

Światłowody w monitoringu zapór ziemnych i wałów przeciwpowodziowych

Fiber optic sensor in the monitoring of earth dams and flood banks

Jerzy KRYWULTⁱ, Łukasz KRYWULTⁱⁱ, Adam KOZŁOWSKIⁱⁱⁱ

Streszczenie. Technika pomiarowa wykorzystująca światłowody jako sensory (czujniki) do liniowego pomiaru temperatury jest już na tyle rozwinięta, że możliwe jest jej użycie do monitorowania obiektów hydrotechnicznych. W artykule przedstawiono zasadę działania systemu pomiarowego. Omówiono główne zalety metody pomiarowej. Pokazano również przykłady możliwych instalacji w różnych warunkach obiektowych. Wskazano na istotne znaczenie właściwego zlokalizowania światłowodu i jego konstrukcji, dla uzyskania przydatnych do oceny stateczności wyników pomiarów.

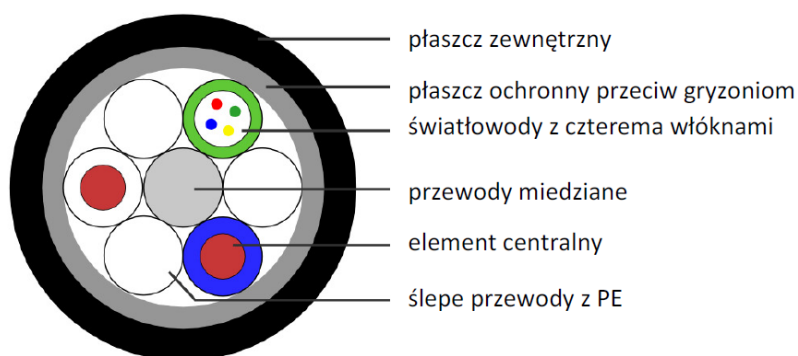
Abstract. Measuring technique using fiber-optic sensors for linear temperature measurement turned out to be reliable enough to be used for monitoring of hydrotechnical facilities. The paper presents the idea and action of a fiber-optic based measurement system. Basic features and advantages of the system are described as well as suggested modes of installation in various conditions. The importance of optical fiber construction and its location for obtaining reliable and useful stability data was also highlighted.

1. Wprowadzenie

Światłowody, wykorzystywane dotychczas na obiektach hydrotechnicznych do transmisji sygnałów, okazały się najmniej zawodnym elementem konwencjonalnych systemów pomiarowych. Ich odporność na wylądowania atmosferyczne spowodowała, że w kręgach specjalistów wypowiedana jest opinia: „Im mniej miedzi, a więcej światłowodów, tym bardziej niezawodny system monitorowania zapory”. Układ rozproszonych czujników lub grup czujników, skomunikowany światłowodami z serwerem, to gwarancja wysokiej niezawodności systemu pomiarowego.

Postęp techniczny w dziedzinie metod pomiarowych pozwoli w najbliższych latach znacznie udoskonalić sposoby monitorowania obiektów hydrotechnicznych, głównie wałów przeciwpowodziowych i zapór ziemnych. Będzie to możliwe dzięki światłowodowej technice pomiarowej, a dokładniej, dzięki technice pomiarowej wykorzystującej kabel światłowodowy jako liniowy czujnik pomiarowy.

