

Mobilne pomiary satelitarne na liniach Pomorskiej Kolei Metropolitalnej

Mobile satellite measurements on the Pomeranian Metropolitan Railway



Cezary Specht

prof. dr hab. inż.

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Geodezji i Oceanografii



Paweł Dąbrowski

mgr inż.
Akademia Morska w Gdyni, Katedra Geodezji i Oceanografii; Woj. Biuro Geodez. i Terenów Rolnych w Gdańsku



Mariusz Specht

inż.

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Geodezji i Oceanografii



Władysław Koc

prof. dr hab. inż.

Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów



Piotr Chrostowski

dr inż.

Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów



Jacek Szmagliński

mgr inż.

Politechnika Gdańska, Katedra Transportu Szynowego i Mostów



Marcin Dera

inż.

Budimex S.A. w Gdańsku



Marcin Skóra

mgr inż.

Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej

Streszczenie: W pracy przedstawiono organizację i wykonanie mobilnych pomiarów satelitarnych torów kolejowych, przeprowadzonych na liniach Pomorskiej Kolei Metropolitalnej przed oficjalnym oddaniem do eksploatacji. Pomiary te umożliwiły dokładne odtworzenie rzeczywistego kształtu geometrycznego torów. Opisano zagadnienia projektowania i budowy omawianej linii kolejowej oraz prace geodezyjne przy realizacji inwestycji. W analizie wyników przeprowadzonych pomiarów podjęto kwestie transformacji pomierzonych punktów do układu Gdańsk '70, powtarzalności pomiarów oraz porównania pomierzonego przebiegu trasy z przebiegiem projektowanym.

Słowa kluczowe: Tor kolejowy; Pomiary satelitarne; Weryfikacja rzędnych poziomych

Abstract: This paper presents the process of organization and execution of the mobile satellite measurements conducted on the tracks of the Pomeranian Metropolitan Railway before officially entry the line into operation. These measurements allowed for the accurate identification of the actual geometric shape of the line. In the paper the issues of both design and construction phase of this railway line has been described. Moreover, the geodetic works during implementation of the investment has been introduced. The analysis of the surveying results was focused on the issues like transformation the measured data to the local system of coordinates called Gdańsk '70, repeatability of measurement's results and comparison of measured route with the designed geometrical layout.

Keywords: Railway track; Satellite measurements; Verification of horizontal coordinates

W dniu 1 maja 1914 roku została oddana do eksploatacji jednotorowa linia kolejowa z Gdańska Wrzeszcza do Starej Piły, stacji położonej na linii Pruszcz Gdański – Kartuzy. Ta tzw. „kolej k Koszkowska” stworzyła możliwość bezpośredniego dojazdu z Dolnego Tarasu Gdańska na Wysoczyznę Kaszubską. Z uwagi na znaczne pochylenia, zdecydowano się wówczas skierować do jej obsługi parowozu Tkt2, stosowane później również na trasach górskich (m.in. Chabówka – Zakopane).

Historia tej linii była skomplikowana [2]. Po I Wojnie Światowej przecięła ją granica pomiędzy odrodzonym

Państwem Polskim i Wolnym Miastem Gdańsk. Pod koniec II Wojny Światowej uległa zniszczeniu i już jej nie odbudowano. W 1994 roku Polskie Koleje Państwowe przekazały do Skarbu Państwa działki, przez które przebiegała omawiana linia kolejowa. W 2003 roku sprzedano tereny funkcjonującego przez wiele lat poligonu wojskowego i zamknięta została baza CPN w Kiełpinku.

Wiek XXI rozpoczął się od intensywnych samorządowych inwestycji drogowych w rejonie Gdańska. Pozwalały na to dofinansowania z funduszy Unii Europejskiej. Prowadzono prace w ramach budowy Trasy Słowackiego,

Trasy Sucharskiego, Drogi Zielonej, południowej obwodnicy Gdańska i trasy W-Z. Inwestowano również w komunikację publiczną, m.in. przez budowę nowych linii tramwajowych na Chełm, Łostowice i Piecki-Migowo, remonty istniejących torowisk oraz zakup nowego taboru autobusowego i tramwajowego. Wszystko to miało na celu zwiększenie przepustowości układu drogowego i zachęcenie mieszkańców do korzystania z komunikacji miejskiej. Nie uzyskano jednak w tym zakresie pełnego powodzenia i wówczas powróciła idea wykorzystania rezerwy terenowej po zlikwidowanej linii kole-

jowej z Gdańska Wrzeszcza w kierunku Obwodnicy Trójmiasta.

Budowa Pomorskiej Kolei Metropolitalnej

W 2007 roku Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa w Warszawie wykonało na zlecenie PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., przy wsparciu finansowym Urzędu Marszałkowskiego Województwa Pomorskiego (UMWP), wstępne studium wykonalności. Po jego uzyskaniu spółka PKP PLK oświadczyła, że nie jest zainteresowana budową nowej linii kolejowej, dlatego zadanie to mogło być realizowane tylko przez UMWP. Władze Gdańska, początkowo sceptycznie nastawione do pomysłu – w związku z innymi planami zabudowy terenów po dawnej kolei, ostatecznie wsparły działania samorządowych władz wojewódzkich. Inwestycja została wpisana na listę projektów powiązanych z Mistrzostwami Europy w piłce nożnej organizowanymi w Polsce w 2012 roku.

W 2010 roku powstała spółka celowa Pomorska Kolej Metropolitalna S.A., której zadaniem miało być wybudowanie nowej linii kolejowej. Rok później, na podstawie koncepcji programowo-przestrzennej, studium wykonalności oraz analiz środowiskowych, Zarząd Województwa Pomorskiego wybrał ostateczny przebieg nowej linii. Wyłoniono również w przetargu wykonawcę dokumentacji projektowej, którym został Transprojekt Gdański Sp. z o.o.

Trasę Pomorskiej Kolei Metropolitalnej można podzielić na dwie części. Pierwszy, 10-kilometrowy odcinek, przebiegający śladem zlikwidowanej po wojnie Kolei Kokoszkowskiej, rozpoczyna się odejściem od magistrali kolejowej E65 w okolicach przystanku Szybkiej Kolei Miejskiej Gdańsk Zaspą i kończy na wysokości Obwodnicy Trójmiasta. W tym miejscu zaczyna się drugi, nowo zaprojektowany odcinek, który odchodzi od starego śladu linii w kierunku północnym i przebiega aż do włączenia w linię kolejową nr 201 w Rębiechowie.

