

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Politechnika Warszawska

WYTYCZNE WYKONYWANIA BADAŃ PODŁOŻA GRUNTOWEGO NA POTRZEBY BUDOWNICTWA DROGOWEGO

Część 3:
Geomonitoring. Monitoring
podłoża budowlanego
i elementów konstrukcyjnych

Tom 1
Część ogólna

Wytyczne wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego.

Część 3: Monitoring podłoża i elementów konstrukcyjnych.

Tom 1 Część ogólna

ZESPÓŁ AUTORSKI:

AGH

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska w zakresie monitoringu geotechnicznego:

dr inż. Aleksandra Borecka, dr inż. Klaudia Sekuła

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska w zakresie monitoringu geodezyjnego:

dr inż. Przemysław Kuras, dr inż. Łukasz Ortyl, dr hab. inż. Tomasz Owerko, dr inż. Rafał Kocierz

Autorzy: Nr rozdziału:

A. Borecka Rozdz. 1, Rozdz. 2, Rozdz. 3, Rozdz. 4

K. Sekuła Rozdz. 2, Rozdz. 3,

P. Kuras Rozdz. 3

Ł. Ortyl Rozdz. 3

T. Owerko Rozdz. 3

R. Kocierz Rozdz. 3

ZESPÓŁ OPINIUJĄCY GENERALNEJ DYREKCJI DRÓG KRAJOWYCH I AUTOSTRAD:

mgr Artur Ładoń, mgr Tomasz Skowera, mgr Paweł Zysk

SPIS TREŚCI:

1. WSTĘP	5
1.1. Zakres stosowania	6
1.2. Podstawy formalno-prawne	7
1.3. Ogólne wymagania Eurokodu 7 dotyczące monitoringu (wykorzystano fragmenty artykułu Borecka i in. 2017)	9
2. NIEPEWNOŚĆ POMIARU INSTRUMENTÓW POMIAROWYCH	14
2.1. Dokładność	14
2.2. Precyzja (powtarzalność i odtwarzalność)	15
2.3. Rozdzielczość	15
2.4. Czułość	15
2.5. Liniowość	15
2.6. Histereza	16
2.7. Szumy, zakłócenia	17
2.8. Błędy wskazania przyrządu pomiarowego	17
3. TYPY INSTRUMENTÓW POMIAROWYCH I METODY MONITORINGU	18
3.1. Pomiary przemieszczeń (deformacji)	21
3.1.1. Pomiary przemieszczeń powierzchniowych	25
3.1.1.a Klasyczne techniki geodezyjne	25
3.1.1.b Metody teledetekcyjne i fotogrametryczne	32
3.1.1.c Szczelinomierze i urządzenia pokrewne	44
3.1.1.d Pochyłomierze i urządzenia pokrewne	46
3.1.2. Pomiary przemieszczeń wgłębnych	49
3.1.2.a Inklinometry	49
3.1.2.b Pomiary reflektometryczne TDR (MTDR)	56
3.1.2.c Ekstensometry	61
3.1.2.d Repery wgłębne i hydrauliczne systemy pomiaru osiadań	64
3.2. Pomiary położenia zwierciadła wody i ciśnienia porowego wody	70
3.3. Pomiary parcia i naprężeń	78
3.4. Pomiary obciążeń i odkształceń elementów konstrukcyjnych	82
3.5. Pomiary drgań	87
Załączniki	92
Załącznik 4 Przykłady i terminologia	93
Załącznik 4.1 Przykłady geotechnicznych i geodezyjnych urządzeń/metod pomiarowych wykorzystywanych w monitoringu	93
Załącznik 4.2 Przykłady urządzeń pomiarowych wykorzystywanych w monitoringu meteorologicznym (SHM System)	94
Załącznik 4.3 Przykłady geotechnicznych i geodezyjnych urządzeń/metod pomiarowych	

wykorzystywanych w monitoringu w zależności (na podstawie PN-EN ISO 18674-1:2015 oraz Mazzanti 2017)	95
Załącznik 4.4 W załączniku E normy PN-EN ISO 18674-1:2015 zestawiono najbardziej powszechne metody monitorowania wykorzystywane w zagadnieniach geoinżynierskich	97
Załącznik 4.5 Zestawienie najczęściej spotykanych odpowiedników w języku angielskim nazw urządzeń oraz metod zastawionych i opisanych w niniejszym opracowaniu.....	102
Załącznik 4.6 Terminologia dotycząca monitoringu	104
Załącznik 4.7 Terminologia dotycząca urządzeń i metod pomiarowych.....	107
Załącznik 4.8 Terminologia dotycząca budownictwa.....	110
Załącznik 4.9 Terminologia dotycząca podłoża	111
Załącznik 4.10 Terminologia dotycząca obszaru badań.....	112
<i>Załącznik 5 Spis wykorzystanych materiałów:</i>	<i>113</i>
Załącznik 5.1 Przepisy prawne	113
Załącznik 5.2 Normy	113
Załącznik 5.3 Wytyczne, instrukcje, przewodniki	114
Załącznik 5.4 Literatura.....	115
Załącznik 5.5 Strony internetowe:.....	118

1. WSTĘP

Zarówno w Polsce jak i na świecie infrastruktura komunikacyjna jest nieustannie rozwijana i unowocześniana. Wiąże się to z potrzebą ustanawiania nowych traktów komunikacyjnych, które niejednokrotnie budowane są na terenach odznaczających się niekorzystnymi warunkami geologicznymi oraz geotechnicznymi. Innym problemem są przeszkody terenowe zmuszające inwestorów do planowania i wykonywania przepraw podziemnych i naziemnych, którymi dana droga będzie mogła przebiegać. Przedstawione w części II sytuacje zwiększają potrzebę instalowania monitoringu, który oprócz zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników obiektu w trakcie jego eksploatacji, daje także możliwość ochrony pracowników w trakcie budowy a także uniknięcia nieprzewidzianych zdarzeń mogących skutkować katastrofą.

Czym jest monitoring?

Monitoring często jest mylony z obserwacją. Trzeba więc podkreślić, że monitoring nie jest obserwacją, aczkolwiek w skład monitoringu wchodzi obserwacja (Witkowski i in. 2009). Stanowi on integralną częścią projektowania opartego na tzn. *metodzie obserwacyjnej* (PN-EN 1997-1).

Monitoring od łacińskiego słowa „monitor” oznacza doradztwo, ostrzegający, przypominający, jest to działalność mająca na celu wykrywanie zagrożeń (Witkowski i in. 2009).

Monitoring od angielskiego słowa „monitoring” oznacza śledzenie jakościowych i ilościowych zmian pewnych wielkości (słownik wyrazów obcych)

Aby uzupełnić te definicje trzeba sięgnąć słów pewnego słynnego fizyka, matematyka, przyrodnika *Lorda Kelvina*, który powiedział: *„...when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind”* – *“kiedy możesz zmierzyć to o czym mówisz i wyrazić to liczbowo, to znaczy że wiesz coś o tym; ale jeśli nie możesz tego zmierzyć, jeśli nie możesz tego wyrazić liczbą, to twoja wiedza jest skromna i w stanie niezadowolającym”* (Thomas 1883).

Pełną definicję monitoringu można więc zawrzeć w słowach:

Monitoring to regularne (cykliczne), systematyczne zbieranie i analizowanie ilościowych danych wybranych wielkości przez z góry określony czas, w celu wykrywania zagrożeń, ostrzegania o grożącym niebezpieczeństwie i na ich podstawie wdrażania działań na wypadek przekroczenia wartości alarmowych (interwencyjnych) lub ich zaniechania (Borecka 2018/2017).

Co za tym idzie niezbędne przy monitoringu jest wcześniejsze ustalenie rodzaju zagrożenia – określenie warunku monitoringu – i dostosowanie systemu monitorowania do tego zagrożenia oraz ustalenie sposobu informowania o zagrożeniu. System monitoringu musi się więc składać zawsze z dwóch podsystemów: obserwacyjnego i ostrzegawczego. Podsystem obserwacyjny musi umożliwiać pozyskiwanie informacji stosownych do rodzaju potencjalnego zagrożenia. System ostrzegawczy musi być wyposażony w możliwość analizy obserwacji, porównywania jej ze stanami alarmowymi i przekazywania informacji o wystąpieniu stanów alarmowych pod z góry ustalone adresy (Witkowski i in. 2009).

Monitoring nie jest więc metodą rozpoznania podłoża a „narzędziem” wspomagającym proces rozpoznania pod warunkiem, że na danym terenie na którym wykonujemy rozpoznanie był on wcześniej prowadzony. Monitoring „obarczony” jest pojęciem czasu. Jest jednym z elementów zapewniającym bezpieczeństwo i jakość stawianych obiektów, powinien być prowadzony już w fazie projektowania, podczas budowy i po jej zakończeniu. Ma on na celu sprawdzenie słuszności poczynionych podczas projektowania założeń, co do zachowania konstrukcji, oraz upewnienia się, że po zakończeniu budowy konstrukcja będzie nadal zachowywać się zgodnie z założonymi

wymaganiami projektowymi. Może również stanowić użyteczne narzędzie przy weryfikacji zachowania się nowych materiałów i technologii stosowanych w geotechnice czy budownictwie (Borecka i in. 2017).

Rozwój metod i sprzętu pomiarowego doprowadził do sytuacji, w której projektanci oraz osoby odpowiedzialne za bezpieczeństwo obiektów geotechnicznych i budowlanych mają do dyspozycji szeroki wachlarz dostępnych technik i instrumentów pomiarowych. Umiejętne wykorzystanie monitoringu może okazać się cennym narzędziem w codziennej pracy inżynierów i projektantów zwłaszcza w tematyce związanej z zarządzaniem ryzykiem i wzmocnić jakość procesu decyzyjnego (Borecka i in. 2017). Szacowanie poziomu ryzyka ma istotne znaczenie dla jakości procesów zarządzania, pozwala bowiem określać stan ryzyka w momencie jego pomiaru. Jeśli zatem stan ryzyka wykazuje duże odchylenia od stanów dopuszczalnych, określonych w założeniach realizowanych planów, bezwarunkowo należy dokonać zmian scenariusza, według którego realizowane są procesy decyzyjne. System monitoringu jest więc zasadniczo systemem zarządzania ryzykiem (Powderham, 2002; Zemke 2013).

Wynikiem prac jest opis narzędzi i metod pomiarowych, które zdaniem autorów mogą być pomocne w zakresie monitoringu powierzchniowego i wglębnego wykorzystywanego dla oceny zachowania się obiektów drogowych, mostowych i tuneli oraz na obszarach występowania niekorzystnych zjawisk geologicznych i szkód górniczych. Zawarte w części II informacje stanowią wytyczne do planowania systemów monitorowania, są to zebrane przykłady rozwiązań projektowych proponowanych przez różne podmioty zajmujące się tego typu projektowaniem.

Zakres niniejszego opracowania nie obejmuje monitoringu środowiska przez który rozumie się pomiary, ocenę jakości środowiska i zachodzących w nim zmian na podstawie zebranych danych i ich analizę (art. 25 ust. 2 Dz. U. 2001 Nr 62 poz. 627).

1.1. Zakres stosowania

Powody budowy i instalacji oprzyrządowania (instrumentów) oraz wykorzystania innym metod pomiarowych dla celów monitoringu można opisać w kilku punktach. Oto główne powody ich stosowania (Slope Indicator 2004a):

Wstępne rozpoznanie terenu

Instrumenty/metody pomiarowe mogą być używane do opisu początkowych warunków jakie panują na danym obszarze badań. Typowe parametry jakie mierzy się to chociażby ciśnienia porowe, położenie zwierciadła wody (z uwzględnieniem zmian nawet w krótkim czasie), ocena przepuszczalność ośrodka gruntowego lub skalnego, ocena stateczności czy przestrzenna zmienność (metody geofizyczne).

Weryfikacja założeń projektowych

Instrumenty mogą służyć do weryfikacji założeń projektowych i sprawdzania czy zachowanie się obiektu/podłoża jest takie jak przewidywano. Dane z instrumentów/metod pomiarowych z początkowej fazy projektu mogą ujawnić potrzebę (lub możliwość) zmodyfikowania projektu w późniejszych etapach.

Kontrola powstawania konstrukcji

Instrumenty/metody pomiarowe służą do monitorowania efektów budowy. Dane z nich mogą pomóc inżynierom określić, jak szybko może przebiegać budowa bez ryzyka wystąpienia awarii.

Kontroli jakości prowadzonych prac

Oprzyrządowanie może być wykorzystywane zarówno do egzekwowania jakości wykonania inwestycji, jak i udokumentowania, że praca została wykonana zgodnie ze specyfikacjami

(projektem).

Bezpieczeństwa

Instrumenty/metody pomiarowe mogą zapewnić wczesne ostrzeżenie o zbliżających się zagrożeniu, umożliwiając czas na bezpieczną ewakuację z zagrożonego obszaru i czasu na wdrożenie działań zaradczych. Monitorowanie bezpieczeństwa wymaga szybkiego pozyskiwania, przetwarzania i prezentacji danych, dzięki czemu decyzje można podejmować szybko.

Ochrony prawnej

Dane z instrumentu mogą dostarczyć dowodów na obronę prawną projektantów i wykonawców, jeżeli właściciele sąsiednich nieruchomości stwierdzą, że realizacja przedsięwzięcia spowodowała szkody w ich nieruchomościach.

Skuteczności zrealizowanego przedsięwzięcia

Instrumenty pomiarowe mogą być wykorzystywane przy monitorowaniu skuteczności działania wybudowanej konstrukcji. Na przykład monitorowanie obciążeń ciągłych lub kotew skalnych a ruchu w obrębie zbocza. Może to stanowić na przykład wskazówkę dotyczącą działania systemu odwadniającego zainstalowanego na ustabilizowanym zboczu lub jakości wykonania zabezpieczenia.

1.2. Podstawy formalno-prawne

Potrzebę prowadzenia monitoringu potwierdzają przepisy i akty prawne wymienione poniżej:

- Rozporządzenie Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa z dnia 21 lutego 1995 r. w sprawie rodzaju i zakresu opracowań geodezyjno-kartograficznych oraz czynności geodezyjnych obowiązujących w budownictwie, Dz. U. 1995 r. Nr 25, poz. 133
- Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, Dz. U. z 2000 r. Nr 63, poz. 735
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie informacji dotyczących ruchów masowych ziemi, Dz. U. 2007 nr 121 poz. 840
- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa I Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych, Dz. U. z 2012 r. poz. 463.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, Dz. U. z 2016 r. poz. 2033.

Analiza przywołanych aktów prawnych powiązanych z oceną zachowania podłoża i konstrukcji inżynierskich dla celów drogownictwa pozwoliła stwierdzić, że nie wprowadzają one określonych regulacji prawnych w zakresie prowadzenia monitoringu, a podają jedynie bardzo ogólne wytyczne, które przywołano poniżej.

Informacji o monitoringu opartym o pomiary geodezyjne można dopatrzeć się w zapisach Rozporządzenia Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa w sprawie rodzaju i zakresu opracowań geodezyjno-kartograficznych oraz czynności geodezyjnych obowiązujących w budownictwie z dnia 21 lutego 1995 r. (Dz. U. 1995 r. Nr 25, poz. 133) a dotyczących pomiaru przemieszczeń i odkształceń obiektów i jego podłoża:

- zarówno w trakcie realizacji budowy w ramach podstawowych pomiarów (§ 12. 1. pkt 2),
- jak i, w celu zapewnienia bezpieczeństwa budowy obiektu oraz bezpieczeństwa jego utrzymania (§ 14.),
- oraz po zakończeniu budowy i w trakcie jego użytkowania w ramach okresowych

pomiarów jeżeli pomiary takie przewidywał projekt budowlany lub na wniosek zainteresowanego podmiotu (§ 18.) (Borecka i in. 2017).

Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz. U. z 2000 r. Nr 63, poz. 735), do drogowych obiektów inżynierskich zalicza: obiekty mostowe, tunele, przepusty i konstrukcje oporowe. Rozporządzenie określa sposób wyposażenia tych obiektów w znaki pomiarowe (repery) zakładane w celu wykonywania okresowych pomiarów geodezyjnych dla oceny pracy obiektu inżynierskiego oraz ich wymaganą liczbę (§ 298):

- na głowicach tuneli – nie mniej niż 3 sztuki,
- na każdej z podpór obiektu mostowego – nie mniej niż 4 sztuki,
- po obu stronach prześleł: nad podporami oraz w środku rozpiętości prześleł dłuższych niż 21 m,
- w osiach skrajnych dźwigarów lub w punktach znajdujących się nad dolnymi krawędziami ustrojów płytowych.

Repery powinny być powiązane ze stałym znakiem wysokościowym (reperem odniesienia), wykonanym z trwałego materiału i posadowionym na gruncie rodzimym poniżej poziomu przemarzania, poza korpusem drogi, w niewielkiej odległości od obiektu. Przy obiektach o długości większej niż 100 m powinny być wykonane dwa znaki stałe, rozmieszczone w pobliżu końców obiektu. Ponadto zaleca się, aby obiekty mostowe o długościach powyżej 200 m i wymagające stałej obserwacji, były wyposażone w stanowiska pomiarowe rozmieszczone poza nimi. Rozporządzenie (Dz. U. z 2000 r. Nr 63, poz. 735) jako cel założenia tych stanowisk wskazuje cykliczne pomiary niwelacyjne (osiadania, przechyły podpór, ugięcia prześleł), **co jest oczywistą pomyłką**, niemniej stanowiska te mogą być przydatne do wyznaczania przemieszczeń przestrzennych elementów obiektu mostowego.

W ustawie Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. 2011 Nr 163 poz. 981 z późniejszymi zmianami) brak przepisów dotyczących monitoringu geotechnicznego/ geodezyjnego/ geofizycznego. Ustawa w swoich zapisach odnosi się jedynie do monitoringu środowiskowego, który nie jest przedmiotem niniejszego opracowania. Również w rozporządzeniu wydanym na jej podstawie a dotyczącym projektu robót geologicznych (Dz. U. 2011r. Nr 288, poz. 1696 i zmieniającym je Dz. U. 2015r. poz. 964) brak jakichkolwiek zapisów w tym zakresie. Jedyne formalny wymóg odnosi się do rozporządzenia w sprawie sporządzania dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Dz. U. z 2016r. poz. 2033,) i dotyczy **wskazania** odcinków tras oraz obiektów wymagających monitoringu w **ramach projektowania obiektów inwestycji liniowych** ze względu na niekorzystne warunki geologiczno-inżynierskie występujące w podłożu (§ 23. ust.1.pkt 10). (Borecka i in., 2017)

Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych (Dz. U. 2012 poz. 463) wydane na podstawie Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz. U. 1994 nr 89 poz. 414 z późn. zmianami) nie zawiera również bardziej rozbudowanych zapisów dotyczących monitorowania podłoża czy konstrukcji w zakresie planowanych i wykonywanych badań geotechnicznych pod inwestycje drogowe, chociaż wskazuje, że ustalanie geotechnicznych warunków posadowienia oprócz ogólnie znanych wskazań polega również na: określeniu przemieszczeń podłoża (§ 3. 1.5.), ustaleniu wzajemnego oddziaływania obiektu budowlanego i podłoża gruntowego w różnych fazach budowy i eksploatacji, a także ustaleniu wzajemnego oddziaływania obiektu budowlanego z obiektami sąsiadującymi (§ 3.1.6.) czy na ocenie wzajemnego oddziaływania wód gruntowych i obiektu budowlanego (§ 3.1.9.). W Rozporządzeniu

zwrócono również uwagę, że przemieszczenia podłoża czy część wskazanych wyżej oddziaływań można określić poprzez analizę danych i ocenę prowadzonych obserwacji geodezyjnych (§ 5.) lub przez określenie niezbędnego monitorowania na etapie pisania projektu geotechnicznego dla wybudowanego obiektu budowlanego, obiektów sąsiadujących i otaczającego gruntu. Monitoring ten jest niezbędny do rozpoznania zagrożeń mogących wystąpić w trakcie robót budowlanych lub w ich wyniku oraz w czasie użytkowania obiektu budowlanego (§ 10, pkt 10), powołując się tym samym na zapisy zawarte w PN-EN 1997-1. W wymienione czynności winny być więc podjęte w odniesieniu do obiektów drugiej i trzeciej kategorii geotechnicznej. (Borecka i in., 2017)

Jedynym rozporządzeniem, które w sposób nieco bardziej szczegółowy określa zakres monitoringu jest Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie informacji dotyczących ruchów masowych ziemi (Dz. U. 2007 nr 121 poz. 840) wydanym na podstawie Ustawy z dnia 27 kwietnia 2001r. Prawo ochrony środowiska (Dz. U. z 2001 r. Nr 62, poz. 627, z późn. zm.). Dotyczy ono obszarów na których wystąpiły lub istnieje realne zagrożenie wystąpienia ruchów masowych mogących spowodować lub powodujących bezpośrednie zagrożenie dla życia ludzi, infrastruktury technicznej lub komunikacyjnej.

Zapisy Rozporządzenia, dokonują podziału monitoringu na powierzchniowy (podstawowy), prowadzony przy wykorzystaniu w szczególności metod geodezyjnych „w celu określenia prędkości i charakteru przemieszczania” czyli wyłącznie w celu oceny dynamiki ruchów masowych. Jeśli jest on nie wystarczający wskazane jest uzupełnienie go monitoringiem wgłębnym dla „rozpoznania liczby, rodzaju i głębokości położenia powierzchni poślizgu” czyli w celu określenia szybkości i zasięgu głębokościowego przemieszczanych mas. Dodatkowo w Rozporządzeniu zalecano częstotliwość pomiarów. Co najmniej dwa razy do roku - w okresach: marzec-kwiecień oraz wrzesień-październik, lub po wystąpieniu ekstremalnych zjawisk, a uzyskane wyniki wprowadza się do rejestru prowadzonego w formie elektronicznej bazy danych.

Tak naprawdę to prowadzenie monitoringu opartego zarówno o pomiary powierzchniowe (geodezyjne, teledetekcyjne czy fotogrametryczne) jak i pomiary wgłębne oraz odpowiednia częstotliwość pomiarów dostosowana do przewidywanych szybkości zmian, daje dopiero pełen obraz zachowania się terenów zagrożonych ruchami masowymi.

1.3. Ogólne wymagania Eurokodu 7 dotyczące monitoringu (wykorzystano fragmenty artykułu Borecka i in. 2017)

Eurokod 7 jest aktualnie podstawowym dokumentem określającym zasady projektowania geotechnicznego w Polsce. Integralną częścią projektowania geotechnicznego opartego na tzn. metodzie obserwacyjnej jest właśnie monitoring geotechniczny/geodezyjny. Ma ona zastosowanie w sytuacjach, gdy prognozowanie zachowania się konstrukcji inżynierskich i podłoża gruntowego jest trudne do przewidzenia. W Eurokod 7 dużo uwagi poświęcono metodzie obserwacyjnej już na etapie projektowania (pkt 2.8), następnie wznoszenia budowli i/lub szerzej na etapie dozoru i kontroli (pkt 4.5). Zgodnie z zapisami tam zawartymi metoda obserwacyjna została wskazana jako jedna z metod dopuszczonych przy sprawdzaniu stanów granicznych (pkt 2.1), jednak stosując ją należy spełnić następujące wymagania (PN-EN 1997-1, pkt 2.7):

- ustalić granice zachowań dopuszczalnych;
- oszacować przedział możliwego zachowania się konstrukcji i wykazać ostateczne prawdopodobieństwo, iż rzeczywiste zachowanie konstrukcji będzie w dopuszczalnych granicach;
- ustalić program monitorowania, który umożliwi stwierdzenie, czy zachowanie obiektu mieści się w akceptowanych granicach. Monitorowanie powinno wykazać to w

dostatecznie wczesnym stadium robót i z wystarczającą częstotliwością, by w sytuacji zagrożenia była możliwość podjęcia skutecznych działań interwencyjnych;

- dostosować czas reakcji przyrządów i procedury analizy wyników do szybkości możliwych zmian systemu;
- opracować plan działań interwencyjnych, które można zastosować, jeśli monitorowanie wykaże zachowanie wykraczające poza granice zachowań dopuszczalnych.

Zapisy zawarte w Eurokod 7 (Część 1) stanowią, że na etapie opracowywania projektu geotechnicznego informacja o monitoringu, a właściwie opis programu monitorowania powinien znaleźć się w nim jedynie **w razie potrzeby** (czyli nie koniecznie), przez podanie informacji o (pkt 2.8):

- celu zastosowania systemu obserwacji lub pomiarów,
- części konstrukcji, które mają być monitorowane i wskazanie stanowisk, na których mają być robione obserwacje,
- częstotliwości, z jaką mają być wykonywane odczyty,
- sposobach oceny wyników (obserwacji i pomiarów),
- zakresie wartości, w których spodziewane są wyniki,
- okresie, przez który monitorowanie ma być prowadzone po zakończeniu budowy,
- podmiotach odpowiedzialnych za wykonanie pomiarów i obserwacji, za interpretację otrzymanych wyników oraz za konserwację urządzeń.

Zapisy te odnoszą się głównie do monitoringu konstrukcji (SHM z ang. Structural Health Monitoring – System Monitorowania Konstrukcji (w polskiej nomenklaturze można niekiedy spotkać skrót SMK)) jednak można je również odnieść do monitoringu podłoża.

Na etapie wznoszenia i po zakończeniu budowy monitoring staje się instrumentem do: weryfikacji słuszności poczynionych podczas projektowania założeń odnośnie zachowania się konstrukcji, określenia różnic pomiędzy rzeczywistym zachowaniem podłoża a warunkami przyjętymi w projekcie, ale również instrumentem do oceny długotrwałego zachowania się konstrukcji czy podłoża oraz systemem wczesnego ostrzegania przed możliwym do wystąpienia zagrożeniem. Informacje pozyskane w trakcie jego prowadzenia dają często podstawę do dokonywania zmian w projekcie, określenia potrzeb lub wdrożenia działań zaradczych czy chociażby zmian w kolejności wykonywania konstrukcji.

Na tym etapie monitorowanie może obejmować następujące pomiary (pkt 4.5 PN-EN 1997-1):

- odkształcenia podłoża gruntowego spowodowane przez konstrukcję,
- wartości oddziaływań,
- wartości naprężeń kontaktowych między podłożem gruntowym a konstrukcją,
- ciśnienia wody w porach,
- sił i przemieszczeń (przemieszczenia pionowe i poziome, obroty, odkształcenia postaciowe).

Długość okresu monitorowania po zakończeniu budowy zaleca się zmieniać w wyniku obserwacji uzyskanych podczas budowy. Dla obiektów które mogą niekorzystnie wpływać na znaczne obszary otaczającego środowiska lub których awaria może stanowić duże ryzyko dla życia lub mienia zaleca się monitorowanie przez więcej niż dziesięć lat od zakończenia budowy lub nawet przez cały okres użytkowania.

W Eurokod 7 (pkt 4.5 (8,9,10)) podaje się również minimalny zakres dla oceny zachowania konstrukcji i podłoża w zależności od przypisanej kategorii geotechnicznej:

W przypadku 1 kategorii geotechnicznej ocena zachowania może być prosta, jakościowa i dokonana na podstawie obserwacji (np. wizualnej) zachowania się podłoża obiektów i ich

otoczenia, jak też samych konstrukcji.

W przypadku 2 kategorii geotechnicznej ocena zachowania może być oparta na pomiarach przemieszczeń wybranych punktów konstrukcji.

W przypadku 3 kategorii geotechnicznej jako podstawa oceny zachowania zalecane są zwykłe pomiary przemieszczeń i ich analiza uwzględniająca kolejność robót budowlanych.

Przy planowaniu monitorowania obiektów, które mogą mieć niekorzystny wpływ na warunki gruntowe lub wodne, tj.:

- konstrukcje przeznaczone do ograniczenia filtracji,
- tunele,
- duże konstrukcje podziemne,
- głębokie wykopy,
- skarpy/zbocza i konstrukcje oporowe,
- wzmocnienia podłoża gruntowego

należy uwzględnić możliwość wystąpienia przecieków, spiętrzania wody, wystąpienia podtopień, obniżania zwierciadła wód podziemnych, zmiany kierunków płynięcia wody gruntowej oraz negatywne zmiany chemizmu wód gruntowych (pkt 4.5 (11,12) PN-EN 1997-1). W PN-EN 1997-1 zawarto także zalecenia dla prowadzenia monitoringu w odniesieniu do oceny stateczności skarp i zboczy (pkt 11.7) oraz dla budowli ziemnych (pkt 12.7).

Ogólną stateczność skarp i zboczy z uwzględnieniem wpływu istniejących i planowanych konstrukcji, należy sprawdzić ze względu na stan graniczny nośności. Jeśli nie można udowodnić przez obliczenia lub na podstawie przepisów, że wystąpienie stanów granicznych jest wystarczająco mało prawdopodobne lub założenia przyjęte do obliczeń nie są oparte na wiarygodnych danych wówczas bardzo przydatnym okazuje się prowadzenie monitoringu w celu zapewnienia danych o (pkt 11.7 (2), PN-EN 1997-1):

- poziomach wód gruntowych lub ciśnieniach wody w porach gruntu (analiza naprężeń efektywnych)
- poziomych i pionowych ruchach gruntu do przewidzenia dalszych odkształceń
- głębokości i kształcie powierzchni poślizgu w powstałym osuwisku dla oszacowania parametrów wytrzymałościowych podłoża potrzebnych do projektu robót naprawczych
- prędkości ruchów, aby umożliwić ostrzeżenie przed zbliżającym się niebezpieczeństwem. W takich przypadkach może być przydatny zdalny odczyt cyfrowy, lub system wczesnego ostrzegania.

W przypadku budowli ziemnych prowadzenie monitoringu zaleca się stosować gdy (pkt 12.7 (2) PN-EN 1997-1) :

- stateczność nasypu, zależy w dużym stopniu od rozkładu ciśnienia wody w porach gruntu, poniżej nasypu,
- wymagana jest kontrola negatywnego wpływu nasypów na inne konstrukcje lub instalacje,
- istnieje znaczące zagrożenie erozją powierzchniową.
- Program monitorowania powinien wówczas obejmować (pkt 12.7 (4) PN-EN 1997-1):
- pomiary ciśnienia wody w porach gruntu, wewnątrz i poniżej nasypu,
- pomiary osiadań (przemieszczeń pionowych) całego nasypu lub jego części oraz konstrukcji będących pod jego wpływem,
- pomiary przemieszczeń poziomych,
- obserwacje elementów konstrukcji zabezpieczających.

Wykaz podstawowych czynności związanych z monitorowaniem zachowania obiektu inżynierskiego zamieszczono w Załączniku J (PN-EN 1997-1). Wykaz ten nie jest pełny, zawiera

jednak ważniejsze parametry, jakie zaleca się mierzyć przy monitorowaniu zachowania już ukończonej konstrukcji:

- osiadanie budynków i innych konstrukcji w ustalonych przedziałach czasu, łącznie z osiadaniami spowodowanymi drganiami, na gruntach o ograniczonej stabilności wewnętrznej.
- przemieszczenie poziome i odkształcenie, szczególnie związane z nasypami i hałdami; konstrukcje podpierane przez grunt, takie jak budynki lub duże zbiorniki; głębokie wykopy.
- poziomy piezometryczne wód pod budynkami lub przyległymi obszarami, szczególnie jeśli są zainstalowane systemy głębokiego drenażu lub stałego odwodnienia, lub gdy wykonywane są głębokie podziemia.
- ugięcie lub przemieszczenie konstrukcji oporowych, z uwzględnieniem: normalnych obciążeń zasyпки, wpływu hałd, nasypów lub innych obciążeń powierzchni, parcia wody.
- pomiar wydatku z drenów.
- wodoszczelność.
- pomiary drgań.

Głównym dokumentem, który porządkuje metody monitorowania geotechnicznego jest norma ISO 18674 (Rozpoznanie i badania geotechniczne. Monitorowanie geotechniczne za pomocą urządzeń terenowych). Składa się ona z 10 części z czego na obecną chwilę tylko dwie pierwsze zostały opublikowane. Pozostałe części pozostają na etapie opiniowania przez Komitet Techniczny PKN nr 254 (część 3), zostały sporządzone i są na etapie roboczym w ISO (części 4 i 5) lub są dopiero w przygotowaniu (części od 6 do 10). Każda z wyróżnionych części to opis innej techniki pomiarowej wykorzystywanej w monitoringu geotechnicznym:

- Część 1: Zasady ogólne – opublikowana w lipcu 2015 r.
- Część 2: Pomiar przemieszczeń wzdłuż linii pomiarowych: Ekstensometry – opublikowana w styczniu 2017 r.
- Część 3: Pomiar przemieszczeń w przekrojach pomiarowych: Inklinometry – opublikowana w lutym 2018 r.
- Część 4: Piezometry - na etapie roboczym
- Część 5: Pomiar parcia gruntu (TPC)- na etapie roboczym
- Część 6: Przyrządy hydrauliczne do pomiaru osiadań
- Część 7: Pomiar tensometryczny
- Część 8: Pomiar naprężeń
- Część 9: Geodezyjne przyrządy monitorujące
- Część 10: Pomiar drgań

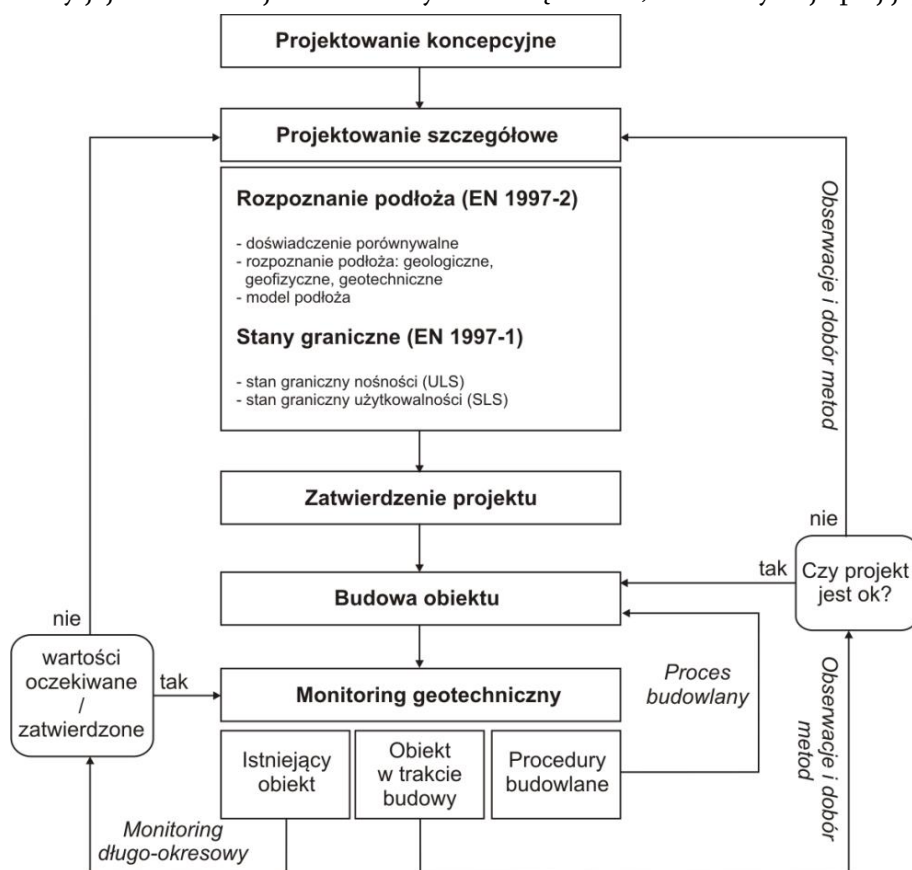
Wymagania dotyczące ogólnych zasad prowadzenia monitorowania podłoża, budowli z nim współpracujących, nasypów oraz robót geotechnicznych w ramach badań geotechnicznych zgodnie z PN-EN 1997-1 oraz PN-EN 1997-2 zawarto w pierwszej części normy PN-EN ISO 18674-1. Określono w niej również pozycje monitoringu geotechnicznego i geodezyjnego na tle projektowania geotechnicznego w nawiązaniu do etapów budowy obiektów inżynierskich: przed, w trakcie i po ich zakończeniu (Rysunek 1).

Części 2 i 3 EN ISO 18674 znajduje zastosowanie do:

- monitorowania zachowania się gruntów, nasypów oraz skał,
- monitorowania geotechnicznego obiektów przed, w trakcie oraz po zakończeniu robót (np. istniejące skarpy, nasypy, ściany oporowe wokół wykopów, zapory, tunele),
- sprawdzania projektów geotechnicznych przy zastosowaniu procedur metody obserwacyjnej,

- określania kluczowych parametrów geotechnicznych (np. na podstawie wyników badań pali),
- oceny stateczności, przed, podczas oraz po realizacji prac wykonawczych (np. stateczność naturalnych zboczy, skarp wykopów, nasypów, ścian oporowych, fundamentów, tuneli),
- identyfikacji i monitorowania aktywnych powierzchni poślizgu w gruncie (inklinometry).

Korff i in. (2013) przeanalizowali szereg projektów, w których metoda obserwacyjna została wykorzystana. Na ich przykładzie przeprowadzili analizę SWOT wskazując jej mocne i słabe strony oraz szanse i zagrożenia płynące z zastosowania jej w praktyce inżynierskiej wskazując, kiedy jej stosowanie jest doskonałym rozwiązaniem, a w kiedy najlepiej jej unikać (Tabela 1).



Rysunek 1 Pozycja monitoringu geotechnicznego na tle projektowania i budowy obiektów inżynierskich (wg PN-EN ISO 18674-1:2015)

Tabela 1 Analiza SWOT metody obserwacyjnej (na podstawie Korff i in., 2013) (Borecka i in. 2017)

STRENGTHS	MOCNE STRONY	WEAKNESSES	SŁABE STRONY
<p>Wieloetapowość projektów. W związku z szybką reakcją podłoża, możliwość skrócenie czasu realizacji inwestycji. Przemieszczenia jako wiodąca cecha projektowanych konstrukcji. Zintegrowana odpowiedzialność zespołów projektowych i budowlanych. Elastyczność vis a vis zarządzanie ryzykiem.</p>		<p>Zbyt mało czasu pomiędzy pomiarami a ich interpretacją. Metody pomiarowe, mogące przyczynić się do uszkodzenia konstrukcji (pół-destrukcyjne metody badawcze). Przyjęty mechanizm zniszczenia / wielkości nie mogą być zmierzone. Zmiana mechanizmu zniszczenia w trakcie budowy. Koszty zmian wprowadzane w projekcie w trakcie budowy są większe niż zyski minus koszty monitorowania. Komunikacja pomiędzy placem budowy biurem projektowym.</p>	
OPPORTUNITIES	SZANSE	THREATS	ZAGROŻENIA
<p>Obecność zagrożeń o niskim, ale nie do przyjęcia a priori prawdopodobieństwie przekroczenia i ich istotne skutki. Interesariusze (organizacje lub osoby indywidualne, które uczestniczą w tworzeniu projektu (biorą czynny udział w jego realizacji) lub są bezpośrednio zainteresowane jego wynikami). Podejście „Najlepsze wyjście”(ang. Best way out)</p>		<p>Szybko zmieniające się obciążenia. Niechęć władz, mocodawców. Ograniczenia czasowe. Metody i narzędzia obliczeniowe nie zawsze pozwalają na właściwe wykorzystanie metody obserwacyjnej.</p>	

2. NIEPEWNOŚĆ POMIARU INSTRUMENTÓW POMIAROWYCH

Jak wykazuje praktyka, żaden pomiar, niezależnie od staranności jego wykonania nie daje idealnego wyniku. Z pomiarem nierozzerwalnie związana jest niepewność uzyskanego wyniku, której nie sposób uniknąć. Zachowując większą staranność w pomiarze i doborze oprzyrządowania można ją jedynie próbować zmniejszyć. Celem tego rozdziału jest zdefiniowanie znaczenia terminów związanych z niepewnością w celu wskazania różnych rodzajów błędów, które mogą wpłynąć na pomiar i zasugerowania, w jaki sposób można je zminimalizować.

Zgodnie z definicjami zawartymi w przewodniku ISO/IEC Guide 98-3:2008, JCGM 100:2008 oraz Międzynarodowym słowniku podstawowych i ogólnych terminów metrologii, (ZMOGUM, GUM, 1996) „niepewność” (ang. *uncertainty*) oznacza wątpliwość co do wartości wyniku pomiaru, natomiast „niepewność pomiaru” jest parametrem związanym z wynikiem pomiaru, charakteryzującym rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej.

W praktyce istnieje wiele możliwych źródeł błędów wpływających na niepewność pomiaru. Można tu wyróżnić (JCGM 100:2008):

- a) nieprecyzyjne zdefiniowanie wielkości mierzonej;
- b) niedokładną realizację definicji wielkości mierzonej;
- c) niereprezentatywne pomiary – mierzona próbka nie jest reprezentatywna dla zdefiniowanej wielkości mierzonej;
- d) warunki środowiskowe - niewystarczającą znajomość warunków środowiskowych wpływających na pomiar lub niedokładny pomiar warunków środowiskowych;
- e) błąd obserwatora - błędy w odczytywaniu wskazań z przyrządów;
- f) skończona zdolność rozdzielcza lub próg pobudliwości instrumentu;
- g) niedokładnie znane wartości przypisane wzorcom i materiałom odniesienia;
- h) niedokładnie znane wartości stałych i innych parametrów uzyskanych ze źródeł zewnętrznych i stosowanych w procedurach przetwarzania danych;
- i) błędy metody pomiarowej - przybliżenia i założenia upraszczające uwzględnione w metodzie i procedurze pomiarowej;
- j) rozrzut wartości wielkości mierzonej podczas obserwacji w pozornie identycznych warunkach – brak powtarzalności.

Wymienione źródła niepewności niekoniecznie muszą być niezależne. Niektóre ze źródeł wymienione w punktach (a) do (i) mogą przyczynić się do powstania źródła wymienionego w punkcie (j).

Oczywiście nierozpoznany systematyczny efekt nie może być brany pod uwagę przy ocenie niepewności wyniku pomiaru, ale przyczynia się do jego błędu.

Przewodnik ISO/IEC Guide 98-3 wprowadza rozróżnienie między „niepewnością pomiarów” a „błędami” w potocznym tego słowa znaczeniu oraz przyjmuje jednolitą terminologię i metody określania niepewności pomiaru.

2.1. Dokładność

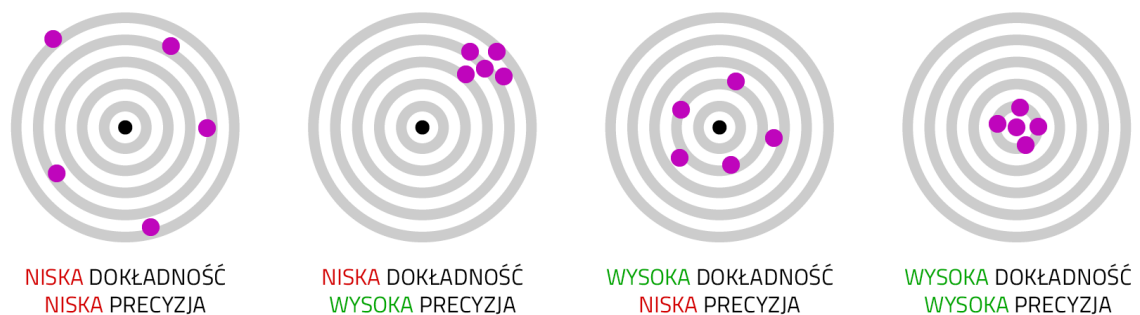
Dokładność pomiaru można zdefiniować jako różnicę pomierzonej wartości w stosunku do wartości rzeczywistej (ZMOGUM, GUM, 1996). Jest ona najczęściej wyrażana jako \pm wartość liczbowa (np. $\pm 0,5$ mm), wartość względna odczytu (np. $\pm 1\%$ odczytu) lub wartość względna

pełnej skali (np. $\pm 1\%$ pełnej skali i jest zazwyczaj określana w trakcie wzorcowania przyrządu (Slope Indicator, 2004a).

2.2. Precyzja (powtarzalność i odtwarzalność)

Precyzja to stopień zgodności między wynikami uzyskanymi w określonych warunkach z wielokrotnych pomiarów tej samej wielkości. Obejmuje dwa pojęcia: powtarzalności i odtwarzalności. Z których powtarzalność to zgodności wyników kolejnych pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonanych w tych samych warunkach pomiarowych a odtwarzalność wykonywanych w zmiennych warunkach pomiarowych (ZMOGUM, GUM, 1996). Duża precyzja otrzymana zostaje wówczas, gdy zmierzone wartości są położone blisko siebie. Precyzja określa zatem, jak dobrze został określony rezultat pomiaru, bez odnoszenia się do wartości prawdziwej.

Zależności dokładności i precyzji dokonywanych pomiarów przedstawiono na Rysunek 2.



Rysunek 2 Dokładność a precyzja pomiaru (błędy systematyczne - b) i d), błędy przypadkowe - a) i c))

2.3. Rozdzielczość

Rozdzielczość to najmniejsza wartość (działka elementarna) lub najmniejsza różnica wskazania urządzenia wskazującego, która może być zauważona w wyraźny sposób (ZMOGUM, GUM, 1996) czyli najmniejsza zmiana wskazań przyrządu jaka może być wyświetlana (lub zapisywana) na skali danego przyrządu pomiarowego. W niektórych przypadkach możliwe jest interpolowanie wartości pomiędzy dwiema działkami, ale interpolacja jest wówczas subiektywna i nie zwiększa rozdzielczości samego przyrządu. W praktyce przyjmuje się dla przyrządów analogowych 0,2 działki elementarnej, a dla przyrządów o odczycie cyfrowym zmianę stanu wskaźnika o najmniej znaczącą cyfrę. Najczęściej jest to wartość o jaką zmienia się ostatnia cyfra (Dunnicliff 1993).

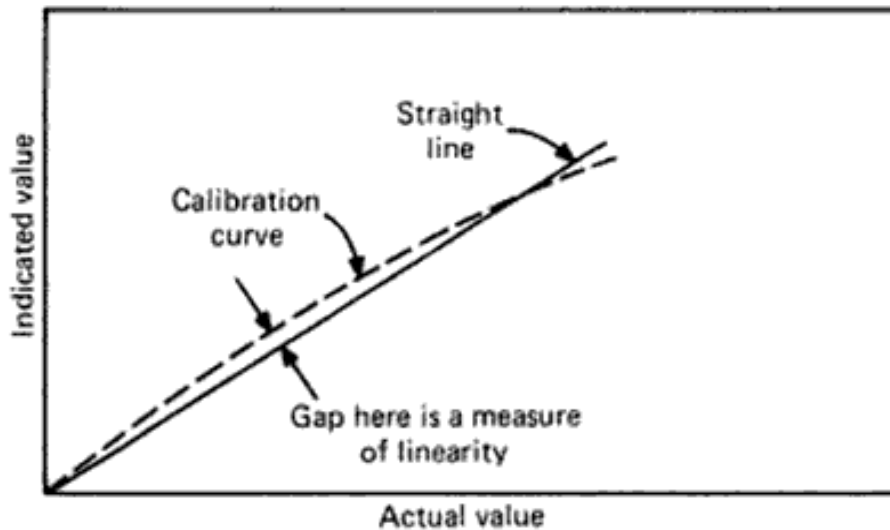
2.4. Czułość

Czułość jest to stosunek przyrostu odpowiedzi przyrządu pomiarowego do przyrostu odpowiedniego sygnału wejściowego (ZMOGUM, GUM, 1996). Parametr ten jest najbardziej przydatny, gdy przyrząd (czujnik) ma liniową charakterystykę nominalną, a zatem stałą czułość w zakresie pomiarowym. Wysoka czułość nie oznacza dużej dokładności ani precyzji (Dunnicliff 1993).

