

## PRAKTYKA REALIZACJI I OPRACOWANIA POMIARÓW SATELITARNYCH PUNKTÓW KOLEJOWEJ OSNOWY GEODEZYJNEJ

---

**Andrzej Uznański**

dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, e-mail: auznan@agh.edu.pl

---

*Streszczenie. W pracy przedstawiono problematykę projektowania, realizacji i opracowania statycznych pomiarów satelitarnych wykonywanych w celu wyznaczenia współrzędnych punktów kolejowej podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej. Istotność i aktualność zagadnienia wynika z modernizacji wielu odcinków linii kolejowych, a także z perspektywy kolejnych prac, wynikających z alokacji środków UE na cele związane z transportem kolejowym. Dobrej jakości kolejowa osnowa geodezyjna stanowi podstawę prawidłowego prowadzenia prac modernizacyjnych zgodnie z projektem. Znaczenie jakości osnowy wzrasta również z powodu przystosowywania linii kolejowych do coraz większych prędkości. W pracy akcentowano aspekty praktyczne zagadnienia. Zwrócono uwagę na problematykę niezawodności wyników obliczeń pomiarów zrealizowanych w ramach satelitarnych sesji statycznych oraz analizę pomiaru wykonanego w niekorzystnych dla pomiarów satelitarnych warunkach topograficznych.*

*Słowa kluczowe: kolejowa osnowa geodezyjna, znaki regulacji osi toru, Ig-7, statyczne sesje satelitarne, niezawodność, dokładność*

### 1. Wprowadzenie

Podstawą ładu przestrzennego w przypadku każdego rodzaju inwestycji jest osnowa geodezyjna, którą stanowią punkty o dokładnie wyznaczonych współrzędnych, zlokalizowane na obszarze całej inwestycji w sposób umożliwiający prowadzenie wszelkiego rodzaju prac związanych z tą inwestycją. Niedokładna lub źle zaprojektowana osnowa może powodować trudności w zrealizowaniu prac zgodnie z projektem. Obszar kolejowy ma szczególne znaczenie w tym względzie z powodu występowania pojęcia skrajni. Ponadto linie kolejowe są przystosowywane do coraz wyższych prędkości, co narzuca większe wymagania, co do jakości wykonawstwa, także geodezyjnego.

W zakresie realizacji pomiarów geodezyjnych na obszarach kolejowych nadal najnowszym, a przez to i najaktualniejszym, opracowaniem spółki PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. jest Standard techniczny Ig-7 z końca 2012r. Standard ten określa „zasady i dokładności pomiarów geodezyjnych dla zakładania wielofunkcyjnych znaków regulacji osi toru Ig-7” [4]. Jest to jedyne opracowanie branży, w którym pojawiają się aktualne zapisy dotyczące pomiarów satelitarnych realizo-

wanych w ramach sesji statycznych. Sformułowano w nim szczegółowo procedurę pomiarową, natomiast zagadnieniom związanym z opracowaniem statycznych obserwacji satelitarnych nie poświęcono zbyt wiele uwagi, a wymagana zawartość operatu jest absolutnie minimalna i niepozwalająca na jakąkolwiek kontrolę poprawności opracowania przedstawionego przez wykonawcę.

Celem regulacji standardu technicznego Ig-7 jest prawidłowe wyznaczenie współrzędnych znaków regulacji osi toru. Osnowa geodezyjna pojawia się w zapisach jedynie jako środek do uzyskania konkretnego celu. Natomiast nie ma odrębnych przepisów regulujących zakładanie kolejowych osnow geodezyjnych, które mogą mieć bardzo wszechstronne zastosowanie we wszelkiego rodzaju pracach prowadzonych na terenach kolejowych.

Statyczne pomiary satelitarne są wymagane przepisami do wyznaczania współrzędnych punktów kolejowej podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej. Wyznaczanie współrzędnych punktów osnowy geodezyjnej jest dwuetapowym opracowaniem wyników pomiaru satelitarnego. Pierwszym etapem jest postprocessing obserwacji satelitarnych, po którym należy przeprowadzić ich wyrównanie. W pracy starano się zwrócić uwagę na źródła problemów związane z realizacją i opracowaniem wyników pomiarów satelitarnych. Szczególny akcent położono na bardzo istotny wpływ lokalizacji punktów osnowy na wyniki obliczeń. Wykonawcy dysponując aktualnie co najmniej dwusystemowymi odbiornikami satelitarnymi, często nie przykładają odpowiedniej wagi do tej kwestii. W połączeniu z obiektywnymi trudnościami w ocenie jakości wyników pomiarów, efektem może być osnowa o niskiej dokładności. Znaczenie przesłoneń horyzontu wokół punktu analizowano na konkretnym przykładzie jednego z wykonanych pomiarów.

## 2. Aspekt lokalizacji punktów kolejowej podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej

Jakość wyników obliczeń obserwacji satelitarnych jest zależna od różnych czynników, na które wykonawca pomiarów może mieć zróżnicowany wpływ z dwóch powodów: rodzaju czynnika samego w sobie, jak i konkretnej sytuacji pomiarowej. Znaczenie dla wyników pomiarów satelitarnych ma wpływ refrakcji jonosferycznej i troposferycznej, błędy zegarów satelitów, dokładność współrzędnych punktów osnowy wykorzystanej do nawiązania i inne.