Inwestycję podzielono na następujące zadania:

- zadanie 1ab: budowa linii PKM na odcinku Port Lotniczy – włączenie w linię kolejową 201 (inwestycja finansowana przez UMWP, prowadzona przez spółkę PKM),
- zadanie 1c: przebudowa linii 201 na odcinku wyłączeniowym torów PKM (inwestycja PKP PLK S.A.),
- zadanie 2: budowa linii kolejowej na odcinku Port Lotniczy – włączenie w stację Gdańsk Wrzeszcz (inwestycja UMWP, prowadzona przez spółkę PKM),
- przebudowa stacji Gdańsk Wrzeszcz w ramach modernizacji linii E-65 Warszawa – Gdynia (inwestycja PKP PLK S.A.), wykonana na podstawie zmienionego – na zlecenie spółki PKM – projektu przebudowy stacji Gdańsk Wrzeszcz, w celu dostosowania projektowanego układu torowego i peronowego do przyjęcia pociągów poruszających się po linii PKM.

Ostatecznie nie zbudowano linii na turniej Euro 2012. Przetarg na wyłonienie generalnego wykonawcy całej linii rozstrzygnięto w marcu 2013 roku, a umowę na roboty budowlane z konsorcjum firm Budimex S.A. & Ferrovial Agroman podpisano w dniu 7.05.2013 roku. Konsorcjum stało się odpowiedzialne za wybudowanie linii PKM w ramach zadania 1ab oraz zadania 2.

Infrastruktura linii PKM charakteryzuje się zastosowaniem rozwiązań niespotykanych dotychczas na polskich torach, które stanowią:

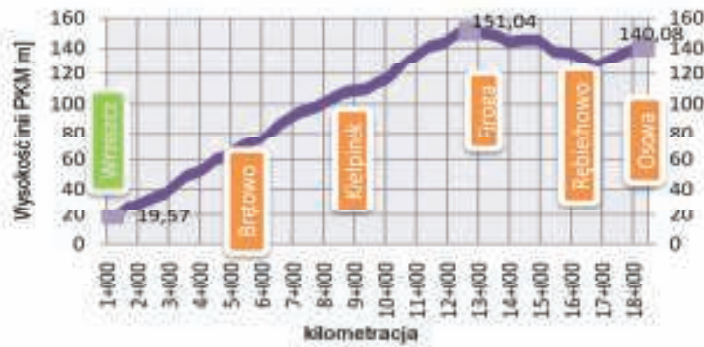
- przytwierdzenie W14,
- rozjazdy łukowe R760,
- przyrządy wyrównawcze łukowe o przesuwie do 350 mm,
- ścianki peronowe ze stopniem uławiającym wejście z toru.

W ramach realizowanej inwestycji w ciągu dwóch lat wybudowano od podstaw 18 km dwutorowej linii kolejowej oraz 1,3 km jednotorowej łącznicy. Na trasie powstało 8 przystanków, z których większość pełnić będzie funkcję lokalnych węzłów integracyjnych. Wbudowano 23 rozjazdy, z cze-

go 5 to rozjazdy o promieniu 1200 m umożliwiające przejazd na kierunku zwrotnym z prędkością 100 km/h, a 2 są rozjazdami łukowymi z ruchomym dziobem krzyżownicy (powstałymi w wyniku wyłukowania rozjazdu podstawowego Rz 1200 1:18,5). Tory Pomorskiej Kolei Metropolitalnej zostały wykonane jako bezстыkowe z szyn 49E1 na podkładach strunobetonowych PS-93 z przytwierdzeniem Vossloh W-14, na podsypce tłuczniowej klasy I o grubości min. 30 cm. Warstwa ochronna torowiska została wykonana z niesortu kamiennego 0/31,5 o miąższości 15 cm oraz warstwy gruntu stabilizowanego cementem $R_m = 1,5$ MPa o miąższości min. 20 cm. Na 4 obiektach mostowych nawierzchnię kolejową wykonano w formie toru bezpodsypkowego – szyny z przytwierdzeniem Vossloh DFF21 [16] na wylewanych „na mokro” żelbetonowych blokach. Na długości łuków o promieniach mniejszych od $R = 450$ m oraz na odcinkach o dużym pochyleniu położonych w rejonie hamowania i przyspieszenia pociągów wykonane zostało zagęszczenie podkładów do rozstawu 55 cm oraz poszerzenie przyzmy tłucznia do 55 cm od czoła podkładu po zewnętrznej stronie łuku.

Obowiązująca na linii prędkość konstrukcyjna wynosi 120 km/h dla pociągów pasażerskich oraz 80 km/h dla pociągów towarowych, z lokalnymi ograniczeniami. W związku z budową linii powstały 4 nowe posterunki ruchu (posterunki odgałęźne Brętowo i Kiełpiniek, posterunek bocznicy Firoga oraz stacja Gdańsk Rębiechowo), a 2 skrajne stacje (Gdańsk Wrzeszcz i Gdańsk Osowa) powiększyły swój zasięg.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że różnica poziomów pomiędzy najniższym i najwyższym punktem niwelety torów PKM wynosi 131,47 m (rys. 1). Przekłada się to na średnie pochylenie o wartości 11,5‰. Na odcinku Gdańsk Wrzeszcz – Firoga (ok. 12 km) występuje jednostajny spadek w kierunku malejącego kilometrażu, a największe pochylenie podłużne toru o wartości 32 ‰ występuje w rejonie wjazdu torem nr 2 na stację Gdańsk Wrzeszcz. Z uwagi na przewidywane duże obciążenie ruchem, w łuku o promieniu 440 m na



1. Profil podłużny linii PKM (podany w m n.p.m.)

wjeździe do Wrzeszcza, w celu ograniczenia hałasu emitowanego przez przejeżdżający tabor oraz zużycia szyn, zamontowano bezobsługowe smarownice szyn firmy Railtech Papla.