2.5. Liniowość

Przyrząd pomiarowy ma charakterystykę liniową, gdy wskazane wartości mierzone są wprost proporcjonalne do wartości rzeczywistych. Liniowość (zazwyczaj określana w kategoriach nieliniowości), stanowi maksymalne odchylenie parametru rzeczywistego (przeciętnej wartości

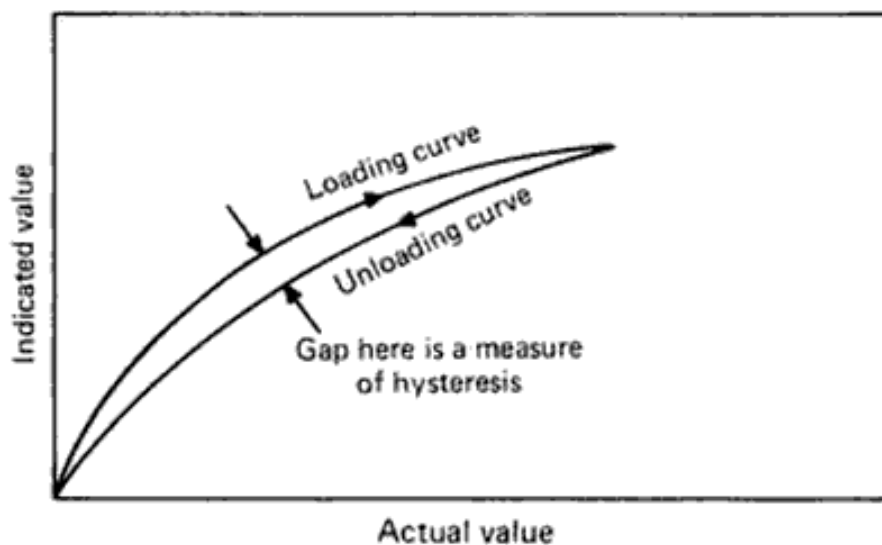
górnego i dolnego odczytu na skali) w kierunku dodatnim lub ujemnym, od linii prostej poprowadzonej w taki sposób, żeby maksymalne odchylenia zostały wyrównane i zminimalizowane. Innymi słowy, jest to maksymalna różnica pomiędzy wartościami zmierzonej charakterystyki przyrządu pomiarowego a wartościami jego idealnej charakterystyki liniowej odniesiona w procentach do wartości zakresu zmian sygnału wyjściowego (Rysunek 3). Tak więc liniowość 1% FS oznacza, że maksymalny błąd powstały przy założeniu liniowego współczynnika kalibracji będzie wynosić 1% odczytu w pełnej skali (Dunnicliff 1993).



Rysunek 3 Liniowość pomiarów (Dunnicliff 1993).

2.6. Histereza

Jest brana pod uwagę, gdy mierzona wartość podlega cyklicznym zmianom. Histereza określa różnicę wskazań przyrządu pomiarowego, gdy tę samą wartość wielkości mierzonej osiąga się raz przy zwiększaniu wartości wielkości mierzonej, drugi raz przy jej zmniejszaniu (Rysunek 4). Histereza jest najczęściej spowodowana tarcieniem lub luzem wstecznym i występuje, na przykład w siłownikach hydraulicznych, gdy obciążenie wzrasta i maleje. Przyrządy pomiarowe charakteryzujące się dużą histerezą nie nadają się do pomiaru szybko zmieniających się wielkości (Dunnicliff 1993).



Rysunek 4 Histereza (Dunnicliff 1993).

2.7. Szumy, zakłócenia

Szumy to sygnały niepożądane, zakłócające sygnały użytkowe. Oprócz szumów powstających wewnątrz układu, szum może dostawać się także z zewnątrz w postaci zakłóceń. Termin ten używany jest najczęściej do określenia przypadkowych zmian mierzonych wielkości, spowodowanych czynnikami zewnętrznymi i skutkującymi utratą precyzji i dokładności w dokonywanym pomiarze. Nadmierny hałas w systemie może maskować małe, rzeczywiste zmiany. Zakłócenia częstotliwości radiowych pochodzące ze źródeł wysokiego napięcia oraz nadajników telewizyjnych lub radiowych stanowią przykład czynnika zewnętrznego powodującego szumy (Dunnicliff 1993).

2.8. Błędy wskazania przyrządu pomiarowego

Błąd pomiaru jest to różnica pomiędzy wynikiem zmierzonego jednostkowego pomiaru a wartością rzeczywistą (ZMOGUM, GUM, 1996). Nie należy go rozumieć, jako powstałego wyłącznie w wyniku pomyłki, a jako nieodłączny czynnik procesu pomiarowego. Błąd pomiaru jest bezpośrednio związany z metodą pomiaru. Z matematycznego punktu widzenia, równy jest dokładności (I.2.1). Przyczyny powstania błędów wraz ze środkami zapobiegawczymi przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2 Błędy pomiarowe – przyczyny i środki zapobiegawcze (Dunnicliff 1993).

RODZAJ BŁĘDU	PRZYCZYNY	ŚRODKI ZAPOBIEGAWCZE
GRUBE	Brak doświadczenia Błąd odczytu Błąd zapisu Błąd obliczeniowy	Staranność, dbałość Trening Zwielokrotnienie odczytów Dwóch obserwatorów Weryfikacja poprzednich odczytów
SYSTEMATYCZNE	Niewłaściwa kalibracja Utrata kalibracji Histereza Nieliniowość	Poprawna kalibracja Powtórna kalibracja Stosowanie norm lub/i procedur, wzorców Stosowanie spójnych procedur odczytu
ZGODNOŚCI	Niewłaściwa instalacja Ograniczenia dotyczące przyrządów pomiarowych	Dobór odpowiedniego przyrządu pomiarowego Modyfikacja procedury instalacji Poprawa projekt przyrządu pomiarowego
ŚRODOWISKOWE	Pogoda Temperatura Drgania Korozja Zapylenie	Rejestracja zmian środowiskowych i zastosowanie korekcji Właściwy dobór konstrukcji i materiałów konstrukcyjnych przyrządu pomiarowego
OBSERWACYJNE	Różnice w odczytach wynikające ze zmiany obserwatora	Trening Wykorzystanie automatycznych systemów zbierania danych
DOBÓR PRÓBY	Zmienność mierzonego parametru Nieprawidłowa technika opróbkowania	Instalacja wystarczającej liczby przyrządów w reprezentatywnych lokalizacjach
PRZYPADKOWE (LOSOWE)	Szumy Tarcie Wpływ środowiska	Prawidłowy dobór przyrządów pomiarowych Czasowe eliminowanie szumów Wielokrotność odczytów Analiza statystyczna
PRAWO MURPHY'EGO	Jeżeli coś może się nie udać - nie uda się na pewno	ŻADNE - Każda próba zaradzenia zaistniałej sytuacji będzie tylko gorsza

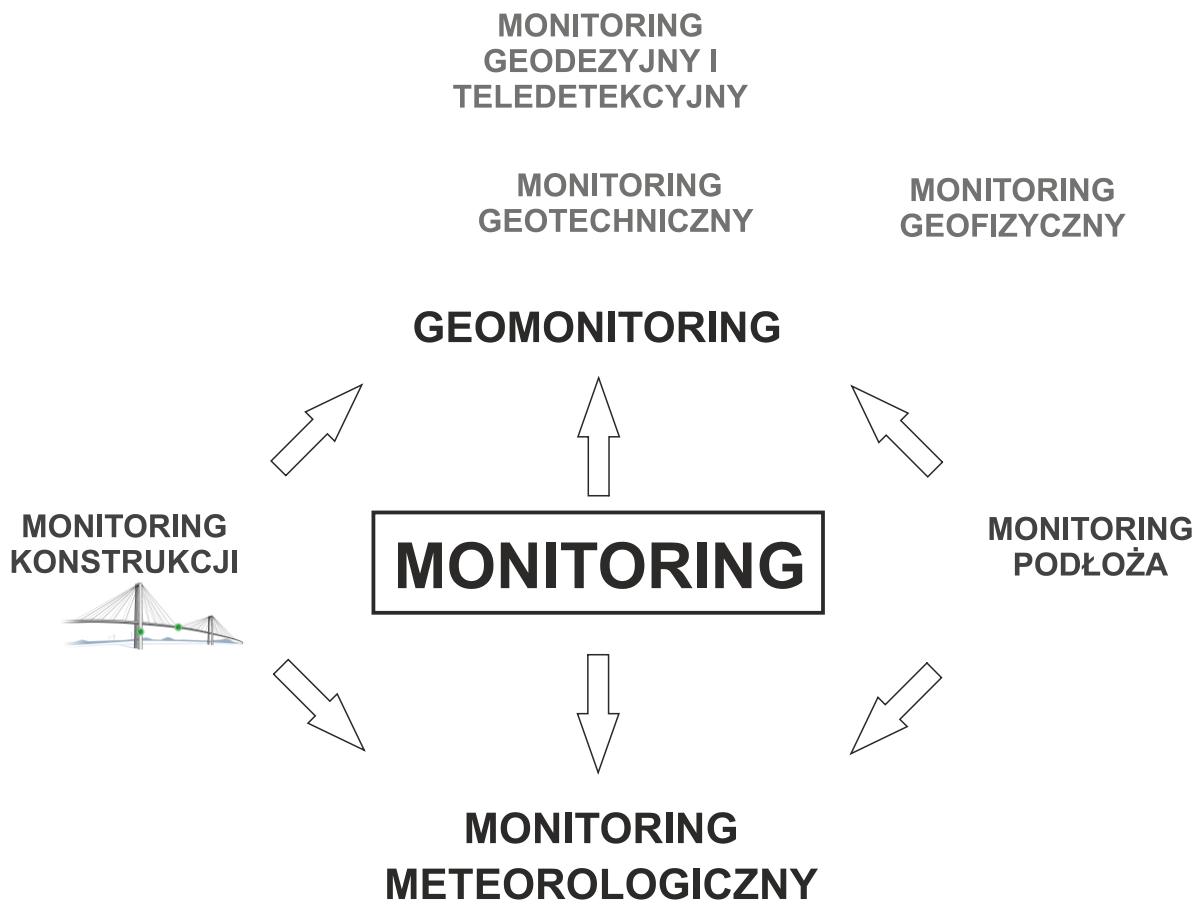
3. TYPY INSTRUMENTÓW POMIAROWYCH I METODY MONITORINGU

Monitoring ze względu na rodzaj przestrzeni, w ramach której jest lub będzie prowadzony, można podzielić na monitoring konstrukcji inżynierskich oraz monitoring podłoża. Obie te przestrzenie często się ze sobą zazębiają (Rysunek 5, Rysunek 6), a wzajemne oddziaływanie pomiędzy podłożem a konstrukcją staje się wówczas oczywiste. Dla obu tych przestrzeni wydzielono dwie grupy monitoringu: geomonitoring i monitoring meteorologiczny. W obrębie geomonitoringu wyróżniono monitoring geotechniczny, monitoring geodezyjny i teledetekcyjny oraz monitoring geofizyczny. Dwie pierwsze formy monitoringu prowadzone są zarówno w obrębie konstrukcji jak i podłoża trzeci monitoring geofizyczny odnosi się głównie do monitoringu podłoża. Wykorzystanie oprzyrządowania geotechnicznego, geodezyjnego czy geofizycznego jako instrumentarium w ramach monitoringu jest szczególnie ważne, gdy istnieje wysoki stopień niepewności w odniesieniu do warunków gruntowych, oczekiwanych wartości i założeń projektowych. Geomonitoring jest zatem jednym z elementów zapewniających bezpieczeństwo i jakość wznoszonych obiektów, jak również może okazać się cennym narzędziem w codziennej pracy inżynierów i projektantów, zwłaszcza w tematyce związanej z zarządzaniem ryzykiem, i wzmocnić jakość procesu decyzyjnego.

MONITORING KONSTRUKCJI		MONITORING PODŁOŻA
Budynki		Wahania zwierciadła wody
Mosty		Posadowienie na gruntach słabonośnych
Przyczółki		Obszary zagrożone ruchami masowymi (osuwiskami)
Tunele		Obszary górnicze (szkody górnicze)
Elementy konstrukcyjne wykopów		Skarpy wykopów
Konstrukcje oporowe		Otoczenie tuneli, itp.
Wiadukty, estakady, itp.		

Rysunek 5 Wzajemne zazębianie się różnych przestrzeni w obszarze monitoringu

Monitoring meteorologiczny stanowi dodatkowy, ale także istotny element kompletnego monitoringu. Znajomość tła atmosferycznego pozwala na pełną analizę i interpretację pomierzonych paramentów i wysunięcie odpowiednich wniosków.



Rysunek 6 Podział monitoringu w budownictwie komunikacyjnym (opracowanie A. Borecka)

W załączniku E (PN-EN ISO 18674) zestawiono najbardziej powszechne metody monitorowania wykorzystywane w zagadnieniach geoinżynierskich (Załącznik ...). Wśród nich wyróżniono pięć głównych grup metod pomiarowych:

Grupa I - monitoring powierzchniowy uwzględniający metody geodezyjne i teledetekcyjne (w tym metody klasyczne, naziemny i satelitarny skaning laserowy, naziemną i satelitarną interferometrię radarową) oraz wybrane rodzaje urządzeń do pomiaru deformacji powierzchniowych (szczelinomierze, pochylomierze, ekstensometry taśmowe i inne),

Grupa II - monitoring przemieszczeń wglębnych – pomiary przemieszczeń podłoża lub konstrukcji inżynierskich z wykorzystaniem inklinometrów, ekstensometrów oraz urządzeń do pomiarów osiadań,

Grupa III - monitoring położenia zwierciadła wody i zmiany ciśnienia porowego - dotyczy piezometrów oraz czujników do pomiaru ciśnienia porowego wody,

Grupa IV - monitoring sił i naprężeń - uwzględnia czujniki, które są wykorzystywane do pomiaru sił i naprężeń rejestrowanych w podłożu lub w/na konstrukcjach inżynierskich,

Grupa V - instrumenty inne - w tej grupie wyszczególniono np. instrumenty do pomiaru drgań.

Należy zauważyć, że norma ISO 18674 to zbiór metod, które zostały przez lata wypracowane na drodze aplikacyjnej. Tryb wdrożenia każdej metody i umieszczenie jej w normie jest stosunkowo długi. Autorzy opierając się na w/w normie, wytycznych, literaturze przedmiotu oraz ofertach handlowych firm specjalizujących się w tematyce monitoringu przyjęli następujący podział (Tabela 3):

Tabela 3 Geomonitoring - narzędzia i metody pomiarowe (opracowanie A. Borecka)

GEOMONITORING		
GEODEZYJNY	GEOTECHNICZNY	GEOFIZYCZNY
<p>GEODEZJA</p> <p>pomiary satelitarne GNSS</p> <p>pomiary tachimetryczne</p> <p>niwelacja</p> <p>TELEDETEKCJA I FOTOGRAMETRIA</p> <p>satelity optyczne o średniej zdolności rozdzielczej</p> <p>satelity optyczne o wysokiej zdolności rozdzielczej</p> <p>fotogrametria lotnicza</p> <p>fotogrametria niskiego pułapu - bezzałogowe statki powietrzne (UAV)</p> <p>satelity operujące w zakresie radarowym</p> <p>satelitarna interferometria radarowa</p> <p>naziemna interferometria radarowa</p> <p>lotniczy skaning laserowy</p> <p>mobilny skaning laserowy z niskiego pułapu lotniczego</p> <p>naziemny skaning laserowy</p>	<p>MONITORING POWIERZCHNIOWY</p> <p>wskaźniki rozwarcia rys, szczelin</p> <p>szczelinomierze linkowe (strunowe)</p> <p>szczelinomierze precyzyjne (1D, 2D, 3D)</p> <p>ekstensometry taśmowe, linkowe</p> <p>pochyłomierze przenośne</p> <p>pochyłomierze precyzyjne</p> <p>wahadła</p> <p>MONITORING WGLĘBNY</p> <p>inklinometry przenośne</p> <p>inklinometry łańcuchowe</p> <p>inklinometry modułowe</p> <p>pomiary reflektometryczne tdr</p> <p>ekstensometry prętowe, strunowe i pokrewne</p> <p>ekstensometry przenośne</p> <p>repery wgłębne</p> <p>hydroniwelatory</p> <p>profilometry hydrostatyczne (hydroprofilometry)</p> <p>piezometry otwarte (studnia obserwacyjna, mikropiezometr)</p> <p>piezometry zamknięte</p> <p>czujniki do pomiaru ciśnienia porowego wody</p> <p>czujniki do pomiaru naprężeń/parcia gruntu/skał</p> <p>czujniki do pomiaru naprężeń/parcia obudowy</p> <p>czujnik do pomiaru obciążenia kotew (w ciągach sprężających)</p> <p>czujniki do pomiaru obciążeń konstrukcji</p> <p>tensometry</p> <p>systemy światłowodowe</p> <p>inne</p> <p>geofony</p> <p>akcelerometry</p> <p>laserowe czujniki triangulacyjne,</p> <p>wibrometry laserowe,</p> <p>radary interferometryczne</p> <p>czujniki do pomiaru wilgotności</p> <p>czujniki do pomiaru temperatury</p>	<p>tomografia elektrooporowa ERT</p> <p>profilowanie konduktometryczne GCM</p> <p>profilowanie georadarowe GPR</p> <p>wielokanałowa analiza fal powierzchniowych MASW</p>

Dla lepszego zobrazowania wprowadzono pojęcie przydatności instrumentów/metod pomiarowych, dzieląc je na trzy poziomy, którym przypisano odpowiednio kolory: zielony, pomarańczowy i czerwony (Rysunek 7).

	URZĄDZENIA/METODY ZALECANE I PREFEROWANE
	URZĄDZENIA/METODY WARUNKOWO STOSOWANE
	URZĄDZENIA/METODY NIEZALECANE
	NIE DOTYCZY

Rysunek 7 Przydatność instrumentów/metod pomiarowych wykorzystywanych w monitoringu

Kolor **zielony** to **URZĄDZENIA/METODY ZALECANE I PREFEROWANE** zdefiniowane, jako te, które pozwalają na bezpośrednie osiągnięcie celu bez ograniczeń i dodatkowych uwarunkowań.

Kolor **pomarańczowy** to **URZĄDZENIA/METODY WARUNKOWO STOSOWANE** charakteryzujące się mniejszą dokładnością, precyzją w wykonywaniu pomiarów, które pozwalają na osiągnięcie celu tylko przy spełnieniu dodatkowych kryteriów, np.: tylko dla konkretnego rodzaju gruntu, tylko dla danej sytuacji, itp.

Kolor **czerwony** to **URZĄDZENIA/METODY NIEZALECANE** niededykowane danym pomiarom, jednak pozwalają na wyprowadzenie parametrów w sposób pośredni. Przy odpowiedniej obróbce pozyskanych danych istnieje możliwość uzyskania wyników mniej lub bardziej bliższych do rzeczywistości. Ta grupa urządzeń jest szczególnie wrażliwa na doświadczenie dokumentatora.

Wprowadzono również pojęcie **NIE DOTYCZY** oznaczone na biało. Pojęcie to stosowano w przypadku, gdy wskazanymi urządzeniami lub metodami nie wykonuje się tego typu pomiarów.

Takie podejście pozwala wskazać optymalne, najlepsze instrumenty lub metody pomiarowe, którymi możemy mierzyć dane wielkości i rozwiązywać problemy inżynierskie, z którymi się zmagamy, przy uwzględnieniu oczywiście wszystkich czynników mających istotny wpływ, a także wskazaniu zalet i ograniczeń w ich stosowaniu.

3.1. Pomiary przemieszczeń (deformacji)

Dla opisanego przebiegu i wyznaczenia wartości przemieszczeń podłoża i elementów konstrukcyjnych obiektów inżynierskich należy pomierzyć szereg wielkości geometrycznych. Można w tym celu wykorzystać zarówno techniki pomiarowe oparte o klasyczne pomiary geodezyjne (tachimetrię, niwelację, pomiary GNSS), fotogrametrię, czy coraz prężniej rozwijające się techniki teledetekcyjne jak również o instrumenty geotechniczne (powierzchniowe i wgłębne).

Przemieszczenia elementu podlegającego deformacjom można opisać za pomocą dwóch składowych: składowej poziomej (tzn. przesunięcia), przy czym podaje się ich wówczas również kierunek i zwrot oraz składowej pionowej (osiadania) (Szpetkowski 1978).

Dla opisanego procesu deformacji wyznacza się dodatkowo wielkości pochodne przemieszczenia, wyrażające zmiany pomiędzy poszczególnymi punktami odkształcającego się ciała, a mianowicie – odkształcenia liniowe, postaciowe zwane dalej deformacjami¹ (Szpetkowski 1978). Wartości przemieszczeń wyznacza się zwykle w określonym układzie odniesienia. Można wyróżnić dwa rodzaje pomiarów:

- pomiary bezwzględnych wartości przemieszczeń
- pomiary względnych wartości przemieszczeń (Szpetkowski 1978).

W tabelach (Tabela 4 - Tabela 6) zebrano i przypisano przydatność najbardziej popularnych instrumentów/metod pomiarowych do pomiarów przemieszczeń (deformacji), jak również części z nich próbowano przypisać możliwość wykorzystania do wyznaczenia współrzędnych geograficznych czy pomiarów sytuacyjno-wysokościowych. W kolejnych rozdziałach przedstawiono krótki opis każdego z instrumentu/metody wskazując na ich ograniczenia ale również na zalety.

¹ Dla uproszczenia w dalszym ciągu opracowania pod nazwa przemieszczenia będą się kryły również deformacje

Tabela 4 Przydatność geodezyjnych metod pomiarowych do pomiaru przemieszczeń

Pomiar deformacji NIECIĄGŁYCH													
Pomiar deformacji CIĄGŁYCH													
WYCHYLENIE/OBRÓT	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Pomiar przemieszczeń OSIOWYCH (pionowe lub poziome lub pomiędzy nimi)													
Pomiar przemieszczeń PIONOWYCH													
Pomiary przemieszczeń POZIOMYCH													
Pomiary przemieszczeń WGŁĘBNYCH													
Pomiary przemieszczeń POWIERZCHNIOWYCH													
Wyznaczenie współrzędnych punktów													
Pomiary sytuacyjno- wysokościowy													
NAZWA METODY/ URZĄDZENIA	Pomiary satelitarne GNSS	Pomiary tachimetryczne (dalmierz)	Niwelacja	Satelity optyczne o średniej zdolności rozdzielczej	Satelity optyczne o wysokiej zdolności rozdzielczej	Satelity operujące w zakresie radarowym	Satelitarna interferometria radarowa	Naziemna interferometria radarowa	Lotniczy skaning laserowy	Mobilny skaning laserowy z niskiego pułapu lotniczego	Naziemny skaning laserowy	Fotogrametria lotnicza	Fotogrametria niskiego pułapu – Bezałogowe Statki Powietrzne (ang. Unmanned Aerial Vehicles)
	GEODEZJA			TELEDETEKCJA								FOTOGRAMETRIA	

Tabela 5 Przydatność powierzchniowych geotechnicznych instrumentów pomiarowych do pomiaru przemieszczeń

Pomiar deformacji NIECIĄGŁYCH					?	?	?
Pomiar deformacji CIĄGŁYCH					?	?	?
WYCHYLENIE/OBRÓT					M	A	M/A
Pomiar przemieszczeń OSIOWYCH (pionowe lub poziome lub pomiędzy nimi)	M	M/A	A	M/A			
Pomiar przemieszczeń PIONOWYCH	M	M/A	A	M/A			
Pomiary przemieszczeń POZIOMYCH	M	M/A	A	M/A			
Pomiary przemieszczeń WGLĘBNYCH							
Pomiary przemieszczeń POWIERZCHNIOWYCH							
Wyznaczenie współrzędnych punktów							
Pomiary sytuacyjno-wysokościowy							
NAZWA METODY/ URZĄDZENIA	Wskaźniki rozwarcia rys, szczelin	Szczelinomierze linkowe	Szczelinomierze precyzyjne 1D, 2D, 3D	Ekstensometry taśmowy	Pochyłomierze przenośne	Pochyłomierze precyzyjne	Wahadła
	INSTRUMENTY GEOTECHNICZNE MONITORING POWIERZCHNIOWY						

A – pomiar automatyczny, M- pomiar manualny, M/A – manualny/automatyczny, A/M-automatyczny/manualny

Tabela 6 Przydatność wgłębnych geotechnicznych instrumentów pomiarowych do pomiaru przemieszczeń

Pomiar deformacji NIECIĄGŁYCH	?	?	?		?	?	?			
Pomiar deformacji CIĄGŁYCH					?	?	?			
WYCHYLENIE/OBRÓT	M	A	A							
Pomiar przemieszczeń OSIOWYCH (pionowe lub poziome lub pomiędzy nimi)	M	A	A		A	A/M	M			
Pomiar przemieszczeń PIONOWYCH	M	A	A		A	A/M	M			
Pomiary przemieszczeń POZIOMYCH	M	A	A	A	A	A/M	M			
Pomiary przemieszczeń WGLĘBNYCH										
Pomiary przemieszczeń POWIERZCHNIOWYCH										
Wyznaczenie współrzędnych punktów										
Pomiary sytuacyjno-wysokościowy										
NAZWA METODY/ URZĄDZENIA	Inklinometry przenośne	Inklinometry łańcuchowe IPI	Inklinometry modułowe (np. typu SAA)	Pomiary reflektometryczne TDR	Systemy światłowodowe	Ekstensometry prętowe, strunowe, łańcuchowe	Ekstensometry mobilne (przenośne)	Rpery wgłębne	Hydroniwelatory	Profilometry hydrauliczne (hydroprofilometry)
	INSTRUMENTY GEOTECHNICZNE MONITORING WGLĘBNY									

A – pomiar automatyczny, M- pomiar manualny, M/A – manualny/automatyczny, A/M-automatyczny/manualny

3.1.1. Pomiary przemieszczeń powierzchniowych

3.1.1.a Klasyczne techniki geodezyjne

Do klasycznych geodezyjnych technik pomiarowych zaliczono pomiary satelitarne GNSS, pomiary tachymetryczne oraz niwelację geometryczną. Wszystkie pozwalają wykonywać pomiary bezwzględne, czyli nawiązane do zewnętrznego układu odniesienia. Spośród wszystkich grup pomiarów geodezyjnych wyróżniają się najwyższą dokładnością i są stosowane w monitoringu obiektów wymagających szczególnej uwagi. Podstawę niniejszego opracowania stanowi raport (PIG i in., 2016).

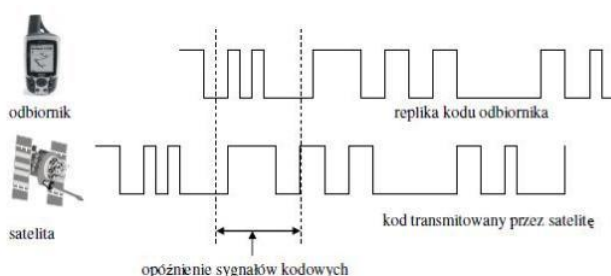
Pomiary satelitarne GNSS

Skrót GNSS (Global Navigation Satellite System) oznacza ogólnoświatowy system pozycjonowania, bazujący na wielu niezależnych systemach satelitarnych, wśród których aktualnie można wskazać systemy: GPS, GLONASS, Galileo, Beidou (Compass), IRNSS, QZSS. Zasada działania wszystkich jest podobna, dlatego poniżej omówiono system GPS ze względu na jego największą popularność i niezawodność.

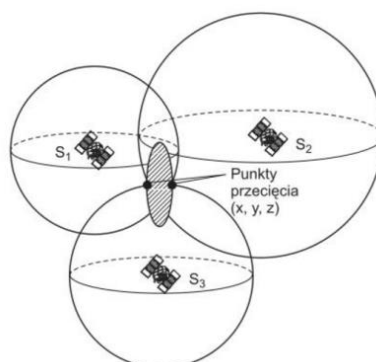
System satelitarny składa się z trzech segmentów:

- konstelacja satelitów,
- centrum dowodzenia wraz z stacjami obserwującymi położenie satelitów,
- użytkowników wyposażonych w odpowiednie odbiorniki.

Na sygnał transmitowany przez anteny satelitów nakładany jest indywidualny kod. Replika tego kodu generowana jest również przez odbiornik sygnałów, który porównuje go z kodem odebrany przez satelitę. Na podstawie przesunięcia sygnałów kodowych (Rysunek 8) wyznaczona zostaje odległość, jaką pokonała fala w drodze od satelity do odbiornika.



Rysunek 8 Pomiar czasu przebiegu fali od satelity do odbiornika (Narkiewicz, 2007)



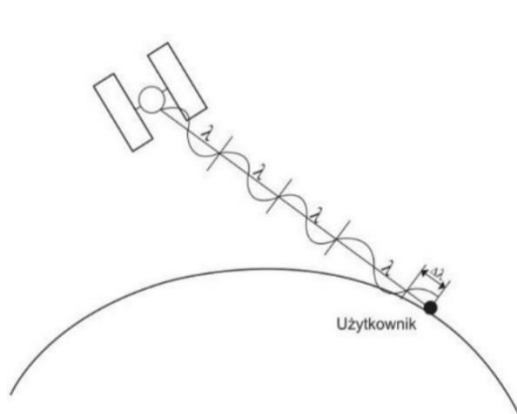
Rysunek 9 Zasada wyznaczenia współrzędnych odbiornika (Narkiewicz, 2007)

Jeśli odbiornik odbierze sygnał i wyznaczy odległość do 3 satelitów, możliwe jest wyznaczenie przecięcia 3 sfer, a przez to obliczenie współrzędnych odbiornika (Rysunek 9). Aby było to możliwe, odbiorniki musi mieć możliwość określenia współrzędnych satelitów na dowolny moment czasu. Dlatego też satelity, oprócz transmisji kodu niezbędnego do wyznaczenia odległości, nakładają również na falę tzw. depezę nawigacyjną, w której przesyłane są parametry orbit każdego z satelitów. Tak przesłane efemerydy pokładowe pozwalają na wyznaczenie współrzędnych w układzie geocentrycznym WGS84. Metoda ta zakłada, że odbiornik generuje replikę kodu na ten sam moment czasu, w jakim robił to satelita. Jednak odbiornik sygnału GPS nie jest wyposażony w zegar atomowy i należy wyznaczyć dla niego dodatkową poprawkę względem zegarów atomowych umieszczonych na satelitach. Zakładając, że poprawka zegara jest taka sama względem każdego satelity, można ją wyznaczyć wraz ze współrzędnymi odbiornika, jeśli odbierany jest sygnał od minimum 4 satelitów. Powyższy sposób wyznaczania pozycji

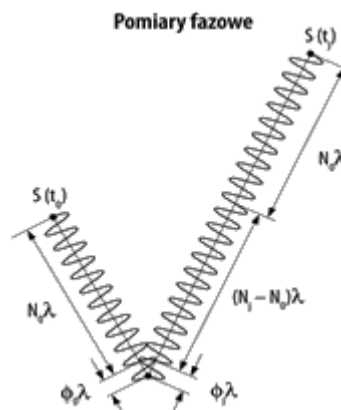
nazywany jest metodą bezwzględną kodową i wykorzystywany jest powszechnie w szeroko pojętej nawigacji. Współrzędne kartezjańskie XYZ w układzie geocentrycznym WGS84 mogą być przeliczone na współrzędne geodezyjne (długość i szerokość geograficzną), a także na współrzędne płaskie w państwowych układach współrzędnych (np. układ PL-2000 lub PL-1992). Metoda ta zapewnia błąd przestrzenny wyznaczenia pozycji na poziomie $\pm(7\div 10)$ metrów. Należy jednak pamiętać, że w przypadku występowania przeszkód terenowych (które będą przysłaniać satelity lub wywołają efekt wielotorowości sygnału) pozycjonowanie może mieć gorszą dokładność albo być wręcz niemożliwe.

Na uzyskiwaną dokładność ma duży wpływ ośrodek, przez jakiś przebiega fala nośna. Wyróżnia się tu dwie strefy, które wprowadzają tzw. opóźnienie jonosferyczne i refrakcję troposferyczną. Czynniki te wprowadzają błędy systematyczne, które dla pewnego obszaru można uznać za stałe, czyli w równym stopniu wpływające na obserwacje wykonywane dwoma odbiornikami znajdującymi się w odległości np. 100 km. Mając to na uwadze, powstał sposób na poprawę dokładności metody bezwzględnej kodowej. Polega on na tym, iż jeden z odbiorników umieszcza się na punkcie o znanych współrzędnych w układzie WGS-84 i uruchamia akwizycję sygnału pomiarowego. W ten sposób możliwe jest wyznaczenie tzw. pseudoodległości z pomiaru kodowego, a także jest możliwe wyznaczenie odległości teoretycznej na podstawie współrzędnych odbiornika oraz satelity. Różnice pomiędzy tymi dwiema wielkościami obliczone dla każdego widocznego satelity są korektami, które można przesłać np. drogą radiową (lub z wykorzystaniem sieci Internet) do drugiego odbiornika. Odbiornik, którego współrzędne są wyznaczone, dokonuje wyznaczenia odległości do satelitów na podstawie sygnału kodowego, a następnie poprawia je o otrzymane poprawki ze stacji referencyjnej (punktu o znanych współrzędnych, na którym w tym samym czasie prowadzone są obserwacje satelitarne). Na podstawie tak skorygowanych pseudoodległości wyznaczone są współrzędne odbiornika ruchomego. Takie rozwiązanie nazywamy metodą różnicową kodową. Możliwa do uzyskania dokładność jest zależna od odległości pomiędzy odbiornikami oraz klasą zastosowanych urządzeń. W najlepszym przypadku błąd może dochodzić nawet do ± 30 cm, choć najczęściej jest na poziomie ± 1 m. W oparciu o tę zasadę powstały sieci wspomagające dokładność systemu GPS. Na obszarze Europy działa system EGNOS, składający się z sieci stacji referencyjnych, które w sposób permanentny rejestrują obserwacje satelitarne. Wyznaczone poprawki do pseudoodległości dla poszczególnych satelitów wysyłane są do satelitów geostacjonarnych, które następnie je retransmitują i mogą być odebrane przez odbiorniki nawigacyjne. Poprawki udostępnione przez system EGNOS pozwalają na osiągnięcie maksymalnego błędy na poziomie ± 1 m.

Pomiary kodowe (bezwzględne i różnicowe) cechują się niewystarczającą dokładnością dla potrzeb geodezyjnych. Dużym ograniczeniem jest sama dokładność wyznaczenia pseudoodległości, gdzie długość pojedynczego impulsu kodu wynosi 300 m. Jednak istnieje możliwość pomiaru fazy sygnału (Rysunek 10) dla każdej z częstotliwości emitowanej przez satelitę. Sam pomiar fazy jest wykonywany z błędem rzędu pojedynczych milimetrów, ale w celu wyznaczenia precyzyjnej odległości do satelity niezbędna jest znajomość liczby pełnych odłożeń fali. Jest ona możliwa do wyznaczenia przez obserwację fazy sygnałów emitowanych przez wiele poruszających się satelitów przy nieruchomym odbiorniku (Rysunek 11). Metoda ta nazywana jest statyczną metodą fazową. W literaturze występuje również pod nazwą PPP (*z ang. precise point positioning*). Wymaga ona długiego czasu obserwacji (wiele godzin), a także precyzyjnego modelowania błędów zegarów atomowych, refrakcji jonosferycznej i troposferycznej oraz wielu innych elementów wpływających na ruch satelitów i przebieg sygnału. Metoda ta pozwala na wyznaczenie położenia w układzie geodezyjnym na poziomie pojedynczych centymetrów.

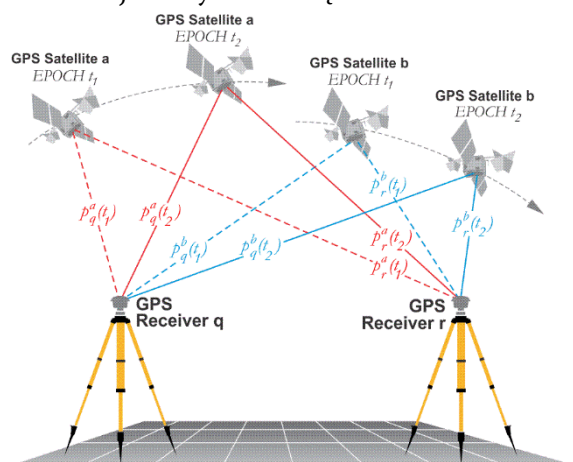


Rysunek 10 Pomiar fazy sygnału (Narkiewicz, 2007)



Rysunek 11 Pomiar różnicy fazy sygnału pomiędzy dwoma położeniami satelity (Śledziński, 2005)

W celu redukcji wpływu błędów troposfery, jonosfery, czy też błędów zegarów atomowych możliwe jest wykorzystanie metody różnicowej fazowej. Tak jak w przypadku pomiarów kodowych, tak i tu niezbędne jest obserwowanie sygnałów z tych samych satelitów przez minimum dwa nieruchome odbiorniki (Rysunek 12). Na podstawie tak zebranych obserwacji możliwe jest wyznaczenie wektora przestrzennego łączącego środki anten obu odbiorników (z pominięciem odległości do satelitów). Jeśli jeden z odbiorników będzie umieszczony nad punktem o znanych współrzędnych geocentrycznych, możliwe będzie obliczenie współrzędnych drugiego z pary. Dokładność takiego pomiaru zależy od liczby widocznych satelitów oraz czasu pomiaru. Dla krótkich wektorów (rzędu pojedynczych kilometrów) i czasu obserwacji od 30 do 60 minut możliwe jest uzyskanie błędów z zakresu 2÷5 mm.



Rysunek 12 Pomiary względne metodą fazową statyczną (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)

Rozwój technologii pomiarowych i obliczeniowych doprowadził do znacznego skrócenia czasu pomiaru w celu wyznaczenia wektora początkowego, przesyłania obserwacji (radiomodemy lub połączenie siecią komórkową z siecią Internet) i wykonywania obliczeń w czasie rzeczywistym. Dzięki temu powstała metoda różnicowa fazowa umożliwiająca wyznaczanie współrzędnych odbiornika ruchomego w czasie rzeczywistym (RTK – Real Time Kinematic).

Wymaga ona od użytkownika posiadania dwóch odbiorników fazowych wyposażonych w odpowiednie radiomodemy, z czego jeden jest ustawiony na punkcie o znanych współrzędnych, a drugi przemieszcza się po punktach wyznaczanych. Zaletą jest możliwość szybkiego pomiaru współrzędnych przestrzennych z błędem $\pm(2\div 5)$ cm.

W celu wyeliminowania potrzeby posiadania dwóch precyzyjnych odbiorników rzędu wielu

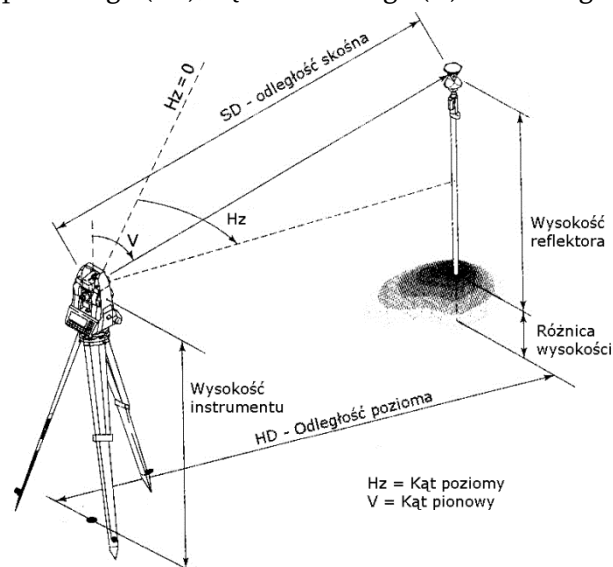
krajów, a także wiele firm komercyjnych, zdecydowało się na utworzenie sieci stacji referencyjnych, których obserwacje są udostępniane odpłatnie poprzez sieć Internet. Ta modyfikacja metody RTK nosi nazwę RTN (Real Time Network). W Polsce powstała państwowa sieć ASG-EUPOS, składająca się ze 102 stacji permanentnych rozmieszczonych równomiernie na obszarze kraju oraz z 24 stacji zagranicznych (Rysunek 13). Użytkownicy mogą także korzystać z komercyjnych sieci stacji referencyjnych utrzymywanych przeważnie przez firmy zajmujące się dystrybucją odbiorników GNSS. Stacje permanentne GNSS są często spotykanym rozwiązaniem stosowanym w ciągłym monitoringu deformacji obiektów inżynierskich (np. mostów wiszących), hydrotechnicznych (np. zapór wodnych, zbiorników poflotacyjnych) czy niestabilnego podłoża (np. osuwisk).



Rysunek 13 Mapa rozmieszczenia stacji sieci ASG-EUPOS (www.asgeupos.pl)

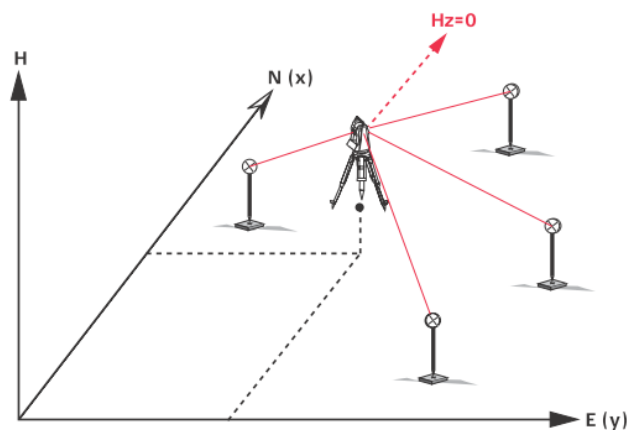
Pomiary tachimetryczne

Tachimetria jest techniką pozycjonowania w przestrzeni 3D, która opiera się na wykorzystaniu tachimetrów elektronicznych pozwalających na pomiar trzech elementów (Rysunek 14): kierunku poziomego (H_z), kąta zenitalnego (V) oraz odległości przestrzennej (SD).



Rysunek 14 Wielkości wyznaczone tachimetrem elektronicznym

Łącznie wielkości te stanowią współrzędne biegunowe obserwowanego punktu w układzie własnym instrumentu pomiarowego, co pozwala na wyznaczenie jego przestrzennego położenia (Rysunek 15). Dzięki wykorzystaniu prostych zależności trygonometrycznych współrzędne biegunowe mogą zostać zamienione na współrzędne prostokątne.



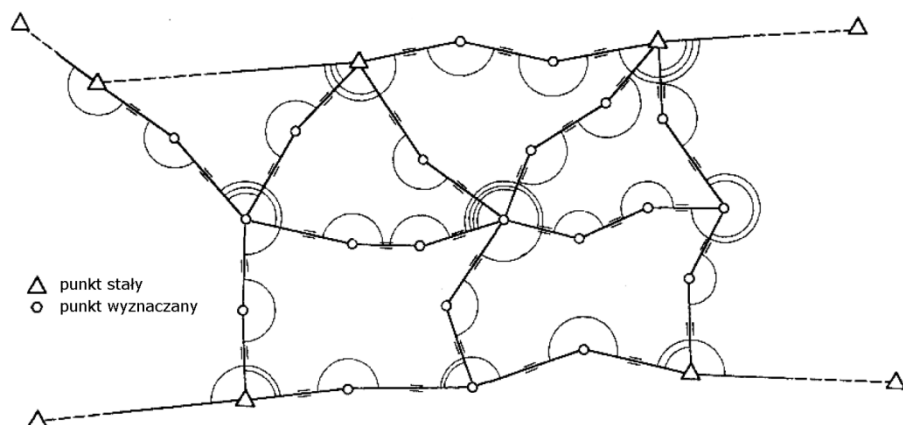
Rysunek 15 Wyznaczenie pozycji na podstawie pomiaru tachimetrycznego (Osada, 2002)

Dokładność położenia względnego wyznaczonego metodą tachimetryczną może być bardzo różna i zależy od wielu czynników:

- dokładności pomiaru kierunku poziomego i kąta zenitalnego (pionowego),
- dokładności pomiaru odległości,
- sposobu sygnalizacji celu.

Współcześnie produkuje się tachimetry, których dokładności znacząco się różnią, dzięki czemu mogą być dopasowane do potrzeb oraz możliwości finansowych użytkownika. Tachimetry przeznaczone do typowych zastosowań pomiarowych cechują się błędem pomiaru kierunku poziomego oraz kąta pionowego nie gorszą niż $\pm 7''$ (tzn. ok. 34 mm/km), zaś błąd pomiaru odległości wynosi $\pm(3 \text{ mm} + 2 \text{ mm/km})$. Wyróżnia się również tachimetry precyzyjne, które charakteryzują się błędem pomiaru kierunków pionowych oraz kąta zenitalnego $\pm 0,5''$ (tzn. ok. 2,5 mm/km), a błąd pomiaru odległości może dochodzić nawet do 0,25 mm.

Tachimetr pozwala na wyznaczanie położenia względnego (w układzie własnym instrumentu) punktów pomiarowych. W celu wyznaczenia współrzędnych w układzie państwowym, podczas pomiaru należy wykonać obserwacje do punktów państwowej osnowy geodezyjnej. Jeżeli w najbliższej odległości brak jest punktów osnowy lub ich rozmieszczenie uniemożliwia wykonanie pomiaru (brak wizur), należy założyć osnowę pomiarową, nawiązaną do punktów osnowy geodezyjnej (Rysunek 16).



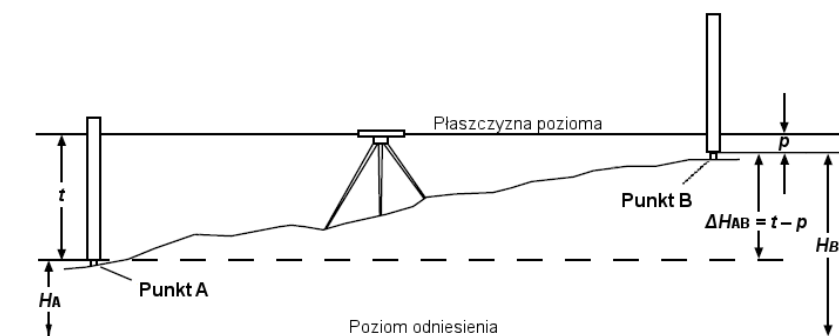
Rysunek 16 Przykład osnowy pomiarowej

Wraz z rozwojem techniki zmieniają się możliwości współczesnych tachimetrów. Kilkanaście lat temu pomiar odległości był możliwy do specjalnych reflektorów (pryzmatów) dalmierzowych, a aktualnie możliwy jest pomiar do niemalże dowolnej powierzchni rzeczywistej oddalonej od instrumentu pomiarowego nawet o 500÷1000 m (zależnie od zastosowanej technologii pomiaru). Dodatkowo, dzięki wbudowaniu specjalnych serwomotorów oraz kamer CCD tachimetry mogą automatycznie celować na zasygnalizowane cele i wykonywać zdalnie pomiar. To rozwiązanie jest powszechnie stosowane w automatycznych systemach monitoringu. Coraz powszechniejsze stają się również tachimetry z możliwością wykonywania zdjęcia każdemu punktowi pomiarowemu, a także otoczeniu stanowiska pomiarowego. Dzięki temu zyskuje się dodatkową dokumentację wizualną mierzonych punktów. Jednym z najnowszych osiągnięć są jednak tachimetry skanujące, które pozwalają na szybkie utworzenie modelu 3D otoczenia instrumentu. Nie są to jednak instrumenty, które mogą zagrozić współczesnym skanerom laserowym, gdyż ich prędkość skanowania jest znacznie niższa i dochodzi do 1000 punktów na sekundę.

Dzięki oprogramowaniu zainstalowanemu we współczesnych kontrolerach tachimetrów elektronicznych, całość obliczeń może odbywać się już w terenie, co pozwala na uzyskanie wprost współrzędnych w układzie państwowym. Możliwe jest również późniejsze przetwarzanie pomiarów z wykorzystaniem powszechnie dostępnego oprogramowania geodezyjnego, a także oprogramowania CAD i GIS.

