



**PROBLEMATYKA PROJEKTOWANIA I WYKONAWSTWA  
W ASPEKTCIE STOSOWANIA NOWYCH TECHNOLOGII,  
MATERIAŁÓW I NOWOCZESNEJ TECHNIKI W BUDOWNICTWIE  
NORMY EUROPEJSKIE – TEORIA A PRAKTYKA**

Kraków, 23 – 25 października 2013 r.

Rafał SIENKO<sup>1</sup>

## ROLA MONITORINGU W BEZPIECZEŃSTWIE UŻYTKOWANIA ZNACZĄCYCH OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

### 1. Wprowadzenie

Od współcześnie projektowanych, znaczących obiektów budowlanych wymaga się by były niepowtarzalne. Do spełnienia tego warunku dąży zarówno inwestor, jak i projektant. Dla tego drugiego, obiekt budowlany jest dziełem, które będzie świadczyło o nim przed kolejnymi pokoleniami. Dlatego znaczące obiekty budowlane charakteryzują się bardzo często niebagatelnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, posiadają duże rozpiętości, skomplikowane kształty, czy złożone schematy statyczne. Dostępność programów obliczeniowych służących analizie konstrukcji powoduje, że każdą, choćby najbardziej skomplikowaną konstrukcję, jesteśmy w stanie „rozwiązać” numerycznie. Niestety, nie zawsze zdajemy sobie sprawę, że założenia upraszczające przyjmowane w modelach teoretycznych na etapie projektowania obiektów budowlanych powodują, że analizy obliczeniowe tylko w pewnym stopniu odwzorowują sposób pracy konstrukcji obiektu w warunkach eksploatacji. Zarówno właściwości materiałowe, jak i geometria konstrukcji oraz oddziaływania są jedynie próbą opisania rzeczywistego obiektu. Jeśli weźmiemy jeszcze pod uwagę efekt skali, to może się okazać, że modele powszechnie stosowane w standardowych obiektach są niewłaściwe, a nawet błędne w przypadku konstrukcji wielkogabarytowych.

Projektowanie konstrukcji polegać będzie zawsze na konieczności przyjęcia bardzo dużej liczby trudnych do jednoznacznego określenia parametrów opisujących jej pracę podczas całego procesu wznoszenia obiektu oraz jego użytkowania. Nie do pominięcia jest również niedoskonałość człowieka (projektanta, wykonawcy, użytkownika) i wynikająca stąd możliwość popełnienia błędu lub niedopełnienia obowiązku. Wreszcie, biorąc pod uwagę współczesną ekonomię, dla większości obiektów nieracjonalne byłoby przyjmowanie np. obciążeń, których wartości nie mogłyby być przekroczone w całym okresie eksploatacji obiektu. Sposób uwzględniania tych parametrów, decydujących o ostatecznym poziomie bezpieczeństwa konstrukcji, podejmowany jest przez normy budowlane, między innymi podczas definiowania metody stanów granicznych i częściowych współczynników bezpieczeństwa. Ostatecznie, zgodnie z podejściem normowym, zgadzamy się na przyjmowanie ryzyka, zdając sobie sprawę, że niemożliwe jest jego całkowite wyeliminowanie. Dążymy jednak do ideału, czyli do projektowania i wznoszenia takich konstrukcji, których zawodność byłaby ograniczona do minimum.

<sup>1</sup> Dr inż. - Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Krakowska

Jedną z budzących duże nadzieje metod służących podniesieniu bezpieczeństwa użytkowania obiektów budowlanych jest monitorowanie konstrukcji. Artykuł ma na celu przybliżenie czytelnikowi zagadnienia monitoringu oraz pokazanie przykładów realizacji tego typu systemów w Polsce. Nie jest ambicją autora wskazanie metodyki projektowania i instalacji systemów na rzeczywistych obiektach.

## 2. Definicja systemu monitorowania konstrukcji

Pod pojęciem systemu monitorowania konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring – SHM) będziemy tutaj rozumieć zaawansowane urządzenie techniczne, składające się z różnego typu czujników realizujących pomiary wybranych wielkości fizycznych związanych z pracą danej konstrukcji budowlanej, przesyłających dane pomiarowe do komputera, w którym zainstalowano oprogramowanie służące do archiwizacji tych danych oraz najczęściej, ich obróbki numerycznej. Istotnym wyróżnikiem systemów monitorowania jest ich permanentne działanie objawiające się realizacją pomiarów w okresach liczonych w godzinach, minutach lub hercach w odróżnieniu od przeglądów (inspekcji) okresowych, które wykonywane są w odstępach czasowych liczonych co najwyżej w dniach, a najczęściej – w miesiącach lub latach. Systemy monitorowania powinny charakteryzować się trwałością tego samego rzędu, co objekty, na których są instalowane, czyli minimum kilkadziesiąt lat.

Wykonanie systemu monitorowania musi zostać poprzedzone szczegółowymi numerycznymi analizami statycznymi i dynamicznymi konstrukcji, a czasem nawet badaniami modelowymi. Wybór wielkości fizycznych, które mają być mierzone, lokalizacja miejsc, w których realizowany będzie pomiar oraz dobór sposobu prowadzenia pomiaru i jego dokładności jest zagadnieniem, które będzie miało bardzo istotny wpływ na jakość uzyskiwanych wyników pomiarów oraz możliwość ich poprawnej interpretacji. Tworzenie systemu monitorowania musi zatem być dziełem interdyscyplinarnym, w którym brać będą udział specjaliści z zakresu konstrukcji budowlanych, monitorowania konstrukcji, elektroniki oraz informatyki.

## 3. Techniki pomiarowe

Na wybór wielkości fizycznych, których pomiar będzie realizował system monitorowania ma wpływ wiele czynników. Istotne znaczenie będzie miała przede wszystkim decyzja o częstotliwości wykonywania pomiarów. W przypadku pozyskiwania danych w odstępach czasowych liczonych w hercach nie będziemy mogli zastosować wszystkich typów urządzeń pomiarowych. Ograniczeniem dla wielu technik mierniczych będzie również konieczność zagwarantowania stabilności pomiarów w czasie. Musimy sobie zdawać sprawę, że kalibracja czujników w okresie eksploatacji obiektu jest, z punktu widzenia pomiarowego niepożądana. Jej wykonanie jest bardzo kosztowne, a czasami wręcz niemożliwe.

Współcześnie stosowanych jest wiele technik mierzenia i rejestrowania wielkości fizycznych. Można tutaj wymienić między innymi:

- tensometrię mechaniczną z czujnikami przykładowymi do zainstalowanych na elemencie baz pomiarowych. Zaletą tego typu czujników jest prostota działania, niezawodność oraz stosunkowo niska cena,
- tensometrię elektrooporową. Czujniki te są chyba najpowszechniej stosowanymi w różnych gałęziach przemysłu: od zabawek dla dzieci począwszy, a na produkcji statków kosmicznych skończywszy,

- tensometrię strunową. Czujniki te charakteryzują się bardzo dobrą stabilnością pomiarów w czasie,
- czujniki indukcyjne (transformatorowe) wykorzystywane przede wszystkim jako przetworniki przemieszczeń,
- czujniki piezoelektryczne znane głównie z zastosowań w pomiarach przyspieszeń drgań konstrukcji, ale stosowane również do pomiaru odkształceń,
- czujniki światłowodowe. Stosunkowo nowa technika pomiarowa o bardzo dużych możliwościach pomiarowych. Jednym czujnikiem (światłowodem) można wykonywać pomiary lokalne w bardzo wielu punktach pomiarowych umieszczonych na trasie czujnika,
- czujniki MEMS (mikroelektromechaniczne). Czujniki wykorzystujące w swej budowie mikroskopijnej wielkości układy elektro-mechaniczne. Wykorzystywane powszechnie do pomiarów większości wielkości fizycznych. Ich podstawową zaletą jest niska cena. Niestety wadą – często niska dokładność

i wiele innych.

Zastosowanie konkretnej techniki pomiarowej, czyli danego typu czujnika zależy będzie od kilku czynników. Należy tutaj wymienić przede wszystkim:

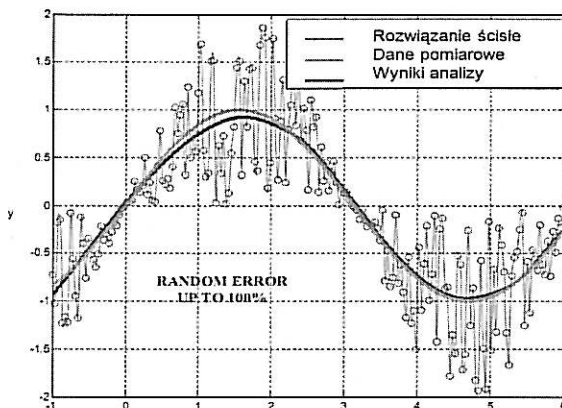
- rodzaj mierzonej wielkości fizycznej,
- częstotliwość pomiaru (pomiar statyczny i dynamiczny),
- dokładność pomiaru,
- zakres pomiaru (pomiar w punkcie oraz pomiar globalny konstrukcji),
- środowisko instalacji,
- czasookres pomiaru (pomiar chwilowy i długookresowy – systemy monitorowania).

Pewne wielkości fizyczne możemy mierzyć różnymi technikami pomiarowymi. Wybór konkretnego rozwiązania będzie zależał od naszych potrzeb. Przykładowo, ugięcie belki można zmierzyć geodezyjnie lub przetwornikiem przemieszczenia (indukcyjnym, strunowym, mechanicznym itp.). W pierwszym przypadku punkt odniesienia, w stosunku do którego będziemy wykonywać pomiar ugięcia może znajdować się bardzo daleko od badanego elementu. Zastosowanie przetworników wymusza natomiast lokalizację punktu odniesienia w bezpośrednim sąsiedztwie konstrukcji.

Nie wszystkie techniki pomiarowe mogą być wykorzystywane do pomiarów wielkości szybkozmiennych. Przykładowo, czujnikami indukcyjnymi możemy realizować zarówno pomiary statyczne, jak i dynamiczne, podczas gdy czujniki strunowe mogą zwracać informację o zmianie mierzonej wielkości fizycznej w odstępach czasowych liczonych co najwyżej w sekundach (obecnie prowadzone są prace nad wdrożeniem dynamicznych pomiarów strunowych).