W związku z wymaganiami dyrektywy unijnej linię dostosowano do Europejskiego Systemu Zarządzania Ruchem Kolejowym (ERTMS) poprzez zabudowę komplementarnych systemów łączności bezprzewodowej GSMR oraz systemu sterowania ruchem ETCS. Infrastruktura ETCS zabudowana na linii PKM to poziom 2, co pozwoli w przyszłości na jednoczesny ruch 9÷12 pociągów w każdym kierunku. Ponieważ dyżurni ruchu PKM nie zostali wyposażeni w tradycyjny polski system radiołączności kolejowej – łączność w zakresie fal ultrakrótkich na częstotliwości 150 MHz, powoduje to pewne problemy. Przykładowo, pojazdy niewyposażone w nadal rzadko stosowaną w Polsce telefonię GSMR nie powinny poruszać się po torach PKM z uwagi na brak możliwości skontaktowania się z dyżurnym ruchu.

Prace geodezyjne przy realizacji inwestycji

Prace geodezyjne przy projekcie Pomorskiej Kolei Metropolitalnej rozpoczęto w 2010 roku. Z ramienia Zarządu Województwa Pomorskiego ich wykonawcą było Wojewódzkie Biuro Geodezji i Terenów Rolnych w Gdańsku. Z kolei główny wykonawca prac budowlanych powierzył obowiązujące go prace geodezyjne odrębnej jednostce.

Zakres opracowania map do celów projektowych obejmował obszar planowanej inwestycji z kołnierzem około 30 m. Z powodu znacznych różnic

treści mapy zasadniczej od sytuacji faktycznej w terenie zdecydowano o przeprowadzeniu nowego pomiaru sytuacyjno-wysokościowego. Sporządzona dokumentacja stanowiła jeden z elementów niezbędnych do sporządzenia projektu budowlanego.

Drugim istotnym przedmiotem wstępnych prac było uregulowanie stanu prawnego nieruchomości znajdujących się w pasie planowanej inwestycji. Pomorska Kolej Metropolitalna stanowiła jedno z przedsięwzięć realizowanych dla potrzeb EURO 2012. Zasady przygotowania turnieju, w szczególności warunki realizacji przedsięwzięć niezbędnych do jego przeprowadzenia, zostały określone w ustawie [15]. W tym celu przeprowadzono inwentaryzację osnowy geodezyjnej znajdującej się w jej bezpośrednim sąsiedztwie. Wytypowano 22 punkty do pomiaru satelitarnego, stanowiące POK (Podstawową Osnowę Kolejową) [1]. Stwierdzono konieczność uzupełnienia i zagęszczenia sieci. Odszukano punkty osnowy podstawowej bazowej, które posłużyły w dalszych etapach prac jako punkty nawiązania. Po sporządzeniu projektu sieci przystąpiono do stabilizacji punktów osnowy. Niemal wszystkie punkty szczegółowej poziomej osnowy geodezyjnej zostały zastabilizowane dwupoziomowo. Jako znaki podziemne zastosowano płytki betonowe, a jako znaki naziemne użyto słupów betonowych ze stalowym trzpieniem (rys. 2)

Do pomiaru wykorzystano dwuczęstotliwościowe odbiorniki GNSS, które w godzinnych sesjach pomiarowych rejestrowały obserwacje satelitarne. W systemie ASG-EUPOS wygenerowano obserwacje dla wirtualnych stacji re-



2. Znak regulacji osi toru Pomorskiej Kolei Metropolitalnej (zdj. Paweł Dąbrowski)

ferencyjnych. Pobrano dane z najbliższych fizycznych stacji referencyjnych. Po obliczeniu wektorów wyrównano sieć metodą najmniejszych kwadratów i uzyskano współrzędne kartezyjskie w systemie odniesienia WGS 84 [10]. Kolejnym etapem była transformacja współrzędnych do państwowego systemu odniesień przestrzennych w postaci układu współrzędnych płaskich prostokątnych PL-2000 [9]. Punkty osnowy podstawowej bazowej, z racji posiadanych współrzędnych w układzie PL-2000 oraz w układzie lokalnym Gdańsk '70, posłużyły jako punkty dostosowania w konforemnej transformacji płaskiej. Uzyskano błędy wyznaczenia współrzędnych płaskich nie przekraczające 0,01 m w układzie PL-2000 oraz 0,04 m w układzie lokalnym Gdańsk '70. Założono łącznie 88 punktów szczegółowej poziomej osnowy geodezyjnej. W bezpośrednim sąsiedztwie inwestycji zastabilizowano 28 reperów ściennych i ziemnych oraz poprowadzono ciągi precyzyjnej niwelacji geometrycznej. Pomiarom wysokościowym objęto również większość punktów nowo założonej szczegółowej poziomej osnowy geodezyjnej. Dane obserwacyjne wyrównano metodą najmniejszych kwadratów i uzyskano średnie błędy pomiaru nie przekraczające 2 mm/km. Osnowa pozioma i wysokościowa zostały przekazane wykonawcy prac budowlanych.

Do inwentaryzacji pozostałej starej infrastruktury wykorzystano technolo-



3. Wyburzony wiadukt im. Weisera Dawidka (po lewej) oraz nowo wybudowana kładka dla pieszych w okolicach ul. Gomółki w Gdańsku Wrzeszczu (zdj. Paweł Dąbrowski)

gię naziemnego skaningu laserowego. Pomiarom objęto łącznie 15 obiektów: 5 wiaduktów kolejowych, 1 tunel drogowy, 1 wiadukt drogowy, 3 kładki dla pieszych oraz 5 przejść pod torami. Do pomiaru wykorzystano impulsowy skaner laserowy Leica ScanStation C10. Wyniki pomiarów opracowano w oprogramowaniu Leica Cyclone. Wojewódzkiemu konserwatorowi zabytków przekazano sporządzoną dokumentację architektoniczną. Na rysunku 3 pokazano przykładową dokumentację fotograficzną zawierającą istniejący wiadukt przed wyburzeniem oraz wybudowany w tym samym miejscu nowy obiekt.

W oparciu o osnowę realizacyjną wykonana została geodezyjna obsługa inwestycji. Po zakończeniu prac budowlanych przeprowadzono powykonawczy pomiar inwentaryzacyjny, którego dokumentacja była niezbędna do odbioru budowy.

