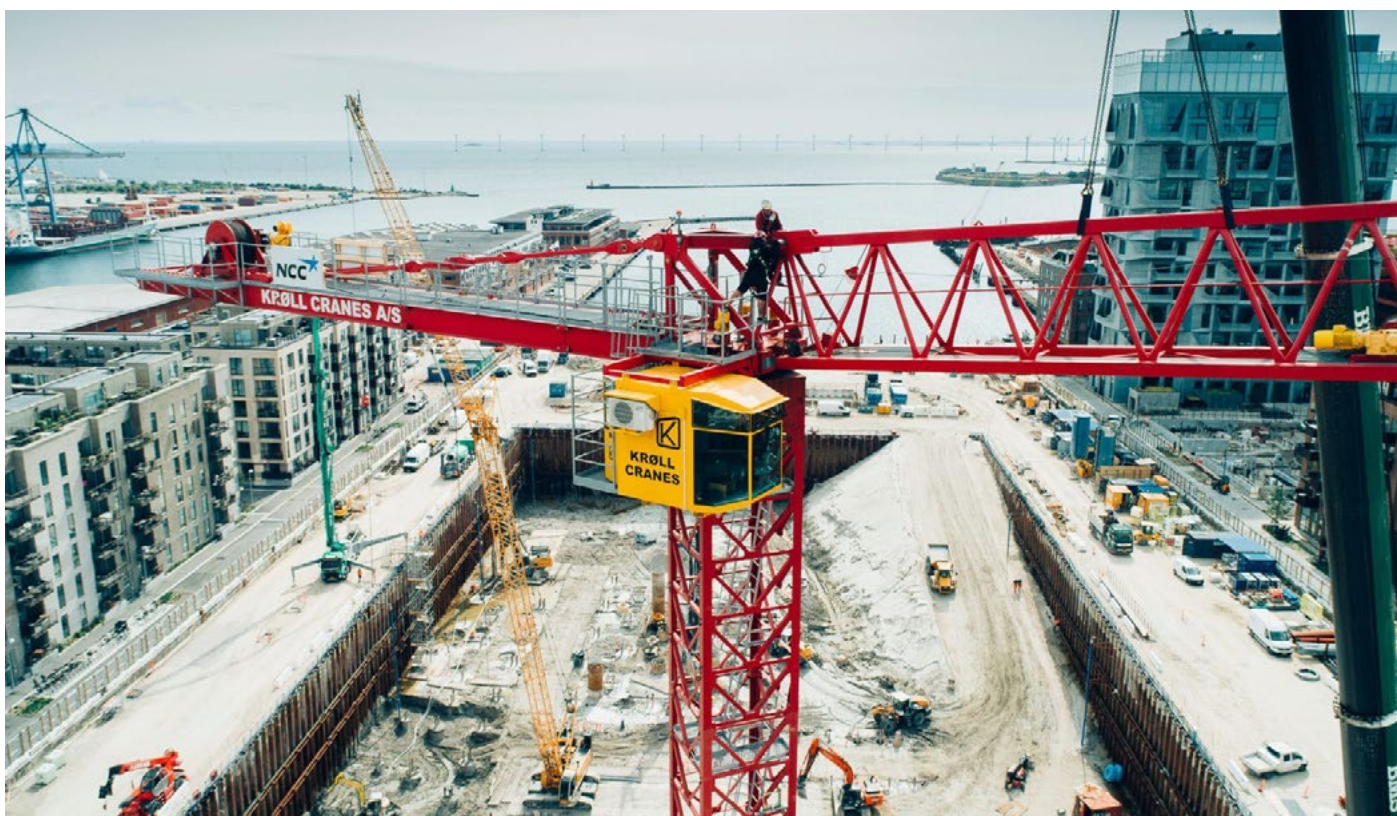


Im wyższa struktura tym istotniejsze staje się monitorowanie jej obciążenia

Na szczęście wszystkie powyższe ograniczenia można w dość łatwy sposób pokonać wykorzystując optyczne techniki monitoringu oparte o światłowody.