Kolejnym parametrem determinującym dobór techniki pomiarowej jest wymagana dokładność pozyskiwanych danych. Oczywiście jest, że dokładniejsze urządzenia są jednocześnie droższe i to najczęściej kilkukrotnie. Jednak odpowiedź na pytanie, czy lepiej jest zainstalować mniej czujników o wyższej dokładności, czy więcej, ale mniej dokładnych, nie jest już tak jednoznaczna. Interpretacja pomiarów bardzo często prowadzona jest przy wykorzystaniu różnych technik numerycznych wykorzystujących całą dostępną wiedzę o obiekcie, począwszy od danych geometrycznych i materiałowych, poprzez prawa fizyczne, na wynikach pomiarów kończąc. Analizy takie (w mechanice zwane rozwiązywaniem zadań odwrotnych) – rys. 1, najczęściej umożliwiają dużo poprawniejszą interpretację pomiarów otrzymywanych z systemów monitorowania, gdy danych jest odpowiednio dużo. Niezbędnym jest wówczas zdefiniowanie tzw. funkcji wagowych, parametrów optymalizacji rozwiązań, czy przedziałów, w których pozyskiwane dane są wiarygodne.

Wybór elementów konstrukcji podlegających opomiarowaniu oraz lokalizacja punktów pomiarowych jest zadaniem trudnym do jednoznacznego rozwiązania. Musimy wziąć pod uwagę fakt, że położenie miejsc ekstremalnego wyężenia konstrukcji jest determinowane m.in. rzeczywistym schematem statycznym, rzeczywistymi właściwościami materiałowymi oraz rzeczywistą geometrią konstrukcji. Projekt systemu monitorowania jest natomiast wykonywany na podstawie założeń teoretycznych.



Rys. 1. Dane pomiarowe na tle rozwiązania ścisłego oraz analizy metodami przybliżonymi

Kształt systemu pomiarowego będzie zależał także od tego, czy możliwym będzie wskazanie miejsc najbardziej niebezpiecznych w konstrukcji w sposób jednoznaczny. Przykładowo, wychwycenie lokalnej wady materiałowej w elemencie osiowo rozciągającym będzie wymagało innej techniki pomiarowej niż pomiar w nim siły rozciągającej. Z pomocą przyjdą nam tutaj różne technologie umożliwiające globalny, ale zgrubny pomiar różnych wielkości fizycznych. Najczęściej istotna będzie wówczas nie wartość bezwzględna danej wielkości, ale jej zmiana (doświadczalna analiza modalna). Wtedy zadaniem systemu monitorowania może być poinformowanie o konieczności przeprowadzenia szczegółowej inspekcji danego fragmentu konstrukcji z wykorzystaniem przenośnych urządzeń pomiarowych.

Podsumowując: głównym zadaniem systemów monitorowania konstrukcji budowlanych jest istotne podniesienie ich bezpieczeństwa użytkowania poprzez dostarczanie informacji o sposobie obciążenia konstrukcji oraz odpowiedzi na przykładane doń oddziaływania. Wiedza ta wspomaga ekspertów w określaniu rzeczywistego stanu statycznie i dynamiczno-wytrzymałościowego monitorowanych obiektów w trakcie ich normalnej eksploatacji, a także w przypadku różnych sytuacji wyjątkowych, np. uszkodzenia elementów konstrukcji w wyniku awarii obiektu, eksplozji, przeciążenia itp. Systemy monitorowania dostarczają także bardzo obszernej wiedzy naukowej na temat sposobu pracy rzeczywistych konstrukcji, co umożliwia np. weryfikację zaleceń normowych dotyczących sposobu ich analizy.

Systemy monitorujące pracę konstrukcji obiektów budowlanych wdrażane są na świecie od kilkunastu lat. W zasadzie wszystkie nowo wznoszone ważne i duże obiekty budowlane, a także odpowiedzialne istniejące konstrukcje wyposażane są obecnie w różnego typu urządzenia, których zadaniem jest prowadzenie ciągłego pomiaru wybranych wielkości fizycznych. Najwięcej tego typu realizacji odnotowano na Dalekim Wschodzie oraz w Stanach Zjednoczonych. W Polsce systemy monitorowania pracy konstrukcji dopiero są rozwijane. Wynika to w dużej mierze z faktu, że do niedawna nie budowaliśmy obiektów o większych rozpiętościach, czy niestandardowej konstrukcji. Mimo to, do chwili obecnej wyposażono

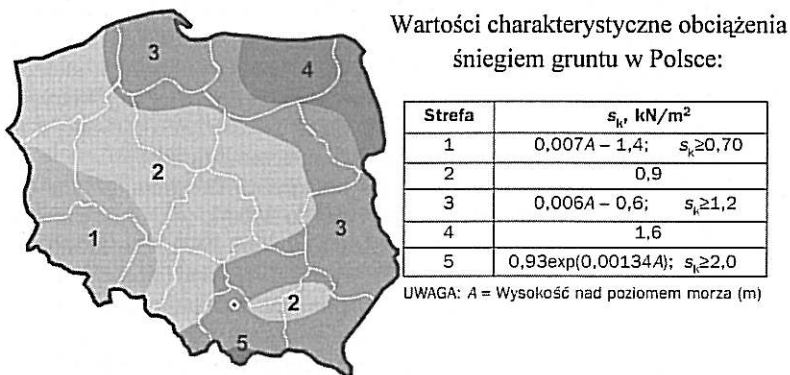
w różnego typu systemy monitorowania kilkanaście dużych obiektów halowych, mostowych, zbiorników oraz konstrukcji geotechnicznych.

Warto wspomnieć, że wszystkie współcześnie projektowane i wykonywane odpowiedzialne maszyny (duże silniki, wentylatory, generatory prądu, obrabiarki itp.) wyposażane są w różnego typu czujniki służące do pomiaru wielkości fizycznych, których zmiana wartości informuje o jakiejś zmianie sposobu oddziaływania lub właściwości mechanicznych maszyny. Osiągnięcie przez daną wielkość fizyczną zdefiniowanej wartości lub spełnienie konkretnego warunku logicznego przez kilka wielkości fizycznych powoduje wykonanie przez maszynę danej procedury, np. jej zatrzymanie. Realizacja pomiarów odbywa się niezależnie od standardowych przeglądów (inspekcji) wykonywanych w różnych odstępach czasu. Działania te uzupełniają się i wzajemnie wspomagają. Ostateczną decyzję o sposobie postępowania zawsze podejmuje człowiek, gdyż tylko on jest w stanie właściwie przeanalizować przyczyny pojawienia się danej odpowiedzi maszyny. Dzisiaj nikt nie wyobraża sobie np. elektrowni, w której nie wykonywano by pomiarów tysięcy wielkości fizycznych związanych z oddziaływaniami i odpowiedzią poszczególnych maszyn. Sterowanie pracą wszystkich urządzeń jest realizacją różnego typu procedur wykonywanych najczęściej automatycznie, przy minimalnym udziale człowieka. Jego decyzja potrzebna jest zazwyczaj jedynie w sytuacjach niestandardowych.

#### 4. Oddziaływania, a wymagania normowe

Wartości oraz sposób rozkładu oddziaływań mechanicznych i niemechanicznych podawane są w normach jako określone doświadczalnie modele o różnym stopniu zaawansowania. Zbudowanie tych modeli związane jest zawsze z koniecznością przyjęcia pewnych założeń oraz zdefiniowania funkcji prawdopodobieństwa określającej możliwość osiągnięcia przez dane oddziaływanie innej (zazwyczaj większej) wartości lub odmiennego sposobu rozkładu. Problematyka ta zostanie przybliżona na podstawie obciążenia śniegiem.

Obciążenie połaci dachowych śniegiem [1] określają normy PN-80/B-02010 „Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie śniegiem” wraz ze zmianą Az1 z 2006 r. oraz PN-EN 1991-1-3:2005 „Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem”. Normy te wyróżniają 5 stref śniegowych, na który został podzielony obszar Polski – rys. 2.



Rys. 2. Podział Polski na strefy obciążenia śniegiem oraz wartości charakterystycznego obciążenia śniegiem gruntu w Polsce wg PN-80/B-02010 wraz ze zmianą Az1 z 2006 r. oraz PN-EN 1991-1-3:2005 (wartości w obydwu normach są identyczne)

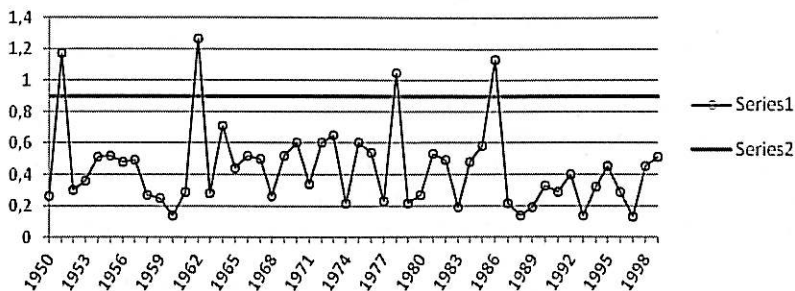
W każdej ze stref obciążenie charakterystyczne śniegiem gruntu posiada inną wartość. Uwzględniając różne współczynniki, związane między innymi z kształtem dachu, jego izolacyjnością termiczną, czy bliskością obiektów sąsiednich wyznaczane jest obciążenie charakterystyczne śniegiem odniesione do  $1\text{m}^2$  powierzchni rzutu dachu. Oczywiście, obciążenie to będzie przyjmować inną wartość w zależności od części dachu. Przykładowo, w sąsiedztwie atyk będziemy spodziewać się nagromadzenia większej ilości śniegu niż w obrębie kalenicy, gdzie śnieg będzie przewiewany przez wiatr. Zdajemy sobie jednak sprawę, że rozkład obciążenia śniegiem na rzeczywistym dachu może być znacznie bardziej skomplikowany niż funkcja wieloliniowa proponowana przez normę.

Zastosowanie współczynnika obciążeniowego (o wartości 1,5) umożliwia wyznaczenie wartości obciążenia obliczeniowego śniegiem uwzględnianego podczas analizy nośności konstrukcji.