Nowe elementy infrastruktury kolejowej, takie jak wiadukty kolejowe i drogowy, przystanki, kładki dla pieszych itp. objęte są obowiązkiem cyklicznego monitoringu (kontroli) ich położenia. W tym celu w ścianach konstrukcyjnych obiektów zostały zamontowane repery (stalowe bolce). Po zakończeniu prac budowlanych wykonany został tzw. pomiar zerowy, w wyniku którego z dużą dokładnością zostały wyznaczone współrzędne punktów kontrolnych. Po upływie wskazanego w przepisach okresu czasu pomiar jest powtarzany. Uzyskane wyniki pomiaru porównywane są z pierwotnymi. W ten sposób określone są wartości osiadań poszczególnych komponentów obiektów budowlanych.

Na mocy decyzji Ministra Infrastruktury i Rozwoju obszar Pomorskiej Kolei

Metropolitalnej ustanowiony został terenem zamkniętym. Termin ten definiowany jest w ustawie [14] jako teren o charakterze zastrzeżonym ze względu na obronność i bezpieczeństwo państwa. Ze zmianą statusu terenu wiązała się również konieczność utworzenia, odrębnego od powiatowego, Kolejowego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej Pomorskiej Kolei Metropolitalnej (KODGiK PKM). Ośrodek gromadzi opracowania i materiały geodezyjne właściwe dla zastrzeżonego sobie terenu.

Organizacja i wykonanie pomiarów satelitarnych na liniach PKM

Technika mobilnych pomiarów satelitarnych, rozwijana od 2009 roku przez interdyscyplinarny zespół naukowy Politechniki Gdańskiej i Akademii Morskiej w Gdyni, była prezentowana m. in. w pracach [3, 4, 11, 12, 13]. Pierwsze pomiary inwentaryzacyjne wykorzystywały polską aktywną sieć geodezyjną ASG-EUPOS. W kolejnych zastosowano rozwiązanie dwusystemowe (GPS/Glonass), co okazało się rozwiązaniem właściwym i spowodowało znaczący wzrost wskaźników dostępności dla trzech przyjętych poziomów dokładności (10 cm, 3 cm i 1 cm).

Jednakże prowadzone w latach 2009-2014 pomiary wykazały na istnienie bariery, ograniczającej stosowanie rozwijanej przez lata metodyki. Jej zasadniczymi mankamentami są: niemożność zwiększenia dostępności wyznaczeń dla dokładności określenia współrzędnych pozycji poniżej 1 cm, uzyskiwanie dostępności na poziomie powyżej 90 % dla błędu pomiaru wynoszącego 3 cm wydaje się w praktyce niemożliwe, co dotyczy również możli-

wości przekroczenia dostępności 50 % wyznaczenia wysokości dla poziomu 1 cm. W tej sytuacji zespół badawczy stanął przed koniecznością poszukiwania alternatywnych metod realizacji pomiarów, które umożliwiałyby zwiększenie dostępności wysoko dokładnych wyznaczeń GNSS odniesionych do poziomów 1 cm oraz 3 cm.

Z tego też względu weryfikacji uległa również strategia prowadzonych badań. Nową strategię zdecydowano się oprzeć na dwóch elementach:

- wykorzystaniu systemu INS do wspomaganie pozycjonowania,
- wykorzystaniu, poza systemami GPS i Glonass, dodatkowych satelitów systemu Beidou w procesie określenia pozycji.

Przeprowadzenie pomiarów inwentaryzacyjnych linii Pomorskiej Kolei Metropolitalnej umożliwiła firma Budimex S.A. Zastosowano tutaj po raz pierwszy wspomaganie pomiarów systemem inercyjnym, który pozwalał na co najmniej kilkusekundowe utrzymanie wysoko dokładnej pozycji w przypadku znacznego spadku liczby dostępnych satelitów (np. w terenie zabudowanym lub zalesionym).

W dniach 10 i 26 czerwca 2015 roku zespół zrealizował na tej linii dwie kampanie pomiarowe. Pierwszą z kampanii (w dniu 10 czerwca 2015 roku) wykonał zespół czterech uczelni (Akademia Morska w Gdyni, Politechnika Gdańska, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni i Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie) oraz firma Geotronics. Zrealizowano geodezyjne pomiary inwentaryzacyjne na trasie Gdańsk Lotnisko – Gdańsk Wrzeszcz. W pomiarach wykorzystano 7 odbiorników GNSS (Trimble R10, Leica GS15, Topcon Hiper Pro, Septentrio), których wyznaczenia wspomaganie układami inercyjnymi. Kolejne pomiary – obejmujące całą linię PKM - zrealizowano w dniu 26 czerwca 2015 roku (już bez udziału UWM Olsztyn). Tym razem przejazd pomiarowy wykonano z użyciem dwóch odbiorników GNSS: Leica GS 15 oraz Trimble R10.

Pozyksane w dniu 26 czerwca 2015

roku (w godzinach 16.28÷19.54) dane pomiarowe (fix rate 20 Hz, 244695 fixes) opracowano zgodnie z odpowiednimi procedurami. W tab. 1 przedstawiono zbiorcze zestawienie uzyskanych rezultatów.

Analizując wyniki badań stwierdzono, że zastosowanie odbiornika ze wspomaganie systemem INS oraz zwiększenie liczby dostępnych satelitów spowodowało wzrost dostępności dla wszystkich trzech poziomów dokładności. Można w zasadzie uznać, że wszystkie 3 miary (availability, reliability and continuity) dla poziomów 3 cm oraz 100 cm są bliskie 100 %. Natomiast dla poziomu dokładności 1 cm wzrost dostępności w płaszczyźnie horyzontalnej jest bardzo wysoki (31,28 %), podobnie jest ze wzrostem dostępności w płaszczyźnie wertykalnej (1D) – 31.34 %. Nie ulega wątpliwości, że prowadzone przez zespół od szeregu lat badania posiadają perspektywę ciągłego zwiększania uzyskiwanej dokładności.