Niwelacja geometryczna

Niwelacja geometryczna jest jednym z podstawowych sposobów wyznaczania przewyższeń (a przez to wysokości) punktów położonych blisko siebie, ale również oddalonych o wiele kilometrów. Polega ona na realizacji w terenie płaszczyzny poziomej, a następnie wyznaczeniu odległości pionowych od punktów terenowych (Rysunek 17).



Rysunek 17 Zasada niwelacji geometrycznej

Płaszczyznę poziomą realizuje się w terenie z wykorzystaniem niwelatorów. Są to instrumenty których oś optyczna, dzięki specjalnym kompensatorom, jest ustawiana w poziomie. Można wyróżnić trzy rodzaje typów niwelatorów, które różnią się sposobem pomiaru:

- niwelatory optyczne,
- niwelatory kodowe,
- niwelatory laserowe.

Odczyty t i p (odległości pionowe) są wyznaczane na specjalnych łątach. W zależności od typu niwelatora, odczyt jest wykonywany przez lunetę instrumentu w sposób manualny lub automatycznie z wykorzystaniem podziału kodowego. Możliwe jest również, w przypadku niwelatorów laserowych, wykonanie bezpośredniego odczytu na łącie.

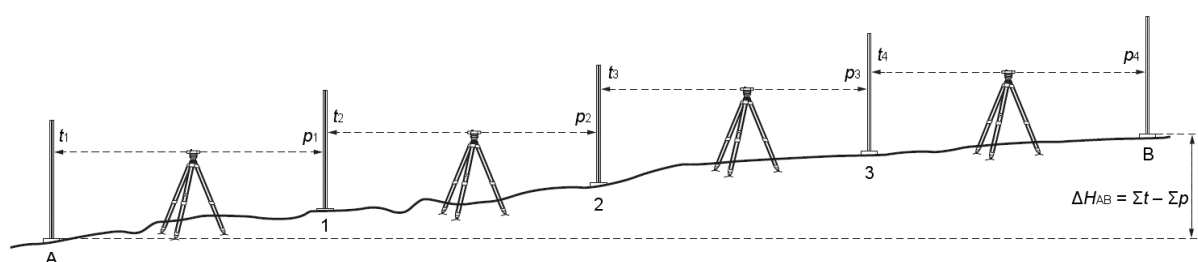
Dokładność wyznaczenia odległości pionowej jest uzależniona od wielu czynników:

- dokładności odczytu,
- dokładności wyznaczenia płaszczyzny poziomej,
- błędów podziału łąty,
- uwzględnienia czynników zaburzających takich jak wpływ krzywizny Ziemi.

W przypadku niwelacji technicznej błąd ten będzie wynosił około ± 1 mm, jednak w uzasadnionych przypadkach wykorzystuje się tzw. niwelację precyzyjną, w przypadku, której błąd maleje nawet do $\pm 0,05$ mm.

Wykonane odczyty odległości pionowych pozwalają na wyznaczenie przewyższenia między punktami, a w przypadku, gdy jeden z tych punktów jest punktem państwowej osnowy wysokościowej lub tzw. reperem roboczym, to istnieje również możliwość obliczenia wysokości dowolnego punktu, który jest widoczny ze stanowiska niwelatora. W przypadku, gdy punkt, którego wysokość należy wyznaczyć, jest położony w znacznej odległości (przekraczającej zasięg pojedynczego stanowiska) od repera, należy utworzyć ciąg niwelacyjny (Rysunek 18). Dzięki tej konstrukcji możliwe jest wyznaczenie przewyższeń na odległościach przekraczających wiele kilometrów i uzyskanie następujących błędów:

- niwelacja techniczna: ± 1 mm/km \div ± 3 mm/km,
- niwelacja precyzyjna: $\pm 0,2$ mm/km \div $\pm 0,7$ mm/km.



Rysunek 18 Szkic ciągu niwelacyjnego

Opracowanie danych sprowadza się do obliczenia przewyższenia na podstawie różnic odczytów na łątach, a następnie dodanie do wysokości repera. Zaleca się jednak wykorzystanie dwóch punktów o znanych wysokościach, przy czym jeden z nich znajduje się na początku ciągu, a drugi na jego końcu. W ten sposób możliwa jest kontrola poprawności pomiaru (punkt końcowy ma znaną wysokość, oraz wyznaczoną z pomiaru), a uzyskana odchyłka jest rozrzucana na wszystkie stanowiska. Aktualnie wszystkie obliczenia wykonuje się w programach geodezyjnych, które umożliwiają obliczenie wysokości wszystkich punktów metodami uproszczonymi, ale również metodą najmniejszych kwadratów.

W tabeli (Tabela 7) zestawiono ich zalety i ograniczenia.

Tabela 7 Zalety i ograniczenia klasycznych metod geodezyjnych

METODA	ZALETY	OGRANICZENIA
pomiary satelitarne (GNSS)	dokładność pozycjonowania na poziomie centymetrowym lub wyższa (przy zastosowaniu pomiarów statycznych) możliwość wyznaczenia przemieszczeń punktów w przestrzeni szybkie opracowanie pomiaru niezależność od warunków atmosferycznych i pory dnia duży zasięg pomiaru	dość duża czasochłonność pomiaru pomiar punktowy przeszkody terenowe (wysoka roślinność, gęsta zabudowa) uniemożliwiający pomiar większy błąd wyznaczenia wysokości niż położenia sytuacyjnego
pomiary tachimetryczne	dokładność na poziomie centymetrowym lub milimetrowym (przy zastosowaniu tachimetrów precyzyjnych) możliwość wyznaczenia przemieszczeń punktów w przestrzeni szybkie opracowanie pomiaru duży zasięg pomiaru możliwość automatyzacji pomiaru	duża czasochłonność pomiaru pomiar punktowy (standardowo) zapewnienie wizury pomiędzy instrumentem a punktem pomiarowym
niwelacja geometryczna	niski koszt dokładność na poziomie milimetrowym lub wyższa szybkie opracowanie pomiaru	duża czasochłonność pomiaru pomiar punktowy wyznaczenie składowej pionowej przemieszczeń niewielki zasięg

3.1.1.b Metody teledetekcyjne i fotogrametryczne

Techniki teledetekcyjne pozwalają w sposób zdalny pozyskiwać informację o obiektach i zjawiskach, co oznacza, że nie jest wymagany bezpośredni kontakt sensora z obiektem. W odniesieniu do monitoringu techniki te najczęściej mogą być wykorzystane do wielkoobszarowych analiz deformacji powierzchni terenu. Zazwyczaj liczba obserwowanych punktów jest bardzo duża w porównaniu z technikami klasycznymi, ale uzyskiwane dokładności są zwykle niższe. Podstawę niniejszego opracowania stanowi raport (PIG i in., 2016).

Obrazowanie satelitarne

Teledetekcja satelitarna jest to metoda pomiaru cech obiektów położonych na powierzchni ziemi z poziomu satelitarnego. Sensor nie jest w bezpośrednim kontakcie z obrazowanym obiektem, dlatego metoda bazuje na propagacji sygnału (na przykład elektromagnetycznej fali w paśmie optycznym, czy mikrofalach). Odbicie sygnału od fragmentu terenu (wyznaczającego rozdzielczość obrazowania) jest zapisywane cyfrowo i odpowiada wartości jednego piksela wynikowego obrazu. Systemy teledetekcyjne, szczególnie satelitarne, zapewniają powtarzalne i spójne obrazowanie powierzchni ziemi, co jest nieocenione w prowadzeniu monitoringu zmian krótko- i długookresowych.

W odpowiedzi na różne zapotrzebowanie, satelity są wyposażane w różne sensory i charakteryzują się szeroką gamą przestrzennych, spektralnych i czasowych parametrów (Gupta 2003, Adamczyk i Będkowski 2005). Omówienie satelitów teledetekcyjnych ze zrozumiiałych względów zostało ograniczone do najważniejszych i najczęściej używanych systemów.

Nowoczesne obrazowanie powierzchni Ziemi zaczęło się w 1972 roku wraz z uruchomieniem przez NASA systemu Landsat 1 (wcześniej jako Earth Resources Technology Satellite: ERTS 1). System był wzbogacany następnie o kolejne satelity, aż do najmłodszego Landsat 8, wystrzelonego w 2013 roku. W innych państwach zostały uruchomione podobne satelity teledetekcyjne, takie jak SPOT (Francja, Belgia, Szwecja), IRS (Indie), JERS (Japonia). Na szczególną uwagę zasługuje satelita Sentinel 2A, wystrzelony w czerwcu 2015, który powstał z inspiracji ESA (Europejska

Agencja Kosmiczna) w ramach Programu COPERNICUS. ESA planuje do 2020 r. umieszczenie na orbicie następnych satelitów z serii Sentinel 3A, 3B i 3C.

Kolejną grupę stanowią satelity o wysokiej rozdzielczości, z których można wymienić: SkySat (rozdzielczość 0.9 m), IKONOS (0.82 m), Quick Bird (0.65 m), KOMPSAT (0.55 m), Pleiadas (0.5 m), Geo-Eye (0.34 m) czy Seria WorldView (do 0.31 m).

Charakterystyki wybranych satelitów zostały podane w tabeli (Tabela 8).

Tabela 8 Charakterystyki współcześnie działających satelitów (na podstawie <https://directory.eoportal.org>)

System	Typ sensora M- multispektralny P-panchromatyczny (liczba kanałów)	Rozdzielczość przestrzenna [m]	Pas obrazowania [km]	Rozpoczęcie obrazowania
Landsat 7 (ETM+)	M (7), P	30 (M), 15 (P)	185	1999
Landsat 8 (OLI)	M (8), P	30 (M), 15 (P)	185	2013
SPOT 6, 7	M (4), P	8 (M), 2 (P)	60	2012
ASTER	M (14)	15-90	60	1999
SENTINEL2A	M (13)	10-60	290	2015
IKONOS	4 (M), P	4 (M), 1 (P)	13	1999
WorldView 1	P	0.5	17	2007
WorldView 2	8 (M), P	2.4 (M), 0.5 (P)	16	2009
WorldView 3	8 (M), P	1.3 (M), 0.34 (P)	13	2014
GeoEye 1	4 (M), P	1.8 (M), 0.5 (P)	15	2008

Odrębną grupą satelitów są systemy działające w zakresie mikrofal. Wyróżniającym satelitą w tym gronie jest TerraSAR-X. Spore nadzieje są związane z innym satelitą radarowym obserwacji Ziemi Sentinel 1A Komisji Europejskiej, który zbudowany i nadzorowany jest przez Europejską Agencję Kosmiczną. Jest to pierwszy satelita programu Copernicus (dawnego GMES).

W zakresie monitoringu obiektów drogowych techniki teledetekcyjne mogą być wykorzystywane do: identyfikacji i monitoringu powierzchniowych ruchów masowych (osuwisk, obrywów, sływów itp.), detekcji przemieszczeń powierzchni terenu (osiadań, ruchów geotektonicznych itp.) przy pomocy metod interferometrycznych (szerzej omówione poniżej), lokalizacji obszarów podmokłych i podtopień jako metoda wspomagająca, analiz geosrodowiskowych, zmian użytkowania powierzchni terenu oraz lokalizacji zanieczyszczeń.

Zalety i ograniczenia systemów satelitarnych omówiono w trzech odrębnych grupach (Tabela 9). Do pierwszej z nich zaliczono satelity o średniej zdolności rozdzielczej od 10 do kilkudziesięciu metrów. Druga grupa to satelity o wysokiej rozdzielczości rzędu 1 m. Wreszcie trzecia grupa to satelity operujące w zakresie radarowym.

Tabela 9 Zalety i ograniczenia systemów satelitarnych

RODZAJ METODY	ZALETY	OGRANICZENIA
Satelity optyczne o średniej zdolności rozdzielczej	dostępność do pełnych danych z całego świata, możliwość pozyskania zobrażeń w różnych porach roku (w zależności od zainteresowania zamawiającego), darmowy dostęp lub po niskim koszcie, wysoka kartometryczność, pokrycie dużego obszaru terenu (około 200 X 200 km), możliwość generowania barwnych kompozycji wielospektralnych ułatwiających fotointerpretację, możliwość synoptycznego oglądu terenu pozwalająca wychwytywać regionalne elementy budowy geologicznej,	trudność w pozyskaniu bezchmurnych scen w pewnych strefach klimatycznych, niewystarczająca dokładność do rozpoznania niewielkich elementów budowy geologicznej, ograniczenia skali w stosunku do opracowań kartograficznych (do 1 : 50 000).

RODZAJ METODY	ZALETY	OGRANICZENIA
	możliwość interpretacji stereoskopowej	
Satelity optyczne o wysokiej zdolności rozdzielczej	możliwość pozyskania zobrażeń w różnych porach roku (w zależności od zainteresowania zamawiającego), wysoka kartometryczność, możliwość rozpoznania niewielkich elementów budowy geologicznej, możliwość opracowania produktów kartograficznych w skali do 1 : 10 000, możliwość interpretacji stereoskopowej	ograniczona dostępność do pełnych danych z całego świata, stosunkowo wysoki koszt pozyskania danych (powyżej 10 euro za 1 km ²), pokrycie stosunkowo niewielkiego obszaru terenu (przeciętnie 10 X 10 km), brak możliwości generowania barwnych kompozycji wielospektralnych, za wyjątkiem danych z satelity WorldView-3
Satelity operujące w zakresie radarowym	dostępność do pełnych danych z całego świata, możliwość pozyskania zobrażeń w różnych porach roku (w zależności od zainteresowania zamawiającego), penetracja przez pokrywę chmur, możliwość penetracji przez niewielką pokrywę roślinną, możliwość wykonania zobrażeń przez całą dobę z uwagi na własne źródło zasilania, darmowy dostęp lub po niskim koszcie (SENTINEL oraz archiwalne ERS-1 i 2, ENVISAT), pokrycie stosunkowo dużego obszaru terenu (przeciętnie około 100 X 100 km), możliwość generowania barwnych kompozycji przy wykorzystaniu zobrażeń o różnej polaryzacji (H – V), możliwość synoptycznego oglądu terenu pozwalająca wychwytywać regionalne elementy budowy geologicznej	konieczność wprowadzenia poprawki geometrycznej zobrażeń z uwagi na boczny kąt padania wiązki radarowej, stosunkowo wysoki koszt zobrażeń o wyższej rozdzielczości (TerraSAR-X, Radarsat 1 i 2, Cosmo-SkyMed), ograniczenia skali w stosunku do opracowań kartograficznych (do 1 : 100 000).

Satelitarna interferometria radarowa

Pierwsze systemy radarowe wykorzystujące radar z aperturą syntetyczną umieszczono na orbicie okołoziemskiej pod koniec lat 70-tych. Systemy te znalazły i znajdują szerokie zastosowanie w teledetekcji. Na początku lat 90-tych, wykorzystując zjawisko interferencji fal, na podstawie danych satelity ERS-1 operującego w zakresie mikrofal i umieszczonego na orbicie okołoziemskiej 17 lipca 1991 r. przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA), zaczęto generować interferogramy radarowe, umożliwiające tworzenie cyfrowych modeli terenu oraz rejestrację zmian powierzchni terenu z dokładnością centymetrową. Następnie, co kilka lat ESA uruchamiała kolejne satelity ERS-2, ENVISAT i wreszcie Sentinel-1A w kwietniu 2014 r. W międzyczasie inne organizacje rozpoczynały misje kolejnych satelitów: ALOS, RADARSAT 1 i 2, COSMO-SkyMed oraz TerraSAR-X.

Wszystkie wymienione satelity objęły pełny zakres widma mikrofalowego – X, C i L, co pozwoliło na detekcję ruchów powierzchni terenu w przedziale od milimetrów po decymetrów. Metoda interferometrii satelitarnej stała się niezwykle atrakcyjna do badania skutków trzęsień ziemi, aktywności wulkanicznej, identyfikacji i monitoringu osuwisk, aktywności górniczej, identyfikacji deformacji terenu na terenach zurbanizowanych, detekcji gruntów słabonośnych i wielu innych zastosowań. Może być stosowana do analiz posadowienia oraz monitoringu dużych obiektów przemysłowych i infrastrukturalnych, w tym obiektów liniowych (autostrad, dróg ekspresowych, węzłów komunikacyjnych oraz linii kolejowych). Okazało się również, że archiwalne dane satelitarne są ponownie niezwykle przydatne, bo dzięki nim można śledzić dynamikę przemieszczeń powierzchni terenu w ciągu ostatnich dwudziestu kilku lat. Równoległe z rozwojem technologicznym i ulepszaniem parametrów satelitów obserwowany jest również

rozwój technik przetwarzania i doskonalenia stosowanych algorytmów.

Zasadniczo można wydzielić dwie metody przetwarzania satelitarnych danych interferometrycznych; metodę różnicową (dyferencyjną)–DInSAR oraz metodę permanentnych rozpraszaczy –PSInSAR. Każda z tych metod ma swoje zalety i ograniczenia. Obie metody zezwalają na analizę dużego obszaru, co czyni je konkurencyjnymi w stosunku do tradycyjnych metod geodezyjnych. Nie znaczy to, że metody satelitarne zastąpią metody klasyczne, ale mogą je ograniczyć i pozwolić na lepsze ich zaprojektowanie. Metoda dyferencyjna umożliwia rejestrację przemieszczeń w skali decymetrowej wynikającej z porównania dwóch scen satelitarnych pozyskanych w różnym czasie. Zmiany na powierzchni są widoczne w postaci prążków interferometrycznych. Z kolei w metodzie PSInSAR mamy do czynienia z „chmurą” punktów, tak zwanych permanentnych rozpraszaczy(PS – Permanent Scatterers). Każdy z punktów zawiera informacje o wielkości przemieszczeń (mm/rok) zazwyczaj w przedziale kilku lub kilkunastu lat. Zwykle metoda obejmuje przetwarzanie kilkudziesięciu scen satelitów radarowych. Obie metody można z powodzeniem wykorzystać do obserwacji przemieszczeń pionowych na terenach górniczych, ale również są one przydatne do monitoringu osuwisk.

Bezpośrednim wynikiem przetworzenia są obrazy rastrowe (interferogramy różnicowe), na których widoczne są zaistniałe zmiany powierzchni terenu w postaci prążków interferometrycznych oraz zestaw wektorowych punktów (PS).

Interferometria radarowa oraz technika SAR służą do badania zmian powierzchni ziemi nie tylko z poziomu satelitów czy samolotów. Te techniki mogą być stosowane również w systemach naziemnych, przede wszystkim do wykrywania przemieszczeń powstających na dużych obszarach, takich jak osuwiska i tereny objęte eksploatacją górnictwem (np. w kopalniach odkrywkowych). Przykładami szerokiego zastosowania radaru do badania deformacji powierzchni terenu są:

- SlopeStability Radar – SSR, system opracowany w 2002 r., dystrybuowany przez firmę GroundProbe,
- Movement and Surveying Radar – MSR, system stworzony przez firmę Reutech Radar Systems w 2006 r.,
- Ground-Based SAR – GBSAR, technologia rozwijana od 2000 r., dostępna na rynku w postaci systemu IBIS (Image by InterferometricSurvey), oferowanego od 2007 r. przez firmę Ingegneria dei Sistemi (IDS),
- GAMMA Portable Radar Interferometer – GPRI, system o podobnej funkcjonalności do systemu IBIS rozwijany przez firmę GAMMA Remote Sensing od 2005 r.,
- FastGBSAR – system o podobnej funkcjonalności do systemu IBIS, oferowany przez firmę MetaSensing od 2012 r.

Wymienione naziemne systemy radarowe mają wspólne podstawowe zasady działania, podobne do zasad, na których opiera się interferometria satelitarna. Dwa sygnały mikrofalowe są wysyłane w różnych momentach czasu. Fale po dotarciu do obiektu (np. powierzchni osuwiska) są rozpraszane, a część rozproszonego sygnału powraca do jednostki radarowej, gdzie następuje rejestracja jego amplitudy i fazy. Na skutek ruchu pomiędzy dwiema akwizycjami, rejestrowana jest różnica fazy. Wyznaczona różnica faz $\Delta\varphi$ dla pojedynczego piksela odpowiada jego przemieszczeniu d zgodnie z równaniem:

$$d = -\frac{c}{4\pi f_c} \Delta\varphi$$

gdzie: c – prędkość rozchodzenia się fali; f_c – częstotliwość środkowa.

Naziemne systemy radarowe są tworzone z myślą o różnych zastosowaniach. Najczęściej wymienianymi są: krótko- lub długotrwałe pomiary ruchów zboczy ścian i kopalń odkrywkowych (SSR, MSR, IBIS, FastGB SAR), monitoring obiektów hydrotechnicznych takich jak zapory i obwałowania ziemne (SSR, IBIS, FastGB SAR), monitoring osuwisk i niestabilnych zboczy oraz lodowców (IBIS, GPRI, FastGB SAR).

W zależności od producenta stosowane są różne rodzaje radarów, zarówno z aperturą rzeczywistą (RAR), jak i syntetyzowaną (SAR).

Powierzchnia podlegająca pomiarowi jest obserwowana w sposób punktowy. Pojedynczy fragment obserwowanej powierzchni jest nazywany pikselem. Pojedynczy piksel powstaje, jako przecięcie linii określających rozdzielczość odległościową (w kierunku obserwacji) oraz rozdzielczość azymutalną (w kierunku prostopadłym). Rozdzielczość odległościowa jest zależna od szerokości pasma częstotliwości użytego w modulacji wiązki radarowej. W stosowanych systemach najwyższa możliwa do uzyskania rozdzielczość wynosi 0,50-0,75 m, dzięki użyciu modulacji częstotliwości fali ciągłej FMCW lub SFCW. Natomiast rozdzielczość azymutalną uzyskuje się dzięki aperturze anteny. W tym przypadku istnieje kilka rozwiązań technicznych, takich jak skaner liniowy zapewniający aperturę syntetyzowaną czy ruchoma głowica zapewniająca obrót anteny wokół osi pionowej. Przykładowe wartości możliwej do uzyskania rozdzielczości azymutalnej to 0.25°, 0.4° (tzn. ok. 0,44 m i 0,70 m na odległości 100 m).

Dostępne systemy posiadają także możliwość wykonania pomiaru w sposób pozwalający na uzyskanie trójwymiarowego modelu obserwowanego terenu.

Bezpośrednim wynikiem pomiaru jest szereg wartości przemieszczeń zarejestrowanych dla obserwowanych punktów (pikseli). Wymiary pikseli są zależne od parametrów systemu. Przemieszczenia mierzone są w kierunku propagacji fali, co oznacza, że w ogólności rejestrowana jest pewna składowa przemieszczenia przestrzennego. Istotne jest zatem takie usytuowanie jednostki radarowej, aby kierunek wysyłanych sygnałów pokrywał się z przewidywanym kierunkiem przemieszczeń. Wszystkim wartościom przemieszczeń przypisane są momenty czasu, w których dokonano rejestracji. Każdy z producentów dostarcza własne dedykowane oprogramowanie do akwizycji i przetwarzania obserwacji oraz prezentacji wyników.

Motywacją dla rozwoju naziemnej interferometrii radarowej było uzyskanie pomiaru przemieszczeń powierzchni terenu obserwowanej w dwóch wymiarach, z wysoką dokładnością. W porównaniu z obrazowaniem uzyskiwanym z pułapu wysokiego, idea pomiaru instrumentami naziemnymi jest silniej nastawiona na szczegółową obserwację osuwisk, niestabilnych zboczy czy infrastruktury (np. drogowej). Istnieje możliwość zastosowania tej techniki do monitoringu stabilności umocnień drogowych w postaci nasypów czy ścian oporowych. Geometria pomiaru i czas obserwacji mogą być bardziej zoptymalizowane dla poszczególnych miejsc obserwacji.

Zalety i ograniczenia interferometrii radarowej zestawiono w tabeli (Tabela 10).

Tabela 10 Zalety i ograniczenia interferometrii radarowej

RODZAJ METODY	ZALETY	OGRANICZENIA
Satelitarna interferometria radarowa	wysoka precyzja pomiarów, stopień przemieszczenia pomiędzy dwoma punktami w ciągu roku od ± 0.1 mm, przemieszczenie jednego punktu PS od 1 mm w kierunku wybierania („widzenia”) satelity (LOS) do 1 cm w kierunku wschód – zachód, maksymalne przemieszczenia, które mogą być rejestrowane przez satelity ERS 1 i 2 lub inne w zakresie C wynoszą 14 mm w ciągu 35 dni (a obecnie nawet częściej),	dosyć skomplikowana metodyka obliczeniowa, obliczone prędkości deformacji mają charakter względny tak w czasie i w przestrzeni, gdyż są odnoszone do czasu wykonania sceny SAR obranej za referencyjną, a przestrzennie do jednego bądź kilku PS obranych za referencyjne (dla których przyjmuje się, że deformacja wynosi 0 mm/rok), wartości deformacji odnoszą się do przyjętego modelu deformacji. Najczęściej, przy braku innych danych przyjmuje się model liniowy. Jeśli

RODZAJ METODY	ZALETY	OGRANICZENIA
	<p>zebranie danych pomiarowych z dużego obszaru w szybkim czasie, jednorazowo do 2 000 km², bogaty zasób archiwalny danych z satelitów ERS 1 i 2 umożliwiających przebieg ruchów na powierzchni terenu od 1992 r., duża gęstość punktów pomiarowych, na terenach aglomeracji miejskich i przemysłowych do 4 000 punktów PS na kilometr kwadratowy, łatwa konwersja danych interferometrycznych do formatu GIS.</p>	<p>deformacja za nadto odbiega od modelu PS jest odrzucany, na dokładność wyznaczonych prędkości deformacji mają wpływ użyta liczba scen SAR, a także gęstość i rozmieszczenie rozpraszaczy PS w terenie.</p>
<p>Naziemna interferometria radarowa</p>	<p>zasięg pracy sięgający kilka km wysoka czułość (dokładność) pomiaru przemieszczenia rzędu 0,1 mm w sprzyjających warunkach krótki czas pomiaru (kilka – kilkanaście minut) wzajemna zgodność kolejnych pomiarów jest dobrze kontrolowana za pomocą parametru koherencji interferogramów krótki czas akwizycji danych z pojedynczej sceny i instalacja urządzenia na potrzeby konkretnego obiektu zapewnia istotnie wyższą rozdzielczość czasową niż w przypadku interferometrii satelitarnej, w której ten parametr jest zależny od parametrów ruchu satelitów na orbitach możliwość prowadzenia obserwacji bez względu na warunki pogodowe oraz oświetlenie systemy radarowe nie wymagają instalacji dodatkowych urządzeń na obserwowanej powierzchni niepokrytej roślinnością</p>	<p>roślinność pokrywająca powierzchnię istotnie pogarsza dokładność pomiaru przemieszczeń lub wręcz uniemożliwia prowadzenie obserwacji, nieoznaczoność fazy, czyli brak możliwości jednoznacznego określenia przemieszczenia na podstawie wyznaczonej wartości fazy, która wynosi $\pm\lambda/4$, gdzie λ oznacza długość fali radarowej (np. dla radarów, w których $\lambda = 17,2$ GHz, nieoznaczoność występuje dla przemieszczenia przekraczającego wartość $\pm 4,4$ mm pomiędzy kolejnymi pomiarami) pasmo mikrofal, które jest stosowane w systemach radarowych, jest podatne na zmiany warunków atmosferycznych, szczególnie wilgotności. Eliminacja pozornych przemieszczeń wynikających z niestabilności parametrów atmosfery, wymaga ich rejestracji albo obserwacji w polu widzenia punktów stabilnych (ew. monitorowanych za pomocą innych technik), ze względu na możliwość prowadzenia rejestracji w kierunku propagacji fali, technika GB-SAR jest mało użyteczna do detekcji ruchów pionowych lub dla obszarów płaskich, które mogą być poddane np. wpływom osiadań ograniczona mobilność systemów radarowych (w porównaniu z innymi technikami naziemnymi - instrumentami geodezyjnymi czy skanerami laserowymi)</p>

Techniki fotogrametryczne

Fotogrametria jest dziedziną nauki i techniki, która pozwala na wyznaczanie kształtów, rozmiarów i położenia obiektów w przestrzeni na podstawie zdjęć fotogrametrycznych. Powstawanie obrazu zakłócają wady optyczne obiektywu, z których najbardziej istotna jest dystorsja obiektywu, minimalizowana dzięki stosowaniu kamer metrycznych.

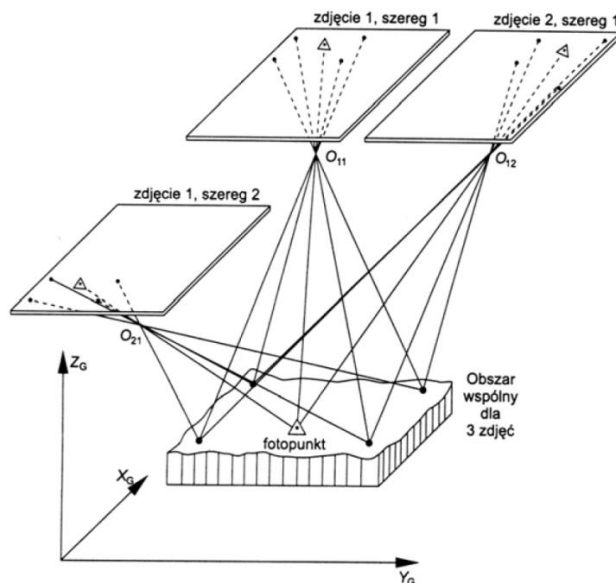
W fotogrametrii lotniczej zdjęcia pozyskiwane są z pułapu samolotów i najczęściej są to zdjęcia prawie pionowe, o odchyleniu od pionu w zakresie od kilku minut do 3 stopni. Procesem obliczeniowym, który pozwala na precyzyjne określenie położenia zdjęć lotniczych w przestrzeni, jest aerotriangulacja. W tym procesie wyznacza się parametry orientacji zewnętrznej zdjęć oraz współrzędne środków rzutów. Konieczna jest znajomość współrzędnych punktów zidentyfikowanych na zdjęciach (tzw. fotopunktów, GCP – groundcontrol point), których współrzędne terenowe zwykle wyznacza się klasycznym pomiarem geodezyjnym. Mogą one być sygnalizowane specjalnymi tarczami przed nalotem fotogrametrycznym; wtedy na ogół nie ma kłopotów z ich identyfikacją na zdjęciach i dokładność pomiaru współrzędnych tłowych jest wyższa. Mogą też być wybierane na takich szczegółach sytuacyjnych (naturalnych lub

sztucznych), które umożliwiają ich jednoznaczną identyfikację zarówno w terenie, jak i na zdjęciach.

Przy cyfrowym opracowaniu zdjęć większe znaczenie dla poszczególnych zdjęć mają jego elementy orientacji zewnętrznej niż współrzędne punktów. Postęp w metodach pomiarów geodezyjnych, a zwłaszcza satelitarne techniki pozycjonowania, umożliwia określenie współrzędnych środków rzutów kamery w momencie ekspozycji z błędem do kilkunastu centymetrów. Wyniki pomiarów satelitarnych uwzględniane są w procesie aerotriangulacji jako obserwacje lub dodatkowe warunki. (Bernasik, 2008)

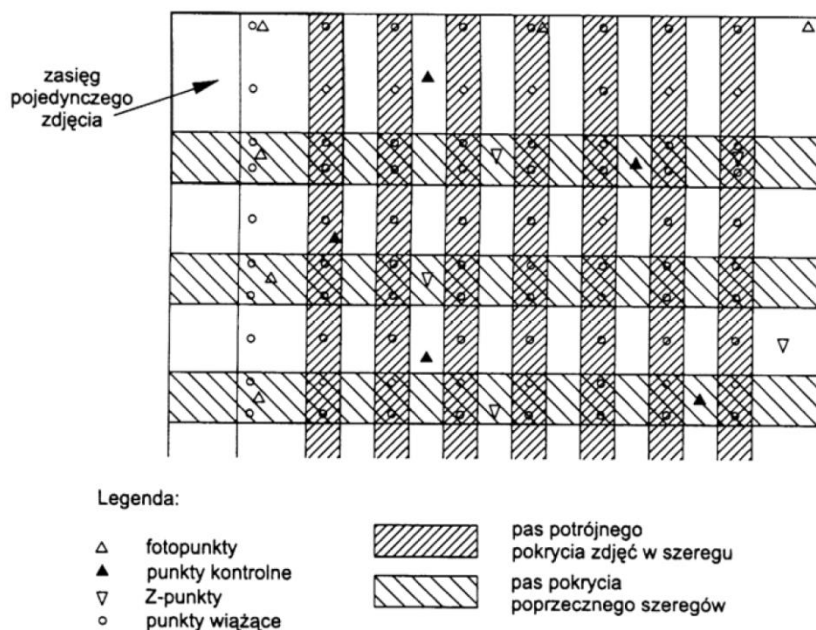
Pomierzone na zdjęciu punkty, przy znanych elementach orientacji wewnętrznej kamery, umożliwiają odtworzenie wiązki promieni. Wszystkie promienie przecinają się w środku rzutów kamery (Rysunek 19). Aerotriangulacja metodą niezależnych wiązek polega na znalezieniu takiego położenia poszczególnych wiązek (określonego przez elementy orientacji zewnętrznej tj. współrzędne środków rzutów X, Y, Z oraz trzy kąty ω, φ, κ), aby spełnione były następujące warunki:

- promienie pochodzące od tych samych punktów terenowych (tzw. punkty wiążące) powinny się przecinać,
- promienie pochodzące od fotopunktów powinny przechodzić przez dany punkt.



Rysunek 19 Wiązki promieni tworzących obrazy

Fotopunkty powinny być zlokalizowane na granicach bloku w pasach pokrycia poprzecznego szeregów, wzdłuż szeregów co 4-6 baz oraz wewnątrz bloku (Rysunek 20). Ponadto projektuje się dodatkowe punkty w liczbie około 50% fotopunktów wykorzystanych do wyrównania bloku, które będą pełniły rolę punktów kontrolnych i pozwolą na ocenę dokładności aerotriangulacji (Bernasik, 2008).



Rysunek 20 Blok zdjęć aerotriangulacji (Bernasik, 2008)

Do zdefiniowania poszczególnych wiązek niezbędna jest znajomość elementów orientacji wewnętrznej kamery oraz czynników deformujących wiązkę (np. dystorsji obiektywu). Elementy te zawarte są w raporcie z kalibracji kamery.

Do wykonania aerotriangulacji potrzebne są fotopunkty oraz punkty wiążące. Punkty wiążące zdjęcia w szeregu muszą być zlokalizowane w pasie potrójnego pokrycia zdjęć (minimum trzy), a punkty wiążące zdjęcia pomiędzy szeregami w pasie pokrycia szeregów. Punkt wiążący musi być możliwy do pomiaru na każdym zdjęciu, na którym się znajduje. W przypadku idealnie wykonanych zdjęć w bloku punkt wiążący, pełniący równocześnie rolę punktu wiążącego zdjęcia w szeregu i pomiędzy szeregami, może występować na sześciu zdjęciach (Rysunek 20). Punkty wiążące są wybierane w charakterystycznych punktach terenu.

Pomiar współrzędnych współcześnie wykonuje się na fotogrametrycznej stacji cyfrowej. Pomiarowi podlegają: fotopunkty, punkty kontrolne, punkty wiążące i inne punkty wyznaczone w procesie aerotriangulacji. Pomiar odbywa się z wykorzystaniem efektu stereoskopowego, z wykorzystaniem procedury automatycznej korelacji obrazów.

Kolejnym etapem jest obliczenie współrzędnych tłowych wszystkich pomierzonych punktów, ponieważ pomierzone wielkości są w układzie obrazu cyfrowego. W tym celu najczęściej stosuje się transformacje: Helmerta, afiniczną, bilinearną, rzutową. Następnie wprowadzane są poprawki do współrzędnych tłowych korygujące dystorsję obiektywu i uwzględniające wpływ krzywizny Ziemi i refrakcji atmosferycznej. Kolejnym etapem jest obliczenie elementów orientacji wzajemnej oraz szczytkowej paralaksy poprzecznej na pomierzonych punktach.

Po pomiarze w powyższy sposób wszystkich zdjęć ostatnim etapem jest obliczenie i wyrównanie aerotriangulacji. Rezultatem są: elementy orientacji zewnętrznej wszystkich zdjęć, współrzędne terenowe (geodezyjne) punktów wyznaczanych, odchyłki pomiędzy współrzędnymi obliczonymi z aerotriangulacji a danymi dla fotopunktów, odchyłki na punktach kontrolnych oraz parametry statystyczne charakteryzujące jakość aerotriangulacji: dokładność wewnętrzną aerotriangulacji, średnie odchyłki na fotopunktach i punktach kontrolnych, odchyłki maksymalne itp.

W zakresie monitoringu pomiary fotogrametryczne z pułapu lotniczego mogą być używane w celu tworzenia modeli wysokościowych (NMT, NMPT) oraz prowadzenia na ich podstawie analiz

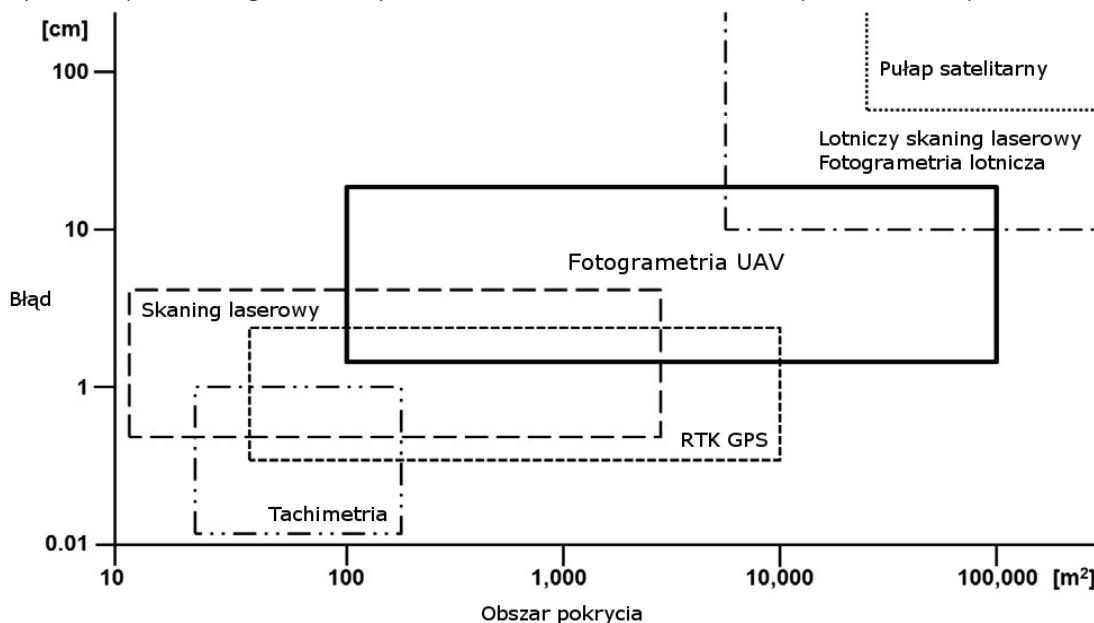
danych wieloczasowych/archiwalnych: zmiany powierzchni terenu (w tym zapadliska, osuwiska; selekcja miejsc o potencjalnie "trudnych" utworach/glebach powierzchniowych).

Pomiary fotogrametryczne mogą być również prowadzone na podstawie obrazów pozyskanych z bezzałogowych statków powietrznych (BSP, ang. UAV). Pozyskane zdjęcia mogą być wykorzystane do opracowania kilku standardowych produktów przetwarzania danych fotogrametrycznych.

Obrazy pozyskiwane z bezzałogowych statków powietrznych stanowią konkurencję dla klasycznych metod fotogrametrycznych. W zakresie zastosowań związanych realizacją inwestycji drogowych, poza aspektem ekonomicznym duża przewaga technologii UAV polega na możliwości wykonaniu zdjęć umożliwiających wysoką rozdzielczość, a w konsekwencji dużą dokładność przestrzenną modelu pokrycia terenu. Dokładność uzyskiwana z platform UAV w porównaniu do innych metod jest uzyskana kosztem konieczności wykonania dużej liczby zdjęć dla danego obszaru, na przykład w stosunku do nalotów fotogrametrycznych wysokiego oraz satelitarnego pułapu.

Aktualnie dostępne zintegrowane systemy INS/GNSS oferują podobne możliwości co systemy wykorzystujące GCP do pozyskania informacji o zmienności terenu (monitoringu deformacji), co oznacza, że georeferencja bezwzględna zastępuje konieczność rozkładania punktów kontrolnych, które muszą być odfotografowane oraz niezależnie zamierzone. Zintegrowane systemy IMU/GNSS mają niewielką masę, więc nawet dla lekkich jednostek latających o ograniczonym udźwigu nie stanowią znaczącego obciążenia.

W publikacji (Siebert i Teizer, 2014) autorzy prezentują szacowaną dokładność danych uzyskiwanych z fotogrametrii systemami UAV w stosunku do innych metod (Rysunek 21).



Rysunek 21 Szacowana dokładność fotogrametrii UAV w stosunku do innych metod (Siebert i Teizer, 2014)

W zakresie realizacji inwestycji drogowych technika pomiarów oparta na UAV jest bardzo dobrym uzupełnieniem innych metod inwentaryzacyjnych. W zagadnieniach związanych z monitoringiem deformacji terenu jest ograniczona do dokładności kilku centymetrów. Naloty z poziomu UAV w sposób oczywisty dostarczają obrazów, które mogą stanowić uzupełnienie przeglądów okresowych dróg oraz drogowych obiektów inżynierskich.

Zalety i ograniczenia technik fotogrametrycznych realizowanych z różnego pułapu zestawiono w tabeli (Tabela 11).

Tabela 11 Zalety i ograniczenia technik fotogrametrycznych

RODZAJ METODY	ZALETY	OGRANICZENIA
Fotogrametria lotnicza	bardzo duży obszar opracowania kameralna obserwacja przestrzenna terenu, która ma szczególne znaczenie w interpretacji stanów archiwalnych automatyzacja opracowania dzięki tzw. gęstemu matchingowi, który zwiększa dokładność NMT	brak możliwości pomiaru w miejscach głęboko zacienionych dla terenów o gęstej roślinności tylko możliwość wykonania numerycznego modelu pokrycia terenu bez możliwości uzyskania NMT brak możliwości pomiaru przy zachmurzeniu wysoki koszt
Fotogrametria niskiego pułapu (BSP, UAV)	możliwość szybkiej inwentaryzacji obszaru opracowania z bardzo wysoką rozdzielczością możliwość prowadzenia nalotu nad obszarem niedostępnym dla bezpośrednich technik pomiarowych możliwość pomiaru przy zachmurzeniu niski koszt wysokie dokładności opracowania nawet przy zastosowaniu kamer niemetrycznych	ekstrakcja ścisłego numerycznego modelu terenu nie zawsze jest możliwa; nie zawsze jest możliwe opracowanie NMT na podstawie pozyskanego NMPT możliwość wykonania nalotów może być ograniczona względami formalnymi (strefy w których nie można latać) oraz pogodowymi niewielki zakres opracowania wynikający z niskiego pułapu oraz ograniczeń w zasilaniu ograniczenia udźwigu powodujące konieczność stosowania mniej dokładnych jednostek nawigacyjnych

Skaning laserowy

Technologia skaningu laserowego bazuje na nieselektywnym pomiarze dużej liczby punktów w przestrzeni trójwymiarowej. Podstawą działania współczesnych skanerów jest elektrooptyczny pomiar odległości bazujący najczęściej na paśmie światła widzialnego lub podczerwonego (zakresy stosowanej fali nośnej zwykle są z przedziału 0,4 μm do 1,6 μm).

Skaning laserowy jako metoda pomiarowa charakteryzuje się pozyskiwaniem dużej ilości danych dobrze reprezentujących przebieg oraz zmienność powierzchni terenu. W stosunku do klasycznych geodezyjnych metod pomiarowych pozwala na uzyskanie mniejszej dokładności, ale przy nieporównywalnie większej gęstości punktów reprezentujących obiekt pomiaru.

Skanery laserowe można charakteryzować wieloma kryteriami, niemniej jednak najpopularniejszym zbiorem cech charakterystycznych danego urządzenia są:

Zasięg pomiaru. Dla skanerów lotniczych oraz naziemnych przeznaczonych do pomiarów na dużych odległościach zasięg przekracza znacząco 1 km, zwykle jest to ponad 2 km,

Rozdzielczość skanowania. Jest to jeden parametrów, który decyduje o zastosowaniu danego urządzenia do wybranego celu. Rozdzielczość może być definiowana niezależnie od odległości (rozdzielczość kątowa przeliczana na stałą odległość od skanera) lub w zależności od odległości (w takim przypadku można teoretycznie osiągnąć maksymalną rozdzielczość terenową nawet na odległości równej maksymalnemu zasięgowi danego skanera),

Zakres pola widzenia. W pomiarach objętości mas ziemnych czy pomiarach topografii i jej zmienności nie jest to element kluczowy, ale w inwentaryzacji obiektów inżynierskich może już mieć znaczenie.

Szybkość skanowania. Na chwilę obecną skanery średniego zasięgu próbują scenę pomiarową z prędkościami przekraczającymi rejestrację 1 miliona punktów na sekundę. Skaner dużego zasięgu pobierają informację z terenu z prędkością około 200 tys. punktów na sekundę.

Dokładność pozyskiwanej informacji. Na ten parametr wpływ ma dokładność pomiaru odległości, rozmiar plamki laserowej – koherencja wiązki oraz dokładność pomiaru kątów.

Pozyskanie danych przestrzennych skanerem laserowym polega standardowo na wykonaniu następujących czynności:

- zaplanowanie pomiaru,

- przeprowadzenie pomiaru terenowego,
- wstępne przygotowanie danych,
- rejestracja skanów (połączenie wielu stanowisk w jednolitą chmurę punktów),
- praca na danych (modelowanie, generowanie przekrojów itd.),
- sprawdzenie i kontrola produktów.

Zaplanowaniu i przeprowadzeniu pomiarów, obejmującym w szczególności dobór liczby i lokalizacji stanowisk, towarzyszy zdefiniowanie rozdzielczości (stosownie do zadania pomiarowego) oraz sposób wzajemnego powiązania chmur punktów. Na tym etapie na prowadzone pomiary mają wpływ czynniki zewnętrzne np. zmienne warunki atmosferyczne.

Przeprowadzenie procesu rejestracji pomiarów czyli połączenia skanów z wielu stanowisk w jedną całość sprowadza się do wyznaczenia 6-parametrowej transformacji położenia i orientacji jednego stanowiska w stosunku do innego. W przypadku ogólnym do połączenia pary skanów konieczna jest znajomość położenia 3 wspólnych niewspółliniowych punktów. Liczbę punktów można ograniczyć, jeżeli skaner wyposażony jest w działający kompensator dwuosiowy. Proces ten może być przeprowadzony na wiele sposobów. Zasadniczo można wyróżnić trzy dominujące techniki:

- rejestrację bezpośrednią – która umożliwia wykonywanie pomiarów skanerowych w sposób analogiczny dla klasycznych pomiarów geodezyjnych. Skaner ustawiany jest nad punktem o znanych współrzędnych, a nawiązanie realizowane jest w oparciu o inne punkty o znanych współrzędnych, zatem sieć punktów pomiarowych musi istnieć przed pomiarem skanerowym lub zostać zamierzona bezpośrednio po nim. Technika ta dobrze sprawdza się dla obiektów liniowych. Georeferencja jest możliwa na podstawie geodezyjnego pomiaru stanowisk skanera (np. tachymetrem lub odbiornikiem GNSS),
- rejestrację pośrednią z wykorzystaniem tarcz pomiarowych. W skanowanych scenach pomiarowych umieszcza się specjalne tarcze (model matematyczny ich kształtu jest znany a priori lub definiowany w projekcie). Tarcze są skanowane z kilku stanowisk z wymaganą rozdzielczością, pozwalającą na określenie ich środka geometrycznego, i stanowią podstawę do połączenia chmur punktów. Georeferencja jest możliwa na podstawie geodezyjnego pomiaru położenia tarcz,
- rejestrację pośrednią z wykorzystaniem chmur punktów. W tym przypadku pomiary muszą być tak zaprojektowane, aby części wspólne na chmurach punktów, czyli ich wzajemne nachodzenie przekraczało 30%. Większość pakietów oprogramowania wykorzystuje zmodyfikowaną postać algorytmu ICP. Georeferencja jest możliwa, jeżeli wybrane, charakterystyczne punkty sceny zostaną pomierzone geodezyjnie.

