

dr inż. Radosław Baryła

Autoreferat

Olsztyn 2018

Spis treści

1.	Imię i Nazwisko	3
2.	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	3
3.	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	3
4.	Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust.2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz. u. 2016 r. poz. 882 ze zm.)	4
4.1.	Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2.	Publikacja stanowiąca osiągnięcie naukowe.....	4
4.3.	Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.....	4
4.3.1.	Wprowadzenie	4
4.3.2.	Cel pracy	7
4.3.7.	Problemy integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi	18
4.3.3.	Analiza ścisłego wyrównania sieci kontrolnej integrującej niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi.....	22
4.3.4.	Ścisłe wyrównanie przykładowej sieci kontrolnej integrującej niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi w różnych wariantach obliczeniowych	28
4.3.5.	Podsumowanie	32
4.3.6.	Literatura	36
5.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.....	39
5.1.	Komentarz do prac badawczych spoza tematyki wskazanego osiągnięcia naukowego	39
5.2.	Publikacje z listy A Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego indeksowane przez JCR	41
5.4.	Publikacje naukowe z listy B MNiSW, rozdziały monografii, indeksowane materiały pokonferencyjne	42
5.5.	Dorobek i osiągnięcia w zakresie popularyzatorskim, organizacyjnym i dydaktycznym.....	43
5.6.	Zestawienie wybranych wskaźników	44

1. Imię i Nazwisko

Radosław Baryła

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

1. **Tytuł magistra inżyniera**, kierunek Geodezja i Kartografia, w zakresie geodezji gospodarczej, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie dnia 15 lipca 1997 r.

Praca magisterska pt.: „Opracowanie mapy numerycznej ewidencji gruntów – zakres i metody wykorzystania dokumentacji ewidencji gruntów założonej na podstawie pomiaru bezpośredniego w latach 1963 – 1990”, współautor: Adam Ciećko, promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Oszczak, prof. zw.,

2. **Świadectwo ukończenia Studiów Poddyplomowych** w zakresie szacowania nieruchomości, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie dnia 15 września 1997 r.

3. **Stopień naukowy doktora nauk technicznych** w dyscyplinie geodezja i kartografia w zakresie geodezji satelitarnej nadany dnia 25 czerwca 2002 r. przez Radę Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Tytuł rozprawy doktorskiej: „Badania nad zastosowaniem metody RTK dla inwentaryzacji i modernizacji osnów geodezyjnych”.

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Stanisław Oszczak, prof. zw.

Recenzenci rozprawy doktorskiej:

- 1) prof. dr hab. inż. Idzi Gajderowicz, prof. zw. (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie),
- 2) prof. dr hab. inż. Jan Gocał, prof. zw. (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie).

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1. Od 01 października 1997r. do 25 czerwca 2002r. – doktorant – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie (do 1999r. Akademia Rolniczo-Techniczna w Olsztynie), Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej na stanowisku adiunkta (obecnie Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa)



2. Od 16 grudnia 2002r. – adiunkt – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej na stanowisku adiunkta (obecnie Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa).
3. Od 29 kwietnia 2005r. do 31 grudnia 2011r. – adiunkt – Wszechnica Warmińska w Lidzbarku Warmińskim.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust.2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz. u. 2016 r. poz. 882 ze zm.)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki jest monografia pt.: „**Integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w badaniach nad antropogenicznymi deformacjami powierzchni Ziemi**”. Olsztyn 2018 (... s., Ark. wyd. 21, ISBN 978-83-8100-111-3).

4.2. Publikacja stanowiąca osiągnięcie naukowe

Radosław Baryła, „**Integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w badaniach nad antropogenicznymi deformacji powierzchni Ziemi**”, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn 2018 (... s., Ark. wyd. 21, ISBN 978-83-8100-111-3).

Recenzenci wydawniczy:

- 1) prof. dr hab. inż. Edward Osada, prof. zw.,
- 2) dr hab. inż. Bogdan Skorupa.

4.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.3.1. Wprowadzenie

Od początku aktywności naukowej w sferze moich zainteresowań znajdował się rozwój nowych technik oraz metod pozyskiwania danych pomiarowych z wykorzystaniem systemów GNSS (*Global Navigation Satellite System*), mogących znaleźć zastosowanie w pracach geodezyjnych wymagających precyzyjnych rozwiązań. W pewnej liczbie zadań techniki satelitarne wypierają narzędzia i metody klasycznej geodezji. Z drugiej jednak strony w zadaniach wymagających najwyższej dokładności oraz wiarygodności metody satelitarne stanowią doskonałe uzupełnienie klasycznych metod pomiarowych, co z kolei prowadzi do konieczności opracowania metodologii ich integracji. Moja wieloletnia współpraca z ośrodkami badawczymi i podmiotami gospodarczymi w zakresie badań deformacji terenu umożliwiła zarówno rozwój metodologii wykonywania i opracowania klasycznych oraz satelitarnych pomiarów, jak i jej praktyczne zastosowanie. Doświadczenia pokazały, iż właściwym rozwiązaniem tego typu badań jest

integracja pomiarów satelitarnych z precyzyjną niwelacją geometryczną. Przy zachowaniu odpowiednich procedur pomiarowych oraz obliczeniowych obie metody umożliwiają pozyskanie dokładnych i wiarygodnych danych, jednakże ich łączne wykorzystanie eliminuje szereg ograniczeń występujących przy ich oddzielnym wykorzystaniu.

Integrację niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w badaniach deformacji terenu należy rozpocząć na etapie projektowania sieci kontrolnej. Biorąc pod uwagę możliwość wykorzystania pomiarów satelitarnych do realizacji układu odniesienia oraz badania stałości punktów referencyjnych (odniesienia), dla których wzrost odległości między mierzonymi punktami nie wpływa znacząco na względne dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów, sieć kontrolna może przybierać dowolną wielkość uzależnioną głównie od wielkości obszaru występowania deformacji oraz możliwości stabilizacji znaków punktów referencyjnych poza tym obszarem. Pomiarami satelitarnymi przenosi się układ odniesienia na punkty kontrolowane, tym samym wyznaczane są przestrzenne wskaźniki deformacji w bezpośrednim otoczeniu tych punktów. Wykorzystanie niwelacji geometrycznej może wpłynąć na możliwość znacznego zagęszczenia badanego obszaru dodatkowymi punktami kontrolowanymi, na które nie będzie potrzeby przeprowadzania pomiarów satelitarnych, a tym samym zwiększenia rozdzielczości uzyskiwanych pionowych wskaźników deformacji. Niwelacja geometryczna dodatkowo może być wykorzystania do badania stabilności jak i bezwzględnych osiadań budynków i budowli inżynierskich. Pełna integracja wyżej wymienionych technik pomiarowych jest możliwa pod warunkiem zastosowania odpowiedniej konstrukcji znaków referencyjnych i kontrolowanych, umożliwiających jednoznaczną identyfikację mierzonych punktów, oraz sposobów wymuszonej stabilizacji anten satelitarnych na tych znakach (Baryła 2007), które w maksymalnym stopniu wykluczają powstawanie błędów przypadkowych.

Rozwój satelitarnych technik pomiarowych może być również z powodzeniem wykorzystany do integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w badaniach deformacji terenu na istniejących sieciach kontrolnych. Pomiary satelitarne w tym przypadku mogą spełniać taką samą funkcję co w przypadku nowych sieci kontrolnych. Warunek zachowania ciągłości badań będzie zachowany poprzez stabilizację nowych punktów referencyjnych w pobliżu dotychczasowych punktów odniesienia, których współrzędne zostaną wyznaczone w dotychczasowym układzie odniesienia. W przypadku punktów kontrolowanych istniejących sieci, stabilizowanych różnej klasy znakami wysokościowymi (ziemnymi, ściennymi) dla potrzeb niwelacji geometrycznej, nie ma możliwości przeprowadzenia pomiarów satelitarnych z wymuszonym centrowaniem anteny GNSS, jak również zachodzi duże prawdopodobieństwo wystąpienia znacznych zasłon terenowych. Jedynym rozwiązaniem integracji punktów kontrolnych istniejących sieci kontrolnych jest zastosowanie specjalnej konstrukcji znaków punktów pośrednich (Baryła i in. 2017) i odpowiedniej procedury pomiarowej (Baryła i in. 2016).

Wykorzystując pomiary satelitarne w badaniach deformacji terenu należy opracować odpowiednie strategie: pomiarową oraz obliczeniową, adekwatne do wielkości sieci i przewidywanych dokładności wyników końcowych. Na etapie opracowywania tych strategii należy również wziąć pod uwagę to, że wyniki w postaci współrzędnych wyznaczanych punktów uzyskiwane w czasie rzeczywistym lub w postprocessingu na podstawie obserwacji sygnałów emitowanych przez satelity GNSS, obarczone są różnymi błędami wynikającymi z ciągłej zmienności otaczającej Ziemię atmosfery (głównie jonosfera i troposfera), warunków pomiarowych (zasłony sfery niebieskiej), jak i z niedoskonałości samych systemów

nawigacji satelitarnej (Wielgosz i in. 2011, Baryła i in. 2014b, Stępnik i in. 2015). Do głównych czynników zmniejszających dokładność pozycjonowania satelitarnego można zaliczyć: błędy efemeryd satelitów, wpływ jonosfery, wpływ troposfery, wielotorowość sygnału, błędy odbiornika satelitarnego, zmienność centrum fazowego anten satelitarnych.

W badaniach deformacji terenu z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych ważnym elementem, oprócz sposobu wyznaczenia wysokości anteny satelitarnej względem badanego punktu, okazuje się znajomość położenia jej średniego centrum fazowego *MPC* (*Mean Electrical Antenna Phase Center*) w układzie lokalnym anteny. Punkt *MPC* jest właściwym, średnim punktem trójwymiarowej powierzchni *PCV* (*Phase Center Variations*), w którym skupiają się fale elektromagnetyczne wysyłane przez satelity. Anteny satelitarne wykorzystywane w pomiarach geodezyjnych są bardzo zróżnicowane ze względu na kształt, konstrukcję oraz materiały z których są wykonane. Zmienność położenia centrów fazowych anten satelitarnych jest źródłem błędów w precyzyjnych pomiarach satelitarnych, szczególnie w opracowaniu sieci geodezyjnych, badaniach deformacji terenu, itp. (Schmitz 2001, Becker i in. 2010, Baryła i in. 2011). Toteż w trakcie prowadzonych badań przeprowadzono indywidualną kalibrację anten GNSS wykorzystywanych w badaniach deformacji terenu. Do tego celu skonstruowano stanowisko do kalibracji anten GNSS, zwłaszcza dla potrzeb wyznaczania deformacji terenu (Baryła i in. 2018). Problem zachowania stałości położenia *MPC* przez anteny GNSS może być pomijany w cyklicznych badaniach parametrów deformacji z wykorzystaniem tylko obserwacji satelitarnych, zachowując zasadę niezmienności wykorzystywanego sprzętu na poszczególnych punktach, powstałe przyrosty do współrzędnych punktów będą eliminowane w drodze różnicowania wyników obserwacji z danej epoki względem epoki odniesienia (wyjściowej). Natomiast znajomość indywidualnych poprawek do centrów fazowych anten niezębna jest w dwóch przypadkach. Pierwszy ma miejsce w integracji pomiarów satelitarnych z precyzyjną niwelacją geometryczną na istniejącej sieci kontrolnej. Istniejące poprawki do *MPC* anten wykorzystywanych w pomiarach satelitarnych mogą w znaczny sposób wpłynąć na dokładność modelu lokalnej quasi-geoidy (jeżeli będzie wyznaczany na podstawie połączenia wyników obserwacji klasycznych i satelitarnych) lub będą wprost zniekształcać wyniki integracji zwiększając tym samym wartość średnich błędów wyznaczanych wysokości punktów kontrolowanych. Drugi przypadek może mieć miejsce w momencie awarii anteny. Zachodzi wówczas potrzeba zmiany anteny na nową w trakcie trwania badań deformacji. Występujące poprawki do *MPC*, anteny uszkodzonej i nowej, mogą się zsumować wprowadzając tym samym fałszywą wartość wyznaczenia współrzędnych punktu, która może zostać zinterpretowana jako zmiana położenia stabilnego punktu lub wpłynąć na wartość wyznaczanych wskaźników deformacji.

W monografii habilitacyjnej przybliżona została tematyka związana z badaniem deformacji terenu: podstawowe definicje, źródła powstawania, sposoby ich wyznaczania. Opisano istotę pomiarów satelitarnych, podstawowe źródła błędów oraz możliwości ich zmniejszenia, jak również proces niwelacji geometrycznej oraz technikę precyzyjnej niwelacji geometrycznej. Zweryfikowano różnice między niwelacją geometryczną i pomiarami satelitarnymi, jak i możliwości ich integracji poprzez zastosowanie odpowiedniego modelu quasi-geoidy. Dodatkowo szczególną uwagę poświęcono problematyce zachowania stałości centrum fazowego anten GNSS. W tym celu opracowano specjalny sposób kalibracji anten GNSS, z wykorzystaniem stanowiska do kalibracji anten GNSS, zwłaszcza dla potrzeb deformacji terenu (Baryła i in. 2018).

4.3.2. Cel pracy

Głównym celem pracy jest zbadanie możliwości integracji niwelacji geometrycznej, przeprowadzanej techniką precyzyjnej niwelacji geometrycznej, z pomiarami satelitarnymi w badaniach deformacji terenu w celu osiągnięcia pożądanego wysokiej dokładności oraz wiarygodności wyników. Rozwiązanie takie umożliwia określenie wskaźników deformacji z dokładnością pojedynczych milimetrów. W ogólnym założeniu zaproponowane podejście integracji polega na przeniesieniu układu odniesienia techniką satelitarną z punktów referencyjnych znajdujących się w znacznej odległości od obiektu badań, na wybrane punkty kontrolowane sieci kontrolnej, które mają stanowić bezpośrednie nawiązanie dla niwelacji geometrycznej zagęszczającej pomiary. Następnie pomiar klasyczny ma na celu szybkie pozyskanie aktualnej informacji z dużą przestrzenną rozdzielczością na badanym obszarze. Szczególny przypadek zastosowania niniejszego rozwiązania może mieć miejsce w przypadku wystąpienia nagłych zmian powierzchniowych na określonych fragmentach sieci kontrolnych obejmujących znaczne obszary, na których stosunkowo rzadko przeprowadzane są pomiary okresowe.

Integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w badaniach deformacji terenu może przebiegać z wykorzystaniem następujących sposobów:

- niwelacja klasyczna połączona z przeprowadzeniem statycznych pomiarów satelitarnych na tych samych punktach nowych sieci kontrolnych;
- przeniesienie wysokości techniką satelitarną z punktów referencyjnych na punkty kontrolowane sieci kontrolnej, które następnie pełnią funkcję odniesienia dla pomiarów klasycznych przeprowadzanych na wybranym fragmencie sieci kontrolnej;
- niwelacja klasyczna połączona ze statycznymi pomiarami satelitarnymi poprzez punkty pośrednie integrujące odmienne technologie pomiarowe, przeprowadzane na istniejącej sieci kontrolnej.

Realizowane przez autora w latach 2004 – 2016 projekty badawcze związane z badaniem deformacji terenu na obszarach miejskich i górniczych oprócz opracowania metodologii integracji przyczyniły się również do opracowania odpowiednich konstrukcji sieci kontrolnych integrujących niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi. Ponadto wprowadzono nowe konstrukcje znaków referencyjnych i kontrolowanych, sposoby ich stabilizacji, jak i rozwiązania patentowe niezbędne do realizacji tych badań. W trakcie badań skupiono się również nad takimi szczegółowymi zagadnieniami jak: źródła powstawania błędów pomiarowych i sposoby ich redukcji, zasady opracowania danych obserwacyjnych oraz właściwa interpretacja uzyskanych wyników z pomiarów okresowych.

Opracowane w trakcie prowadzonych pomiarów deformacji terenu technologie, zdobyte doświadczenia, jak i pozyskane dane obserwacyjne, posłużyły do realizacji głównego celu pracy związanego z wyznaczeniem i analizą pionowych wskaźników deformacji terenu oraz ich dokładności na podstawie integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi. Na poligon doświadczalny wybrano obiekt zlokalizowany w pobliżu odkrywki Kopalni Węgla Brunatnego „Adamów” w Turku, znajdujący się w granicach wpływów eksploatacji górniczej. Na wybranej sieci kontrolnej realizowano synchronicznie pomiary niwelacji geometrycznej oraz pomiary satelitarne. Proces obliczeniowy, oparty na wartościach przewyższeń między punktami uzyskanych z niwelacji geometrycznej oraz współrzędnych punktów z

pomiarów satelitarnych, przeprowadzono na podstawie czterech wariantów ścisłego wyrównania. Przeprowadzone badania integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi mają udzielić odpowiedzi na dwie postawione tezy badawcze: czy takie rozwiązanie można zastosować w przypadku znacznej odległości punktów referencyjnych (rozległy obszar oddziaływania kopalni) od obszaru badanego (teren intensywnie zurbanizowany) oraz jakie są możliwości wyznaczania wskaźników deformacji terenu w przypadkach wystąpienia nagłych zdarzeń (zawały górnicze), poprzez przeniesienie układu współrzędnych pomiarami satelitarnymi w rejon zdarzenia, a następnie przeprowadzenie niwelacji geometrycznej w celu uzyskania danych szczegółowych?

4.3.3. Wykorzystanie pomiarów satelitarnych w badaniach deformacji

Rozwój technologii pomiarowych, zwłaszcza satelitarnych, przyczynił się do zmiany koncepcji przy projektowaniu sieci kontrolnych. Uzyskiwane z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych duże dokładności współrzędnych punktów, niezależnie od odległości między mierzonymi punktami (długości wyznaczanych wektorów), od 90-tych lat XX wieku sprzyjały zastępowaniu pomiarów klasycznych satelitarnymi. Pierwsze w skali kraju prace integrujące pomiary satelitarne z siecią triangulacyjną (powierzchniową) przeprowadził w 1993 roku zespół Prof. dr. hab. Stanisława Oszczaka (Oszczak i in. 1999). W tym przypadku przeprowadzony proces miał na celu wyeliminowanie żmudnych pomiarów kątowych, niejednokrotnie przeprowadzanych na punktach zabudowanych wątpliwej jakości wieżami triangulacyjnymi. Pomimo uzyskiwania współrzędnych poziomych punktów o dużej dokładności, problemy natury technicznej oraz programowej (obliczeniowej) uniemożliwiły rozszerzenie badań na kontrolną sieć wysokościową (niwelacyjną).