Wstępna analiza wyników przeprowadzonych badań

Charakterystyka odcinka poddanego analizie

Odcinek poddany analizie ma długość 3,5 km i na długości 900 m przebiega po estakadzie wzdłuż gdańskiego Portu Lotniczego. Na długości wiaduktu zlokalizowany jest przystanek osobowy Gdańsk Port Lotniczy o peronach w formie wspornikowych płyt zakotwionych do płyty obiektu. Na estakadzie ułożona jest nawierzchnia bezpodsykowa. Od km 15+050 linia przebiega na nasypie, a tory wykonane są jako klasyczna nawierzchnia tłuczniowa. W km 15+500 rozpoczyna się stacja Gdańsk Rębiechowo, na której w km 16+450 odgałęzia się od toru nr 2 jednotorowa łącznica, stanowiąca linię nr 253. W km 16+500 rozpoczyna się długi łuk z przechyłką 150 mm, który wyprowadza linię na północ w kierunku stacji Gdańsk Osowa. Promienie łuków kołowych są następujące: 499,35 m, 2024,8 m, 1000 m i 640 m.

Tab. 1. Wartości wybranych parametrów dokładnościowych dla odbiorników GNSS podczas kampanii pomiarowej Gdańsk PKM 2015

| Parametr pozycji | Bez systemu inercyjnego | | | Z systemem inercyjnym | | |
|--|----------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|----------|----------|
| | 3D | 3D | 2D | 1D | 2D | 1D |
| Systemy | GPS / Glonass | | | GPS / Glonass / Beidou | | |
| Typ terenu | Miasto 500.000 mieszkańców | | | Miasto 500.000 mieszkańców | | |
| MTBF dla U < 1 cm | 2.06 s | 35.44 s | 7.183 s | 7.2 s | 75.93 s | 19.48 s |
| Dostępność dla U < 1 cm | 0.16 % | 56.75 % | 6.88 % | 1.22 % | 88.03 % | 38.31 % |
| Niezawodność dla U < 1 cm oraz $\tau = 300$ s | 3.762x10 ⁻⁴ | 52.15 % | 4.53 % | 0.80 % | 84.62 % | 32.85 % |
| Ciągłość dla U < 1 cm oraz $\tau = 300$ s | 23.36 % | 91.88 % | 65.86 % | 65.92 % | 96.12 % | 85.73 % |
| MTBF dla U < 3 cm | 134.90 s | 1.422x10 ³ s | 202.12 s | 226.89 s | All time | 357.11 s |
| Dostępność dla U < 3 cm | 76.52 % | 83.15 % | 79.97 % | 98.29 % | 100 % | 99.49 % |
| Niezawodność dla U < 3 cm oraz $\tau = 300$ s | 74.83 % | 82.97 % | 78.30 % | 97.00 % | 100 % | 98.65 % |
| Ciągłość dla U < 3 cm oraz $\tau = 300$ s | 97.80 % | 99.78 % | 98.52 % | 98.68 % | 100 % | 99.16 % |
| MTBF dla U < 10 cm | 3.235x10 ³ | 4.859x10 ³ s | 2.333x10 ³ | All time | All time | All time |
| Dostępność dla U < 10 cm | 84.62 % | 85.39 % | 84.86 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| Niezawodność dla U < 10 cm oraz $\tau = 300$ s | 84.54 % | 85.34 % | 84.47 % | 100 % | 100 % | 100 % |
| Ciągłość dla U < 10 cm oraz $\tau = 300$ s | 99.90 % | 99.93 % | 99.87 % | 100 % | 100 % | 100 % |

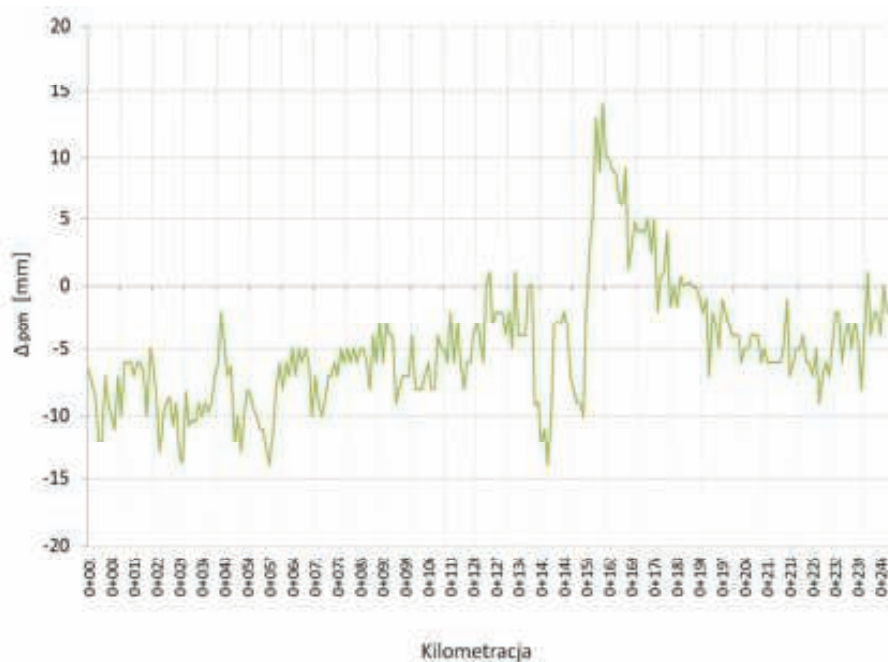
Transformacja pomierzonych punktów do układu Gdańsk '70

Projekt Pomorskiej Kolei Metropolitalnej wykonany został na mapach do projektowania w układzie lokalnym Gdańsk '70. Natomiast w wyniku pomiarów satelitarnych współrzędne wybudowanych torów linii PKM zostały określone w państwowym systemie odniesień przestrzennych przy pomocy odwzorowania elipsoidalnego WGS 84. Aby móc porównywać współrzędne projektowe z wynikami pomiarów, konieczna była transformacja punktów pomiarowych do układu lokalnego Gdańsk '70.