Bardzo istotnym czynnikiem, mającym znaczenie dla jakości wyników pomiarów satelitarnych jest aspekt lokalizacji punktów osnowy. Czynniki te generalnie można kształtować w pewnym zakresie. Są jednak sytuacje, w których wybór nie jest dobry z punktu widzenia pomiarów satelitarnych.

W przypadku lokalizacji punktów osnowy geodezyjnej znaczenie mają założenia projektowe. Wymóg pomiaru satelitarnego dotyczy wg przepisów tylko punktów kolejowej podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej. Są to punkty lokalizowane wzdłuż linii kolejowej parami. Odległość punktów w parze powinna wynosić

150 m – 300 m, a odległość par punktów powinna być rzędu 2.0 km - 2.5 km [4]. Te wytyczne determinują projekt osnowy. Nie są one rygorystyczne i dają pewne pole manewru. W niektórych sytuacjach terenowych ma to znaczenie, w innych niestety nie.

W zestawieniu z pomiarami naziemnymi, dużym atutem pomiarów satelitarnych jest brak wymogu istnienia wizur między mierzonymi punktami. Niestety w to miejsce pojawia się wymóg odkrytego horyzontu, umożliwiającego odbiór niezakłóconych sygnałów satelitarnych. W przypadku pomiarów na terenach kolejowych relatywnie często występuje sytuacja, w której horyzont wokół punktów osnowy jest silnie przesłonięty, szczególnie przez szpalery, często wysokich drzew. W wielu takich przypadkach nie ma możliwości uzyskania bardziej korzystnego horyzontu, gdyż dany odcinek linii kolejowej przebiega np. przez las. Znaczenie przesłonięć horyzontu może być dwojakie:

- ograniczenie liczby satelitów, z których sygnał może zostać odebrany przez antenę odbiornika satelitarnego,
- wprowadzenie zakłóceń do sygnałów odbieranych przez antenę odbiornika satelitarnego.

Projekt pomiaru punktów osnowy powinien być przeprowadzony z pomocą programu do planowania pomiarów satelitarnych, gdyż w obydwu przypadkach rozwiązaniem może być wybór optymalnego okna pomiarowego, czyli interwału czasu, w którym stwierdzono wystarczająco dużą liczbę satelitów, których trajektoria wskazuje na brak zakłóceń ich sygnałów przez przeszkody terenowe.

Jeśli warunki topograficzne wymuszają pomiar punktów osnowy dla linii przebiegającej przez las, praktyczną wskazówką może być unikanie lokalizacji punktów podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej na i w bliskim sąsiedztwie luków takiego odcinka linii kolejowej. Na odcinkach prostych przebieg linii, tworząc korytarz, wymusza odkrycie horyzontu przynajmniej w takim pasie. Ze względu na nachylenie płaszczyzn orbitalnych satelitów do równika (NAVSTAR GPS  $55^{\circ}$ , GLONASS  $64.8^{\circ}$ , Galileo  $56^{\circ}$ ), wówczas znaczenie może mieć kierunek tego korytarza względem stron świata.

W przypadku nieuniknionych zakłóceń sygnałów satelitarnych konieczne jest odpowiednie opracowanie obserwacji. Można wykorzystać oprogramowanie do analizy zarejestrowanych obserwacji, np. TEQC i/lub możliwości programu producenta odbiorników satelitarnych. Analiza wpływu niekorzystnej lokalizacji punktów na wyniki została przedstawiona w dalszej części pracy. Skoncentrowano się w niej na jednym konkretnym przypadku.

### 3. Opracowanie obserwacji satelitarnych

Produkt finalny pomiarów geodezyjnych w postaci współrzędnych wyrównanych punktów wraz z charakterystyką ich jakości uzyskuje się w przypadku pomiarów satelitarnych z dwuetapowego opracowania. Pierwszym etapem jest postprocesing obserwacji, którego celem jest obliczenie składowych wektorów między parami

punktów. Uzyskana w tym kroku obliczeniowym sieć o charakterze liniowym jest następnie poddawana procesowi wyrównania metodą najmniejszych kwadratów.

Na poziomie inżynierskim opracowanie obserwacji satelitarnych realizowane jest praktycznie zawsze za pomocą oprogramowania producentów odbiorników satelitarnych. W praktyce bardziej zaawansowane programy, których najpopularniejszym przedstawicielem jest Bernese, nie są stosowane.

Najprostszym i często najmniej odpowiednim rozwiązaniem jest przypadek obliczeń wykonywanych przez program automatycznie, wg jedyne go lub domyślnego algorytmu producenta sprzętu geodezyjnego. Jest to wyjście naprzeciw użytkownikom, którym teoria zagadnienia nie jest znana, a dysponują jedynie sprzętem do pomiarów satelitarnych. Należy zwrócić uwagę, że niektóre programy umożliwiają użytkownikowi skorzystanie z jego wiedzy teoretycznej, jak i tej o warunkach realizacji pomiaru, w sposób bardzo nieznaczny.