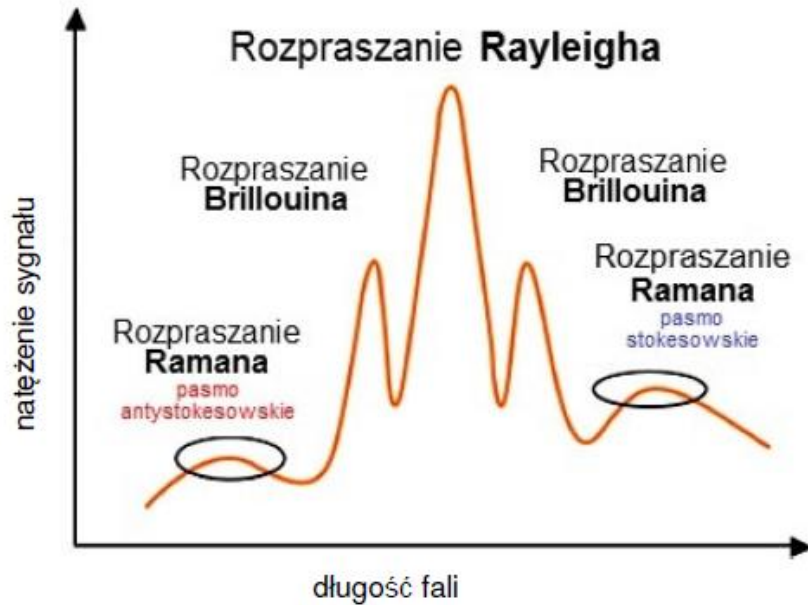
Kabel światłowodowy (rys.1.) wnosi do techniki pomiarowej nową jakość. W miejsce pomiarów punktowych pojawia się możliwość prowadzenia pomiarów liniowych. Zamiast punktowo rozmieszczonych piezometrów, możliwy jest liniowy pomiar na całej długości zapory. Nowoczesny system pomiarowy - oparty na kablu światłowodowym - mierzy średnią temperaturę na każdym 1-metrowym odcinku kabla i w ten sposób możliwe jest wykrywanie lokalnych przecieków, nieszczelności, a przede wszystkim ustalenie położenia krzywej filtracji.



Rys.1. Przekrój kabla pomiarowego

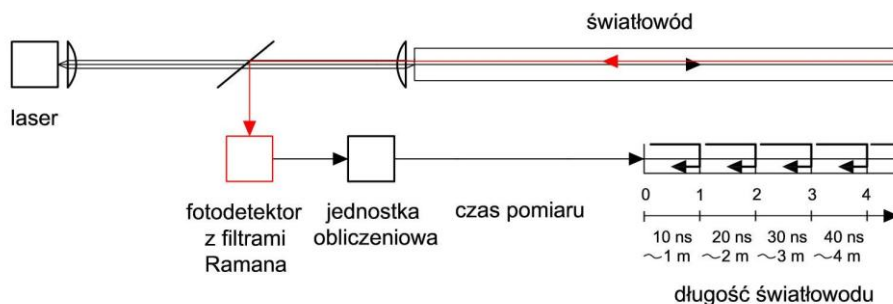
2. Zasada działania systemu pomiarowego

Wysokiej klasy światłowody jednomodowe pozwalają przekazywać sygnał na odległość do 100 km. Transmisja sygnału na większe odległości bez dodatkowego wzmocnienia nie jest możliwa, bo na przeszkodzie stoi zjawisko rozproszenia światła. Ta istotna przeszkoda w transmisji sygnałów stanowi podstawę pomiaru temperatury za pomocą kabla sensorycznego. Zjawisko rozproszenia światła w światłowodzie tłumaczy mechanika kwantowa, a w uproszczeniu można je przedstawić następująco: Światło generowane przez laser to strumień cząstek elementarnych, czyli fotonów. Rdzeń światłowodu to z kolei struktura molekularna, składająca się z powiązanych ze sobą atomów. Strumień fotonów przenikających przez strukturę molekularną rdzenia napotyka na swojej drodze atomy. W tej sytuacji musi dochodzić do kolizji fotonów z atomami, a ściślej z elektronami. Przebieg takiej kolizji jest następujący: elektron przejmuje energię fotonu w wyniku czego podnosi się na wyższy poziom energetyczny, a foton zanika. Ten proces jest odwracalny. Elektron spada na niższy poziom energetyczny, czemu towarzyszy emisja wtórnego fotonu. Cechą wspólną wszystkich wyemitowanych wtórnie fotonów jest ich swobodne ukierunkowanie, czyli rozproszenie. Część, w liczbie 1 na 10^7 wraca do punktu wyjścia, gdzie podlega analizie. Rozróżnia się trzy rodzaje zderzeń. Najliczniejsze to takie, kiedy elektron po zderzeniu wraca na swój pierwotny poziom energetyczny, a emitowany wtórnie foton ma energię taką samą, jak foton pierwotny, co oznacza taką samą długość fali. Ten rodzaj rozproszenia nosi nazwę rozproszenia Rayleigha. Mniej liczne, to rozproszenie kiedy elektron spada na poziom energetyczny wyższy lub niższy od pierwotnego, a emitowane wtórnie fotony mają energię odpowiednio mniejszą lub większą od fotonu światła pierwotnego. Noszą one nazwę rozproszenia stokesowskiego i antystokesowskiego, albo łącznie rozproszenia Ramana. Wykres widma światła rozproszonego przedstawia rys.2.