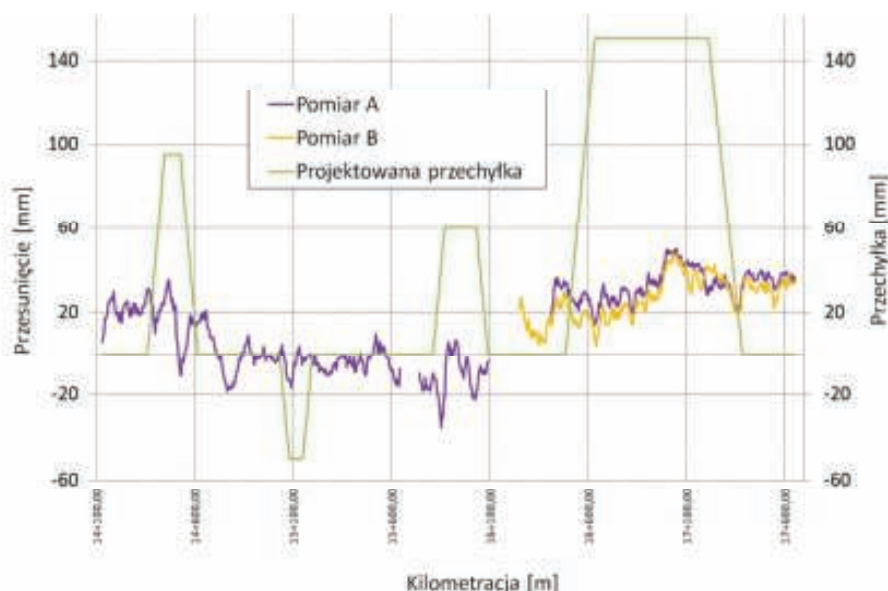
Do transformacji współrzędnych punktów pomiarowych wykorzystano oprogramowanie C-GEO [6]. Na potrzeby niniejszej pracy przeprowadzono najpierw analizę dokładności wykonywanej w C-GEO transformacji bez podania punktów dostosowania. Wykorzystano punkty osnowy geodezyjnej o znanych w układzie Gdańsk '70 współrzędnych, na których przeprowadzono statyczne pomiary GNSS w celu wyznaczenia ich współrzędnych w układzie 2000. Jak się okazało, różnice pomiędzy współrzędnymi tych samych punktów wyznaczonych na

drodze pomiaru i obliczonych w wyniku transformacji są znaczne i dochodzą w skrajnym przypadku do 67 mm.

Z tego powodu postanowiono przeprowadzić transformację na podstawie punktów dostosowania zlokalizowanych wzdłuż trasy PKM. Punkty te były już raz użyte w tym samym celu – podczas transformacji do układu Gdańsk '70 kolejowej osnowy podstawowej utworzonej na potrzeby realizacji PKM. Stanowią one punkty osnowy geodezyjnej o znanych w układzie Gdańsk '70 współrzędnych, przekazanej wykonawcy budowy PKM przez zamawiającego. Na tychże punktach wykonano statyczne obserwacje GNSS i wyznaczono ich współrzędne w układzie 2000. Uzyskano większą dokładność przekształcenia niż przy transformacji bez punktów dostosowania – w najmniej korzystnym przypadku błąd transformacji wyniósł 4 cm. Zastosowanie transformacji z punktami dostosowania pozwala zatem na poprawę sytuacji, przy założeniu że transformowane punkty są zlokalizowane w sąsiedztwie punktów dostosowania. Przy zastosowaniu przedstawionej procedury w programie C-GEO do układu Gdańsk '70 zostały przetransformowane wszystkie (tj. około 205 tysięcy) punkty pomiarowe.



4. Analiza powtarzalności pomiaru dla toru nr 1



5. Wykresy przesunięć dla toru nr 1

Ocena powtarzalności pomiarów

Analizę powtarzalności pomiarów przeprowadzono na odcinkach, które były pomierzone dwukrotnie. Przyjęta metoda polega na zobrazowaniu na wykresie wskaźnika różnicy pomiędzy układami: pomierzonym i zaprojektowanym, uzyskany w pomiarze A oraz pomiarze B dla każdego z torów. Różnice te wyznaczone za pomocą programu Bentley Power Rail Track [5], w którym zaprojektowano układ geometryczny linii PKM. Analiza porównawcza przebiegała w następujących etapach:

- wprowadzenie pomierzonych satelitarne punktów osi toru do programu Power Rail Track (po transformacji ich współrzędnych do układu Gdańsk'70),
- utworzenie linii łamanej łączącej punkty pomiarowe,
- obliczenie odległości pomiędzy utworzoną linią łamaną a zaprojektowanym w układzie Gdańsk'70 układem geometrycznym (z założonym 5-metrowym krokiem).

Wyznaczone odległości są określane dalej mianem „przesunięć”. Wskaźnikiem oceny jest różnica pomiędzy przesunięciami z pomiarów A i B, ozna-

czona jako Δ_{pom} . W przypadku toru nr 1 (rys. 4) widać, że wskaźnik Δ_{pom} oscyluje w granicach 10 mm, jedynie na odcinkach km 16+500 ÷ 16+700 oraz km 17+100 ÷ 17+250 spada. W pierwszej z tych dwóch lokalizacji tor przebiega wzdłuż przesłony terenu w postaci tzw. „zielonego ekranu”, w drugiej natomiast jest położony w łuku z bardzo dużą przechyłką i w głębokim wykopie – wszystkie te elementy skutkują ograniczeniem widzialnej wysokości topocentrycznej. W obu przypadkach spadek wskaźnika Δ_{pom} związany jest ze zmniejszeniem liczby obserwowanych satelitów z uwagi na przesłony terenowe. Istotny wpływ na trajektorię ruchu może mieć również sposób prowadzenia wózków z antenami – podczas przejazdu pomiarowego A wózki z antenami były przez dreżynę pchane, natomiast podczas pomiaru B ciągnięte. Jak stwierdzono, podobnie spostrzeżenia odnoszą się również do sytuacji w torze nr 2.

Porównanie pomierzonego przebiegu trasy z przebiegiem projektowanym

Analizie poddano następujące przejazdy pomiarowe:

- pomiar A toru nr 1 na odcinku km 14+120 ÷ 17+650,
- pomiar B toru nr 1 na odcinku km 16+240 ÷ 17+650
- pomiar A oraz pomiar B toru nr 2 na odcinku km 14+130 ÷ 17+670.

Podobnie jak w poprzednim punkcie, ocenie poddano różnice pomiędzy linią łamaną łączącą punkty pomiarowe a zaprojektowanym układem geometrycznym.

W celu wyeliminowania z analizy punktów pomierzonych z mniejszą dokładnością – które mogłyby zaburzać wyniki analizy – wprowadzony został dwuetapowy mechanizm oceny jakości danych i ich ewentualnej korekty. W pomiarze A toru nr 1 uśrednianie pomiarów niedokładnych dotyczyło 61 punktów z ogólnej liczby 717. Można zatem stwierdzić, że 10% punktów zostało pomierzonych ze znacznie mniejszą dokładnością niż pozostałe.