Bardzo ważnym czynnikiem w badaniach deformacji terenu jest zachowanie ciągłości wyników pomiarów z jednoczesnym utrzymaniem ich wysokiej dokładności. O ile w niwelacji geometrycznej zachowanie tego warunku nie stanowi większego problemu, to zastosowanie pomiarów satelitarnych wymusza opracowanie odpowiednich strategii pomiarowych i obliczeniowych. Obiekty obejmowane badaniami różnią się pod względem wielkości opracowania, charakterystyki występujących deformacji, lokalizacji względem punktów sieci IGS (*International GNSS Service*) lub EPN (*EUREF Permanent Network*). Z tego też względu należy opracować odpowiednią dla danego obiektu strategię pomiarową zapewniającą: możliwość prawidłowego zdefiniowania układu wyjściowego na podstawie dowiązania do sieci IGS lub EPN, przeprowadzenie w każdej kampanii pomiarowej badania stałości położenia punktów referencyjnych, dokładne wyznaczenie oraz weryfikację dokładności współrzędnych punktów kontrolowanych. Strategia obliczeniowa powinna być przeprowadzona z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania z zastosowaniem następujących danych dotyczących: rodzaju sygnału, precyzyjnych orbit satelitów, modeli troposfery i jonosfery, modeli centrów fazowych anten GNSS (Wielgosz i in. 2011, Baryła i in. 2014b, Stępiak i in. 2015). Ponadto strategia obliczeniowa powinna być dostosowana do średniej długości rozpatrywanych wektorów z wyznaczeń satelitarnych (w danym obiekcie inna do wyznaczenia współrzędnych punktów referencyjnych – długie wektory, i do wyznaczenia relacji między punktami kontrolowanymi a referencyjnymi – krótkie wektory), jak również powinna być zachowana przez cały okres prowadzenia badań. W przypadku potrzeby zmiany strategii obliczeniowej w trakcie prowadzenia badań, wszystkie dotychczas otrzymane zbiory obserwacyjne należy przeliczyć w celu utrzymania ciągłości badań.

Zastosowanie pomiarów satelitarnych w badaniach deformacji terenu, umożliwia znaczne oddalenie punktów referencyjnych od obszaru podlegającego deformacjom, co istotnie ogranicza, a nawet eliminuje, wpływ tych czynników na stabilność w czasie lokalnego układu współrzędnych definiowanego przez zbiór tych punktów. Zbyt duże oddalenie punktów referencyjnych od punktów kontrolowanych, w znacznym stopniu zmniejsza ekonomiczność zastosowania niwelacji geometrycznej. W takim przypadku najlepszym rozwiązaniem może być połączenie obu technik pomiarowych. Pomiar satelitarny będzie wówczas stanowić źródło pośredniego nawiązania do punktów referencyjnych niwelacji geometrycznej, przeprowadzanej tylko na zbiorze punktów kontrolowanych (Wielgosz i in. 2014). W takim rozwiązaniu nie zachodzi potrzeba stabilizacji punktów wiążących (pośrednich), a znaczne oddalenie punktów referencyjnych od badanego obiektu nie wpływa na pogorszenie dokładności wyników pomiarów satelitarnych, pod warunkiem zachowania odpowiednich procedur pomiarowych oraz obliczeniowych, co umożliwi prawidłową weryfikację stałości ich położenia.

4.3.4. Projektowanie sieci kontrolnej integrującej niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi

Prowadzone przez Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie badania nad zastosowaniem pomiarów satelitarnych w wyznaczaniu pionowych deformacji terenu Głównego i Starego Miasta Gdańska (Baryła i in. 2007b) oraz na obszarze odkrywki „Kozłmin I” PAK KWB Adamów S.A. w Turku (Baryła i Paziewski 2012), przyczyniły się do opracowania nowej koncepcji sieci kontrolnej, integrującej niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi, technologii pomiarowej oraz procesów obliczeniowych.

Badania deformacji terenu rozpoczyna opracowanie projektu sieci kontrolnej obejmującej obszar występowania zjawiska, zawierającej punkty kontrolowane (obrazujące zmiany powierzchniowe, lokalizowane na badanym obszarze) oraz punkty referencyjne (definiujące układ odniesienia niezmienny co najmniej w okresie przewidzianym do prowadzenia badań, lokalizowane poza obszarem występowania deformacji). Projekt, który będzie integrował dwie odmienne techniki pomiarowe, musi zapewniać możliwość prawidłowego przeprowadzenia pomiarów tymi technikami do tych samych, jednoznacznie zidentyfikowanych punktów terenowych (kontrolowanych). Bardzo ważnym czynnikiem prawidłowej integracji różnych technik pomiarowych jest wspólny układ odniesienia definiowany zbiorem punktów referencyjnych. Przeprowadzane pomiary różnymi technikami pomiarowymi powinny nawzajem uzupełniać się lub zwiększać wiarygodności wspólnie uzyskiwanych wyników. Integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi na etapie projektowania sieci kontrolnej, oprócz analizy warunków geologicznych objętego badaniem obszaru, powinna uwzględniać:

- warunki topograficzne – zapewnienie krótkich ciągów niwelacyjnych między sąsiednimi punktami, łatwość przemieszczania się zespołów pomiarowych w trakcie realizacji pomiarów, możliwość dojazdu do punktu oraz brak zasłon terenowych w przypadku pomiarów satelitarnych,
- konstrukcję znaków punktów kontrolowanych – zapewniającą jednoznaczną identyfikację punktu w trakcie pomiaru różnymi technikami, wykluczającą efekty zmiany położenia znaku ze względu na czynniki zewnętrzne (zamarzanie gruntu, zmienne warunki wilgotności gruntu),
- konstrukcję znaków punktów referencyjnych – podobnie jak w przypadku znaków punktów kontrolowanych oraz powinna zapewnić największą dokładność przeprowadzanych kilkugodzinnych pomiarów satelitarnych.

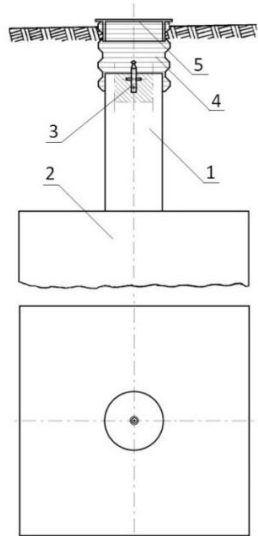
W celu integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi opracowano projekt znaków punktów kontrolowanych stabilizowanych podziemnymi znakami fundamentalnymi (rys. 1). Lokalizacja punktów kontrolowanych wymaga dokładnego prześledzenia rozłożenia zasłon terenowych wokół miejsc przewidzianych do ich stabilizacji. Z tego względu należy przeprowadzić wnikliwy wywiad terenowy, w trakcie którego zweryfikowany zostanie projekt sieci kontrolnej, wyznaczając dokładną lokalizację punktów kontrolowanych uwzględniając następujące czynniki (Baryła i in. 2007a):

- warunki przeprowadzenia obserwacji GNSS (maks. odkryta sfera niebieska),
- możliwość wykonania stabilizacji ziemnego znaku fundamentalnego punktu kontrolowanego,
- możliwość przeprowadzenia precyzyjnej niwelacji geometrycznej,
- uzyskanie zezwolenia na budowę znaku geodezyjnego w wybranym miejscu,
- brak podziemnego uzbrojenia terenu w miejscu stabilizacji i w bezpośrednim jego sąsiedztwie,
- brak linii wysokiego napięcia w pobliżu punktu (zakłócenia sygnału GNSS),
- zachowanie trwałości znaku (małe ryzyko zniszczenia).

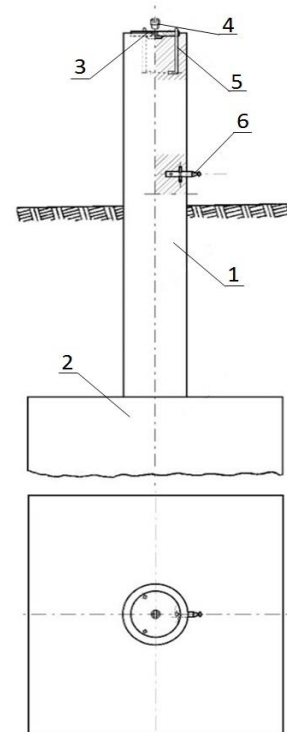
Punkty referencyjne w badaniach deformacji terenu powinny wyróżniać się niezmiennością bezwzględnej położenia co najmniej w okresie przewidzianym do prowadzenia badań, a ich ilość w sieci kontrolnej powinna zapewnić możliwość wzajemnej kontroli stałości położenia. W celu zapewnienia pełnej weryfikacji stałości punktów referencyjnych, które mają na celu definiowanie lokalnego układu współrzędnych, w projekcie należy przyjąć stabilizację co najmniej czterech punktów referencyjnych nadziemnymi znakami fundamentalnymi, dla których opracowano specjalną konstrukcję (rys. 2). Wszystkie miejsca lokalizacji punktów referencyjnych powinny charakteryzować się brakiem zasłon terenowych oraz znajdować się na obszarach wolnych w najbliższym czasie od inwestycji. Wybierając w trakcie wywiadu terenowego szczegółowe miejsca lokalizacji punktów referencyjnych należy kierować się następującymi zasadami (Oszczak i in. 2006):

- dogodne warunki przeprowadzenia obserwacji GNSS (brak zasłon sfery niebieskiej od 10° nad horyzontem,
- możliwość wykonania stabilizacji nadziemnego znaku fundamentalnego punktu referencyjnego,
- odpowiednia stabilność gruntu,
- ustalenie właściwej geometrii sieci punktów referencyjnych oraz punktów kontrolowanych,
- uzyskanie zezwolenia na budowę znaku geodezyjnego w wybranym miejscu,
- zachowanie trwałości znaku (małe ryzyko zniszczenia),
- brak linii wysokiego napięcia w pobliżu punktu (zakłócenia sygnału GNSS),
- możliwość łatwego dojazdu do miejsca lokalizacji punktu referencyjnego.

Dla potrzeb integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi opracowano sieci kontrolne na obszarze miejskim Głównego i Starego Miasta Gdańska oraz na obszarze eksploatacji górniczej PAK Kopalni Węgla Kamiennego „Adamów” w Turku. Na podstawie współpracy z Państwowym Instytutem Geologicznym w Warszawie, powyższe założenia i konstrukcje znaków referencyjnych oraz kontrolowanych wykorzystano w projektach sieci kontrolnych na obiektach wiertni gazu łupkowego: Babiak (woj. warmińsko-mazurskie), Berejów (woj. lubelskie), Lewino (woj. pomorskie), oraz na obszarze nieczynnej kopalni soli w Wapnie (woj. wielkopolskie).



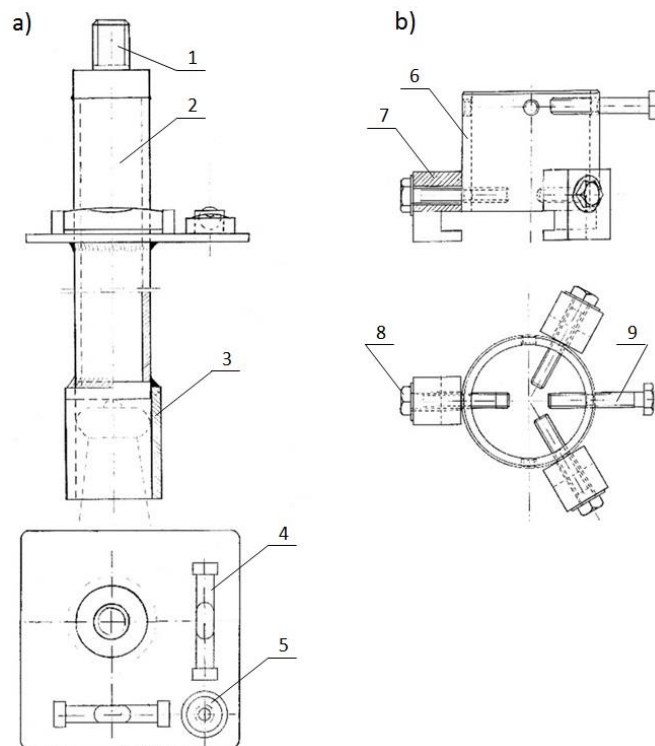
Rys. 1. Fundamentalny znak podziemnego punktu kontrolowanego: 1 – słup żelbetowy, 2 – stopa fundamentowa, 3 – reper, 4 – dren studni, 5 – pokrywa studni



Rys. 2. Fundamentalny znak nadziemnego punktu referencyjnego: 1 – słup żelbetowy, 2 – stopa fundamentowa, 3 – głowica znaku, 4 – śruba mocująca spodarkę, 5 – kotwa, 6 – reper boczny

4.3.5. Eliminacja błędów centrowania i pomiaru wysokości anten GNSS

W przypadku przeprowadzania integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi, ważną rolę odgrywa sposób ustawienia anteny satelitarnej nad badanym punktem. W praktyce geodezyjnej do tego celu wykorzystuje się statyw oraz spodarkę z możliwością przeprowadzenia procedury centrowania z poziomowaniem, natomiast samą wysokość anteny względem znaku definiującego punkt pomiarowy mierzy się przymiarem (ruletką, liniałem drążkowym). Osłabienie wpływu pomiarów wysokości anten GNSS na wyniki pomiarów osiągnięto poprzez zastosowanie na punktach kontrolowanych (rys. 1) przedstawionego na rys. 3 przyrządu do wymuszonego precyzyjnego centrowania anteny GPS – wzór patentowy nr 64831 (Baryła 2007), który zapewnia stałą (znaną) odległość od punktu mierzonego do punktu *ARP* (*Antenna Reference Point*) anteny GNSS. Natomiast na punktach referencyjnych (rys. 2) zastosowano wymuszone centrowanie spodarki geodezyjnej i precyzyjnego pomiaru wysokości suwmiarką między głowicą znaku a geometrycznymi punktami danej anteny GNSS.



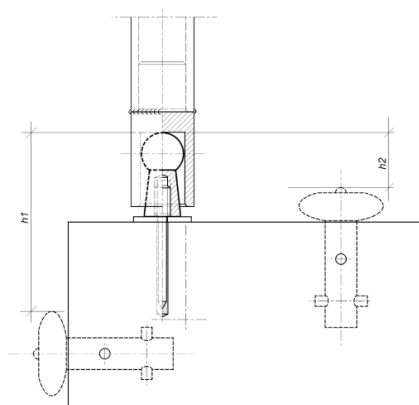
Rys. 3. Przyrząd do wymuszonego precyzyjnego centrowania anteny GPS, wzór patentowy nr 64831, *a* – schemat przyrządu, *b* – głowica do stabilizacji przyrządu, montowana do statywu geodezyjnego: 1 – śruba mocująca antenę, 2 – korpus przyrządu (rura), 3 – tuleja stabilizująca, 4 – libella rurkowa, 5 – libella pudełkowa, 6 – tuleja głowicy stabilizującej, 7 – element mocujący głowicę do statywu, 8 – śruba montażowa, 9 – śruba pozycjonująca przyrząd
Źródło: Baryła (2007)

Jeżeli integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi przeprowadzana jest na istniejącej sieci kontrolnej, to na pewno pojawi się problem jednoznacznej identyfikacji wspólnych punktów kontrolowanych. Problem ten jest istotny ze względu na zachowanie ciągłości prowadzonych badań i może zostać rozwiązany poprzez zastosowanie odpowiednich rozwiązań: sposób wyznaczenia deformacji terenu, zwłaszcza terenu górniczego (Baryła i in. 2016), znak punktu pośredniego (Baryła i in. 2017). Od 2012r., na podstawie współpracy UWM w Olsztynie i Centrum Badawczo-Rozwojowym CUPRUM KGHM Polska Miedź we Wrocławiu, przeprowadzana jest integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi na istniejącej sieci kontrolnej LGOM 2 klasy zlokalizowanej na obszarze Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego.

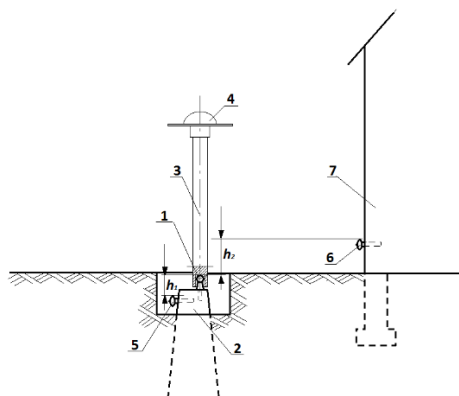
Analizując konstrukcję ziemnych znaków punktów węzłowych sieci Niwelacji Precyzyjnej LGOM 2 klasy, zwrócono uwagę na wiele niedogodności do przeprowadzenia bezpośrednich pomiarów satelitarnych. Wynikały one głównie z różnej konstrukcji znaków stanowiących właściwy punkt wysokościowy (repery), charakteryzujących się zmienną średnicą, jak i ułożeniem osi względem granitowego lub żelbetonowego słupa znaku – w górnej płaszczyźnie lub z boku. Dodatkowo znaki te znajdują się w miejscach o ograniczonej widoczności sfery niebieskiej. Przeprowadzona weryfikacja sposobu stabilizacji punktów istniejącej sieci całkowicie wykluczyła możliwość przeprowadzenia na nich bezpośrednich pomiarów satelitarnych z wymuszonym centrowaniem anten GNSS. Dlatego opracowano koncepcję przeprowadzenia pomiaru satelitarnego na punkcie pośrednim, według zgłoszenia patentowego

nr W.126017 (Baryła i in. 2017), którą przedstawia rys. 4. W pierwszej kolejności, przed rozpoczęciem kampanii pomiarowej, stabilizuje się na istniejących znakach punktów wysokościowych znaki punktów pośrednich (rys. 4). Jeżeli zachodzi możliwość przeprowadzenia bezpośredniego pomiaru satelitarnego na istniejącym punkcie osnowy wysokościowej, znak punktu pośredniego może być montowany w głowicy znaku tego punktu. W przypadku gdy na istniejącym punkcie występują znaczne zasłony terenowe lub jest to punkt stabilizowany znakiem ściennym, punkt pośredni należy montować w niedalekim sąsiedztwie punktu macierzystego z dobrymi warunkami do realizacji pomiaru satelitarnego. Do montażu punktów pośrednich można wybierać betonowe lub kamienne elementy infrastruktury technicznej, trwale związane z gruntem i zapewniające niezmienność położenia przez okres danej zintegrowanej kampanii pomiarowej. Przeniesienie wysokości (wyznaczenie przewyższeń) z macierzystych punktów kontrolowanych na punkty pośrednie (rys. 5), realizuje się w trakcie niwelacji geometrycznej. Relacje te, ze względu na możliwość montażu punktów pośrednich na elementach podlegających innym wpływom niż deformacje terenu (przemarzanie, zmienna wilgotność wierzchniej warstwy gruntu), powinny być wyznaczane w trakcie każdej następnej zintegrowanej kampanii pomiarowej (Baryła i in. 2016).