Obiekty budowlane projektowane są na pewien, z góry określony okres użytkowania, który zazwyczaj wynosi od 10 do kilkuset lat. Dłuższe okresy użytkowania wymuszają oczywiście przyjmowanie wyższych wartości współczynników bezpieczeństwa, co generuje wyższe koszty jednostkowe realizacji inwestycji. Stąd, najczęściej przyjmowanym okresem prawdopodobnej, bezpiecznej pracy konstrukcji budynku jest 50 lat. Trwałość obiektu budowlanego związana jest między innymi z nie przekraczaniem w okresie jego użytkowania obciążeń przyjętych podczas jego projektowania. Należy zwrócić uwagę, że okres powrotu, czyli upraszczając, czas w którym wartość danego oddziaływania nie powinna zostać przekroczona, dla obciążenia śniegiem zdefiniowanego w normie PN-80/B-02010. Obciążenia w obliczeniach statycznych – obciążenie śniegiem (w skrócie PN-B), czyli w normie, zgodnie z którą projektowane były obiekty budowlane w Polsce do połowy 2006 r., został przyjęty na poziomie jedynie 5 lat. Oznacza to, że statystycznie raz na pięć lat, obciążenie śniegiem przyjęte jako założenie do zaprojektowania konstrukcji obiektu, mogło zostać przekroczone. Dopiero zmiana normy wprowadzona w drugiej połowie 2006 roku wydłużyła okres powrotu obciążenia śniegiem do 50 lat (podobnie przyjęto w normie PN-EN 1991-1-3:2005 „Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem” – w skrócie PN-EN), co w większości spowodowało zwiększenie wartości zalecanych obciążeń [2].

Dodatkowo należy podkreślić, że obciążenia przyjmowane dla danego obszaru Polski są wyznaczane na podstawie pomiarów wykonywanych w wybranych stacjach meteorologicznych, co oznacza, że jest to tylko pewna próba statystyczna oraz, co bardzo istotne, ciężar pokrywy śnieżnej odpowiada pokrywie na gruncie, która to zależy od jego temperatury i może być dużo mniejsza niż pokrywa na dobrze izolowanym termicznie dachu (woda z topniejącego śniegu może wsiąkać do gruntu) [2]. Wreszcie, podawana w normie wartość obciążenia, nie jest bynajmniej wartością maksymalną przyjętą w założonym okresie powrotu, tylko wartością wyznaczoną zgodnie z tzw. metodą „największej wiarygodności” [3]. Metoda ta pozwala określić wartość obciążenia jakie w uproszczeniu mówiąc, z największym prawdopodobieństwem, może wystąpić w danej stacji meteorologicznej.

Na rys. 3 pokazano wykres rzeczywistego obciążenia śniegiem gruntu (linia czarna) odnotowanego dla stacji Katowice w okresie od 1950 do 2000 r. [4]. Linia czerwona obrazuje wartość charakterystyczną obciążenia śniegiem dla strefy 2 wg PN-EN, w której zlokalizowane jest to miasto. Wartość tę norma przyjmuje opisując rozkład obciążenia śniegiem dla poszczególnych stacji meteorologicznych przy pomocy rozkładu Gumbela, dla którego parametry wyznaczane są przy pomocy metody „największej wiarygodności” [2], przyjmując założenie, że teoretycznie tak określone obciążenie śniegiem może zostać przekroczone średnio raz na 50 lat. Następnie obliczona została wartość średnia dla wszystkich analizowanych stacji (0,93), którą zaokrąglono do wartości 0,9 [2]. Na rys. 3 wyraźnie widać, że tak określona wartość charakterystyczna obciążenia śniegiem gruntu została przekroczona aż cztery razy w analizowanym okresie czasu.



Rys. 3. Obciążenie śniegiem gruntu [kN/m<sup>2</sup>] w stacji Katowice w okresie od 1950 do 2000 [4] w porównaniu z charakterystyczną wartością obciążenia śniegiem przypisaną do strefy 2 wg PN-EN

Podsumowując powyższe spostrzeżenia należy stwierdzić, że nie można zagwarantować, że w okresie powrotu, przyjęte zgodnie z „normą” obciążenie, nie zostanie przekroczone. Oczywiście nie jesteśmy również w żaden sposób przewidzieć, kiedy i czy w ogóle nastąpi przekroczenie tego obciążenia i dojdzie do zagrożenia bezpieczeństwa konstrukcji obiektu. Odrębnym problemem jest określenie tego niebezpiecznego „schematu obciążenia” śniegiem na konkretnym dachu budynku, biorąc pod uwagę zmieniający się w czasie ciężar objętościowy śniegu oraz funkcję opisującą kształt pokrywy śnieżnej na dachu, dodatkowo skomplikowaną wpływem wiatru. Jeśli nasze rozważanie skupimy na obiektach niestandardowych, o znacznych rozmiarach, to okaże się, że współczesne normy obciążeniowe (i nie tylko) nie obejmują takich obiektów. Wtedy pozostają nam do dyspozycji badania modelowe (np. tunele aerodynamiczne, badania modeli konstrukcji), ale w tym przypadku będziemy musieli się zmierzyć z efektem skali oraz analizy numeryczne wykorzystujące metody elementów skończonych, elementów brzegowych i mutację tych metod. Tu znów konieczne będzie przyjmowanie wielu założeń materiałowych, przybliżeń schematów statycznych, oddziaływań i wielu innych właściwości konstrukcji.

Powyższe rozważania pozwalają spojrzeć w inny sposób na projektowanie niestandardowych obiektów. Ponieważ bardzo często niemożliwe jest jednoznaczne zdefiniowanie modelu konstrukcji i oddziaływań występujących podczas całego okresu jej eksploatacji, a ekonomicznie nieuzasadnione byłoby przyjmowanie bardzo bezpiecznych modeli, wtedy warto zastanowić się nad zastosowaniem systemu pomiarowego, który przez cały okres użytkowania obiektu monitorował będzie rzeczywistą odpowiedź konstrukcji na przykładane doń oddziaływanie. W wartościach pomiarowych uwzględniony będzie rzeczywisty schemat konstrukcji wraz ze wszystkimi zmiennościami charakterystyk materiałowych, uwzględnione zostaną efekty czasu (np. reologia), postępująca degradacja stanu technicznego obiektu oraz inne właściwości konstrukcji i oddziaływań, których zdefiniowanie podczas projektowania jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

## 5. Wymagania prawne

W wyniku awarii i katastrof budowlanych, wynikających przede wszystkim z oddziaływania śniegu, zostały wprowadzone do przepisów techniczno-budowlanych nowe uregulowania prawne mające na celu minimalizację występowania tego typu zjawisk [5].

Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 12 marca 2009 r. zmieniającym Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 56, Poz. 461 z 2009r.) w dziale V „Bezpieczeństwo Konstrukcji” § 204, ust. 7 w/w Rozporządzenia, ustawodawca narzucił konieczność kontrolowania odpowiedzi konstrukcji na przykładane do niej obciążenia:

*„Budynki użyteczności publicznej z pomieszczeniami przeznaczonymi do przebywania znacznej liczby osób, takie jak: hale widowiskowe, sportowe, wystawowe, targowe, handlowe, dworcowe powinny być wyposażone, w zależności od potrzeb, w urządzenia do stałej kontroli parametrów istotnych dla bezpieczeństwa konstrukcji, takich jak: przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w konstrukcji.”*

Obowiązek instalowania urządzeń do stałej kontroli wielkości fizycznych związanych z pracą konstrukcji dotyczy obiektów użyteczności publicznej, w których może przebywać znaczna liczba osób. Przykłady takich obiektów zostały wprost podane w rozporządzeniu, czym ustawodawca chciał wyeliminować część dyskusji na temat rodzajów budynków użyteczności publicznej podlegających w/w uregulowaniom. Wyjaśnienia natomiast wymaga sformułowanie „urządzenia do stałej kontroli”. Pod pojęciem „urządzenie” w Słowniku języka polskiego znajdujemy definicję: „mechanizm lub zespół mechanizmów, służący do wykonania określonych czynności”, w tym wypadku – kontroli zmian wartości wielkości fizycznych wykonywanej stale (w sposób ciągły), czyli w ściśle określonych odstępach czasowych. Biorąc pod uwagę możliwą, znaczną dynamikę zmian parametrów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo konstrukcji, należy przyjąć, że pomiary te powinny być wykonywane przynajmniej kilka razy na dobę. Współczesna technika umożliwia prowadzenie tego typu kontroli w odstępach czasowych rzędu kilku sekund, a w przypadku pomiarów wielkości dynamicznych (np. drgania elementów konstrukcji) – kilkuset herców.

## 6. Kontrole stanu technicznego

Podczas użytkowania obiektów budowlanych, na skutek różnych procesów w skali makro i mikro, dochodzi do ciągłej degradacji ich stanu technicznego, przy czym spadek sprawności konstrukcji opisywany jest w przybliżeniu funkcją wykładniczą. Oznacza to, że wraz z upływem czasu, uszkodzenia konstrukcji obiektów budowlanych postępują szybciej i gwałtowniej. Na obniżanie stanu technicznego konstrukcji ma wpływ wiele czynników, a między innymi:

- właściwości fizyczne i chemiczne materiałów, a w szczególności ich związek z czasem,
- ujawnianie się w czasie błędów projektowych i wykonawczych,
- nieprzestrzeganie zasad właściwej eksploatacji,
- zaniedbywanie realizacji remontów i napraw,
- przeciążenia konstrukcji

i wiele innych.

Ocena sprawności technicznej konstrukcji obiektów budowlanych jest zadaniem trudnym. Złożoność schematów statycznych, nieprzewidywalność obciążeń, a przede wszystkim postępująca degradacja materiałów nastęrcza dużo problemów i powoduje, że opinie formułowane przez oceniających stan techniczny obiektów ekspertów oparte są na niepewnych założeniach.

