

# Jak inteligentny system monitorowania skarp i nasypów InfraGuard™ zwiększa bezpieczeństwo w zagadnieniach kolejowych

## How the InfraGuard™ Intelligent Slope and Embankment Monitoring System increases safety in railroads



**Peter Berger**

Kierownik Rozwoju Działu  
Monitoringowego Senceive,  
Specjalista od Monitorowania  
Infrastruktury Krytycznej



**Michał Dąbrowski**

Kierownik Działu Rozwiązań  
Monitoringowych TPI SP z o.o.  
mdabrowski@tpi.com.pl

**Streszczenie:** Typowym rozwiązaniem dla budowy ciągów komunikacyjnych na całym świecie jest ekonomiczne wpasowywanie ich przebiegu do naturalnego ukształtowania terenu. Stąd też typowym jest budowa drogowej i kolejowej na nasypach lub we wcięciach. Zmiany klimatyczne w ostatnim czasie wywołują skrajne warunki i wydarzenia pogodowe, które w znacznym stopniu mają wpływ na stabilność skarp. Zaburzenia takie mogą się objawiać stopniowym osiadaniem o charakterze długoterminowym, lub nagłymi, nieprzewidywanymi osunięciami i zawałami oraz stanowić poważne zagrożenie dla życia ludzkiego.

**Słowa kluczowe:** System monitorowania; Skarpa; Nasyp; Bezpieczeństwo w zagadnieniach kolejowych

**Abstract:** A typical solution for the construction of transportation infrastructure around the world is the economic adjustment of their course to the natural terrain. Hence, road and railway construction on embankments or in indentations is typical. Recent climate change is triggering extreme conditions and weather events that have a significant impact on the stability of slopes. Such disturbances may manifest themselves in gradual long-term subsidence, or in sudden, unforeseen landslides and collapses, and constitute a serious threat to human life.

**Keywords:** Monitoring system; Slope; Embankment; Safety in railway issues

Zarządzanie procesem zapobiegawczym historycznie bazuje często na lokalnej inspekcji oraz dokonaniu pomiaru jedną z kilku klasycznych metod. Związane jest to niejednokrotnie z koniecznością częstych wizyt, ograniczonym lub utrudnionym dostępem do obiektu, tymczasowością i nieregularnością pomiarów – a więc zwiększaniem wydatków i ryzyka związanych z prowadzeniem monitoringu tą metodą.

Aktualne nowinki technologiczne wprowadziły możliwość automatyzacji wielu z tych procesów: umożliwiły zdalny dostęp do obiektu i związanych z nim problemów, udoskonaliły proces pozyskiwania danych i zarządzania nimi, oraz poprawiły naszą zdolność do przewidywania warunków

pogodowych- a więc i szacowania poziomu ryzyka związanego m.in. z nadmiernymi opadami lub nagłymi roztopami. Technologia IoT (Internet of Things) umożliwiła stworzenie InfraGuard™, bezprzewodowego inteligentnego rozwiązania monitorującego, które wykrywa i reaguje na ruchy gruntu oraz zapewnia wczesny system ostrzegania o takich procesach, dając jednocześnie zdalny dostęp do systemu wielu użytkownikom z każdego miejsca na świecie. Podstawowym elementem takiego systemu jest sieć czujników ruchu o długiej żywotności, połączonych ze sobą i z Internetem za pomocą bezprzewodowej platformy radiowej. Takie systemy mają wiele cech IoT: są ekonomiczne, małe, łatwe do zainstalowania i nie wymagają kon-

serwacji lub wymagają jej w niewielkim stopniu przez bardzo długi okres eksploatacji (ponad 10 lat), nie potrzebują zasilania sieciowego i działają jak samoregenerujący się system, który jest w stanie znieść uszkodzenia poszczególnych elementów. W sieciach InfraGuard™ można zintegrować czujniki ruchu z bezprzewodowymi kamerami automatycznymi i geotechnicznymi czujnikami pomiarowymi w celu uzyskania dodatkowych informacji.