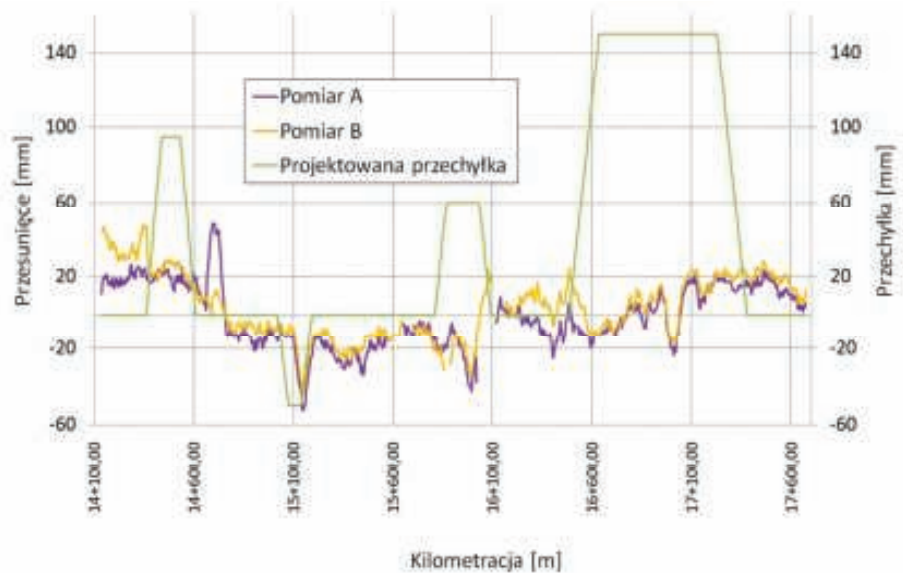
Jak wynika z rysunków 5 i 6, wartości przesunięć osiągają określone wartości niezależnie od kształtu toru (prosta/ łuk) i zmieniają się w pewnych przedziałach dla obydwu torów. Wyjątkiem jest ostatni łuk o przechyłce równej 150 mm, na którym w torze nr 1 obserwujemy największą przeciętną wartość przesunięcia. Przyczyn takiej sytuacji może być kilka. Jedną z nich jest to, że w łukach z dużą przechyłką oś toru przesunięta jest do wewnątrz o pewną wartość wynikającą z przechyłki. Podczas podbijania takich łuków występują trudności z nasuwaniem toru na zewnątrz łuku bez podnoszenia z uwagi na duży opór podsypki pod powierzchnią podkładu.

Ocenę prawidłowości położenia toru zaburzyły również błędy transformacji współrzędnych pomiarowych z układu 2000 do układu lokalnego Gdańsk '70. Błędy te są zróżnicowane, jako powiązane z konkretnym punktem dopasowania, z których każdy obciążony jest innym błędem określenia pozycji. Problem ten nie będzie dotyczył już przyszłych inwestycji, z uwagi na wprowadzenie rozporządzeniem ministerialnym [9] obowiązku stosowania ogólnokrajowego państwowego systemu odniesień przestrzennych do wykonywania map w skalach większych od 1:10000. W przypadku PKM rozporządzenie to jeszcze nie obowiązywało.

Ostatnim czynnikiem generującym błąd jest przyjęta technika pomiarowa. W pewnych konfiguracjach płaszczyny anten względem horyzontu (duże pochylenie podłużne, łuk z dużą przechyłką) ograniczona jest możliwość śledzenia satelitów o małej wysokości topocentrycznej, które umożliwiają dokładniejsze pozycjonowanie [10]. Dodatkowo na łukach położonych w wykopach występuje problem przesłonek terenowych, które mogą skutkować spadkiem dokładności.

Podsumowanie

Mobilne pomiary satelitarne, przeprowadzone na liniach Pomorskiej Kolei Metropolitalnej przed oficjalnym oddaniem jej do eksploatacji, umożliwiły



6. Wykresy przesunięć dla toru nr 2

dokładne odtworzenie jej rzeczywistego kształtu. Było to o tyle istotne, że projekt tej linii został wykonany na mapach do projektowania w układzie lokalnym Gdańsk '70, zaś stabilizacja znaków regulacji osi toru i następnie kształtowanie układu geometrycznego linii odbywało się w dostosowaniu do Państwowego systemu odniesień przestrzennych.

Aby można było porównywać współrzędne projektowe z wynikami przeprowadzonych pomiarów, konieczna była transformacja punktów pomiarowych do układu lokalnego Gdańsk'70. W konkretnej sytuacji zastosowano transformację na podstawie punktów dostosowania zlokalizowanych wzdłuż trasy PKM, wykorzystując oprogramowanie C-GEO.

Analizie poddano odcinek linii PKM o długości 3,5 km, przebiegający wzdłuż gdańskiego Portu Lotniczego. Stwierdzono, że błąd powtarzalności pomiaru oscyluje w granicach 10 mm. Występujący lokalnie spadek powtarzalności pomiaru wynika prawdopodobnie z mniejszej liczby śledzonych satelitów. Wskazano również na istotny wpływ sposobu prowadzenia wózków z antenami na trajektorię ruchu – podczas przejazdu pomiarowego A wózki z antenami były przez drezynę pchane, natomiast podczas pomiaru B ciągnięte.