W celu zminimalizowania wpływu błędów centrowania anten GNSS oraz efektów będących efektem charakterystyk użytego instrumentarium na wyniki pomiarów poszczególnym punktom referencyjnym oraz kontrolowanym należy przyporządkować zestawy pomiarowe, które powinny być niezmiennie przez cały okres prowadzenia badań deformacji terenu. Skład zestawu stanowi odbiornik GNSS, antena GNSS, a w przypadku punktów kontrolowanych dodatkowo przyrząd do wymuszonego precyzyjnego centrowania anteny GPS, wszystkie identyfikowane odpowiednimi numerami seryjnymi lub ewidencyjnymi.



Rys. 4. Montaż znaku punktu pośredniego w głowicy granitowego (lub żelbetonowego) znaku punktu wysokościowego sieci kontrolnej – zgłoszenie patentowe nr W.126017 (Baryła i in. 2017)



Rys. 5. Sposób wyznaczenia deformacji terenu, zwłaszcza terenu górniczego – patent nr 223063 (Baryła i in. 2016): 1 – znak punktu pośredniego, 2 – fundamentalny znak podziemny punktu wysokościowego, 3 – przyrząd do wymuszonego precyzyjnego centrowania anteny GPS (Baryła 2007), 4 – antena GNSS, 5 – reper, 6 – reper ścienny, 7 – ściana budynku

4.3.6. Kalibracja anten GNSS przed pomiarem deformacji terenu

Wnioski z przedstawionych powyżej badań przyczyniły się do potrzeby przeprowadzenia indywidualnej kalibracji anten GNSS. Na dokładność wyników pomiarów satelitarnych w badaniach deformacji terenu zauważa się problem zachowania stałości położenia *MPC* przez anteny GNSS, który może być pomijany w cyklicznych badaniach deformacji z wykorzystaniem tylko obserwacji satelitarnych z zachowaniem niezmienności wykorzystywanego sprzętu pomiarowego na poszczególnych punktach. Powstałe przyrosty do współrzędnych punktów będą eliminowane w drodze różnicowania wyników obserwacji z danej epoki względem epoki odniesienia (wyjściowej). Natomiast znajomość indywidualnych poprawek do centrów fazowych anten GNSS niezbędna jest w dwóch przypadkach. Pierwszy ma miejsce w integracji pomiarów satelitarnych z precyzyjną niwelacją geometryczną na istniejącej sieci kontrolnej. Znajomość poprawek do *MPC* anten GNSS wykorzystywanych w pomiarach satelitarnych mogą w znaczny sposób wpłynąć na dokładność modelu lokalnej quasi-geoidy (jeżeli będzie wyznaczany na podstawie połączenia wyników obserwacji klasycznych i satelitarnych) lub będą wprost zniekształcać wyniki integracji zwiększając tym samym wartość średnich błędów wyznaczanych wysokości punktów kontrolowanych. Drugi przypadek może mieć miejsce w momencie awarii anteny. Zachodzi wówczas potrzeba zmiany anteny na nową w trakcie trwania badań deformacji. Występujące poprawki do *MPC*, anteny uszkodzonej i nowej, mogą się zsumować wprowadzając tym samym fałszywą wartość wyznaczenia współrzędnych punktu, która może zostać zinterpretowana jako zmiana położenia stabilnego punktu lub wpłynąć na wartość wyznaczanych wskaźników deformacji.

Celem kalibracji danego modelu anteny satelitarnej, jest określenie poprawek do centrum fazowego ΔPCV z założeniem, że istnieją konkretne czynniki zależne od miejsca obserwacji, np. parametry danej anteny, efekty wielotorowości sygnału, rodzaj odbieranego sygnału satelitarnego (Wübbena i in. 1997, Dawidowicz i Baryła 2017, Dawidowicz i in. 2017), które mogą modyfikować model PCV oraz wprowadzać dodatkowe błędy pomiarowe. Kalibracja anten może być przeprowadzana w komorze akustycznej (Schupler i Clark 1991, Görres i in. 2006), jak również w terenie przy użyciu rzeczywistych sygnałów GNSS. W przypadku badań terenowych możliwe jest przeprowadzenie kalibracji względnej, w stosunku do anteny odniesienia (Dawidowicz 2011, Mader 2001, Rothacher i in. 1995), lub bezwzględnej, kiedy antena może

realizować ruch obrotowy wokół dowolnej osi w przestrzeni (Görres i in. 2006, Schmid i Rothacher 2003). Kalibracje anten przeprowadzane są przez odpowiednio wyposażone laboratoria, wyznaczające zależności pomiędzy punktem odniesienia anteny *ARP*, średnim położeniem centrum fazowego anteny *MPC* oraz zmianami położenia modelu centrum fazowego *PCV*. W praktyce używane są trzy metody kalibracji anten w celu tworzenia modeli centrów fazowych:

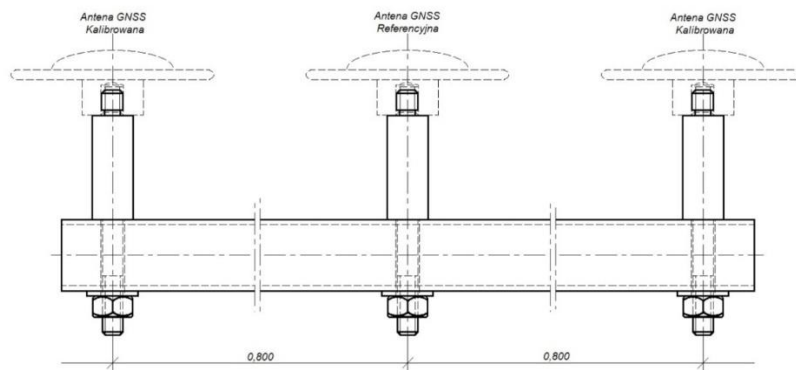
- 1) względna kalibracja polowa,
- 2) pomiary w komorze akustycznej,
- 3) bezwzględna kalibracja polowa.

W metodzie względnej kalibracji polowej przesunięcie oraz zmiana położenia centrum fazowego badanej anteny wyznaczone są z uwzględnieniem tzw. anteny odniesienia. Anteny ustawione są na bardzo krótkiej bazie, której końce mają bardzo dokładnie określone współrzędne. Obserwacje z pomiarów satelitarnych są używane wówczas do obliczenia pozycji centrum fazowego zależnego od wysokości i azymutu obserwowanych satelitów. Uzyskane z kalibracji wyniki obarczone są wpływem anteny odniesienia, które muszą być wcześniej wyznaczone i odpowiednio wyzerowane. Z powodu wpływu wielotorowości sygnału oraz niepełnego pokrycia półsfery satelitami (zasłony terenowe, konstelacja satelitów) typowe rezultaty uzyskanych poprawek ΔPCV , w tym przypadku są zależne tylko od wysokości satelitów nad horyzontem.

Biorąc pod uwagę zmienność położenia centrum fazowego anten GNSS przewidzianych do badań deformacji teren, przeprowadzono indywidualną kalibrację 8 anten GNSS (tab. 1) w okresie od 25 sierpnia do 29 października 2012 roku, na poligonie doświadczalnym w miejscowości Stawiguda oddalonej od Olsztyna ok. 12 km. Dla wszystkich anten biorących udział w kalibracji sprawdzono dostępność modeli *PCV*, następnie pobrano z serwisów IGS i NGS (*National Geodetic Survey*) modele zgodne z układem ITRF2008 (*International Terrestrial Reference Frame*). Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano program *BERNESE v. 5.0*. Badania wykonano na specjalnie zaprojektowanej do tego celu bazie kalibracyjnej (rys. 6) (prawo ochrony DP.W.124889.7.jgas) (Baryła i in. 2018) składającej się z trzech punktów tworzących poziomą linię w kierunku wschód zachód równooddalonych od siebie (0,800 m). Punkt środkowy (rys. 6) stanowi punkt referencyjny z modelową anteną typu Choke Rings DMT – ASH701941B, natomiast na skrajnych punktach, stanowiących bazę kalibracyjną, ustawiano zamiennie poddane indywidualnej kalibracji anteny oraz drugą wzorcową antenę typu Choke Rings DMT – ASH701933D. Do pomiarów kalibracyjnych przyjęto następujące parametry pomiarowe:

- długość sesji obserwacyjnej: 3 doby – start/koniec 00:00 UTC (*Czas Uniwersalny Koordynowany*),
- przerwa na demontaż i montaż anten oraz zgranie i archiwizację danych obserwacyjnych – 1 doba,
- śledzone częstotliwości sygnału GPS: L1, L2,
- interwał pomiarowy: 10 s,
- minimalna wysokość satelity nad horyzontem: 0°,
- maksymalna wartość współczynnika PDOP: 6.

Podstawowym założeniem kalibracji anten GNSS było przeprowadzenie względnych statycznych pomiarów satelitarnych w okresie trzech dób. Wykorzystanie w badaniach precyzyjnych danych efemerydalnych z IGS oraz obserwacji trzydobowych (okres jednej doby umożliwia wykorzystanie pełnej konstelacji satelitów GPS) zwiększa dokładność otrzymanych współrzędnych punktów określających położenie rzeczywistego MPC kalibrowanej anteny względem punktu ARP.



Rys. 6. Schemat przyrządu do kalibracji anten GNSS, prawo ochrony DP.W.124889.7.jgas (Baryła i in. 2018)

Pomiary kalibracyjne prowadzono przez okres 66 dób. Zgromadzone w trakcie pomiarów kalibracyjnych dane obserwacyjne zostały przekonwertowane do formatu RINEX. Ze względu na różne formaty zapisu danych obserwacyjnych zgromadzonych z wykorzystaniem odbiorników satelitarnych różnych producentów, do konwersji należało zastosować następujące programy: Convert to Rinex v.2.1.4.0 – Trimble, JPS2RIN v.1.2.8 – Javad oraz uniwersalny program TEQC, opracowany przez UNAVCO Inc., którym dokonano konwersji danych obserwacyjnych z odbiorników Ashtech i Topcon. Po uporządkowaniu wszystkich danych obserwacyjnych, pobraniu z serwisu IGS danych reprezentujących precyzyjne efemerydy satelitów GPS, ustawieniu odpowiednich parametrów programu obliczeniowego BERNESE, sprawdzono współrzędne punktów bazy kalibracyjnej w układzie ITRF2008, następnie przystąpiono do procesu obliczeniowego.

Otrzymane wyniki indywidualnej kalibracji anten, z uwzględnieniem ich modeli centrów fazowych opracowanych przez serwisy IGS i NGS, wykorzystane zostały do wyznaczenia odpowiednich poprawek względem współrzędnych punktów bazowych, przyjętych jako prawdziwe, które wyznaczone zostały przed rozpoczęciem indywidualnej kalibracji anten, z wykorzystaniem drugiej wzorcowej anteny typu ASH701933D. Punkty bazowe były sprawdzane również w trakcie prowadzonych badań. Punkt referencyjny w pomiarach kalibracyjnych stanowił punkt środkowy bazy kalibracyjnej (rys. 6), na którym obserwacje były rejestrowane permanentnie w okresie kalibracji wszystkich anten. Małe odległości między punktami bazowymi i punktem referencyjnym, przyczyniły się do dużej korelacji sygnałów odbieranych od poszczególnych satelitów w trakcie kalibracji, co jest korzystne na etapie eliminacji błędów podczas tworzenia pseudoobserwacji różnicowych przez program obliczeniowy.

Przyjmując współrzędne punktów bazy kalibracyjnej wyznaczone antenami wzorcowymi oraz współrzędne wyznaczone kalibrowanymi antenami na podstawie trzydobowych obserwacji, obliczone

zostały poprawki do ich modeli PCV udostępnionych przez serwisy IGS i NGS. Wyznaczone poprawki prezentowane są w topocentrycznym układzie lokalnym każdej kalibrowanej anteny jako składowe poziome dN , dE oraz jako składowa wysokościowa dU , która w aspekcie integracji niwelacji geometryczną z pomiarami satelitarnymi, jest najważniejsza. Wyniki kalibracji anten przedstawiono w tabeli 1, która zawiera: modele kalibrowanych anten oraz ich numery seryjne (N/S), poprawki kalibracyjne do MPC jako średnie wartości z wyników otrzymanych z trzech jednodobowych sesji pomiarowych, odchylenia standardowe otrzymanych poprawek kalibracyjnych.

Tabela 1

Średnie wartości poprawek kalibracyjnych anten GNSS, odchylenia standardowe poprawek kalibracyjnych otrzymanych na podstawie trzech jednodobowych sesji pomiarowych

Lp.	Nazwa	Typ anteny GNSS	N/S	Śr. dN [mm]	σ_{dN} [mm]	Śr. dE [mm]	σ_{dE} [mm]	Śr. dU [mm]	σ_{dU} [mm]
1	Trimble	ZEPHYR Geodetic	12680066	0,7	0,5	-0,3	0,2	5,0	1,5
2	Trimble	ZEPHYR Geodetic II	1441112516	-0,8	0,1	0,2	0,0	6,6	0,1
3	Trimble	ZEPHYR Geodetic II	1441101067	0,7	0,5	0,6	0,3	5,7	1,0
4	Trimble	ZEPHYR Geodetic II	1441112279	-0,4	0,1	-0,1	0,0	5,8	0,1
5	Trimble	5800	4442139653	0,4	0,1	-1,1	0,1	5,6	0,0
6	Trimble	5800	4442139640	0,5	0,0	-0,7	0,1	6,3	0,1
7	Trimble	R6	4825155144	-2,6	0,0	-0,7	0,0	8,0	0,2
8	Trimble	R6	4850161616	-2,3	0,1	-1,2	0,0	8,9	0,1
9	Trimble	SPS 882	5027436611	-0,9	0,0	1,4	0,0	5,4	0,1
10	Javad	GrAnt G3T	460	0,3	0,0	-3,0	0,0	3,3	0,0
11	Javad	GrAnt G3T	1348	1,8	0,1	-0,4	0,0	1,6	0,1
12	Javad	Triumph	517	-1,2	0,0	0,2	0,0	-12,7	0,0
13	Javad	Triumph	3180	-1,3	0,1	-0,9	0,1	-15,1	0,1
14	Topcon	HIPER PRO	343-0843	0,6	0,0	-0,8	0,0	3,5	0,1
15	Ashtech	701975.01A	5679	3,0	0,0	0,3	0,1	5,3	0,2
16	Ashtech	701975.01A	5668	3,4	0,1	-0,4	0,0	6,0	0,3

Analizując wyniki kalibracji otrzymane dla każdej anteny w trzech jednodobowych sesjach pomiarowych (tab. 1), można zauważyć na podstawie wartości odchyżeń standardowych σ_{dN} , σ_{dE} , σ_{dU} powtarzalność osiąganych poprawek w granicach dziesiątych części milimetra. W przypadku prawie wszystkich kalibrowanych anten poprawki poziome dN , dE , z wyjątkiem anten: Javad GrAnt G3T (S/N 460: $dE = -3,0$ mm), Trimble R6 ($dN = -2,6 \div -2,3$ mm) i Ashtech 701975.01A ($dN = 3,0 \div 3,4$ mm), nie przekroczyły wartości ± 2 mm. Poprawki wysokościowe dU w przypadku większości kalibrowanych anten są dodatnie i mieszczą się w przedziale od 1,6 mm (antena Javad GrAnt G3T, S/N 01380) do 9,0 mm (antena zintegrowana Trimble R6, S/N 4850161616), z wyjątkiem dwóch anten zintegrowanych Javad Triumph, dla których poprawki wysokościowe osiągnęły wartości odpowiednio: -12,7 mm (S/N 00517), -15,1 mm (S/N 03180).

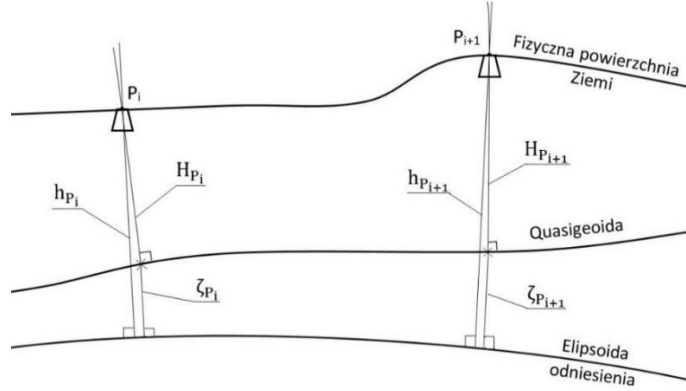
Otrzymane w procesie indywidualnej kalibracji anten GNSS poprawki do MPC mogą być pomijane w pracach związanych z wyznaczeniem punktów poziomej osnowy geodezyjnej, natomiast bezwzględnie muszą być zastosowane w precyzyjnych pomiarach satelitarnych związanych z badaniem deformacji terenu. Wartości poprawek do wysokości badanych anten wskazują na konieczność przeprowadzenia zaproponowanego rozwiązania w przypadku wszystkich anten wykorzystywanych do satelitarnych pomiarów wysokościowych. Należy zauważyć, że w przypadku pomiarów cyklicznych, które mają przede wszystkim miejsce w badaniach deformacji terenu, wartości otrzymanych poprawek będą spełniać funkcję błędów systematycznych eliminowanych w procesie obliczeniowym. Istotne problemy będą pojawiać się wraz z awarią sprzętu pomiarowego i wymianą na nowy. Wówczas nie uwzględnienie poprawek kalibracyjnych, będzie skutkowało wystąpieniem błędów przypadkowych wpływających bezpośrednio na interpretowane wskaźniki deformacji. Szczególną uwagę na wysokościowe poprawki kalibracyjne dU anten GNSS należy zwrócić w integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi. W tym przypadku zmiana wartości tych poprawek uzależniona jest od właściwości użytych anten, a wykorzystanie różnych ich typów, nie zachowujących właściwego modelu PCV (opracowanego przez serwisy IGS i NGS), może prowadzić do zmniejszenia dokładności produktów końcowych tj.: współrzędne punktów osnowy wysokościowej, modelu quasi-geoidy.