Ta technologia wyszła z laboratorium w ciągu ostatniej dekady i została powszechnie zaimplementowana przez użytkowników, takich jak brytyjska firma Network Rail, która w 2020 roku zainstalowała ponad 10000 inteligentnych czujników. Te same zdalne

platformy monitorowania stanu technicznego zostały obecnie zatwierdzone w coraz większej liczbie krajów, w tym w Niemczech, Francji, Kanadzie i USA.

## Ryzyko i wyzwania

Drogi i linie kolejowe w wielu częściach świata budowane są na nasypach lub w sąsiedztwie naturalnych lub stworzonych przez człowieka zboczy. Na bezpieczne i efektywne użytkowanie tych obiektów może mieć negatywny wpływ przemieszczanie się gleby, skał lub roślinności w sposób blokujący lub pozbawiający korytarz transportowy stabilności. Awarie mogą objawiać się stopniowym osiadaniem i deformacją, powodując zakłócenia i konieczność kosztownej interwencji inżynierskiej, lub też nagłymi osunięciami ziemi lub obrywami skalnymi, które stanowią poważne zagrożenie dla życia ludzkiego.

Czynniki przyczyniające się do rosnącego zainteresowania tematyką monitoringową oraz rosnącego zagrożenia wystąpienia awarii zbrocza, obejmują:

- wzrost liczby ekstremalnych zjawisk pogodowych związanych ze zmianami klimatycznymi, w tym częstsze epizody długotrwałych, intensywnych opadów deszczu - kluczowego czynnika zmniejszającego stabilność gruntu
- wzrost natężenia ruchu kolejowego i drogowego, co zwiększa ryzyko, że zdarzenie będzie miało wpływ na ludzi, oraz dotkliwość tego wpływu
- wiek wielu formacji ziemnych, które powstały przed normami projektowymi - są słabo odwodnione i zbyt strome jak na współczesne standardy
- kultura awersji do ryzyka, w której zarządcy obiektów budowlanych są pod presją, aby przewidywać zdarzenia i zapobiegać im, a nie naprawiać je po fakcie.

W tym kontekście rozważamy praktyczną przydatność klasycznego podejścia do zagadnienia i analizujemy zastosowanie inteligentnych rozwiązań monitorujących opartych na technologii bezprzewodowego zdalnego monitorowania stanu w celu zmniejszenia ryzyka awarii zbrocza poprzez wykrywanie ruchów gruntu i ostrzeżenie zainteresowanych stron. W szczególności opisujemy zastosowanie inteligentnego monitoringu przez Network Rail na brytyjskich torach kolejowych.

## Zarządzanie ryzykiem i kontrola bezpieczeństwa - podejście klasyczne

Osoby odpowiedzialne za bezpieczeństwo obiektów przeprowadzały kontrole i monitorowały stoki w miejscach szczególnie zagrożonych, ale dostępne im narzędzia i metodyka pomiarowa były pracochłonne i często nieskuteczne w przekazywaniu zainteresowanym stronom użytecznych i najważniejszych informacji. W dotychczasowej praktyce zarządzania zbroczami, proces monitoringowy opierał się na okresowych oględzinach i badaniach z udziałem ludzi. W przypadku pojawienia się szczególnych obaw związanych z ryzykiem wystąpienia awarii skarpy, niejednokrotnie podejmowano monitoring geotechniczny (podpowierzchniowy), na przykład z wykorzystaniem piezometrów otworowych, inklinometrów i ekstensometrów. Podejście to wymagało okresowych wizyt w terenie oraz ręcznego rejestrowania danych i było nie tylko pracochłonne, ale też nieskuteczne w przewidywaniu awarii zbrocza z wyprzedzeniem lub szybkim powiadomieniu użytkowników po wystąpieniu awarii. Stąd pojawiło się zapotrzebowanie na lepszy sposób ograniczania ryzyka, a bezprzewodowy zdalny monitoring jest rozwiązaniem o wielu zaletach, jednocześnie rozwiązując wiele problemów związanych z podejściem klasycznym, wymienionych wcześniej.

