

# SYSTEMY MONITOROWANIA

## konstrukcji sprężonych

**dr inż. Rafał Sieńko,**  
**mgr inż. Tomasz Howiacki**  
Politechnika Krakowska  
**dr inż. Łukasz Bednarski**  
Akademia Górniczo-Hutnicza AGH  
w Krakowie

Procedury obliczeniowe zamieszczone w normach pozwalają na bezpieczne projektowanie, jednak nie dostarczają pełnej wiedzy na temat pracy konstrukcji w rzeczywistych warunkach użytkowania. Taką wiedzę można pozyskać, interpretując wyniki pomiarów wykonanych za pomocą systemów monitorowania konstrukcji.

W niniejszym artykule przedstawiono ciąg dalszy przeglądu sposobów monitorowania pracy elementów sprężonych na przykładzie wybranych systemów zrealizowanych na różnego typu obiektach w Polsce.

### Monitorowanie mostów wantung

Kable (ciągną) służące do kształtowania początkowego stanu naprężeń w konstrukcji bardzo często stosuje się współcześnie w różnego rodzaju obiektach mostowych, najczęściej w postaci want, odciągów czy lin. Warto także przypomnieć, że w Polsce, w miejscowości Ozimek, znajduje się najstarszy w Europie kontynentalnej żelazny most wiszący. Został wzniesiony w 1827 r. Jego charakterystyczną konstrukcją zaprezentowano na rysunku 8a. Brak wiedzy związanej z zachowaniem się prawie 200-letniego materiału, a także trudności w budowie modelu mostu spowodowały, że ten zabytkowy, historyczny obiekt, został objęty systemem monitorowania podczas kompleksowego remontu w 2010 r. [9].

Na nowych linach oraz odciągach prętowych zainstalowano czujniki do określania zmian sił w czasie: 16 czujników strunowych, realizujących pomiar odkształceń w prętach (rys. 8b) oraz wydłużeń liny (rys. 9). Współcześnie stosowane czujniki strunowe wyposażane są zawsze w termistory [10], aby umożliwić wprowadzenie korekty termicznej do uzyskiwanych pomiarów oraz globalnej analizy konstrukcji pod wpływem obciążenia temperaturą. Na moście w Ozimku podczas jednej sesji pomiarowej wykonywany jest zatem pomiar 32 wielkości fizycznych.

Jeden z największych systemów monitorowania konstrukcji w Europie zainstalowano na Moście Rędziańskim we Wrocławiu. Do analizy pracy konstrukcji wykorzystano łącznie 222 czujniki wykonujące pomiar różnych wielkości fizycznych. Część z czujników ma wbudowane termistory, dlatego w jednej chwili czasowej system monitorowania dostarcza informacji na temat zmian 318 wielkości [11]: odkształceń, naprężeń, sił oraz prędkości i kierunku wiatru.

Do analizy stanu technicznego want wybrano pomiar zmian siły w pojedynczych splotach (80 sztuk). Informacji o sposobie odpowiedzi podwieszenia na oddziaływanie wiatru mają udzielić czujniki przyspieszeń drgań w dwóch kierunkach w płaszczyźnie prostopadłej do osi wanty (rys. 10a). Siły (a tym samym odkształcenia w wantach) mogą ulegać zmianie na

skutek obciążeń eksploatacyjnych, temperatury, reologii czy też awarii (zerwania splotu). Na rysunku 10b przedstawiono względne przemieszczenie pomostów w trakcie obciążenia próbnego, które wyniosło niespełna pół metra (dla niesymetrycznego obciążenia pomostów). Poglądowy schemat rozmieszczenia czujników siły oraz akcelerometrów na konstrukcji mostu przedstawiono na rys. 11.

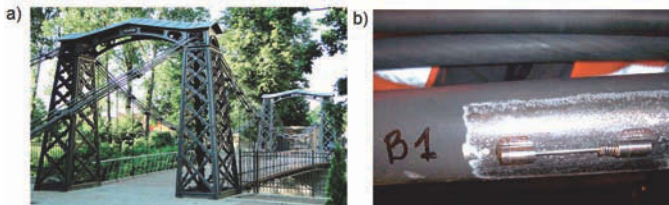
Pomiar siły poprzez pomiar odkształceń dwoma czujnikami zaproponowano dla wieszaków prętowych podwieszających główne, nurto- wento przeszło łukowe w moście przez rzekę Wisłę w Puławach (rys. 12). Dla want mostu podwieszanego przez rzekę Wisłę koło Kwidzyna (rys. 13) przyjęto m.in. pomiary sił w co drugiej wancie, a także pośrednio statyczny pomiar ugięć w przęśle.