W celu porównania pomierzonego przebiegu trasy z przebiegiem projektowanym sporządzono wykresy różnic

rzędnych pomierzonych i rzędnych projektowych dla poszczególnych pomiarów. Z analizy wykresów wyraźnie wynika, że różnice te, zarówno na łukach, jak i na odcinkach prostych, wynoszą przeciętnie 20 mm; wyjątkiem jest łuk o przechyłce 150 mm, gdzie różnice osiągają poziom 30 mm. Analiza porównawcza ułożenia linii PKM względem zaprojektowanego układu geometrycznego na wybranym odcinku wykazała wysoką zgodność. Należy zauważyć, że stwierdzony błąd – na poziomie 20 mm – zawiera w sobie również składowe wynikające z metodyki pomiaru oraz transformacji współrzędnych do układu Gdańsk '70. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Dera M., Widerski T. Osnovy kolejowe oraz prace geodezyjne podczas modernizacji i budowy linii kolejowych. Geodezja inżynierska – Obsługa geodezyjna inwestycji i pomiary przemieszczeń, Archiwum Geomatyki, Gdańsk 2014, s. 143-171.
- [2] Koc W., Lewiński L. Historia linii kolejowej Wrzeszcz - Kokoski. (Materiały poseminaryjne - edycja polska) International Seminar - European Workshop "Preservation of the Industrial Heritage - Gdańsk Outlook", Gdańsk, 11–14 May 1993, s. 73-80.
- [3] Koc W., Specht C. Application of the Polish active GNSS geodetic network for surveying and design of the railroad. First International Con-

ference on Road and Rail Infrastructure – CETRA 2010, Opatija, Croatia, 2010, s. 757-762.

- [4] Koc W., Specht C., Nowak A., Jurkowska A., Chrostowski P., Lewiński L., Bornowski M. Wstępne wyniki badań dostępności sieci ASG-EU-POS podczas inwentaryzacji trasy kolejowej KOŚCIERZYNA – KARTUZY. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, tom 19, 2009, s. 193-200.
- [5] Oprogramowanie Bentley Rail Track, <https://www.bentley.com/en/products/product-line/civil-design-software/power-rail-track> [dostęp 22.03.2016]
- [6] Program C-GEO dla Windows 2016, <http://softline.xgeo.pl/index.php/c-geo> [dostęp 22.02.2016 r.]
- [7] Projekt wykonawczy Pomorska Kolej Metropolitalna, Tom II – Roboty Torowe. Transprojekt Gdańsk Sp. z o.o., Gdańsk 2011.
- [8] Rozporządzenie Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 12 lutego

2013 r. w sprawie bazy danych geodezyjnej ewidencji sieci uzbrojenia terenu, bazy danych obiektów topograficznych oraz mapy zasadniczej (Dz. U. z 2013 r. Nr 0, poz. 383).

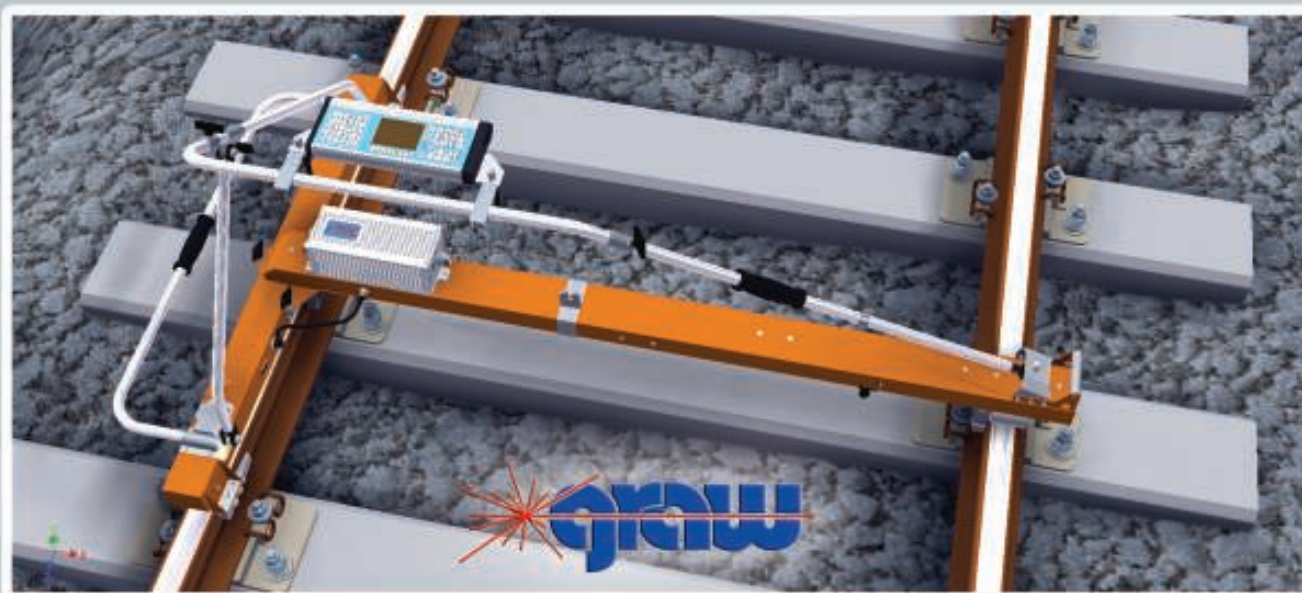
- [9] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych (Dz.U. 2012 poz. 1247).
- [10] Specht C. System GPS. Wydawnictwo BERNARDINUM, Pelplin 2007.
- [11] Specht C., Koc W., Chrostowski P., Szmagliński J. Satellite inventory of tram track geometrical layout. [CD-ROM] Conference Papers of 13th International Conference & Exhibition RAILWAY ENGINEERING 2015, Edinburgh, Scotland, 2015, Metros & Tramways Section.
- [12] Specht C., Koc W., Smolarek L., Grządziela A., Szmagliński J., Specht M. Diagnostics of the tram track shape with the use of the global positioning satellite systems (GPS/Glonass) measurements with a 20 Hz frequ-

ency sampling. Journal of Vibroengineering 2014, vol. 16, iss. 6, 3076-3085.

- [13] Specht C., Nowak A., Koc W., Jurkowska A. Application of the Polish Active Geodetic Network for railway track determination. Transport Systems and Processes – Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, CRC Press – Taylor & Francis Group 2011, London, UK, s. 77-81.
- [14] Ustawa z dnia 17 maja 1989 r. Prawo geodezyjne i kartograficzne. Dz. U. z 2015 r., nr 0, poz. 520 z późn. zm.
- [15] Ustawa z dnia 7 września 2007 r. o przygotowaniu finałowego turnieju Mistrzostw Europy w Piłce Nożnej UEFA EURO 2012. Dz. U. z 2007 roku, nr 173, poz. 1219.
- [16] Vossloh AG, www.vossloh-fasting-systems.com [dostęp 22.03.2016 r.]

REKLAMA

TOROMIERZ INERCYJNY iTEC Dokładny pomiar strzałek



www.graw.com