Wprowadzenie nowoczesnej tech-

nologii pomiarowej często wiąże się ze specyficznymi dla swojej natury przeszkodami i stworzyć może inne wyzwania. Miejsca lokalizacji są w większości wiejskie i mogą znajdować się u podnóża stromych zboczy, dlatego czasami mają słaby zasięg sieci komórkowej. Bardzo niewiele miejsc jest zasilanych energią elektryczną, a uzyskanie dostępu w celu wniesienia sprzętu instalacyjnego i pomiarowego jest często utrudnione. Co najważniejsze jednak, wszystkie strony musiały mieć pewność, że system zapewni poziom niezawodności i powtarzalności niezbędny ze względu na jego potencjalny wpływ na bezpieczeństwo i wydajność kolei.

## Bezprzewodowe rozwiązanie monitoringowe

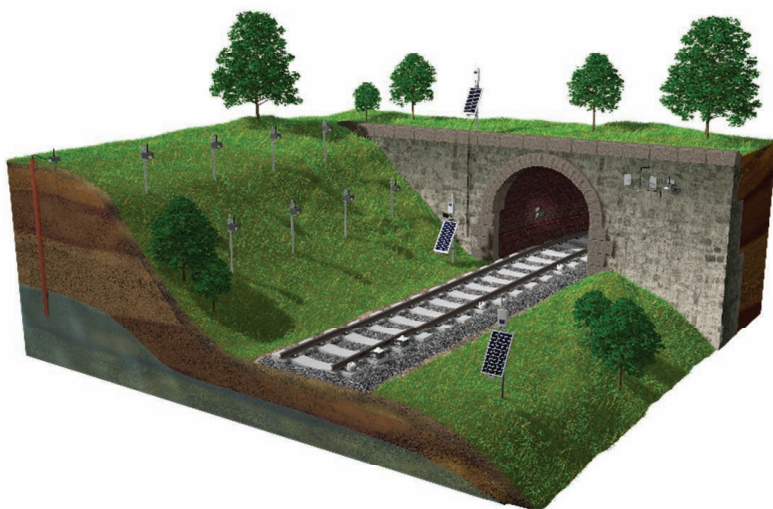
### Wpływ IoT

Pojawienie się sprawdzonych, niezawodnych i zintegrowanych technologii związanych z Internetem rzeczy (IoT) umożliwiło opracowanie InfraGuard™, bezprzewodowego inteligentnego systemu monitorującego (IMS), który może być skuteczny w odległych lokalizacjach z utrudnioną komunikacją GSM.

Sieć czujników bezprzewodowych jest w stanie wykrywać i reagować na ruchy gruntu, zdalnie i samoczynnie gromadzić dane pomiarowe, korelować je z innymi zmiennymi (warunki atmosferyczne, natężenie ruchu, prognozy pogodowe) oraz w efekcie zapewnić system wczesnego ostrzegania dla wielu użytkowników w formie zawiadomienia automatycznego.

Podstawowym elementem systemu InfraGuard™ jest sieć czujników pochylenia o długiej żywotności, połączonych ze sobą i z Internetem za pomocą bezprzewodowej platformy radiowej. Dane z czujników są zestawiane w Centrali Gateway (bramka komunikacyjna)

i przekazywane do internetowego interfejsu użytkownika (WebMonitor) za pośrednictwem technologii łączności



1. Schemat typowej instalacji InfraGuardTM: pochylomierze zainstalowane na tyczkach na skarpie/nasypie, kamera FlatMesh oraz Centrala Komunikacyjna Gateway 4G

HSPA+ (3G) lub LTE (4G).