4.3.7. Problemy integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi

Przeprowadzając integrację niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi, zachodzi możliwość łącznego wyrównania obserwacji pochodzących z niezależnych technik (Osada 2002, Osada 2014, Baryła i Paziewski 2014a). Wysokość elipsoidalna h_i punktu sieci kontrolnej, uzyskana z pomiarów satelitarnych, stanowi odległość tego punktu od powierzchni elipsoidy odniesienia zliczaną wzdłuż linii normalnej do powierzchni tej elipsoidy oraz zawierającej dany punkt (rys. 7). Natomiast wysokość normalna tego punktu H_i , w normalnym systemie wysokości będąca rezultatem niwelacji geometrycznej, jest odległością punktu od quasi-geoidy zliczaną wzdłuż linii normalnego pionu (rys. 7). Zakładając tożsamość przechodzących dany punkt linii: normalnej do elipsoidy i normalnego pionu, to wyznaczoną na podstawie wyników pomiarów satelitarnych wysokość elipsoidalną h_i , można przekształcić do normalnej wysokości punktu H_i^S na podstawie znanej relacji między quasi-geoidą a elipsoidą w danym punkcie i (1), która nazywana jest anomalią wysokości ζ_i (Czarnecki 2010). Wartość anomalii wysokości można pozyskać z odpowiednio opracowanego modelu quasi-geoidy, odniesionego do tego samego układu geodezyjnego, w którym wyznaczone zostały współrzędne punktu na podstawie pomiarów satelitarnych ϕ_i, λ_i, h_i (Kadaj 2012, Kadaj i Świętoń 2013). Osiągając dokładność niwelacji satelitarnej na poziomie niwelacji geometrycznej, wysokości normalne punktu H_i^S oraz H_i można utożsamić (15).

$$H_i^S = h_i - \zeta_i \quad (1)$$

gdzie: $i = 1, 2, 3, \dots$



Rys. 7. Relacje wysokości punktów wyrażone w geometrycznym oraz normalnym systemie wysokości

Korzystając z modelu quasi-geoidy można wyznaczyć wysokość normalną (1) dowolnego punktu sieci kontrolnej P_i o znanych współrzędnych elipsoidalnych (ϕ_i, λ_i, h_i), jak i wysokość normalną dla sąsiedniego punktu P_{i+1} korzystając ze wzoru (2).

$$H_{i+1}^S = h_{i+1} - \zeta_{i+1} \quad (2)$$

Dla pary sąsiadujących ze sobą w sieci kontrolnej punktów można wyznaczyć przyrost wysokości $\Delta h_{i,i+1}$ (3) będący rezultatem przeprowadzonej tzw. niwelacji satelitarnej (1 i 2).

$$\Delta h_{i,i+1} = (H_{i+1}^S + \zeta_{i+1}) - (H_i^S + \zeta_i) \quad (3)$$

Po przekształceniu równania (3), przyrost wysokości $\Delta H_{i,i+1}^S$ między punktami P_i oraz P_{i+1} jest różnicą odpowiednich przyrostów (4): wysokości elipsoidalnej $\Delta h_{i,i+1}$ oraz anomalii wysokości $\Delta \zeta_{i,i+1}$.

$$\Delta H_{i,i+1}^S = \Delta h_{i,i+1} - \Delta \zeta_{i,i+1} \quad (4)$$

Jednym z wyników pomiarów satelitarnych jest wysokość elipsoidalna h_i punktu P_i w określonym geocentrycznym układzie odniesienia (ETRF – *European Terrestrial Reference Frame*, ITRF) względem przyjętej elipsoidy odniesienia. Można przyjąć, że jest ona sumą (5) prawdziwej wysokości elipsoidalnej h_i^e oraz następujących błędów: $\delta(PCV)_i$ – modelu centrum fazowego (Becker i in. 2010), PCV – użytej anteny GNSS względem jej punktu referencyjnego ARP (Hofmann-Wallenhof i in. 2008), δw_i – wyznaczenia pionowej wysokości punktu ARP anteny GNSS względem znaku punktu kontrolowanego lub referencyjnego, ε_i – innych błędów związanych przede wszystkim z właściwościami odbiornika stelarnego.

(5)

$$h_i = h_i^e + \delta h_i^e + \delta(PCV)_i + \delta w_i + \varepsilon_i$$

gdzie:

 h_i^e – wysokość elipsoidalna i -tego punktu, δh_i^e – suma błędów satelitarnego wyznaczenia wysokości elipsoidalnej i -tego punktu, $\delta(PCV)_i$ – błąd modelu centrum fazowego PCV anteny satelitarnej użytej na i -tym punkcie, δw_i – błąd pomiaru wysokości anteny satelitarnej względem znaku definiującego punkt pomiarowy, ε_i – inne błędy występujące w trakcie pomiarów satelitarnych na punkcie.

Dysponując elipsoidalnymi wysokościami h_i punktu wyznaczanego w dwóch epokach pomiarowych: t_0 oraz t_j ($j = 1, 2, 3, \dots$), gdzie pierwsza t_0 jest epoką wyjściową (co ma miejsce w badaniach deformacji terenu), poprzez procedurę ich różnicowania można uzyskać odpowiedni przyrost wysokości elipsoidalnej $dh_i(t_{0,j})$ danego punktu sieci kontrolnej P_i , którego wartość może świadczyć o zmianie jego położenia w okresie między epokami pomiarowymi (pojawienie się wysokościowego wskaźnika deformacji dh_i na epokę t_j względem epoki t_0). Uzyskany na podstawie pomiarów satelitarnych przyrost wysokości (6) w epoce t_j jest sumą różnic wysokości elipsoidalnej $dh_i^e(t_{0,j})$ oraz błędów: $d\delta h_i^e(t_{0,j})$, $d\delta PCV_i(t_{0,j})$, $d\delta w_i(t_{0,j})$, $d\varepsilon_i(t_{0,j})$.

(6)

$$dh_i(t_{0,j}) = dh_i^e(t_{0,j}) + d\delta h_i^e(t_{0,j}) + d\delta PCV_i(t_{0,j}) + d\delta w_i(t_{0,j}) + d\varepsilon_i(t_{0,j})$$

Przyjmując zasadę stosowania na punktach sieci kontrolnej niezmiennie przez cały okres prowadzenia badań odpowiednio tego samego zestawu pomiarowego (antena i odbiornik satelitarny, przyrząd do precyzyjnego wymuszonego centrowania anteny GPS (Baryła 2007)), wówczas różnice błędów (6): $d\delta PCV_i(t_{0,j})$, $d\delta w_i(t_{0,j})$, $d\varepsilon_i(t_{0,j})$, będą przyjmować wartości zmierzające do zera. Tym samym przyrost wysokości na danym punkcie z pomiarów satelitarnych będzie w przybliżeniu równy przyrostowi wysokości elipsoidalnej (7). Podobny efekt uzyskiwany jest w technice niwelacji geometrycznej poprzez stosowanie parzystej liczby stanowisk niwelatora w metodzie niwelacji ze środka, w wyniku czego uzyskuje się eliminację błędu zera łąt. Różnica wynikająca z błędów satelitarnego wyznaczenia wysokości elipsoidalnej punktu w dwóch epokach $d\delta h_i^e(t_{0,j})$, jest wartością przypadkową wprost zależną od uzyskanych dokładności tych pomiarów.

(7)

$$dh_i(t_{0,j}) \approx dh_i^e(t_{0,j})$$

Integracja pomiarów satelitarnych z niwelacją geometryczną może być zrealizowana tylko na poziomie tego samego systemu wysokości. Tak więc należy doprowadzić wysokości elipsoidalne h_i punktów P_i , uzyskane z pomiarów satelitarnych, do wysokości normalnych H_i^S (1), co można uzyskać obliczając przewyższenia pomiędzy sąsiednimi punktami P_i oraz P_{i+1} w danej j -tej epoce t_j (8) oraz przyrosty anomalii wysokości wynikające z nierównoległości quasi-geoidy do powierzchni elipsoidy (9).

$$\Delta h_{i,i+1}(t_j) = h_{i+1}(t_j) - h_i(t_j) \quad (8)$$

$$\Delta \zeta_{i,i+1}(t_j) = \zeta_{i+1}(t_j) - \zeta_i(t_j) \quad (9)$$

Różnica przyrostów wysokości normalnej między sąsiednimi punktami $dH_{i,i+1}^S(t_{0,j})$, uzyskanych z niwelacji satelitarnej przeprowadzonej w dwóch epokach t_0 oraz t_j , będzie wynikiem różnicy przyrostów wysokości elipsoidalnej i anomalii wysokości (10), przy czym epoka t_0 jest epoką wyjściową (początkową), względem której wyznaczane są wskaźniki deformacji dla kolejnych j -tych ($j = 1, 2, 3, \dots$) epok pomiarowych.

$$dH_{i,i+1}^S(t_{0,j}) = dh_{i,i+1}(t_{0,j}) - d\zeta_{i,i+1}(t_{0,j}) \quad (10)$$

Przyjmując, przez okres realizacji badań deformacji terenu na danym obszarze, niezmiennosc powierzchni elipsoidy jak i quasi-geoidy, wówczas we wzorze (10) różnica przyrostu anomalii $d\zeta_{i,i+1}(t_j)$ dla sąsiednich punktów $i, i+1$ z danej j -tej epoki będzie zmierzać do zera, tak więc różnica przyrostu wysokości normalnych będzie bliska różnicy przyrostów wysokości elipsoidalnych (11), stanowiących wynik różnicowania przewyższeń uzyskanych w epoce t_j względem epoki wyjściowej t_0 (12).

$$dH_{i,i+1}^S(t_{0,j}) \approx dh_{i,i+1}(t_{0,j}) \quad (11)$$

$$dh_{i,i+1}(t_{0,j}) = \Delta h_{i,i+1}(t_j) - \Delta h_{i,i+1}(t_0) \quad (12)$$

Analogiczne różnice przewyższeń między sąsiednimi punktami P_i oraz P_{i+1} dla wysokości normalnych, można obliczyć dla wyników pozyskanych z niwelacji geometrycznej (13).

$$dH_{i,i+1}(t_{0,j}) = \Delta H_{i,i+1}(t_j) - \Delta H_{i,i+1}(t_0) \quad (13)$$

Analizując proces różnicowania przewyższeń między sąsiednimi punktami sieci kontrolnej (10), pozyskanych na podstawie pomiarów satelitarnych, wpływ modelu quasi-geoidy został wyeliminowany (11). Toteż można wysunąć wniosek, że w badaniach pionowych deformacji terenu z wykorzystaniem zintegrowanych pomiarów satelitarnych i niwelacji geometrycznej, dokładność przyjętego modelu quasi-geoidy nie wpływa znacząco na uzyskiwane wyniki. Model ten może być wykorzystany do wyznaczenia wysokości normalnych H_i^S punktów kontrolowanych, które będą stanowić wysokości odniesienia w dalszych badaniach. Zauważyć również można, że przyjęcie w okresie badań anomalii wysokościowych ζ'_i

(14), wyznaczonych w wyjściowej epoce t_0 jako różnice uzyskanych wyników z pomiarów satelitarnych oraz niwelacji geometrycznej, dodatkowo osłabia wpływ błędów systematycznych wpływających na wynik niwelacji satelitarnej (5, 6), pod warunkiem zachowania niezmienności procedur oraz zestawów pomiarowych.

$$\zeta'_i = h_i(t_0) - H_i(t_0) \quad (14)$$

W badaniach deformacji terenu wyznaczenie pionowych przemieszczeń punktów kontrolowanych sieci kontrolnej, w nawiązaniu do stałych punktów referencyjnych definiujących właściwy układ odniesienia, można przeprowadzić według trzech wariantów obliczeniowych na podstawie wyników pomiarów z danej kampanii pomiarowej względem kampanii wyjściowej: metodą różnic współrzędnych, metodą różnic obserwacji, metodą wyrównania łącznego obserwacji (Lazzarini 1977, Prószyński i Kwaśniak 2015). Integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi, jest możliwa pod warunkiem uzyskania jednakowej przestrzeni odniesienia (systemu wysokości), w którym będą wyrażone uzyskane z dwóch odmiennych źródeł pomiarowych wyniki obserwacji. Jak wynika z powyższych rozważań, najwłaściwszym podejściem wyznaczenia pionowych wskaźników deformacji w integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi, jest metoda różnic obserwacji. Uzyskane, w co najmniej dwóch kampaniach pomiarowych, różnice obserwacji satelitarnych (przyrosty wysokości elipsoidalnych) oraz niwelacji geometrycznej (przyrosty wysokości normalnych) między sąsiednimi punktami, pomimo odmiennych systemów odniesienia, można utożsamić na podstawie spodziewanych małych ich wartości (rzędu milimetrów).

4.3.3. Analiza ścisłego wyrównania sieci kontrolnej integrującej niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi

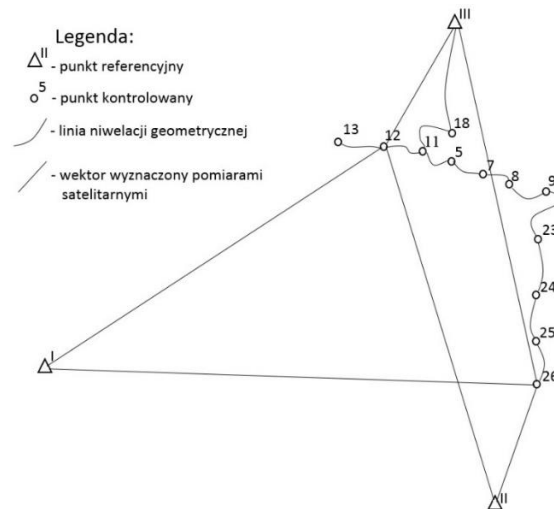
Spełnienie potrzeby poprawnego wyznaczenia pionowych przemieszczeń punktów kontrolowanych, w sieci integrującej niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi, może nastąpić tylko pod warunkiem prawie całkowitej zbieżności wyników pomiarów satelitarnych i klasycznych (15), wyrażonych w tym samym systemie wysokości.

$$H_i^s \approx H_i \quad (15)$$

Taka sytuacja może mieć miejsce w przypadku bezbłędnego wyznaczenia wysokości elipsoidalnych oraz anomalii wysokości (1), zakładając jednocześnie większą dokładność (wagę) wyników niwelacji geometrycznej. W praktyce uzyskiwane w danej kampanii wyniki pomiarów satelitarnych, obrazujące przewyższenia punktów (8), obarczone są szeregiem błędów (5) związanych z pomiarem satelitarnym, jak również zawierają błędy modelu quasi-geoidy (9). Wyznaczone przewyższenia między punktami na podstawie różnicowania obserwacji, eliminują dwa sposoby wyznaczenia pionowych deformacji punktów kontrolowanych: metodę różnic współrzędnych i metodę wyrównania łącznego obserwacji (Prószyński i Kwaśniak, 2015). Natomiast zastosowanie metody różnic obserwacji do wyznaczenia pionowych

wskaźników deformacji punktów kontrolowanych, w przypadku integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi, w dużej mierze osłabi wpływ błędów systematycznych (6) występujących w tych dwóch odmiennych technikach pomiarowych.

Wyniki przeprowadzonych przeze mnie na różnych sieciach kontrolnych badań, z wykorzystaniem niwelacji geometrycznej oraz pomiarów satelitarnych, potwierdzają zbieżność dokładności wyników końcowych przyjętych procedur pomiarowych. Na podstawie wyników tych badań można wnioskować możliwość integracji zastosowanych technik pomiarowych przy ich wzajemnym uzupełnianiu się, w przypadkach konieczności przeprowadzenia badań na przypadkowym fragmencie sieci kontrolnej, w dowolnym momencie między cyklami pomiarowymi przewidzianymi w projekcie technicznym. Taka sytuacja może zaistnieć np. w przypadku wystąpienia katastrofy górniczej. Najszybsze określenie szkód górniczych wówczas będzie możliwe przez przeniesienie układu współrzędnych definiowanego punktami referencyjnymi, poprzez pomiary satelitarne na wybrane punkty kontrolowane, które następnie będą stanowić nawiązanie dla niwelacji geometrycznej, zagęszczającej pomiarami określony obszar wystąpienia zdarzenia (rys. 8). W takiej sytuacji punkty referencyjne mogą być oddalone nawet o kilkanaście – kilkadziesiąt kilometrów od miejsca zdarzenia, co czyniłoby niwelację geometryczną (przeprowadzaną techniką niwelacji precyzyjnej) zbyt czasochłonną.



Rys. 8. Szkic sieci kontrolnej integrującej niwelację geometryczną i pomiary satelitarne

Przyjmując, że różnice obserwacji dla przykładowej sieci kontrolnej zintegrowanych pomiarów satelitarnych i niwelacji geometrycznej przedstawionej na rys. 8, wyznaczone zostały na podstawie pomiarów z dwóch epok t_0 oraz t_i , gdzie t_0 określone jest w epoce wyjściowej. Różnice te można poddać procesowi wyrównania metodą parametryczną (16), z zachowaniem warunku najmniejszych kwadratów (17) (Baran 1999, Fotopoulos i in. 2003, Wiśniewski 2005, Osada 2014), na podstawie liniowego modelu obserwacyjnego Gaussa-Markowa.

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}d\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{L} \quad (16)$$

gdzie:

\mathbf{V} – wektor poprawek do zaobserwowanych różnic przewyższeń między punktami kontrolowanymi,

\mathbf{A} – macierz rozmieszczenia parametrów,

$d\hat{\mathbf{X}}$ – wektor wyznaczanych parametrów – różnic wysokości dla punktów kontrolowanych,

\mathbf{L} – wektor różnic przewyższeń między punktami uzyskanych w epoce t_j względem epoki t_0 .

$$\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min \quad (17)$$

gdzie:

\mathbf{P} – macierz wag.

Po przyrównaniu pochodnej z równania (17) do zera i podstawieniu w miejsce \mathbf{V} prawej strony równania (16) otrzymujemy układ równań normalnych (18), którego rozwiązaniem metodą nieoznaczoną (Wiśniewski 2016) jest wektor szukanych parametrów $d\hat{\mathbf{X}}$ (19).