W metodach optycznych światłowód staje się głowicą sensoryczną, przytwierdzoną do monitorowanego elementu, bądź też umieszczoną w monitorowanym środowisku. Umieszczony na dalekim końcu interogator (pomiarowe urządzenie aktywne) sprawdza stan światłowodu z niemal dowolną częstotliwością, wykrywając w ten sposób zmiany mierzonej wielkości optycznej, które z kolei kodują informację na temat zmiany powiązanej z nią wielkości mechanicznej. **W tym celu może być wykorzystywanych kilka zjawisk optycznych, najczęściej jest to wymuszone rozpraszanie Brillouina (ang. SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*), wymuszone rozprasa-**

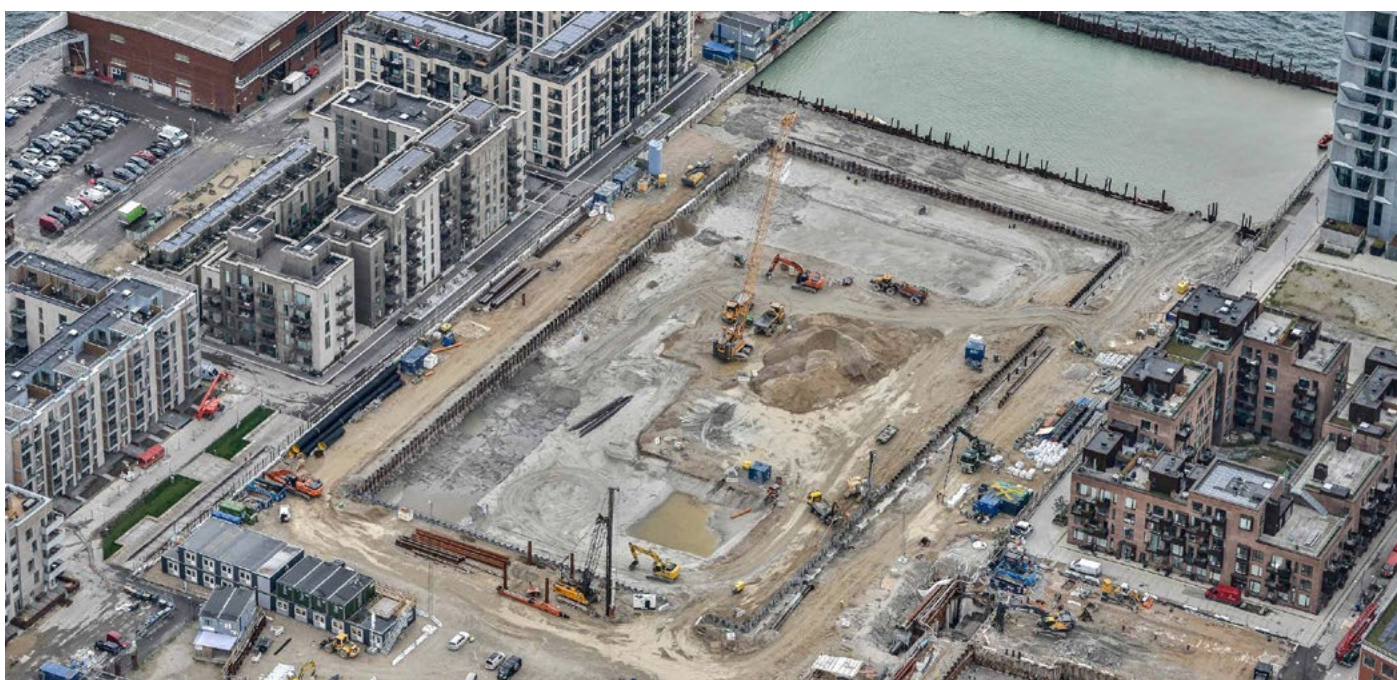
nie Ramana (ang. SRS – *Stimulated Raman Scattering*), bądź też rozpraszanie Rayleigha. Wszystkie te zjawiska mogą być wykorzystane do uzyskania praktycznych czujników rozproszonych, a z mechanicznego punktu widzenia ich odpowiedź jest praktycznie natychmiastowa. Co więcej, optyczne czujniki światłowodowe są w pełni pasywne i w naturalny sposób całkowicie odporne na zakłócenia elektromagnetyczne, a dodatkowo mogą być w pełni dielektryczne, co ma znaczenie dla pracy w wielu trudnych środowiskach. **Nie tylko naprężenia, ale również temperatura może być mierzona przy ich wykorzystaniu.**