Pomiar drgań want należy traktować przede wszystkim w sposób jakościowy – tzn. zmiana przyspieszeń (amplitudy, przebiegu itp.) da informację o zmianie sposobu pracy konstrukcji, jednak trudno będzie zidentyfikować rzeczywiste przyczyny powstania tych zmian. Mogą być one wynikiem zerwania splotu, ale również np. postępującą reologią.

W systemach monitorowania instalowanych na konstrukcjach mostowych na świecie obserwuje się obecnie tendencję, zgodnie z którą pomiarami obejmowane są wielkości fizyczne, których zmiany są największe przy niewielkich zmianach oddziaływań. Zmiana sił w wantach na skutek uszkodzenia pojedynczych splotów zazwyczaj będzie najbardziej widoczna w postaci zmiany przemieszczenia pomostu (prace naukowe na ten temat prowadzi obecnie prof. Krzysztof Żółtowski). Dlatego coraz częściej systemy monitorowania konstrukcji wyposażane są w czujniki umożliwiające pomiar względnych przemieszczeń pionowych (ugięć) w wybranych punktach pomostu (liczbę punktów pomiarowych należy dobrać na podstawie analizy teoretycznej). Dzięki dokładnemu określeniu zmian geometrii w płaszczyźnie pionowej, przy wykorzystaniu numerycznego modelu konstrukcji, możliwe będzie określenie wyężenia jej poszczególnych elementów (również want). Dodatkowo czujniki te umożliwią bezpośrednią kontrolę pracy mostu podczas obciążenia próbnego.

### Monitorowanie ciągnowych przekryć dachowych

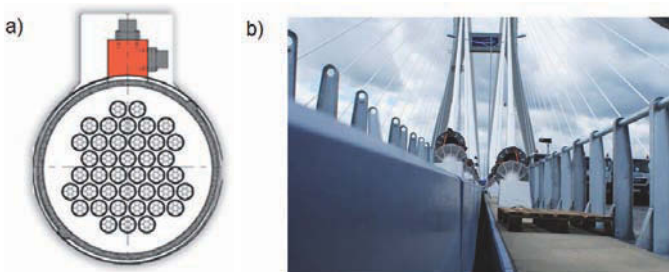
Ciągną sprężające wykorzystywane są coraz częściej do konstruowania zaawansowanych rozwiązań przekryć dachowych, np. w halach spor-



Rys. 8. a) widok mostu w Ozimku [www.ozimek.pl];  
b) czujniki odkształceń na odciągach prętowych



Rys. 9. Czujnik do pomiaru odkształceń pojedynczego splotu [7]



Rys. 10. a) przekrój poprzeczny przez wantung w miejscu instalacji akcelerometru, b) widok względnych przemieszczeń pomostu w trakcie próby obciążeniowej [www.tuwroclaw.com]

towo-widowiskowych. Największym tego typu obiektem w Polsce i drugim co do wielkości w Europie jest hala wzniesiona w krakowskich Czyżynach.

Do monitorowania stanu bezpieczeństwa zadaszenia wybrano następujące wielkości fizyczne: siły w wybranych cięgnach, przyspieszenia drgań, przemieszczenia pionowe, odkształcenia pierścienia wewnętrznego (rozety), odkształcenia wewnątrz betonu w obwodowym pierścieniu zewnętrznym oraz temperatury w wielu punktach pomiarowych. System uzupełniono o pomiary meteorologiczne, związane z oddziaływaniem wiatru i temperatury powietrza. Schemat zainstalowanych czujników w przekroju poprzecznym głównej hali przedstawiono na rysunku 14.

Warto podkreślić, że tego typu konstrukcje zadaszeń pracują przestrzennie, dlatego podejście do monitorowania może mieć charakter bardziej globalny. O awarii cięgien podwieszających (np. zerwaniu splotu) można wnioskować nie tylko poprzez pomiar siły (redystrybucja obciążeń po zerwaniu splotu nie zawsze jest proporcjonalna) czy też przyspieszeń drgań (ocena jakościowa), ale przede wszystkim na podstawie przemieszczeń pionowych lub/oraz kątowych w wytypowanych miejscach zadaszenia. Należy pamiętać, że dla pracy tego typu przekryć i globalnej analizy konstrukcji duże znaczenie ma oddziaływanie temperatury, dlatego zaleca się prowadzenie jej pomiarów w wybranych punktach równomiernie rozłożonych na powierzchni zadaszenia.