Użytkownik może mieć wpływ na wyniki postprocessingu poprzez:

- modyfikację domyślnego algorytmu obliczeniowego programu,
- manualnego usunięcia z rozwiązania wybranych wektorów.

Zakres ingerencji geodety w proces obliczeniowy na etapie postprocessingu zależy od zróżnicowanych możliwości udostępnianych przez oprogramowanie. Najczęściej użytkownik może mieć dwójakiego rodzaju wpływ na algorytm obliczeniowy:

- wprowadzenie dokładniejszych danych do obliczeń, dotyczy w zasadzie efermyd precyzyjnych i parametrów kalibracyjnych anten satelitarnych,
- wybór modeli, głównie w zakresie opisu zjawisk refrakcji jonosferycznej i troposferycznej.

Podstawą do usunięcia wektora z rozwiązania może być wiedza o warunkach, w których pomiar był zrealizowany, analiza zamknięć pętli oraz wpływ na wartość współrzędnych uśrednionych punktu. Oprogramowanie może pozwalać na manualne tworzenie dowolnych pętli wektorów satelitarnych lub automatycznie je tworzyć dla wszystkich kombinacji trójek punktów. Rysunek 1 przedstawia wynik obliczeń dla dwóch automatycznie utworzonych pętli. Pierwsza dotyczy punktów mierzonej osnowy, druga, o numerze 72, dotyczy trójki punktów, z których jeden jest stacją referencyjną systemu ASG-EUPOS. W tym przypadku odchyłka zamknięcia pętli wynosi ponad 16 cm przy jej długości wynoszącej prawie 121 km.

Na rysunku 2 przedstawiono wynik obliczeń postprocessingu dla jednego z punktów w wariancie obliczeń automatycznych. Współrzędne punktu 92.835 zlokalizowanego na odcinku linii kolejowej przebiegającej przez wysoki las zostały obliczone z trzech relatywnie krótkich wektorów (od 970 m do 2810 m) i obserwacji zarejestrowanych w trakcie sesji trwającej prawie 2,5 godziny. Obliczone różnice współrzędnych punktu, wyznaczone ze składowych wektorów satelitarnych obliczonych w postprocessingu, sięgają 16 cm sytuacyjnie i 26,5 cm wysokościowo. Ten wynik odzwierciedla wpływ zakłóceń sygnałów satelitarnych oraz istotnych przesłoneń horyzontu wokół tego punktu. Jeśli oprogramowanie nie generuje takich informacji dla użytkownika, wynik końcowy obliczeń może być obarczony dużymi błędami. Jest to problematyka związana z niezawodnością wyników obliczeń.

W niektórych programach na tym etapie obliczeń istnieją możliwości wyboru algorytmu obliczeniowego. Przy odpowiedniej wiedzy użytkownik może więc zminimalizować wpływ takich odstających rozwiązań na wynik końcowy bez konieczności ich eliminacji z obliczeń.

Loop 1				Loop 72					
From	To	dX[m]	dY[m]	dZ[m]	From	To	dX[m]	dY[m]	dZ[m]
91.838	92.835	-556.9318	805.1746	189.3168	92.994	94.798	-1009.2151	1456.2328	343.1996
92.835	92.075	424.7824	-614.3209	-144.3688	94.798	KROS	15108.0241	50768.6524	-27399.4466
92.075	91.838	132.1484	-190.8537	-44.9485	KROS	92.994	-14098.9079	-52224.9276	27056.1198
X:	-0.0010 m	W-Test:	-0.12		X:	-0.0990 m	W-Test:	-6.65	▲
Y:	0.0000 m		-0.01		Y:	-0.0424 m		-6.42	▲
Z:	-0.0004 m		-0.04		Z:	-0.1271 m		-6.49	▲
Easting:	0.0003 m	W-Test:	0.08		Easting:	-0.0034 m	W-Test:	-0.42	
Northing:	0.0005 m		0.05		Northing:	0.0006 m		0.03	
Height:	-0.0010 m		-0.10		Height:	-0.1665 m		-9.52	▲
Closing error:	0.0011 m (0.6 ppm)	Ratio:	(1:1779793)		Closing error:	0.1666 m (1.4 ppm)	Ratio:	(1:731923)	
Length:	1994.3115 m				Length:	121924.0895 m			

Rys. 1. Pętle wektorów satelitarnych utworzone automatycznie przez program LeicaGeo Office

Point Id: 92.835		Averaging Limit					
		Position: 0.0100 m		Height: 0.0200 m			
Use	State	Reference	Date/Time	Posn.diff	Hgt. diff	Posn. + Hgt. diff	
<input type="checkbox"/>	▲ Automatic	93.715	04/04/2014 17:22:34	0.0061	0.0422	0.0426	
<input checked="" type="checkbox"/>	▲ Automatic	93.907	04/04/2014 17:22:34	0.0000	0.0000	0.0000	
<input type="checkbox"/>	▲ Automatic	94.798	04/04/2014 17:22:34	0.0257	-0.0192	0.0317	
<input type="checkbox"/>	▲ Automatic	89.940	04/04/2014 17:22:34	0.1608	-0.2657	0.3106	
<input type="checkbox"/>	▲ Automatic	92.994	04/04/2014 17:31:54	0.0091	0.1494	0.1497	