Rys. 2. Widmo światła rozproszonego

Ponieważ temperatura materii to pochodna energii, czyli ruchu cząsteczek, rozproszenie światła, głównie rozproszenie Ramana, ma w każdej temperaturze inny charakter. Pozwala to określić temperaturę odcinka światłowodu z dokładnością do $0,3^{\circ}\text{C}$. Analizę światła rozproszonego prowadzi się w tzw. oknach czasowych odpowiadających czasowi powrotu światła z odległości analizowanego odcinka światłowodu. Stosuje się standardowo odcinki pomiarowe o długości 1m, niekiedy 0,5 m, a w wyjątkowych przypadkach, przy granicznych długościach kabla pomiarowego dochodzących do 20 km – 2 metry. Ogólną zasadę działania systemu pomiarowego obrazuje rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego

Opisaną metodę pomiarową można uznać za podstawową w zakresie pomiaru temperatury. W przypadkach szczególnych, przy większej długości kabli pomiarowych oraz do pomiaru odkształceń, wykorzystywane jest rozproszenie Brillouina. Jego widmo pokazano również na rys. 2. System pomiarowy wykorzystujący efekt stymulowanego rozproszenia Brillouina (Stimulated Brillouin Scattering - SBS) w światłowodach szklanych, umożliwia rejestrację zmian naprężeń i temperatury na odcinkach dochodzących nawet do 20 km i z dokładnością lokalizacji wynoszącą 2-3 m.

SBS opisuje wzajemne oddziaływanie w rdzeniu światłowodu dwóch wiązek światła laserowego o minimalnie różnych częstotliwościach fali, wprowadzanych w przeciwnych kierunkach do obu końców światłowodu. Wskutek tego oddziaływania zostaje wzbudzona ruchoma fala akustyczna w rdzeniu światłowodu, modulująca jego współczynnik załamania światła. Modulacja ta, prowadzi

do rozproszenia, odbicia w przeciwnym kierunku wiązki światła laserowego o większej częstotliwościach fali. Wskutek efektu Dopplera (odbicie fali optycznej na ruchomej fali akustycznej) obserwujemy, podobnie jak podczas pomiaru radarem prędkości samochodów, zmianę częstotliwości fali wiązki odbitej. Rejestrowane, charakterystyczne przesunięcie częstotliwości (Brillouin Frequency Shift - BFS) jest funkcją liniową naprężeń i temperatury rdzenia światłowodu, co wykorzystuje się do wyznaczania obu wspomnianych wielkości fizycznych.