Systemy takie mają wiele cech urządzeń IoT: są stosunkowo niedrogie, małe, łatwe w instalacji i nie wymagają konserwacji lub wymagają jej w niewielkim stopniu przez bardzo długi okres eksploatacji (>10 lat). Nie potrzebują okablowania do zasilania lub połączeń komunikacyjnych i działają jako system samoregenerujący się, który jest w stanie przetrwać uszkodzenia poszczególnych elementów swojej sieci.

## Inteligentny monitoring InfraGuardTM

Prezentowany w artykule system pomiarowy InfraGuardTM zbudowany jest na inteligentnej platformie monitorowania Senceive FlatMesh™, opar-

cowanej do stosowania w kolejowych robotach ziemnych. System monitorowania, który można zdefiniować jako IMS, posiada szereg kluczowych atrybutów. Odnoszą się one przede wszystkim do automatyzacji i szybkości reakcji.

FlatMesh™ to inteligentny bezprzewodowy system czujników oparty na strukturze „pajęcznej” sieci połączeń, opracowany w ciągu ostatniej dekady przez firmę Senceive, którego korzenie sięgają badań przeprowadzonych w University College London, zapoczątkowanych w 2005 roku. Wersja wprowadzona w 2013 roku była pierwszą, w której zastosowano obliczenia brzegowe i wbudowaną inteligencję w węzłach czujników. Do roku 2015 dodano zmienną częstotliwość raportowania, automatyczne wyzwalanie

zdarzeń i zintegrowaną kamerę, a także poprawiono zużycie energii, dzięki czemu typowy węzeł może działać przez ponad dekadę bez wymiany baterii. Inteligentne przetwarzanie danych w węźle czujnika i możliwość automatycznego podejmowania decyzji przyniosły ogromne korzyści i znalazły zastosowanie w wielu aplikacjach zdalnego monitorowania stanu geotechnicznego.

Węzły czujników mogą zmieniać częstotliwość raportowania, węzły kamer mogą otrzymać polecenie wykonania zdjęcia lub wszystkie węzły czujników w sieci mogą otrzymać polecenie natychmiastowego wykonania odczytu. W przypadku przekroczenia ustalonych wcześniej warunków brzegowych lub wystąpienia warunków krytycznych, Centrala Sieciowa automatycznie umożliwia zmianę protokołów pomiarowych i komunikacyjnych, aby umożliwić dokładniejszy i pewniejszy proces pomiarowy oraz natychmiastową transmisję danych do serwera.

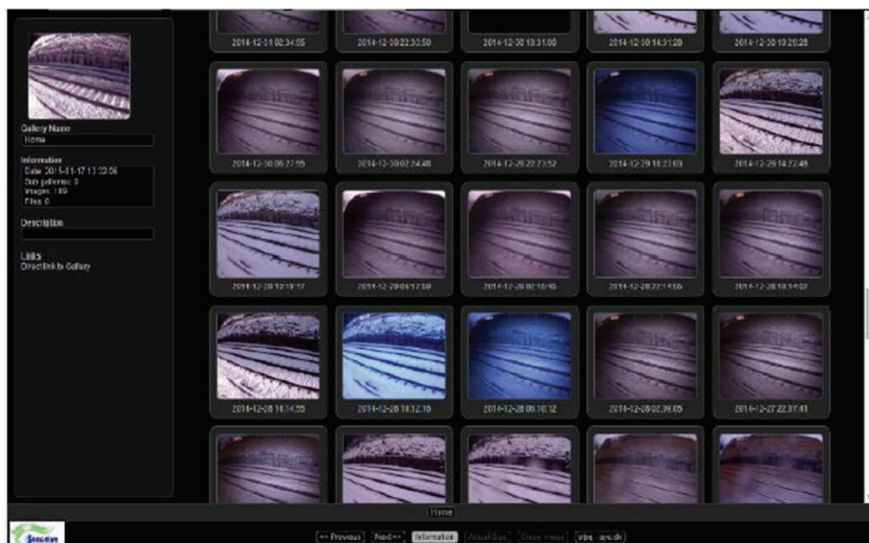
Możliwości obliczeniowe wbudowane w czujnik pomiarowy są czynnikiem, który sprawia, że sieć jest wystarczająco odporna na krótko- lub długoterminowe uszkodzenia bez systematycznej utraty wydajności. W przypadku krótkotrwałej przerwy w dostawie prądu dane mogą być przechowywane na pokładzie węzła i przekazywane dalej, gdy zasięg sieci zostanie wznowiony. Jeśli węzeł zostanie