Ciekawą propozycją skierowaną przede wszystkim do służb ratowniczych, jest pomiar temperatury powietrza w sąsiedztwie cięgien sprężających realizowany w zakresie do 350°C. Zadaniem tego podsystemu jest dostarczanie informacji zarządzającemu akcją ratowniczą o zmianie wyężenia cięgien sprężających na skutek wzrostu temperatury. Stal sprężająca jest szczególnie wrażliwa na wysoką temperaturę i po osiągnięciu ok. 350°C przyjmuje się, że jej wytrzymałość spada do ok. 50% wytrzymałości określonej w temperaturze 20°C [15].

Na rysunku 15 przedstawiono przykładową koncepcję systemu monitorowania przekrycia cięgnowego hali sportowo-widowiskowej „Podium” w Gliwicach. Przekrycie to ma nietypową geometrię w postaci powierzchni siodłowej (paraboloida hiperboliczna).

W Polsce systemami monitorowania obejmowane są także innego rodzaju obiekty, np. amfiteatry, w których konstrukcję zadaszenia stanowi często wiotka membrana ustabilizowana za pomocą układu cięgien. Wymienić tu można chociażby amfiteatr w Płocku lub w Pruszczu Gdańskim. W obydwu przypadkach zaproponowano odmienną koncepcję monitorowania stanu technicznego obiektów. W Płocku odbywa się to przez pomiar przemieszczeń pionowych i temperatury w wybranych miejscach konstrukcji, natomiast w Pruszczu Gdańskim zaproponowano pomiar przemieszczeń kątowych. Schematy systemów przedstawiono na rys. 16.

Analizując systemy monitorowania zainstalowane na sprężonych przekryciach cięgnowych, nie sposób nie wspomnieć o stadionach piłkarskich. Do analizy stanu technicznego Stadionu Narodowego w Warszawie wybrano m.in. pomiar przemieszczeń w trzech kierunkach w 12 punktach na zewnętrznym pierścieniu ściskającym, w 10 punktach na wewnętrznym pierścieniu liniowym, w 2 punktach na iglicy oraz w 2 punktach referencyjnych na trybunach. Przemieszczenia mierzone są z wykorzystaniem automatycznego tachimetru. Przyspieszenia drgań na kierunku pionowym realizowane są w wybranych punktach pierścienia wewnętrznego, natomiast drgania iglicy analizowane są w trzech kierunkach. System monitorowania konstrukcji uzupełniono o pomiary temperatury, warunków pogodowych oraz monitoring wizyjny. Wybrane komponenty systemu monitorowania cięgnowej konstrukcji zadaszenia Stadionu Narodowego przedstawiono na rys. 17.

Innym bardzo ciekawym obiektem jest Stadion Śląski. Zadaszenie wykorzystujące w swej budowie ideę koła szprychowego (jedno z pierwszych zastosowań idei sprężania) składa się z dwóch zewnętrznych pierścieni ściskanych (dolny i górny), promieniowych cięgien podwieszają-

REKLAMA

77  
wrzesień 2015  
Builder

**CG Structural Consulting**

- Profesjonalne doradztwo techniczne
- Zaawansowane obliczenia MES
- Złożone modele obliczeniowe

**LUSAS**

Oficjalny dystrybutor Lusas FEA Ltd.

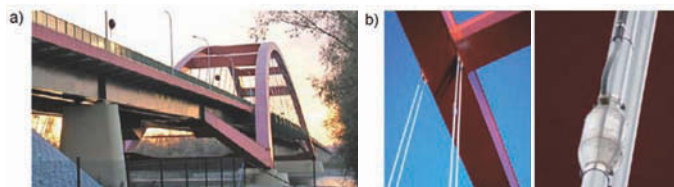
- Eurokody, PN i AASHTO
- Fazy montażu, etapy wznoszenia i budowy
- Optymalizacja obciążenia pojazdami

30-732 Kraków, ul. Biskupińska 2  
tel. 501183666, 698715469

[www.cgsc.pl](http://www.cgsc.pl)