Rys. 2. Postprocessing: duże różnice poszczególnych rozwiązań wyznaczających współrzędne uśrednione punktu (LeicaGeo Office)

W wyniku przeprowadzonego postprocessingu otrzymuje się sieć liniową złożoną z wektorów satelitarnych. Kolejnym krokiem jest wyrównanie tej sieci metodą najmniejszych kwadratów. W tym etapie znacznie istotniejsze od ustawień w opcjach programu jest właściwe zinterpretowanie parametru jakości współrzędnych wyrównanych punktów osnowy oraz wyników testów statystycznych związanych z dążeniem do zapewnienia niezawodności wynikom obliczeń.

W publikacji [7] przedstawiono szerzej pewien przykład pomiaru kontrolnego. Podane w operacie błędy współrzędnych punktów wynosiły 1 mm sytuacyjnie i do 2 mm dla wysokości. Wynik poparto wartościami statystyki testu Chi-kwadrat. Pomiar półsekundowym precyzyjnym tachymetrem wykazał błędy położenia sytuacyjnego punktów w przedziale od 14 mm do 49 mm. W tej sytuacji wynik testu nie miał żadnego znaczenia, a obliczone odchylenia standardowe współrzędnych punktów osnowy kolejowej nie zgadzają się zupełnie z ich rzeczywistą jakością.

Problem ma swoje źródło w różnicy między pojęciami precyzji i dokładności [6]. Parametrem jakości obliczanym przez oprogramowanie jest zazwyczaj odchylenie standardowe, które jest miarą precyzji. Jeśli model matematyczny i/lub stochastyczny nie był dobrany właściwie, wartość parametru opisującego jakość pomiaru nie będzie wiarygodna. Dla wartości odchyłeń standardowych współrzędnych punktów znaczenie ma również rodzaj wektorów obliczonych w postprocesingu i/lub poddanych wyrównaniu: wszystkie lub tylko niezależne. Należy mieć świadomość, że wyrównanie wszystkich wektorów wpłynie istotnie na obniżenie wartości odchyłeń standardowych współrzędnych punktów.

#### 4. Analiza postprocessingu statycznego pomiaru satelitarnego

Technologia statycznych pomiarów satelitarnych jest dobrze rozpoznaną metodą pomiarową. Aspekt obliczeniowy może jednak sprawiać w praktyce problemy. Nie jest to kwestia formalnej umiejętności przeprowadzenia tego etapu opracowania, gdyż jest opcja wykonania go automatycznie. Problem polega na umiejętności, czy wręcz możliwości w programie, uzyskania wiarygodnych wyników, dzięki opcjom analizy obserwacji, wyboru parametrów i modeli obliczeniowych, narzędzi oprogramowania do kontroli poprawności otrzymanego rozwiązania. Wartości parametru charakteryzującego jakość współrzędnych wyrównanych punktów i ich interpretacja to kolejna, nieco odrębna kwestia.

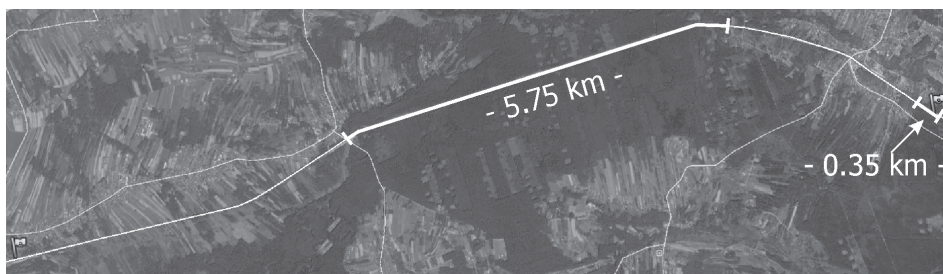
W pracy położono akcent na analizę wyników statycznych pomiarów satelitarnych uzyskanych w niekorzystnych warunkach terenowych, tj. przy istotnych przesłonięciach horyzontu wokół punktów kolejowej podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej. Opracowanie wyników pomiaru satelitarnego jest wówczas najbardziej wymagające.

Na poniższym rysunku przedstawiono odcinek linii kolejowej E-30, którego punkty osnowy podlegały pomiarowi satelitarnemu oraz analizom na potrzeby niniejszego opracowania. Środkowa część odcinka oraz jeden z końców przebiega przez las, szczególnie wysoki w jego środkowej części o długości 5,75 km. W tym przypadku nie ma możliwości uniknięcia lokalizacji punktów podstawowej poziomej osnowy kolejowej w bezpośrednim sąsiedztwie szpalerów drzew. Z kolei na zachodnim końcu odcinka rozpoczyna się kolejny obszar zalesiony. Również tutaj nie ma możliwości uniknięcia niekorzystnych lokalizacji punktów osnowy.