2. Instalacja czujników wykrywających osuwanie skarp w dwóch rzędach



3. Trójosiowy czujnik pochylenia FlatMesh IX oraz NanoMacro mierzy ruch obrotowy z rozdzielczością 0,0001° (0,0018 mm/m)



4. Przykładowy collage zdjęć z kamery FlatMesh z modulem podczerwieni InfraRed- zdjęcia robione są w cyklu dobowym i przesyłane do systemu WebMonitor

uszkodzony w dłuższym okresie (na przykład w wyniku uderzenia przez sprzęt budowlany), sąsiednie węzły automatycznie dostosują się, znajdując najbardziej efektywną drogę transmisji do Centrali Sieciowej.

Kluczowe kwestie dotyczące systemu, który ma pełnić rolę związaną z bezpieczeństwem w sieci kolejowej, to trwałość, powtarzalność i szybki transfer danych pomiarowych.

Jeśli chodzi o trwałość, system monitorowania ma działać w każdych warunkach pogodowych i oświetleniowych przez wiele lat bez znaczącej interwencji człowieka. Elementy sprzętowe zostały zaprojektowane i zbudowane tak, aby działały w warunkach środowiskowych wykraczających poza te, które prawdopodobnie wystąpią w Europie. Na przykład czujniki pochylenia są przystosowane do pracy w zakresie temperatur od -40°C do +85°C. Żywotność baterii czujni-

ków pochylenia wynosi od 12 do 15 lat przy typowej częstotliwości raportowania. Elementy sieci InfraGuardTM wymagające zasilania zewnętrznego, pracują z panelem słonecznym.

Pewien stopień wspomagania procesu monitoringowego ze strony człowieka jest jednak wymagany. Konieczne jest selektywne usuwanie roślinności, aby zapobiec jej kontaktowi z czujnikami pochylenia lub zasłanianiu kamer, a także czyszczenie paneli słonecznych w miejscach, w których występują soki z drzew lub inne opady.

Termin "opóźnienie" odnosi się do czasu, jaki upływa między wykonaniem i wysłaniem pomiaru. W przypadku kamery opóźnienie odnosi się do czasu, jaki upływa od otrzymania sygnału wyzwalamyjącego aktywację kamery do momentu, gdy obraz jest dostępny w galerii internetowej. Typowe opóźnienie wynosi 1 minutę 30

sekund. W przypadku pochylomierza opóźnienie jest definiowane jako czas od otrzymania żądania wykonania pomiaru do wysłania ostrzeżenia do portalu WebMonitor. Typowe opóźnienie wynosi 2 minuty i 41 sekund.

Kluczowym wymogiem systemu monitorowania jest zapewnienie odpowiedniego poziomu powtarzalności pomiarów przyrządów automatycznych w celu wyeliminowania błędnych odczytów i mylących alarmów, które mogłyby zakłócić skuteczność działania systemu i zmniejszyć jego poziom zaufania. Powtarzalność jest definiowana przez Bureau International des Poids et Mesures jako precyzją pomiaru w określonych warunkach powtarzalności. W przypadku czujników pochylenia IX zastosowanych w tym projekcie wartość ta wynosi  $\pm 0,0005^\circ$ , co odpowiada  $\pm 0,0087$  mm/m.

