

EUREF – nowy układ współrzędnych w Europie i jego związek z WGS84

SABINA ŁYSZKOWICZ

Po drugiej wojnie światowej przystąpiono w Europie do łączenia krajowych sieci triangulacyjnych w sieci o zasięgu regionalnym. Wówczas to powstały dwie regionalne sieci, a mianowicie: Jednolita Sieć Astronomiczno-Geodezyjna (JSAG) obejmująca swym zasięgiem Europę Centralną i Wschodnią oraz sieć European Datum (ED) obejmująca Europę Zachodnią.

Sieć JSAG została odniesiona do elipsoidy Krasowskiego o parametrach $a=6\,378\,245$ m; $f=1:298,3$. Elipsoida ta została obliczona w 1940 roku z danych pochodzących z obszaru ZSRR, Europy Zachodniej i Stanów Zjednoczonych. Wyznaczone w 1942 roku dla centralnego punktu w obserwatorium w Pułkowie parametry orientujące elipsoidę Krasowskiego względem bryły ziemskiej dały początek układowi „42”.

W tym to układzie przeprowadzono dwa wyrównania sieci JSAG: pierwsze w 1957, a drugie w 1983 roku.

Europejski układ współrzędnych ED powstał wkrótce po drugiej wojnie światowej pod nazwą European Datum 1950. Był on oparty na pomiarach naziemnych i został odniesiony do elipsoidy Hayforda o parametrach $a=6\,378\,388$ m; $f=1:297,0$. Punkt główny sieci znajdował się w słynnej wieży Helmerta w Poczdamie, który to zresztą Poczdam wraz z całą NRD znalazł się wkrótce poza obszarem ED50. Przez następne lata trwały ciągłe prace nad ulepszeniem i modernizacją systemu ED50, koordynowane przez komisję Międzynarodowej Asocjacji Geodezji o nazwie RETrig (Réseaux Européens de la Triangulation). Ostatnia wersja tego układu pojawiła się w 1987 roku już z wykorzystaniem danych satelitarnych. Tak ujednoczona kontynentalna sieć triangulacyjna ED87 charakteryzuje się dokładnością rzędu 1×10^{-6} , co odpowiada błędowi bezwzględnemu położenia skrajnych punktów Europy Zachodniej rzędu ± 2 m.

Tymczasem pojawiła się nowa technika – Global Positioning System (GPS), a wraz z nią geocentryczny układ współrzędnych geodezyjnych – World Geodetic System 1984

Podstawowe sieci geodezyjne odgrywają kluczową rolę w procesie poznawania i kartowania fizycznej powierzchni Ziemi. Do najstarszych podstawowych sieci zaliczana jest triangulacja, a historia jej powstawania jest dobrze znana. Wiadomo, że około 1600 roku Tycho de Brahe i Snellius wynaleźli metodę wyznaczania pozycji punktu zwaną triangulacją, a polegającą na pomiarze kątów i co najmniej jednego boku. Metoda ta została wykorzystana przez słynnych francuskich geodetów XVIII wieku do wyznaczenia kształtu Ziemi przez pomiar łuku południka. Począwszy od tego momentu krajowe sieci triangulacyjne służą za podstawę (osnowę) dla wszystkich rodzajów prac geodezyjnych i mierniczych.