Aby uzyskać dane w terenowym układzie współrzędnych, konieczne jest pomiar położenia i stanowisk metodami geodezyjnymi w pierwszym przypadku, pomiar położenia tarcz w drugim lub pomiar położenia punktów szczególnych rejestrowanych chmur punktów. Takie postępowania umożliwi porównanie położenia pomiędzy epokami pomiarowymi lub porównanie z innymi technikami pomiarowymi.

Biorąc pod uwagę wymagania dla poprawnej rejestracji, można sformułować katalog dobrych praktyk:

- wartości reszt rejestracji globalnej powinny być równe lub mniejsze od oczekiwanej dokładności geometrycznej pomiaru,
- w przypadku wykonywania rejestracji za pomocą tarcz niezbędne jest na każdym stanowisku pozyskanie informacji o co najmniej czterech tarczach – taka nadmiarowość układu równań minimalizuje prawdopodobieństwo wpływu niedokładnego pomiaru tarczy na wynik końcowy,
- w raporcie końcowym należy podawać wartości reszt z procesu wyrównania (rejestracji)

- oraz wielkości geometryczne wyestymowanych parametrów (np. błędów),
- tarcze pomiarowe nie powinny być zbyt duże oraz nie powinny zasłaniać obiektu pomiaru,
 - zasadniczo naturalne punkty pomiarowe jako punkty wiążące sprawują się gorzej niż dedykowane tarcze pomiarowe,
 - jeżeli tarcze zostały zeskanowane pod ostrymi kątami, to automatyczne rozpoznawanie tarczy może dawać słabsze wyniki.

Przetwarzanie danych skanerowych na różnym etapie wymaga różnej czasochłonności ze względu na różny stopień zautomatyzowania. Poszczególnych etapy pozyskania i opracowania danych skanerowych można scharakteryzować, w odniesieniu do stopnia automatyzacji w następujący sposób:

- pozyskiwanie danych – etap częściowo zautomatyzowany. Czynności techniczne takie jak orientacja, wybór rozdzielczości, definiowanie zakresu skanu, identyfikowanie tarcz w scenie są w zakresie obowiązków osoby wykonującej pomiar,
- rejestracja danych – etap który w najnowszych pakietach oprogramowania skanerowego mocno wspiera przetwarzanie automatyczne. Trend ten będzie się tylko pogłębiał ze względu na gwałtowny rozwój algorytmów.
- modelowanie – etap który jest z pewnością najbardziej czasochłonny. Etap ten można tylko częściowo automatyzować.
- Efektami końcowymi opracowania danych laserowych (produktami) mogą być:
 - zarejestrowana i oczyszczona chmura punktów,
 - dwuwymiarowe mapy, plany, rzuty elewacji uzyskane na podstawie chmury punktów,
 - pełne model 3D obiektów i terenu,
 - porównanie modeli lub chmur punktów pomiędzy epokami pomiarowymi z detekcją różnic (w szczególności deformacji i przemieszczeń),
 - animacje.

W zakresie realizacji inwestycji drogowych skaning laserowy może stanowić podstawowe narzędzie inwentaryzacji, w szczególności będące uzupełnieniem przeglądów okresowych dróg oraz drogowych obiektów inżynierskich. Pomiaru wykonywane na chmurze mogą stanowić podstawę do budowy wektorowych modeli obiektów drogowych. Dane pomiarowe umożliwiają pełen zakres obliczeń i analiz oraz porównanie wykonanego obiektu z projektem (analiza odstępstw oraz kolizji z innymi projektami). W zagadnieniach związanych z monitoringiem deformacji terenu skaning laserowy jest ograniczony do dokładności kilku centymetrów, ale przy badaniach obiektów inżynierskich możliwe jest osiągnięcie dokładności milimetrowej.

Zalety i ograniczenia skaningu laserowego realizowanego z poziomu różnych platform zestawiono w tabeli (Tabela 12).

Tabela 12 Zalety i ograniczenia skaningu laserowego

RODZAJ METODY	ZALETY	OGRANICZENIA
Lotniczy skaning laserowy (ALS)	bardzo duży obszar opracowania niezależność od oświetlenia możliwość przenikania wiązki laserowej przez pokrywę roślinną zastosowanie do opisu przebiegu topograficznej powierzchni terenu	wysoki koszt dokładność i rozdzielczość niższa niż TLS brak możliwości pomiaru w miejscach zasłoniętych
Mobilny skaning laserowy (MLS), w tym z poziomu UAV	duża szybkość pomiaru możliwość montażu na dedykowanych pojazdach poruszających się np. wzdłuż obiektów liniowych	wysoki koszt mniejszy zasięg niż ALS niższa rozdzielczość niż TLS

RODZAJ METODY	ZALETY	OGRANICZENIA
	dokładność i rozdzielczość wyższa niż ALS	
Naziemny skaning laserowy (TLS)	niski koszt w porównaniu z ALS i MLS wysoka szczegółowość danych wysoka dokładność – przy zastosowaniach specjalnych na poziomie milimetrycznym możliwość przenikania wiązki laserowej przez pokrywą roślinną przy użyciu specjalnych skanerów	utrudniony dostęp do wysoko położonych powierzchni (np. dachów) wyższy koszt od klasycznych technik geodezyjnych wysoka czasochłonność pomiaru duża objętość danych pomiarowych

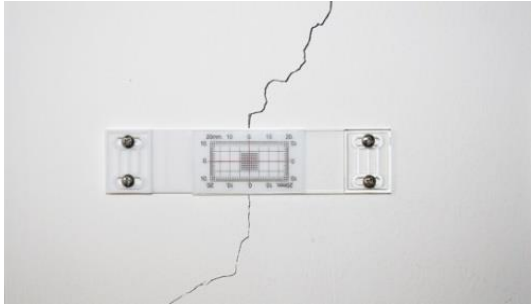
3.1.1.c Szczelinomierze i urządzenia pokrewne

Szczelinomierze to przyrządy pomiarowe wykorzystywane do monitorowania zmian wielkości szczelin pęknięć, dylatacji i spoin pojawiających się na budynkach, betonowych konstrukcjach mostowych, tunelach, zaporach wodnych, rurociągach oraz formacjach skalnych i gruntowych (Baran & Żak 2015, Woliński & Wójcik 2010). Znajdują więc szerokie zastosowanie zarówno w budownictwie powierzchniowym jak i budownictwie podziemnym. Podzielić je można na trzy grupy:

- wskaźniki do pomiaru rys, szczelin (Rysunek 22 A, B),
- szczelinomierze linkowe (Rysunek 22 C, D),
- szczelinomierze precyzyjne (Rysunek 22 E-G).

Doskonale sprawdzają się w systemach wczesnego ostrzegania oraz monitorowania stref poddanych wstrząsom. Wystąpienie szczelin lub pęknięć w gruncie lub masywie skalnym może być pierwszym objawem deformacji osuwiskowych. Uważna obserwacja i monitorowanie zmian parametrów szczelin może dostarczyć informacji o możliwości rozwoju ruchów masowych lub zjawisk, które zachodzą na osuwisku. Do istotnych parametrów, którymi możemy opisać szczeliny należy nie tylko ich rozwartość, ale również propagacja, przesunięcie pionowe, zjawisko ścinania i rotacji (ClimChAlp 2008).

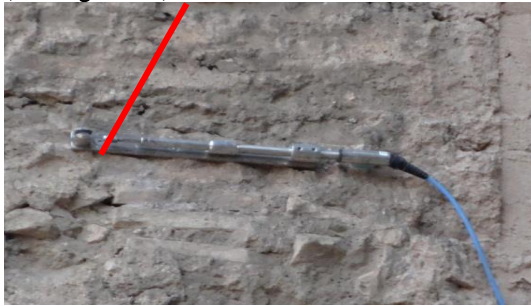
Pomiary z użyciem szczelinomierza polegają na zamontowaniu przetwornika przemieszczenia, w poprzek szczeliny (rysy). Składa się on najczęściej z czujnika oraz elementu ruchomego. Czujnik przemieszczenia umieszczony wewnątrz szczelinomierza umożliwia pomiar zmiany odległości pomiędzy przytwierdzonymi elementami krańcowymi. Odpowiednie ich rozlokowania pozwala na prowadzenie pomiarów przemieszczeń w jednej (1D), dwóch (2-D) lub trzech osiach (3D), (Woliński & Wójcik 2010).



A wskaźniki do pomiaru rys, szczelin
(fot. Sisgeo.com)



B wskaźniki do pomiaru rys, szczelin(fot. SHM System)



C szczelinomierz linkowy(fot. A.Borecka)



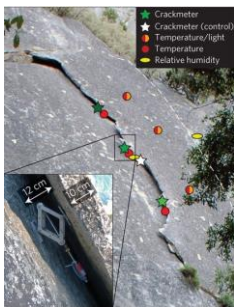
D szczelinomierzlinkowy
(fot. www.rstinstruments.com)



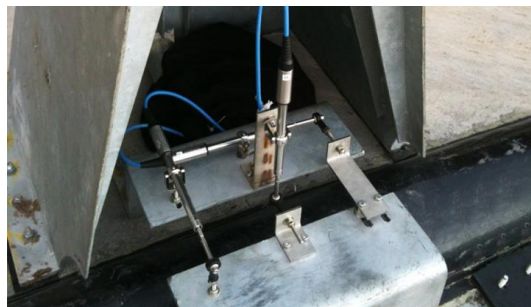
E szczelinomierz precyzyjny(fot. A.Borecka)



F szczelinomierz precyzyjny
(fot. www.spectotechnology.com)



G szczelinomierz precyzyjny
(Collins& Stock, 2016)



H szczelinomierze precyzyjne (pomiar 3D)
(fot.Sisgeo.com)

Rysunek 22 Przykłady szczelinomierzy i ich zastosowanie

W tabeli (Tabela 13) zebrano większość zalet i ograniczeń pracy szczelinomierzy.

Tabela 13 Główne zalet i ograniczenia szczelinomierzy i instrumentów pokrewnych (część na podstawie sisgeo.com)

RODZAJ INSTRUMENTU	ZALETY	OGRANICZENIA
wskaźniki rozwarcia rys, szczelin	niskie koszty oprzyrządowania prosty montaż pomiar w dwóch prostopadłych kierunkach pełna odporność na warunki atmosferyczne	w większości przypadków ograniczony zakres pomiarowy w większości przypadków konieczność przygotowania podłoża pod montaż pomiar wyłącznie manualny głównie przeznaczone do pomiaru szczelin, dylatacji powstających na ścianach budynków
szczelinomierz linkowy	nieograniczony zakres pomiarowy możliwość instalacji na obiektach inżynierskich i masywach skalnych niższa dokładność niż w przypadku szczelinomierza precyzyjnego pomiar automatyczny z możliwością przesyłu danych zastosowanie na osuwiskach i zboczach, do pomiarów dużych przemieszczeń	na odczyty może mieć wpływ termiczne rozszerzanie lub kurczenie się linki pomiar wyłącznie w kierunku przemieszczenia
szczelinomierz precyzyjny	pozwalają na uzyskanie wyników o pomijalnym wpływie oporu kabla przesyłowego wysoka dokładność pomiarów monitoring w jednej 1-D, dwóch 2-D lub trzech 3-D osiach brak problemów z zamazaniem bardzo dobra długoterminowa niezawodność. wysoka dokładność i czytelność możliwość instalacji na obiektach inżynierskich i masywach skalnych pomiar automatyczny z możliwością przesyłu danych	wpływ temperatury - wahania temperatury (w tym dobowe i sezonowe), wpływ wilgotności na podłączenie elektryczne (czujnik rezystancyjny) wibracje samego ośrodka w którym wykonywany jest pomiar (czujniki strunowe) czujniki strunowe wymagają ochrony przeciwprzebieciowej możliwość automatycznej rejestracji wyników wymaga instalacji urządzeń rejestrujących oraz dedykowanego oprogramowania.

3.1.1.d Pochyłomierze i urządzenia pokrewne

Pochyłomierz to przyrząd, którego działanie opiera się na zasadzie prawa grawitacji, służący do pomiaru kąta nachylenia terenu, obiektu inżynierskiego, elementu konstrukcyjnego względem poziomu lub poziomu odniesienia. Z reguły są one instalowane na stałe w celu zapewnienia długoterminowego, automatycznego monitorowania stabilności konstrukcji inżynierskich i na zboczach skalnych (Woliński & Wójcik 2010). Są one również stosunkowo często stosowane w tunelach, szybach, na zagrożonych ruchami obszarach górniczych, w budownictwie hydrotechnicznym czy przy monitoringu budynków sąsiadującymi z głębokimi wykopami.

Złożoność budowy pochyłomierzy może wahać się od stosunkowo prostych instrumentów opartych na położeniu pęcherzyka powietrza, do bardziej precyzyjnych urządzeń (w wersjach jedno- lub dwuosioowych) wyposażonych w systemy automatycznego pomiaru ze zdalnym przesyłem danych.

Podzielić je można na trzy grupy:

- pochyłomierze przenośne (Rysunek 23 A, B),
- pochyłomierze precyzyjne (Rysunek 23 C-H), z możliwością budowy całych układów pomiarowych (Rysunek 23 E-H)
- wahadła proste i odwrócone (Rysunek 23 I).

W przypadku wersji przenośnej zestaw pomiarowy składa się z przenośnego pochyłomierza umieszczonego każdorazowo na specjalnych płytkach odniesienia (Rysunek 23 A, B), które są na

stałe przymocowywane do konstrukcji przeznaczonej do monitorowania. Pomiary mogą być wykonane na powierzchniach poziomych lub pionowych. Odczyty na osiach A i B są wykonywane w parach poprzez obrót pochyłomierza o 180° względem siebie, w celu wyeliminowania błędów pomiarowych, a oba pomiary są uśredniane.

Pochyłomierze precyzyjne zostały zaprojektowane do pomiaru zmian pochylenia w jednej lub dwóch osiach prostopadłych do płytki montażowej. Pochyłomierze montowane są na stałe na przykład na konstrukcji stalowej, osadzone w betonie, na powierzchni ścian budynków lub skałe w pozycji pionowej lub poziomej. Płaszczyzny odniesienia można orientować w różnych kierunkach. Podczas testowania pochyłomierza ustala się, w jakiej płaszczyźnie odniesienia będzie on instalowany i w którym kierunku, względem tej płaszczyzny odniesienia przyrosty wskazań pochyłomierza mają być dodatnie. Pomiary mogą być wykonywane ręcznie (czytnik danych) lub automatycznie. Ten typ pochyłomierza może być również montowany na belkach o niskim profilu, aby monitorować ruch względny między punktami zaczepienia na obu końcach belki (Rysunek 23 E, F). Układ połączonych ze sobą belek, może być używany do monitorowania zróżnicowania osiadań, deformacji czy konwergencji.

Wahadła proste i odwrócone są prostym, niezawodnym i precyzyjnym systemem stosowanym do monitorowania wewnętrznych poprzecznych deformacji betonowych zapór, fundamentów tamy i przyczółków, wież, wysokich budynków przemysłowych i pomostów (www.rstinstruments.com, www.geosense.co.uk, www.sisgeo.com). Zastosowanie wahadeł odwróconych zakotwionych w fundamencie wraz z wahadłami prostymi umożliwia śledzenie profilu pionowego.

Wahadło proste składa się z drutu ze stali nierdzewnej przymocowanego do stałego punktu na szczycie monitorowanej konstrukcji, do generowania napięcia drutu wykorzystywany jest ciężarek (przyciąganie grawitacyjne). Ciężarek zanurzony jest w zbiorniku wypełnionym płynem tłumiący (redukuje oddziaływań podmuchów wiatru i powietrza na drut). Odwrócone wahadło zawiera również naprężony drut ze stali nierdzewnej, ale zakotwiczony w fundamencie konstrukcji z pływakiem przymocowanym na jego górnym końcu. Pływak, który swobodnie porusza się w zbiorniku, napina drut i utrzymuje go w pionie. Wahadło odwrócone po zakotwieniu w stabilnym punkcie fundamentu mierzy bezwzględne odkształcenie konstrukcji i może być używane, jako odniesienie dla geodezyjnych pomiarów powierzchniowych (www.rstinstruments.com). Odczyty mogą być wykonywane w sposób ręczny lub automatycznie mierzone i zapisywane.



A pochyłomierz przenośny
(fot. Sisgeo.com)



B pochyłomierz przenośny
(fot.Sisgeo.com)



C pochyłomierz precyzyjny
(fot. Geokon.com)



D pochyłomierz precyzyjny w otoczeniu geodezyjnych punktów pomiarowych (fot. A. Borecka)

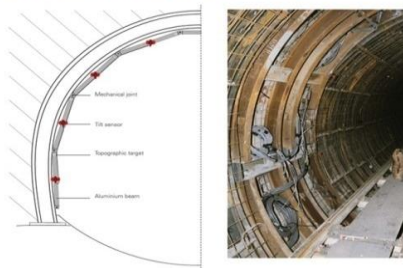


E pochyłomierz precyzyjny zamontowany na belce
(fot. A. Borecka)



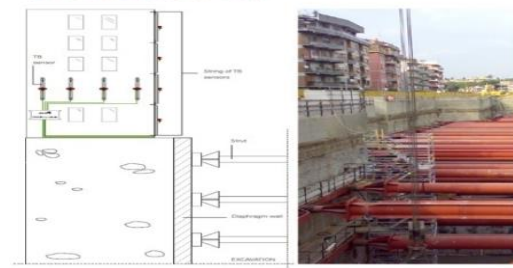
F pochyłomierze precyzyjne zamontowane na belkach
(fot. A. Borecka)

APPLICATION FOR TUNNEL CONVERGENCE MONITORING



G wykorzystanie pochyłomierzy precyzyjnych przy pomiarach konwergencji (fot.Sisgeo.com)

STRUCTURAL TILT/CANT MONITORING
EXAMPLE WITH ANALOGUE TILT METERS



H wykorzystanie pochyłomierzy precyzyjnych w monitoringu pracy głębokiego wykopu (fot.Sisgeo.com)



I wahadło proste (fot. A. Borecka)

Rysunek 23 Przykłady pochyłomierzy i ich zastosowanie

W tabeli (Tabela 14) zebrano większość zalet i ograniczeń wynikających ze stosowania pochyłomierzy i urządzeń pokrewnych.

Tabela 14 Główne zalety i ograniczenia pochyłomierzy i urządzeń pokrewnych

RODZAJ POCHYŁOMIERZA	ZALETY	OGRANICZENIA
przenośny	dokładność i powtarzalność pomiar jednoosiowy lub dwuosiowy montaż płytek odniesienia poziomo lub pionowo łatwa instalacja	brak zdalnego odczytu dokładność odczytu uzależniona od doświadczenia operatora (tzn. od umiejscowienia pochyłomierza względem płytki odniesienia czy dopasowania pochyłomierza do płytki odniesienia) konieczność instalacji płytek referencyjnych (odniesienia) do sztywnej konstrukcji lub stabilnego fragmentu masywu skalnego nieznacznym wpływ czynników termicznych
precyzyjny	dokładność i powtarzalność czujniki jednoosiowe lub dwuosiowe montaż poziomy lub pionowy łatwa instalacja nieznacznym wpływ czynników termicznych możliwość montowania na belkach- sumowanie przechyłów na różnych płaszczyznach pomiar wychylenia w jednej lub dwóch płaszczyznach	możliwość uszkodzenia elektroniki w związku z wyładowaniami atmosferycznymi (czujniki strunowe) - w tym zakresie skutecznym rozwiązaniem jest stosowanie instalacji przeciwprzepięciowej, pomiar będą traktowane wyłącznie jako pomiar punktowy jeśli obserwujemy nierównomierne odkształcenia konstrukcji
wahadła	wysoka dokładność i powtarzalność dostępne ręczne lub automatyczne odczyty prosty w użyciu długoterminowa niezawodność pomiar deformacji w kierunkach x, y i z (warunkowe)	drżenie, silne wiatry, bardzo niska temperatura (zamarzanie płynu) na odczyty może mieć wpływ termiczne rozszerzanie lub kurczenie się drutu

3.1.2. Pomiary przemieszczeń wgłębnych

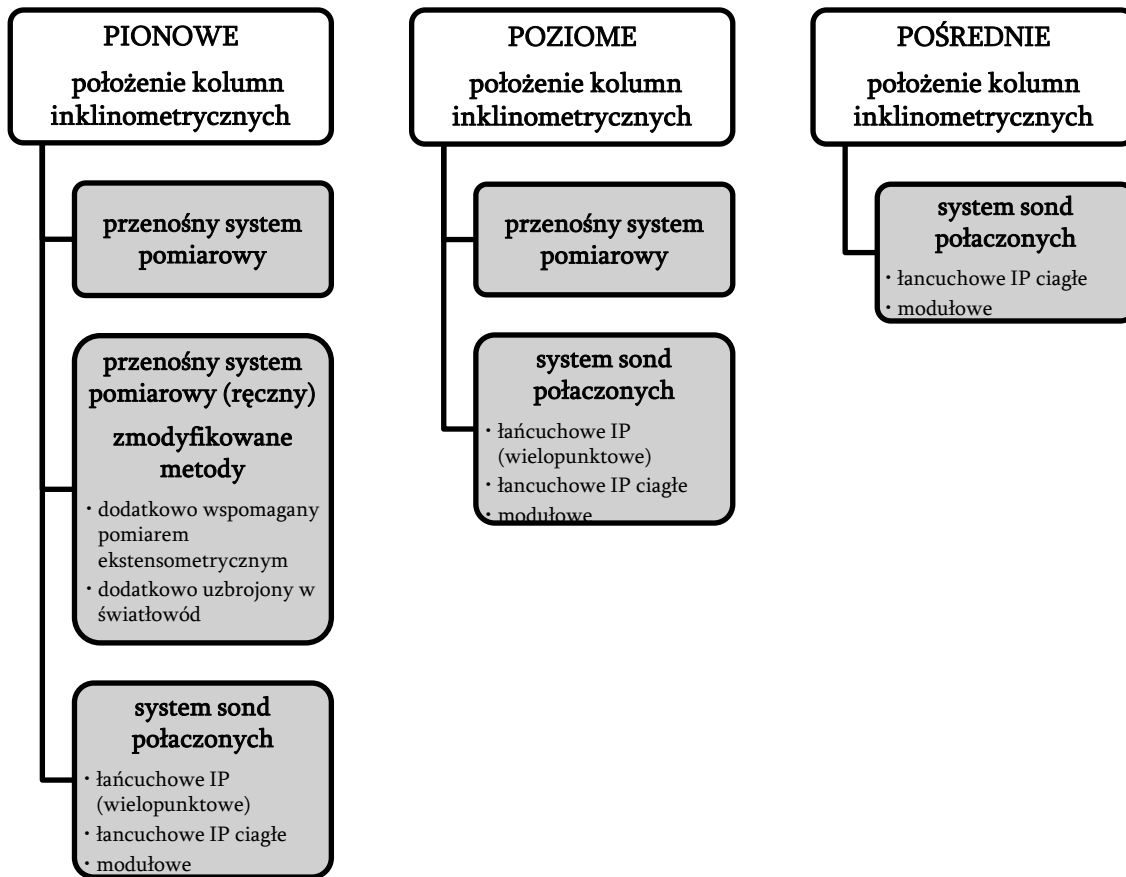
3.1.2.a Inklinometry

Inklinometr to przyrząd, służący do określania kąta wychylenia od przyjętego pomiaru zerowego. Jest to podstawowy instrument wykorzystywany do pomiaru wgłębnych deformacji podłoża, oceny dynamiki i wielkości przemieszczeń oraz głębokości występowania powierzchni czy stref nieciągłości. Pomiar inklinometryczny stanowią główne narzędzie do monitoringu obiektów budowlanych (tj. tunele, zapory, ścianki szczelinowe, budynki w sąsiedztwie głębokich wykopów), rejestracji deformacji wgłębnych na terenach osuwiskowych czy w podłożu nasypów drogowych, są praktycznym narzędziem do wczesnego ostrzegania przed mogącymi wystąpić zagrożeniami.

Pomiarów inklinometrycznych dokonujemy przy użyciu tzn. zestawu inklinometrycznego składającego się z wbudowanej w podłoże kolumny inklinometrycznej (najczęściej z tworzywa ABS), oraz z elementu pomiarowego tj. sondy pomiarowej lub sond pomiarowych połączonych ze sobą.

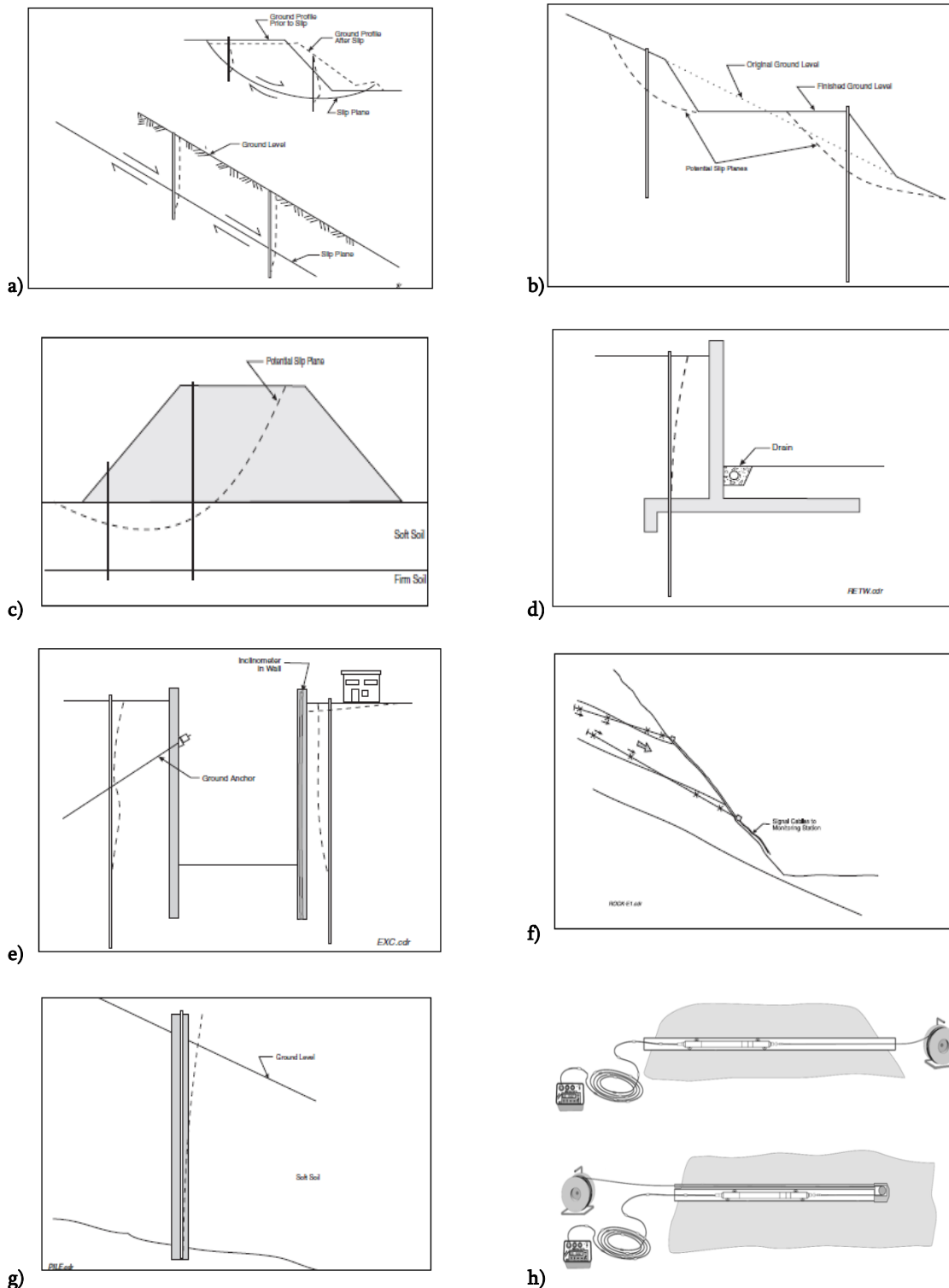
Analiza międzynarodowych rozwiązań, doświadczeń, normy (PN-EN ISO 18674-3:2018-02E) pozwoliła na stworzenie bardziej przejrzystego schematycznego podziału pomiarów inklinometrycznych według aktualnego stanu wiedzy (Rysunek 24).

SYSTEMY INKLINOMETRYCZNE



Rysunek 24 Schematyczny podział pomiarów inklinometrycznych

Przykłady zastosowań przedstawiono na rysunku (Rysunek 25).



a, b, c - monitorowanie stateczności skarp, zboczy, nasypów; d –ocena przemieszczeń podłoża za murem oporowym, określenie rotacji; e –monitorowanie zmian nachylenia i ugięcia ścianek szczelnych i szczelinowych; f - monitorowanie wielkości i tempa przemieszczeń w obrębie masywów skalnych, g –monitorowanie stateczności pali; h – monitorowanie wielkości i tempa osiadań czy pęcznienia

Rysunek 25 Zastosowanie pomiarów inklinometrycznych w geotechnice - (SLOPE INDICATOR, 2004a)

Pomiarów inklinometrycznych dokonujemy z wykorzystaniem sond pomiarowych. Wyróżnić można trzy podstawowe rodzaje sond pomiarowych:

- przenośną sondę inklinometryczną (Rysunek 26),



Rysunek 26 Przenośna sonda inklinometryczna (fot. A. Borecka)

- systemy sond łańcuchowych zainstalowane na stałe w kolumnie inklinometrycznej, połączonych ze sobą bezpośrednio tworząc pełen profil pomiarowy – głównie w przypadku płytkich otworów lub składający się z jednej lub więcej dedykowanych sond połączonych linkami o zmiennej długości lub przegubowo i podłączonych do rejestratora danych - IPI (In-Place Inclinometer – sondy wielopunktowe) (Rysunek 27). W przypadku inklinometrów wielopunktowych sondy są umieszczone w strefach, prawdopodobnego wystąpienia nieciągłości (w początkowej fazie przenośne sondy inklinometryczne są często stosowane do wykrywania takich stref).



Rysunek 27 Przykład systemu IPI i jego wykorzystania do pomiarów w otworach pionowych (b) (fot, Sisgeo.com)

- modułowy system pomiarowy posiadający sztywne segmenty połączone elastycznymi przegubami, jego przykładem może być system SAA (ShapeAccelArray) (Rysunek 28). Trójosiowe czujniki grawitacyjne mierzą nachylenie w każdym segmencie, zachowuje dokładność i rozdzielczość pomiarową, charakterystyczną dla pomiarów przenośną sondą inklinometryczną, umożliwia pełną automatyzację pomiarów (Krywult i in. 2016), charakteryzuje się niższym kosztem, wyższą żywotnością, szybszym montażem i instalacją niż IPI. Może być instalowana w pionie – śledzenie wielkości i kierunku deformacji poziomych, lub poziomie – monitoring deformacji pionowych (osiadanie). Może być również instalowany wzdłuż osi podłużnej i/lub po obwodni tuneli umożliwiając pomiar konwergencji w przypadku IPI to zadanie jest utrudnione.



Rysunek 28 Sonda pomiarowych SAA firmy Measurand (fot. Budokop Sp Z o.o.)

Pomiary inklinometryczne mogą być wykonywane systemem:

- manualnym (ręcznym) przy użyciu przenośnej sondy inklinometrycznej, w określonych interwałach czasowych,
- manualno-automatycznym (częściowo zautomatyzowany),
- w pełni zautomatyzowanym.

Cykliczność pomiarów z wykorzystaniem przenośnej sondy pomiarowej (ręcznej) w większości wypadków nie daje wyników powiązanych w czasie ze zjawiskami zachodzącymi w podłożu. Dlatego coraz częściej łączy się ze sobą różne urządzenia pomiarowe aby przynajmniej częściowo wyeliminować ten problem. Takim przykładem może być połączenie kolumny inklinometrycznej z przytwierdzonym do niej ekstensometrem czy kablem światłowodowym (Krywult i in. 2016). Oba urządzenia pełnią tu rolę sygnalizatora, który przesyła informacje i ostrzega o potencjalnych ruchach i przymusza do przeprowadzenia wcześniejszych pomiarów inklinometrycznych lub przy ich braku pozwala pominąć niektóre pomiary. Takie podejście pozwala na prowadzenie monitoringu w sposób przemyślany z możliwością wyboru czasu prowadzenia pomiarów.

Inklinometry łańcuchowe oraz modułowe mogą być wykorzystywane jako elementy systemu wczesnego ostrzegania.

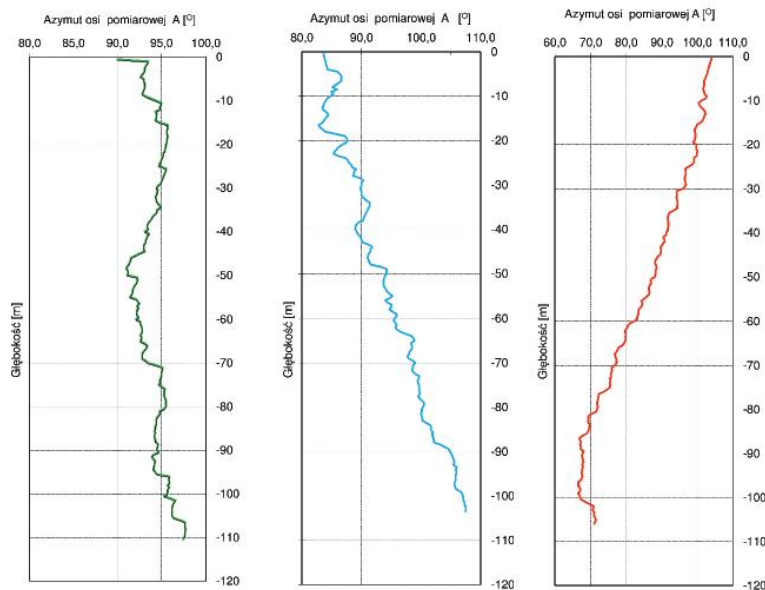
Doświadczenia wskazują, że pomiary inklinometryczne (głównie klasyczne i łańcuchowe) mogą być obciążone błędami – są to głównie błędy przypadkowe i/lub systematyczne (Green, Mikkelsen 1988, Mikkelsen 2003, Cornforth 2005). Błędy systematyczne są sumowane przy każdym pomiarze interwału i dlatego są zwykle większe niż błędy losowe. Błędy systematyczne możemy korygować stosując odpowiednie procedur matematycznych. Błędy losowe niestety nie. Mogą one wynikać np. z braku precyzji sondy czy wpływu czynników środowiskowych (Dunncliff 1993).

Mikkelsen E.P. (2003) a za nim norma PN-EN ISO 18674-3:2018-02E podaje cztery główne typy możliwych do wystąpienia błędów systematycznych:

- błąd pozycjonowania - błąd ustalenia głębokości, nachylenia i krzywizny kolumny inklinometrycznej (zły poziom odniesienia),
- nieuwzględnienie kąta skręcenie kolumny inklinometrycznej (kolumna pomiarowa ulega skręceniu podczas instalacji, przy czym kąt skręcenia rośnie wraz z jej długością, (Krywult i in. 2016), (Rysunek 29),
- przemieszczenie sensora pomiarowego wewnątrz sondy (błąd kalibracji, łatwy do wyeliminowania),
- spadek dokładności pomiaru (zmiana wzmocnienia sygnału).

Mikkelsen (2003) sugeruje, że błędy systematyczne mogą wynosić nawet 0,11 mm na interwał pomiarowy. W przypadku bardzo małych deformacji wymagana jest więc staranna analiza danych w celu zmniejszenia tego błędu (Willenberg i in., 2003). Odchylenie standardowe błędu losowego w pionowych inklinometrach może wahać się od 0,1 mm do 0,16 mm / na interwał pomiarowy

(ClimChAlp 2008, Mikkelsen 2003).



Rysunek 29 Przykładowe wyniki pomiaru kąta skręcenia głębokich kolumn inklinometrycznych: zmierzony kąt skręcenia około 10° (zielony), kąt skręcenia około 20° (niebieski), kąt skręcenia około 40° (czerwony) (Krywult i in. 2016)

Części z tych błędów możemy uniknąć stosując sondy modułowe (np. typu SAA) lub łańcuchowe. Błędy mogą również wynikać z (Wolski 2006):

- niedokładności odwzorowania przemieszczeń ośrodka przez kolumnę inklinometryczną – zły dobór mieszanki, o odpowiedniej sztywności uzależnionej od rodzaju i właściwości ośrodka budującego podłoże,
- stanu kolumny inklinometrycznej, w której po dłuższym okresie eksploatacji mogą pojawić się nierówności, zabrudzenia, itp.
- niedokładności połączeń kolejnych rur inklinometrycznych,
- zużycia układu mechanicznego sondy pomiarowej
- czy sposobu i jakości wykonania otworu wiertniczego.

Poniżej zebrano większość zalet i ograniczeń pomiarów inklinometrycznych (Tabela 15).

Tabela 15 Zalety i ograniczenia w pomiarach inklinometrycznych (Slope Indicator 2004a, sisgeo.com, geokon.com, geosense.co.uk, rstinstrument.com)

RODZAJ INKLINOMETRU	ZALETY	OGRANICZENIA
przenośny	dokładność i powtarzalność w przypadku pomiaru przemieszczeń poziomych – pomiary dwuosiowe, w przypadku przemieszczeń pionowych – pomiary wyłącznie jednoosiowe. łatwa instalacja, niedrogi system określenie z dużą dokładnością wielkości przemieszczeń oraz ich kierunku, możliwość wykonywania pomiarów w wielu kolumnach inklinometrycznych	brak zdalnego odczytu czas odczytu 15 minut na 10m odczyty są nieporęczne i długotrwałe konieczność powtarzania pomiaru w dwóch kierunkach dokładność odczytu uzależniona od doświadczenia operatora (niedokładne jednakowo umieszczanie w tym samym interwale sondy pomiarowej pomiar przenośną sondą inklinometryczną nie obejdują się bez wykwalifikowanego personelu dokładność pomiaru - konieczność używania tej samej sondy pomiarowej lub konieczność stosowanie badań porównawczych pomiędzy urządzeniami dostarczanie najczęściej wyników niepowiązane w czasie ze zjawiskami zachodzącymi w podłożu,

RODZAJ INKLINOMETRU	ZALETY	OGRANICZENIA
		<p>pomiar nie poręczny przy pomiarach osiadań wydłużony czas odczytów przy większej ilości kolumn inklinometrycznych</p> <p>nie przeznaczone do dużych odkształceń na małych długościach</p> <p>warunkowa możliwość identyfikacji wielu stref ścinania (nieciągłości), do momentu zniszczenia rur inklinometrycznych lub do momentu kiedy krzywizna wygięcia rur nie stanie się na tyle niekorzystna, że zapuszczenie czy przeciągnięcie sondy będzie nie możliwe</p>
łańcuchowy	<p>dokładność i powtarzalność</p> <p>w przypadku pomiaru przemieszczeń poziomych – pomiary dwuosiowe, w przypadku przemieszczeń pionowych – pomiary wyłącznie jednoosiowe.</p> <p>nieznaczny wpływ czynników termicznych</p> <p>niskie koszty bieżące</p> <p>ponieważ sondy pomiarowe są zamontowane na stałe występuje mniejsze źródło błędów w ustawieniu czujników w kolejnych pomiarach dane mogą być pozyskiwane w określonych przedziałach czasowych za pomocą zautomatyzowanych systemów, dane mogą być lokalnie przechowywane lub przesyłane w czasie zbliżonym do rzeczywistego</p> <p>możliwość pomiaru większych deformacji niż pozwala na to konstrukcja tradycyjnych inklinometrów</p> <p>możliwość identyfikacji wielu stref ścinania (nieciągłości),</p> <p>określenie z dużą dokładnością wielkości, prędkości przemieszczeń oraz ich kierunku,</p> <p>możliwość wykorzystania jako system wczesnego ostrzegania</p> <p>możliwość instalacji sond w konfiguracji ciągłej lub na wybranych odcinkach głębokościowych w celu ograniczenia kosztów</p> <p>możliwość instalowane na wybranych głębokościach</p>	<p>możliwość uszkodzenia elektroniki w związku z wyładowaniami atmosferycznymi - w tym zakresie skutecznym rozwiązaniem jest stosowanie instalacji przeciwprzebiegowej,</p> <p>koszty zakupu i montażu są znaczące,</p> <p>konieczność pozostawienia instalacji w gruncie wiąże się to z poniesieniem odpowiednich nakładów na zabezpieczenie instalacji przed działaniem osób trzecich,</p> <p>pomiary zostaną przerwane w przypadku ścięcia obudowy (kolumn) – utrata sond pomiarowych</p> <p>brak ciągłości pomiarowej jeśli sondy nie są połączone na sztywno</p> <p>sztywność połączeń w systemach ciągłych -</p> <p>możliwość wymuszania przemieszczeń (skręcania) kolejnych odcinków</p> <p>w przypadku strefowych pomiarów, prawidłowe pozycjonowanie jest krytyczne – możliwość pominięcia potencjalnych stref ścięcia</p>
modułowy	<p>dokładność i powtarzalność</p> <p>prosty w użyciu</p> <p>długoterminowa niezawodność</p> <p>pomiary deformacji w kierunkach x, y i z (warunkowe)</p> <p>w przypadku pomiaru przemieszczeń poziomych i pionowych (osiadania) – pomiary dwuosiowe,</p> <p>możliwość wykorzystania do pomiarów konwergencji</p> <p>pełny profil pomiarowy</p> <p>giętka, smukła konstrukcja, elastyczność połączeń</p> <p>pojedynczy kabel</p> <p>łatwość montażu</p> <p>niskie koszty bieżące</p> <p>niewielki rozmiar sond pomiarowych (min 20cm) – większa dokładność niż we wcześniej opisanych konstrukcjach</p> <p>ponieważ sondy pomiarowe są zamontowane na stałe występuje mniejsze źródło błędów pomiarowego</p>	<p>możliwość uszkodzenia elektroniki w związku z wyładowaniami atmosferycznymi - w tym zakresie skutecznym rozwiązaniem jest stosowanie instalacji przeciwprzebiegowej,</p> <p>koszty zakupu i montażu są znaczące,</p> <p>konieczność pozostawienia instalacji w gruncie wiąże się to z poniesieniem odpowiednich nakładów na zabezpieczenie instalacji przed działaniem osób trzecich,</p> <p>pomiary zostaną przerwane w przypadku ścięcia obudowy (kolumn) – utrata sond pomiarowych.</p>

RODZAJ INKLINOMETRU	ZALETY	OGRANICZENIA
	<p>efekt skręcania wyeliminowany dane mogą być pozyskiwane w określonych przedziałach czasowych za pomocą zautomatyzowanych systemów, dane mogą być lokalnie przechowywane lub przesyłane w czasie zbliżonym do rzeczywistego możliwość pomiaru większych deformacji niż pozwala na to konstrukcja tradycyjnych i łańcuchowych inklinometrów (min 20cm odcinki) możliwość identyfikacji wielu stref ścinania (nieciągłości), określenie z dużą dokładnością wielkości, prędkości przemieszczeń oraz ich kierunku, możliwość wykorzystania jako system wczesnego ostrzegania automatyczna rejestracja danych (często programy dedykowane już z poprawkami) przeznaczone do dużych odkształceń na małych długościach charakteryzują się znacznie lepszą powtarzalnością i mniejszym rozproszeniem danych w porównaniu z innymi bardziej tradycyjnymi systemami.</p>	

3.1.2.b Pomiary reflektometryczne TDR (MTDR)

Wykorzystanie pomiarów reflektometrycznych TDR (Time Domain Reflectometry) jest nadal stosunkowo nowym podejściem do monitorowania ruchu górotworu (Beck i Kane, 1996; Kane i Beck, 1994, 1996a, 1996b; Mikkelsen, 1996; O'Connor i Dowding, 1999). Pierwotnie wykorzystano ją do lokalizacji przerw i usterek przewodów komunikacyjnych i linii energetycznych.

TDR jest techniką pomiarów elektrycznych stosowaną w celu określenia stopnia i lokalizacji przestrzennego odkształcenia na kablu. W swoim założeniu jest ona podobna do radaru wzdłuż kabla.

Uniwersalność pomiarów pozwoliła na wykorzystywanie tej techniki do monitorowania różnych obszarów, obiektów, oraz zmian wielkości geotechnicznych:

- monitoringu stanu technicznego obiektów budowlanych (tunele, zapory, ścianki szczelne, szczelinowe, budynki w sąsiedztwie głębokich wykopów, itp.),
- monitorowania osiadań spowodowanych zawaleniem się pustek pod np. nasypami drogowymi na obszarach występowania szkód górniczych
- monitoringu obszarów zagrożonych procesami geodynamicznymi,
- monitoringu terenów górniczych,
- prowadzenia prac budowlanych bezpiecznie,
- lokalizacji stref nieciągłości,
- pomiarów poziomu zwierciadła wody,
- pomiarów wilgotności, podciągania kapilarnego gruntów, obiektów budowlanych

jest praktycznym narzędziem do wczesnego ostrzegania przed mogącymi wystąpić zagrożeniami.

Metoda reflektometryczna TDR jest rekomendowana jako dodatkowa metoda pomiarowa w monitoringu osuwisk zalecana przez Instrukcje ... (Grabowski i in., 2008), stosowana w zależności od specyfiki badanego obiektu i stopnia wywołanego zagrożenia.

Jest ona również wykorzystywana do oceny wilgotności objętościowej gruntu w oparciu o pomiar

jego względnej przenikalności elektrycznej i pozwala na przeprowadzenie szybkich, dokładnych, nieinwazyjnych (nie niszczących badanego obiektu) oraz w pełni automatycznych pomiarów zawartości wody w gruncie (Leciejewski 2009).

W technologii tej używamy dwóch narzędzi: kabla koncentrycznego i najczęściej przenośnego reflektometru (testera okablowania) (Rysunek 30).



Rysunek 30 Przykład okablowania i przenośnego reflektometru (www.rstinstruments.com)

Reflektometr to elektroniczny przyrząd pomiarowy służący głównie do pomiarów długości i tłumienności² przewodów miedzianych, a także włókien światłowodowych.

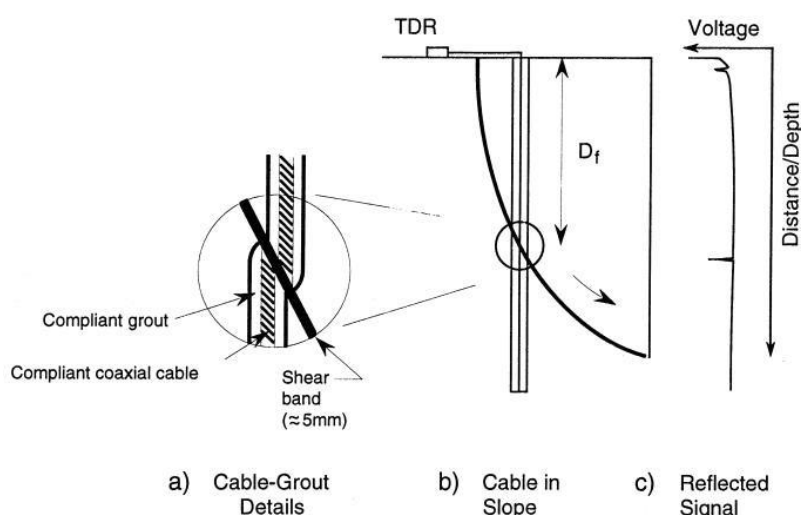
Reflektometry można podzielić na:

- reflektometry do torów przewodów miedzianych, zwane TDR (lub MTDR) (*od ang. metallic time-domain reflectometer*)
- reflektometry optyczne (do torów światłowodowych), zwane OTDR (*od ang. optical time-domain reflectometer*).