Analizę wyników postprocessingu dla jednego z punktów osnowy w zakresie zamknięcia pętli wektorów satelitarnych oraz współrzędnych uśrednionych ujęto w poprzednim punkcie. O ile tak duża różnica (16 cm sytuacyjnie i 26,5 cm wysokościowo) jednego z rozwiązań w stosunku do współrzędnych uśrednionych dotyczyła tylko jednego punktu w tym pomiarze, to w praktyce takie sytuacje nie są rzadkością, zwłaszcza w przypadku długich wektorów, wysokich przesłonięć horyzontu i zakłóceń sygnałów satelitarnych. Dla pozostałych punktów analogicznie obliczona wartość maksymalna wyniosła dla pozycji poziomej 25 mm przy wartości odchylenia standardowego 5 mm i medianie wynoszącej 4 mm. Milimetrowe wartości średnie statystyk z analiz 176



rozwiązań nie budzą zastrzeżeń co do jakości obserwacji i wyników obliczeń. Szczegółowa analiza rozwiązań uzyskanych dla poszczególnych punktów, dla których nader często występują różnice w stosunku do wartości średniej na poziomie kilkunastu milimetrów, wskazuje jednak na obciążenie wyników postprocessingu wpływem niekorzystnych warunków realizacji pomiaru satelitarne.



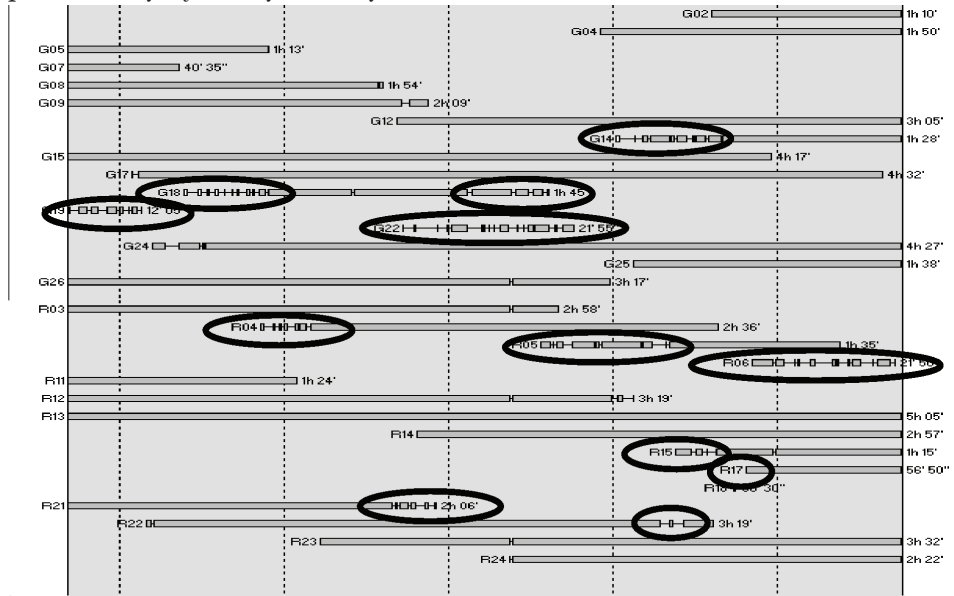
Rys. 3. Odcinek linii E30, którego pomiar punktów osnowy poddano analizie

W przypadku analizy zamknięć elementarnych pętli wektorów satelitarnych utworzonych przez trójki punktów, których program wygenerował 123, wyraźnie większe odchyłki występują w przypadku ich utworzenia z wektorów rozpiętych między punktami osnowy i nawiązujących je do stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS. Jednakże w takich przypadkach wartości względne niezamknięcia pętli podane w ppm (ang. **parts per milion**) nie odbiegają znacząco od wartości obliczonych dla pętli utworzonych tylko z relatywnie krótkich wektorów między punktami osnowy. Natomiast jedno z największych wartości odchyłek zamknięcia pętli uzyskano oczywiście dla pętli utworzonych z udziałem wspomnianego już punktu 92.835.