Obiekty budowlane, w których może przebywać znaczna liczba osób, są konstrukcjami o dużych gabarytach. Przegląd takiej konstrukcji polega na ogół na wzrokowym (zazwyczaj przy użyciu lornetki z poziomu posadzki) poszukiwaniu elementów oraz węzłów, których zachowanie informowałoby o obniżaniu się ich sprawności. Tak więc kontrolą objęte jest



przede wszystkim występowanie korozji, wybaczanie się i wichrzenie elementów, czy zniszczenie śrub bądź spawów w przypadku konstrukcji stalowych oraz zarysowania, pęknięcia czy ubytki – w przypadku konstrukcji betonowych. Taki sposób kontroli stanu technicznego niestety posiada przynajmniej kilka wad:

- przeglądy wykonywane są w dość dużych odstępach czasowych. Łatwo wykazać, że istnieje znaczne prawdopodobieństwo, że awaria może wystąpić pomiędzy przeglądami,
- przeglądy nie są w stanie wyeliminować przeciążenia konstrukcji, gdyż następują dopiero po wystąpieniu oddziaływania o zwiększonej, w stosunku do założonej, wartości,
- przeglądy wykonywane są przez ludzi, co powoduje, że mogą być obarczone błędami. Oko ludzkie nie wszystko jest w stanie zauważyć, szczególnie biorąc pod uwagę trudne warunki prowadzenia przeglądów.

Bardzo istotnym wydaje się więc poszukiwanie innych metod kontroli stanu technicznego konstrukcji obiektów budowlanych, nieposiadających wyżej wymienionych wad. Taką metodą może być zainstalowanie na obiekcie systemu monitorowania konstrukcji. Urządzenie to będzie dostarczało w trybie ciągłym informacji o sposobie jej pracy, bez konieczności obecności osoby interpretującej wyniki pomiarów w analizowanym obiekcie.

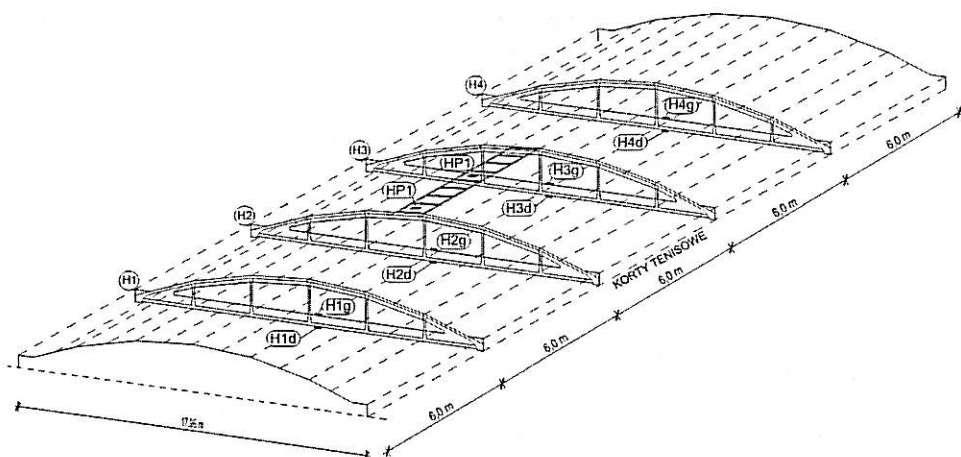
## 7. Przykłady systemów monitorowania

Pomimo, że systemy monitorowania konstrukcji rozwijane są w Polsce dopiero od kilku lat, udało się zrealizować ich co najmniej kilkanaście. W artykule zostaną przedstawione wybrane przez autora obiekty budowlane wyposażone w systemy monitorowania.

### 7.1. Obiekty wielkopowierzchniowe

Obiekty wielkopowierzchniowe, czyli takie, których powierzchnia zabudowy jest duża, są w sposób szczególny przeznaczone do monitorowania. W obiektach tych bardzo często spotykane są przekrycia dachowe o dużej rozpiętości, przy czym mogą one być wykonywane jako konstrukcje stalowe (w tym również linowe), betonowe (najczęściej sprężone) lub drewniane. Oddziaływanie śniegu jest dla tych obiektów bardzo często trudne do jednoznacznego zdefiniowania, gdyż ich gabaryty (w tym często skomplikowany układ połączonych brył) powodują zaburzenie w rozkładzie tego oddziaływania na połaci dachowej.

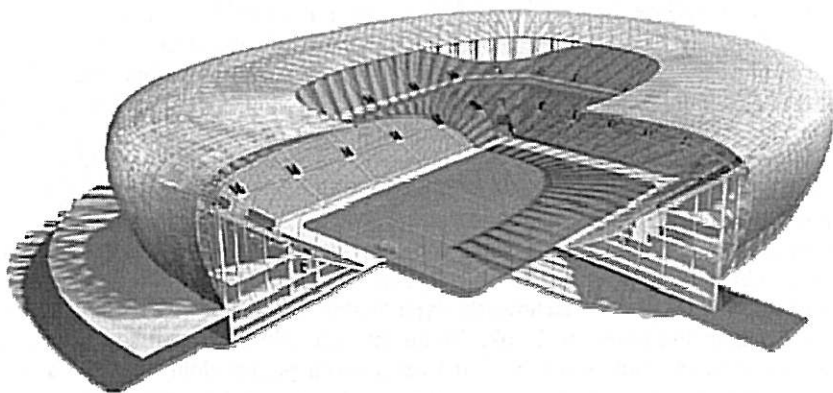
Monitorowane mogą być jednak obiekty o różnej skali. Jako przykład niech posłuży **hala i sala sportowa Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie**. Ze względu na planowaną przebudowę obiektu, w bardzo istotny sposób miał zostać ograniczony dostęp do kablobetonowych dźwigarów dachowych typu KBO-18 i KBO-15. Konstrukcja dachu eksploatowana była już przez okres ok. 50-ciu lat. Zdecydowano się na zainstalowanie na wszystkich dźwigarach dachowych, na ich rozciąganych pasach dolnych, dwóch czujników służących do pomiaru odkształceń na dolnej i górnej powierzchni pasa. Czujniki strunowe o bazie 150 mm zostały połączone z konstrukcją poprzez wklejenie kotew przyspawanych do elementów bazowych czujnika. Dodatkowo, na kilku wybranych płytach dachowych typu PŻ 1,49x5,87 m o wysokości żeber 0,3 m, zainstalowano czujniki realizujące pomiar odkształceń powodujących ściskanie na kierunku równoleżnikowym powłoki walcowej rys. 4.



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia czujników w hali o rozpiętości 18m

Zadaniem systemu jest przede wszystkim zwiększenie bezpieczeństwa konstrukcji. Wartością dodaną jest natomiast ostrzeżenie o nadmiernym obciążeniu śniegiem. Ze względu na zmianę normy określającej wartość możliwego obciążenia śniegiem, konieczne było wprowadzenie kontroli tego oddziaływania. System monitorowania nie analizuje ciężaru śniegu, a odpowiedź konstrukcji spowodowaną tym oddziaływaniem. Dzięki temu możliwe jest odpowiedzialne zarządzanie odsnieżaniem dachu hali i usuwanie śniegu dopiero wtedy, gdy jest to naprawdę konieczne z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji.

Istnieją jednak obiekty z przekryciami o znacznych rozmiarach, których odsnieżanie praktycznie nie jest możliwe. Jako przykład niech posłuży dach stadionu piłkarskiego PGE ARENA wzniesionego na Euro 2012 – rys. 5.



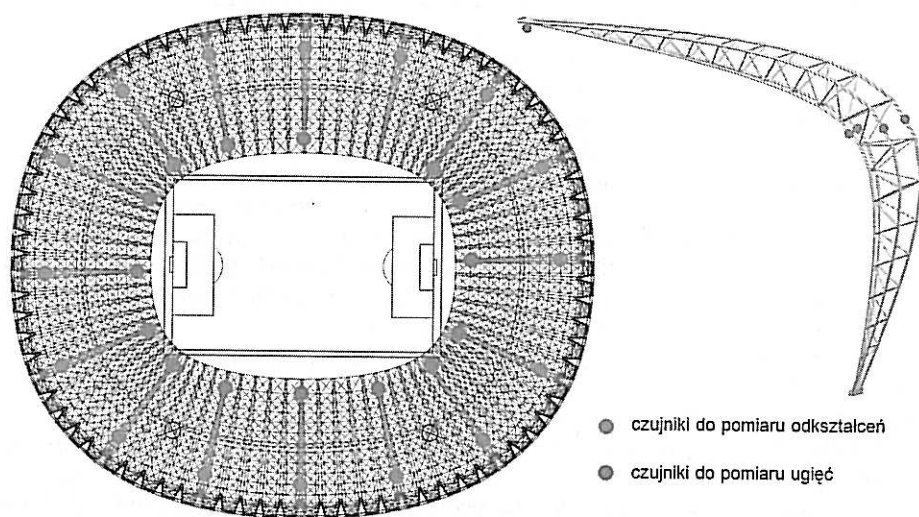
Rys. 5. Widok stadionu PGE ARENA [6]

Zakrzywienie ścian zewnętrznych powoduje, że podczas zrzucania śniegu dochodziłoby do ich uszkodzenia. Usuwanie śniegu w kierunku wnętrza obiektu skutkowałoby natomiast zniszczeniem murawy. Określenie funkcji opisującej ekstremalny rozkład obciążenia śniegiem dla takiego obiektu jest możliwe jedynie w sposób przybliżony na podstawie badań modelowych. Najlepszym sposobem kontroli wyężenia tego typu obiektu podczas jego eksploatacji na skutek oddziaływania śniegu jest instalacja systemu monitorowania. Dzięki

pomiaram, możliwe będzie bieżące kontrolowanie sposobu pracy konstrukcji, w szczególności spowodowane obciążeniem śniegiem.

Konstrukcja zadaszenia stadionu [6] składa się z 82 przestrzennych kratownicowych wiązarów stalowych w formie łuków sierpowych wspartych na fundamentach lub na podziemnej części konstrukcji żelbetowej. Jest ona niezależna od pozostałych części stadionu i stanowi odrębny statycznie element. Wiązary główne połączone są ze sobą obwodowymi elementami tworzącymi zamknięte pierścienie. Dodatkowo, wiązary są usztywnione stężeniami prętowymi typu X. Dzięki układowi pierścieni obwodowych i stężeń ciągnowych, zadaszenie pracuje jak quasi – kopuła z otworem w środku. Ponieważ jednak kształt wiązarów głównych odbiega od teoretycznej kopuły membranowej, występują w nich duże momenty zginające.