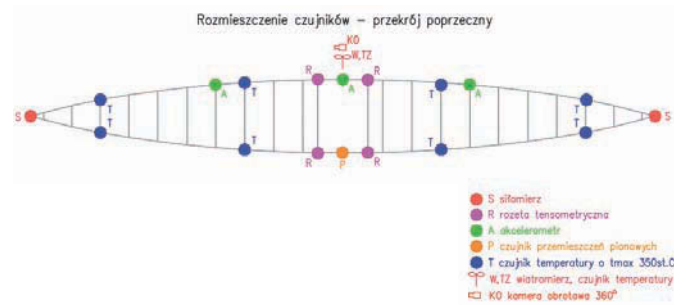
Rys. 11. Elementy składowe systemu monitorowania Mostu Rędzńskiego służące ocenie stanu technicznego wian podwieszających [na podstawie 11]



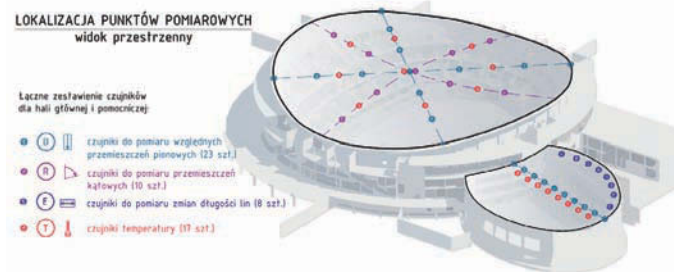
Rys. 12. a) widok mostu w Puławach; b) widok czujników odkształceń i drgań w obudowie ochronnej na wybranym wieszaku mostu [12]



Rys. 13. Schemat rozmieszczenia wybranych czujników systemu monitorowania mostu przez rz. Wisłę koło Kwidzyna (siły wciągach oraz przemieszczenia pionowe) [na podstawie 13]



Rys. 14. Schemat monitorowania głównej hali w Kraków-Arenie



Rys. 15. Schemat propozycji systemu monitorowania hali „Podium” w Gliwicach

cych oraz linowego pierścienia wewnętrznego. System monitorowania ma za zadanie prowadzenie bieżącej, globalnej diagnostyki konstrukcji oraz podniesienie komfortu użytkownika zadaszona poprzez dopuszczenie ponadnormatywnego obciążenia śniegiem. Zadaszenie ze względu na swoją stosunkowo małą sztywność i nieliniowość geometryczną jest szczególnie podatne na ugięcia w zależności od różnych wariantów obciążenia śniegiem. Idea monitoringu inżynierskiego opiera się zatem na poszukiwaniu rzeczywistych rozkładów i wartości obciążeń poprzez analizę deformacji [14]. Zaproponowano wykonywanie pomiarów przemieszczeń pionowych, trójkierunkowych przyspieszeń, temperatury oraz siły w co drugim ciężnie podwieszającym. Zainstalowana zostanie także stacja pogodowa oraz monitoring wizyjny.

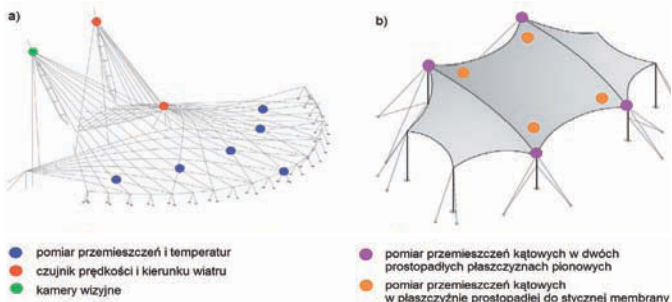
Warto wspomnieć również o konstrukcji zadaszona stadionu w Poznaniu. Jest ono nietypowe ze względu na wprowadzenie siły sprężającej do pasów dolnych stalowych dźwigarów kratowych, co nie jest powszechną praktyką w przypadku konstrukcji stalowych. System monitorowania obejmuje pomiar przemieszczeń pionowych i kątowych, odkształceń dźwigarów oraz przyspieszeń w wybranych punktach. Na rysunku 19 przedstawiono widok dźwigara oraz czujnik przechyłu.