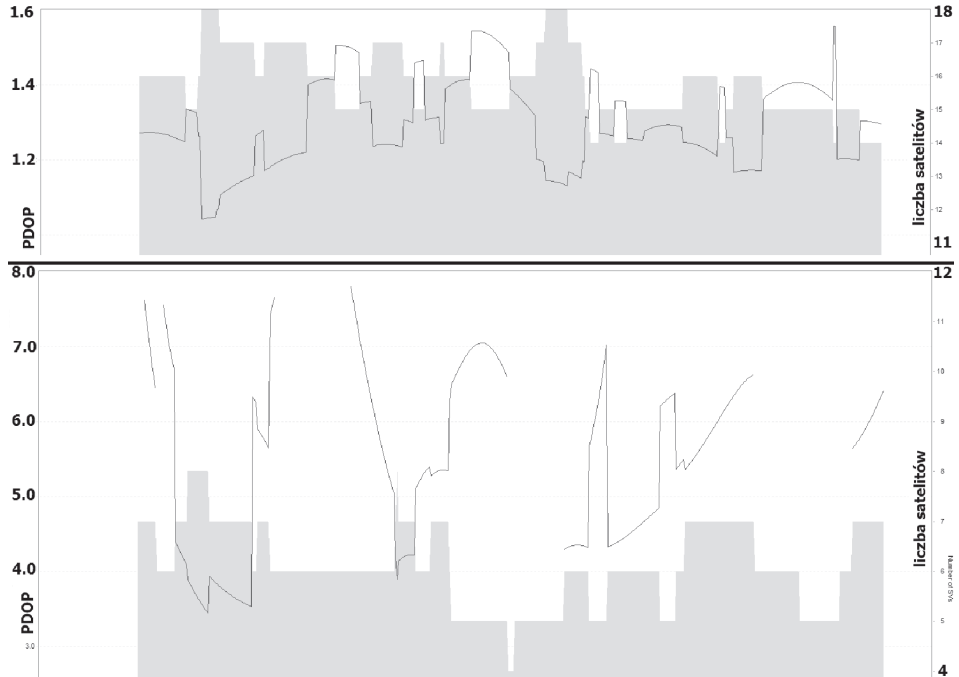
Odchyłki zamknięć pętli wektorów satelitarnych oraz różnice od średniej poszczególnych rozwiązań wektorów w postprocessingu dla danego punktu są efektami mierzalnymi, na które wpływ miały wysokie przesłonięcia horyzontu oraz zakłócenia sygnałów satelitarnych. Czynniki te można analizować m.in. graficznie, w celu próby usunięcia przyczyn pogorszenia wyników obliczeń. Poniższy rysunek przedstawia okno z widocznymi przerwami w odbiorze sygnałów satelitarnych przez odbiornik GNSS. Elipsami oznaczono interwały czasu dla sygnałów z poszczególnych satelitów, w których występowały okresowe, częste przerwy w odbiorze sygnałów z poszczególnych satelitów. Pojedynczych przerw, również widocznych na rysunku, nie oznaczano.

Zalecenia GUGiK [3] formułują wymóg realizacji pomiaru satelitarne przy wartościach PDOP (ang. Positional Dilution of Precision) mniejszych od 6. Przy przesłonięciach horyzontu wynoszących  $40^{\circ}$  wartości PDOP powyżej 6 przeważają w tym oknie czasowym. Natomiast wymóg standardu technicznego Ig-7 dotyczący rejestracji sygnałów z min. 4 satelitów został spełniony. O ile rys. 4 można analizować tylko a posteriori, o tyle rys. 5 można analizować a priori. Przedstawia on wpływ braku przesłonięć horyzontu (górze) oraz niekorzystnego horyzontu (dół) wokół punktu na wartość współczynnika PDOP. Wnioskiem jest konieczność poprawnego oszacowania wysokości przesłonięć horyzontu wokół tego punktu.

Umożliwia to wykonanie dobrego projektu pomiaru satelitarnego, który może być w opozycji do ekonomiczności pomiaru. W praktyce najczęściej aspekt ekonomii pomiaru zwycięża u wykonawcy.



Rys. 4. Przykładowe okno pomiaru punktu z wysokimi przesłonięciami horyzontu



Rys. 5. Wartość współczynnika PDOP (linia) na tle liczby satelitów (szare tło), u góry przesłonięcia horyzontu 10°, u dołu 40° (LGO)



## 5. Analiza wyrównania statycznego pomiaru satelitarne

Na wyniki wyrównania sieci liniowej wektorów satelitarnych użytkownik ma znacznie mniejszy zakres wpływu, niż w przypadku różnorodnych opcji post-processingu. Istnieje możliwość uwzględnienia błędności punktów nawiązania, ustalenia błędów centrowania i poziomu istotności dla testów statystycznych, wyrównywania tylko wektorów niezależnych, obliczania wartości odchyłeń standardowych wyrównanych współrzędnych punktów na wybranym poziomie ufności.

W tym etapie opracowania wyników pomiaru satelitarne należy wykonać dwa rodzaje wyrównania sieci liniowej. W pierwszym pomierzona sieć powinna być nawiązana do stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS przez minimalną liczbę warunków. W drugim wyrównaniu pomierzona sieć należy dowiązać do stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS, których np. wg Ig-7 powinno być minimum 3. Dzięki temu można ocenić jakie naprężenia w konstrukcji pomiarowej powodują dłuższe wektory nawiązania oraz dokładność współrzędnych stacji referencyjnych.

Niektóre z wektorów mogą zostać oznaczone przez program, jako obarczone błędami grubymi, gdyż wartość statystyk testowych została przekroczona. Można usunąć takie wektory z wyrównania, jeśli dysponuje się wektorami nadliczbowymi i sprawdzić ich wpływ na współrzędne wyrównane punktów. M.in. z tego powodu satelitarne pomiary osnów geodezyjnych powinny być realizowane minimum 3 odbiornikami satelitarnymi. Wpływ usuniętych wektorów na współrzędne wyrównane nie zawsze musi być istotny.