3. Praktyczne wykorzystanie w hydrotechnice

Nowoczesne czujniki – kable światłowodowe - mogą być z powodzeniem wykorzystywane do monitoringu obiektów hydrotechnicznych. Jednakże sposoby wykorzystania techniki pomiarowej do monitorowania zapór ziemnych i wałów przeciwpowodziowych będą z konieczności odmienne. Wynika to nie tyle z różnicy konstrukcji tych obiektów co z odmiennych warunków, w których one pracują. Zapora spiętrza wodę i z zasady pozostaje pod jej działaniem przez cały okres eksploatacji. Wał przeciwpowodziowy, zlokalizowany w znacznej odległości od koryta rzeki, pozostaje suchy przez większą część roku. Kontakt z wodą uzyskuje dopiero podczas wezbrania powodziowego. Ta różnica powoduje, że w obu przypadkach konieczne jest zastosowanie innej metodyki badań, a najczęściej również kabli pomiarowych o innej konstrukcji. W tym zakresie nie bez znaczenia będzie również czynnik ekonomiczny.

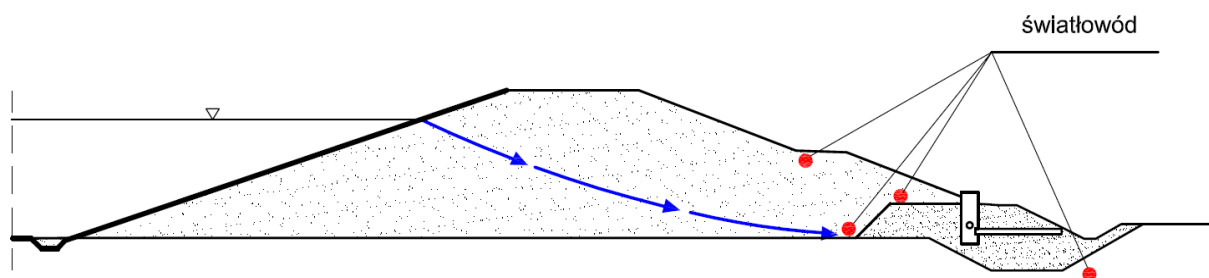
Zapory ziemne.

Jednym z głównych parametrów używanych do oceny stateczności zapór ziemnych, oraz ich szczelności jest położenie krzywej filtracji. Wyznacza się je na podstawie pomiarów poziomu wody w piezometrach otwartych. Piezometry te, rozmieszczone w linii równoległej do osi podłużnej zapory, grupowane są najczęściej w tzw. przekroje pomiarowe. W poszczególnych przekrojach pomiarowych możliwe jest zatem wyznaczenie krzywej filtracji. Przekroje pomiarowe rozlokowane są z konieczności w pewnych odległościach od siebie, a pomiary mają charakter punktowy. Odcinki pomiędzy przekrojami pomiarowymi nie są badane, a krzywe filtracji przyjmuje się dla nich przez analogię do najbliższych przekrojów. W ten sposób znaczne odcinki zapory są kontrolowane jedynie wizualnie, a lokalne nieszczelności można wykryć, z małą dokładnością, obserwując wypływ wody z drenaży. Zastosowanie techniki światłowodowej umożliwia pomiar liniowy, na całej długości zapory.

W procesie projektowania przyjmuje się dla korpusu zapory krzywą filtracji, przy której zachowane są w pełni warunki stateczności. Jest to tzw. krzywa projektowana. W zaporach nowych, o dużej szczelności, rzeczywista krzywa zawodnienia będzie z pewnością utrzymywać się poniżej projektowanej. Jeśli na poziomie krzywej projektowanej ułożyć kabel pomiarowy, jak to pokazano na rys.4., to wzrost filtracji wody zostanie zarejestrowany jako lokalna zmiana temperatury światłowodu. Do rejestracji zmian konieczna jest różnica temperatur pomiędzy nasypem suchym i zawodnionym, albo przynajmniej zróżnicowana temperatura kabla pomiarowego na różnych jego odcinkach. W zaporach ziemnych bezpieczniej będzie założyć, że w pewnych warunkach ta różnica zaniknie. Znaczna miąższość korpusu, minimalne prędkości filtracji wody, czy zawodnienie nasypu na całej długości światłowodu, mogą doprowadzić do znaczącego zmniejszenia różnic temperaturowych. W tych warunkach gwarancją dobrego pomiaru daje aktywna metoda pomiarowa, czyli zastosowanie kabla pomiarowego z ogrzewaniem. Kabel pomiarowy, wyposażony dodatkowo w przewody miedziane, może być podgrzany elektrycznie na krótko przed wykonaniem pomiaru. Takie rozwiązanie ułatwia interpretację wyników, a w niektórych przypadkach może dostarczyć nowych informacji np. nt. lokalizacji odcinków kabla intensywniej chłodzonych, czyli odcinków zapory o zwiększonej filtracji wody.