Urządzenia pomiarowe, które wchodzi w skład kompletnego systemu monitoringowego InfraGuardTM, obejmują szeroką gamę trójosiowych czujników nachylenia, laserowego czujnika przemieszczeń ODS, czujnik szczelinomierza CS, bezprzewodową kamerę InfraRed i węzły przetwornika wibrującej struny oraz mV/V, które umożliwiają podłączenie czujników innych firm do systemu bezprzewodowego, jak również czujniki monitorowania temperatury powietrza i ma-



5. Centrala Komunikacyjna EdgeHub, kamera 4G i panel słoneczny



6. Instalacja systemu monitoringu

teriału PT100.

Wszystkie zalety związane z inteligentną siecią pomiarową InfraGuard™ dostępne są tylko w stworzonym przez Senceive protokole komunikacji sieciowej FlatMesh® i ze względu na brak przepustowości i problemy związane z synchronizacją - nie są możliwe do zastosowania w innych bezprzewodowych sieciach komunikacyjnych typu LoRa, która jest wykorzystywana przez większość branży monitoringu bezprzewodowego.

## Brytyjski Network Rail oraz wprowadzony system zabezpieczeń InfraGuard™

Network Rail jest właścicielem i zarządcą głównej sieci kolejowej w Wielkiej Brytanii. Podstawowe elementy tej sieci mają w większości ponad 130 lat, w tym ponad 190 tys obiektów, to

właśnie elementy ziemne: skarpy, wycięcia, nasypy.

Na kilku z tych tras występuje kumulacja cech, które łącznie powodują stosunkowo wysoki poziom ryzyka wystąpienia zakłóceń związanych z uszkodzeniem skarpy: obecność stromych zboczy, niestabilną geologię, coraz częstsze okresy wyjątkowo mokrej pogody oraz wysoki poziom ruchu drogowego. Doskonałym przykładem są ruchliwe linie podmiejskie biegnące na południe od Londynu przez Kent i Sussex, a odpowiedzialni za nie zarządcy zdecydowali się na wdrożenie szeroko zakrojonego monitoringu wykopów i nasypów.