Standard techniczny Ig-7 wskazuje na wyrównywanie tylko wektorów niezależnych. Wyrównanie wszystkich pomierzonych wektorów wpływa istotnie na obniżenie wartości odchyłeń standardowych współrzędnych punktów do wartości nierealnych, często poniżej 1 mm. Jest to oczywisty mankament. Natomiast wyrównanie tylko wektorów niezależnych niestety nie musi oznaczać wiarygodnych wartości dla parametrów jakości wyników pomiaru, a pociąga za sobą rezygnację z badania wiarygodności wyników, eliminując możliwość zastosowania w tym celu teorii niezawodności.

Z tego powodu w analizowanym pomiarze zastosowano teorię niezawodności wg W.Baardy [1,2]. Obliczony wpływ ewentualnie niewykrytych błędów grubych na współrzędne wyrównane punktów nie przekroczył 8 mm, przy medianie wynoszącej 3 mm, co oznacza, że połowa wartości znalazła się w przedziale od 0 do 3 mm. W tabeli 1 zestawiono wyniki uzyskane dla punktu 92.835 w przypadku przeprowadzenia postprocessingu automatycznie oraz manualnie, z wykorzystaniem analizy informacji dostępnych w programie. Należy podkreślić, że wartości statystyk nie oznaczają wystąpienia takich błędów, a jedynie ich wpływ na współrzędne wyrównane w przypadku wystąpienia.

Tabela 1. Wpływ rodzaju postprocessingu na wartości statystyk obliczonych dla punktu 92.835

<i>Statystyka/postprocessing</i>	<i>Automatyczny</i>	<i>Manualny</i>
Wpływ niewykrytego błędu grubego na współrzędną $\varphi$	28 mm	1 mm
Wpływ niewykrytego błędu grubego na współrzędną $\lambda$	16 mm	2mm
Wpływ niewykrytego błędu grubego na wysokość $h$	54 mm	7 mm

Za poziom detekcji błędów grubych odpowiedzialna jest odrębna statystyka, która obliczana jest dla obserwacji indywidualnie. W takiej analizie obserwacjami będą składowe wektorów satelitarnych. Poziom detekcji błędów grubych w obserwacjach był dla analizowanego pomiaru bardzo mocno zróżnicowany i zawarł się w przedziale [4 mm – 57 mm]. Wartość średniej dla tej statystyki wynosząca 19 mm i mediany wynosząca 17 mm wskazują na relatywnie wysoki poziom niewykrywalnych przez testy statystyczne błędów w obserwacjach. Analiza innych pomiarów w tym względzie pozwala wnioskować, że przyczyną były przede wszystkim zakłócenia sygnałów satelitarnych.

W przypadku korzystania z teorii niezawodności dodatkowego znaczenia nabiera dwuwariantowe wyrównanie sieci wektorów satelitarnych. Dla pomiarów satelitarnych zrealizowanych w korzystnych warunkach topograficznych, w wariancie nawiązanym do stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS, poziom detekcji błędów w obserwacjach rośnie o rząd wielkości, osiągając zazwyczaj poziom rzędu 20 mm, czyli w opisywanym przypadku zbieżny z obliczonym dla pomiaru przeprowadzonego w niekorzystnych warunkach topograficznych.

W celach kontrolnych zrealizowano dla punktu 92.835 i kilku sąsiednich dodatkową czterogodzinną sesję oraz pomiar tachymetryczny. Szczególne znaczenie kontrolne dla pomiarów satelitarnych mają zawsze precyzyjne pomiary naziemne. Odległość między sąsiednimi punktami pomierzona precyzyjnym dalmierzem elektronicznym oraz obliczona z wyrównanych współrzędnych z pomiaru satelitarnego dla punktu 92.835 wyniosła 4,0 mm. Zazwyczaj otrzymywana zgodność była na poziomie 1 mm, sporadycznie sięgała 2 – 3 mm, ale zważywszy na warunki topograficzne tego punktu, wynik należy uznać za bardzo satysfakcjonujący.

## 6. Podsumowanie

Poprawne opracowanie wyników statycznego pomiaru satelitarnego jest zagadnieniem złożonym. W pracy akcent położono na analizę wyników statycznych pomiarów satelitarnych uzyskanych w niekorzystnych warunkach terenowych, tj. przy istotnych przesłonięciach horyzontu wokół punktów kolejowej podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej. Starano się przedstawić konkretny przypadek pomiaru kolejowej osnowy geodezyjnej, gdyż, jak to zostało wskazane także w niniejszej pracy (pkt. 4), posługiwanie się wartościami uśrednionymi często nie jest miarodajne. Na przykładzie jednego z punktów zwrócono uwagę na konsekwencje braku analizy materiału obserwacyjnego i/lub nie uwzględnienie wniosków z niego

płynących. Podobna sytuacja może wystąpić w przypadku braku lub złego projektu pomiarów satelitarnych nawet dla punktów o przeciętnym horyzoncie.