Jeśli w korpusie zapory zainstalowany będzie dodatkowy kabel pomiarowy na tzw. poziomie ostrzegawczym, to wyznaczona zostanie strefa bezpiecznej eksploatacji. Zwiększenie zawodnienia do poziomu krzywej ostrzegawczej zostanie zarejestrowane i uruchomi lokalnie obowiązujące

procedury naprawcze. Na rysunku 4. przedstawiono różne warianty ulokowania kabla pomiarowego, wykrywające filtrację wody z różnych kierunków i na różnych poziomach zapory.

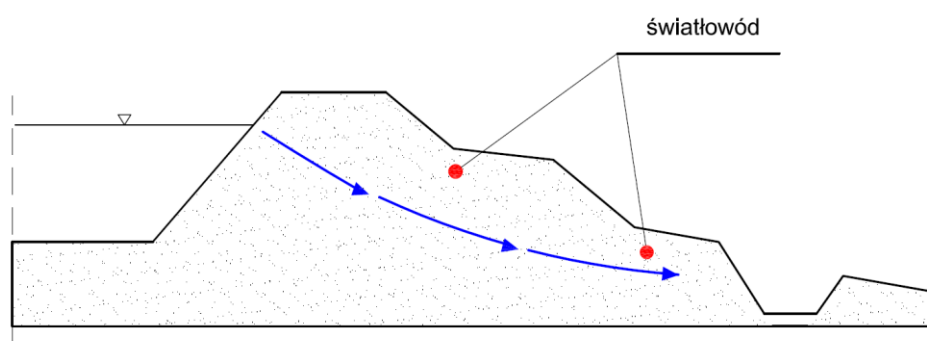


Rys.4. Przykłady możliwych lokalizacji kabla pomiarowego w zaprze ziemnej bez rdzenia wodoszczelnego

Wały przeciwpowodziowe.

Jak już wspomniano wały przeciwpowodziowe przez większą część roku nie mają kontaktu z wodą. Procesy destrukcyjne jakim mogą podlegać mają pochodzenie mechaniczne i są wynikiem działalności ludzi, zwierząt i oddziaływania roślin. Większe uszkodzenia wykryje kontrola wizualna. Mniejsze, ujawnić może dopiero kontakt z wodą w warunkach powodziowych. Na wczesne wykrycie właśnie takich uszkodzeń w wałach starych, jak również na wykrycie odcinków o mniejszej szczelności w wałach nowo wybudowanych, powinien być ukierunkowany system monitorowania oparty na technice światłowodowej.

W początkowej fazie wezbrania system umożliwi również monitorowanie intensywności filtracji wody na różnych odcinkach wału. Znaczne długości kabli pomiarowych, dochodzące do 20 km dają możliwość kontroli wałów z jednego punktu pomiarowego na odcinku 40 km łącznie. Wczesne wykrycie słabszych odcinków daje możliwość usunięcia zagrożenia w jego początkowym stadium. Można założyć, że instalacja jednego, a w wałach z przyporą dwóch światłowodów o znacznej długości, jest w tych warunkach rozwiązaniem optymalnym (rys.5.). Pomiary powinny być prowadzone w początkowej fazie wezbrania, celem wykrycia odcinków zagrożonych wału, na których nastąpił najwcześniejszy kontakt światłowodu z wodą.