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} d\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} = 0 \quad (18)$$

$$d\hat{\mathbf{X}} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (19)$$

Wynikami końcowymi danej kampanii pomiarowej w epoce t_j są przyrosty wysokości między sąsiednimi punktami ($\Delta h_{i,i+1}$ – z pomiarów satelitarnych i $\Delta H_{i,i+1}$ – z niwelacji geometrycznej) oraz średnie błędy ich wyznaczenia odpowiednio $m_{\Delta h_{i,i+1}}$ i $m_{\Delta H_{i,i+1}}$. W proponowanej metodzie różnic obserwacji z epok t_0 i t_j , wektor parametrów w procesie wyrównania tworzą odpowiednie różnice wysokości dla punktów kontrolowanych (20). Wartości tych różnic będą świadczyć o ewentualnym wystąpieniu przemieszczeń wysokościowych. W tym miejscu należy nadmienić, że przez cały okres prowadzenia badań układ pomiarowy (kształt sieci kontrolnej) musi pozostać niezmienny.

$$d\hat{X}_i = dH_i = dH_i(t_{0,j}) = H_i(t_j) - H_i(t_0) \quad (20)$$

Macierz \mathbf{A} (21) stanowi macierz planu obserwacji w układzie równań liniowych (16), dla których obliczane są pochodne względem wyznaczanych parametrów (Baran 1999, Wiśniewski 2005, Osada 2014). Ponieważ tworzone równania dla przewyższeń między punktami są liniowe oraz współczynniki przy niewiadomych są równe 1, 0 lub -1, to macierz przyjmuje postać blokową (22).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial H_1} & \frac{\partial F_1}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial H_m} \\ \frac{\partial F_2}{\partial H_1} & \frac{\partial F_2}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial H_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial H_1} & \frac{\partial F_n}{\partial H_2} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial H_m} \end{bmatrix} \quad (21)$$

gdzie:

n – liczba równań,

m – liczba niewiadomych.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_h \\ \mathbf{A}_H \end{bmatrix} \quad (22)$$

Wektor przyrostów do zaobserwowanych wielkości \mathbf{L} (23), w rozpatrywanym przypadku przyjmie postać różnic obserwacji między epokami t_0 oraz t_j , jak i przyrostów wysokości w epoce wyjściowej dla odpowiednich punktów definiujących daną linię niwelacji geometrycznej lub wektor wyznaczony pomiarami satelitarnymi.

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{\Delta h} \\ \mathbf{d}_{\Delta H} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Zakładając, że wartości zmian wysokości badanych punktów będą wyznaczone względem epoki wyjściowej t_0 , w której zdefiniowany jest układ odniesienia, wówczas różnice wysokości dla poszczególnych punktów kontrolowanych dla tej epoki (t_0) będą wynosić zero (24). Tak więc wektor różnic obserwacji \mathbf{L} przyjmie uproszczoną postać odpowiednich ujemnych wartości różnic zaobserwowanych przewyższeń między sąsiednimi punktami między epokami t_0 oraz t_j .

$$dH_i(t_0) = 0 \quad (24)$$

Ostatecznie równanie (16) można zapisać w postaci macierzy blokowych (25), adekwatnej do dwóch źródeł pochodzenia danych obserwacyjnych (Fotopoulos i in. 2003).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\Delta h} \\ \mathbf{v}_{\Delta H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_h \\ \mathbf{A}_H \end{bmatrix}^T \cdot d\mathbf{X} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{\Delta h} \\ \mathbf{d}_{\Delta H} \end{bmatrix} \quad (25)$$

W przypadku konieczności wyznaczenia wysokościowych zmian położenia punktów kontrolowanych na ograniczonym obszarze sieci kontrolnej, na którym doszło do nagłego zdarzenia, względem ostatniej epoki pomiarowej t_{j-1} , procesowi obliczeniowemu można poddać fragment sieci kontrolnej, na którym wykonane zostaną zintegrowane pomiary satelitarne oraz niwelacja geometryczna. W takim przypadku

macierz rozmieszczenia obserwacji \mathbf{A} (21) musi być adekwatna do zaistniałej sytuacji, z czego wynika taka sama kolejność przeprowadzenia pomiarów na wybranym fragmencie sieci w epokach t_{j-1} oraz t_j , natomiast macierz zaobserwowanych przewyższeń \mathbf{L} (23) będzie wyznaczona względem epoki wyjściowej t_{j-1} , odpowiednio dla różnic: wysokości punktów (26), przewyższeń elipsoidalnych (27) oraz przewyższeń z niwelacji geometrycznej (23).

$$dH_i(t_0) \rightarrow dH_i(t_{j-1}) \quad (26)$$

$$dh_{i,i+1}(t_{0,j}) \rightarrow dh_{i,i+1}(t_{j-1,j}) \quad (27)$$

$$dH_{i,i+1}(t_{0,j}) \rightarrow dH_{i,i+1}(t_{j-1,j}) \quad (28)$$

W efekcie końcowym, przyjmując epokę t_{j-1} jako pomiar wyjściowy ($t_{j-1} \rightarrow t_0$), to macierz \mathbf{L} również przyjmie postać skróconą (23) złożoną z różnic $d_{\Delta H}$ odpowiednich obserwacji między epokami t_j oraz t_{j-1} , a uzyskane w procesie wyrównania ścisłego (19) wskaźniki deformacji dodane do wysokości punktów z epoki t_{j-1} pozwolą obliczyć ich aktualne wysokości normalne lub elipsoidalne.

Odmienność integrowanych technik pomiarowych generuje również problemy na etapie wspólnego wyrównania określeniem adekwatnego współczynnika wag obserwacji występujących w rozwiązaniu wektora parametrów (19). W procesie ścisłego wyrównania sieci niwelacji geometrycznej wagi mogą być obliczane na podstawie długości ciągów lub liczby stanowisk niwelatora wzdłuż danego ciągu. Wybór sposobu obliczania wag zależy od charakterystyki terenu. Obliczanie wag na podstawie długości ciągów stosuje się w przypadku małych deniwelacji terenu oraz zbliżonych długości celowych w trakcie niwelacji całej sieci. Liczba stanowisk może być podstawą obliczania wag przy dużych deniwelacjach. W takim przypadku krótki ciąg generuje dużą liczbę stanowisk, co przyczynia się do spadku dokładności pomiaru. Długie ciągi niwelacyjne, pomierzone na terenach równinnych, generują stosunkowo małą liczbę stanowisk i pozwalają na zastosowanie maksymalnych (dopuszczalnych) długości celowych. Wynikami względnych pomiarów satelitarnych są współrzędne wektorów łączących sąsiednie punkty sieci, wyrażone w geocentrycznym kartezjańskim układzie współrzędnych. Przyjmując współrzędne punktów referencyjnych również w podobnym układzie odniesienia, to po dodaniu współrzędnych odpowiednich wektorów otrzymuje się współrzędne kartezjańskie punktów wyznaczanych (kontrolowanych), które należy przeliczyć do współrzędnych elipsoidalnych w celu określenia ich wysokości względem elipsoidy odniesienia. Dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów określane są wówczas wartościami odchyień standardowych wyników rozwiązań wieloepokowych obserwacji satelitarnych. Mając na uwadze zalecaną dokładność precyzyjnej niwelacji geometrycznej w badaniach deformacji terenu (Lazzarini 1977, Szpetkowski 1978) na poziomie $\pm 2\sqrt{R}$ mm (R – długość ciągu niwelacyjnego w km), to rezultaty przeprowadzonych badań z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych (Baryła i in. 2007, Baryła i Paziewski 2012) przy zachowaniu odpowiednich procedur pomiarowych, również umożliwiają uzyskanie dużej

dokładności wyznaczenia wysokości punktów kontrolowanych na poziomie ± 3 mm dla wektorów satelitarnych o długości ok. 20 km. Toteż wyrazy macierzy wag \mathbf{P} można ułożyć jako odwrotności kwadratów błędów średnich odpowiednich ciągów niwelacyjnych oraz odwrotności kwadratów odchyleń standardowych otrzymanych dla wysokości elipsoidalnych punktów kontrolowanych. Mając na uwadze, że procesowi ścisłego wyrównania podlegają różnice przewyższeń sąsiednich punktów uzyskane w dwóch epokach t_0 oraz t_j , jak i wpływ na dokładność wyników odmiennych warunków realizacji pomiarów w różnym czasie, błąd obserwacji można wyznaczyć na podstawie prawa przenoszenia się błędów średnich Gaussa (Baran 1999) w funkcji czasu dla przewyższeń z niwelacji geometrycznej (29) oraz z pomiarów satelitarnych (30).

$$m_{i,i+1} = m_{i,i+1}(t_{0,j}) = \sqrt{(m_{i,i+1}(t_0))^2 + (m_{i,i+1}(t_j))^2} \quad (29)$$

$$\sigma_{i,i+1} = \sigma_{i,i+1}(t_{0,j}) = \sqrt{(\sigma_{i,i+1}(t_0))^2 + (\sigma_{i,i+1}(t_j))^2} \quad (30)$$

W rozpatrywanym przykładzie zintegrowanej sieci kontrolnej (rys. 8), uwzględniając założenia (29) oraz (30), macierz wag \mathbf{P} otrzyma postać (31):

$$\mathbf{P} = \text{Diag} \left(\frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{n_s}^2}, \frac{1}{m_1^2}, \frac{1}{m_2^2}, \dots, \frac{1}{m_{n_k}^2} \right) \quad (31)$$

gdzie:

n_s – liczba wektorów wyznaczonych pomiarami satelitarnymi,

n_k – liczba odcinków linii niwelacji geometrycznej łączących sąsiednie punkty sieci kontrolnej.

Proces wyrównania ścisłego kończy ocena dokładności poprzez wyznaczenie estymatora współczynnika wariancji (32), którego wartość bliska 1 wskazuje na prawidłowy dobór wag (Wiśniewski 2005).

$$m_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{n - r}} \quad (32)$$

gdzie:

n – liczba obserwacji (linii niwelacyjnych oraz wektorów wyznaczonych pomiarami satelitarnymi),

r – liczba wyznaczanych parametrów (liczba wyznaczanych punktów kontrolowanych w danej kampanii).

Następnie, na podstawie macierzy kowariancji wyrównanych parametrów (33) (Wiśniewski 2005), należy wyznaczyć błędy średnie wyrównanych przyrostów wysokości $dH_i(t_{0,j})$ (34) dla poszczególnych punktów kontrolowanych w epoce t_j względem t_0 (lub t_{j-1}).

$$\mathbf{C} = m_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (33)$$

$$m_{dH_i} = \sqrt{[\mathbf{C}]_{i,i}} \quad (34)$$

W podobny sposób, na podstawie macierzy kowariancji wyrównanych różnic przewyższeń (35) (Baran 1999, Wiśniewski 2005), można wyznaczyć błędy średnie różnic zaobserwowanych przewyższeń między sąsiednimi punktami dla niwelacji geometrycznej $dH_{i,i+1}(t_{0,j})$ (36) oraz pomiarów satelitarnych $dh_{i,i+1}(t_{0,j})$ (36) w epoce t_j względem t_0 (lub t_{j-1}).

$$\mathbf{C}_{dH_{i,i+1}} = m_0^2 \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} m_{dh_{i,i+1}}^2 \\ m_{dH_{i,i+1}}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{i,i+1} \\ \mathbf{C}_{i,i+1} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Właściwą interpretację wystąpienia pionowych deformacji na badanym obszarze, na podstawie zmiany wysokości punktów kontrolowanych $dH_i(t_{0,j})$ uzyskanych w procesie ścisłego wyrównania różnic przyrostów do obserwacji $dH_{i,i+1}(t_{0,j})$ – z niwelacji geometrycznej oraz $dh_{i,i+1}(t_{0,j})$ – z pomiarów satelitarnych, uzyskanych w dwóch epokach: t_0 (lub t_{j-1}) oraz t_j , można określić jeżeli w przypadku konkretnych punktów kontrolowanych P_i uzyskane wartości zmiany wysokości $dH_i(t_{0,j})$ osiągną lub przekroczą potrójną wartość błędów średnich ich wyznaczenia m_{dH_i} (37) (Lazzarini 1977).

$$dH_i(t_{0,j}) \geq 3 m_{dH_i} \quad (37)$$

4.3.4. Ścisłe wyrównanie przykładowej sieci kontrolnej integrującej niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi w różnych wariantach obliczeniowych

Weryfikacja przyjętych założeń wyznaczania pionowych wskaźników deformacji metodą różnicowania obserwacji pozyskanych w danej epoce względem epoki wyjściowej, na podstawie zintegrowanych pomiarów satelitarnej i niwelacji geometrycznej, przeprowadzona została na sieci eksperymentalnej zobrazowanej na rys. 8. W skład sieci eksperymentalnej wchodzi trzy punkty referencyjne oraz dwanaście punktów kontrolowanych.

Dane wykorzystane w opracowaniu są efektem trzech wspólnych, dla niwelacji geometrycznej oraz pomiarów satelitarnych, kampanii pomiarowych przeprowadzonych w latach: 2012, 2013, 2014. Jako obserwacje z pomiarów satelitarnych wykorzystano wybrane wektory obliczone w programie BERNESSE v. 5.0 (Dach i in. 2007) oraz odchylenia standardowe współrzędnych wysokościowych, które przybierały wartości z przedziału ± 3 mm. Natomiast w przypadku niwelacji geometrycznej obserwacje stanowiły

uśrednione przewyższenia między punktami kontrolowanymi, pochodzące z pomiarów w dwóch kierunkach i dokładności $\pm 2\sqrt{R}$ mm. Współrzędne punktów referencyjnych wyznaczone zostały w epoce 2008 na podstawie pomiarów satelitarnych i przez cały okres prowadzenia badań nie wykazały zmiany położenia. Przyjmując relacje między epokami 2013 i 2014 względem epoki wyjściowej z roku 2012 oraz epoki 2014 względem 2013, niniejszy eksperyment przeprowadzono w czterech wariantach ścisłego wyrównania metodą parametryczną z zachowaniem warunku najmniejszych kwadratów poprawek do różnic przewyższeń:

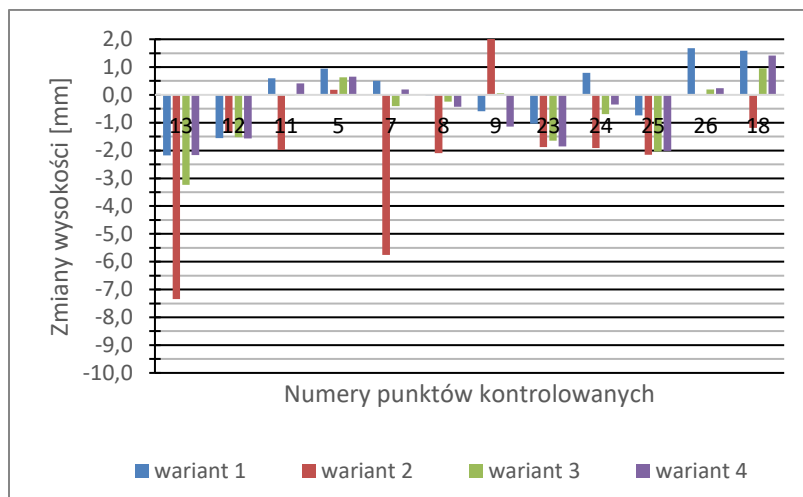
- 1) swobodne wyrównanie różnic przewyższeń z niwelacji geometrycznej,
- 2) wyrównanie różnic wysokościowych współrzędnych wektorów z pomiarów satelitarnych,
- 3) łączne wyrównanie różnic przewyższeń z niwelacji geometrycznej oraz pomiarów satelitarnych,
- 4) wyrównanie różnic przewyższeń w sieci kontrolnej integrującej niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi,

Obliczenia przeprowadzono w programie MATLAB R.2013a (Zaleski i Cegięła 1999, Treichel i Stachurski 2009), dane obserwacyjne dla sieci eksperymentalnej (rys. 8) pozyskano z raportów będących efektem realizacji prac badawczych (Baryła i in. 2013, Baryła i Paziewski 2013, Baryła i in. 2014a, Baryła i Paziewski 2014b, Baryła i in. 2015, Baryła i Paziewski 2015), które przetworzono do różnic obserwacji z precyzyjnej niwelacji geometrycznej oraz pomiarów satelitarnych umożliwiającym przeprowadzenie obliczeń według wyżej wymienionych wariantów.

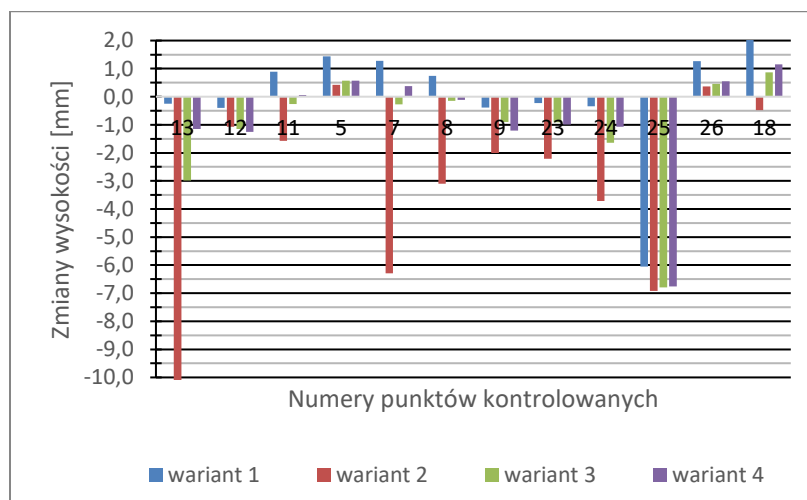
W pomiarach satelitarnych przyjęto jako punkty stałe trzy punkty referencyjne, które w okresie pięciu lat nie wykazały zmienności położenia, definiując tym samym układ odniesienia na epokę rozpoczęcia badań w roku 2008. Niwelację geometryczną, ze względu na lokalizację oraz obszar oddziaływania eksploatacji (lokalizację pozostałych punktów referencyjnych), nawiązano do jednego punktu referencyjnego.

Szczegółowe omówienie przeprowadzonych doświadczeń oraz analizy otrzymanych wyników zawiera monografia. W autoreferacie przedstawiam jako przykład końcowe analizy będące podsumowaniem wyników czterech wariantów obliczeniowych. Do monografii dołączony jest również wariant 4 rozszerzony o dodatkowe analizy dokładności pomiarów satelitarnych, który został wyłączony z poniższych rozważań.