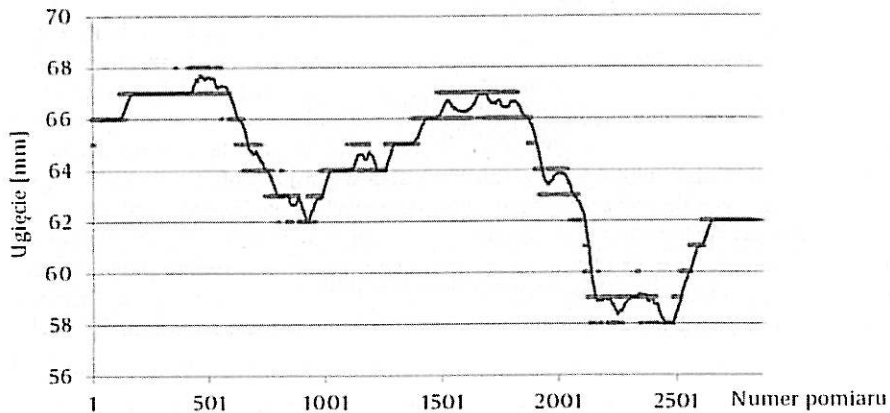
Wiązary główne rozmieszczone są w rozstawie ok. 8 m wzdłuż obwodu stadionu. Wysokość od poziomu stopy do powierzchni dachu wynosi ok. 38 m. Długość wspornika nad trybuną, liczona od łożyska do krawędzi dachu nad boiskiem wynosi ok. 48 m. Pasy wiązarów wykonane są z profilu rurowego, okrągłego  $\varnothing$  355,6 mm o zmiennej grubości ścianki od 8 do 30 mm. Krzyżulce wiązarów głównych wykonano z profilu rurowych  $\varnothing$  219,1/8 mm. Cała konstrukcja zrealizowana została jako spawana.



Rys. 6. Rozmieszczenie punktów pomiarowych [6]

Ostatecznie opomiarowano co czwarty z 82 dźwigarów. Na każdym z 16 dźwigarów, na ich końcach, zainstalowano laserowe czujniki do pomiaru ugięć. Określenie odkształceń konstrukcji zaplanowano w najbardziej wyężonych przekrojach pasów rurowych przy pomocy czujników strunowych o bazie 50 mm – rys. 6, przy czym na każdej rurze zamontowano 4 czujniki rozmieszczone co  $90^\circ$ . Dodatkowo, na dachu obiektu umieszczono 4 kamery obrotowe oraz 4 tyczki śniegowe z naniesioną podziałką służące obserwacji rozkładu obciążenia śniegiem. Zamontowano także 16 czujników kierunku i prędkości wiatru w celu jak najlepszej analizy tego oddziaływania klimatycznego na konstrukcję przekrycia. Pomiaru meteorologiczne wspomagane są stacją referencyjną umieszczoną na pylonie mostu im. Jana Pawła II w Gdańsku.

Na rys. 7 pokazano zmianę ugięcia jednego z dźwigarów w okresie dwóch dni lutego 2012 r., gdy dochodziło do zmian temperatur i wynikającej stąd zmiany obciążenia śniegiem.



Rys. 7. Zmiana ugięcia jednego z dźwigarów w okresie 5-6 lutego 2012 r. [6]

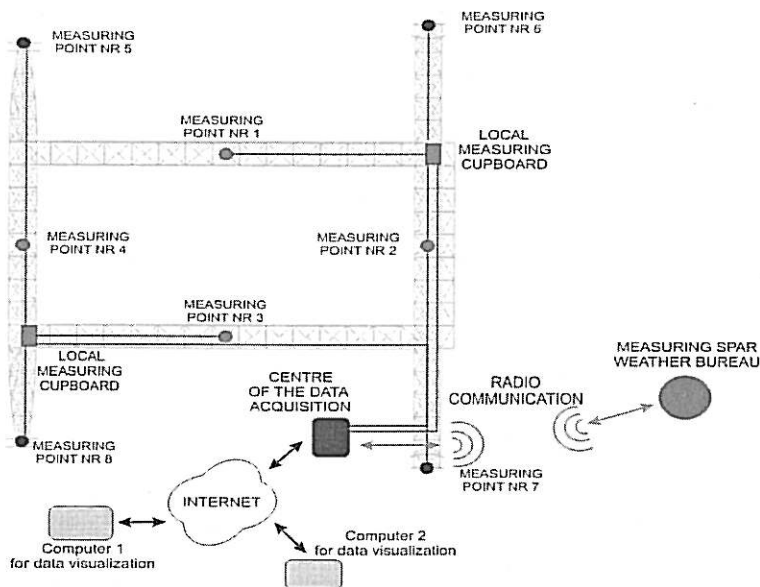
Na podstawie wszystkich pomiarów, przy wykorzystaniu metod genetycznych, budowana jest dla całego stadionu funkcja obciążenia połaci dachowej. Dla tej przestrzennej funkcji wykonywana jest analiza całej konstrukcji i poddawane zostają weryfikacji wszystkie jej elementy. W przypadku wyężenia dowolnego elementu większego niż zdefiniowano, podejmowane są procedury, łącznie z zarządzaniem ewakuacji obiektu.

Podobny system monitorowania zainstalowano na **Miejskim Stadionie w Poznaniu**, gdzie konstrukcję nośną dachu stanowią dwie główne kratownice przestrzenne o rozpiętości 175,0 m i 159,5 m oparte na żelbetowych podporach o przekroju poprzecznym w kształcie litery U. W kierunku prostopadłym do kratownic głównych zaprojektowano wsparte na nich dwie kratownice podłużne o rozpiętości 135,0 m [7].

Nietypowe ukształtowanie bryły stadionu wymagało, dla określenia charakterystyki oddziaływania wiatru i śniegu, przeprowadzenia badań w tunelu aerodynamicznym. Badania takie przeprowadzono w Politechnice Krakowskiej.

W ramach systemu monitorowania konstrukcji realizowane są pomiary następujących wielkości fizycznych – rys. 8:

- przemieszczenia kratownic na podporach przy zastosowaniu ekstensometrów strunowych o zakresie pomiarowym 600 mm – 2 szt.,
- odkształcenia pasów kratownic przy zastosowaniu czujników strunowych o bazie 50 mm – 28 szt.,
- przyspieszenia w wybranych przekrojach kratownic przy zastosowaniu akcelerometrów piezoelektrycznych – 8 szt.,
- przemieszczenia kątowe kratownic przy zastosowaniu strunowych czujników kąta – 8 szt.,
- prędkość i kierunek wiatru przy zastosowaniu anemometrów mechanicznych – 3 szt.,
- temperatura przy zastosowaniu termistorów – 38 szt..



Rys. 8. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na konstrukcji przekrycia Stadionu Miejskiego w Poznaniu

**Stadion Narodowy** również wyposażono w system monitorowania konstrukcji. Konstrukcja nośna dachu nad stadionem przypomina zasadą pracy koło rowerowe. Została zaprojektowana jako układ linowy ukształtowany radialnie, połączony ze stalowym pierścieniem ściskającym. Liny umocowane są do zewnętrznej konstrukcji nośnej, a nad środkiem stadionu zakotwione są w pierścieniu będącym elementem iglicy centralnej. Zewnętrzna konstrukcja, do której mocowane są liny, wykształcona została w postaci pierścienia rurowego opartego na słupach – rys. 9.



Rys. 9. Widok od wnętrza stadionu w kierunku iglicy (z lewej) oraz widok zewnętrznego pierścienia ściskającego (z prawej)

Pierścień ściskający wykonano z rury o średnicy 1820 mm i grubości ścianki 80 mm. Wzdłuż osi podłużnej ma on kształt zdeformowanego koła, jego łączna długość wynosi ok. 907 m. Oparty jest na 72 słupach rurowych o średnicy 1016 mm i grubości ścianki 30-70 mm oraz wysokości od ok. 29 do 34 m. Z pierścienia ściskającego, w miejscach podparcia na słupach,

wyprowadzono do góry zastrzały z rur o średnicy 1016 mm i 1200 mm oraz ściance grubości od 35 do 45 mm.

System monitorowania konstrukcji realizuje pomiary:

- przemieszczenia konstrukcji przekrycia przy zastosowaniu tachimetru automatycznego odczytującego współrzędne XYZ 30 luster,
- przemieszczenia pionowego iglicy przy wykorzystaniu systemu GPS,
- przyspieszenia iglicy przy zastosowaniu akcelerometrów piezoelektrycznych – 10 szt.,
- prędkości i kierunku wiatru przy wykorzystaniu anemometru mechanicznego – 1 szt.,
- temperatury konstrukcji przy zastosowaniu termistorów – 9 szt..

Opisane systemy monitorowania, zainstalowane na obiektach wznoszonych na Euro 2012, analizują pracę nowych obiektów. Jest zatem mało prawdopodobne, że w najbliższym czasie konieczne będzie wdrożenie np. procedury ewakuacji któregoś z obiektów. Ciekawym zastosowaniem systemu monitorowania jest jego instalacja na elementach konstrukcji, która z uwagi na niespełnienie wymagań normowych, powinna zostać wyłączona z eksploatacji. Wówczas system pomiarowy pozwala dopuścić do użytkowania obiekt, przy czym definiuje się procedury, które np. wymuszają opuszczenie obiektu lub ograniczenie wykorzystania budowli w przypadku niespełnienia zdefiniowanych warunków logicznych.