źródło: www.kronlobsbassinet.dk

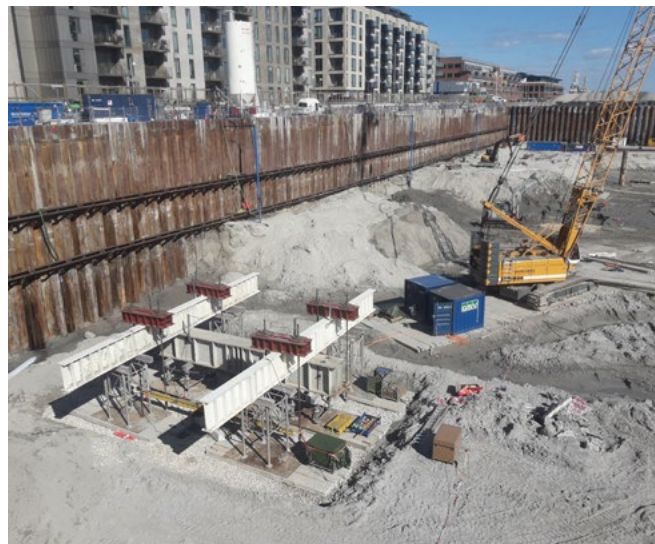
W miarę jak optyczne metody monitoringu stają się szerzej znane, coraz więcej firm budowlanych i inwestorów chcących być liderami w swojej branży zaczyna je stosować w praktyce. W niniejszym artykule są przedstawione wyniki jednej z tego typu praktycznych implementacji. Generalnym wykonawcą w projekcie była firma **NCC Denmark A/S**,

natomiast fundamenty zostały wykonane przez skandynawską firmę **Hercules Fundering**, specjalizującą się w inżynierii geotechnicznej. Budowa to wielokondygnacyjny budynek mieszkalno-usługowy z czteropiętrowym parkingiem podziemnym, zlokalizowany w Kopenhadze, nad samym brzegiem morza.



źródło: www.kronlobsbassinet.dk

Ze względu na bardzo specyficzne warunki budowy, głębokie fundamenty składały się z kilkuset wierconych pali fundamentowych, wykonywanych z platformy umieszczonej 10 metrów poniżej poziomu morza. Oczywiście wykonanie w takich warunkach fundamentów (w bezpośredniej bliskości otwartego morza) wymagało bardzo specjalistycznego sprzętu i *know-how*. Pozwala to sobie uświadomić jak wymagający był opisywany projekt i dlatego monitorowanie stanu konstrukcji było w tym przypadku tak istotne. **W celu zweryfikowania (i potencjalnej optymalizacji) projektu fundamentów wybrane pale fundamentowe zostały uzbrojone w kable światłowodowe, a następnie poddane badaniom obciążeń statycznych.** Do pomiaru rozkładu obciążeń w badanych palach została wybrana metoda pomiarowa bazująca na rozpraszaniu Rayleigha.



źródło: J. Kania, CP Test



źródło: A. B. Jørgensen, CP Test

Kable światłowodowe zastosowane w opisywanym projekcie zostały wstępnie przymocowane do prętów zbrojeniowych, a następnie wraz z konstrukcją zbrojoną opuszczone od odwiertu i zalane betonem. Należy podkreślić, że **kable stosowane w celu monitoringu naprężeń muszą cechować się bardzo specyficzną konstrukcją, zupełnie odmienną od kabli telekomunikacyjnych**, dla których to podstawowym wymogiem jest odsprężnienie w jak największym stopniu włókna od czynników zewnętrznych. Tymczasem w przypadku kabli czujnikowych konieczne jest, aby naprężenie (rozciąganie lub ściskanie) jakiemu poddawana jest powłoka zewnętrzna było przeniesione na włókno w sposób liniowy i kontrolowany, tak aby siły zewnętrzne powodowały przewidywalne zmiany w charakterystyce optycznej. Zaprojektowanie i wytworzenie konstrukcji kabla, który w wiarygodny sposób mierzy naprężenia nie jest więc łatwym zadaniem. Z tego też powodu pojawiają się czasem wątpliwości co do porównywalności wyników pomiarów uzyska-

nych optycznymi metodami SHM. Dlatego też, w celu porównania uzyskanych wyników, w przypadku diskutowanego projektu dwa różne typy kabli (od różnych producentów) zostały zastosowane do monitorowania pali fundamentowych. Jeden z kabli to szeroko znany i stosowany w zastosowaniach SHM kabel do pomiaru naprężeń, drugi natomiast to kabel produkcji Fibrain, mierzący zarówno naprężenia, jak i temperaturę.

Obydwa typy kabli były przymocowane do tego samego pręta zbrojeniowego, aby mieć pewność, że pracują dokładnie w tym samych warunkach. Jak wspomniano, zbrojenie zostało następnie zalane w palach fundamentowych, o głębokości 7 m. Kabel pierwszego typu zawierał jedno włókno, do pomiaru naprężeń, natomiast kabel Fibrain to konstrukcja dwuwłóknowa (w pełni dielektryczna), gdzie jedno włókno pomiarowe służy do pomiaru naprężeń, a drugie do pomiaru temperatury.