### Podsumowanie i wnioski końcowe

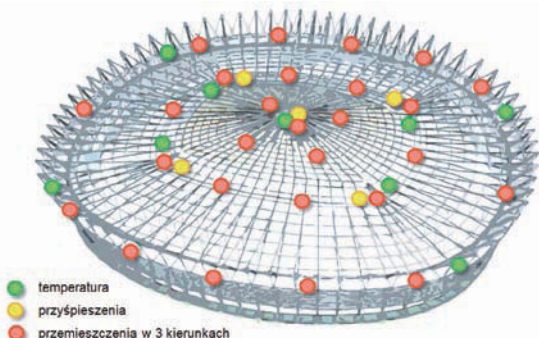
Wszystkie zaprezentowane w niniejszym cyklu systemy monitorowania konstrukcji sprężonych (w tym ciężnowych) w znacznym stopniu wykorzystywały punktowy pomiar różnych wielkości fizycznych czujnikami strunowymi. Czujniki te charakteryzują się dużą dokładnością i stabilnością pomiarów w czasie (rzędu kilkudziesięciu lat), niezawodnością oraz odpornością na czynniki zewnętrzne, a także możliwością przesyłania sygnału na znaczne odległości (rzędu kilku kilometrów), co jest szczególnie istotne przy obiektach wielkogabarytowych. Dlatego znalazły powszechne zastosowanie w inżynierii lądowej, począwszy od geotechniki, poprzez mosty, stadiony, wieżowce itp., na elektrowniach atomowych skończywszy. Obecnie na świecie trwa bardzo intensywny rozwój różnych technik pomiarowych w celu poszukiwania rozwiązań umożliwiających budowanie coraz efektywniejszych systemów monitorowania.

Duże nadzieje związane są ze światłowodową technologią pomiarową. W pracy [16] zaprezentowano wyniki z badań przeprowadzonych na sprężonej belce z zastosowaniem światłowodów Bragga. Belka opomiarowana była w sposób quasi-ciągły, tzn. pomiary odkształceń wykonywane były na długości światłowodu co kilkanaście centymetrów (w kilku punktach), a analiza dotyczyła zarówno procesu dojrzewania betonu, jak i zachowania się elementu w chwili sprężenia. Uzyskano bardzo obiecujące wyniki, także w zakresie możliwości detekcji powstających zarysowań. W pracy [17] przedstawiono badania doświadczalne na kablobetonowych dźwigarach sprężonych, zarówno z ciężnami bez przyczepności, jak i z przyczepnością, wyposażonych w czujniki światłowodowe. Obserwowana była praca dźwigarów pod obciążeniem statycznym i dynamicznym, a uzyskane wyniki wykazały dużą zgodność pomiarów z innymi technikami pomiarowymi.

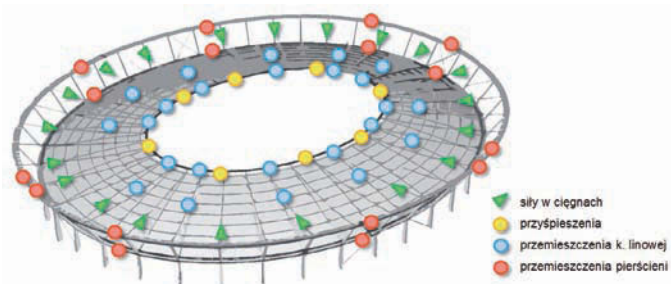
Na Politechnice Krakowskiej trwają obecnie prace nad zastosowaniem ciągłych czujników światłowodowych realizujących pomiar odkształceń wzdłuż całej swej długości (rys. 20). Pozyskiwanie danych pomiarowych jednocześnie w kilku tysiącach punktów z częstotliwością nawet 250 Hz stanowi o ogromnej zalecie tej techniki względem powszechnie stosowanych obecnie pomiarów punktowych. Być może w przyszłości będzie możliwa analiza rzeczywistego rozkładu siły sprężającej na długości ciężna sprężającego (analiza strat siły sprężającej od momentu naciągu przez kilkadziesiąt lat). Nie ulega wątpliwości, że monitorowanie konstrukcji inżynierskich, a w szczególności konstrukcji sprężonych, jest trudną sztuką. W każdym przypadku wymagane jest indywidualne podejście, poprzedzone szczegółowymi analizami oraz współpracą specjalistów m.in. z zakresu konstrukcji budowlanych, elektroniki i informatyki. Warto jednak podjąć taki wysiłek, ponieważ dobrze zaprojektowany system monitorowania konstrukcji będzie dostarczał wartościowych informacji na temat pracy konstrukcji przez co najmniej kilkadziesiąt lat. Najważniejsze, że dzięki niemu możliwe będzie podniesienie bezpieczeństwa konstrukcji i zwiększenie jej niezawodności. ■



Rys. 16. Schemat systemu monitorowania cięgnowej konstrukcji zadania: a) amfiteatru w Płocku; b) amfiteatru w Pruszczu Gdańskim



Rys. 17. Wybrane punkty pomiarowe systemu monitorowania konstrukcji na Stadionie Narodowym w Warszawie



Rys. 18. Wybrane punkty pomiarowe systemu monitorowania konstrukcji na Stadionie Śląskim [na podstawie 14]



Rysunek 19. a) widok dźwigara kratowego na stadionie w Poznaniu; b) instalacja przechylomierza



Rys. 20. Światłowód przyklejony do powierzchni belki żelbetonowej i betonowego walca przygotowanego do próby ściskania.