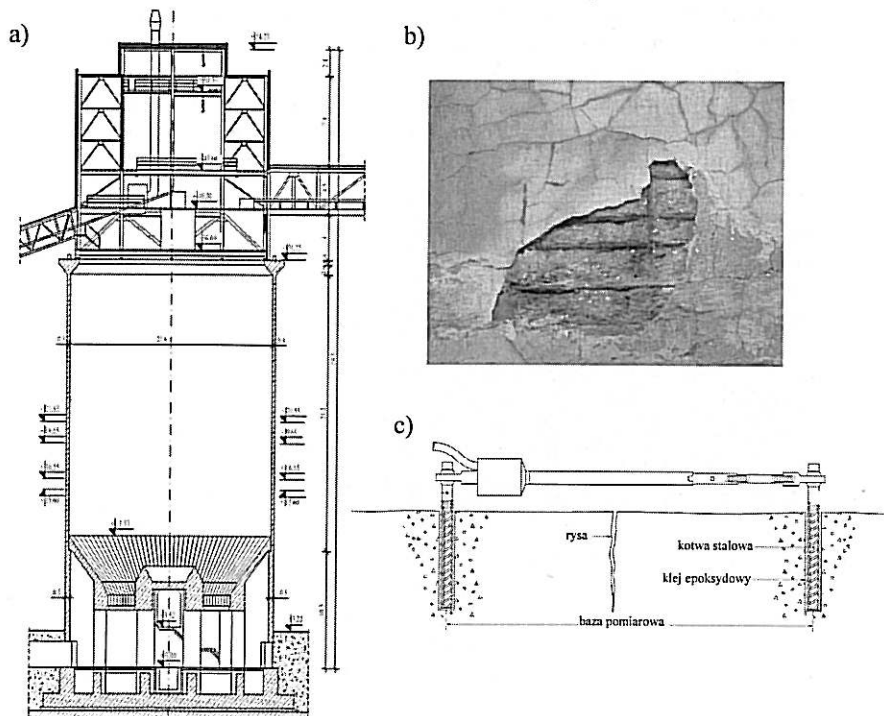
Przykładami takich czysto użytecznych systemów mogą być **amfiteatr z przekryciem ciągnowym** – rys. 10 oraz **zbiornik na węgiel** – rys. 11 [8]



Rys. 10. Widok przekrycia Amfiteatru w Płocku

Pierwszy z obiektów posiada przekrycie dachowe o konstrukcji linowej. Na skutek dużych opadów śniegu dochodzi do tak niekorzystnej deformacji kształtu dachu, że blokowany jest odpływ wody. Kolejne opady powodują zatem narastanie obciążenia i w konsekwencji przeciążenie konstrukcji. Zainstalowany system monitorowania realizuje pomiary przemieszczeń pionowych konstrukcji linowej w wybranych jej punktach. Osiągnięcie danego poziomu przemieszczenia przez dowolny z czujników powoduje wdrożenie konkretnej procedury działania, począwszy od ograniczenia w organizowaniu imprez masowych po całkowite wyłączenie obiektu z użytkowania.

Drugi obiekt to żelbetowy zbiornik na węgiel w kształcie walca o wysokości ponad 35 m. Jego wieloletnie użytkowanie w bardzo ciężkich warunkach eksploatacji doprowadziło do znacznych uszkodzeń w obszarze powłoki. Zbrojenie w wielu miejscach uległo przerwaniu, lokalnie stwierdzono nawet perforację zbiornika. Ekspertyza zalecała wyłączenie obiektu z eksploatacji. Dla kopalni taka decyzja wiązałaby się z koniecznością zamknięcia części linii technologicznej. Poszukiwano zatem innego podejścia do oceny bezpieczeństwa konstrukcji. Zdecydowano się na zainstalowanie ośmiu strunowych przetworników przemieszczeń, których zadaniem był pomiar zmian rozwarcia istniejących rys na skutek zmieniającego się wypełnienia zbiornika węglem. Dane przesyłane przez czujniki są na bieżąco analizowane i porównywane z obliczeniami numerycznymi. Zbiornik będzie pracował pod nadzorem systemu monitorowania przez okres ok. 3 lat do czasu wybudowania nowego obiektu.



Rys. 11. a) przekrój poprzeczny przez zbiornik na węgiel, b) widok przykładowego uszkodzenia powłoki zbiornika oraz c) sposób pomiaru rozwarcia rys

## 7.2. Obiekty mostowe

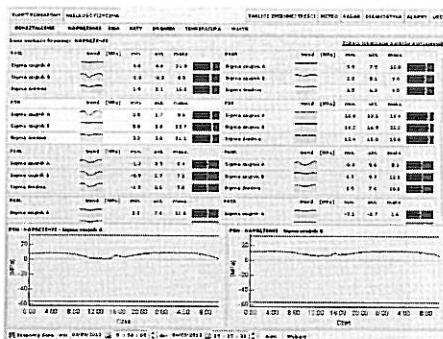
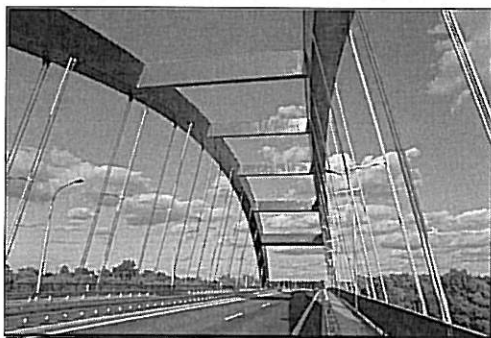
Obiekty mostowe posiadają bardzo często unikatową konstrukcję, duże rozpiętości i poddane są różnym, często trudnym do jednoznacznego zdefiniowania oddziaływaniom. Katastrofa mostu pociągnęłaby za sobą znaczne skutki ekonomiczne, a przede wszystkim mogło by dojść do śmierci wielu ludzi. Dlatego nie dziwi fakt, że pomimo braku formalnych wymagań, obserwuje się zainteresowanie projektantów dużych mostów i kładek dla pieszych systemami monitorowania.

W Polsce wyposażono w systemy monitorowania kilka dużych obiektów mostowych: Most Solidarności w Płocku [9], Most Sucharskiego w Gdańsku [10], Most przez rz. Wisłę

w Puławach [11] oraz Most Rędziński we Wrocławiu [12]. W referacie omówione zostaną tylko dwa ostatnie przykłady.

W 2008 roku zrealizowano w **Puławach nową przeprawę mostową przez rzekę Wisłę** – rys. 12. Całkowita długość obiektu wynosi 1038,2 m, a wynosząca 212,0 m rozpiętość głównego łukowego przęsła nurtowego jest największą wśród łukowych mostów w Polsce. Obiekt został zaprojektowany jako konstrukcja ciągła, czternastoprzęsłowa, o rozpiętościach przęseł  $44,0+3 \times 56,0+6 \times 64,0+80,0+212,0+80,0+44,0=1012,0$  m.

Przęsło główne podwieszono do stalowych łuków nośnych za pomocą 28 zespołów wieszaków prętowych. Dźwigary łukowe o przekroju skrzynkowym podparte zostały na filarach 12,0 m poniżej poziomu jezdni, natomiast wzniesienie łuku w środku jego rozpiętości ponad jezdnią wynosi 24,0 m. Konstrukcję pomostu zaprojektowano jako zespoloną stalowo-betonową. Dźwigary podłużne wykonano w postaci czterech blachownic o stałej wysokości wynoszącej 3,0 m zgrupowanych w dwa tandemy po dwie blachownice w rozstawie 2,5 m przy rozstawie osiowym tandemów 12,5 m. Blachownice połączono na długości układem poprzecznic o stałym rozstawie 4,0 m. Na konstrukcji stalowej ułożono żelbetową płytę pomostową o średniej grubości 0,27 m zespoloną zarówno z belkami głównymi jak i poprzecznicami.



Rys. 12. Widok przęsła łukowego mostu oraz typowa strona programu przedstawiającego wyniki pomiarów

System monitorowania realizuje pomiary:

- odkształcenia stali łuków oraz podłużnych blachownic przy zastosowaniu strunowych czujników odkształceń o bazie 50 mm – 48 szt.,
- siły w 10 wieszakach przy zastosowaniu strunowych czujników odkształceń o bazie 50 mm – 20 szt.,
- przyspieszenia drgań elementów konstrukcji (łuków i pomostu) przy wykorzystaniu akcelerometrów piezoelektrycznych – 30 szt.,
- przechyły elementów konstrukcji przy zastosowaniu strunowych czujników kąta – 10 szt.,
- prędkości i kierunku wiatru przy zastosowaniu mechanicznych anemometrów zainstalowanych w kluczu łuku oraz pod pomostem,
- temperatury przy zastosowaniu termistorów – 78 szt..

Obserwacja wskazań systemu nie wykazała do chwili obecnej występowania żadnych anomalii w pracy konstrukcji. Stwierdzono natomiast, że temperatura konstrukcji (łuków) poddanej bezpośredniemu oddziaływaniu promieni słonecznych może przewyższać zalecenia normowe [13]. W okresie użytkowania obiektu odnotowano najwyższą temperaturę o wartości  $+50^{\circ}\text{C}$  w kluczu łuku południowego. W tym miejscu występowała też największa dobowa

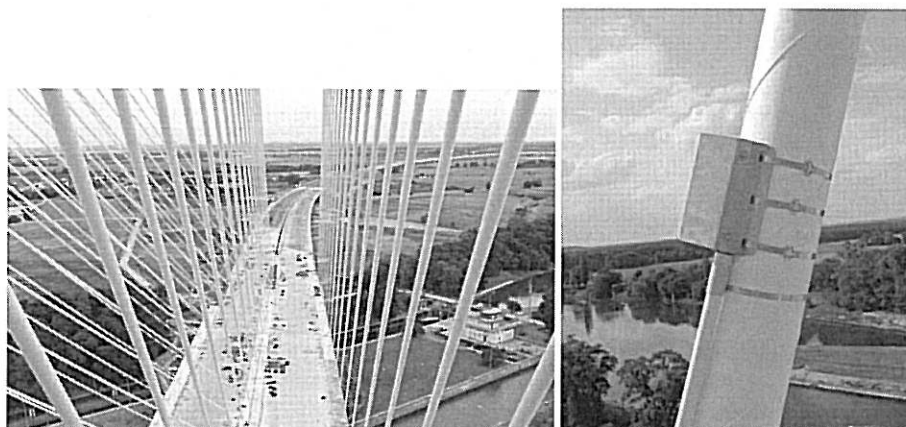


zmiana temperatury o wartości 30°C. Oczywiście maksymalne temperatury i ich zmiany w przypadku belek podłużnych ukrytych pod płytą pomostu były znacznie mniejsze.