Instalacji kabli koncentrycznych może odbywać się pionowo, poziomo, ukośnie w zależności od potrzeb.

Działanie reflektometru polega na porównaniu parametrów impulsu pomiarowego wysyłanego w kierunku przewodu badanego z impulsem powrotnym odbitym od końca przewodu czy miejsca jego odkształcenia lub też na przykład w punktach łączenia poszczególnych odcinków. Odbicie od „przeszkody” zapisywane jest w postaci piku. Na podstawie pomiaru czasu potrzebnego na powrót sygnału i charakteru jego zniekształceń można dość precyzyjnie ocenić długość przewodu, jego budowę (stopień jego niejednorodności), tłumienność ale co najważniejsze charakter uszkodzenia (to znaczy czy jest to przerwa, zwarcie, czy zmiana tłumienności spowodowana przykładowo dostaniem się do przewodu wody) i odległość do zakłóceń (Rysunek 31).

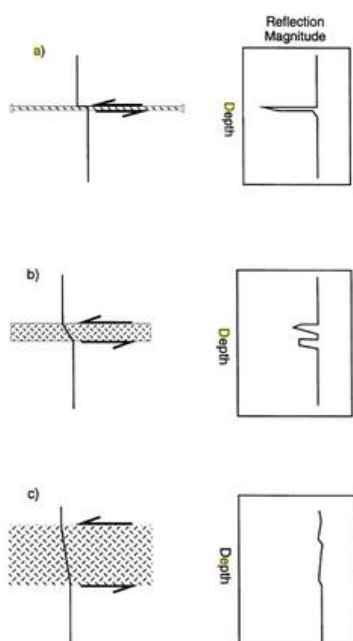
² Tłumienność – jeden z podstawowych parametrów opisujących zdolność danego łącza do realizacji transmisji (kabel, światłowód, łącze bezprzewodowe) (pl.wikipedia.org)



Rysunek 31 Przykłady mechanizmu zniszczenia a sygnału odbicia (Dowding C.H. i in., 2003)

Główne przeznaczenie to monitorowanie obszarów zagrożonych ruchami masowymi. Łatwość wdrożenia technologii TDR przy ocenie ruchów masowych zmienia się wraz z materiałem podłoża.

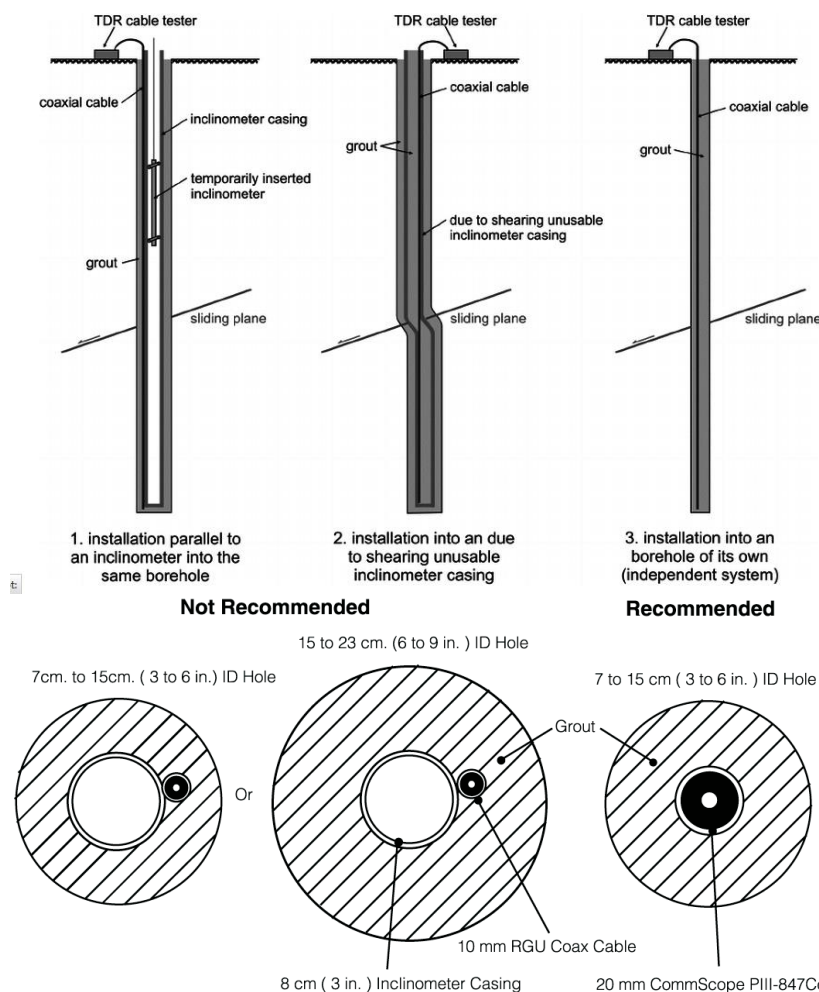
Technologia ta została po raz pierwszy zastosowana w geotechnice do monitorowania deformacji górotworu na obszarach górniczym (Dowding i Huang, 1994). Duża sztywność skał i wysoki wskaźnik lokalizacji odkształceń wzdłuż pęknięć i szczelin skalnych przy zastosowaniu jednak sztywnego przewodu (montowanego w otworze a następnie zainiekowanego - najczęściej zaprawą cementowo-bentonitową), pozwala bardzo precyzyjnie określić miejsce zniszczenia. Nieco trudniej tą metodę zastosować przy monitorowaniu podłoża gruntowego a zwłaszcza gruntów o niskiej „sztywności”. Plastyczne grunty, stosunkowo małe odkształcenia i strefowość zniszczenia zwłaszcza we wczesnym stadium odkształcenia, znacznie komplikuje lokalizacji strefy nieciągłości i interpretację uzyskanych wyników (Rysunek 32).



Rysunek 32 Rozmycia strefy ścięcia . Przykłady sygnałów odbitych w zależności od strefy zniszczenia (O’Conner K.M. i Dowding C.H., 1999)

Aby ten efekt zminimalizować i aby w gruntach uchwycić strefy ścinania stosuje się odpowiednio skomponowane zaprawy aby istniała możliwość wytworzenia tak dużych miejscowych naprężeń, które umożliwią lokalne odkształcenia kabla. Deformacje są przenoszone więc na kabel za pomocą zaprawy. Zaczyn, który jest zbyt silny, uniemożliwi uchwycenie miejsca deformacji, podczas gdy zaczynu, który jest zbyt słaby, nie będzie podlegał zniszczeniu i nie będzie uszkadzał kabla. Optymalne materiały i montaż koncentrycznych kabli do pomiarów reflektometrycznych TDR, opiera się niestety na doświadczeniu i na metodzie najlepszych praktyk.

Doświadczenia (Thuro i in. 2007, Kane 2000, Dowding i in., 2003) pokazują, że kable TDR powinny być instalowane w oddzielnych otworach, aby zastosowana technologia była skuteczna. Niestety, w wielu wypadkach doczepiane są one na zewnątrz kolumn inklinometrycznych, aby uniknąć dodatkowych kosztów wynikających z konieczności wiercenia dodatkowego otworu. Usztywnienia wynikające z obecności jednocześnie zaczynu i obudowy inklinometru zmniejszają możliwość skręcania, czy uszkodzania kabla koncentrycznego (Rysunek 34). Instalacja kabli do obudowy kolumn inklinometrycznych powinna być stosowana jedynie w celach badawczych w celu porównania pomiarów inklinometrycznych (metoda bezpośredniego pomiaru) z odczytami TDR (metoda pośrednia pomiarowego) (Rysunek 33). Jeśli natomiast kolumna inklinometryczna uległa odkształceniu na tyle że pomiary sondą inklinometryczną są już niemożliwe do wykonania, w celu wydłużenia „żywności” danego inklinometru, wówczas montuje się kable koncentryczne wewnątrz zniszczonych kolumn inklinometrycznych i dalsze pomiary deformacji realizowane są w technologii TDR po wcześniejszym zainiekowaniu kolumny (Rysunek 34).

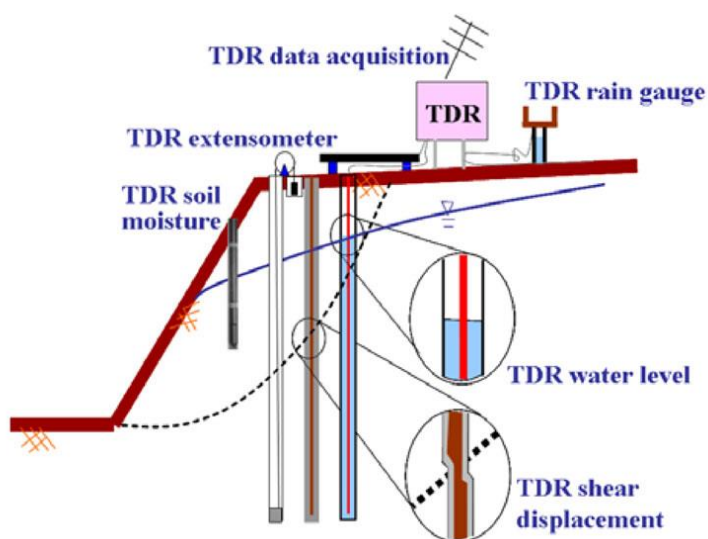


Rysunek 33 Zalecane i niezalecane miejsca instalacji kabli TDR w podłożu (Thuro i in.2007, Dowding i in., 2003)

Poniżej zebrano większość zalet i ograniczeń pomiarów reflektometrycznych kabli TDR.

ZALETY

- uniwersalność pomiarów (Rysunek 34): lokalizacja stref nieciągłości, pomiary poziomu zwierciadła wody (specjalne otwory wywiercone w kablu), pomiary wilgotności,
- możliwość wykorzystania otworów rozpoznawczych (wiertniczych) do instalacji kabli TDR,
- mniejsze koszty realizacji i pomiarów niż w przypadku pomiarów inklinometrycznych,
- łatwość i szybkość wykonania pomiaru,
- wybór formy pomiaru – manualny lub automatyczny,
- ciągłe zbieranie danych,
- zdalne zbieranie danych,
- deformacja może być określana bezpośrednio podczas zbierania danych, zamiast oczekiwania, aż dane zostaną wykreślone na komputerze,
- wydłużenie „żywności” kolumn inklinometrycznych,
- możliwość identyfikacji wielu stref ścinania (nieciągłości),
- możliwość monitoringu stanu technicznego obiektów budowlanych (tunele, zapory, ścianki szczelne, szczelinowe, budynki w sąsiedztwie głębokich wykopów),
- możliwość monitoringu obszarów zagrożonych procesami geodynamicznymi,
- możliwość monitoringu terenów górniczych,
- możliwość prowadzenia prac budowlanych bezpiecznie,
- jako element systemu wczesnego ostrzegania.



Rysunek 34 Uniwersalność metody TDR (<http://dpwe.nctu.edu.tw>)

OGRANICZENIA

- dobór odpowiedniej mieszanki, o odpowiedniej sztywności w zależności od rodzaju i właściwości materiału budującego podłoże,
- podłoże musi być odpowiednio sztywne – proste zginanie kabla, bez jego uszkodzenia, nie wskazuje często żadnego odkształcenia (Rysunek 33),
- w gruntach plastycznych przemieszczenia trudne do uchwycenia (Rysunek 33), stosunkowo małe przemieszczenia i strefowość zniszczenia zwłaszcza we wczesnym stadium odkształcenia, oznacza komplikuje przy lokalizacji i interpretacji wyników,

- zastosowanie jedynie do wąskiej strefy ścinania,
- pomiary ilościowe są nadal wyzwaniem (wielkość przemieszczenia > 2 cm / a) ,
- brak informacji o kierunku /orientacji przemieszczeń,
- nie można mierzyć deformacji pod powierzchnią wody, jeżeli woda dostanie się do kabla, może zmienić właściwości elektryczne kabla, zapisy trudne do zinterpretowania (Kane i Parkinson, 1998).

W tabeli (Tabela 16) przedstawiono przegląd inklinometrów i pomiarów TDR oraz ich przydatność w sytuacjach, w których te instrumenty najczęściej wykorzystuje się.

Tabela 16 Geotechniczne wykorzystanie pomiarów inklinometrycznych i pomiarów pokrewnych- zmodyfikowane na bazie PN- EN ISO 18674-3:2018

	Inklinometry				TDR*
	przenośne		łańcuchowe IPI		
	V	H	V	H	
Stateczność zboczy/skarp (powierzchnia poślizgu)	■	■	■	■	■
Nasypy drogowe (stateczność skarp)	■	■	■	■	■
Głębokie wykopy (stateczność ścian wykopu)	■	■	■	■	■
Stateczność budowli w pobliżu wykopów	■	■	■	■	■
Nasypy na gruntach słabonośnych – profil osiadań	■	■	■	■	■
Budowa tuneli (wpływ na otaczające warstwy, struktury)	■	■	■	■	■
Pomiary konwergencji	■	■	■	■	■
Próbne obciążenia pali (przemieszczenia poziome)	■	■	■	■	■
Kontrola ugięcia (deformacji) pionowych elementów konstrukcyjnych (np. ścianki szczelinowe, mury oporowe, itp.)	■	■	■	■	■
Pęcznienie podłoża	■	■	■	■	■
Kierunek i orientacja przemieszczeń	■	■	■	■	■

V - pomiary deformacji pionowych (jednoosiowe) , H – pomiary deformacji poziomych (dwuosiowe)

*możliwość rozmycia strefy ścięcia (patrz ograniczenia dla pomiarów TDR)

**typu SAA

3.1.2.c Ekstensometry

Ekstensometr (z ang. *extension* = rozszerzenie, wydłużenie) to przyrząd wykorzystywany w geotechnice do pomiaru wydłużeń – zmian wymiarów liniowych (odkształceń liniowych) konstrukcji inżynierskich, ośrodka gruntowego oraz masywu skalnego czyli do pomiaru osiadań, przemieszczeń i odkształceń w budownictwie tunelowym i górniczym oraz do kontroli stateczności budowli ziemnych (zapór, nasypów), zboczy i skarp.

Przyrządem który mierzy zjawisko odwrotne polegające na zaciskaniu się masywu gruntowego czy skalnego jest konwergometr (z ang. *convergere* = zbiegać się). Nazwa ta używana jest wyłącznie w górnictwie i budownictwie podziemnym, i związana jest z pomiarami konwergencji.

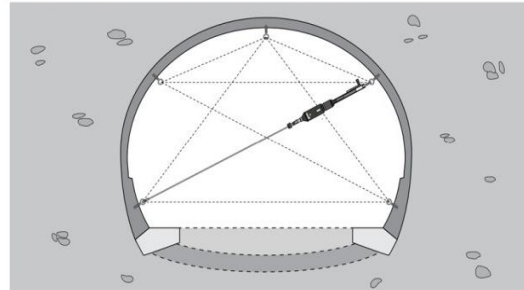
Ekstensometry to urządzenia mierzące zmianę odległości między dwoma lub więcej punktami pomiarowymi umieszczonymi wzdłuż linii pomiarowej, która pokrywa się z osią otworu

wiertniczego (PN EN-ISO 18674-2:2017). Podstawową zasadą jest pomiar ruchu wybranego punktu w odniesieniu do innego nieruchomego. W punkcie pomiarowym ruchy badanego ośrodka (np. gruntu, skał, betonu i konstrukcji stalowych) są przenoszone na punkt pomiarowy za pomocą urządzeń takich jak kotewki, pręty zbrojeniowe, poduszki kotwiące, pierścienie lub śruby. Ogólnie ekstensometry możemy podzielić na instrumenty wykorzystywane do pomiaru deformacji powierzchniowych (ekstensometry taśmowe - Rysunek 35 A, B) oraz bardziej popularną grupę ekstensometrów wykorzystywaną do pomiarów deformacji wgłębnych, w której wyróżniono ekstensometry:

- prętowe, strunowe (jedno- i wieloprętowe, wielostrunowe – Rysunek 35 C-F)
- ekstensometry przenośne z pomiarem sondą jedno- lub dwupunktową (Rysunek 36 A, B). Ze względu na swoją konstrukcję i działanie ekstensometr wykorzystujący sondę jednopunktową jest powszechnie określany jako "ekstensometr magnetyczny", a sondę dwupunktową jako „ekstensometr przyrostowy lub przesuwny" (PN EN-ISO 18674-2:2017),
- instrumenty hybrydowe w postaci ekstenso-inklinometrów (Rysunek 36 C).



A ekstensometr taśmowy (fot.Sisgeo.com)



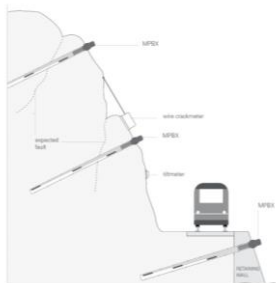
B pomiar konwergencji ekstensometrem taśmowym (źródło: Sisgeo.com)



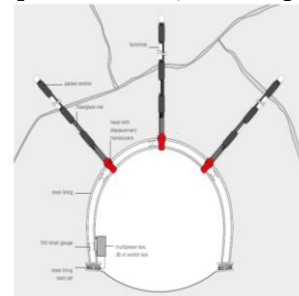
C ekstensometry wieloprętowe (trzyprętowe, fot. Sisgeo.com)



D ekstensometry wieloprętowe (poduszki kotwiące, fot. Sisgeo.com)



E monitoring skarp (źródło: Sisgeo.com)

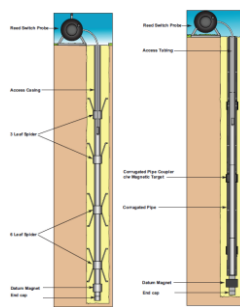


F monitoring tuneli(źródło: Sisgeo.com)

Rysunek 35 Przykłady ekstensometrów i ich zastosowanie



A ekstensometr przenośny (fot. Sisgeo.com)



B pomiary ekstensometrem przenośnym (geosense.com)



Ekstensometr hybrydowy – ekstenso-inklinometr (fot.A.Borecka)

Rysunek 36 Przykłady ekstensometrów i ich zastosowania

Ekstensometry mogą pracować w otworach o różnym nachyleniu, co umożliwia szerokie zastosowanie przy pomiarach wymagających dużych precyzji.

Najprostszy ekstensometr taśmowy (lub konwergometr taśmowy) przeznaczony jest do pomiaru niewielkich zmian odległości między referencyjnymi punktami np. przeciwległymi ścianami lub między stropem a spągiem wyrobisk górniczych lub tuneli (pomiar konwergencji) (Rysunek 36 A, B). Może również być wykorzystany do monitorowania odkształcenie konstrukcji inżynierskich i podpór oraz pomiaru przemieszczenia niestabilnych zboczach.

Ekstensometr prętowy składa się z jednego (*single-point system*) lub kilku prętów (*multi-point system*) o różnych długościach, których końce stabilizuje się na różnych głębokościach tak, aby nie hamowały swobodnego ruchu prętom dłuższym. Kotewki lub inne elementy stabilizujące montowane są w otworze na głębokościach występowania materiałów zróżnicowanych pod względem geomechanicznym, tektonicznym czy stratygraficznym.

Na zewnątrz mocowane jest urządzenie pomiarowe (głowice pomiarowe najczęściej z automatycznym pomiarem). Wzajemne przemieszczenie końcówki pręta w stosunku do głowicy ekstensometru wskazuje na względną deformację.

Ekstensometry mobilne (przenośne)- najczęściej wykorzystywane to ekstensometry magnetyczne. Ekstensometr magnetyczny jest ekstensometrem wielopunktowym którego elementy mogą być montowane na rurze pomiarowej lub na obudowie kolumny inklinometrycznej (możliwość dokonywania dwóch niezależnych pomiarów jednocześnie). System składa się z sondy pomiarowej oraz szeregu magnesów umieszczonych wzdłuż rury prowadzącej. Elementami pomiarowymi są w tym przypadku np. kotwiczki magnetyczne (Rysunek 36 H). Im większa ilość i zagęszczenie kotwiczek, tym dokładniejsze rozpoznanie stref deformacji podłoża (górotworu). Sama sonda to plastikowa rurka, wewnątrz której umieszczane są przewody elektryczne. Impuls prądowy przepływający przez sondę wytwarza pole magnetyczne, które oddziałuje na pole wokół poszczególnych magnesów. Zmiany położenia kotwiczek na skutek ruchów górotworu powodują zmianę siły pola magnetycznego wytworzonego przez magnesy umieszczone wewnątrz kotwiczek. Deformacje oblicza się przez porównanie aktualnej położenia każdego magnesu do wartości bazowej (zerowej).

W tabeli (Tabela 17) zebrano większość zalet i ograniczeń wynikających ze stosowania ekstensometrów.

Tabela 17 Główne zalet i ograniczenia ekstensometrów

Rodzaj	Zalety	Ograniczenia
ekstensometr taśmowy	prosty w obsłudze, szybkie łączenie ze sobą punktów odniesienia, system zapewnia nieograniczony ruch taśmy i jest bardzo łatwy do utrzymania w czystości możliwość prostej wymiany uszkodzonych elementów, uszkodzona taśma może być wymieniana bez znaczącej utraty ciągłości danych, taśmy są bardzo lekkie, także błędy w wyniku jej ugięcia jest minimalny tani system pomiarowy system haczyków oczkowych wykorzystywany do podpięcia taśmy ekstensometrycznej jest bardziej ekonomiczny i szybszy w obsłudze niż systemy gwintowe pomiar automatyczny lub manualny	temperatura, zwłaszcza jeśli nie stosujemy taśm inwarowych zdalne odczyty są nie możliwe
ekstensometr prętowy/strunowy	szybkie i łatwe do zainstalowania, prosty dostęp i możliwość korekty czujnika, możliwe mechaniczne, elektryczne i zautomatyzowane odczyty wysoka dokładność pomiaru głowica elektryczna pozwala bez nadzoru monitorowanie pomiarów przekazywane przez rejestrator danych.	pomiar punktowy, max. 6 pomiarów w otworze, także prawidłowa lokalizacja jest bardzo istotna głębokość kotwienia jest ograniczona przez materiał pręta i kierunkiem ustawienia prętów, swobodny ruch prętów montowanych poziomo może być ograniczony przez tarcie i zaciskanie z powodu przemieszczeń pionowych.
ekstensometr przenośny	możliwość uzyskania szczegółowego profilu deformacji(dowolna liczba elementów pomiarowych), uzupełnia pomiary inklinometryczne, jeśli kotwiczki są zainstalowane na obudowie kolumny inklinometrycznej, uzyskujemy pomiary 3-D, niezawodny i dokładny system pomiarowy, który jest prosty do odczytania, monitorowanie dowolnej ilości punktów w jednym otworze, opłaczalne; jedna sonda pomiarowa odczytuje wszystkie lokalizacje.	prawidłowe odczyty wymagają dokładnego operatora, zdalne odczyty są nie możliwe /wyłącznie pomiar ręczny

W przypadku ekstensometrów wykorzystywanych do pomiaru deformacji wgłębnych błędy pomiarowe mogą również wynikać z niedokładność odwzorowania przemieszczeń ośrodka przez zły dobór mieszanki, o odpowiedniej sztywności uzależnionej od rodzaju i właściwości ośrodka budującego podłoże.

3.1.2.d Repery wgłębne i hydrauliczne systemy pomiaru osiadań

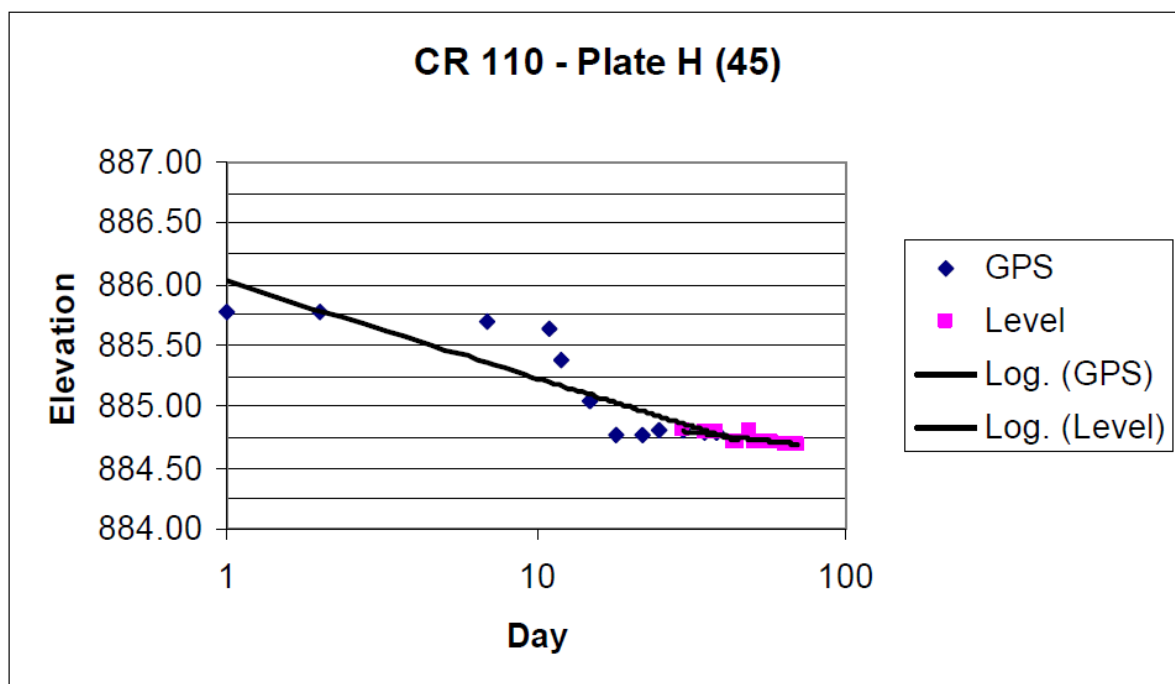
Urządzenia przedstawione w tym rozdziale to zasadniczo urządzenia wykorzystywane do monitorowania osiadań nasypów w trakcie budowy i po jej zakończeniu (Rysunek 37, Rysunek 39), monitorowania osiadań podłoża gruntowego w pobliżu tuneli, na obszarach występowania szkód górniczych, ale również monitorowania osiadań konstrukcji budowlanych.

Repery wgłębne są prostym instrumentem pomiarowym zwykle używanym do monitorowania osiadań nasypów posadowionych na gruntach słabonośnych (Rysunek 37). Mogą być one również

wykorzystane do oceny pęcznienia podłoża zlokalizowanego pod nasypem czy oceny stopnia wypełnienia materiałem nasypu. Są one instalowane w dnie wykopów lub w podstawie formowanego nasypu. Repery wgłębne to najczęściej kwadratowe płyty ze stali, drewna lub betonu do których przymocowana jest stalowa rura (najczęściej 1-1,5 metrowej długości) zakończona gwintowanymi łącznikami. Takie rozwiązanie pozwala na wydłużanie ciągu pomiarowego o dowolną długość wraz ze wznoszeniem nasypu. Aby uchronić rurę przed niebezpieczeństwem zgięcia lub zniekształceniem w trakcie wznoszenia nasypu, jako osłonę stosuje się np. plastikowe rury PCV. Ta obudowa jest przedłużona podobnie jak pręty stalowe. Pomiaru są realizowane poprzez pomiar wysokości wierzchołka rury stalowej za pomocą konwencjonalnych metod geodezyjnych (niwelacji) – pomiar bezwzględny lub innych systemów pomiarowych. Ręczne systemy GNSS (GPS) nie zawsze są wystarczająco precyzyjne (Rysunek 38). Czujniki elektryczne mogą być używane do zdalnego odczytu (pomiar względny), jeśli odniesiemy do stałego układu odniesienia uzyskamy pomiar bezwzględny.



Rysunek 37 Przykład repera wgłębego i jego zabudowy (sisgeo.com)



Rysunek 38 Przykład dokładności pomiaru pomiędzy niwelatorem a GNSS (GPS po amerykańsku) (MnDOT 2017)

Hydrauliczne systemy pomiaru osiadań można podzielić na dwa podsystemy:

- punktowy na który składają się: czujnik lub sieć czujników podłączonych do zbiornika referencyjnego (stacji pomiarowej) umieszczonego na stabilnym podłożu, za pomocą rurek wypełnionych cieczą oraz rurki do wyrównania ciśnienia atmosferycznego - pozwala to na uniknięcie błędów pomiarowych spowodowanych różnicą ciśnień – tzw. hydroniwelatory,
- ciągły (pomiar wykonywane co 1m) na który składają się z rura przewodnicza zakopana w podłożu oraz sonda przenośna połączona ze zbiornikiem referencyjnym (stacją pomiarową) umieszczoną na stabilnym podłożu (np. płycie betonowej) - tzw. hydroprofilometry.

Zasadniczo stanowią one alternatywę dla ekstensometrów przenośnych, czy reperów wgłębnych, umożliwiając instalację bez częstych przerw w trakcie wznoszenia i zagęszczania nasypu, minimalizując tym samym ryzyko uszkodzenia przyrządu.

W obu pomiarach wykorzystuje się technologię tzw. niwelacji hydrostatycznej czyli zasadę pomiaru ciśnienia hydrostatycznego wytwarzanego przez kolumnę cieczy zakończoną sondą pomiarową. Pomiar położenia w pionie danego punktu polega na wyznaczeniu ciśnienia wywieranego przez słup cieczy o określonej wysokości. Przy założeniu stałej gęstości cieczy, ciśnienie hydrostatyczne (P) jest funkcją wyłącznie wysokości słupa cieczy (h). Pomiar ciśnienia pozwala więc bezpośrednio wyznaczyć położenie mierzonego punktu w pionie (<http://www.izbudujemy.pl/artykuly/896/Monitoring-geotechniczny>). Gdy czujnik osiada wraz z otaczającym go gruntem, wysokość kolumny słupa cieczy się zwiększa, a odpowiednie wyższe ciśnienie jest mierzone przez czujnik ciśnienia. Osiedlenia oblicza się przez przeliczenie ciśnienia na milimetry słupa cieczy (geosense.co.uk, sisgeo.com).

Wykonywany pomiar powinien być nawiązany wysokościowo do reperów kontrolnych umieszczonych przy każdym z końców profilu na bloczkach betonowych w celu zapewnienia rzeczywistego odniesienia – tzw. pomiary bezwzględne. Wysokość reperów kontrolnych określana jest bezpośrednio przed każdym z badaniami na podstawie najczęściej niwelacji geometrycznej (geosense.co.uk, geokon.com, sisgeo.com).

W przypadku hydroniwelatorów względne osiedlenia mogą być wyznaczane na podstawie:

- pomiaru równowagi poziomu cieczy (tzw. urządzenia przelewowe lub alternatywnie hydrauliczne urządzenia wyrównawcze, przelewowe), w których czujniki zabudowane w nasyp i odnoszące się do stacji pomiarowej poza nasypem są na mniej więcej tej samej wysokości. Są one jednak w wielu wypadkach zabronione (MnDOT 2017) z powodu swej błędnej historii i prawdopodobnie wątpliwej jakości uzyskiwanych danych
- lub pomiarze ciśnienia przenoszonego przez ciecz. Tu czujniki i odnoszące się do nich stacje pomiarowe są położone na różnych wysokościach. Montowane są one w trakcie wznoszenia konstrukcji (Rysunek 39) lub w bezpośrednio w otworze wiertniczym (zakotwione). Te drugie znacznie mniej popularne.

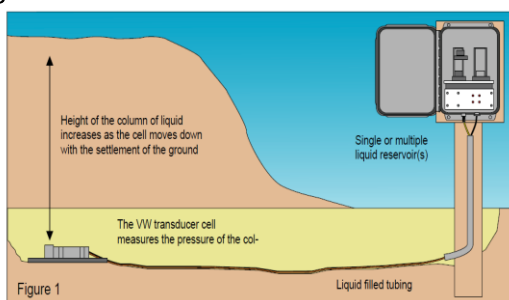
Ogólnie, hydrauliczne systemy są wrażliwe na zmiany gęstości cieczy spowodowane zmianami temperatury, skutkami napięcia powierzchniowego i każdą nieciągłością cieczy w rurce wypełnionej cieczą. Największym potencjalnym źródłem błędu jest nieciągłość cieczy spowodowana obecnością gazu (powietrza) (Dunnicliff 1993).



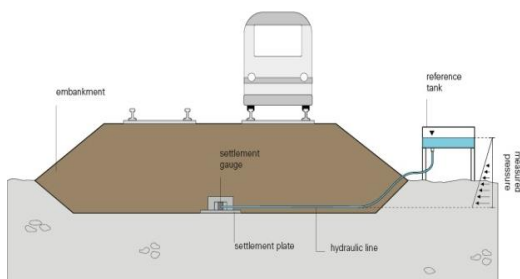
geokon.com



sisgeo.com



geosense.co.uk



sisgeo.com

Rysunek 39 Przykładowe rozwiązania hydroniwelatorów i ich zastosowanie

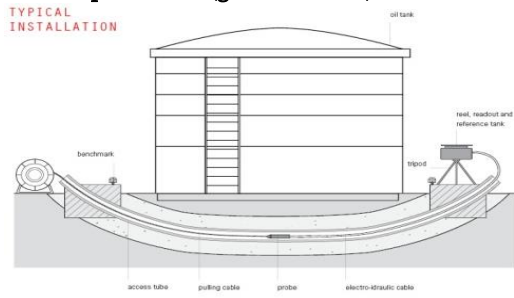
Hydroprofilometr składa się z sondy pomiarowej połączonej rurkami wypełnionymi cieczą ze zbiornikiem pomiarowym (referencyjnym), który ustawiany jest na stabilnym gruncie. Sonda przeciągana jest metr po metrze wzdłuż rury profilometrycznej umieszczonej pod badanym obiektem (Rysunek 40), instalowanej na wstępnym etapie, przed rozpoczęciem prac ziemnych lub przy pomocy przewiertu gdy mamy do czynienia z obiektem już istniejącym. Odczyty są dokonywane co metr co pozwala ustalić cały profil pomiarowy. Różnice w profilu pionowym z czasem dostarczają danych do określenia deformacji pionowej. Uzyskujemy w ten sposób o wiele bardziej szczegółowe dane dotyczące osiadania obiektu. Przyrządy te są szczególnie odpowiednie, gdy deformacja pionowa może być nierównomierna, w przeciwnym razie wymagane byłoby użycie wielu jednopunktowych przyrządów pomiarowych (reperów wgłębnych czy hydroniwelatorów) (Rysunek 41). Skalibrowana część systemu pomiarowego jest przenośna i może być używana w kilku lokalizacjach w jednym projekcie lub w kilku projektach. Najczęstszy używany rodzaj sondy jest identyczny z wersją jednopunktową (hydroniwelator). Hydroprofilometry dostarczają te same informacje, co poziome inklinometry (Dunnicliff 1993).



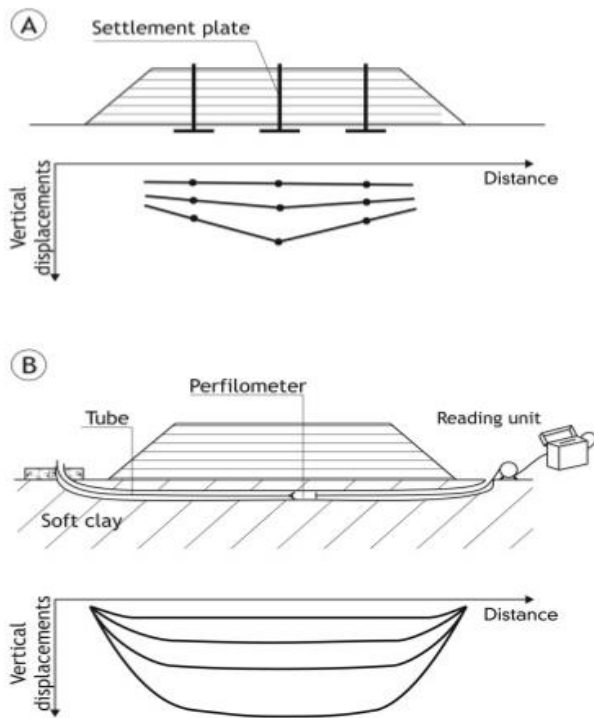
A sonda pomiarowa (geosense.co.uk)



B zbiornik referencyjny (stacja pomiarowa) (sisgeo.com)



Rysunek 40 Przykład hydroprofilometru oraz jego zastosowania

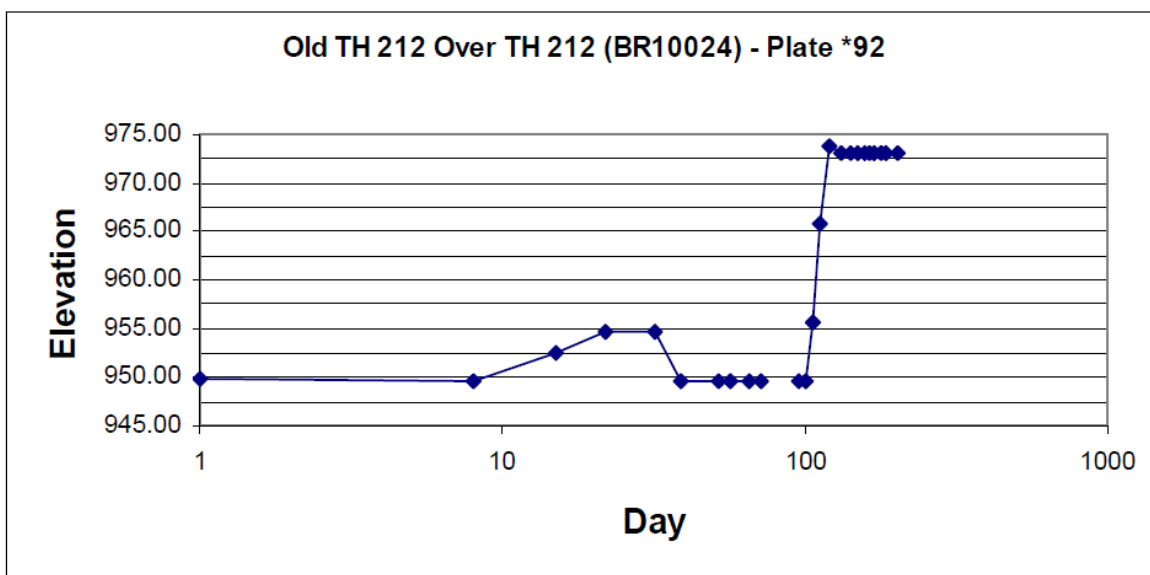


Rysunek 41 Profil osiadań - przykład dokładności pomiaru- reper wgłębny vis a vis hydroprofilometr (Almeida i in. 2013)

Poniżej zebrano większość zalet i ograniczeń reperów wgłębnych i hydraulicznych systemów do pomiaru osiadań (Tabela 18).

Tabela 18 Główne zalet i ograniczenia reperów wgłębnych i hydraulicznych systemów do pomiaru osiadań

Rodzaj	Zalety	Ograniczenia
reper wgłębny	<p>szybkie i łatwe do zainstalowania, proste w obsłudze, niskie koszty, wysoka dokładność</p>	<p>dokładność odczytu uzależniona od doświadczenia personelu i precyzji urządzeń geodezyjnych (rys.38) pomiar najczęściej manualny zwłaszcza w fazie wznoszenia nasypu zdalne odczyty są ograniczone pręty przeszkadzają we wznoszeniu nasypu (konieczność używania osłon żeby nie zniszczyć, przekrzywić prętów) możliwość uszkodzenia prętów w trakcie wznoszenia nasypu konieczność uwzględnienia kolejno przykręcanych prętów wraz ze wznoszeniem nasypu (błąd pomiaru rys.42)</p>
hydroniwelator	<p>stacja pomiarowa może być oddalona od obszaru roboczego i nie zakłóca prac budowlanych - mniej inwazyjne dla procesu budowy możliwe mechaniczne (manualne), zdalne lub zautomatyzowane odczyty wysoka dokładność pomiaru zabudowywane przed rozpoczęciem etapu wznoszenia nasypu lub w jego początkowej fazie możliwość zabudowy na różnych poziomach w obrębie nasypu możliwość uzyskania szczegółowego profilu deformacji (jeśli uwzględnimy odpowiednią ilość elementów pomiarowych), stosowaną cieczą jest zazwyczaj dezaktywowana mieszanina, która jest odporna na rozrost glonów i nie jest podatna na zamarzanie możliwość tworzenia wielopunktowych systemów pomiarowych dodatkowo czujniki wyposażone są w termistor do pomiaru temperatury</p>	<p>systemy złożone i podatne na błędy będące efektem zmiany ciśnienia powietrza, ciśnienia płynu i temperatury dokładność odczytu uzależniona od doświadczenia personelu i precyzji urządzeń pomiarowych płyn musi być regularnie dodawany do zbiornika wyjątkowo wrażliwe na temperaturę (woda) i zamarzanie - konieczność używania odpowiedniej cieczy nie podatnej na zamarzanie możliwość błędnych pomiarów, jeśli zbiornik nie znajduje się na stabilnym podłożu możliwość błędnych pomiarów, jeśli w rurkach systemu pomiarowego obserwujemy pęcherzyki powietrza – nieciągłość cieczy pomiar punktowy w systemach zautomatyzowanych ilość instrumentów ograniczona od możliwości pomiarowych zbiornika referencyjnego</p>
hydroprofilome	<p>możliwość uzyskania szczegółowego profilu przemieszczenia - pomiar co 1m niezawodny i dokładny system pomiarowy, który jest prosty do odczytania, monitorowanie dowolnej ilości punktów wzdłuż jednego profilu, możliwość wykonywania pomiarów dla wielu profili pomiarowych stacja pomiarowa może być oddalona od obszaru roboczego i nie zakłócać prac budowlanych - mniej inwazyjne dla procesu budowy</p>	<p>dokładność odczytu uzależniona od doświadczenia personelu i precyzji urządzeń pomiarowych płyn musi być regularnie dodawany do zbiornika wyjątkowo wrażliwe na temperaturę (woda) i zamarzanie - konieczność używania odpowiedniej cieczy nie podatnej na zamarzanie możliwość błędnych pomiarów, jeśli zbiornik nie znajduje się na stabilnym podłożu możliwość błędnych pomiarów, jeśli w rurkach systemu pomiarowego obserwujemy pęcherzyki powietrza – nieciągłość cieczy systemy złożone i podatne na błędy będące efektem zmiany ciśnienia powietrza, ciśnienia płynu i temperatury. zdalne odczyty są kosztowne /najczęściej pomiar manualny</p>



Rysunek 42 Błąd pomiaru na reperze wgłębnym – pominięcie dodatkowego pręta w reperze wgłębnym (MnDOT 2017)

3.2. Pomiary położenia zwierciadła wody i ciśnienia porowego wody

Pomiary piezometryczne polegają na bezpośrednim pomiarze rzędnej zwierciadła wody lub na pomiarze ciśnienia wody i przeliczeniu go na wysokość słupa wody (Dowgiałło J. i in., 2002, Kledyński Z., 2011) za pomocą np. czujników ciśnienia porowego (FERC, 1994). Z geotechnicznego punktu widzenia są one często wykorzystywane do obliczeń stateczności, oceny postępu konsolidacji nasypów (w trakcie budowy i w trakcie eksploatacji), oceny kierunku przepływu wody w ośrodku a także bieżącej kontroli zmian poziomów zwierciadła wody.

Pomiar może odbywać się w piezometrach otwartych zaopatrzonych w końcówki filtrujące zapewniające dopływ wody do piezometru. Woda gruntowa ma wówczas bezpośredni kontakt z atmosferą (PN-EN ISO 22475-1:2006) a pomiary polegają na bezpośrednim pomiarze rzędnej zwierciadła wody za pomocą różnego typu gwizdków hydrogeologicznych, mierników optyczno-akustycznych lub pomiarze ciśnienia piezometrycznego przy użyciu czujników do pomiaru ciśnienia wody porowej (pomiar ciągły).

W przypadku piezometrów zamkniętych, woda gruntowa nie ma bezpośredniego kontaktu z atmosferą (PN-EN ISO 22475-1:2006), a pomiar położenia zwierciadła wody polega na pomiarze ciśnienia wody w porach gruntu (ciśnienie piezometryczne) za pomocą różnego rodzaju czujników ciśnienia porowego (hydraulicznych, pneumatycznych lub strunowych) a następnie przeliczeniu go na wysokość słupa wody. Ich instalacja jest możliwa na trzy sposoby:

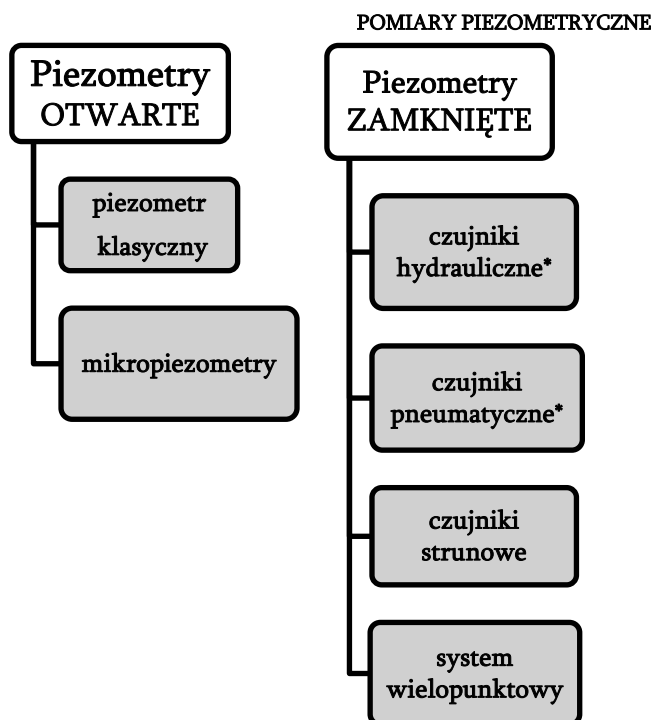
- poprzez wciskanie czujnika bezpośrednio w grunt,
- poprzez zabudowanie w otworze wiertniczym - w tym przypadku wyróżniamy dwa podejścia:
 - obecnie najbardziej popularne - przez zastosowanie mieszanek cementu, bentonitu i wody o odpowiedniej przepuszczalności, na całej długości otworu,
 - lub przez zasypanie końcówki filtra czujnika piaskiem. Przestrzeń powyżej warstwy piasku zwykle jest uszczelniana bentonitem.

Norma PN-EN ISO 18674-1:2015 przedstawia podział piezometrów według następującego schematu:

- studnie lub rury piezometryczne z oprzyrządowaniem manualnym do pomiaru poziomu położenia zwierciadła wody (rury o średnicy > 25cm),

- mikropiezometry otwarte z oprzyrządowaniem do pomiaru poziomu zwierciadła wody
- (np. piezometr Casagrande'a)(pomiar manualny lub automatyczny),
- piezometry zamknięte z zabudowanym pneumatycznym czujnikiem pomiaru ciśnienia porowego,
- piezometry zamknięte z zabudowanym elektrycznym (strunowym VW) czujnikiem pomiaru ciśnienia porowego.