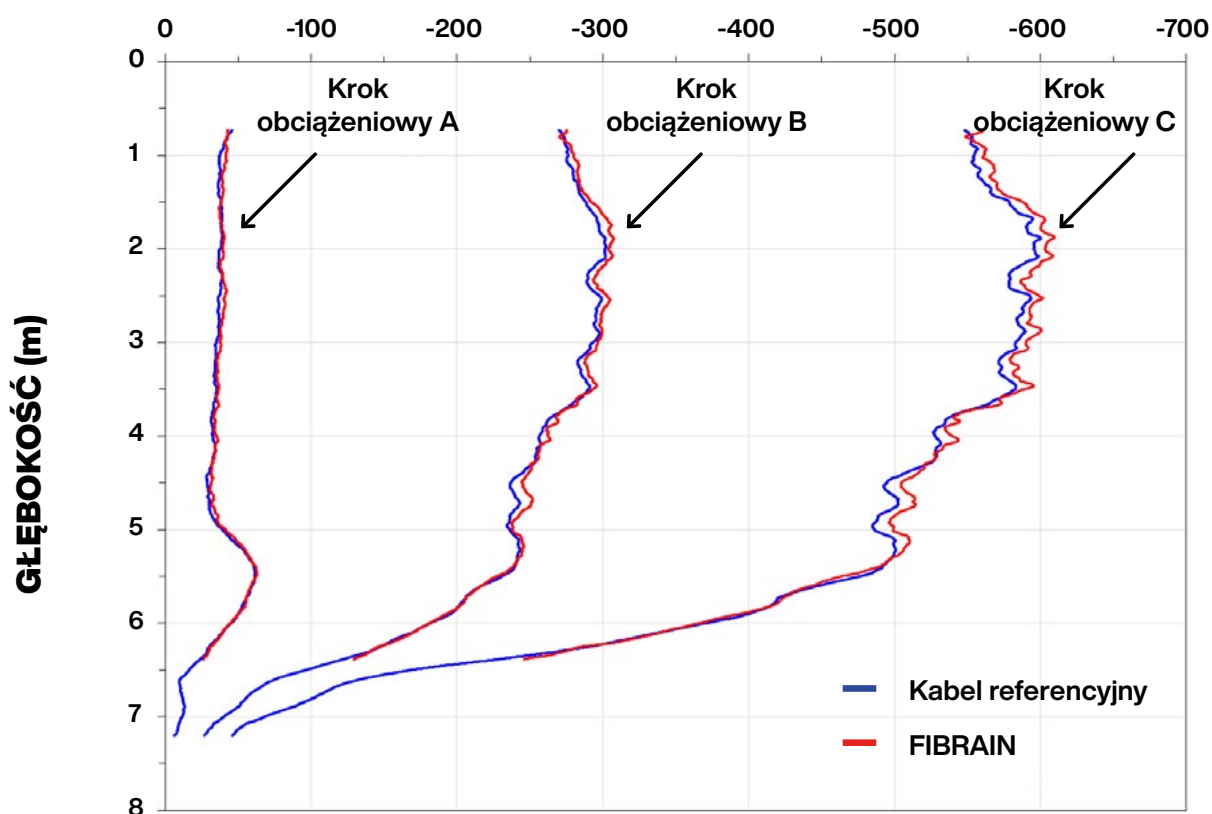
Oprzyrządowanie pali, jak również statyczne próby obciążeniowe (łącznie z planowaniem testów, przygotowaniem, archiwizacją i analizą danych, a następnie raportowaniem) zostały wykonane przez specjalistyczne firmy **cp test A/S** (Dania), oraz **DMT Gründungstechnik GmbH** (Niemcy). Pomiaru zostały wykonane przy użyciu instrumentu Luna ODiSI-B.

W celu porównania obydwu kabli, badane pale zostały poddane obciążeniom o różnych wartościach i wyniki pomiarowe były notowane dla każdego z wartości obciążeń. Kable od obydwu producentów były monitorowane po kolei, bezpośrednio po sobie, tak aby wyeliminować efekt potencjalnego pełzania gruntu. Wykres poniżej przedstawia zmierzone wzdłuż kabla (a co za tym idzie pala) rozkłady naprężeń dla obydwu typów kabli, dla trzech wybranych wartości obciążenia.



źródło: A. B. Jørgensen, CP Test

NAPRĘŻENIE ($\mu\epsilon$)



źródło: J. Kania, CP Test

Jak można zauważyć, odpowiedzi obydwu kabli są niemalże identyczne (przy okazji widać również, że kabel Fibrain był nieco krótszy i nie sięgał końca pala, gdzie naprężenia rozpraszają się w gruncie). Warto zwrócić uwagę, że żadne dodatkowe skalowanie wyników

nie było wymagane w celu uzyskania tak dobrej zgodności wyników, tak więc uzyskane rezultaty potwierdzają dojrzałość optycznych technik SHM, jak również kompatybilność pomiędzy kablami od porównywanych w obecnym artykule producentów.