W połowie 2011 roku oddano do użytkowania podwieszony most o najdłuższym w Polsce prześle betonowym 612 m – rys. 13. Pod względem długości prześla podwieszonego do jednego pylonu, **most Rędziański we Wrocławiu**, został sklasyfikowany na osiemnastym miejscu na świecie, czternastym w Europie i pierwszym w Polsce. Zawężając tę kategorię do mostów w pełni betonowych, most Rędziański jest czwartą konstrukcją tego typu na świecie i drugą w Europie. W Polsce jest to największy most betonowy i drugi pod względem długości prześla most podwieszony.

Most jest konstrukcją czteroprześlową o rozpiętościach prześel 50m+2x256m+50m i całkowitej długości pomostów 612 m. Prześla środkowe są podwieszone wantami do centralnie usytuowanego, trapezoidalnego pylonu o wysokości 122 m. Są one balastowane przez belkowe prześla skrajne.

Prześla mostu to dwie niezależne konstrukcje pod każdą z jezdni autostrady, zarówno w sensie podparcia na podporach, jak i podwieszenia ich do wspólnego pylonu. Szerokość całkowita prześel wynosi  $2 \times 19,24 + 0,10 = 38,58$  m.



Rys. 13. Widok z poziomu pylonu prześla nurtowego Mostu Rędziańskiego w czasie budowy oraz obudowa czujnika drgań na jednej z want

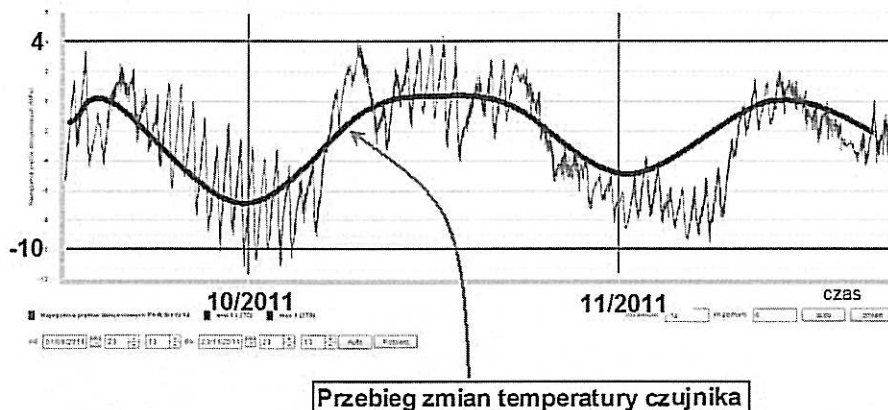
System monitorowania konstrukcji realizuje następujące pomiary:

- odkształcenia stalowego płaszczu pylonu przy zastosowaniu czujników strunowych o bazie 50 mm – 18 szt.,
- odkształcenia betonowego płaszczu pylonu przy zastosowaniu czujników strunowych o bazie 150 mm – 16 szt.,
- odkształcenia prętów zbrojeniowych przy zastosowaniu czujników strunowych o bazie 50 mm – 16 szt.,
- odkształcenia betonu wewnątrz pylonu przy zastosowaniu czujników strunowych o bazie 150 mm – 24 szt.,
- „naprężenia” betonu w pylonie przy wykorzystaniu specjalnych przetworników strunowych – 8 szt.,
- sił w pojedynczych splotach want przy zastosowaniu czujników elektrooporowych – 80 szt.,
- przyspieszeń drgań pylonu i pomostu przy zastosowaniu akcelerometrów piezoelektrycznych – 28 szt.,

- przechyłu elementów konstrukcji przy zastosowaniu strunowych czujników kąta – 10 szt.,
- prędkości i kierunku wiatru przy zastosowaniu dwóch anemometrów mechanicznych zainstalowanych na wierzchołku pylonu i pod pomostem,
- temperatury przy wykorzystaniu termistorów – 102 szt.

System monitorowania Mostu Rędzińskiego jest obecnie największym system mostowym w Polsce. Łącznie wykonywanych jest 336 pomiarów różnych wielkości fizycznych.

Na rysunku 14 pokazano zmiany przyrostów naprężeń w prętach zbrojeniowych dolnej części pylonu w porównaniu do przebiegu zmian termicznych w krótkim okresie czasowym, tj. od 15 września do 20 listopada 2011 r. Na wykresie bardzo wyraźnie widoczne jest, że główne zmiany naprężeń powodowane są wpływami termicznymi, a nie obciążeniami zewnętrznymi.



**Przebieg zmian temperatury czujnika**

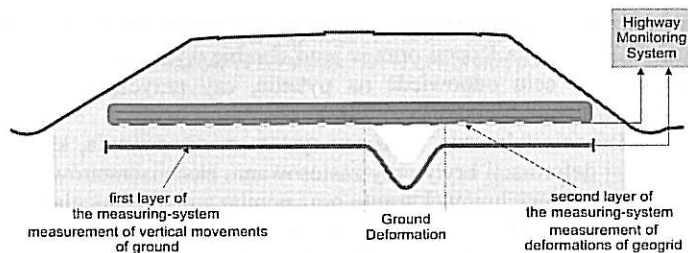
**Rys. 14.** Przyrosty zmian naprężeń [MPa] w prętach zbrojeniowych dolnej części pylonu w porównaniu do przebiegu zmian termicznych w wybranym okresie czasowym

### 7.3. Obiekty geotechniczne

Zastosowanie systemów monitorowania w budownictwie początkowo obejmowało wyłącznie obiekty geotechniczne. Zachowanie tych budowli było zawsze najtrudniejsze do przewidzenia na drodze analizy teoretycznej, a brak reakcji na deformacje konstrukcji bardzo często prowadził do katastrofy obiektu.

Największym systemem monitorowania wykonanym w Polsce jest system zainstalowany w korpusie drogowym fragmentu autostrady A1 w okolicach Piekar Śląskich. Droga na tym odcinku przebiega przez obszary objęte czynną eksploatacją górniczą. Tereny te znajdują się dodatkowo w obszarze tzw. stref uskokowych stwarzających największe zagrożenie dla obiektów i korpusu autostrady z powodu dużego prawdopodobieństwa wystąpienia deformacji nieciągłych. Istota wzmocnienia podłoża nasypów i przypowierzchniowych warstw korpusu drogowego polega na ograniczeniu stopnia redukcji poziomych naprężeń w warunkach odkształceń rozluźniających poprzez ograniczenie swobody poziomych przemieszczeń ziaren materiałów konstrukcyjnych oraz cząstek gruntu zlokalizowanych powyżej geosyntetyku [14].

Zadaniem systemu monitorowania jest lokalizowanie pustek powstających pod nasypem drogowym oraz pomiar odkształceń geosyntetyku wzmacniającego nasyp drogowy – rys. 15.



Rys. 15. Zasada działania systemu monitorowania korpusu drogowego autostrady A1

System monitorowania realizuje pomiary:

- przemieszczeń pionowych (poprzez pomiar wsunięć cięgien pomiarowych) przy zastosowaniu ekstensometrów strunowych o zakresie pomiarowym 200 mm – 2 541 szt.,
- odkształceń geosyntetyku przy zastosowaniu ekstensometrów strunowych (rys. 16) o zakresie pomiarowym 25 mm – 12 706 szt.,



Rys. 16. Widok z lotu ptaka części systemu monitorowania odkształceń geosyntetyku oraz szczegół montażu ekstensometru strunowego

- przemieszczeń pionowych przy wykorzystaniu hydraulicznych przetworników strunowych – 25 szt.,
- odkształceń zbrojenia stalowego płyty żelbetowej przy wykorzystaniu czujników strunowych zintegrowanych z prętami zbrojeniowymi – 30 szt.,
- temperatury przy wykorzystaniu termistorów – 15 247 szt..

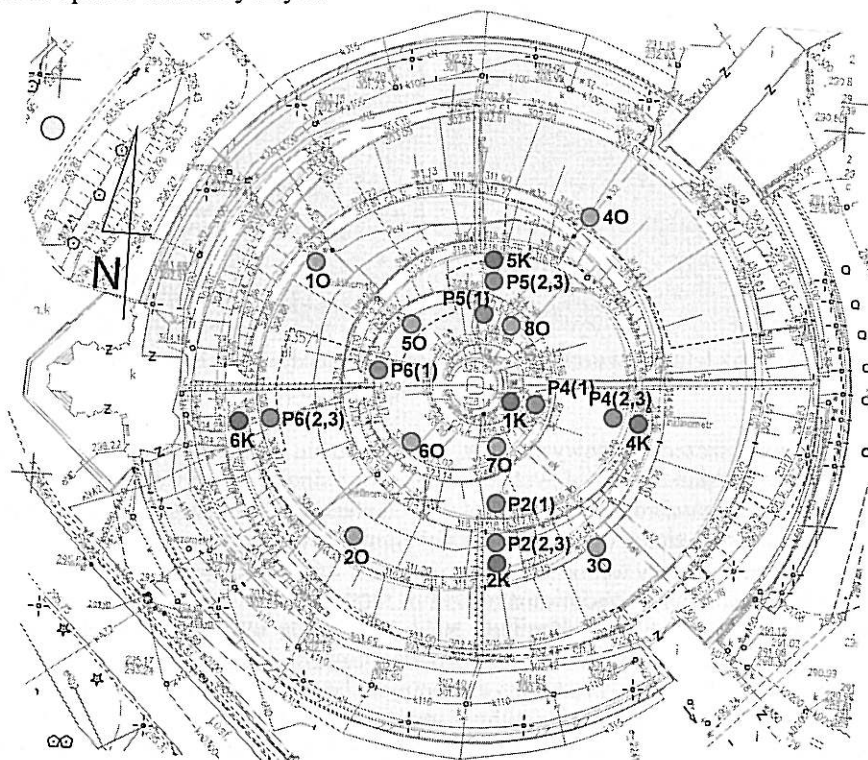
Łączna powierzchnia monitorowana wynosi ok. 100 000m<sup>2</sup>.

W przypadku wystąpienia deformacji lub odkształcenia większego od zdefiniowanego proggu, zarządca drogi ma podjąć działania zmierzające do powstrzymania dalszej degradacji konstrukcji autostrady. W chwili obecnej opracowywane są szczegółowe procedury mające na celu szybkie działanie naprawcze w chwili zaistnienia sytuacji kryzysowej. Celem robót budowlanych ma być nie dopuszczenie do wystąpienia deformacji w obrębie nawierzchni asfaltowej.