## Monitoring wielkiego kalibru w Kent i Sussex

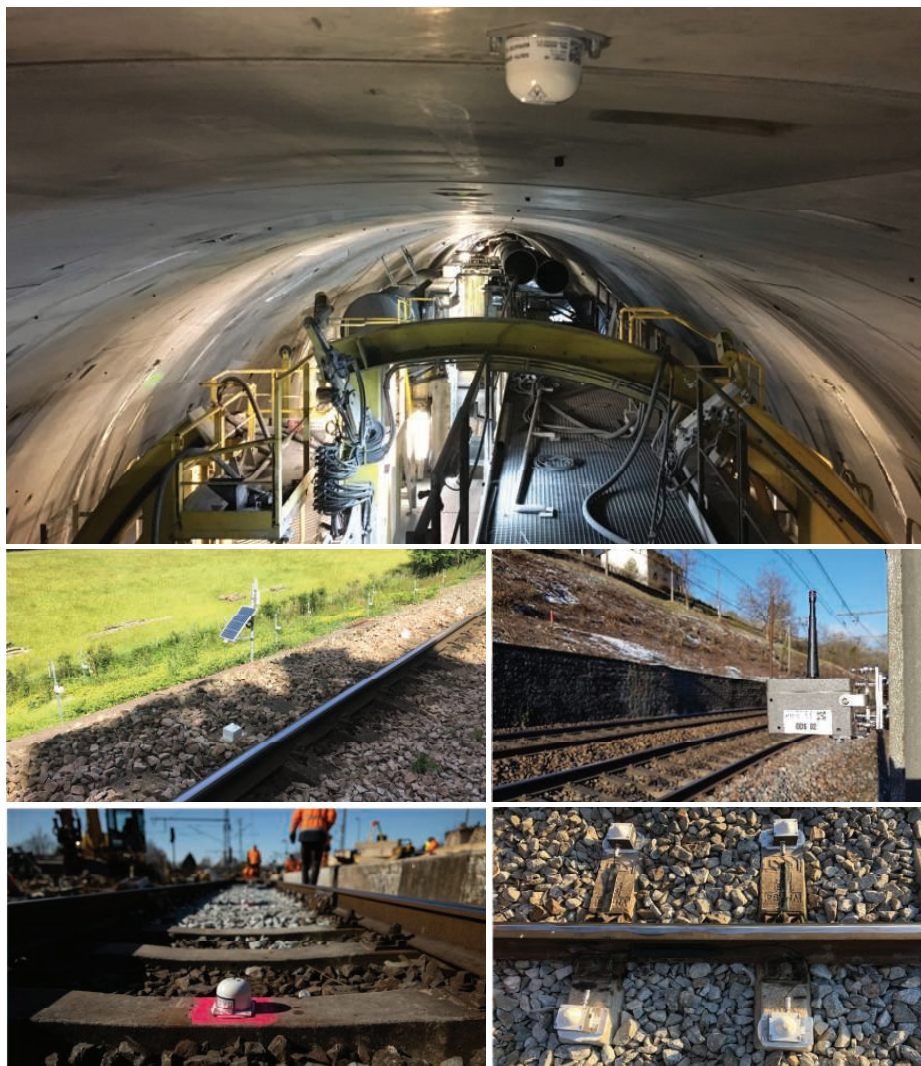
W obu hrabstwach Kent i Sussex podjęto decyzję o zainwestowaniu około 6 milionów funtów w inteligentny

system monitorowania robót ziemnych, z zamiarem uruchomienia systemu przed sezonem burz zimowych 2020/21. Aby wdrożenie systemu było skuteczne i na tyle proste, by mogli je przeprowadzić nie-specjaliści, zastosowano standardowe podejście do każdej lokalizacji. Każdy obiekt został podzielony na bloki o długości 100 m (co odpowiada pięciu łańcuchom w tradycyjnym brytyjskim systemie kolejowym). W każdym bloku zainstalowano 50 węzłów czujników pochylenia, dwie kamery i jedną zasilaną energią słoneczną Centralę Komunikacji Kómkowej.

W Sussex czujniki pochylenia zostały zainstalowane w odległości 4 m od siebie w dwóch rzędach u podnóża zbocza i dwa metry wyżej. Zespół w Kent zdecydował się na instalację jednego rzędu u dołu zbocza i jednego rzędu u góry. We wszystkich przypadkach czujniki zostały przymocowane do pionowych metalowych słupków wbitych w ziemię na głębokość 500 mm. W najkrótszych lokalizacjach zainstalowano tylko jeden taki blok, natomiast w dłuższych - kilka. Najdłuższy, w Haywards Heath, ma 20 bloków składających się z 20 bramek, 40 kamer i 996 czujników pochylenia. Łącznie w Sussex opomiarowano 9,7

Tab. 1. Zestawienie działań uruchamianych na różnym poziomie ostrzeżenia

Poziom ostrzeżenia	Ruch czujników	Reakcja
Poziom 1 Zielony	10 mm	Inżynier zdalnie ustala, czy wyniki są prawdziwe, informuje zespół zarządzania monitoringiem, kontynuuje monitorowanie
Poziom 2 Żółty	30 mm	Reakcja powyżej oraz wysłanie na inspekcję miejsca zdarzenia
Poziom 3 Czerwony	60 mm	Wszystkie czynności powyżej oraz powiadomienie zespołu ds. zarządzania ruchem o ewentualnym wprowadzeniu awaryjnego ograniczenia prędkości i rozpoczęciu prac zapobiegawczych
Poziom 4 Czarny	90 mm	Wszystkie czynności powyżej plus zatrzymanie pociągu lub ostrożność w ruchu



7. Inne przykłady zastosowań rozwiązań monitoringowych Senceive w zadaniach kolejowych

km kłopotliwych zboczy, a w Kent 12,7 km.