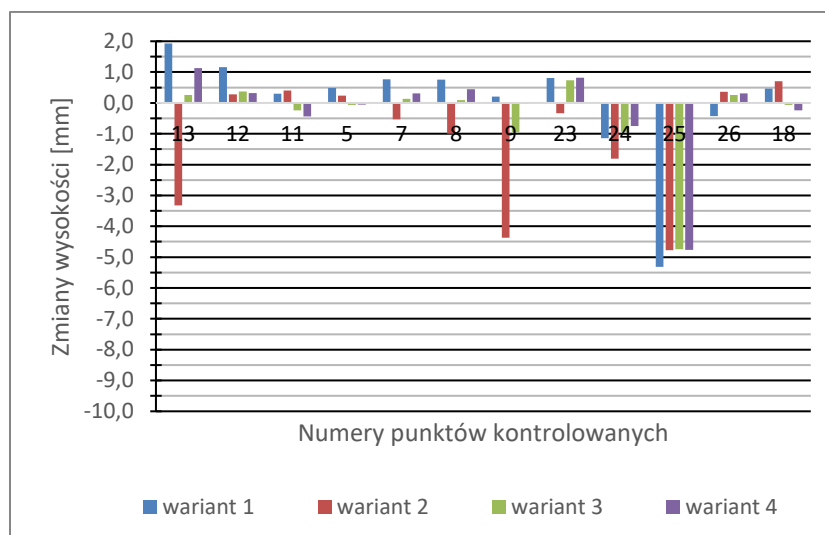
Analizom dokładnościowym, na postawie ścisłego wyrównania sieci kontrolnej w czterech wariantach, poddane zostały uzyskane różnice wysokości badanych punktów kontrolowanych. Zbiór danych do ścisłego wyrównania uzyskano na podstawie różnicowania obserwacji (przewyższeń między sąsiednimi punktami kontrolowanymi uzyskanymi z pomiarów satelitarnych i/lub z niwelacji geometrycznej) z danej epoki, kampanii pomiarowej przeprowadzonej w 2013 i 2014 r. w odniesieniu do epoki wyjściowej 2012 r. Dodatkowo sprawdzeniu poddano zmiany wartości obserwacji uzyskane w 2014 r. względem 2013 r. W celu uzyskania aktualnych wysokości punktów kontrolowanych na daną epokę, należy do wyników z kampanii wyjściowej, czyli wysokości punktów kontrolowanych w umownym układzie odniesienia: państwowym lub lokalnym, dodać uzyskane na daną epokę różnice wysokości – przyrosty do współrzędnych (zmiany wysokości). Wyniki z poszczególnych wariantów obliczeniowych przedstawiono na rys. 9, 10 i 11.



Rys. 9. Zestawienie wartości wyrównanych różnic przewyższeń (poprawek) do wysokości punktów kontrolowanych, wyznaczone na podstawie danych z integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w relacji epok 2012-13



Rys. 10. Zestawienie wartości wyrównanych różnic przewyższeń (poprawek) do wysokości punktów kontrolowanych, wyznaczone na podstawie danych z integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w relacji epok 2012-14



Rys. 11. Zestawienie wartości wyrównanych różnic przewyższeń (poprawek) do wysokości punktów kontrolowanych, wyznaczone na podstawie danych z integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w relacji epok 2013-14

Na podstawie wspólnego zestawienia wyników otrzymanych w czterech wariantach obliczeniowych (rys. 9, 10, 11), przyjmując wyniki z wariantu 1 jako wzorcowe, można stwierdzić, że najbardziej odstającymi są wyniki otrzymane w wariacie 2. W przypadku punktów kontrolowanych 7 i 13 nastąpiła zamiana sprzętu pomiarowego, co przyczyniło się do wygenerowania wartości różnic wysokości punktów zawierających wpływ indywidualnych charakterystyk anten satelitarnych, które nie mogły zostać wyeliminowane jako błędy systematyczne w procesie różnicowania obserwacji. Wystąpienie znacznych błędów w trakcie realizacji pomiarów satelitarnych ujawnione zostało w przypadku punktu 9. Pomimo stwierdzenia w tym przypadku osiągnięcia wartości granicznych w epokach 2013 (rys. 9) i 2014 (rys. 10), nie wskazujących na możliwość wystąpienia deformacji (przyjęta a priori dokładność satelitarnego pomiaru wysokości ± 2 mm), to relacja epoki 2014 względem 2013 wykazuje na możliwość wystąpienia deformacji o wartości $-4,4$ mm (rys. 11). Dopiero niezależna niwelacja geometryczna oraz pozostałe dwa warianty (3 oraz 4) obliczeniowe wykluczają wystąpienie tego zjawiska. Możliwe jest, że do wystąpienia tak znacznych różnic wyników pomiarów satelitarnych przyczyniły się inne błędy pomiarowe.

Połączenie wyników niwelacji geometrycznej oraz pomiarów satelitarnych w postaci różnic przewyższeń między sąsiednimi punktami sieci kontrolnej zmniejszyło wpływ pomiarów satelitarnych na wyniki końcowe, poprzez zastawanie mniejszych wag, tym samym zbliżyło je do wyników z wariantu 1.

Integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi, przeprowadzona w wariacie 3, również w znacznym stopniu zapewniła zbieżności wyników z wariantem 1. W tym przypadku należy zauważyć bezpośredni wpływ dokładności satelitarnego wyznaczenia wysokości punktów kontrolowanych, do których będzie nawiązana niwelacja geometryczna. Niezachowanie zasady przyporządkowania konkretnego zestawu sprzętu pomiarowego do danego punktu kontrolowanego może generować przypadkowe, znacznie przekraczające dopuszczalne wartości (w przypadku punktów 7 i 13), pozorne wskaźniki deformacji.

Prawidłowość zastosowanych procedur pomiarowych, w integracji niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi, potwierdza zbieżność w granicach dokładności osiągniętych różnic wysokości punktów kontrolowanych w czterech wariantach obliczeniowych (wyłączając rozpatrywane wyżej przypadki). Szczególny przypadek stanowi punkt 25 na epokę 2014, na którym wystąpiło zjawisko osiadania zbieżnie wykryte we wszystkich wariantach obliczeniowych (rys. 10, 11 i 12).

Integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi rozpatrywana w wariancie 4, potwierdza słuszność przyjętych założeń dokładnościowych pod warunkiem przestrzegania rygorystycznych procedur pomiarowych oraz obliczeniowych. Zastosowanie rozwiązania mającego na celu integrację niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi, w znacznym stopniu przyczynia się do pomniejszenia nakładów pracy. Pomiary satelitarne mogą być wykorzystywane do przenoszenia układu odniesienia definiowanego przez znacznie oddalone od miejsca pomiaru punkty referencyjne. Równocześnie z pomiarem satelitarnym może być realizowana niwelacja geometryczna, mająca na celu wyznaczenie dokładnych relacji między gęsto zlokalizowanymi punktami na badanym obiekcie.

4.3.5. Podsumowanie

Proces opracowywania projektu sieci kontrolnej, będącej fundamentem prowadzenia badań deformacji terenu, powinien obejmować cały obszar oddziaływania eksploatacji górniczej oraz terenów bezpośrednio przyległych, w tym również obszary dużego prawdopodobieństwa wystąpienia deformacji w przyszłości (co najmniej w przewidywanym okresie prowadzenia eksploatacji). Bardzo ważnym elementem jest ustalenie granicy obszaru opracowania, ze względu na wybór odpowiedniej lokalizacji punktów referencyjnych. Ten czynnik ma szczególne znaczenie, zwłaszcza przy wykorzystaniu klasycznych technik pomiarowych, ze względu na zminimalizowanie długości ciągów nawiazania, a tym samym zmniejszenie źródeł generujących błędy pomiarowe. Lokalizacja punktów kontrolowanych oraz gęstość ich rozmieszczenia musi uwzględniać: źródła wywołujące ich powstawanie, przewidywane wielkości i charakterystyczne miejsca wystąpienia (występowania) wskaźników deformacji, przewidzianą technikę pomiaru (techniki pomiarów). Szczególną uwagę należy zwrócić na właściwy dobór konstrukcji oraz odpowiedniej stabilizacji znaków referencyjnych oraz kontrolowanych, w celu wyeliminowania wpływu ich osiadań własnych na ostateczne wartości wskaźników deformacji.

Technika precyzyjnej niwelacji geometrycznej, wykorzystywana w badaniach deformacji terenu, jest najpewniejszym źródłem informacji w celu wyznaczenia pionowych wskaźników deformacji. Dodatkowym jej atrybutem, jest rozwój instrumentów pomiarowych od precyzyjnych niwelatorów libellowych do niwelatorów kodowych, zapewniających automatyczną rejestrację obserwacji oraz bieżącą kontrolę dokładności na stanowisku pomiarowym. Automatyzacja pomiaru na stanowisku przyczyniła się do zwiększenia efektywności pomiaru przy sprzyjających warunkach nawet czterokrotnie.

Obecnie bardziej preferowane ze względów technicznych i ekonomicznych pomiary satelitarne, również mogą stanowić właściwe źródło danych w badaniach deformacji terenu. Tym bardziej, że przy zachowaniu odpowiednich procedur pomiarowych i obliczeniowych, umożliwiają uzyskanie dokładności poziomych i pionowych wskaźników deformacji na poziomie pomiarów klasycznych. Ponadto, dla potrzeb badania deformacji mogą być również dowiązywane do niezależnych sieci: krajowej ASG-EUPOS (*Aktywna Sieć Geodezyjna EUPOS*) oraz międzynarodowych EPN i IGS, co umożliwia zwiększenie wiarygodności kontroli stałości położenia punktów referencyjnych sieci kontrolnej. W ten sposób można uzyskać

realizację wyjściowego przestrzennego układu odniesienia, definiowanego przez obowiązujący układ ITRF na epokę wyjściowej kampanii pomiarowej. Odniesienie się do bieżącej realizacji układu ITRF jest bardzo istotne w pomiarach satelitarnych, ponieważ w nim jest wyrażona część parametrów wykorzystywanych w programach obliczeniowych GNSS (np. orbity satelitów). Realizację układu płaskiego można wówczas uzyskać poprzez zastosowanie odpowiednich funkcji odwzorowawczych, natomiast układ wysokościowy może być odniesiony wprost do powierzchni przyjętej elipsoidy odniesienia (wysokości elipsoidalne). Przejście z wysokości elipsoidalnych do systemu wysokości normalnych można uzyskać stosując krajowy model quasi-geoidy lub model lokalny opracowany dla konkretnego obiektu, w przypadku opracowania którego, wykorzystywane są wyniki z pomiarów satelitarnych uzyskanych w pierwszej kampanii.

Realizacja pomiarów satelitarnych oraz postprocessing danych obserwacyjnych powinny w maksymalnym stopniu uwzględniać redukcję błędów systematycznych oraz przypadkowych. Warunek ten może zostać w pełni osiągnięty, na etapie gromadzenia danych obserwacyjnych, poprzez wymuszone centrowanie anten GNSS oraz wykonywanie okresowych pomiarów na poszczególnych punktach tymi samymi zestawami pomiarowymi. Do postprocessingu danych obserwacyjnych należy stosować odpowiednie programy obliczeniowe, które uwzględniają modele ośrodków propagacji fal (troposfery i jonosfery) jak i centrów fazowych anten GNSS. W szczególnych przypadkach wymagana jest indywidualna kalibracja anten GNSS, w celu wyznaczenia dla nich ewentualnych przesunięć średnich centrów fazowych względem odpowiednich modeli. Może to mieć miejsce w przypadku anten intensywnie eksploatowanych lub w sytuacjach konieczności zamiany anten (np. w wyniku awarii anteny dotychczas wykorzystywanej), w celu zachowania ciągłości badań. Nawet w przypadku tych samych typów anten suma różnic MPC względem modelu może generować błąd, który w danej kampanii pomiarowej może zostać źle zinterpretowany jako wartość wskaźnika deformacji.

Integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi następuje już na etapie projektowania sieci kontrolnej oraz wyboru konstrukcji znaków punktów kontrolowanych i referencyjnych. Na tym etapie istotna jest możliwość przeprowadzenia pomiarów na tych samych punktach sieci odmiennymi technikami, co ma szczególne znaczenie w przypadku pomiarów satelitarnych, gdzie punkty powinny charakteryzować się minimalnymi zasłonami terenowymi. W trakcie badań należy zwracać szczególną uwagę na realizację pomiarów do jednoznacznie określonych punktów pomiarowych. O ile w niwelacji geometrycznej wynik pomiaru uzyskiwany jest względem punktu ustawienia łąty niwelacyjnej (reper), to w pomiarach satelitarnych uzyskiwana pozycja odniesiona jest do punktu średniego centrum fazowego danej anteny GNSS (MPC), później dokonywana jest redukcja do jej punktu referencyjnego (ARP), następnie wzdłuż normalnej do elipsoidy odniesienia współrzędne przenoszone są na właściwy punkt pomiarowy zdefiniowany odpowiednim znakiem. Ostatni proces jest najbardziej wadliwy, gdyż pomiar wysokości anteny na stanowisku pomiarowym realizowany jest ręcznie przez obserwatora, najczęściej z zastosowaniem przyrządu liniowego. Z tego też względu w badaniach deformacji terenu powinno być stosowane tylko wymuszone centrowanie anten GNSS, a w przypadku pomiaru na punktach kontrolowanych należy stosować przyrządy do precyzyjnego wymuszonego centrowania anten GPS. Opracowany dla potrzeb prowadzonych badań przyrząd, zapewnia powtarzalność pomiaru punktów, jak i nie stanowi przeszkody przed stabilizacją punktów kontrolowanych znakami podziemnymi, do których dostęp i ochronę stanowią specjalne zamykane pokrywami studzienki.

Integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi na nowych obiektach, nie przysparza większych problemów, ponieważ wszystkie elementy i etapy projektu opracowywane są w pełnej

harmonii. Problem może pojawić się w przypadkach adaptacji starych sieci kontrolnych, jak to ma miejsce w przypadku obiektu LGOM. Rezultatem rozpoczętych w latach 70-tych XX wieku badań deformacji terenu była sieć Niwelacji Precyzyjnej LGOM – 2 klasy. Nawiązanie wysokościowe tej sieci, a jednocześnie zbiór punktów stałych, stanowią punkty podstawowej Państwowej Osnowy Wysokościowej (dawnej I klasy), której ciągi okalały badany obszar. Punkty kontrolowane stabilizowano fundamentalnymi znakami ziemnymi z żeliwnymi reperami umieszczanych pionowo lub poziomo oraz znakami ściennymi. Pomiar dotychczas realizowany jest techniką precyzyjnej niwelacji geometrycznej. W 2012 r., w wyniku współpracy Centrum Badawczo-Rozwojowego CUPRUM KGHM we Wrocławiu i Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, opracowano koncepcję stopniowego zastępowania niwelacji geometrycznej pomiarami satelitarnymi. Najpoważniejszym problemem, jaki pojawił się na początku prac, była jednoznaczna identyfikacja punktów pomiarowych. Do rozwiązania tego problemu przyczyniło się powstanie dwóch patentów: „Sposób wyznaczenia deformacji terenu, zwłaszcza terenu górniczego” (Baryła i in. 2016) oraz „Znak punktu pośredniego, zwłaszcza dla potrzeb wyznaczania deformacji terenu” (Baryła i in. 2017). Korzystna okazała się możliwość stabilizacji dodatkowych punktów referencyjnych poza obszarem oddziaływania eksploatacji górniczej, dla których badanie stałości położenia można przeprowadzić na podstawie niezależnych wektorów satelitarnych, które nie są skorelowane z punktami kontrolowanymi. Dodatkowo można przeprowadzić kontrolę stałości punktów referencyjnych w odniesieniu do sieci: ASG-EUPOS, EPN, IGS. Dane pozyskane w kampanii integrującej niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi przeprowadzonej w 2014 r., przyczyniły się do opracowania lokalnego modelu quasi-geoidy LGOM-2015.

Kluczowym celem niniejszej pracy było udzielenie odpowiedzi na pytanie: czy w badaniach deformacji terenu można wykorzystać pomiary satelitarne do przeniesienia układu odniesienia z punktów referencyjnych, znacznie oddalonych od badanego obszaru, na punkty kontrolowane, które następnie stanowią nawiązanie niwelacji geometrycznej? Takie rozwiązanie może być istotne w przypadku małego obszaru opracowania, znajdującego się na znacznym obszarze oddziaływania eksploatacji górniczej lub w przypadku wystąpienia nagłego zdarzenia (wstrząsu) i potrzeby szybkiego określenia szkód górniczych. Zakładając niemożliwość szybkiego wykonania niwelacji geometrycznej w dowiązaniu do punktów referencyjnych. Najskuteczniejszym, z czterech rozpatrywanych przypadków, okazuje się wariant z zastosowaniem dodatkowych pomiarów satelitarnych. Toteż integracja niwelacji geometrycznej na etapie projektowania sieci kontrolnej na dużych obszarach lub adaptacja już istniejących sieci poprzez montaż zaproponowanych znaków punktów pośrednich, szczególnie gdy przewidziane pomiary terenowe przeprowadzane będą (są) w długich okresach (nawet kilkuletnich), może okazać się najwłaściwszym rozwiązaniem w momentach wystąpienia lokalnych zdarzeń górniczych w celu określenia szkód górniczych.

Opracowanie czterech wariantów ścisłego wyrównania zintegrowanej sieci niwelacji geometrycznej i satelitarnej, potwierdza dominację precyzyjnej niwelacji geometrycznej pod względem dokładności wyznaczenia przewyższeń między punktami oddalonymi od siebie do 2 km. Natomiast w przypadku relacji między punktami ponad 2 km, dokładność wysokościowego pomiaru satelitarnego jest zbieżna z dokładnością niwelacji geometrycznej. Wskazuje to na możliwość integracji tych dwóch technik pomiarowych w badaniach deformacji terenu: pomiarów satelitarnych do badania stałości punktów referencyjnych oraz przenoszenia układu odniesienia na obiekt w celu przeprowadzenia dalszego, zagęszczającego pomiaru techniką precyzyjnej niwelacji geometrycznej.