Innym, bardzo ciekawym obiektem geotechnicznym, który wyposażono w system monitorowania jest **Kopiec Kościuszki** w Krakowie. Kopiec jest budowlą usypaną przez człowieka z gruntów nienadających się do budowy tego typu obiektów. Utwory pylaste łatwo ulegają degradacji poprzez zmianę ich zawilgocenia. Kopiec wielokrotnie podlegał uszkodzeniom o różnym zakresie oddziaływania. Był też wielokrotnie naprawiany, ostatnio na przełomie wieków XX i XXI, kiedy to wykonano naprawę Kopca przy zastosowaniu współczesnych technik geotechnicznych. Niestety, po kilku latach, na skutek długotrwałych opadów deszczu, bryła Kopca ponownie uległa spękaniu i deformacjom. Obserwacje

geodezyjne prowadzone od czasu wykonania naprawy wskazują, że wierzchołek Kopca obniżył się o ok. 0,5 m. W 2012 r. na Kopcu oraz w jego obrębie wykonano bardzo szerokie badania geologiczne mające na celu odpowiedź na pytanie, czy przyczyną deformacji Kopca są nieciągłości w górotworze wapiennym, czy sama konstrukcja bryły.

W ramach badań zainstalowano w Kopcu system monitorowania, którego zadaniem jest pomiar przestrzennej deformacji bryły przy zastosowaniu ekstensometrów strunowych, pomiar wilgotności warstwy powierzchniowej gruntu oraz pomiar zmian ciśnienia porowego wewnątrz bryły Kopca – rys. 17. Przykładowo opisane zostanie wykorzystanie ekstensometrów pionowych. W pięciu punktach 1K, 2K, 4K, 5K i 6K zainstalowano przetworniki przemieszczeń w taki sposób, że przy ich pomocy mierzona jest zmiana odległości od wspólnej głowicy do punktu kotwienia danego ekstensometru. W każdym otworze zabudowano 4 czujniki. Odejmując wyniki pomiarów uzyskanych z ekstensometrów kotwionych na sąsiadujących poziomach uzyskano wynik w postaci zmiany grubości warstw bryły Kopca – rys. 18. W okresie tylko 3 miesięcy warstwa h1, czyli najbliższa powierzchni Kopca, zmniejszyła swą grubość o ok. 2 mm, przy czym w okresie tym nie odnotowano anomalii w zakresie opadów atmosferycznych.



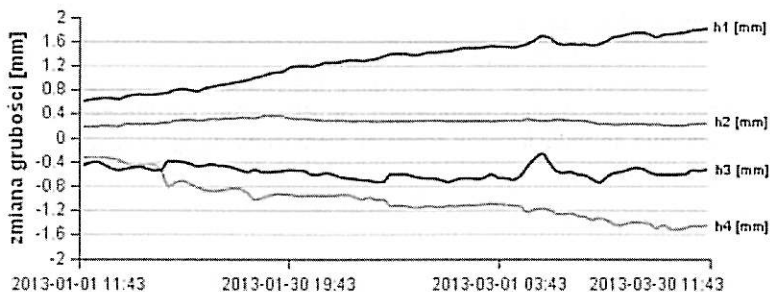
1K, 2K, 4K, 5K, 6K - punkty pomiaru przemieszczeń pionowych

10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 - punkty pomiaru odkształceń obwodowych i promienistych oraz pomiaru wilgotności gruntu

P2, P4, P5, P6 - punkty pomiaru ciśnienia porowego wody i temperatury

Rys. 17. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w obrębie bryły Kopca Kościuszki – widok z góry

▲ Punkt 4K - Zmiany grubości warstw gruntu  
na podstawie pomiarów przemieszczeń w otworach pionowych



Rys. 18. Zmiana grubości warstw Kopca pomierzona w okresie od 01.01.2013 do 30.03.2013 r. przy zastosowaniu ekstensometrów wgłębnych

Obserwacja zachowania się bryły Kopca w dłuższym okresie czasowym ma pomóc projektantom docelowego wzmocnienia budowli w przyjęciu rozwiązania, które nie podda się niekorzystnym warunkom atmosferycznym.

## 8. Podsumowanie

Niniejszy artykuł miał na celu przybliżenie czytelnikowi nowej dziedziny wiedzy, jaką są systemy monitorowania (ang. Structural Health Monitoring). Systemy te są obecnie dopiero wdrażane w Polsce i zdobywane są pierwsze doświadczenia związane z ich wykorzystywaniem. Na pewno należy stwierdzić, że wyposażenie obiektu w system monitorowania w istotny sposób podnosi jego bezpieczeństwo. Ciągły pomiar wybranych wielkości fizycznych umożliwia kontrolę pracy konstrukcji w czasie, wspomagając ekspertów w orzekaniu o stanie jej bezpieczeństwa.

Powyżej podano przykładowe realizacje systemów monitorowania. Część z nich zainstalowano na nowych obiektach, inne umożliwiły dopuszczenie do użytkowania obiektów już istniejących. Obecnie, najczęściej systemy monitorowania stosowane są jako wyposażenie obiektów dużych, o skomplikowanej konstrukcji, gdzie może gromadzić się znaczna liczba osób. Ze względu na coraz niższy koszt monitorowania konstrukcji, systemy tego typu instalowane są również na obiektach o niewielkiej skali. Służą wówczas rozpoznaniu konkretnego zjawiska. Przykładem mogą być jednoprzęsłowe **obiekty mostowe na szkodach górniczych**, gdzie system zbudowany z kilku lub kilkunastu czujników ma za zadanie prowadzenie ciągłej obserwacji odpowiedzi mostu na oddziaływanie górnicze [15]. Autor wykonał już kilkanaście niewielkich systemów pomiarowych mających za zadanie wspomaganie analiz eksperckich w budynkach o różnej konstrukcji. Systemy te instalowane były zazwyczaj na okres jednego roku do dwóch lat i miały na celu np. obserwację zmian rozwarości rys w elementach żelbetowych, rozwarcia dylatacji, czy odkształceń elementów.

Systemy monitorowania konstrukcji muszą być projektowane indywidualnie dla każdego obiektu. W procesie tym uwzględniane są uwarunkowania konstrukcyjne, ekonomiczne oraz szczegółowe wymagania inwestora. System pomiarowy powinien odznaczać się bardzo dużą trwałością (powyżej 30 lat), pomijalnym wpływem czasu na rejestrowane przez czujniki wartości (brak relaksacji i pęcznienia czujników oraz kleju), możliwością wykonania instalacji

obejmującej cały obiekt o dużych wymiarach, jak najmniejszą stratą sygnału pomiarowego na skutek różnych zakłóceń oraz możliwością rozbudowy systemu po jego oddaniu do użytkowania.

Podstawowym celem instalacji systemu monitorowania jest zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji obiektu w długiej perspektywie czasowej. Analizy wskazań czujników pozwolą na szacowanie stopnia degradacji konstrukcji w funkcji czasu i efektywniejsze planowanie remontów.

Obserwując rozwój systemów monitorowania konstrukcji w świecie należy sądzić, że wszystkie odpowiedzialne obiekty budowlane projektowane i wznoszone w Polsce będą wyposażane w czujniki do stałej kontroli pracy ich elementów

## Literatura

- [1] Bednarski Ł., Sieńko R.: Obciążenie śniegiem obiektów budowlanych, *Inżynier Budownictwa*, 12/2011.
- [2] Żurański J. A.: O obciążeniu śniegiem w aktualnych normach polskich, „*Inżynieria i Budownictwo*”, nr 9/2006, str. 510-513.
- [3] Murzewski J.: O wartościach charakterystycznych obciążenia śniegiem, „*Inżynieria i Budownictwo*”, nr 4/2007, str. 219-222.
- [4] Żurański J., Sobolewski A.: Obciążenie śniegiem w Polsce, ITB Warszawa, 2009.
- [5] Sieńko R.: Ostatnia nowelizacja prawa budowlanego, a bezpieczeństwo obiektów budowlanych, *Inżynier Budownictwa*, nr 10/2007, str. 33-36.
- [6] Romaszkiwicz T.: Ocena nośności konstrukcji zadaszenia stadionu PGE Arena w Gdańsku, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2012.
- [7] Flaga A., Bednarski Ł., Sieńko R., Stoliński M., Ćwiek P.: Monitoring of the roof structure of the municipal stadium in Poznań, 6 International Symposium on Environmental Effects on Buildings and People EEBP VI, Tomaszowice k/Krakowa, 11-13 października 2010.
- [8] Hulimka J., Sieńko R.: System monitorowania konstrukcji cylindrycznego zbiornika na węgiel, *Przegląd Budowlany*, 4/2012, str. 146-150.
- [9] Biliszczuk J., Hildebrand M., Barcik W., Hawryszków P.: System obserwacji ciągłej mostu podwieszonoego przez Wisłę w Płocku, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 7-8/2006.
- [10] Żółtowski K., Malinowski M., Hildebrand M.: Monitoring mostów podwieszonych, *Mosty*, nr 3/2009.
- [11] Biliszczuk J., Barcik W., Sieńko R.: System monitorowania mostu w Puławach, *Mosty*, nr 4/2009.
- [12] Barcik W., Sieńko R., Biliszczuk J.: System monitorowania Mostu Rędziańskiego we Wrocławiu, *Wrocławskie Dni Mostowe*, 11.2011.
- [13] Onysyk H.: Analiza zmian temperatury stalowej konstrukcji mostu przez Wisłę w Puławach, *Drogi i Mosty* 1/2012.
- [14] Sieńko R.: Projekt, realizacja oraz założenia do monitoringu monolitycznej platformy żelbetowej stanowiącej element konstrukcji zabezpieczającej przed wpływami deformacji geologiczno-górnicych, *Magazyn Autostrady*, 12/2011.
- [15] Parkasiewicz B.: Monitoring przemieszczeń elementów budowlanych w warunkach prowadzenia eksploatacji górniczej na przykładzie obserwacji wiaduktu w Rudzie Śląskiej”, *Przegląd Górnicy* nr 8/2012.