Uzyskanie wiarygodnych wyników z pomiarów satelitarnych wymaga wiedzy i doświadczenia. Natomiast sam fakt uzyskania wyniku może być możliwy nawet w przypadku bardzo nikłego przygotowania merytorycznego użytkownika. Z drugiej strony, niezależnie od przygotowania użytkownika, ocena wiarygodności otrzymanych wyników jest najtrudniejsza. Obliczane przez oprogramowanie parametry charakteryzujące jakość wyników pomiaru dotyczą jego precyzji i są często na poziomie 1 mm dla współrzędnych sytuacyjnych. Są to wartości najczęściej nie oddające zupełnie rzeczywistej jakości wyznaczonej pozycji punktu. Wspomniany w pracy przykład pomiaru kontrolnego, opisany szerzej w [7], jest bardzo charakterystyczny i miarodajny w tym względzie. Podobnie w przypadku pomiarów RTK GPS i RTN, precyzja wyniku wyświetlana na ekranie kontrolera najczęściej będzie odbiegała od jego rzeczywistej dokładności.

W analizie zamknięć pętli wektorów satelitarnych należy zwrócić uwagę, że są to konstrukcje przestrzenne, w których dominującym czynnikiem jest wpływ wyznaczenia wysokości. Interesujące zaś dla wykonawcy są w zasadzie współrzędne sytuacyjne, więc w analizie trzeba wziąć pod uwagę specyfikę wyniku.

Opcje dostępne w oprogramowaniu do opracowania obserwacji satelitarnych i ich umiejętne wykorzystanie mogą być bardzo pomocne w uzyskiwaniu wiarygodnych wyników obliczeń. W przypadku niekorzystnych warunków realizacji pomiaru satelitarnego dobór modeli refrakcji atmosferycznych może mieć relatywnie niewielkie znaczenie. Natomiast nie można nie uwzględnić w obliczeniach żadnego z modeli.

Bagatelizowanie przez wykonawców doboru lokalizacji punktów osnowy może nie być skompensowane przez odbiornik dwusystemowy. W analizowanym przypadku system GLONASS nie wspomógł znacząco systemu NAVSTAR GPS. Niekorzystny horyzont wokół punktów osnowy oraz zakłócenia sygnałów satelitarnych mogą być przyczyną subdecymetrowych błędów współrzędnych wyrównanych punktów. Dla niezawodności wyników pomiarów istotna jest liczba odbiorników, którymi realizowany jest pomiar osnowy.

Mimo problemów z oceną jakości wyników pomiarów satelitarnych, należy zwrócić uwagę, że w przypadku dobrego projektu pomiaru punktów osnowy i prawidłowego opracowania statycznych obserwacji satelitarnych możliwe jest uzyskanie dokładności współrzędnych wyrównanych na poziomie pojedynczych milimetrów. W dotychczasowej praktyce pomiarów na terenach kolejowych zdarzyły się 3 różne przypadki wykonania powtórnego pomiaru punktu kolejowej podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej w odstępie nawet 15 miesięcy. Z całkowicie niezależnych opracowań otrzymano różnice wyników dla współrzędnych sytuacyjnych: 1 mm dla dwóch punktów o odkrytym horyzoncie oraz 8 mm dla jednego punktu zlokalizowanego pośród wysokiego lasu z przesłonięciami horyzontu na poziomie  $45^{\circ}$ . W każdym z przypadków wykonano kontrolę precyzyjnym tachymetrem elektronicznym, otrzymując zgodność pomierzonej odległości z obliczoną

długością wektora satelitarnego odpowiednio na poziomie 1 mm i 3 mm w terenie zalesionym.

Pośrednim potwierdzeniem możliwości uzyskania wysokiej dokładności współrzędnych punktów osnowy z pomiarów satelitarnych są wyniki tzw. wcięć wstecz do znaków regulacji osi toru, dla których podstawą wyznaczenia współrzędnych są punkty podstawowej poziomej osnowy geodezyjnej. Obliczone w ten sposób błędy stanowiska instrumentu często są na poziomie 1 mm.

## Bibliografia

1. Baarda W., *Statistical concepts in geodesy*, Publication on Geodesy, New Series, Netherlands Geodetic Commission, vol. 2, No 4, Delft, 1967.
2. Baarda W., *A testing procedure for use in geodetic networks*, Publication on Geodesy, New Series, Netherlands Geodetic Commission, vol. 2, No 5, Delft, 1968.
3. Główny Geodeta Kraju, *Zalecenia techniczne: Pomiarы satelitarne GNSS oparte na systemie stacji referencyjnych ASG-EUPOS*, Warszawa 2011.
4. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., *Standard techniczny określający zasady i dokładności pomiarów geodezyjnych dla zakładania wielofunkcyjnych znaków regulacji osi toru Ig-7. Załącznik do zarządzenia Nr 27/2012 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 19 listopada 2012r.*
5. *Rozporządzenie Ministra Administracji i Cyfryzacji z dn. 14.02.2012r. w sprawie osnow geodezyjnych, grawimetrycznych i magnetycznych* (Dz. U. 2012 poz. 352).
6. Uznański A., *Niezawodność pomiarów geodezyjnych w zintegrowanej osnowie kolejowej*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej, Oddział w Krakowie, z. 154, Kraków 2010.
7. Uznański A., *Kolejowa osnowa geodezyjna – przepisy oraz praktyka pomiarowa. Drogi Kolejowe*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej, Oddział w Krakowie, Nr 2 (101), Kraków 2013.