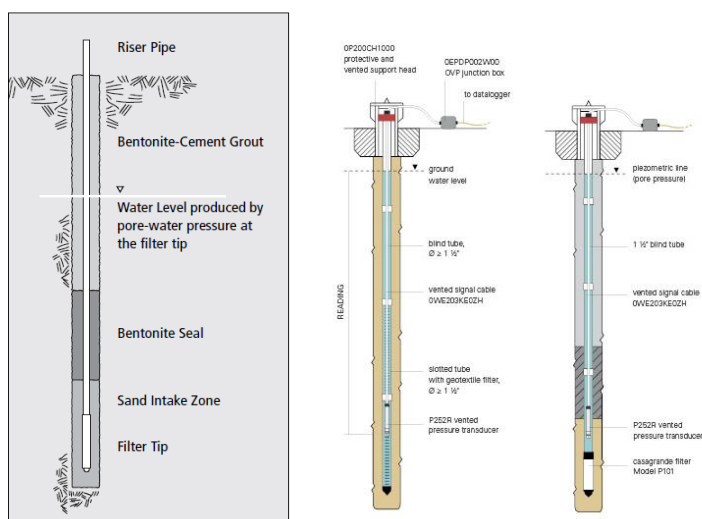
Analiza międzynarodowych rozwiązań, doświadczeń, norm pozwoliła na stworzenie bardziej przejrzystego schematycznego podziału pomiarów piezometrycznych według aktualnego stanu wiedzy (Rysunek 43).



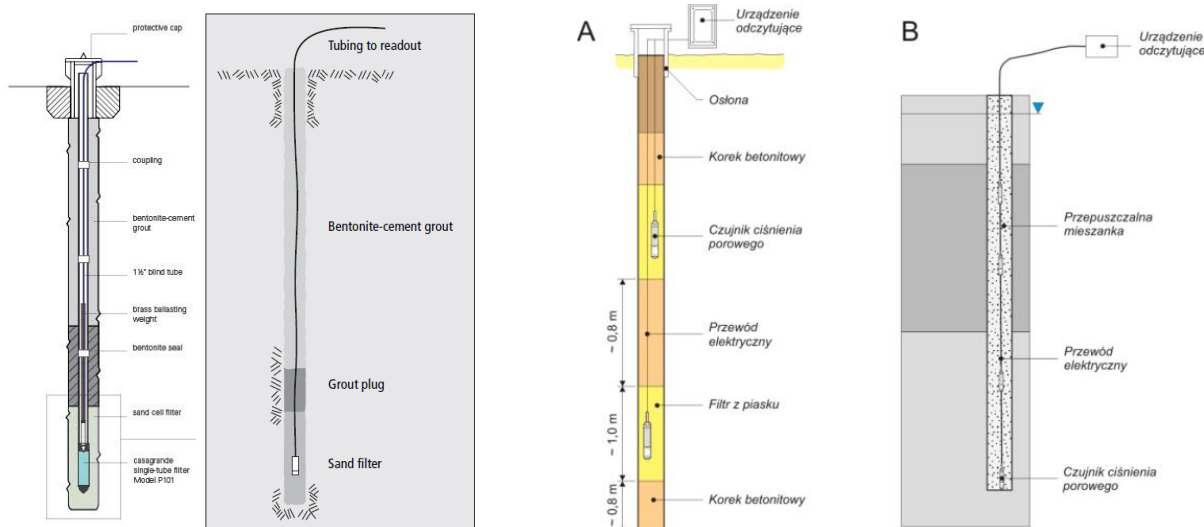
*obecnie rzadko stosowane

Rysunek 43 Podział pomiarów piezometrycznych

Schematy instalacji przedstawiono na rysunkach (Rysunek 44, Rysunek 45).



Rysunek 44 Przykładowe sposoby pomiaru położenia zwierciadła wody gruntowej – piezometry otwarte

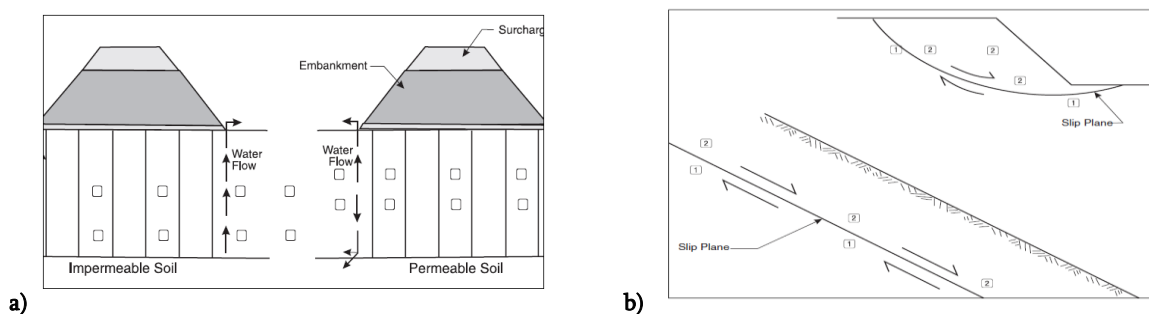


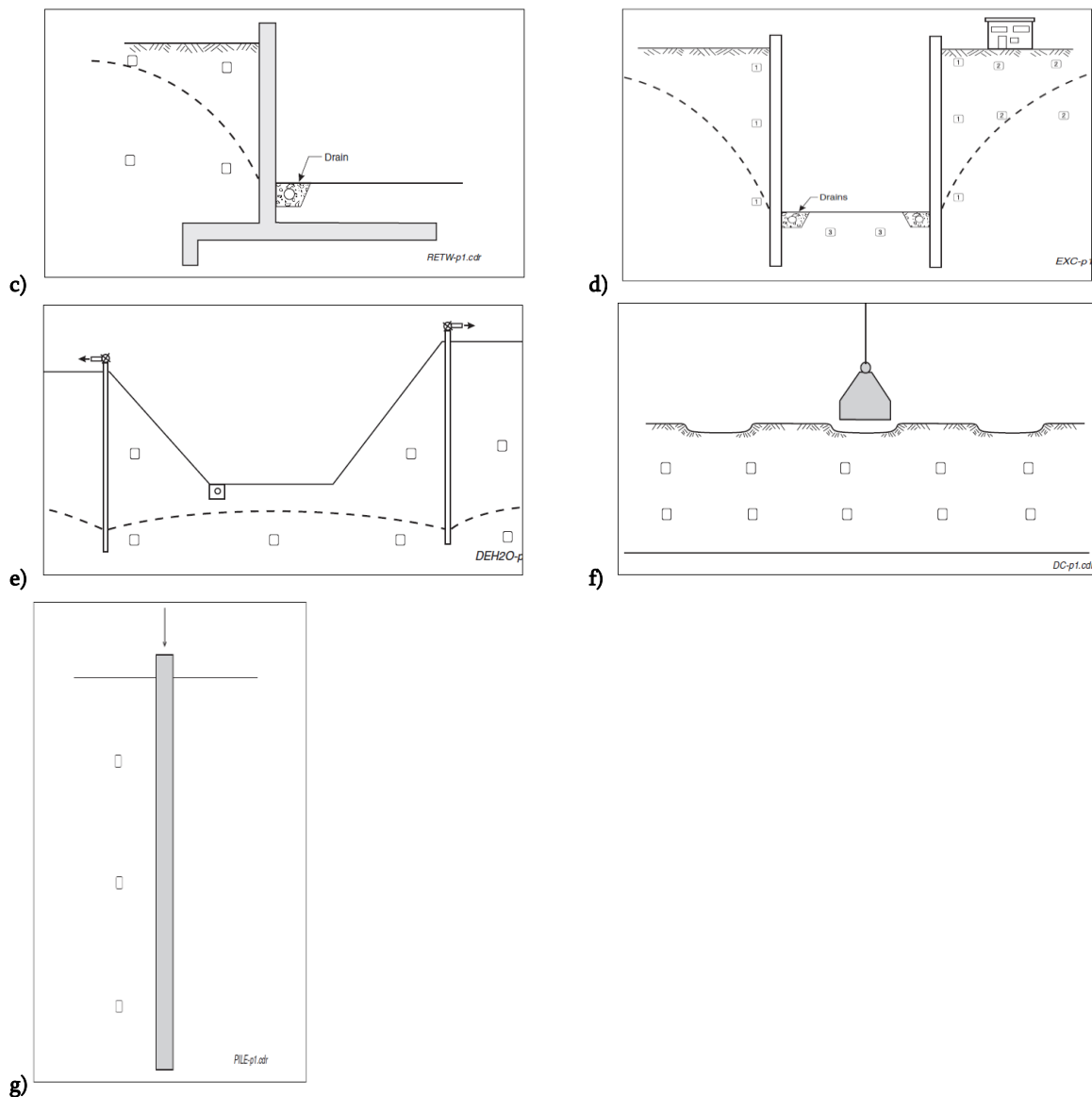
Rysunek 45 Przykładowe sposoby pomiaru położenia zwierciadła wody gruntowej- piezometry zamknięte

Rozwój technologicznych rozwiązań w zakresie czujników do pomiaru ciśnienia porowego skupia się obecnie na ulepszaniu czujników strunowych i systemów wielopunktowych (wielopoziomowych). Czujniki hydrauliczne czy pneumatyczne są obecnie sporadycznie stosowane – trudno je nawet znaleźć w katalogach światowych producentów. Rozwija się za to mocno technologia wielopunktowych kabli sygnałowych. Odchodzi się obecnie od tradycyjnego umieszczania pojedynczych czujników na różnych głębokościach w jednym otworze wiertniczym, co było często trudne, a trudność wzrastała wraz z liczbą czujników, na rzecz jednego systemu wielopunktowego (Rysunek 45).

Pomiary ciśnienia porowego wody pozwalają na uzyskanie informacji o rozwoju procesu niszczenia, zmianach niszczenia, zmianach gradientów hydraulicznych, postępie konsolidacji, wydajności drenaży czy kierunku przepływu kierunku przepływu wody w ośrodku. Przykłady zastosowań czujników do pomiaru ciśnień porowych przedstawiono na rysunkach (a – osiadanie nasypów (postęp konsolidacji, jakość drenażu) ; b – osuwiska (rozwój procesów niszczących); c –stateczność ścian oporowych (parcie, jakość drenażu), d - zmiana nachylenia i ugięci ścianek szczelnych i szczelinowych (parcie, jakość drenażu, wyparcie); e – odwodnienia wykopów, f –ocena konsolidacji w trakcie i po dynamicznym dogęszczaniu podłoża g- kontrola nadmiar ciśnienia porowego generowanego przez wbijaniu pała.

Rysunek 46 a-g).





a – osiadanie nasypów (postęp konsolidacji, jakość drenażu) ; b – osuwiska (rozwój procesów niszczących); c – stateczność ścian oporowych (parcie, jakość drenażu), d - zmiana nachylenia i ugięci ścianek szczelnych i szczelinowych (parcie, jakość drenażu, wyparcie); e – odwodnienia wykopów, f – ocena konsolidacji w trakcie i po dynamicznym dogęszczaniu podłoża g- kontrola nadmiaru ciśnienia porowego generowanego przez wbijaniu pala.

Rysunek 46 Zastosowanie czujników ciśnienia porowego w geotechnice - (SLOPE INDICATOR, 2004a)

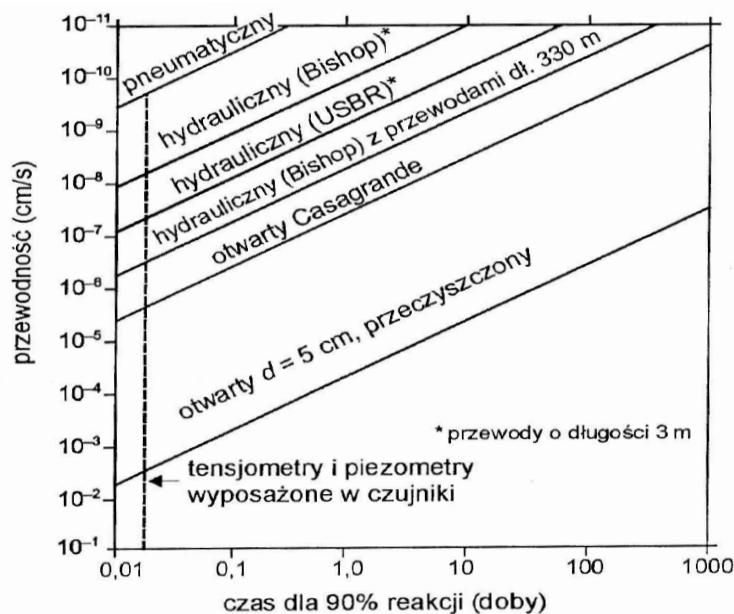
Nawet najdokładniejsze pomiary zwierciadła wody prowadzone w otworze piezometrycznym (piezometry otwarte) z uwzględnieniem okresu potrzebnego na ustabilizowanie się zwierciadła nie pozwolą na dokładne oszacowanie amplitudy zmian położenia zwierciadła w krótkim odstępie czasowym. Dlatego pojawia się tu pojęcie hydrodynamicznego opóźnienia czasowego odpowiadającemu czasowi potrzebnemu do wplynięcia wody do rurki piezometrycznej lub z niej wypłynięcia do czasu uzyskania równowagi ciśnień (wysokości zwierciadła). Zależy ono przede wszystkim od rodzaju i wymiarów piezometru oraz przepuszczalności otaczającego gruntu. Piezometry otwarte mają znacznie większy czas zwłoki hydrodynamicznej niż piezometry zamknięte. Dlatego też, jeśli poziom zwierciadła wody podlega codziennym wahaniom, a opóźnienie reakcji urządzenia w czasie jest dłuższe niż kilka godzin przesłaniają rzeczywiste zmiany, to wykonane pomiary mogą nie mieć żadnej wartości.

Z praktycznego doświadczenia wiadomo, że reakcja w 90% wyrównania jest uważana za wystarczającą dla wielu praktycznych zastosowań, a czas reakcji 100% jest uważany za nieskończony (Dunnicliff, 1993).

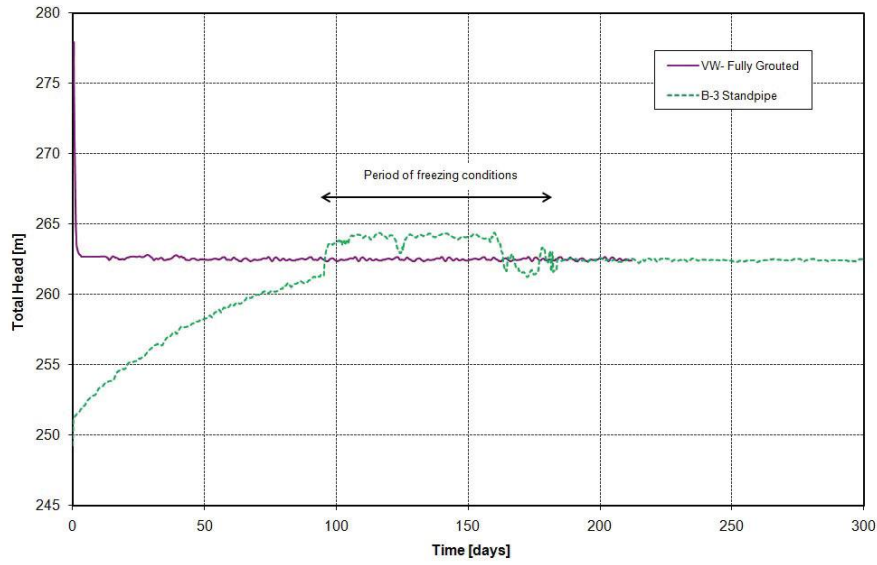
W zamkniętych systemach wykorzystujących czujniki do pomiaru ciśnienia wody czasy reakcji są praktycznie natychmiastowe, niemniej w pewnym zakresie zależą od długości przewodów łączących (Rysunek 47). Przykładowe wielkości opóźnień przedstawiono w tabelce (Tabela 19) i na rysunku (Rysunek 47, Rysunek 48).

Tabela 19 Czas reakcji wskazań piezometru typu Casagrande'a na zmiany położenia zwierciadła wody w jego otoczeniu w zależności od wielkości współczynnika filtracji gruntów (Zaradny 1999 za Fell i in. 1992)

Grunt	Piasek Sa	Pył Si			Ił Cl		
Współczynnik filtracji cm/s	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8	10-9
Średni czas opóźnienia dla 95% wyrównania	12s	2 min	20min	3,5h	36h	15dni	150dni
Średni czas opóźnienia dla 99% wyrównania	18s	3 min	30min	5,2h	54h	22,5 dni	225 dni

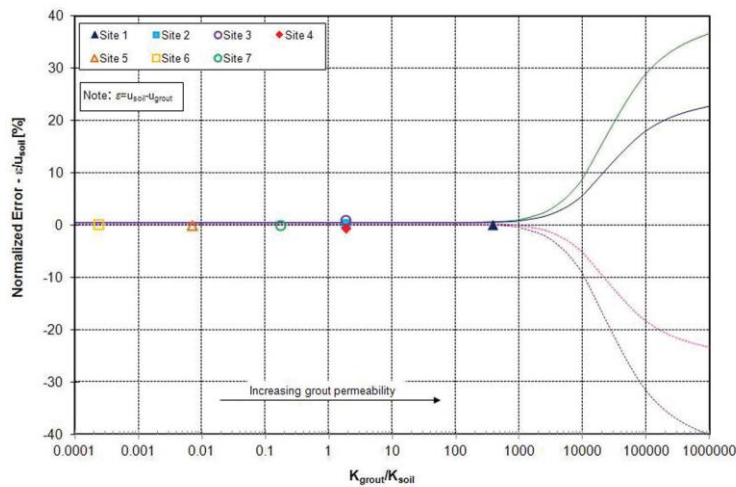


Rysunek 47 Przybliżony czas reakcji dla wybranych typów piezometrów (Zaradny 1999 za Dunnicliff 1993).



Rysunek 48 Przykład porównania opóźnienia w reakcji wskazań poziomu wody w piezometrze otwartym a piezometrze zamkniętym (czujnik strunowy VW) w gruncie spoistym o wysokiej plastyczności ($k \approx 1 \cdot 10^{-8} \text{cm/s}$) (Contreras i in. 2012)

Ponadto stwierdzono (Contreras i in.2012) że przepuszczalność zaczynu używanego do zalania otworu może być do trzech rzędów wielkości większa niż przepuszczalność otaczającego gruntu bez wywoływania znaczącego błędu w zmierzonym ciśnieniu wody porowej (Rysunek 49).

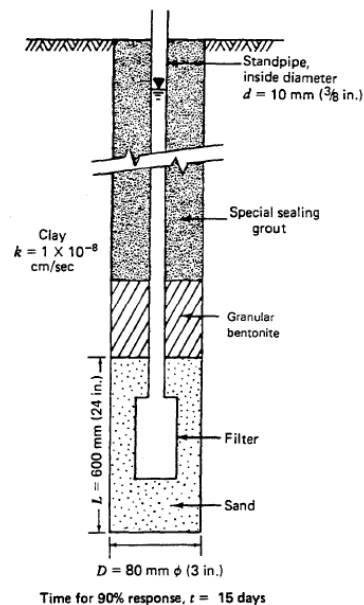


Rysunek 49 Porównanie znormalizowanych błędów (z badań polowych i modelu numerycznego) ze współczynnikiem przepuszczalności kzwiesina / kgrunt (Contreras i in.2012)

Przykładowy pomiar czasu odpowiedzi piezometrów otwartych można oszacować na podstawie równania podanego przez Penmana (Rysunek 50 - Dunnycliff 1993).

$$t = 3,3 \cdot 10^{-6} \frac{d^2 \ln\left[\frac{L}{d} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{d}\right)^2}\right]}{kL}$$

- t – czas opóźnienia (zwłoki hydrodynamicznej) dla 90% wyrównania poziomów wody [doby]
- d – wewnętrzna średnica rurki piezometrycznej (cm)
- L - długość części zafiltrowanej (lub strefy wypełnienia piaskiem wokół filtra) (cm)
- D – średnica części zafiltrowanej (lub strefy wypełnienia piaskiem) (cm)
- k – współczynnik filtracji gruntów w otoczeniu filtra (cm/s)



Rysunek 50 Przykładowa formuła obliczeniowa hydrodynamicznego opóźnienia czasowego dla piezometru otwartego

Kryterium opóźnień czasowych należy więc oceniać indywidualnie dla każdego przypadku osobno. A znaczenie szybkości reakcji urządzeń na zmiany warunków w otoczeniu piezometru zależą przede wszystkim od celu pomiarów, przewidywanych wahań zwierciadła wody czy pogorszenia się czułości układu wraz z upływem czasu (kolmatacja) (Dunnycliff 1993, Zaradny 1999).

Poniżej przedstawiono ogólne zalety i ograniczenia piezometrów zamkniętych (czujników do pomiaru ciśnienia porowej wody) względem piezometrów otwartych.

Wśród głównych ZALET stosowania piezometrów zamkniętych (czyli czujników do pomiaru

ciśnienia porowego) należy wymienić:

- szybszy czas reakcji niż w przypadku piezometrów otwartych (Rysunek 47, Rysunek 48),
- możliwość prowadzenia pomiarów ciągłych,
- możliwość instalacji na różnych głębokościach,
- łatwa obsługa oraz prostsza i łatwiejsza instalacja,
- znaczący wybór rodzajów czujników oraz ich zakresu pomiarowego,
- prosta interpretacja wyników pomiarów,
- możliwość instalacji systemów wielopunktowych (wielopoziomowych) w jednym, w pełni wypełnionym zaczynem otworze wiertniczym zapewnia duże oszczędności w kosztach instalacji. W przypadku tradycyjnego podejścia czyli instalacji większej ilości pojedynczych czujników na różnych głębokościach zachodzi konieczność wykonywania dodatkowych otworów wiertniczych,.
- wielopunktowe(wielopoziomowe) systemy piezometryczne dostarczają szczegółowych informacji dotyczących ciśnienia porowego wody zdanego profilu, zwłaszcza w warstwach złożonych o nieregularnym występowaniu wód gruntowych, często ujawniając nierozpoznane potencjalne mechanizmy uszkodzeń lub wyjaśniając wcześniej niewyjaśnione zachowania podłoża,
- mnogość rodzajów czujników pozwala na dowolną konfigurację pojedynczych czujników lub zestawów pomiarowych. Możliwość umieszczenia różnego rodzaju instrumentów pomiarowych w jednym w pełni wypełnionym zaczynem otworze wiertniczym, np. inklinometrów i piezometrów, pozwala na uzyskania pełniejszego obraz zmian zachodzących w podłożu.

Do głównych OGRANICZEŃ tego rozwiązania należy zaliczyć:

- możliwość kolmatacji filtra,
- dryft elementów pomiarowych, który w dłuższej perspektywie prowadzi do rozkalibrowania czujnika,
- wyładowania atmosferyczne mogą przyczynić się do uszkodzenie elektroniki – konieczność stosowania instalacji przeciwprzepięciowej,
- brak możliwości wymiany uszkodzonych czujników,
- konieczność pozostawienie instalacji w gruncie - wiąże się to z poniesieniem odpowiednich nakładów na zabezpieczenie instalacji przed działaniem osób trzecich,
- w przypadku otwartych piezometrów w wynikach pomiarów należy uwzględnić ciśnienie atmosferyczne.

W tabeli (Tabela 20) zebrano większość zalet i ograniczeń wynikających ze stosowania piezometrów otwartych i czujników do pomiaru ciśnienia porowego wody, w tym również do pomiaru ciśnienia piezometrycznego. Na podstawie powyższych zapisów dokonano optymalizacji pomiarów piezometrycznych i czujników do pomiaru ciśnienia porowego i zestawiono w tabeli (Tabela 21).

Tabela 20 Zalety i ograniczenie w pomiarach piezometrycznych (SLOPE INDICATOR 2004a; FERC 1994, GEONSENSE 2014)

Rodzaj piezometrów	Zalety	Ograniczenia
Piezometr otwarty	Niskie koszty wykonania, prostota wykonania. Pomiar wysokości zwierciadła wody odbywa się najczęściej w sposób bezpośredni. Można przekształcić go na piezometr z odczytem zdalnym poprzez wprowadzenie czujnika do pomiaru ciśnienia wody	Wykonanie pomiaru wysokości zwierciadła wody wymaga dostępu do górnej części rury. Nie mam możliwości wykonania pomiaru w przypadku zamarznięcia lustra wody. W gruntach drobnoziarnistych (spoiстых) i organicznych może występować zjawisko

Rodzaj piezometrów		Zalety	Ograniczenia
		(piezometrycznego) Bardzo dobra długoterminowa niezawodność. Piezometry Casagrandae'a charakteryzują się mniejszym hydrodynamicznym opóźnieniem czasowym niż klasyczne piezometry	opóźnienia reakcji piezometru. Ryzyko łączenia wód z różnych poziomów wodonośnych przy nieumiejętnym montażu. Brak możliwości pomiarów podciśnienia. Automatyzacja może być droga. Filtr może zostać zatkany wskutek wielokrotnego dopływu i odpływu wody Ryzyko zamarzania wody
Piezometr zamknięty oraz czujniki do pomiaru ciśnienia porowego wody	hydrauliczny	Prosty, niezawodny mechanizm. Elementy pomiarowe, do których nie ma dostępu, nie zawierają żadnych elementów ruchomych Końcówka piezometru może być przepłukiwana. Piezometr może być używany do pomiaru przepuszczalności. Możliwość odczytywania ujemnych ciśnień porowych (ciśnienie ssania)	Konieczność uwzględnienia wpływu temperatury Konieczność okresowego odpowietrzenia systemu Piezometr podatny jest na uszkodzenia w wyniku zamarzania Ograniczenie zasięgu użytkowania do pięciu metrów powyżej poziomu piezometrycznego. W gruntach drobnoziarnistych (spoiстых) i organicznych może występować zjawisko opóźnienia reakcji piezometru
	pneumatyczne	Zainstalowane elementy są proste w budowie i nie wymagają kalibracji. Czujniki nie wymagają ochrony przeciwprzepięciowej. Czas reakcji na zmiany ciśnienia porowego jest szybki w większości rodzajów gruntu. Brak problemów z zamarzaniem	Obsługa i wykonanie odczytów wymagają od operatora dużej dokładności i staranności. Odczyt trwa dłużej niż w tradycyjnym piezometrze lub w przypadku czujników strunowych. Czujnik musi być regularnie uzupełniany suchym azotem, ze względu na możliwość wystąpienia zjawiska kondensacji w przewodzie. Trudny do zautomatyzowania Im głębiej zainstalowany czujnik tym czas uzyskania pomiaru wydłuża się.
	strunowe	Czas reakcji na zmiany ciśnienia porowego jest szybki dla większości rodzajów gruntu. Możliwość automatycznej rejestracji odczytów. Wysoka dokładność Można łatwo podłączyć do rejestratora Brak problemów z zamarzaniem Bardzo dobra długoterminowa niezawodność. Często zintegrowane z czujnikiem temperatury Prosta procedura instalacji w otworze wypełnionym zaczynem stwarza możliwość instalacji wielu piezometrów w jednym otworze (system wielopunktowy) lub instalacji piezometru w obudowie inklinometru.	Skalibrowany czujnik umieszczony jest w gruncie na stałe uniemożliwiając jego wymianę. Czujniki wymagają ochrony przeciwprzepięciowej. Możliwość automatycznej rejestracji wyników wymaga instalacji urządzeń rejestrujących oraz dedykowanego oprogramowania.
	wielopunktowe głównie strunowe	Prosta instalacja Idealne, gdy wymagany jest więcej niż jeden odczyt w tym samym miejscu z różnych głębokości Nieograniczona liczba punktów pomiarowych Krótszy czas instalacji Wykorzystane czujniki to najczęściej czujniki strunowe Wysoka dokładność	Skalibrowany czujnik umieszczony jest w gruncie na stałe uniemożliwiając jego wymianę. Czujniki wymagają ochrony przeciwprzepięciowej.

Tabela 21 Optymalizacja pomiarów piezometrycznych i czujników do pomiaru ciśnienia porowego

	Piezometry otwarte	Piezometr Casagrande'a	Piezometry zamknięte	Czujnik do pomiaru ciśnienia wody porowej
Pomiar położenia zwierciadła wody	M/A	M/A		
Pomiar ciśnienia piezometrycznego			A*	A*
Wahania zwierciadła wód podziemnych	M/A	M/A	A*	A*
Pomiar ciśnienia porowego			A*	A*

*M - czujniki pneumatyczne i hydrauliczne – pomiar zwykle manualny, obecnie rzadko stosowane

3.3. Pomiary parcia i naprężeń

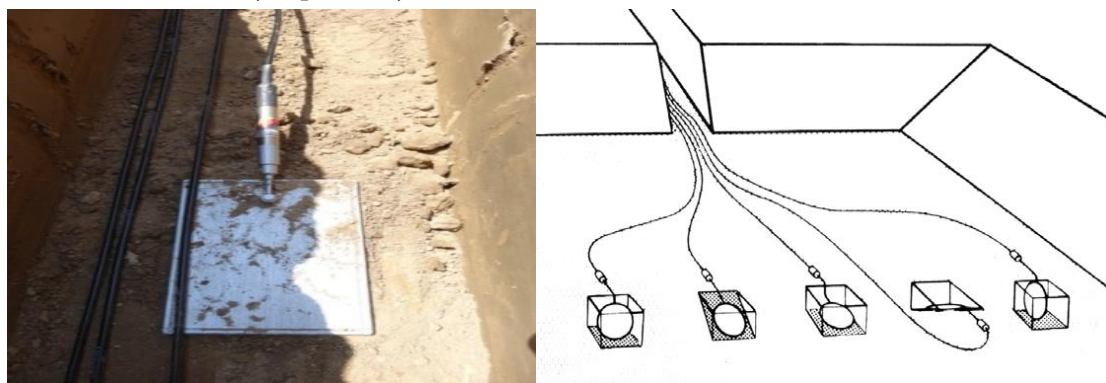
Czujniki do pomiaru naprężeń/parcia gruntu lub obudowy (poduszki ciśnieniowe) - są przeznaczone do pomiaru: naprężeń całkowitych w gruncie, parcia jakie wywiera górotwór na obudowę wyrobisk podziemnych wykonanych metodą betonu natryskowego jak i betonowania klasycznego, a także parcia jakie wywiera grunt/skała na konstrukcję typu przyczółki, ściankę szczelinową czy konstrukcje oporową.

Typowe zastosowania to:

- monitoring naprężeń całkowitych w gruntach i skałach,
- monitoring naprężeń całkowitych wewnątrz i/lub na powierzchni konstrukcji inżynierskich (ziemnych, ściankach szczelinowych, tunelach, palach i innych obiektach budowlanych) w celu weryfikacji założeń projektowych,
- ustalenie wielkości, rozkładu i kierunku działania naprężeń.

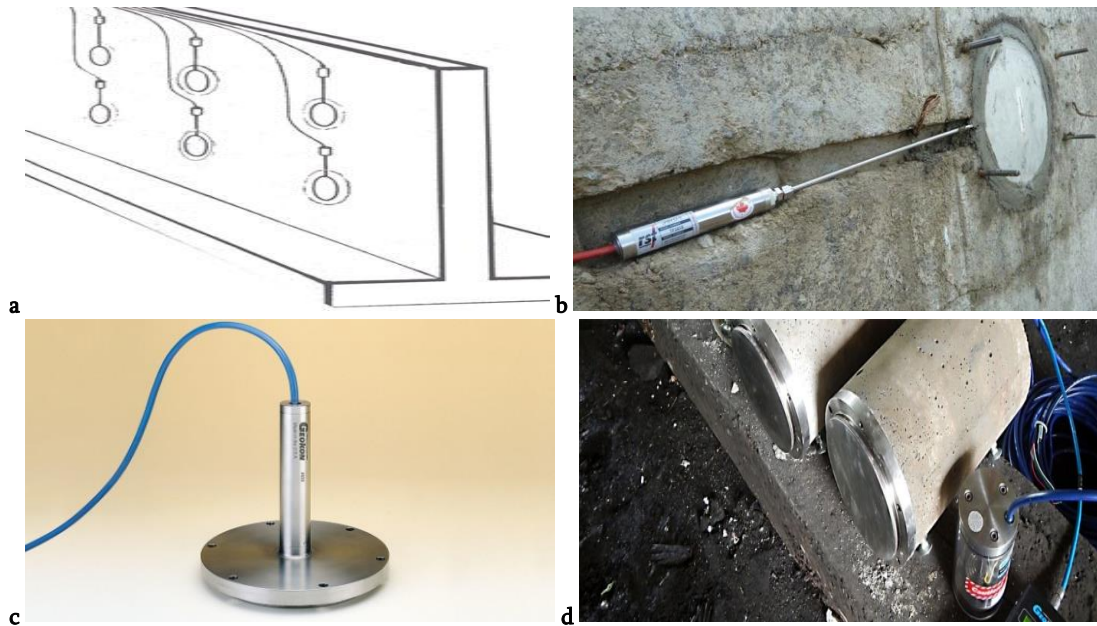
Instalacja jest możliwa na kilka sposobów poprzez:

- montaż w wykopie – (Rysunek 51).



Rysunek 51 Przykładowy czujnik i sposoby instalacji czujników w wykopie (fot. A. Borecka; SLOPE INDICATOR, 2004b)

- montaż na/w konstrukcji stalowej, betonowej lub innej (Rysunek 52)



Rysunek 52 Przykłady rozwiązań czujników i sposoby ich instalacji w obrębie elementów konstrukcyjnych (a) SLOPE INDICATOR, 2004b;b) fot. geosense.co.uk, c) fot. Geokon.com, d) fot. SHM System

- Montaż w masywie skalnym,
- Montaż przez wciskanie (Rysunek 53). Z reguły instalacji dokonuje się w dnie otworu wiertniczego. Do gruntów sypkich i mało spoiowych czujniki mogą być wciskane z powierzchni bez konieczności wykonywania otworu, wówczas wykorzystuje się w tym celu system pneumatyczny sondy CPT.



Rysunek 53 Przykłady czujnika do pomiaru naprężeń wciskanego w podłoże gruntowe lub budowlę ziemną (fot. soil.co.uk)

- Montaż na kontakcie górotwór - obudowa. Czujniki te zostały zaprojektowane w celu optymalizacji pomiarów naprężeń radiacyjnych (promieniowych) i stycznych w obudowie tuneli i innych wyrobiskach podziemnych wykonanych metodą betonu natryskowego jak i betonowania klasycznego. Charakteryzuje się on większą sztywnością niż czujniki zabudowywane w gruncie a zatem są bardziej odpowiednie do pomiaru naprężeń w betonie. Bardzo charakterystycznym elementem w tym typie czujników jest rurka kompensacyjna (wyrównawcza) przy pomocy której można zwiększać ciśnienie płynu wewnątrz poduszki by utrzymywać dokładny kontakt pomiędzy poduszką a materiałem otaczającym (Rysunek 54).



Rysunek 54 Przykłady rozwiązań czujników NATM (www.geokon.com), ich rozmieszczania w obudowie oraz sposobu montażu (www.geokon.com, www.sisgeo.com, geosense.co.uk)

Najczęściej spotykamy układy pojedyncze, jednak niekiedy mogą być one połączone w zestaw składającego się z kilku poduszek tworzących tzn. sondę. Usytuowanie poduszek w sondzie pozwala na określenie wartości i kierunków naprężeń głównych w danych miejscu otworu badawczego (Rysunek 55).



Rysunek 55 Przykład sondy pomiarowej firmy Glöttzl (fot. Budokop Sp. z o.o.)

Czujniki do pomiaru parcia i naprężeń mogą być wykorzystywane w drogownictwie w wielu aspektach: ustalenia wielkości, rozkładu i kierunków naprężeń, do monitorowania naprężenia całkowitego w nasypach drogowych, parcia na styku pomiędzy np. przyczółkiem, fundamentem, ścianką szczelinową czy murem oporowym a ścianami wykopu, monitorowanie zmian rozkładu naprężeń wokół wyrobisk podziemnych czy pomiary naprężeń przed i po dogęszczeniu podłoża lub nasypów.

Wśród głównych ZALET stosowania tych czujników należy wymienić:

- możliwość pomiaru naprężeń lub parcia,
- niski profil czujnika pozwala na jak najlepsze odwzorowanie zachowania gruntu,
- odpowietrzony płyn w poduszce maksymalizuje jej czułość,
- długoterminowa stabilność w przypadku czujników VW, często zintegrowane z czujnikiem temperatury,
- ręczny lub automatyczny odczyt,
- możliwość zdalnego sterowania.

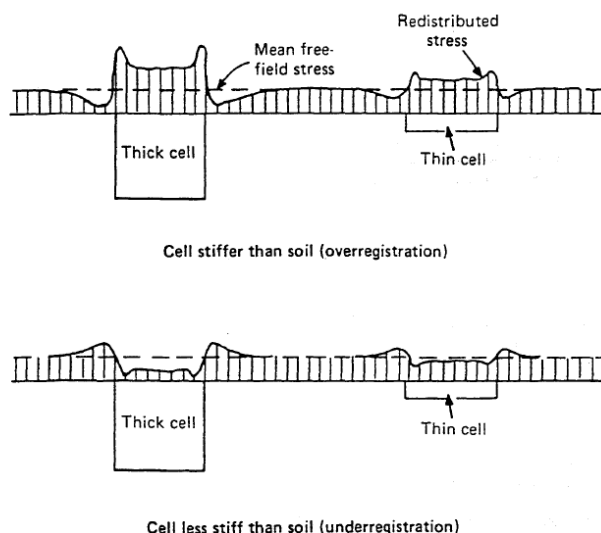
Do głównych OGRANICZEŃ tego rozwiązania należy zaliczyć::

- montaż na etapie budowy
- uszkodzenie elektroniki związane z wyładowaniami atmosferycznymi (dotyczy to czujników strunowych) - w tym zakresie skutecznym rozwiązaniem jest stosowanie instalacji przeciwprzepięciowej,
- sposób i dokładność instalacji (połączenia, sztywność grunt/poduszka) - dopasowanie modułu odkształcenia poduszki ciśnieniowej do podłoża/obudowy jest niekiedy trudne i tym samym kosztowne, modułu odkształcenia i gęstości otaczający materiał powinna być zbliżona do warunków rzeczywistych, zachowanie bezpośredniego kontaktu -
- w przypadku poduszek ciśnieniowych instalowanych na gruncie słabonośnym (podatnym) dokładność pomiaru spada wraz ze zwiększającą się podatnością na jego odkształcenia. Dlatego pomiar z dużą dokładnością całkowitego naprężenia jest niemożliwy,
- niejednorodność podłoża,
- wersja pneumatyczna –możliwy wyłącznie odczyt manualny.

W Tabeli (Tabela 22) zebrano dodatkowo główne czynniki wpływające na pomiary i wskazano sposoby ich niwelacji (na podstawie tabeli Weiler i Kulhawy (1982), z istotnymi zmianami, FHWA-HI-98-034). Wiele z nich może prowadzić do znacznych błędów, wówczas trudno mówić o wysokiej dokładności.

Tabela 22 Główne czynniki wpływające na pomiar naprężeń/parcia z wykorzystaniem poduszek hydraulicznych (Raport FHWA-HI-98-034)

Czynnik	Opis błędów	Korekta
Współczynnik proporcji (stosunek grubości poduszki do średnicy)	Grubość poduszki przyczynia się do zmiany pola naprężeń wokół niej	Użycie stosunkowo cienkich poduszek ($H/D < 1/10$ lub $D/H > 10$) H- grubość, D – średnica
Współczynnik sztywności gruntu / poduszka , (Rysunek 56)	Może spowodować zaniżenie lub zawyżenie wartości. Błąd będzie zmienił się wraz ze zmianą sztywności podłoża	Odpowiedni dobór poduszki w zależności od sztywności podłoża
Rozmiar poduszki	Zbyt małe poduszki podlegają efektowi skali i błędowi wynikającym z ich lokalizacji. Zbyt duże poduszki trudno zainstalować i są podatne na nierównomierne ułożenie (brak bezpośredniego kontaktu z otoczeniem)	Użycie poduszek o przeciętnej średnicy: 200-300 mm
Zachowanie gruntu - naprężenie-odkształcenie	Zły dobór zakresu pomiarowego	Kalibracja poduszki w warunkach zbliżonych do rzeczywistych
Zabudowa	Złe dopasowanie i zagęszczenie materiału powoduje zmianę właściwości materiału i pola naprężeń wokół poduszki	Zastosować odpowiednią technikę zabudowy, aby jak najlepiej odwzorować rzeczywiste warunki - zachowanie minimalnych zmian właściwości materiału i pola naprężeń wokół poduszki
Obciążenia mimośrodowe, nierównomierne i punktowe	Rozmiar ziarn jest zbyt duży dla użytej wielkości poduszki. Niejednorodne podłoża powoduje nierównomierne osiadanie i przenoszenie naprężeń	Zwiększyć aktywną średnicę powierzchni Użyć poduszek mniej podatnych Zachować szczególną ostrożność, aby zmaksymalizować jednorodność podłoża/podsypki
Bliskość budowli i innych wbudowanych instrumentów	Interakcja pól naprężeń w pobliżu instrumentów i konstrukcji powoduje błędy	Utrzymać odpowiedni odstęp
Ugięcie aktywnej powierzchni	Nadmierne ugięcie aktywnej powierzchni (krawędzi) zmienia rozkład naprężeń poduszki poprzez jej wygięcie	Jeśli poduszka projektowa jest dla niewielkich ugięć można ją podlać cienką warstwą wody podczas instalacji (dopasowanie)
Naprężenia docelowe	Nadmierne obciążenie podczas zagęszczania gruntu może trwale uszkodzić poduszkę	Sprawdzić konstrukcję poduszki i przetwornika pod kątem granicy dopuszczalnych obciążeń (poduszka z przetwornikiem pneumatycznym ma wyższą oporność na przeciążania)
Temperatura	Zmiana temperatury powodują zmianę odczytu - wrażliwość na zmiany temperatury	Stosować poduszki zintegrowane z czujnikiem temperatury (korekta wyników)



Rysunek 56 Dobór grubości poduszki hydraulicznej w zależności od sztywności podłoża (FHWA -HI-98-034 za Selig, 1964)

3.4. Pomiary obciążeń i odkształceń elementów konstrukcyjnych

Przyrządy do pomiaru obciążeń i odkształceń elementów konstrukcyjnych można podzielić na trzy grupy: ogniwa obciążeniowe (wykorzystywane w monitoringu kotew, belek rozporowych lub pali), tensometry (czujniki do pomiaru odkształceń stali, betonu, gruntu czy geosyntetyków) oraz systemy światłowodowe. Ta ostatnia grupa coraz prężniej się rozwija i stanowi obecnie alternatywę dla pomiarów konwencjonalnych.

We wszystkich przypadkach wymienione instrumenty są używane do pomiaru wydłużeń (rozprężenia) lub kompresji (ściskania) konstrukcji, ale w niewielkich zakresach.

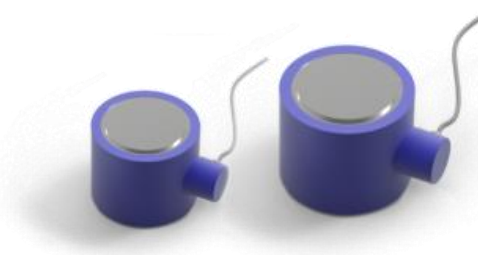
Ogniwa obciążeniowe montowane są najczęściej na stałe na wybranych kotwach. W zależności od zastosowanej konstrukcji składać się mogą z cylindrycznego korpusu wykonanego ze stali nierdzewnej, wewnątrz którego równomiernie po obwodzie zamontowane są tensometry tworzące pełne mostki pomiarowe (połączone ze sobą) (Rysunek 57), a wynikiem pomiaru jest wówczas średnia arytmetyczna odczytów ze wszystkich zabudowanych czujników. Innym rozwiązaniem może być hydrauliczny miernik który składa się z dwóch zespawanych ze sobą po obwodzie płytek ze stali nierdzewnej w kształcie pierścienia, wewnątrz wypełniony jest odpowietrzonym w warunkach próżni, specjalistycznym olejem (Rysunek 58). Budowa ogniwa oraz zastosowanie bardzo sztywnej płyty redystrybuującej zapewnia równomierne rozłożenie naprężeń na całym obwodzie cylindra (płytek) minimalizując tym samym wpływ działania obciążenia mimośrodowego. Ogniwa obciążeniowe muszą być zainstalowane ze szczególną starannością, aby uzyskać płaskie i równoległe powierzchnie nośne, w celu uniknięcia znaczących zakłóceń pod obciążeniem.

Wykorzystuje się je przy:

- próbnym obciążeniach pali,
- do kontroli naciągu kotew gruntowych/skalnych,
- monitorowaniu wydajności cięgien i kotwi zainstalowanych w tunelach, ścianach oporowych, na osuwiskach lub w ścianach głębokich wykopach, elementów rozporowych w głębokich wykopach, odkształceń ścianek szczelinowych itp.

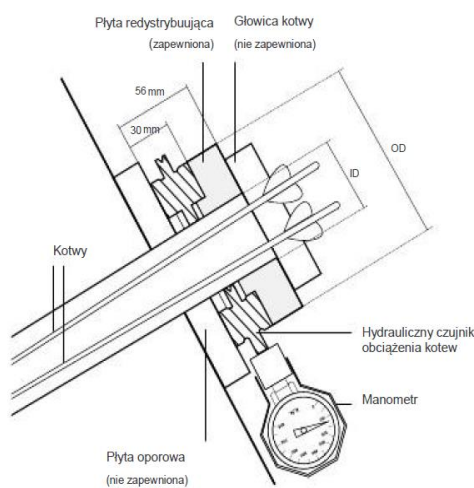


Geokon.com Sisgeo.com



Sisgeo.com (fot. A. Borecka)

Rysunek 57 Przykłady konstrukcji mierników obciążeń kotwi

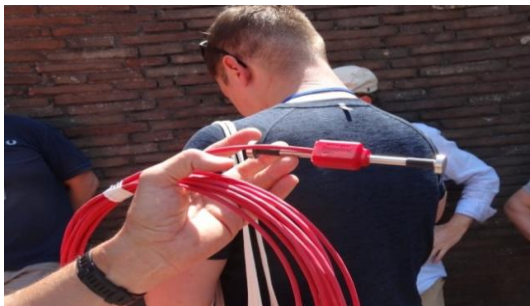


Rysunek 58 Przykłady hydraulicznych mierników obciążeń kotwi (Sisgeo.com)

Tensometry to czujniki bezpośrednio połączone z elementem konstrukcyjnym na jego powierzchni lub zabudowane wewnątrz. Są one stosowane, do określania tymczasowych lub stałych (długoterminowych) odkształceń np. pręseł, prętów zbrojeniowych, rozpór w głębokich wykopach, betonów, ścianek szczelinowych, pręseł, dźwigarów, odkształcalnych elementów mostów czy geosyntetyków (Rysunek 59), a uzyskane dane można wykorzystać do obliczenia szerokiego zakresu parametrów, w tym obciążeń, naprężeń i ciśnienia. Montowanie ich jednocześnie na prętach zbrojeniowych jak i w betonie pozwala określić, jaka część odkształceń/naprężeń przejmowana jest przez beton, a jaka przez stal zbrojeniową (Barcik i in. 2012). Obecnie stosowane czujniki mają zabudowane termistatory do pomiaru temperatury (korelacja).

Systemy światłowodowe pozwalają na uzyskanie takiej samej lub lepszej dokładności pomiarowej niż tensometry. Oferują bardziej wytrzymałe rozwiązania, zapewniając quasi-liniowe (2D) pozyskanie danych wzdłuż całej długości włókna pomiarowego. Technologia ta pozwala na gęstsze

opomiarowanie i wyższą rozdzielczość przestrzenną. Stanowią więc znakomitą alternatywę dla punktowych instrumentów pomiarowych (tensometrów). Kable światłowodowe mogą być zamontowane na powierzchni elementu konstrukcyjnego lub zabudowane wewnątrz. Najnowsza technologia światłowodowa umożliwia jednocześnie uzyskanie pomiarów odkształceń i temperatury - wszystko za pomocą jednego urządzenia do akwizycji danych. Podstawą działania pomiarów światłowodowych jest zjawisko rozpraszania światła wewnątrz światłowodu. Rozróżniamy trzy rodzaje takiego rozpraszania: rozpraszanie Raman'a, Brillouin'a oraz Rayleigh'a. Zjawisko rozpraszania Raman'a wykorzystywane jest do pomiaru zmian temperatury wzdłuż światłowodu. Zjawisko Brillouin'a wykorzystywane jest do pomiaru zmian temperatury, odkształceń oraz drgań światłowodu wzdłuż całej jego długości. Zjawisko rozpraszania Rayleigh'a może zostać wykorzystane do pomiaru zarówno zmian odkształceń, jak i temperatury światłowodu (Bednarski i in. 2015, Kaleta i in. 2017). Systemy światłowodowe stanowią idealne rozwiązanie w sytuacjach wymagających pomiarów w pobliżu różnego rodzaju źródeł hałasu, takich jak np. transformatory mocy, silniki elektryczne, anteny i inne urządzenia, gdyż odznaczają się znaczącą odpornością na zakłócenia radiowe, zakłócenia elektromagnetyczne, wysokie napięcie, środowisko korozyjne i wodę (<http://www.ni.com/white-paper/12338/en/>).