Instalacja na taką skalę przyniosła znaczny wzrost wydajności. Pod koniec projektu całą instalację o długości 100 m można było wykonać w ciągu jednej zmiany, co oznaczało tylko cztery lub pięć godzin pracy w miejscu robót. Obejmowało to pomiary ekologiczne, topograficzne i dotyczące zakopanego uzbrojenia terenu, selektywne usuwanie roślinności, instalację węzłów, kamer i bramy z panelem słonecznym oraz wykonanie pomiarów powykonawczych. Instalacja monitoringu została wykonana przez wykonawców bez wcześniejszego doświadczenia. Większość prac wykonano bez konieczności zamykania linii.

Na potrzeby projektu opracowano standardową procedurę instalacji. System był gotowy do działania przed

opuszczeniem terenu budowy przez zespół, a konfiguracja i zatwierdzenie zostały wykonane przez pracowników Senceive. Dane i dokumentacja zostały następnie sprawdzone i zatwierdzone przez menedżera ds. zasobów tras Network Rail, a po zatwierdzeniu przekazane do działu kontroli tras. W systemie zastosowano standardową serię alarmów opartych na skali zarejestrowanego ruchu. Są one podsumowane w tabeli 1, wraz z opisem działań uruchamianych na każdym poziomie.

Większość systemu oddanego do użytku w hrabstwach Kent i Sussex w 2020 działała przez zimę 2021/22.

Inteligentne rozwiązanie monitorujące InfraGuardTM opisane w artykule ma na celu wykrywanie ruchów powierzchniowych zboczy i przekazywanie w odpowiednim czasie ostrzeżeń użytkownikom poprzez komunikaty ostrzegające. Oprócz czujników

pochylenia wykorzystywanych do wykrywania ruchów, bezprzewodowa platforma monitorująca Senceive FlatMesh stanowiąca rdzeń systemu może zawierać szereg innych czujników, w tym podpowierzchniowe instrumenty geotechniczne. Opisany powyżej projekt Network Rail obejmował ograniczoną liczbę piezometrów otworowych zainstalowanych w tym samym systemie, co czujniki pochyleń i kamery. Chociaż nie zostały one uwzględnione w opisywanym studium przypadku, inne instrumenty, które włączono do bezprzewodowych systemów monitorowania, obejmują ekstensometry i piezometry czujnika wibrującej struny, automatyczny łańcuch inklinometryczny FlexiMeasure IPI.

## Dalszy rozwój InfraGuardTM i innych rozwiązań monitoringowych Senceive

Oczekuje się, że dalszy rozwój technologii monitorowania zdalnego z użyciem czujników IoT Senceive obejmie większą integrację strumieni danych w celu lepszego przewidywania awarii zboczy i zakłóceń w sieci. Najbardziej oczywistymi kandydatami są integracja danych o ruchu z ulepszonymi danymi pogodowymi i prognozami.

Opisany powyżej inteligentny system monitorowania został opracowany specjalnie do stosowania na zboczach ziemnych przylegających do torów kolejowych. Byłby on mniej skuteczny w przypadku, gdy głównym problemem jest obryw skalny, ponieważ pojedyncze skały o znacznych rozmiarach mogłyby spaść na drogę między czujnikami i pozostać niewykryte. Istnieją jednak inne zastosowania, w których ten sam typ systemu mógłby zostać wykorzystany. Przykładem mogą być przodki kopalń i kamieniołomów, wały przeciwpowodziowe i zapory ziemne, oraz inne elementy hydrotechnicznej infrastruktury krytycznej. ◀