Rys.5. Przykładowe rozmieszczenie światłowodów w wale przeciwpowodziowym

W zakresie monitorowania wałów przeciwpowodziowych otwarte pozostaje pytanie, czy pomiar temperatury jest wystarczający do wczesnego wykrycia utraty stateczności? Alternatywę stanowi pomiar odkształceń konstrukcji wału. W tym obszarze prowadzone są intensywne badania, których głównym celem jest opracowanie metody wczesnego wykrywania osuwisk. Elementem pomiarowym nie jest tutaj pojedynczy kabel pomiarowy, a mata z geowłókniny, wyposażona dodatkowo w system światłowodów. Prace badawcze pod kierunkiem instytutu Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) z Berlina prowadzone były również w Polsce. Matę pomiarową zainstalowano w 2006 roku na odpowietrznej stronie zapory w Myczkowcach (rys. 6)



Rys. 6. Instalacja maty pomiarowej, zapora Myczkowce.

W roku 2008 prace badawcze realizowane w ramach międzynarodowego projektu POLYTECT, przeniesiono na teren odkrywki Bełchatów, gdzie aktywne procesy osuwiskowe pozwoliły uzyskać wyniki pomiarów w krótszym czasie(rys.7.).



Rys. 7. Instalacja światłowodowej maty pomiarowej, odkrywka Bełchatów.

4. Podsumowanie

Światłowodowa technika pomiarowa stwarza nowe możliwości monitorowania zapór. Jej przydatność jest jednak bardzo zależna od właściwej lokalizacji kabli pomiarowych. Uzyskanie satysfakcjonujących wyników pomiarów uzależnione jest od znajomości monitorowanego obiektu oraz historycznych wyników pomiarów uzyskanych sposobem konwencjonalnym. Wymagać to będzie ścisłej współpracy projektanta obiektu, wykonawcy systemu monitorowania oraz hydrotechnika – gospodarza obiektu.

Technika monitorowania oparta na liniowym pomiarze temperatury jest aktualnie na tyle rozwinięta, że możliwe jest jej wykorzystanie w najtrudniejszych nawet warunkach przemysłowych. Metoda pomiaru odkształceń w geotechnice pozostaje w dalszym ciągu w fazie

badawczej. Dotychczasowy udział polskich podmiotów gospodarczych w pracach badawczych pozwala mieć nadzieję, że będzie ona dostępna dla polskich obiektów hydrotechnicznych niezwłocznie po uzyskaniu pozytywnych wyników badań.

Literatura

1. Liehr S., Lenke P., Wendt M., Gloetzl R., Schneider-Gloetzl J., Gabino L., Krywult Ł.: Distybutet Polimer Optical Fiber Sensor in Geotextiles for Monitoring of Earthwork Structures. 2009. Proc. Of SHMII-4 Conference.
2. Gloetzl R., Schneider-Gloetzl J., Liehr S., Lenke F., Wendt M., Krebber K., Gabino L., Krywult J., Krywult Ł.: First Results of a Field Test In Belchtow Brown Coal Mine to investigate Creeping Slopes. 2009 VI MK GWB.
3. A. Chrost, L. Czarnecki, Ł. Krywult, J. Schneider-gGloetzl : Zastosowanie technik elastoptycznych w procesie kontroli stateczności zboczy. 2009 VI MK GWB.
4. R. Gloetzl, J. Schneider-Gloetzl, A. Wosniok, K. Krebber, Ł. Krywult: Optikal Distributed Sensing Systems and possible Applications in the Geotechnical Measuring Field. 2012.
5. Krebber K., Lenke P., Liehr S., Schukar M., Wendt M., Witt J.: Distybutet POF Sensors _ Recept Progress and New Challenges.

ⁱ BUDOKOP, dr inż. Jerzy Krywult, ul. Powstańców 19a, Mysłowice,

ⁱⁱ BUDOKOP, mgr inż. Łukasz Krywult ul. Powstańców 19a, Mysłowice,

ⁱⁱⁱ GESO, mgr inż. Adam Kozłowski, al. KEN 96/55, Warszawa,