## Literatura

- [8] Bednarski Ł., Sierko R., Howiacki T., Oszacowanie wartości i zmienności modułu sprężystości betonu w istniejącej konstrukcji na podstawie pomiarów in situ, „Cement Wapno Beton”, nr 6/2014.
- [9] Bednarski Ł., Sierko R., Z monitoringiem bezpieczniej, „Inżynier Budownictwa”, nr 10/2013, str. 104-108.
- [10] Bednarski Ł., Sierko R., Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi, „Inżynieria i Budownictwo”, nr 11/2013, str. 615-619.
- [11] Barcik W., Sierko R., Biliszczuk J., System monitorowania konstrukcji Mostu Rzędzińskiego we Wrocławiu, Wrocławskie Dni Mostowe, Wrocław 2011.
- [12] Biliszczuk J., Barcik W., Sierko R., System monitorowania mostu w Puławach, „Mosty” nr 4/2009, str. 12-17.
- [13] Specyfikacja Istotnych Warunków Zamówienia na „Dostawę i instalację wraz z uruchomieniem oraz serwisowanie systemu monitoringu na moście przez rzekę Wisłę w okolicach Kwidzyna”.
- [14] Żółtowski K., Ekspertyza dokumentacji projektowej i stanu technicznego elementów zadania Stadionu Śląskiego w Chorzowie w ramach zadania inwestycyjnego pn.: „Zadaszenie widowni oraz niezbędna infrastruktura techniczna Stadionu Śląskiego w Chorzowie”, Politechnika Gdańska, Gdańsk, sierpień 2013.
- [15] Neville A. M.: Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
- [16] Lin Y. B., Chang K. C., Chern J. C., Wang L. A., The health monitoring of a prestressed concrete beam by using fiber Bragg grating sensors, Smart Materials and Structures 13 (2004), p. 712-718.
- [17] Matthys S., Taerwe L., Experimental Testing of post-tensioned concrete girders instrumented with optical fibre gratings, 17th International Conference on Optical Fibre Sensors, Society of Photo Optical, May 30, 2005.

**Abstract. STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS FOR PRESTRESSED STRUCTURES.** Prestressing technology is primarily used for a large-span elements, carrying heavy loads, which failure consequences would be very substantial. Thus, it is essential to control adequately the process of designing, erecting and further operating of such kind of objects. Computational procedures, presented in the standards, allow for the safe design, but do not provide the full knowledge about structure's work in its real conditions of use. This knowledge could be acquired by interpreting the results of measurements made by structural health monitoring systems. This article presents an overview of the most important ways to monitor the work of prestressed elements based on selected systems implemented in different types of objects in Poland.

**Keywords:** structural health monitoring, prestressed structures.

REKLAMA

## www.dywidag-systems.pl



### TECHNIKI SPRĘŻANIA I PODWIEŻEŃ:

- cięgnowe systemy sprężania z wykorzystaniem: splotów, drutów, prętów – montaż na budowie lub prefabrykowane
- systemy podwieżeń ze splotów równoległych: DYNA Grip® i DYNA Bond®, monitoring DYNA Force
- zastosowania: obiekty mostowe, zbiorniki, stropy, płyty fundamentowe, dachy cięgnowe, maszty
- technika urządzeń: urządzenia hydrauliczne, heavy lifting

### GEOTECHNIKA

- kotwy gruntowe: linowe, prętowe, samowierzące
- gwoździe gruntowe i skalne: prętowe, samowierzące
- mikropale: prętowe, samowierzące, rury z żeliwa ciągliwego
- ściagi: prętowe, linowe GEWI®, THREADBAR®, DYWI® Drill



### NOWOŚĆ System monitorowania sił w cięgnach DYNA Force®



DYWIDAG-Systems International Sp. z o.o.  
 41-506 Chorzów  
 ul. Bojowników o Wolność i Demokrację 38/121  
 tel.: +48 32 241 09 98, + 48 58 300 13 53  
 e-mail: DSI-Polska@dywidag-systems.com