Przeprowadzone testy ścisłego wyrównania zintegrowanej sieci kontrolnej z użyciem wariantu 4 rozszerzonego (monografia), ze stopniowym zmniejszaniem dokładności pomiarów satelitarnych, wykazały stosunkowo nieznaczne zmiany wartości pionowych wskaźników deformacji i ich estymowanych dokładności. Jest to najprawdopodobniej efektem przyjęcia znacznej liczby wektorów satelitarnych do rozwiązania przykładowej sieci oraz wysoką dokładnością pomiarów satelitarnych wykorzystanych w opracowaniu. Można również zakładać, że zwiększenie liczby punktów referencyjnych w podobnych zintegrowanych sieciach kontrolnych, przyczyni się do zwiększenia dokładności wyznaczanych pionowych wskaźników deformacji.

Prawidłowe przeprowadzenie interpretacji otrzymanych wyników badań deformacji terenu w pomiarach zintegrowanych, jest możliwe pod warunkiem maksymalnego osłabienia wpływu błędów systematycznych i przypadkowych na obserwacje. Ten warunek został spełniony w trakcie realizacji niniejszych badań poprzez zastosowanie odpowiednich rozwiązań technicznych, opracowanie szeregu patentów oraz rygorystyczne przestrzeganie określonych technologii pomiarowych i obliczeniowych.

Przeprowadzone badania antropogenicznych deformacji terenu, mające na celu integrację niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi, umożliwiły na sformułowanie następujących wniosków:

- wielkość i kształt sieci kontrolnej nie jest ograniczony możliwościami pomiarowymi oraz dokładnościowymi jednej techniki pomiarowej,
- lokalizacja punktów referencyjnych, gwarantująca brak oddziaływania ośrodka na zmianę ich położenia, może być znacznie oddalona od określonej granicy wpływów eksploatacji górniczej,
- gęstość pokrycia badanego obiektu punktami kontrolowanymi nie musi być regularna, może zostać zwiększona dla obszarów i obiektów szczególnie narażonych na szkody górnicze,
- punkty referencyjne i kontrolowane muszą być stabilizowane odpowiednimi znakami umożliwiającymi jednoznaczną identyfikację, a w przypadku sieci adaptowanych należy stosować opatentowane rozwiązania: „sposób wyznaczenia deformacji terenu, zwłaszcza terenu górniczego” oraz „znaki punktów pośrednich, zwłaszcza dla potrzeb wyznaczania deformacji terenu”,
- przeprowadzając okresowo pomiary satelitarne należy stosować na odpowiednich punktach niezmiennie te same zestawy pomiarowe,
- używane w badaniach anteny GNSS powinny zostać skalibrowane np. na opatentowanym stanowisku do kalibracji anten GNSS, w celu wyznaczenia najbardziej aktualnych poprawek do ich modeli PCV (Baryła i in 2018),
- ustawienie na okres pomiaru anten GNSS na punktach referencyjnych, powinno być realizowane na podstawie wymuszonego centrowania z wykorzystaniem spodarki geodezyjnej, natomiast na punktach kontrolowanych z zastosowaniem opatentowanych przyrządów do precyzyjnego wymuszonego centrowania anten GPS (Baryła 2007),
- niwelację geometryczną należy realizować techniką precyzyjnej niwelacji geometrycznej z wykorzystaniem precyzyjnego niwelatora kodowego z osprzętem, co w znacznym stopniu przyspieszy realizację prac polowych, bezwzględnie z zastosowaniem klinów niwelacyjnych gwarantujących stabilne ustawienie łąt inwarowych, które dla potrzeb prowadzonych badań zostały zmodernizowane (Baryła 2016),
- przetwarzanie obserwacji satelitarnych powinno być realizowane z wykorzystaniem zaawansowanego oprogramowania, umożliwiającego testowanie różnych strategii obliczeniowych z możliwością

modelowania ośrodka propagacji sygnałów satelitarnych, co z kolei prowadzi do wyboru najlepszej strategii obliczeniowej dla konkretnej sieci kontrolnej,

- w przypadku zmiany strategii obliczeniowej, analizującej i przetwarzającej obserwacje satelitarne, na etapie kolejnej kampanii pomiarowej, wszystkie poprzednio zgromadzone zbiory obserwacji należy ponownie przeliczyć, w celu zachowania ciągłości procedury obliczeniowej,
- pełna integracja niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w badaniach deformacji terenu, jest możliwa w przypadku zastosowania odpowiedniego modelu quasi-geoidy, lub opracowaniu go na podstawie danych z pierwszej, wyjściowej kampanii pomiarowej,
- zastosowanie pomiarów satelitarnych umożliwia dowiązanie sieci kontrolnej do następujących sieci: ASG-EUPOS, EPN i IGS, co umożliwia realizację bieżącego układu ITRF, co zapewnia dodatkową weryfikację stałości położenia punktów referencyjnych, a poprzez zastosowanie odpowiednich parametrów transformacji można uzyskać wcześniejsze jego realizacje,
- właściwym rozwiązaniem do tworzenia zbioru danych do przeprowadzenia ścisłego wyrównania zintegrowanej sieci kontrolnej, jest wykorzystanie przyrostów uzyskanych z różnicowania przewyższeń między parami punktów uzyskane w danej i wyjściowej kampanii pomiarowej,
- wagowanie uzyskanych przyrostów może odbywać się na podstawie uzyskanych dokładności obserwacji z niwelacji geometrycznej i odchyłek standardowych z rozwiązań wektorów satelitarnych dla wysokości (odwrotności kwadratów tych parametrów),
- w szczególnych przypadkach (konieczność określenia szkód górniczych na obszarze objętym częścią sieci kontrolnej) pomiar może być przeprowadzony w krótkim okresie i tylko na wybranym fragmencie sieci kontrolnej, poza terminem planowanego cyklu pomiarowego.

4.3.6. Literatura

- Baran L. W., 1999, Teoretyczne podstawy opracowania wyników pomiarów geodezyjnych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Baryła R., 2007, Przyrząd do precyzyjnego wymuszonego centrowania anteny GPS, Świadectwo ochrony wzoru użytkowego nr 64831, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa.
- Baryła R., 2016, złożony wniosek nr Wp.24982 o udzielenie prawa rejestracji wzoru przemysłowego pt.: Klin niwelacyjny. 17 listopada 2016 r., Warszawa.
- Baryła R., Oszczak S., Kurpiński G., Wielgosz P., 2016, Sposób wyznaczenia deformacji terenu, zwłaszcza terenu górniczego, Patent na wynalazek nr 223063, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa.
- Baryła R., Oszczak S., Koczoł B., Szczechowski B., 2007a - A concept of using static GPS measurements for determination of vertical and horizontal land deformations in the Main and Old City of Gdańsk, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, Warszawa.
- Baryła R., Oszczak S., Wielgosz P., Bakuła M., Cellmer S., Popielarczyk D., Jarmołowski W., Tyszko A., Oszczak B., Gregorczyk R., Rapiński J., Zapert M., 2007b, Results of the first GPS measurement campaign for the determination of absolute vertical and horizontal deformations in the Main and Old City of Gdańsk, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, Warszawa.
- Baryła R., Oszczak S., Wielgosz P., Paziewski J., 2013, Kontynuacja badania wpływu eksploatacji górniczej na deformację terenu górniczego Koźmin I na podstawie wyznaczenia przemieszczeń punktów kontrolowanych, Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.
- Baryła R., Oszczak S., Wielgosz P., Paziewski J., 2014a, Kontynuacja badań wpływu robót górniczych na powierzchnię terenu górniczego „Koźmin I” na podstawie wyznaczenia przemieszczeń punktów kontrolowanych (pomiar GPS) wraz z precyzyjną niwelacją geometryczną dodatkowych punktów rozmieszczonych wzdłuż autostrady A-2 i wału przeciwpowodziowego rzeki Warty, Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.

- Baryła R., Oszczak S., Wielgosz P., Paziewski J., 2015, Badania wpływu robót górniczych na powierzchnię terenu górniczego „Kozmin I” – kontynuacja, na podstawie wyznaczenia przemieszczeń punktów kontrolowanych (pomiar GPS) wraz z precyzyjną niwelacją geometryczną dodatkowych punktów rozmieszczonych wzdłuż autostrady A-2 i wału przeciwpowodziowego rzeki Warty, Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.
- Baryła R., Paziewski J., 2012, Główne założenia koncepcji badania deformacji terenu na podstawie satelitarnych pomiarów GPS sieci kontrolnej, Biuletyn WAT, Nr 2, 2012, www.wat.edu.pl, Warszawa.
- Baryła R., Paziewski J., 2013, Badanie wpływu eksploatacji górniczej na deformację terenu górniczego Kozmin I na podstawie wyznaczenia przemieszczeń punktów kontrolowanych precyzyjną niwelacją geometryczną, Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.
- Baryła R., Paziewski J., 2014a, The Concept of the GNSS Control Network Densification with Precise Leveling for Ground Deformation Monitoring, International Conference on Environmental Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 22–23 May 2014 <http://dx.doi.org/10.3846/enviro.2014.187>, Vilnius, Lithuania.
- Baryła R., Paziewski J., 2014b, Kontynuacja badań wpływu robót górniczych na powierzchnię terenu górniczego „Kozmin I” na podstawie wyznaczenia przemieszczeń punktów kontrolowanych (pomiar GPS) wraz z precyzyjną niwelacją geometryczną dodatkowych punktów rozmieszczonych wzdłuż autostrady A-2 i wału przeciwpowodziowego rzeki Warty – Raport z niwelacji geometrycznej, Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.
- Baryła R., Paziewski J., 2015, Badania wpływu robót górniczych na powierzchnię terenu górniczego „Kozmin I” – kontynuacja, na podstawie wyznaczenia przemieszczeń punktów kontrolowanych (pomiar GPS) wraz z precyzyjną niwelacją geometryczną dodatkowych punktów rozmieszczonych wzdłuż autostrady A-2 i wału przeciwpowodziowego rzeki Warty – Raport z niwelacji geometrycznej, Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.
- Baryła R., Paziewski J., Wielgosz P., Stępnia K., Krukowska M., 2014b, “Accuracy assessment of the ground deformation monitoring with the use of GPS local network: open pit mine Kozmin case study”, Acta Geodynamica et Geomaterialia <http://www.irsm.cas.cz>, vol. 11, nr 4 (176).
- Baryła R., Stępnia K., Wielgosz P., Paziewski J., Krukowska M., Kapcia J., 2011, Analiza dokładności modeli centrów fazowych anten odbiorników GPS dla potrzeb niwelacji satelitarnej, Konferencja Komisji Geodezji Satelitarnej Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych PAN „Satelitarne metody wyznaczania pozycji we współczesnej geodezji i nawigacji”, 2-4.06.2011, Wrocław.
- Baryła R., Wielgosz P., Kurpiński G., 2017, Znak punktu pośredniego, zwłaszcza dla potrzeb wyznaczania deformacji terenu, Zgłoszenie patentowe nr W.126017, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa.
- Baryła R., Wielgosz P., Stępnia K., 2018, Stanowisko do kalibracji anten GNSS, zwłaszcza dla potrzeb wyznaczania deformacji terenu, prawo ochrony nr DP.W.124889.7.jgas wzoru użytkowego, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, 20 lutego 2018, Warszawa.
- Becker M., Zeimet P., Schönemann E., 2010, Anechoic chamber calibrations of phase center variations for new and existing GNSS signals and potential impacts in IGS processing, IGS Workshop 28 June - 2 July 2010, Newcastle upon Tyne, England.
- Czarnecki K., 2010, Geodezja współczesna, Wydawnictwo Gall, Katowice.
- Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M., 2007. Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern, Bern.
- Dawidowicz K., 2011, Comparison of using relative and absolute PCV corrections in short baseline GNSS observation processing, Artificial Satellites, 46(1), Warszawa.
- Dawidowicz K., Baryła R., 2017, GNSS antenna caused near-field interference effect in precise point positioning results, Artificial Satellites - Journal of Planetary Geodesy, Vol. 52, No. 2, 27-40, DOI: 10.1515/arsa-2017-0004.
- Dawidowicz K., Krzan G., Baryła R., Świątek K., 2017, The Impact of GNSS Antenna Mounting during Absolute Field Calibration on Phase Center Correction – JAV_GRANT-G3T Antenna Case Study. The 10th International Conference “Environmental Engineering”, Selected Papers, 27–28 April 2017, Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania, <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.183>
- Fotopoulos G., Kotsakis C., Sideris M. G., 2003, Estimation of variance components through a combined adjustment of GPS, geoid and leveling data, A Window on the Future of Geodesy, IAG General Assembly, June 30 – July 11, 2003, Springer, Japan.
- Görres B., Campbell J., Becker M., Siemes M., 2006, Absolute calibration of GPS antennas: laboratory results and comparison with field and robot techniques, GPS Solutions, No. 10.

- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E., 2008, GNSS – Global Navigation Satellite Systems, Springer-Verlag, Wien, Austria.
- Kadaj R., 2012, Algorytm opracowania modelu PL-geoid-2011, Seminarium Komitetu Geodezji PAN i Wydział Geodezji i Kartografii PW „Realizacja osnów geodezyjnych a problemy geodynamiki”, 25-27 września 2012, Grybów.
- Kadaj R., Świętoń T., 2013, Transpol wersja 2.06, program do transformacji współrzędnych i wysokości w państwowym systemie odniesień przestrzennych, metody, algorytmy i opis programu, Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- Lazzarini T., 1977, Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia, Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa.
- Mader G., 2001, A compression of absolute and relative GPS antenna calibrations, GPS Solutions, No. 4(4).
- Osada E., 2002, Geodezja, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Osada E., 2014, Osnowy Geodezyjne, UxLan, Wrocław.
- Oszczak S., Wasilewski A., Rzepecka Z., Szostak-Chrzanowska A., Chrzanowski A., Popiołek E., Ostrowski J., 1999, Ocena przemieszczeń poziomych wyznaczonych technologią GPS i ich optymalne zastosowanie do analizy ruchów górotworu przy pomocy metody elementów skończonych (MES) dla terenów górniczych Rudna I i Rudna II, Instytut Geodezji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.
- Oszczak S., Baryła R., Wielgosz P., 2006, Opracowanie technologii pomiaru i wykonanie precyzyjnych pomiarów GPS w celu wyznaczenia bezwzględnych odkształceń pionowych i poziomych na obszarze Głównego i Starego Miasta Gdańska – Etap I: Budowa i stabilizacji ziemnych znaków wysokościowych, Katedra Geodezji Satelitarnej i Nawigacji, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.
- Prószyński W., Kwaśniak M., 2015, Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń, pojęcia i elementy metodyki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Rothacher, M., Gurtner W., Schaer S., Weber R., Schlüter W., Hase H. O., 1995, Azimuth- and elevation- dependent phase center corrections for geodetic antennas estimated from GPS Calibration campaigns, International Association of Geodesy Symposia, Symposium No. 115: GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne and Spaceborne Applications, Springer, Boulder, CO, USA.
- Stępnia K., Wielgosz P., Baryła R., 2015, Field tests of L1 phase centre variation models of surveying-grade GPS antennas”, *Studia Geophysica et Geodaetica*, <http://dx.doi.org/10.1007/s11200-014-0250-6>, Tom 59, Zeszyt 3.
- Schmid R., Rothacher M., 2003, Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites, *Journal of Geodesy*, Vol. 77, No. 7-8.
- Schmitz M., 2001, Special tests of phase centre variations of various GPS antennas and some results, *Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, Festschrift Prof. G. Seeberzum 60, Geburtstag, No. 239, Hannover.
- Schupler B., Clark T. A., 1991, How different antennas affect The GPS observables. *GPS World* November/December.
- Szpetkowski S., 1978, Pomiary deformacji na terenach górniczych, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
- Treichel W., Stachurski M., 2009, Matlab dla studentów, ćwiczenia, zadania, rozwiązania, WITKOM Salma Press, Warszawa.
- Wielgosz P., Paziewski J., Baryła R., 2011, On constraining zenith tropospheric delays in processing of local GPS networks with BERNESE software, *Survey Review* 43, No. 323.
- Wielgosz P., Baryła R., Paziewski J., Krukowska M., Stępnia K., 2014, Przeprowadzenie analiz deformacji powierzchni terenu z wykorzystaniem zintegrowanej technologii precyzyjnej niwelacji geometrycznej i satelitarnej, Raport z realizacji pierwszej kampanii pomiarowej przeprowadzonej w dniach 19-30 sierpnia 2014 r., 12 listopada 2014 r., Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn.
- Wiśniewski Z., 2005, Rachunek wyrównawczy w geodezji (z przykładami), Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn.
- Wiśniewski Z., 2016, Rachunek wyrównawczy w geodezji (z przykładami), Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn.
- Wübbena G., Menge F., Schmitz M., Seeber G., Völksen Ch., 1997, A new approach for field calibration of absolute antenna phase center variations, *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 44.
- Zaleski A., Cegięła R., 1999, Matlab – obliczenia numeryczne i ich zastosowania, Wydawnictwo Naukowe PWN Nakom, Poznań.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

5.1. Komentarz do prac badawczych spoza tematyki wskazanego osiągnięcia naukowego

Przypisy podano zgodnie z numeracją przyjętą w załączniku nr 3.

Moja pozostała działalność naukowa, nieobjęta powyżej wskazanym osiągnięciem naukowym, skupiała się głównie wokół poniższych obszarów badawczych:

- modernizacja osnowy geodezyjnej z wykorzystaniem satelitarnych pomiarów GPS,
- wykorzystanie metody RTK do inwentaryzacji punktów osnowy geodezyjnej,
- problematyka transformacji współrzędnych punktów osnowy szczegółowej z układu 1965 do układu 2000,
- badania dokładności dostępnych modeli quasi-geoidy wykorzystywanych w niwelacji satelitarnej,
- badania wpływu troposfery i jonosfery na dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów sieci geodezyjnych,
- badania przemieszczeń i odkształceń obiektów budowlanych z wysoką rozdzielczością czasową przy wykorzystaniu technik GNSS.

Działalność naukową w UWM w Olsztynie rozpocząłem od badań z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych GPS do modernizacji osnowy geodezyjnej. Badania te miały na celu weryfikację pod względem dokładności punktów szczegółowej osnowy geodezyjnej ówczesnej 3 klasy zakładanych w latach 80-tych XX wieku. Modernizacja obejmowała również osnowy pomiarowe, których zbiory obejmowały punkty adaptowane z osnow geodezyjnych zakładanych w latach 1945-1980, charakteryzujących się małą gęstością punktów dostosowania, układami wielowęzłowymi oraz dwurzędowością sieci. W takich przypadkach przeprowadzane były kolejno: analizy źródłowych materiałów archiwalnych, ścisłe wyrównanie sieci w celu weryfikacji zbiorów obserwacyjnych oraz określenia punktów najślabszych pod względem dokładności, opracowanie projektu modernizacji sieci geodezyjnej, przeprowadzenie i opracowanie wzmacniających pomiarów satelitarnych, ponowne ścisłe wyrównanie sieci. W efekcie końcowym uzyskiwano wiarygodne współrzędne punktów o dokładności odpowiadającej co najmniej osnowie pomiarowej, wyrażone w układzie 1965 i/lub PL-2000 (2.E.12, 2.E.13, 2.E.16, 2.E.17, 2.E.18, 2.E.21). Realizacja układu PL-2000 odbywała się poprzez dowiązywanie pomiarów satelitarnych do punktów sieci POLREF realizującej układ PL-ETRF89.