Rysunek 59 Przykłady zastosowania tensometrów (fot. A. Borecka)

W tabeli (Tabela 23) zebrano większość zalet i ograniczeń wynikających ze stosowania instrumentów do pomiaru obciążeń i odkształceń elementów konstrukcyjnych.

Tabela 23 Zalety i ograniczenie w pomiarach piezometrycznych (opracowane na podstawie GEOSENSE 2017, Dunnycliff 1993, FHWA 1998, Sisgeo.com, Geokon.com, <http://www.ni.com/white-paper/12338/en/>),

Rodzaj urządzenia	Zalety	Ograniczenia
Ogniwa obciążeniowe		
ogólne informacje	zastosowanie bardzo sztywnej podstawy zapewnia równomierne rozłożenie naprężeń na całym obwodzie cylindra wewnątrz którego umieszczone są czujniki,	błędy pomiaru – niedopasowanie rozmiaru ogniwa obciążającego do średnicy bloku kotwiącego nierównie przyłożone lub zdeformowanie płytek nośnych brak możliwej centrycznej instalacji ogniwa – niedopasowanie ogniwa obecność źródeł zakłóceń – generatory, silniki, Możliwe błędy i ich korekta przedstawione zostały w tabeli (Tabela 24)
hydrauliczny	niski profil, niskie koszty, wyposażone w miernik Bourdona oferuje szybkie i proste odczyty wybór formy pomiaru – manualny lub automatyczny mała objętość płynu hydraulicznego w komorze, oraz określona geometrii samej kotwy umożliwia wysoce dokładne pomiary	najmniejsza dokładność (wpływ temperatury) bardzo wrażliwe na zmiany temperatury, co ma wpływ na dokładność odczytu jeśli jest podłączony manometr Bourdon wymagany jest bezpośredni dostęp a także jego widoczność
elektryczne	wybór formy pomiaru – manualny lub automatyczny konstrukcja czujnika minimalizuje wpływ działania obciążenia mimośrodowego - równomierna zabudowa czujników po obwodzie korpusu wynikiem pomiaru jest średnia arytmetyczna odczytów ze wszystkich zabudowanych czujników dodatkowo czujniki wyposażone są w termistor do pomiaru temperatury są bardzo dokładne ale w krótkim okresie czasu mogą być używane do pomiaru obciążeń dynamicznych	niska moc elektryczna możliwe są błędy wynikające z wilgoci, temperatury i połączeń elektrycznych instalacja przyrządów pomiarowych wymaga dużych umiejętności i doświadczenia potrzeba ochrony odgromowej rzadziej stosowane niż czujniki strunowe
strunowe	najbardziej wytrzymałe i stabilne w długim okresie czasu wybór formy pomiaru – manualny lub automatyczny konstrukcja czujnika minimalizuje wpływ działania obciążenia mimośrodowego - równomierna zabudowa czujników po obwodzie korpusu – ułatwi zauważalne nierównomierne obciążenie wynikiem pomiaru jest średnia arytmetyczna odczytów ze wszystkich zabudowanych czujników dodatkowo czujniki wyposażone są w termistor do pomiaru temperatury	możliwość uszkodzenia struny w związku z wyładowaniami atmosferycznymi - w tym zakresie skutecznym rozwiązaniem jest stosowanie instalacji przeciwprzebiegowej instalacja przyrządów pomiarowych wymaga dużych umiejętności i doświadczenia nie można ich użyć do pomiaru obciążeń dynamicznych o wysokiej częstotliwości
Tensometry		
ogólne informacje	są bardzo dokładne wyposażone są w termistor do pomiaru temperatury	pomiary punktowe w dłuższej perspektywie mogą być podatne na przemieszczanie zwłaszcza jeśli nie są odpowiednio zakotwione (np. przyklejone) potrzeba ochrony odgromowej instalacja przyrządów pomiarowych wymaga dużych umiejętności i doświadczenia

Rodzaj urządzenia	Zalety	Ograniczenia
elektryczne* rzadziej stosowane niż czujniki strunowe	do pomiaru odkształceń dynamicznych	niska moc elektryczna możliwe są błędy wynikające z wilgoci, temperatury i połączeń elektrycznych
strunowe		nie można ich użyć przy pomiarach odkształceń dynamicznych o wysokiej częstotliwości
Systemy światłowodowe		
ogólne informacje	<p>miar ciągły na całej długości włókna światłowodowego - pomiary quasi-liniowe prostsze i mniej czasochłonna instalacja** nie wymagają kalibracji po początkowym zerowaniu instalacji</p> <p>możliwość jednoczesnych pomiarów odkształceń i temperatury</p> <p>osiągają wyższą rozdzielczość na poziomie mikro odkształceń niż tradycyjne przyrządy pomiarowe</p> <p>odporne na niekorzystne warunki środowiskowe (np. zakłócenia elektromagnetyczne, wysokie napięcie, hałas, wodę itp.)</p> <p>możliwość instalacji długich odcinków (nawet w kilometrach)</p> <p>są znacznie bardziej odporne na niewłaściwe metody instalacji.</p>	<p>interpretacja wyników wymaga dużych umiejętności i doświadczenia</p> <p>przerwanie ciągłości – brak możliwości pomiaru</p> <p>miar automatyczny - kosztowny</p> <p>drogi reflektometr i interfejs</p>

**dla porównania, zainstalowanie 3-5 czujników tensometrycznych trwa w przybliżeniu tyle samo czasu, co instalowanie 10-metrowego kabla światłowodowego - odpowiednik około 1000 punktów pomiarowych z odstępem o szerokości 6 mm.

Automatyczne gromadzenie danych jest bardzo pomocne w przypadku miejsc trudno dostępnych lub znajdujących się w odległych lokalizacjach.

W Tabeli (Tabela 24) zebrano główne czynniki wpływające na błędy w pomiarach ogniw obciążeniowych i wskazano sposoby ich korekty. Wiele z nich może prowadzić do znacznych błędów, wówczas trudno mówić o wysokiej dokładności.

Tabela 24 Główne czynniki wpływające na błędy w pomiarach ogniw obciążeniowych i wskazano sposoby ich korekty (opracowano na podstawie GEONSENSE 2017)

Czynnik	Opis błędów	Korekta
Rozmiar ogniwa	<p>Źle dobrana średnica wewnętrzna ogniwa obciążnikowego.</p> <p>Różni producenci mogą mieć różne rozmiary ogniw dla równoważnych obciążeń.</p>	<p>Jeśli średnica głowicy kotwy wynosi x, zaleca się, aby najmniejsza średnica wewnętrzna ogniwa wynosiła</p> $\varnothing_{\min} = x + 5 \text{ mm}$
Obciążenia mimośrodowe Brak centryczności - zły rozmiar ogniwa pomiarowego	<p>Obciążenie nie jest przykładane równomiernie na ogniwo.</p> <p>Część czujników ogniwa obciążeniowego będzie wskazywała zawyżone (bardziej obciążona) a część zaniżone (mniej obciążona) wartości.</p>	<p>Równomierne rozłożenie czujników po obwodzie ogniwa pomiarowego minimalizuje wpływ działania obciążenia mimośrodowego poprzez uśrednianie wyników pomiarów ze wszystkich czujników.</p> <p>Zastosowanie bardzo sztywnej podstawy zapewnia równomierne rozłożenie obciążeń na całym obwodzie ogniwa.</p> <p>Zastosowanie płyt oporowych (podkładek dystrybujących) i odpowiednich procedur instalacyjnych</p>
Odniesienie do pomiaru referencyjnego (próbne obciążenia) Rozmiar ogniwa vis rozmiar siłownika hydraulicznego	<p>Błąd pomiaru:</p> <p>źle dobrana średnica zewnętrzna ogniwa obciążnikowego do średnicy zewnętrznej siłownika hydraulicznego</p>	<p>Odpowiedni dobór rozmiaru ogniwa obciążeniowego</p>

Czynnik	Opis błędów	Korekta
	<p>\emptyset siłownika hydraulicznego < \emptyset ogniwo obciążeniowe \equiv wyższe wartości obciążenia</p> <p>\emptyset siłownika hydraulicznego = \emptyset ogniwo obciążeniowe \equiv rzeczywiste wartości obciążenia</p> <p>\emptyset siłownika hydraulicznego > \emptyset ogniwo obciążeniowe \equiv niższe wartości obciążenia</p>	
Rozmiar i sztywność płyt oporowych (podkładek dysyrujących)	Nierówne lub zdeformowane płyty oporowe będą miały wpływ na odczyty	Różne typy ogniw mogą wymagać zastosowania jednej lub dwóch płyt oporowych aby zapewnić równomierny rozkład obciążenia Przy obciążeniach do 4500 kN płyty oporowe powinny mieć grubość 35mm ↔ 50mm.
Pojemność ogniwa obciążnikowego	Zbyt mały zakres pomiarowy	Zaleca się, aby wybrane ogniwo obciążeniowe działało w zakresie od 50% do 80% skalibrowanego zakresu obciążenia.
Temperatura	Zmiana temperatury powodują zmianę odczytu - wrażliwość na zmiany temperatury Wpływy termiczne są niekiedy trudne do rozpoznania, ponieważ wpływają one nie tylko na ogniwo obciążnikowe, ale także na wszelkie elementy konstrukcyjne je otaczające, tj. cegły, beton lub konstrukcje stalowe	Stosowanie czujników zintegrowane z czujnikiem temperatury (korekta temperatury) Szczytywanie pomiarów zawsze o tej samej porze dnia, najlepiej wczesnym rankiem tuż przed wschodem słońca.

3.5. Pomiary drgań

Pojęcie drgań ma charakter ogólny i odnosi się do procesów, w których opisywane wielkości przyjmują wartości rosnące i malejące naprzemiennie w kolejnych przedziałach czasu. Jeżeli siły wymuszające i reakcja obiektu są opisywalne przy pomocy zależności funkcyjnych, drgania te określa się jako deterministyczne. Szczególnym przypadkiem drgań deterministycznych są drgania okresowe, a ich podstawowym przypadkiem są drgania harmoniczne. W praktyce przebieg obserwowanej wielkości może być złożeniem wielu drgań harmonicznych.

Wśród podstawowych charakterystyk dynamicznych konstrukcji można wskazać:

- częstotliwości drgań własnych,
- postaci drgań własnych (odpowiadające częstotliwościom),
- logarytmiczne dekrementy tłumienia drgań.

Częstotliwością drgań okresowych jest odwrotność okresu drgań. Jeżeli układ drgający posiada wiele częstotliwości, można je wyznaczyć, stosując analizę widmową (spektralną) drgań.

Postać drgań nazywa się konfiguracją zbioru punktów układu drgającego w chwili, kiedy nie wszystkie wychylenia punktów z położeń średnich są równe zeru. Większość układów drgających posiada nieskończenie wiele postaci drgań. Ich wyznaczenie jest przedmiotem analizy modalnej. Bieżąca postać układu drgającego jest zawsze złożeniem wszystkich postaci drgań, jednak nie wszystkie muszą ujawniać się w tym samym stopniu.

Tłumienie drgań występuje w każdym rzeczywistym układzie drgającym i oznacza obniżenie wartości wielkości zmiennej charakteryzującej drganie (np. przemieszczenia) wskutek rozproszenia energii mechanicznej. Powszechnie stosowanym parametrem jest logarytmiczny dekrement tłumienia, określony jako logarytm naturalny ilorazu dwóch kolejnych amplitud w tym samym kierunku.

Celowość prowadzenia pomiarów drgań konstrukcji została określona w normie ISO 4866:2010.

Według niej pomiar drgań polega na empirycznym wyznaczeniu charakterystyk dynamicznych konstrukcji, które są opisywane przez częstotliwości i postaci drgań własnych oraz współczynniki tłumienia. Scharakteryzowanie zarówno właściwości drgań wymuszających, jak i odpowiedzi konstrukcji, może być wykonane przy użyciu różnych czujników przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia drgań. Wszystkie te wielkości mogą być mierzone bezpośrednio lub wyznaczone na podstawie pozostałych poprzez właściwe całkowanie lub różniczkowanie. Norma ISO 4866:2010 zaleca jednak dobór czujnika pozwalającego na bezpośredni pomiar konkretnej wielkości i unikanie procesu całkowania lub różniczkowania. Szczególną uwagę należy zwracać podczas całkowania sygnałów o niskiej częstotliwości drgań. Ten proces wymaga ostrożności i pewności co do amplitudowo-fazowej odpowiedzi przetwornika oraz warunków pomiaru.

Drgania powinny być charakteryzowane na podstawie ciągłych pomiarów amplitudy, rejestrowanych w dostatecznie długim czasie i prowadzonych z dokładnością wystarczającą do przeprowadzenia analizy widmowej. W ramach wykonania pełnej analizy odpowiedzi dynamicznej norma ISO 4866:2010 zaleca użycie systemu umożliwiającego oszacowanie częstotliwości z dokładnością $\pm 0,5\%$ oraz tłumienia z dokładnością $\pm 20\%$.

Większość uszkodzeń konstrukcji wywołanych przez drgania pochodzenia antropogenicznego pojawia się przy zakresie częstotliwości wymuszających od 1 do 150 Hz. Źródła naturalne, takie jak trzęsienia ziemi czy wymuszenie wiatrem, przenoszą energię powodującą zniszczenia na niskich częstotliwościach, z przedziału od 0,1 do 30 Hz. Zakresy odpowiedzi konstrukcji dla różnych źródeł drgań podaje norma ISO 4866:2010. W tabeli (Tabela 25) przedstawiono niektóre z nich. Wartości graniczne są wartościami skrajnymi, ale wskazują na wielkości, które mogą wystąpić i które należy uwzględnić w planowaniu pomiaru.

Tabela 25. Zakresy odpowiedzi konstrukcji dla wybranych źródeł drgań (wg ISO 4866:2010)

Źródło drgań	Zakres częstotliwości [Hz]	Zakres przemieszczeń [mm]	Zakres prędkości [mm/s]	Zakres przyspieszeń [mm/s ²]	Charakterystyka czasowa źródła
Ruch (drogowy, kolejowy, podziemny)	1÷100	0,001÷0,2	0,2÷50	20÷1000	ciągłe / chwilowe
Maszyny (zewewnętrzne i wewnętrzne)	1÷300	0,001÷1	0,2÷100	20÷1000	ciągłe / chwilowe
Wbijanie pali	1÷100	0,01÷0,05	0,2÷100	20÷2000	chwilowe
Trzęsienia ziemi	0,1÷30	0,01÷100	0,2÷400	20÷20000	chwilowe
Wiatr	0,1÷10	0,01÷100	–	–	chwilowe

Przy doborze systemu pomiarowego do monitoringu drgań należy zwrócić szczególną uwagę na następujące parametry (Stypuła, 2006):

- wymagany rodzaj wartości mierzonej (przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie),
- zakres pomiarowy, czyli maksymalna wartość amplitudy, jaką można pomierzyć z określoną dokładnością (Tabela 26),
- wymagany zakres częstotliwości układu pomiarowego (Tabela 26),
- czułość i dokładność systemu pomiarowego.

Najpopularniejszą grupę urządzeń stosowaną do pomiarów drgań stanowią akcelerometry (przyspieszeniomierze) (Rysunek 60 a). Służą do pomiaru przyspieszenia drgań, a ich użycie wymaga bezpośredniego montażu na badanym obiekcie. Wśród nich można wyróżnić czujniki piezoelektryczne, piezoporowe i pojemnościowe, przy czym dwa ostatnie rodzaje są spotykane w czujnikach typu MEMS (micro-electro-mechanical systems). Akcelerometry piezoelektryczne wykorzystują kryształy o właściwościach piezoelektrycznych, na powierzchni których powstaje

ładunek elektryczny wskutek obciążenia mechanicznego. Działanie czujników piezoporowych opiera się na zmianie ich oporu elektrycznego w wyniku obciążenia, a pojemnościowych – na zmianie pojemności elektrycznej płytek zbliżających się do siebie pod wpływem przyspieszenia.

Akcelerometry mierzą przyspieszenie wzdłuż określonej osi, przy czym istnieją czujniki dwuosiowe i trójosiowe. Do badania drgań o niskich częstotliwościach szczególnie przydatne są akcelerometry pojemnościowe. Ogólna zasada przy doborze akcelerometrów mówi, że im większy jest czujnik, tym większa jest jego czułość, ale mniejszy zakres pomiarowy, co przedstawiono jako przykład w tabeli (Tabela 26).

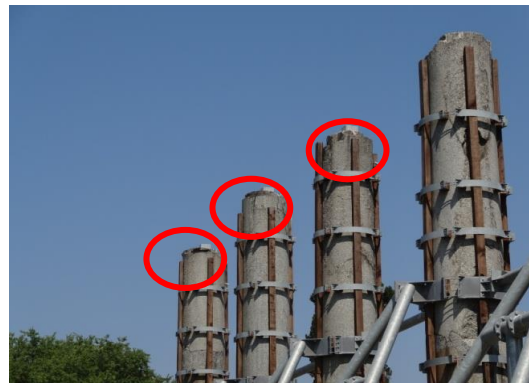
Tabela 26 Przykładowa specyfikacja akcelerometrów pojemnościowych wybranego producenta (g oznacza przyspieszenie ziemskie, 9,81 m/s²)

Czułość napięciowa	Zakres pomiaru	Zakres częstotliwości	Rozdzielczość	Masa	Zastosowanie
10 000 mV/g	0,5 g	0,1÷200 Hz	10 µg	635 gramów	pomiar drgań obiektów inżynierskich, konstrukcji i fundamentów, gruntu
1000 mV/g	5 g	0,5÷2000Hz	100 µg	210 gramów	
10 mV/g	500 g	1÷10 000 Hz	0,005 g	1,7 grama	zastosowania ogólne
0,1 mV/g	50 000 g	4÷10 000 Hz	0,5 g	4,2 grama	czujnik uderowy

Inną grupą urządzeń zamieniających drgania mechanicznej na zmienny sygnał elektryczny są sejsmometry i geofony. Przyjęto, że sejsmometrem nazywa się czujnik, który mierzy przemieszczenia, natomiast geofony służą do pomiaru prędkości drgań. W porównaniu z akcelerometrami czujniki te służą do pomiaru drgań o niskich częstotliwościach, tzn.:

- 0,001÷150 Hz – w przypadku sejsmometrów,
- 1÷1000 Hz – w przypadku geofonów (Rysunek 60 b).

Z tego powodu czujniki te są stosowane do pomiaru drgań w ośrodkach geologicznych, wywołanych np. wstrząsami górniczymi, oraz do pomiaru drgań sejsmicznych.



a) przykłady alcelerometrów (fot. A. Borecka)



b) przykłady geofonów (fot. A. Borecka)

Rysunek 60 Przykłady stacjonarnych instrumentów do pomiaru drgań

Pozostałe urządzenia można określić jako bezkontaktowe, gdyż do wyznaczenia amplitudy przemieszczeń drgań wykorzystują falę elektromagnetyczną (laserową, radarową) wysyłaną i odbitą od badanego obiektu. Zasięg pomiaru zależy w dużym stopniu od odbijalności materiału pokrywającego badany obiekt. Przykładowe parametry tych urządzeń zestawiono w tabeli (Tabela 27).

Tabela 27 Przykładowe specyfikacje bezkontaktowych urządzeń do pomiaru drgań

Urządzenie	Zasięg	Maksymalna częstotliwość próbkowania	Rozdzielczość / błąd pomiaru	Długość fali	Zastosowanie
wibrometr laserowy	1÷4 m	25 000 Hz	ok. 0,34 nm (dla 5 m)	1550 nm	punktowy pomiar przemieszczeń (budownictwo, przemysł maszynowy)
	5÷300 m	2000 Hz			
radar interferometryczny Rysunek 61	5÷1000 m	200 Hz	0,1 mm	17,5 mm	obiekty inżynierskie, jednoczesny pomiar wielu punktów



Rysunek 61 Przykład wykorzystania radaru interferometrycznego do pomiaru drgań (fot. A. Borecka)

W tabeli (Tabela 28) zestawiono główne zalety i ograniczenia instrumentów pomiarowych wykorzystywanych do pomiaru drgań

Tabela 28 Główne zalety i ograniczenia urządzeń do pomiaru drgań

Urządzenie	Zalety	Ograniczenia
czujniki: akcelerometry sejsmometry geofony	niewysoki koszt duża różnorodność czujników do różnych zastosowań możliwy jednoczesny pomiar w 3 osiach	błędy systematyczne (np. dryft czujnika) wymagany dostęp do obiektu wyznaczenie amplitudy przemieszczeń wymaga procesu całkowania (z wyjątkiem sejsmometrów) pomiar punktowy
urządzenia bezkontaktowe: wibrometr laserowy radar interferometryczny	niewymagany dostęp do obiektu zróżnicowany zasięg pomiaru bardzo wysoka dokładność wyznaczenia przemieszczenia możliwość jednoczesnego pomiaru wielu punktów	wysoki koszt pomiar drgań w jednym kierunku wpływ warunków atmosferycznych lub ich zmienności wpływ materiału, z którego wykonany jest badany obiekt

Załączniki

Załącznik 4 Przykłady i terminologia

Załącznik 4.1 Przykłady geotechnicznych i geodezyjnych urządzeń/metod pomiarowych wykorzystywanych w monitoringu

Na podstawie PN-EN ISO 18674-1:2015 oraz Mazzanti 2017. Nie są to oczywiście lista zamknięta.

Mierzony parametr	Przyrządy/metody geotechniczne	Przyrządy/metody geodezyjne teledetekcyjne
przesunięcie punktu pomiarowego, uwzględniające również szczególne przypadki takie jak pionowa składowa przemieszczenia (osiadanie, wypieranie), oraz wyprowadzone parametry takie jak wychylenie (przechył), odkształcenie	wskazniki rozwarcia rys (płytki), szczelinomierze, pochylomierze, wahadła, inklinometry, deflektometry, pomiary TDR, repery wgłębne (pomiar punktowy) ekstensometry, konwergometry hydroniwelatory, hydroprofilometry, kable światłowodowe	niwelatory, pomiary tachimetryczne (dalmierze, manualne, automatyczne), pomiary GNSS (GPS), skaning laserowy (naziemny, lotniczy, UAV) interferometria radarowa (naziemna i satelitarna), fotogrametria (lotnicza, UAV) techniki cyfrowej korelacji obrazu (DIC)
profile przemieszczeń pionowych i poziomych gruntu, fundamentów, ścianek szczelinowych	systemy inklinometryczne poziome i pionowe (łańcuchowe, modułowe), wielopunktowe hydroniwelatory hydroprofilometry, kable światłowodowe	brak narzędzi pomiarowych
wahania zwierciadła wody	piezometry otwarte: studnie, otwory obserwacyjne, piezometry zamknięte: czujniki do pomiaru ciśnienia porowego wody	brak narzędzi pomiarowych
ciśnienie wody	czujniki do pomiaru ciśnienia porowego wody	brak narzędzi pomiarowych
drżania (prędkość, przyspieszenie)	akcelerometry, geofony, sejsmometry	pomiary GNSS (GPS) naziemna interferometria radarowa, wibrometr laserowy techniki cyfrowej korelacji obrazu (DIC)
ciśnienie naprężenie siła	czujniki do pomiaru naprężeń/parcia gruntu /skały czujniki do pomiaru naprężeń/parcia obudowy czujnik do pomiaru obciążeń kotwi czujnik do pomiaru obciążeń konstrukcji tensometry kable światłowodowe	brak narzędzi pomiarowych
temperatury	termometry, termistory kable światłowodowe	kamery termowizyjne
wilgotności gruntu	czujniki do pomiaru wilgotności kable TDR	satelity operujące w zakresie radarowym

Załącznik 4.2 Przykłady urządzeń pomiarowych wykorzystywanych w monitoringu meteorologicznym (SHM System)

Nie są to oczywiście lista zamknięta.

Wielkość mierzona	Rodzaj czujnika
opady deszczu, śniegu	deszczomierz, śniegomierz
temperatura powietrza	czujnik temperatury
prędkość i kierunek wiatru	anemometr, czujnik kierunku wiatru
ciśnienie atmosferyczne	barometr
wilgotność	higrometr
pomiar nasłonecznienia	pyranometr

Załącznik 4.3 Przykłady geotechnicznych i geodezyjnych urządzeń/metod pomiarowych wykorzystywanych w monitoringu w zależności (na podstawie PN-EN ISO 18674-1:2015 oraz Mazzanti 2017)

Nie jest to oczywiście lista zamknięta.

Tabela D.1 – Kluczowe parametry geotechniczne i przykłady instrumentów pomiarowych

Parametr	Jednostka	Szczegóły/przykład	Instrument pomiarowy (przykład)
Lokalizacja	m	długość i szerokość geograficzna, wysokość punktu pomiarowego (związane z globalnym układem współrzędnych = pomiar bezwzględny)	tachimetr niwelatory GNSS
Odległość	m	odległość pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi	ekstensometr linkowy dalmierze tachimetry szczelinomierze
Nachylenie	stopień	nachylenie osi pomiaru (np. wzdłuż osi otworu)	inklinometry pochyłomierze wahadła
Orientacja	stopień	orientacja (kierunek) osi pomiaru (np. azymut odchylenia)	deflektometr umieszczony w otworze żyroskop
Siła	kN	rozkład sił elementów konstrukcyjnych (kotwy, filary, podpory, liny, ciągną..).	siłomierze, tensometry czujniki do pomiaru obciążeń kotew, ciągnien, pali
Napężenie	kPa	w słabych gruntach, nasypach, betonem na powierzchni styku (np. konstrukcja fundamentu)	czujniki do pomiaru naprężeń/parcia obudowy
	MPa	w mocnych gruntach i skałach	czujniki do pomiaru naprężeń/parcia gruntu/skał
Ciśnienie	kPa	ciśnienie porowe	czujniki ciśnienia porowego
Temperatura	°C	parametr, który często oddziałuje geotechniczny system pomiarowych	czujniki do pomiaru temperatury kable światłowodowe kamery termowizyjne
Prędkość	m/s	prędkość	geofony
Przyspieszenie	m/s ²	drgania związane z: - trzęsieniami/tąpnięciami - wstrząsy	akcelerometry

Tabela D.2 – kluczowe parametry geotechniczne i przykłady instrumentów pomiarowych

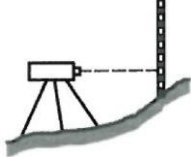
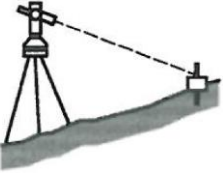
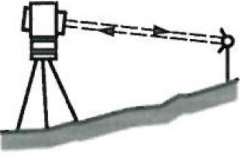
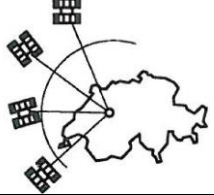


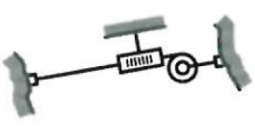
Parametr kluczowy		Instrument pomiarowy (przykład)(zobacz także Aneks E)
Pomiar w punkcie	Zmiana lokalizacji: przemieszczenie punktu (ogólnie w 3-D; bezwzględne i/lub względne)	Metody geodezyjne i teledetekcyjne (patrz tabela 4)
	Pionowe składowe tylko dla: - osiadania - pęcznienie	dla składowej pionowej za pomocą: - niwelatory - hydroprofilometry, - hydroniwelatory - repery wgłębne
	Pozioma składowa tylko dla: - poziome przemieszczenie	Dla składowej poziomej za pomocą: wahadło (normalne lub odwrócone)
	Zmiana lokalizacji: przemieszczenie nieciągłości (tylko względnie) - prostopadła do nieciągłości (w sensie otwierania/zamykania) - wzdłuż nieciągłości (dwa niezależne kierunki)	Szczelinomierze: - 1-D szczelinomierze - 3-D szczelinomierz precyzyjne
	Zmiana wielkości siły	- czujniki do pomiaru obciążeń kotew, ciągien - tensometry - siłomierze
Zmiana naprężenia	dla gruntu, betonu i nasypu	- czujnik do pomiaru naprężeń (np. poduszki ciśnieniowe)
	dla skał	- czujnik naprężenia umieszczony w otworze - miernik/czujnik deformacji umieszczony w otworze
Zmiana ciśnienia porowego		- czujniki do pomiaru ciśnienia porowego
Pomiar wzdłuż linii	Zmiana odległości (przedłużanie/skracanie) (pomiar wzdłuż linii):	- ekstensometry - tensometry - ekstensometry taśmowe (konwergometry)
	Zmiana nachylenia/przechylenia (w płaszczyźnie pionowej) (w poprzek linii):	- inklinometry - pochyłomierze
	Zmiana kierunku/orientacji (w płaszczyźnie poziomej)	- deflektrometr - kompas

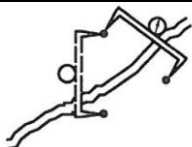
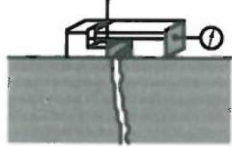

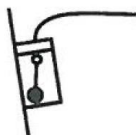
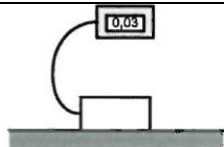
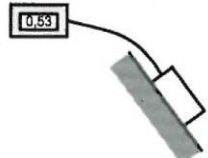
Załącznik 4.4 W załączniku E normy PN-EN ISO 18674-1:2015 zestawiono najbardziej powszechne metody monitorowania wykorzystywane w zagadnieniach geoinżynierskich

Wśród nich można wyróżnić pięć grup metod:


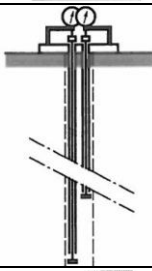
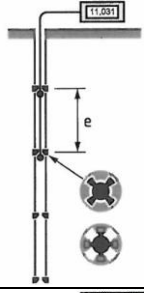
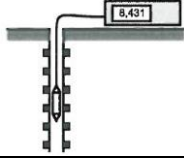

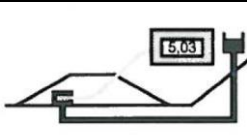

Grupa I - monitoring powierzchniowy - obejmuje grupę metod geodezyjnych (metody klasyczne, naziemny i satelitarny skaning laserowy, naziemna i satelitarna interferometria radarowa) oraz wybrane rodzaje urządzeń do pomiaru deformacji (odkształceń) powierzchniowych (szczelinomierze, pochylomierze, ekstensometry taśmowe i inne).

Tabela 29 Monitoring geotechniczny - powszechnie stosowane narzędzi i metody pomiarowe (PN-EN ISO 18674-1:2015)

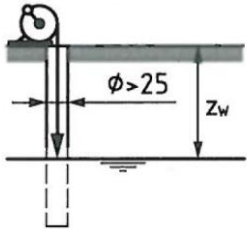
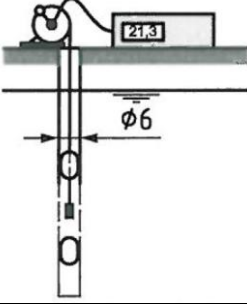
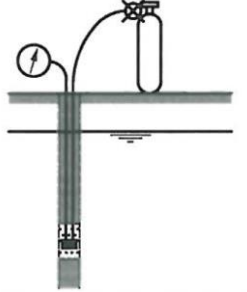
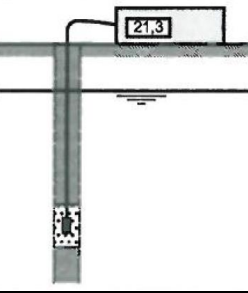
GRUPA I	MONITORING PRZEMIESZCZEŃ POWIERZCHNIOWYCH		
	Schemat (szkic)	Zakres pomiarowy	Niepewność pomiaru (orientacyjne/charakterystyczne zakresy)
Niwelatory Δz		Bardzo duży	2mm/0,5mm (w zależności od rozmieszczenia punktów pomiarowych)
Tachimetr $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ pośrednio Δl		Bardzo duży	1mm ... 5mm (w zależności od mierzonej odległości)
Dalmierz elektroniczny Δl		Bardzo duży	0,5mm ... 3 mm (w zależności od mierzonej odległości)
GPS (Global Positioning System) $\Delta x, \Delta y, \Delta z$		Bardzo duży	20mm (z czterech satelitów i odbiorników rozmieszczonych w punktach odniesienia (bazowych))
Szczelinomierz linkowy (druć inwarowy napinany (naciągana) z użyciem obciążników) Δl		3m (bardzo duży jeśli przewód jest dołączony, zależny od warunków lokalnych)	10mm (w zależności od długości struny)
Dalmierz z wykorzystaniem drutu inwarowego Δl		100mm	0,1mm
Pomiary konwergencji taśmą stalową (ekstensometr taśmowy) Δl		50 mm (czujniki zegarowe)	1mm

GRUPA I	MONITORING PRZEMIESZCZEŃ POWIERZCHNIOWYCH		
	Schemat (szkic)	Zakres pomiarowy	Niepewność pomiaru (orientacyjne/charakterystyczne zakresy)
Szczelinomierze precyzyjne 1-D lub 2-D $\Delta x, \Delta y$		5mm ...50 mm	0,01mm ...0,1mm
Szczelinomierz precyzyjny 3-D $\Delta x, \Delta y, \Delta z$		5mm ...50 mm	0,02mm ...0,2mm
Pochyłomierz z niwelatorem precyzyjnym $\Delta \alpha$		10°	0,1mm/m lub 20''
Pochyłomierz z czujnikiem wahadłowym $\Delta \alpha$		w zależności od układu i zakresu pomiarowego, zwykle: 5°/10°/20°/30°	0,5% zakresu pomiarowego
Precyzyjny pochyłomierz z wbudowanym akcelerometrem $\Delta \alpha$		w zależności od układu i zakresu pomiarowego, zwykle: 1°/15°/30°/45°/90°	0,02% zakresu pomiarowego
Pochyłomierz z pomiarem elektronicznym $\Delta \alpha$		1°/10°/45°/60°	0,5 ... 1% zakresu pomiarowego

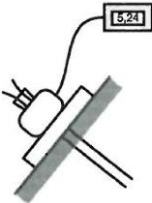
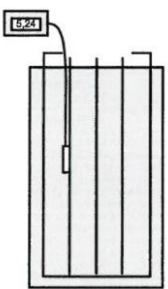

Grupa II - monitoring przemieszczeń – pomiary przemieszczeń podłoża lub konstrukcji inżynierskich z wykorzystaniem inklinometrów, ekstensometrów oraz czujników do pomiarów osiadań.

GRUPA II	MONITORING WGLĘBNY PODŁOŻA LUB MONITORING KONSTRUKCJI- pomiary przemieszczeń		
	Schemat (szkic)	Zakres pomiarowy	Niepewność pomiaru (orientacyjne/charakterystyczne zakresy)
Inklinometry $\Delta\alpha$ (przemieszczenia mierzone narastająco)		00...300 00...900	1mm...2mm/10m
Ekstensometr prętowy Δl		50mm rozciąganie 30mm skracanie	0,1mm
Mobilny (przenośny) ekstensometr (wielopunktowy pomiar) $\Delta l/e$ (wyznaczanie przemieszczeń wzdłuż kolumny pomiarowej w przyrostach e (= bazie pomiarowej))		5mm...100mm	0,005mm...0,1mm/m
Mobilny (przenośny) ekstensometr (jednopunktowy pomiar) Δd		30mm...50mm/m	3mm...5mm
Hydroniwelator Δz		100mm...200mm	1mm
Hydroniwelator z czujnikiem do pomiaru ciśnienia Δz		bez ograniczeń	5mm..10mm 0,1% zakresu pomiarowego przetwornika ciśnieniowego
Ekstensometr światłowodowy Δl		1% aktywnej długości włókna	0,01mm

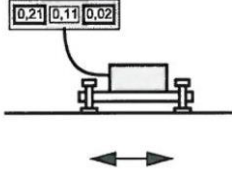
Grupa III - monitoring położenia zwierciadła wody i ciśnienia porowego - dotyczy piezometrów oraz czujników do pomiaru ciśnienia porowego wody.

GRUPA III	MONITORING POZIOMU WODY I CIŚNIENIA POROWEGO		
	Schemat (szkic)	Zakres pomiarowy	Niepewność pomiaru (orientacyjne/charakterystyczne zakresy)
<p>Studnie lub otwarte piezometry z manualnym oprzyrządowaniem do pomiaru poziomu wody (piezometry otwarte)</p> <p>Z_w</p>		Bardzo duży	10mm
<p>Mikropiezometry z oprzyrządowaniem do pomiaru poziomu wody (piezometry otwarte)</p> <p>Z_w</p>		Bardzo duży	10mm
<p>Pneumatyczny czujnik do pomiaru ciśnienia porowego (piezometry zamknięte)</p> <p>u</p>		Bardzo duży > 1MPa	0,5% zakresu pomiarowego
<p>Elektryczny czujnik do pomiaru ciśnienia porowego (piezometry zamknięte)</p> <p>u</p>		0,2..5MPa	0,1% zakresu pomiarowego

Grupa IV - monitorowanie sił i naprężeń - uwzględnia czujniki, które są wykorzystywane do pomiaru sił i naprężeń rejestrowanych w podłożu lub konstrukcjach inżynierskich,

GRUPA IV	MONITORING POMIARU WIELKOŚCI SIŁ I NAPRĘŻEŃ		
	Schemat (szkic)	Zakres pomiarowy	Niepewność pomiaru (orientacyjne/charakterystyczne zakresy)
Czujniki do pomiaru obciążenia (sił) kotew - wciąganych sprężających elementy do demontażu F		100 ... 5 000kN	1% zakresu pomiarowego
Czujniki do pomiaru obciążeń (siły) konstrukcji (element wbudowany) F		100 ... 5 000kN	1% zakresu pomiarowego
Czujniki do pomiaru parcia (naprężeń) na kontakcie grunt/skała/beton lub wewnątrz podłoża σ_n		< 35 MPa	niepewność pomiaru zależna od warunków zabudowy

Grupa V - instrumenty inne - w tej grupie wyszczególniono geofony.

GRUPA IV	MONITORING DRGAŃ		
	Schemat (szkic)	Zakres pomiarowy	Niepewność pomiaru (orientacyjne/charakterystyczne zakresy)
Geofon Akceleratory prędkość przyspieszenie			<p>Drgania:</p> <ul style="list-style-type: none"> - przyspieszenie: 0,1m/s² - prędkość: 0,01mm/s - przemieszczenie: 10µm

Załącznik 4.5 Zestawienie najczęściej spotykanych odpowiedników w języku angielskim nazw urządzeń oraz metod zastawionych i opisanych w niniejszym opracowaniu

Nazwa urządzenia/metody pomiarowej po polsku	Odpowiedniki w języku angielskim	
pomiar satelitarne GNSS	GNSS measurements, GNSS positioning (GNSS – Global Navigation Satellite Systems)	
niwelator	level	
tachimetr	total station, tacheometer, tachymeter	
satelity optyczne o średniej zdolności rozdzielczej	medium resolution satellite imagery	
satelity optyczne o wysokiej zdolności rozdzielczej	high resolution satellite imagery	
fotogrametria lotnicza	aerial photogrammetry, airborne photogrammetry	
fotogrametria niskiego pułapu - bezzałogowe statki powietrzne (UAV)	low-altitude photogrammetry, UAV-borne photogrammetry (UAV – unmanned aerial vehicle)	
satelity operujące w zakresie radarowym	space-based radar, space-borne radar, SAR satellites (SAR – synthetic aperture radar)	
satelitarna interferometria radarowa	interferometric SAR, InSAR, IfSAR	
naziemna interferometria radarowa	ground-based interferometric SAR, GB-SAR interferometry	
lotniczy skaning laserowy	airborne laser scanning (ALS), airborne LiDAR (LiDAR – light detection and ranging)	
mobilny skaning laserowy z niskiego pułapu lotniczego	low-altitude mobile laser scanning (MLS), UAV laser scanning, UAV LiDAR	
naziemny skaning laserowy	terrestrial laser scanning (TLS), terrestrial LiDAR	
wskaźniki rozwarcia rys, szczelin	mechanical crack meter crack gauge plastic crackmeter grid crack meter	crack monitor tell-tale crack monitor fissuremeter
szczelinomierze linkowe (strunowe)	wire crackmeters wire deformeters	crack gauge
szczelinomierze precyzyjne (1D, 2D, 3D)	crackmeter jointmeter electrical crack gage	crack meter joint meter
ekstensometry taśmowe, linkowe	tape extensometer convergence tape convergence gauge	wire extensometer convergence monitor
pochyłomierze przenośne	portable tiltmeter	portable tilt meter
pochyłomierze precyzyjne	tiltmeter tilt meter precision tiltmeter	in-place tilt meter tilt beam sensor
wahadła	pendulum	direct pendulum inverted pendulum
inklinometry przenośne	probe inclinometer portable inclinometer,	inclinometer system inclinometer spiral sensor
inklinometry łańcuchowe	IPI – in-place inclinometer	
inklinometry modułowe	Np. type SAA - ShapeAccelArrays	
pomiar refleksyjny TDR	time domain refleksyjny metallic time domain reflectometry	
ekstensometry prętowe	rod extensometer borehole rod extensometer	single point rod extensometer multi-point rod extensometer multi-point borhole extensometer
ekstensometry strunowe	wire extensometer	
ekstensometry przenośne	magnetic extensometer magnet extensometer magnetic settlement system magnetic settlement plumb	mobile ekstensometer probe extensometer settlement probe single-point probe extensometer double-point probe extensometer
repery wgłębne	settlement plate, settlement platform, , rod settlement system, embankment extensometr,	fixed extensometer soil settlement gauge pipe settlement gauge
hydroniwelatory	liquid level gauges	

Nazwa urządzenia/metody pomiarowej po polsku	Odpowiedniki w języku angielskim	
	liquid level system liquid settlement system	multipoint settlement gauges
profilometry hydrauliczne (hydroprofilometry)	settlement profiler profiler – hydrostatic profile gauge	liquid level full-profile gauge
piezometry otwarte (studnia obserwacyjna, mikropiezometr)	piezometer - open system - observation well open standpipe piezometer micropiezometer	standpipe piezometer Casagrande piezometer Casagrande standpipe piezometer
piezometry zamknięte - czujniki do pomiaru ciśnienia porowego	Piezometer - closed system – pore water pressure sensor	
czujniki do pomiaru ciśnienia porowego wody	pore water pressure (vibrating wire, piezo-resistive, pneumatic, hydraulic, multipoint, multilevel, driver-in, push-in)	piezometer
czujniki do pomiaru naprężeń/parcia gruntu/skał	total earth pressure cell earth pressure cell pressure cell	hydraulic pressure cell push-in pressure cell borhole pressure cell flat Jack
czujniki do pomiaru naprężeń/parcia obudowy	NATM pressure cell	NATM stress cell
czujnik do pomiaru obciążenia kotew (wciągach sprężających)	anchor load cell (hydraulic electric)	load cell (hydraulic electric)
czujniki do pomiaru obciążeń konstrukcji	load cell	strain gauge load cell
tensometry	strain gauge strainmeter (resistance, vibrating wire, and fiber optic)	tension gauge,
systemy światłowodowe	fiber optic	
geofony	geophone	
akcelerometry	accelerometer	
czujniki do pomiaru wilgotności	moisture content sensor	
czujniki do pomiaru temperatury	temperature probe temperature gauge termistor	termArray system, multi-point temperature gauge

W literaturze spotykane są oba wyrazy „gauge = gage”.

Załącznik 4.6 Terminologia dotycząca monitoringu

METODA OBSERWACYJNA – zarządzany, zintegrowany i ciągły proces projektowania, kontroli budowy, monitorowania i dokonywania przeglądów, który w razie potrzeby umożliwia wprowadzenie w trakcie realizacji lub po zakończeniu budowy wcześniej zaplanowanych modyfikacji. Wszystkie ww. składowe procesy muszą być jednakowo ważne. Celem jest uzyskanie ekonomicznych rozwiązań geotechnicznych bez kompromisów w zakresie bezpieczeństwa (Nicholson i in., 1999)

MONITORING - to regularne (cykliczne), systematyczne zbieranie i analizowanie ilościowych danych wybranych wielkości przez z góry określony czas, w celu wykrywania zagrożeń, ostrzegania o groźącym niebezpieczeństwie i na ich podstawie wdrażania działań na wypadek przekroczenia wartości alarmowych (interwencyjnych) lub ich zaniechania (Borecka i in. 2017, Borecka 2018).

GEOMONITORING – jest jednym z elementów zapewniających bezpieczeństwo i jakość wznoszonych obiektów, jak również może okazać się cennym narzędziem w codziennej pracy inżynierów i projektantów, zwłaszcza w tematyce związanej z zarządzaniem ryzykiem, i wzmocnić jakość procesu decyzyjnego. W obrębie geomonitoringu wyróżniono monitoring geotechniczny, monitoring geodezyjny i teledetekcyjny oraz monitoring geofizyczny.

MONITORING GEODEZYJNY – oparty o klasyczną geodezję (niwelację, tachimetrię, GNSS) i fotogrametrię - proces pozyskiwania informacji z obserwacji zachowania się podłoża i/lub konstrukcji (budowli) przed, w trakcie i/lub po zakończeniu jej budowy poprzez pozyskiwanie danych geometrycznych z pomiarów geodezyjnych, ich opracowanie oraz analizę, pozwalający na ocenę dynamiki zachodzących zjawisk deformacyjnych.

MONITORING GEOFIZYCZNY – oparty o geofizyczne metody pomiarowe (elektrooporowe, elektromagnetyczne, sejsmiczne, radarowe) - proces pozyskiwania informacji z obserwacji zachowania się podłoża i/lub konstrukcji (budowli) przed, w trakcie i/lub po zakończeniu procesu budowlanego

MONITORING GEOTECHNICZNY – oparty o pomiary, analizy danych pozyskanych z instrumentów geotechnicznych w celu wykrycia zmian (zagrożeń) wynikających z obserwacji zachowania podłoża i/lub konstrukcji przed, w trakcie i/lub po zakończeniu jej budowy

UWAGA 1: Monitoring geotechniczny jest integralną częścią „metody obserwacyjnej” (patrz EN 1997-1: 2004) (PN EN-18674:1)

UWAGA 2: Monitoring geotechniczny opiera się na obserwacji terenowych, łącznie z nadzorem budowlanym (PN EN-18674:1)

MONITORING TELEDETEKCYJNY – oparty o analizę jakościową i ilościową danych ze zdalnie pozyskanych obrazów satelitarnych i lotniczych. Pomiary i badania teledetekcyjne prowadzone są na obrazach wieloczasowych, celem wykrycia potencjalnych zmian podłoża i/lub konstrukcji (budowli) przed, w trakcie i/lub po zakończeniu jej budowy celem wskazania miejsc potencjalnie nadmiernie zawilgoconych, zdobycia informacji o aktualnym pokryciu i użytkowaniu terenu oraz wykorzystania do wielkoobszarowych analiz deformacji powierzchni terenu.