Modernizacja osnowy geodezyjnej z wykorzystaniem satelitarnych pomiarów GPS wymagała, na etapie terenowej weryfikacji projektu modernizacji sieci, inwentaryzacji punktów do przeprowadzenia pomiarów satelitarnych. Ze względu, że poddawane procesowi modernizacji sieci były eksploatowane przez dziesięciolecia, to zachodziło duże prawdopodobieństwo zniszczenia stabilizacji znacznej części ich punktów. Toteż proces modernizacji, w którym uczestniczyłem, musiał być poprzedzony inwentaryzacją punktów. Biorąc pod uwagę znaczną zmianę sytuacji ze względu na upływ czasu, a tym samym dezaktualizację opisów topograficznych punktów osnowy, najlepszym rozwiązaniem do przeprowadzania inwentaryzacji okazała się metoda RTK. Dodatkowymi efektami jej zastosowania były: możliwość określenia wstępnej dokładności położenia punktów jednoznacznie zidentyfikowanych, określenie

możliwości przeprowadzenia satelitarnych pomiarów statycznych (określenie zaston terenowych) oraz charakterystyki stanu znaków (2.E.20, 2.E.23). Wykorzystanie metody RTK do inwentaryzacji punktów osnowy geodezyjnej wymagało opracowania sposobów realizacji układu 1965 w czasie rzeczywistym jak również możliwości lokalizacji stacji referencyjnej, której zasięg ograniczony był mocą nadajnika radiowego. Należy w tym miejscu napomnieć, że przed wprowadzeniem aktywnych sieci geodezyjnych (ASG-EUPOS 2008r.), pomiary metodą RTK wykonywano z wykorzystaniem lokalnej (własnej) stacji referencyjnej, a realizację układu 1965 (opartego na niegeocentrycznej elipsoidzie Krasowskiego) przeprowadzano tylko na podstawie współczynników transformacji między układami (pomiar na punktach dostosowania, posiadających współrzędne w obu układach).

Wprowadzonym przez Ustawodawcę w dniu 8 sierpnia 2000r. Rozporządzeniem Rady Ministrów, w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych, zdefiniowano nowe układy współrzędnych płaskich: 2000 – do realizacji mapy zasadniczej, 1992 – do prowadzenia map w skali 10 000 i mniejszych. Określono również dzień 31 grudnia 2009r., jako końcowy termin stosowania układu 1965 oraz układów lokalnych. W związku z wprowadzonymi ustaleniami, swoje zainteresowania w okresie pierwszej dekady XXI wieku skupiałem na problematyce transformacji zbiorów punktów, stanowiących zasoby osnowy geodezyjnej w PODGiK oraz MODGiK, z układu 1965 do układu 2000 (2.E.12, 3.Q.20, 3.Q.25, 3.Q.29, 3.Q.37).

Rozpoczynając badania deformacji terenu, związane z integracją niwelacji geometrycznej z pomiarami satelitarnymi w badaniach deformacji terenu, należało rozwiązać problem niwelacji satelitarnej. W tym celu badaniami objęte zostały dostępne modele quasi-geoidy niezbędne do przeprowadzenia niwelacji satelitarnej (2.A.2). Współpraca z Centrum Badawczo-Rozwojowym CUPRUM we Wrocławiu przyczyniła się do pozyskania danych do opracowania nowego modelu quasi-geoidy, obejmującego obszar sieci niwelacji precyzyjnej LGOM 2 klasy, który w pełni będzie integrował niwelację geometryczną z pomiarami satelitarnymi oraz przyczyni się do pełnego zachowania ciągłości badań deformacji (2.A.2).

Realizacja badań deformacji terenu z wykorzystaniem pomiarów satelitarnych od początku była uzależniona od wyznaczenia wpływu troposfery i jonosfery na dokładność wyznaczenia współrzędnych punktów sieci kontrolnych (2.A.6, 2.E.5, 2.E.7). Biorąc pod uwagę niezależny wpływ powyższych ośrodków na dokładność wyznaczenia względnego w zależności od relacji między punktami (krótkie, średnie i długie wektory satelitarne), uczestniczyłem w przeprowadzaniu wielu wariantów obliczeniowych dla każdej badanej sieci kontrolnej. Strategia obliczeniowa, z przyjęciem odpowiednich parametrów troposfery i jonosfery, charakteryzująca się największą dokładnością rozwiązania była przyjmowana dla konkretnej sieci kontrolnej i niezmienna przez cały okres prowadzenia badań deformacji terenu na danym obiekcie.

Moje ostatnie aktywności naukowe dotyczą badań mających na celu precyzyjną detekcję i charakterystykę dynamicznych zmian położenia badanych punktów. Doskonalona metoda umożliwiła opracowanie wysokoczęstotliwościowych (np. 50 Hz) obserwacji satelitarnych i wykrywanie dynamicznych przemieszczeń anteny GNSS na poziomie pojedynczych milimetrów, co może mieć zastosowanie np. w badaniach konstrukcji inżynierskich (2.A.1, 2.E.2). Opracowane algorytmy umożliwiały detekcję wysokoczęstotliwościowych przemieszczeń zarówno w trybie pozycjonowania względnego jak i absolutnego wykorzystując wielosystemowe obserwacje GNSS.

5.2. Publikacje z listy A Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego indeksowane przez JCR

Podano *Impact Factor* z roku opublikowania, liczbę punktów wg MNiSW. Udział wnioskodawcy przedstawiono w Załączniku 3. Publikacje po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.

1. Paziewski J, Sieradzki R, Baryła R, 2018, Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: application to precise dynamic displacement detection, *Measurement Science and Technology*, 29 (3), 035002, DOI: 10.1088/1361-6501/29/3/035002 (Impact Factor 1.588, 30p).
2. Stępnia K, Baryła R, Paziewski J, Gołaszewski P, Wielgosz P, Kurpiński G, Osada E, 2017, Validation of regional geoid models for Poland: Lower Silesia case study, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol. 14, No. 1 (185), 93–100, DOI: 10.13168/AGG.2016.0031 (Impact Factor 0.699, 20p).
3. Stępnia K, Wielgosz P, Baryła R, 2015, Field tests of L1 phase centre variation models of surveying-grade GPS antennas, *Studia Geophysica et Geodaetica*, Vol. 59, 394–408, DOI: 10.1007/s11200-014-0250-6 (Impact Factor 0.818, 20p).
4. Zienkiewicz M, Baryła R, 2015, Determination of vertical indicators of ground deformation in the Old and Main City of Gdansk area by applying unconventional method of robust estimation, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol. 12, No. 3 (179), 249–257, DOI: 10.13168/AGG.2015.0024 (Impact Factor 0.561, 20p).
5. Baryła R, Paziewski J, Wielgosz P, Stępnia K, Krukowska M, 2014, Accuracy assessment of the ground deformation monitoring with the use of GPS local network: open pit mine Koźmin case study, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol. 11, No. 4 (176), DOI: 10.13168/AGG.2014.0013 (Impact Factor 0.389, 20p).
6. Wielgosz P, Paziewski J, Baryła R, 2011, On constraining zenith tropospheric delays in processing of local GPS networks with Bernese software, *Survey Review*, 43, No. 323. pp. 472-483 (Impact Factor 0.277, 15p).

5.3. Patenty, wzory użytkowe, wzory przemysłowe

1. Baryła R, Wielgosz P, Stępnia K, 2018, decyzja do wniosku nr W.124889 na udzielenie prawa ochronnego na wzór użytkowy pt.: Stanowisko do kalibracji anten GNSS, zwłaszcza dla potrzeb wyznaczania deformacji terenu. 20 lutego 2018 r., Warszawa.
2. Baryła R, Wielgosz P, Kurpiński G, 2017, wniosek nr W.126017 udzielenia prawa ochronnego na wzór użytkowy pt.: Znak punktu pośredniego, zwłaszcza dla potrzeb wyznaczania deformacji terenu. 13 lutego 2017 r., Warszawa.
3. Baryła R, 2016, wniosek nr Wp.24982 z rejestracji wzoru przemysłowego pt.: Klin niwelacyjny. 17 listopada 2016 r., Warszawa.
4. Baryła R, Wielgosz P, Kurpiński G, Oszczak S, 2013, patent nr 223063 na wynalazek pt.: Sposób wyznaczania deformacji terenu, zwłaszcza terenu górniczego. 04 listopada 2016 r., Warszawa.
5. Baryła R, 2007, prawo ochronne nr 64831 na wzór użytkowy pt.: Przyrząd do precyzyjnego wymuszonego centrowania anteny GPS. 03 marca 2010 r., Warszawa.

5.4. Publikacje naukowe z listy B MNiSW, rozdziały monografii, indeksowane materiały pokonferencyjne

Podano liczbę punktów czasopisma z roku opublikowania. Udział wnioskodawcy przedstawiono w Załączniku 3. Publikacje po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.

1. Dawidowicz K, Baryła R, 2017, GNSS antenna caused near-field interference effect in precise point positioning results, *Artificial Satellites - Journal of Planetary Geodesy*, Vol. 52, No. 2, 27-40, DOI: 10.1515/arsa-2017-0004 (czasopismo z listy B MNiSW, 6p)
2. Paziewski J, Sieradzki R, Baryła R, 2017, High-rate GNSS positioning for precise detection of dynamic displacements and deformations: methodology and case study results. The 10th International Conference "Environmental Engineering", Selected Papers, 27–28 April 2017, Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania, <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.224> (Recenzowane materiały pokonferencyjne indeksowane w bazie Web of Science, 10p)
3. Dawidowicz K, Krzan G, Baryła R, Świątek K, 2017, The Impact of GNSS Antenna Mounting during Absolute Field Calibration on Phase Center Correction – JAV_GRANT-G3T Antenna Case Study. The 10th International Conference "Environmental Engineering", Selected Papers, 27–28 April 2017, Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania, <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.183> (Recenzowane materiały pokonferencyjne indeksowane w bazie Web of Science, 10p)
4. Baryła R, Paziewski J, 2014, The Concept of the GNSS Control Network Densification with Precise Leveling for Ground Deformation Monitoring, The 9th International Conference "Environmental Engineering", Selected Papers, 22–23 May 2014, Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania, <http://dx.doi.org/10.3846/enviro.2014.187> (Recenzowane materiały pokonferencyjne indeksowane w bazie Web of Science, 10p)
5. Stepniak K, Baryła R, Wielgosz P, Kurpinski G, 2013. Optimal data processing strategy in precise GPS leveling networks. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol. 10, No. 4 (172), 443–452, DOI: 10.13168/AGG.2013.0044 (czasopismo z listy B MNiSW, Impact Factor 0.667, p10)
6. Baryła R, Paziewski J, 2012, Główne założenia technologii badania deformacji terenu na podstawie satelitarnych pomiarów GPS sieci kontrolnej, *Biuletyn WAT*, 2/2012, 39-57, Warszawa (czasopismo z listy B MNiSW, 9p)
7. Baryła R, Wielgosz P, Paziewski J, Błaszczak S, 2011, Principles of ground deformation monitoring at open pit mine with use of GPS technology: KWB "Adamów" in Turek case study, *Reports on Geodesy*, No. 1(90), 23-30, Warszawa (czasopismo z listy B MNiSW, 6p)
8. Baryła R, Oszczak S, Wielgosz P, Koczot B, 2010, Zastosowanie technologii niwelacji satelitarnej do badania deformacji terenu na obszarze Miasta Gdańska, *Pomiary Satelitarne w Geodezji i Budownictwie, Archiwum Geomatyki – praca zbiorowa*, Politechnika Gdańska, ISBN 978-83-930010-4-0, 7-19, Gdańsk (rozdział w monografii)
9. Baryła R, Paziewski J, Oszczak S, Wielgosz P, 2009, Analiza deformacji terenu na obszarze Starego i Głównego Miasta Gdańska wyznaczonych za pomocą techniki GPS – wyniki z pięciu kampanii pomiarowych, *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Konferencje No. 129 (54)*, 3-8, Wrocław (Recenzowane materiały pokonferencyjne, 2p)

10. Baryła R, Oszczak S, Wielgosz P, Koczot B, 2009, Koncepcja wykorzystania technologii GPS do badań deformacji powierzchni Ziemi na terenach miejskich, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Konferencje No. 129 (54), 9-16, Wrocław (Recenzowane materiały pokonferencyjne, 2p)
11. Oszczak S, Baryła R, Ciećko A, Popielarczyk D, Mróz M, 2008, Wykorzystanie globalnych systemów nawigacji satelitarnej GNSS, Badania Naukowe UWM w Olsztynie, 3 przegląd osiągnięć, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, ISBN 83-7299-556-8, 31-36, Olsztyn (rozdział w monografii).
12. Baryła R, Oszczak S, Koczot B, Szczechowski B, 2007, A concept of using static GPS measurements for determination of vertical and horizontal land deformations in the Main and Old City of Gdańsk, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, No. 1(82), 17-24, Warszawa (czasopismo z listy B MNiSW, 6p)
13. Baryła R, Oszczak S, Wielgosz P, Bakuła M, Cellmer S, Popielarczyk D, Jarmołowski W, Tyszko A, Oszczak B, Gregorczyk R, Rapiński J, Zapert M, 2007, Results of the first GPS measurement campaign for the determination of absolute vertical and horizontal deformations in the Main and Old City of Gdańsk, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, No. 1(82), 25-32, Warszawa (czasopismo z listy B MNiSW, 6p)

5.5. Dorobek i osiągnięcia w zakresie popularyzatorskim, organizacyjnym i dydaktycznym

Nagrody:

- Nagroda Jubileuszowa za 20 lat pracy, 2016.
- Nagroda indywidualna Rektora UWM w Olsztynie, II stopnia, za osiągnięcia w dziedzinie naukowej, 2012.
- Dyplom Rektora UWM w Olsztynie, za działalność organizacyjną, a w szczególności za opracowanie nowych programów kształcenia zgodnie z KRK, 2012.
- Nagroda zespołowa Rektora UWM w Olsztynie, II stopnia, za osiągnięcia w dziedzinie naukowej, 2008.
- Nagroda zespołowa Rektora UWM w Olsztynie, II stopnia, za osiągnięcia w dziedzinie naukowej, 2007.

Dorobek dydaktyczny

- Realizacja ćwiczeń i wykładów na studiach pierwszego i drugiego stopnia, stacjonarnych i niestacjonarnych, na Wydziale Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa UWM Olsztyn, Wydział Studiów Technicznych i Społecznych w Elku (filia UWM w Olsztynie) – czternaście przedmiotów.
- Kierownik przedmiotu na studiach pierwszego i drugiego stopnia, stacjonarnych i niestacjonarnych, na Wydziale Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa UWM Olsztyn – sześć przedmiotów.

- Przeprowadzenie egzaminów na studiach pierwszego i drugiego stopnia, stacjonarnych i niestacjonarnych, na Wydziale Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa UWM Olsztyn – pięć przedmiotów.
- Opiekun roku – dwukrotnie.
- Promotorstwo dyplomowych prac magisterskich, UWM w Olsztynie: 67.
- Promotorstwo dyplomowych prac inżynierskich, UWM w Olsztynie: 35.
- Promotorstwo prac podyplomowych, UWM w Olsztynie: 4.
- Recenzje prac dyplomowych inżynierskich oraz magisterskich, UWM w Olsztynie: 25

Dorobek organizacyjny

- Członek Rady Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej (Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa), 2012-2016r.
- Członek czterech komisji wydziałowych, w tym Komisji Konkursowej.
- Kierownik dwóch tematów badań statutowych.
- Kierownik czterech tematów badawczo-rozwojowych.
- Udział w dwudziestu dwóch projektach badawczo-rozwojowych, realizowanych przez Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.

5.6. Zestawienie wybranych wskaźników

Tabela 2

Zestawienie wybranych wskaźników dotyczących osiągnięć naukowo-badawczych, dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy krajowej i międzynarodowej. Szczegółowe zestawienie wszystkich osiągnięć przedstawiono w załączniku nr 3.

L.p.	Wskaźnik	Wartość
1.	Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie <i>Journal Citation Reports</i> (JCR)	6
2.	Patenty, wzory użytkowe:	
	• Patenty	1
	• Prawo ochrony wzoru użytkowego	2
	• Złożone wnioski patentowe	2
	• Wdrożenia	4
3.	Autorstwo lub współautorstwo monografii, publikacji naukowych w czasopismach międzynarodowych lub krajowych:	
	• Monografie	1
	• Rozdziały w monografii	2
	• Publikacje naukowe w czasopismach nieposiadających współczynnika wpływu <i>Impact Factor</i> (lista B)	10
	• Publikacje w materiałach z konferencji międzynarodowych uwzględnionych w uznanej bazie publikacji o zasięgu międzynarodowym (WoS)	3
4.	Sumaryczny <i>Impact Factor</i> wszystkich publikacji naukowych według listy <i>Journal Citation Reports</i> (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	4,220

5.	Liczba cytowań według bazy Web of Science	38
6.	Indeks Hirscha według bazy Web of Science	4
7.	Suma punktów z publikacji i patentów zgodnie z rokiem opublikowania (udział wnioskodawcy)	196
8.	Udział jako wykonawca w międzynarodowych i krajowych projektach badawczych:	6
	Kierowanie tematami statutowymi oraz badawczo-rozwojowymi:	
9.	• Statutowe	2
	• Badawczo-rozwojowe	4
10.	Nagrody za działalność naukową	4
11.	Liczba referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	43
12.	Udział w komitetach organizacyjnych i naukowych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	4
13.	Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych i branżowych	4
14.	Recenzowanie publikacji w czasopiśmie międzynarodowych i krajowych:	
	• Czasopisma z listy JCR (posiadające <i>Impact Factor</i>)	5
15.	Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, eksperty	38
16.	Wypromowane prace dyplomowe:	
	• Magisterskie	67
	• Inżynierskie	35

D. Baugta