POMIAR – zbiór operacji mających na celu wyznaczenie wartości mierzonej wielkości (ZMOGUM, GUM, 1996)

CZUJNIK – element przyrządu pomiarowego lub łańcucha pomiarowego, na który oddziałuje bezpośrednio wielkość mierzona (ZMOGUM, GUM, 1996)

PRZYRZĄD POMIAROWY (urządzenie, instrument pomiarowy) – urządzenie przeznaczone do wykonywania pomiarów, samodzielnie lub w połączeniu z jednym lub z wieloma urządzeniami

dodatkowymi (ZMOGUM, GUM, 1996)

ŁAŃCUCH POMIAROWY – ciąg elementów przyrządu pomiarowego lub układu pomiarowego, tworzący drogę sygnału pomiarowego do wejścia do wyjścia (ZMOGUM, GUM, 1996)

UKŁAD POMIAROWY – kompletny zbiór przyrządów pomiarowych i innych zestawionych urządzeń, przeznaczonych do wykonywania określonych pomiarów (ZMOGUM, GUM, 1996)

PRZETWORNIK POMIAROWY – urządzenie pomiarowe przetwarzające, zgodnie z określonym prawem, wielkość wejściową na wielkość wyjściową (ZMOGUM, GUM, 1996)

METODA POMIAROWA – logiczny ciąg wykonywanych podczas pomiaru operacji, opisanych w sposób ogólny (ZMOGUM, GUM, 1996)

PROCEDURA POMIAROWA – zbiór operacji opisanych w sposób szczegółowy i realizowanych podczas wykonywania pomiarów zgodnie z daną metodą (ZMOGUM, GUM, 1996)

KLUCZOWE PARAMETRY - parametry fizyczne umożliwiające rozpatrywane danego problemu i podlegające monitoringowi (PN EN-18674:1)

PRZYKŁADY: przemieszczenia (całkowite lub względne), naprężenia, wychylenia, ciśnienia porowe, parcie gruntu, siły, prędkości, przyspieszenia, temperatura, ...

PROJEKT MONITORINGU – zbiór operacji opisanych w sposób szczegółowy, które w danym projekcie planuje się zrealizować podczas prowadzenia monitoringu

UWAGA 1: Obejmuje planowanie, ocenę ryzyka, specyfikację instrumentów/metod pomiarowych, sposób dostarczania i instalacji (wraz lokalizacją) systemu monitoringu a także sposób gromadzenia, przetwarzania, prezentowania, szacowania i raportowania danych pozyskanych z monitoringu. (PN EN-18674:1)

KONCEPCJA MONITORINGU - wstępny plan pomiaru kluczowych parametrów opracowany na etapie projektu koncepcyjnego, identyfikujący określone cele, takie jak ograniczenie ryzyka, które należy uwzględnić w monitoringu, poprzez wzięcie pod uwagę rodzaju pomiaru, jego lokalizację oraz harmonogram(my) (plany) przeprowadzania pomiarów (PN EN-18674:1)

PLAN MONITORINGU - postępowanie koncepcji monitoringu w fazie specyfikacji projektowej

SYSTEM MONITOROWANIA - to czujniki, urządzenia do zbierania, transmisji (np., kable elektryczne, światłowody, itp.) i przetwarzania danych oraz oprogramowanie do przetwarzania danych wg zadanych reguł, prezentacji danych oraz generowania informacji i ostrzeżeń dla użytkownika systemu (Bednarski i in. 2017)

UWAGA 1: wydajność (na przykład dokładność, stabilność, precyzja) systemu monitorowania niekoniecznie musi być identyczna z wydajnością komponentów systemu (PN EN-18674:1)

PROGRAM MONITORINGU - całość tych elementów projektu monitoringu, które mogą być systematycznie zaplanowane, składające się z planu monitoringu i systemu monitorowania (PN EN-18674:1)

KARTA SPECYFIKACJI - dokument producenta zawierający specyfikacje techniczną danego instrumentu/metody pomiarowej (PN EN-18674:1)

NIEPEWNOŚĆ POMIARU – to parametr związanym z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wielkości mierzonej (ZMOGUM, GUM, 1996; JCGM 100:2008).

URUCHOMIENIE (ROZRUCH) – demonstracja i akceptacja prawidłowo funkcjonującego, wrazonego systemu monitorowania (PN EN-18674:1)

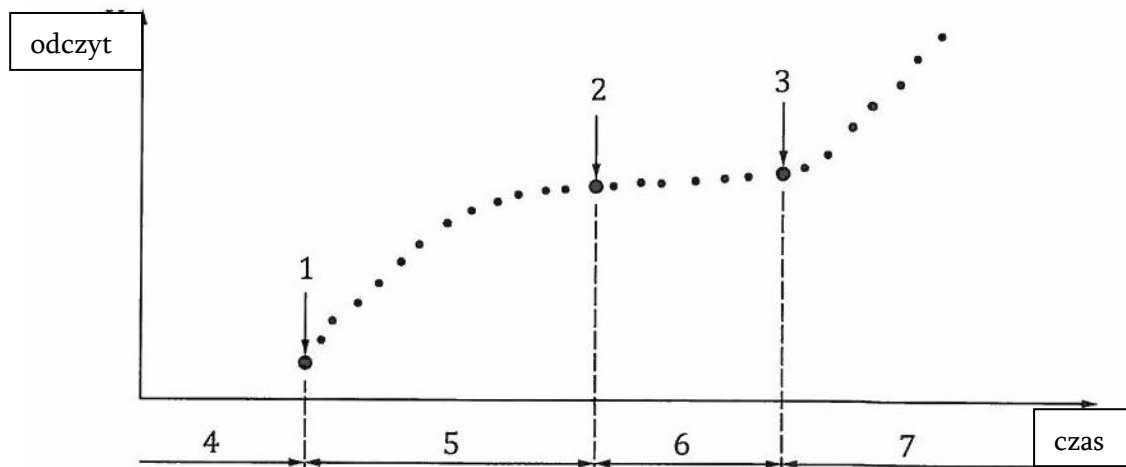
POMIAR POCZĄTKOWY (WSTĘPNY) - pomiar wykonany bezpośrednio po instalacji

POMIAR ZEROWY - pomiar wykonany po ustabilizowaniu się wyników pomiaru od momentu

instalacji

UWAGA 1: Pomiar zerowy jest często traktowany jako pomiar odniesienia (referencyjny) dla kolejnych pomiarów, ponieważ jest zwykle odniesiony do lokalnego przestrzennego i czasowego układu odniesienia.

UWAGA 2: Pomiar zerowy jest zwykle wykonywany ze zwiększonym nakładem pomiarów np. powtarzalnością pomiarów aby zapewnić wiarygodną podstawę dla kolejnych pomiarów



1 pomiar początkowy, 2 pomiar zerowy, 3 pomiar referencyjny (odniesienia), 4 etap instalacji, 5 etap stabilizacji
6 etap pomiaru bazowego, 7 etap budowy

Rysunek 62 Przedstawienie kolejnych faz pomiarów od momentu instalacji oprzyrządowania do początkowego etapu budowy. (PN EN-18674:1)

POMIARY BAZOWE - pomiary wykonywane po pomiarze zerowym z określoną częstotliwością przed rozpoczęciem budowy. Są pomocne do zdefiniowania zmian, które wywołane są innymi przyczynami niż budowa. (PN EN-18674:1)

PRZYKŁAD: Sezonowe wahania wysokości zwierciadła wody, zmian wilgotności, zmiany klimatyczne takie jak temperatura czy ekspozycja na promienie słoneczne.

POMIAR REFERENCYJNY(ODNIESIENIA) - pomiar służący jako baza odniesienia dla wcześniejszych i kolejnych pomiarów. (PN EN-18674:1)

UWAGA 1: Pomiar referencyjny może być również określany jako pomiar wyjściowy (odniesienia, wartość wyjściowa względem której dokonujemy oszacowania)

UWAGA 2: Nowe pomiary referencyjne są często używane w nowym etapie budowy.

UWAGA 3: Pomiary referencyjne często pochodzą z kilku instrumentów pomiarowych.

RÓŻNICA POMIARU - różnica między pomiarem wykonywanym a pomiarem odniesienia (PN EN-18674:1)

POMIAR PUNKTOWY - pomiar parametru fizycznego wykonany w danym punkcie (PN EN-18674:1)

PRZYKŁAD: przemieszczenie punktu pomiarowego, wielkość siły mierzona na głowicy kotwi, wielkość naprężenia w gruncie, ciśnienie porowe w gruncie,

POMIAR LINIOWY- pomiar parametru fizycznego wykonany wzdłuż określonej linii (PN EN ISO18674-1:2015)

PRZYKŁAD: Pomiary inklinometryczne, pomiary światłowodowe (pomiar odkształcenia, temperatury)

PRZEMIESZCZENIE WZGLĘDNE PUNKTU – to zmiana położenia punktu zaistniała w rozpatrywanym okresie czasu w niestałym układzie odniesienia.

PRZEMIESZCZENIE BEZWZGLĘDNE PUNKTU – to zmiana położenia punktu zaistniała w rozpatrywanym okresie czasu w stałym (niezmiennym) układzie odniesienia.

STAŁY UKŁAD ODNIESIENIA – układ współrzędnych, w którym wyrażone są przemieszczenia punktów i obiektów, wyznaczone przez trwale zastabilizowane punkty sieci kontrolno – pomiarowej i zidentyfikowany jako stały.

PRZEMIESZCZENIE OBIEKTU – zmiana położenia obiektu polegająca na przesunięciu lub obrocie albo na przesunięciu i obrocie, przy którym wzajemne położenie punktów obiektu nie ulega zmianie.

ODKSZTAŁCENIE OBIEKTU – zmiana kształtu lub objętości albo kształtu i objętości obiektu powodująca zmiany wzajemnych odległości punktów tego obiektu.

DEFORMACJA OBIEKTU - to zmiana obiektu polegająca na przemieszczeniu obiektu lub odkształceniu obiektu albo przemieszczeniu i odkształceniu obiektu.

DEFORMACJA = PRZEMIESZCZENIE + ODKSZTAŁCENIE

Załącznik 4.7 Terminologia dotycząca urządzeń i metod pomiarowych

POMIARY I BADANIA GEODEZYJNE - ogół czynności geodezyjnych prowadzonych w celu wyznaczenia położenia sytuacyjnego i wysokościowego określonych punktów lub elementów przestrzennych. Pomiary i badania geodezyjne prowadzone są w ramach monitoringu zachowania podłoża, terenów poddawanych eksploatacji górniczej, obiektów inżynierskich lub osuwisk poprzez prowadzenie pomiarów przemieszczeń i odkształceń.

GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM) - metoda precyzyjnego pozycjonowania przy pomocy globalnego systemu nawigacji satelitarnej, bazująca na wielu niezależnych systemach satelitarnych, wśród których aktualnie można wskazać systemy: GPS, GLONASS, Galileo, Beidou (Compass), IRNSS, QZSS, realizowana z wykorzystaniem technik: statycznej, szybkiej statycznej czy techniki kinematycznej RTK lub RTN (zmodyfikowane na podstawie Dz. U. 2011 nr 263, poz.1572)

POMIAR RTK GNSS - pomiary kinematyczne GNSS w czasie rzeczywistym dla których wykorzystywane są dane z pojedynczej stacji referencyjnej.

POMIAR RTN GNSS - pomiary kinematyczne GNSS czasu rzeczywistego dla których wykorzystywane są jednocześnie dane z wielu stacji referencyjnych.

TACHIMETRIA - jest techniką pozycjonowania w przestrzeni 3D, która opiera się na wykorzystaniu tachimetrów elektronicznych pozwalających na pomiar trzech elementów: kierunku poziomego (Hz), kąta zenitalnego (V) oraz odległości przestrzennej (SD).

NIWELACJA GEOMETRYCZNA — rozumie się przez to pomiar różnic wysokości punktów na podstawie pomiaru położenia poziomej osi celowej niwelatora na pionowo ustawionych na tych punktach łąkach niwelacyjnych (Dz. U. 2011 nr 263, poz.1572)

POMIARY I BADANIA FOTOGRAMTRYCZNE - ogół czynności geodezyjnych prowadzonych w celu odtwarzaniem kształtów, rozmiarów i wzajemnego położenia obiektów w terenie na podstawie zdjęć fotogrametrycznych (fotogramów) pozyskanych w ramach obserwacji naziemnych lub lotniczych (w tym z poziomy bezzałogowych statków powietrznych).

POMIAR I BADANIE TELEDETEKCYJNE- analizy jakościowe i ilościowe wykonane w oparciu o zdalnie pozyskane obrazy satelitarne i lotnicze. W ramach wytycznych obejmują wykorzystanie zakresu optycznego promieniowania elektromagnetycznego (promieniowanie widzialne, bliska i średnia podczerwień) oraz mikrofałe (pasmo radarowe). Pomiary i badania teledetekcyjne prowadzone są na obrazach wieloczasowych, celem wykrycia potencjalnych zmian podłoża i/lub

konstrukcji (budowli) przed, w trakcie i/lub po zakończeniu jej budowy celem wskazania miejsc potencjalnie nadmiernie zawilgoconych, zdobycia informacji o aktualnym pokryciu i użytkowaniu terenu oraz wykorzystania do wielkoobszarowych analiz deformacji powierzchni terenu.

SZCZELINOMIERZ - to przyrząd pomiarowy wykorzystywany do monitorowania zmian wielkości szczelin, pęknięć, dylatacji i spoin pojawiających się na budynkach, betonowych konstrukcjach mostowych, tunelach, zaporach wodnych, rurociągach czy formacjach skalnych i gruntowych.

INKLINOMETR – to układ pomiarowy wykorzystywany do monitorowania przemieszczeń wzdłuż określonego przewodu pomiarowego, służący do określania kąta wychylenia od przyjętego pomiaru zerowego (PN-EN ISO 18764-3).

POCHYŁOMIERZ - to przyrząd, którego działanie opiera się na zasadzie prawa grawitacji, służący do pomiaru kąta nachylenia terenu, obiektu inżynierskiego, elementu konstrukcyjnego względem poziomu zerowego lub poziomu odniesienia

PIEZOMETR – z *ang.* inaczej czujnik do pomiaru ciśnienia wody porowej

PIEZOMETR OTWARTY (STUDNIA LUB OTWÓR OBSERWACYJNY) – układ pomiarowy, w którym wody podziemne znajdują się w bezpośrednim kontakcie z atmosferą (PN-EN ISO 22475-1:2006); w hydrogeologii to najczęściej małosrednicowy otwór, służące do pomiaru wysokości ciśnienia piezometrycznego w określonym punkcie warstwy wodonośnej (a tym samym wysokości hydraulicznej). Pomiar polega bądź na pomiarze ciśnienia p i przeliczeniu go na wysokość ciśnienia p/γ jako składowej wysokości hydraulicznej, bądź na bezpośrednim pomiarze wysokości hydraulicznej (a więc rzędnej zwierciadła), jeśli dotyczy to zwykłych, niezmineralizowanych wód podziemnych (zmodyfikowane Kleczkowski, Rózkowski [red], 1997. Słownik Hydrogeologiczny).

PIEZOMETR ZAMKNIĘTY - układ pomiarowy, w którym wody gruntowe nie mają bezpośredniego kontaktu z atmosferą, a pomiar położenia zwierciadła wody polega na pomiarze ciśnienia wody w porach gruntu/skały (ciśnienie piezometrycznego) za pomocą różnego rodzaju czujników do pomiaru ciśnienia porowego (hydraulicznych, pneumatycznych lub strunowych) a następnie przeliczeniu go na wysokość słupa wody (zmodyfikowane na PN-EN ISO 22475-1:2006)

CIŚNIENIE WODY GRUNTOWEJ - ciśnienie w porach, pustkach i pęknięciach występujących w podłożu w określonym punkcie i czasie (PN-EN ISO 22475-1:2006)

POMIARY REFLEKTOMETRYCZNE TDR (*Time Domain Reflectometry*) - to technika pomiarów elektrycznych stosowana w celu określenia stopnia i lokalizacji przestrzennego odkształcenia na kablu. Główne przeznaczenie to monitorowanie obszarów zagrożonych ruchami masowymi. Jest ona również wykorzystywana do oceny wilgotności objętościowej gruntu czy pomiaru poziomu zwierciadła wody (specjalne otwory wywiercone w kablu).

EKSTENSOMETR - (z *ang.* *extension* = rozszerzenie, wydłużenie) mierzy zmianę odległości między dwoma lub więcej punktami pomiarowymi umieszczonymi wzdłuż linii pomiarowej, która pokrywa się z osią otworu wiertniczego (PN EN-ISO 18674-2:2017). Podstawową zasadą jest pomiar ruchu wybranego punktu w odniesieniu do innego nieruchomego. To przyrząd wykorzystywany w geotechnice do pomiaru wydłużeń – zmian wymiarów liniowych konstrukcji inżynierskich, ośrodka gruntowego oraz masywu skalnego czyli do pomiaru osiadań, przemieszczeń i odkształceń w budownictwie tunelowym i górniczym oraz do kontroli stateczności budowli ziemnych (zapór, nasypów), zboczy i skarp.

KONWERGOMETR (z *ang.* *convergere* = zbiegać się) – przyrząd, który mierzy zjawiska polegające na zaciskaniu się masywu gruntowego czy skalnego. Nazwa ta używana jest wyłącznie w górnictwie i budownictwie podziemnym, i związana jest z pomiarami konwergencji.

REPER WGLĘBNY - to najczęściej kwadratowe płyty ze stali, drewna lub betonu do których

przymocowana jest stalowa rura zakończona gwintowanymi łącznikami. Są prostym instrumentem pomiarowym zwykle używanym do monitorowania osiadań nasypów posadowionych na gruntach słabonośnych. Mogą być one również wykorzystane do oceny pęcznienia podłoża zlokalizowanego pod nasypem czy oceny stopnia wypełnienia materiałem nasypu. Są one instalowane w dnie wykopów lub w podstawie formowanego nasypu.

HYDRAULICZNE SYSTEMY POMIARU OSIADAŃ - wykorzystują technologię tzw. niwelacji hydrostatycznej czyli zasadę pomiaru ciśnienia hydrostatycznego wytwarzanego przez kolumnę cieczy zakończoną sondą pomiarową. Pomiar położenia w pionie danego punktu polega na wyznaczeniu ciśnienia wywieranego przez słup cieczy o określonej wysokości. Przy założeniu stałej gęstości cieczy, ciśnienie hydrostatyczne jest funkcją wyłącznie wysokości słupa cieczy.

HYDRONIWELATORY – pomiar punktowy

HYDROPROFILOMWTRY – pomiar ciągły.

CZUJNIKI DO POMIARU NAPRĘŻEŃ/PARCIA GRUNTU LUB OBUDOWY (PODUSZKI CIŚNIENIOWE) - są przeznaczone do pomiaru: naprężeń całkowitych w gruncie, parcia jakie wywiera górotwór na obudowę wyrobisk podziemnych wykonanych metodą betonu natryskowego jak i betonowania klasycznego, a także parcia jakie wywiera grunt/skała na konstrukcję typu przyczółki, ściankę szczelinową czy konstrukcje oporową. Czujniki do pomiaru parcia i naprężeń mogą być wykorzystywane w drogownictwie w wielu aspektach: ustalenia wielkości, rozkładu i kierunków naprężeń, do monitorowania naprężenia całkowitego w nasypach drogowych, parcia na styku pomiędzy np. przyczółkiem, fundamentem, ścianką szczelinową czy murem oporowym a ścianami wykopu, monitorowanie zmian rozkładu naprężeń wokół wyrobisk podziemnych czy pomiary naprężeń przed i po dogęszczeniu podłoża lub nasypów.

OGNIWA OBCIĄŻENIOWE wykorzystywane są do badania nośności i monitorowania systemu kotew gruntowych, kotew skalnych, odciągów i ściągów zamontowanych w tunelach, ścianach oporowych, na osuwiskach lub w ścianach głębokich wykopach. Są one montowane na stałe na wybranych kotwach.

TENSOMETRY to czujniki bezpośrednio połączone z elementem konstrukcyjnym na jego powierzchni lub zabudowane wewnątrz. Są one stosowane, do określania tymczasowych lub stałych (długoterminowych) odkształceń np. przęseł, prętów zbrojeniowych, rozpór w głębokich wykopach, betonów, ścianek szczelinowych, przęseł, dźwigarów, odkształcalnych elementów mostów czy geosyntetyków, a uzyskane dane można wykorzystać do obliczenia szerokiego zakresu parametrów, w tym obciążeń, naprężeń i ciśnienia.

AKCELEROMETRY (przyspieszeniomierze) służą do pomiaru przyspieszeń liniowych lub kątowych. Wykorzystywane jako urządzenie do pomiaru drgań ośrodka (budynku, podłoża, itp.), a ich użycie wymaga bezpośredniego montażu na badanym obiekcie. Akcelerometry mierzą przyspieszenie wzdłuż określonej osi, przy czym istnieją czujniki dwuosiowe i trójosiowe. Zakres częstotliwości wynosi od ok. 0,2 Hz do ponad 20 kHz. W zagadnieniach inżynierskich pełnią rolę podobną do geofonów.

GEOFON - urządzenie wykorzystywane do pomiaru prędkości drgań podłoża do którego jest przytwierdzony (częstotliwość i amplitudę), w zakresie częstotliwości od 1 Hz dla geofonów niskoczęstotliwościowych do ok. 1000 Hz dla geofonów wysokoczęstotliwościowych i przetwarzania ich na impulsy elektryczne (napięcie elektryczne). Jest to w zasadzie rodzaj sejsmometru. (Pilecki i in. 2014)

SEJSMOMETR - ze względu na konstrukcję układu mechanicznego i elektrycznego rejestruje amplitudy składowej przemieszczenia lub prędkości drgań ośrodka. Jest to przyrząd zamieniający drgania mechaniczne na zmienny w czasie sygnał elektryczny w zakresie częstotliwości od ok.

0,001 Hz do ok. 150Hz (Pilecki i in. 2014)

POMIARY I BADANIA GEOFIZYCZNE - ogół czynności związanych z badaniem środowiska geologicznego za pomocą jakościowych i ilościowych metod fizycznych w celu poznania jego budowy oraz wyjaśnienia zachodzących w nim procesów. Pozwalają ocenić charakter, strukturę i parametry fizyczne, jakimi cechuje się środowisko geologiczne.

Załącznik 4.8 Terminologia dotycząca budownictwa

NASYP DROGOWY - budowla ziemna ukształtowana z materiału gruntowego (naturalnego lub antropogenicznego) znajdująca się powyżej powierzchni terenu w obrębie pasa drogowego, powstała w wyniku robót budowlanych polegających na układaniu i zagęszczaniu kolejnych warstw materiału gruntowego/skalnego.

WYKOP DROGOWY - budowla ziemna ukształtowana w postaci sztucznie ukształtowanej otwartej przestrzeni poniżej powierzchni terenu, w wyniku robót budowlanych polegających na usunięciu z niej gruntu/skały.

TUNEL- budowla przeznaczona do przeprowadzenia drogi, samodzielnego ciągu pieszego lub pieszo-rowerowego, szlaku wędrówek zwierząt dziko żyjących lub innego rodzaju komunikacji przez przeszkodę terenową lub pod nią, w tym przejście podziemne. (Dz. U. 1985 nr 14 poz. 60(Dz. U. z 2017 poz 2222) Z uwagi na usytuowanie wysokościowe tunelu względem poziomu terenu oraz stosunek zagłębienia stropu (H) poniżej powierzchni terenu do dwukrotnej szerokości wyrobiska (B), tunele dzieli się na (Madryas C. i in., 2009):

TUNEL GŁĘBOKI- gdy stosunek $H/B \geq 5$,

TUNEL PŁYTKI- gdy stosunek $H/B < 5$.

DROGOWY OBIEKT INŻYNIERSKI – obiekt mostowy, tunel, przepust i konstrukcję oporową (Dz. U. 2017 poz. 2222).;

OBIEKT BUDOWLANY- wszystko to, co zostało zbudowane lub jest wynikiem robót budowlanych (PN-EN 1990). Budynek, budowla bądź obiekt małej architektury, wraz z instalacjami zapewniającymi możliwość użytkowania obiektu zgodnie z jego przeznaczeniem, wzniesiony z użyciem wyrobów budowlanych (Dz. U. 2017 poz. 1332)

BUDOWLA – należy przez to rozumieć każdy obiekt budowlany niebędący budynkiem lub obiektem małej architektury, jak: obiekty liniowe, lotniska, mosty, wiadukty, estakady, tunele, przepusty, sieci techniczne, wolno stojące maszty antenowe, wolno stojące trwale związane z gruntem tablice reklamowe i urządzenia reklamowe, budowle ziemne, obronne (fortyfikacje), ochronne, hydrotechniczne, zbiorniki, wolno stojące instalacje przemysłowe lub urządzenia techniczne, oczyszczalnie ścieków, składowiska odpadów, stacje uzdatniania wody, konstrukcje oporowe, nadziemne i podziemne przejścia dla pieszych, sieci uzbrojenia terenu, budowle sportowe, cmentarze, pomniki, a także części budowlane urządzeń technicznych (kotłów, pieców przemysłowych, elektrowni jądrowych i innych urządzeń) oraz fundamenty pod maszyny i urządzenia, jako odrębne pod względem technicznym części przedmiotów składających się na całość użytkową (Dz. U. 1994 nr 84 poz.414)

OBIEKT LINIOWY- obiekt budowlany, którego charakterystycznym parametrem jest długość, w szczególności droga wraz ze zjazdami, linia kolejowa, wodociąg, kanał, gazociąg, ciepłociąg, rurociąg, linia i trakcja elektroenergetyczna, linia kablowa nadziemna i, umieszczona bezpośrednio w ziemi, podziemna, wał przeciwpowodziowy oraz kanalizacja kablowa, przy czym kable w niej zainstalowane nie stanowią obiektu budowlanego lub jego części ani urządzenia budowlanego (Dz. U. 2017 poz. 1332).

OBIEKT MOSTOWY- budowla przeznaczona do przeprowadzenia drogi, samodzielnego ciągu pieszego lub pieszo-rowerowego, szlaku wędrówek zwierząt dziko żyjących lub innego rodzaju komunikacji nad przeszkodą terenową, w szczególności: most, wiadukt, estakada, kładka, półmost, przejście dla zwierząt, przejazd itd. (Dz. U. 2017 poz. 2222).

KONSTRUKCJA OPOROWA – budowlę przeznaczoną do utrzymywania w stanie stateczności nasypu lub wykopu; (Dz. U. 2017 poz. 2222). Konstrukcja przenosząca boczne parcie gruntu lub innego podobnego materiału albo wody zapewniająca stateczność uskoju naziomu gruntu lub ściany wykopu ((PN-B-02481:1998).

PRZEPUST – budowlę o przekroju poprzecznym zamkniętym, przeznaczoną do przeprowadzenia cieków, szlaków wędrówek zwierząt dziko żyjących lub urządzeń technicznych przez nasyp drogi; (Dz. U. 2017 poz. 2222).

KONSTRUKCJA – uporządkowany zespół połączonych ze sobą elementów, łącznie z nasypami formowanymi podczas wykonywania prac budowlanych, zaprojektowanych w celu przenoszenia obciążeń i zapewnienia odpowiedniej sztywności (opór materiału przeciw odkształceniom) (PN-EN 1997-1)

ELEMENT KONSTRUKCYJNY – fizycznie rozróżnialna część konstrukcji, np. słup, belka, płyta, pał fundamentowy, itp. (PN-EN 1990).

Załącznik 4.9 Terminologia dotycząca podłoża

GRUNT SŁABY (SŁABONOŚNY) - grunt charakteryzujący się brakiem (słabą) zdolności do przenoszenia obciążeń (do przejmowania oddziaływań konstrukcji) przekazywanych przez konstrukcję lub elementy konstrukcji czego wynikiem są jego znaczne odkształcenia lub zniszczenie Umownie przyjmuje się, że do gruntów słabych zalicza się: grunty organiczne (namuły, torfy, gytie), grunty spoiste (drobnoziarniste) w stanie gorszym niż plastyczne, grunty niespoiste w stanie luźnym, grunty antropogeniczne niezależnie od wykształcenia. Określany często jako: grunt słabonośny, grunt nienadający się do posadowienia lub błędnie jako grunt nienośny.

KONSOLIDACJA PODŁOŻA –proces zmniejszania objętości gruntu w wyniku zmiany objętości porów, przy jednoczesnym wyciskaniu z nich wody, zachodzący pod wpływem przyrostu naprężeń. Konsolidacja w gruntach organicznych przebiega odmiennie niż w gruntach mineralnych. Dużą rolę może tu odgrywać ściśliwość cząstek stałych. Wymaga to odmiennego traktowania gruntów organicznych w zastosowaniu teorii konsolidacji (Myślińska 1996).

ODKSZTAŁCALNOŚĆ PODŁOŻA – zdolność gruntu do odkształceń objętościowych i postaciowych w wyniku oddziaływań czynników zewnętrznych i wewnętrznych, zwłaszcza obciążeń konstrukcją, które zmieniają stan naprężeń w podłożu (PN-B-02481:1998).

PODŁOŻE , PODŁOŻE DROGOWEJ BUDOWLI ZIEMNEJ (nasypu lub wykopu) – strefa gruntów rodzimych, skał lub gruntów antropogenicznych występująca na miejscu budowy przed rozpoczęciem prac budowlanych, współpracująca z obiektem budowlanym, której właściwości mają wpływ na projektowanie, wykonywanie i eksploatację obiektów budowlanych (PN-B-02481:1998).

SKARPA - sztucznie ukształtowana i pochylona powierzchnia np. skarpa wykopu, skarpa nasypu.

ZBOCZE - naturalnie ukształtowana i pochylona powierzchnia np.: zbocze doliny, zbocze góry.

Załącznik 4.10 Terminologia dotycząca obszaru badań

OSUWISKO – utrata stateczności zbocza /skarpy i niekontrolowane przemieszczenie się gruntu lub skały pod wpływem sił ciężkości, ciśnienia spływowej wody, wstrząsów i innych przyczyn, połączone ze ścięciem podłoża wzdłuż powierzchni poślizgu (PN-B-02481:1998).

REGION - obszar, na którym jest planowana lokalizacja lub jest zlokalizowana inwestycja drogowa (w zależności od etapu inwestycji), na którym podłoże budowlane cechuje wspólny styl budowy geologicznej.

REJON - obszar, na którym jest planowana lokalizacja lub jest zlokalizowana inwestycja drogowa (w zależności od etapu inwestycji), na którym podłoże budowlane cechuje identyczny profil litologiczny.

STREFA BUFOROWA - obszar poza pasem drogowym/wariantem, wyznaczony w wymaganej odległości od osi drogi/osi wariantu ustalany indywidualnie dla każdego etapu badań (rozdział **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**).

STREFA ZAGROŻEŃ - obszar poza pasem drogowym/wariantem i strefą buforową, który wyznaczają granice zagrożeń mających wpływ na obiekty budowlane zidentyfikowane poza pasem drogowym/wariantem i strefą buforową.

SZKODY GÓRNICZE – szkody powstałe w skutek działalności górniczej (robót górniczych) w nieruchomości, budynku lub innej części składowej nieruchomości, a także w urządzeniach służących do doprowadzania lub odprowadzania wody, gazu, prądu elektrycznego oraz w liniach kolejowych, drogowych i w innych podobnych urządzeniach połączonych z nieruchomością, (sformułowane na podstawie art. 54 ust. 1 Ustawy z dnia 16 listopada 1960r. o zmianie prawa górniczego Dz. U. 1960 nr 52 poz.302),

TEREN ZABUDOWY - rozumie się przez to teren leżący w otoczeniu drogi, na którym dominują obszary o miejskich zasadach zagospodarowania, wymagające urządzeń infrastruktury technicznej, lub obszary przeznaczone pod takie zagospodarowanie w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego (Dz. U. 2016 poz. 124).

TEREN GÓRNICZY – terenem górniczym – jest przestrzeń objęta przewidywanymi szkodliwymi wpływami robót górniczych zakładu górniczego (Dz.U.2011 Nr 163 poz.981)

Załącznik 5 Spis wykorzystanych materiałów:

Uwaga: aktualność podanych aktów prawnych należy każdorazowo sprawdzić.

Zaleca się korzystać ze strony Internetowy System Aktów Prawnych <http://isap.sejm.gov.pl>

Uwaga: aktualność podanych norm należy każdorazowo sprawdzić.

Zaleca się korzystać ze strony Polskiego Komitetu Normalizacyjnego <http://www.pkn.pl>

Załącznik 5.1 Przepisy prawne

USTAWA z dnia 16 listopada 1960r. o zmianie Prawa górniczego (Dz.U. 1960 nr 52 poz.302)

USTAWA z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz. U. 1994 nr 89 poz. 414, z późn. zm.)

USTAWA z dnia 27 kwietnia 2001r. – Prawo ochrony środowiska (Dz.U.2001 nr 62 poz.627)

USTAWA z dnia 9 czerwca 2011 r. - Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. 2011 nr 63 poz.981 z późn.zm.)

ROZPORZĄDZENIE Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa z dnia 21 lutego 1995 r. w sprawie rodzaju i zakresu opracowań geodezyjno-kartograficznych oraz czynności geodezyjnych obowiązujących w budownictwie (Dz. U. 1995r. Nr 25, poz. 133)

ROZPORZĄDZENIE Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie(Dz. U. z 2000 Nr 63, poz. 735)

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie informacji dotyczących ruchów masowych ziemi, Dz. U. 2007 nr 121 poz. 840

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót których wykonanie wymaga uzyskania koncesji (Dz. U. 2011 nr 288 poz. 1696, z późn. zm.)

ROZPORZĄDZENIE Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 9 listopada 2011 r. w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (Dz. U. 2011 nr 263 poz. 1572)

ROZPORZĄDZENIE Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych (Dz. U. 2012 poz. 463.)

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Dz. U. z 2016r. poz. 2033)

OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 8 czerwca 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy - Prawo budowlane (Dz. U. 2017 poz. 1332)

OBWIESZCZENIE Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 9 listopada 2017 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o drogach publicznych (Dz.U. 2017 poz. 2222 z późn. zm.)

OBWIESZCZENIE Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 23 grudnia 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. 2016 poz. 124)

Załącznik 5.2 Normy

PN-EN 1990 Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji

PN-EN 1997-1 Eurokod 7 Projektowanie geotechniczne - Część 1: Zasady ogólne z późniejszymi zmianami

PN-EN 1997 - 2 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne - Część 2: Rozpoznanie i badania podłoża gruntowego

PN-EN ISO 22475-1:2006. Rozpoznanie i badania geotechniczne - Pobieranie próbek metodą wiercenia i odkrywek oraz pomiary wód gruntowych - Część 1: Techniczne zasady wykonania.

PN-B-02481:1998. Geotechnika - Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.

PN- S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania

PN-EN ISO 18674-1:2015-07E - Rozpoznanie i badania geotechniczne - Monitorowanie geotechniczne za pomocą urządzeń terenowych - Część 1: Zasady ogólne

PN-EN ISO 18674-2:2017-01E - Rozpoznanie i badania geotechniczne - Monitorowanie geotechniczne za pomocą urządzeń terenowych - Część 2: Pomiar przemieszczeń wzdłuż linii pomiarowych: Ekstensometry

PN-EN ISO 18674-3:2018-02E - Rozpoznanie i badania geotechniczne - Monitorowanie geotechniczne za pomocą urządzeń terenowych - Część 3: Pomiar przemieszczeń w przekrojach pomiarowych: Inklinometry

ISO 4866:2010 Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures

JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement,

ISO/IEC Guide 98-3:2008 (JCGM/WG1/100) Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)

Załącznik 5.3 Wytyczne, instrukcje, przewodniki

INSTRUKCJA badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. Część 1 i 2. 1998, GDDP, Warszawa.

GUIDE to Geotechnical Instrumentation, 2004, Durham GeoSlope Indicator s. 52

MIĘDZYNARODOWY SŁOWNIK podstawowych i ogólnych terminów metrologii, 1996, ZMOGUM, GUM

ClimChAlp, 2008 – Slope Monitoring Methods. A State of the Art. Raport. Munich.

SLOPE INDICATOR, 2004a - Guide to Geotechnical Instrumentation, Durham Geo Slope Indicator

SLOPE INDICATOR, 2004b–VW Total Pressure Cell, Durham Geo Slope Indicator

Raport FHWA-HI-98-034 - Geotechnical Instrumentation. Reference Manual, National Highway Institute 1998.

GEOSENSE, 2017 – Anchor Load Cells Installation – considerations

MnDOT, 2017 – 2017 Geotechnical Engineering Manual , Geotechnical Engineering Section. Minnesota Department of Transportation, Maplewood

TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR, State of the Practice, Nr E-C129, 2008, Use of Inclinedometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects

FERC, 1994 - Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, Chapter IX: Instrumentation and Monitoring.

Załącznik 5.4 Literatura

- ADAMCZYK J., BĘDKOWSKI K., 2005. Metody cyfrowe w teledetekcji, Wydawnictwa SGGW
- ALMEIDA Márcio de Souza S., MARQUES Maria Esther Soares, 2013 Design and Performance of Embankments on very soft soil , Taylor and Francis
- BARAN M. & ŻAK M., 2015 – Rola i zadania monitoringu na nowoczesnym planu budowy. GDMT Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele. 4: 52-56.
- BARCIK W., SIEŃKO R., BILISZCZUK J., System monitorowania konstrukcji Mostu Rędzińskiego we Wrocławiu, Mosty, 2, 56–62, 2012.
- BAYRD G. Evaluating Practices for Installation of Vibrating Wire Piezometers , GEOTECHNICAL NEWS, December , 2011, p 26-29
- BECK T. J., KANE W.F., 1996 - Current and potential uses of time domain reflektometri for geotechnical monitoring: Proceedings, 47th Highway Geology Symposium, Cody, WY., Wyoming Department of Transportation: 94-103.
- BEDNARSKI Ł., SIEŃKO R., HOWIACKI T., 2015 Wybrane zagadnienia monitorowania konstrukcji, XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, 25-28 marca 2015, Szczyrk, p 1-71
- BEDNARSKI Ł., SIEŃKO R 2017 Automatyczne Systemy Monitorowania w konstrukcjach zbrojonych geosyntetykami (prezentacja)
- BERNASIK J., 2008. Wykłady z fotogrametrii i teledetekcji, materiały dydaktyczne Katedry Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, http://home.agh.edu.pl/~zfiit/mat_dydaktyczne_pliki/JB_wyklady.pdf
- BORECKA A. 2018 Geomonitoring monitoring podłoża i elementów konstrukcyjnych (prezentacja) XXIV Międzynarodowe Targi Budownictwa Drogowego AUTOSTRADA POLSKA 2018, Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie, Kielce
- BORECKA A., STOPKOWICZ A. & SEKUŁA K., 2017 – Metoda obserwacyjna i monitoring geotechniczny w świetle przepisów prawa do oceny zachowania podłoża i konstrukcji inżynierskich, Przegląd Geologiczny, vol.65, nr10/2, p. 685- 691.
- COLLINS B.D. & STOCK G.M. 2016 Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures, Nature geoscience, vol. 9, p. 395-400.
- CONTRERAS I.A., GROSSER A.T. & VER STRATE R.H. Update of the fully-grouted method for piezometer installation GEOTECHNICAL NEWS, June , 2012, p 20-25
- CORNFORTH D.H., 2005. Landslides in practice investigations, analysis, and remedial/preventative options in soils. Wiley, Hoboken, N.J.
- DOWDING C.H., DUSSUD M.L., KANE W.F., O'CONNOR K.M., 2003 – Monitoring deformation in rock and soil with TDR sensor cables, Geotechnical instrumentation News: 55-59.
- DOWGIAŁŁO J., KLECZKOWSKI A. S., MACIOSZCZYK T., RÓŻKOWSKI A., 2002 – Słownik hydrogeologiczny. Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa.
- DUNNICLIFF J. 1993 - Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. Wiley, New York.
- FELL R., MACGREGOR P. & STAPLEDON D., Geotechnical Engineering of Embankment Dams A.A. Balkema Publisher 1992
- GRABOWSKI D., MARCINIEC P., MROZEK T., NESCIERUK P., RĄCZKOWSKI W., WÓJCIK A., ZIMNAL Z., 2008 – Instrukcja opracowania map osuwisk terenów zagrożonych ruchami masowymi, PIG, Warszawa.

- GREEN, G. E. & MIKKELSEN P. E.. Deformation Measurements with Inclinometers. In Transportation Research Record 1169, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1988, pp. 1–15.
- GUPTA R.P., 2003. Remote Sensing Geology, 2nd edition, Springer
- KANE W.F., BECK T. J., 1994 - Development of a time domain reflectometry system to monitor landslide activity: Proceedings, 45th Highway Geology Symposium, Portland, OR: 163-173.
- KANE W. F., BECK T. J., 1996a - Rapid slope monitoring: Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, New York, v. 66: 56-58.
- KANE W. F., Beck T. J., 1996b - An alternative monitoring system for unstable slopes: Geotechnical News, v. 143: 24-26.
- KANE W.F., PARKINSON W. A., 1998 - Remote landslide monitoring including time domain reflectometry: Short Course Manual, KANE GeoTech, Inc., Stockton, CA.
- KANE W.F., 2000 - Monitoring Slope Movement with Time Domain Reflectometry, Geotechnical Field Instrumentation: Applications for Engineers and Geologists: 1-8.
- KANE W.F, BECK T.J, 2001 - Instrumentation practice for slope monitoring engineering geology practice in Northern California: 135-144.
- KALETA D., RAJCHEL M., SIWOWSKI T., SIENKO R., 2017 Odształcenia mostu z kompozytów frp w świetle różnych metod pomiarowych, Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, nr 24, p 152-160
- KEATON, J.R. and DeGRAFF, J.V., 1996. Surface observation and geologic mapping.; Landslides; investigation and mitigation. Special Report Transportation Research Board, National Research Council: 178-230.
- KLEDYŃSKI Z., 2011 - Monitoring i diagnostyka budowli hydrotechnicznych cz.1. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, 35: 54-61.
- KORFF M., DE JONG E. & BLES T.J. 2013 - SWOT analysis observational method applications. [W:] Delange P. , Desrues J., Frank R., Puech A. & Schlosser F. (eds.), Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2-6 September 2013, Paris: 1883-1888.
- KRYWULT Ł., KOSIK A., STEFANEK P., 2016 – Pomiary przemieszczeń gruntu pomiary inklinometryczne. Przegląd metod pomiarowych. Geoinżynieria, 1/2016/54
- LECIEJEWSKI P., 2009 - Wykorzystanie metody TDR do ciągłego pomiaru zmian warunków wilgotnościowych i termicznych w profilu glebowym, Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej R. 11. Zeszyt 2 (21): 235-246.
- MAZZANTI P. 2017, Overview of Monitoring – Part 2, IV International Course on Geotechnical and Structural Monitoring, 13-15 czerwiec, Rzym, Włochy (materiały szkoleniowe)
- MIKKELSEN, P. E., 1996, Field instrumentation: in Turner, A. K., and Schuster, R. L. (eds.), Landslides. Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington, DC: 278-316.
- MIKKELSEN, P.E., 2003. Advances in Inclinometer Analysis. In: F. Myrvoll (Editor), Sixth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics Taylor & Francis, Oslo, pp. 555-567.
- MYSLIŃSKA E. 1996 Leksykon gruntoznawstwa, PIG, Warszawa
- NARKIEWICZ J., 2007. GPS i inne satelitarne systemy nawigacyjne. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

- NICHOLSON D., TSE C-M. & PENNY C. 1999 - The Observational Method in ground engineering – principles and applications. Report 185, CIRIA, London
- O'CONNOR K. M., DOWDING, C. H., 1999 - Geomeasurements by pulsing TDR cables and probes, CRC Press, Boca Raton, FL, 402 p.
- OSADA E., 2002. Geodezja. Wydawnictwo UxLan, Wrocław.
- PIG-PIB, AGH, PW, 2016. Raport z realizacji projektu „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”, podzadanie 1.2: Rozpoznanie metodyki prowadzenia pomiarów z zastosowaniem metod i technik geodezyjnych i teledetekcyjnych, autorzy: W. Drzewiecki, M. Graniczny, B. Hejmanowska, R. Kocierz, Z. Kowalski, P. Kuras, Ł. Ortyl, T. Owerko, T. Pirowski, M. Przyłucka, K. Pyka (materiały niepublikowane)
- PILECKI Z., HARBA P, ADAMCZYK A., KRAWIEC K., PILECKA E. 2017 Geofony w sejsmice inżynierskiej Przegląd Górniczy nr 7 s. 12-21
- POWDERHAM A. J. 2002 – The observational method – learnig for projects. Proceedings of the Institution of CivilEngineers: Geotechnical Engineering 155 (1): 59–69.
- SIEBERT S., TEIZER J., 2014 - Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. Automation in Construction 41, pp. 1–14.
- STYPUŁA K., 2006. Drgania i wibracje, Zarządzenie środowiskowe – ISO 14000. Tom II. Ochrona środowiska naturalnego (red. A. Tabor), Centrum Szkolenia i Organizacji Systemów Jakości Politechniki Krakowskiej im. T. Kościuszki, Kraków, s. 11-59
- SZPETKOWSKI S., 1978. Pomiary deformacji na terenach górniczych, Wydawnictwo Śląsk, wyd. 2 uzup., Katowice, s. 16
- ŚLEDZIŃSKI J., 2005. Cykl artykułów „Alfabet GPS”, Geodeta – Nawi.
- THOMAS W. (Lord Kelvin), 1883 - Electrical Units of Measurement , [w.] Popular Lecture and Adresses, vol. 1, p.73 p.73-136.
- THURO K., WUNDERLICH TH., HEUNECKE O., 2007 Development and testing of an integrative 3D Elary warning system for alpine instable slopes, GEOTECHNOLOGIEN Science Report:101-112.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2002. Structural Deformation Surveying. Department of the Army, Washington.
- WILLENBERG H., EVANS K.F., EBERHARDT E. & LOEW S. 2003, Monitoring of complex rock slope insabilities – correction and analysis of inclinometer/extensonmeter survey and integration with surface displacement data, [w:] Myrvoll F. Field Measurements In Geomechanics, Proc. 6th International Symposium on Field Measurements In Geomechanics, A.A. Balkema Publishers, p. 393-400.
- WITKOWSKI P. , KURCZYŃSKI Z., KUJAWIŃSKA M., DYMNY G., GAWECKI P.& WOŹNIAK M. 2009 - Bezdotykowe metody obserwacji i pomiarów obiektów budowlanych. System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Instrukcje ITB, 443/2009
- WOLIŃSKI Ł. & WÓJCIK M., 2010 - Monitoring geotechniczny konstrukcji budowlanych. Geoinżynieria. Drogi. Mosty. Tunele, 29: 36-39.
- WOLSKI B. 2006, Monitoring metrologiczny obiektów geotechnicznych., Politechnika Krakowska, Kraków
- ZARADNY H. Ciśnienie porowe w budownictwie ziemnym – mechanizmy ich kształtowania oraz metody pomiaru, Instytut Budownictwa Wodnego PAN, Gdańsk 1999
- ZEMKE J. 2013 - Scenariusze procesów decyzyjnych w warunkach zarządzania ryzykiem obsługi

zobowiązań długoterminowych. Zarządzanie i Finanse (Journal of Management and Finance), tom 11, nr 3/2, Uniwersytet Gdański: 275-291.

Załącznik 5.5 Strony internetowe:

<https://directory.eoportal.org>

www.geosense.co.uk

www.rstinstruments.com

www.measurandgeotechnical.com/

www.sisgeo.com

www.geokon.com

www.shmsystem.pl

www.geotests.com.sg/shape-accel-array.html

<http://dpwe.nctu.edu.tw>

<http://www.ni.com/white-paper/12338/en/> - FBG Optical Sensing: A New Alternative for Challenging Strain Measurements

<http://www.izbudujemy.pl/artykuly/896/Monitoring-geotechniczny> - Monitoring geotechniczny - GEO-EKSPERT Sp. z o.o. Data wprowadzenia: 20.10.2017 r.

NOWOCZESNE METODY ROZPOZNANIA PODŁOŻA GRUNTOWEGO W DROGOWNICTWIE

Konsorcjum:



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy



Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie



Politechnika Warszawska

Projekt „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie” finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Skarb Państwa - Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia RID.