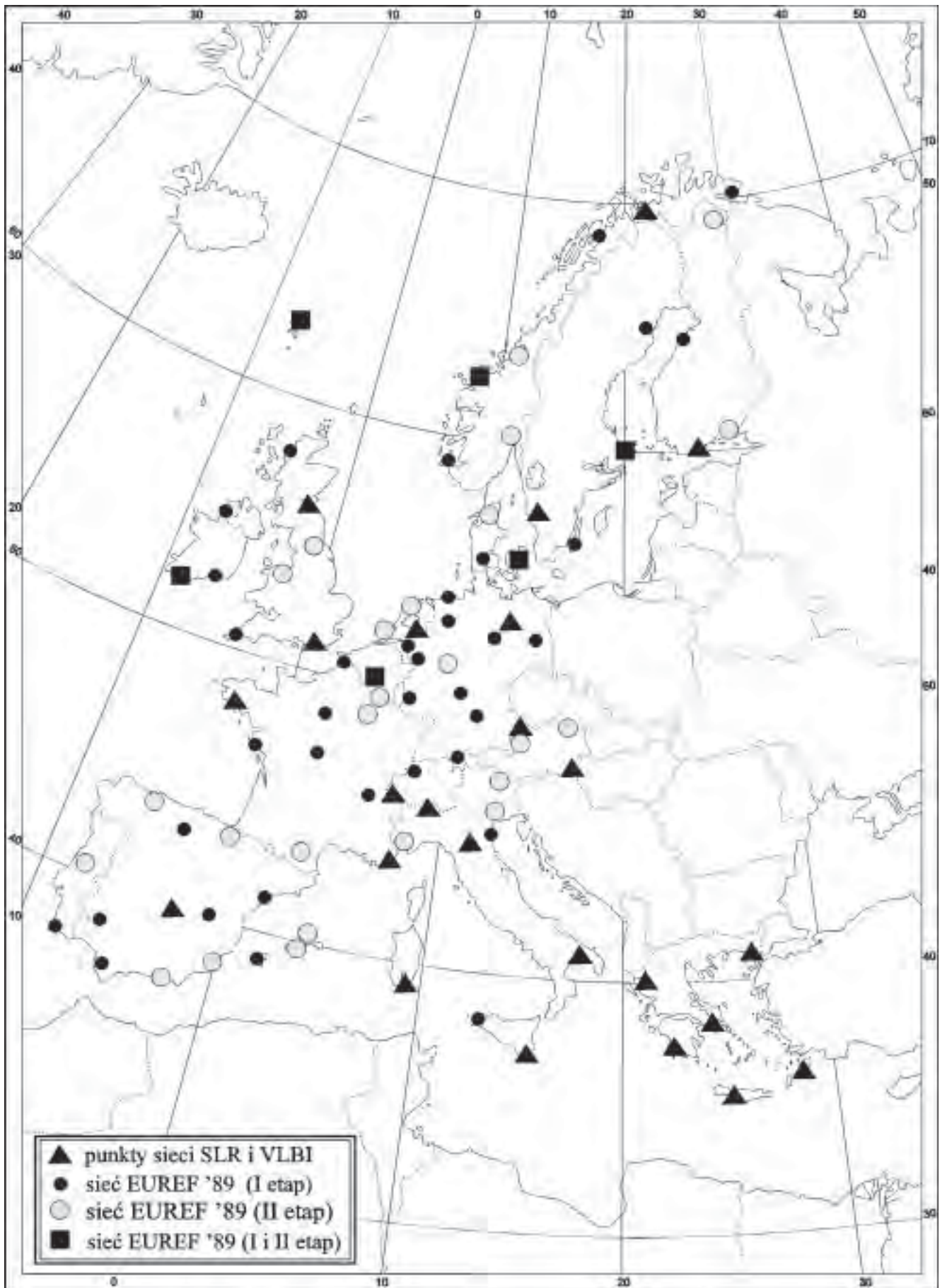
(WGS84). Odbiorniki GPS po odebraniu sygnałów od satelitów krążących po orbitach wokół Ziemi wyznaczają pozycje punktu na powierzchni Ziemi w układzie WGS84. Dokładność tak wyznaczonej pozycji jest ograniczona dokładnością realizacji tego układu, która waha się w granicach 1 metra dla każdej z trzech składowych, a stabilność całego systemu nie przekracza $\pm 1-2$ metrów. Taka dokładność układu WGS84 jest wystarczająca tylko dla opracowań kartograficznych średnio- i małoskalowych. Badania geodynamiczne oraz współczesne pomiary katastralne wymagają znajomości położenia punktów z dokładnością rzędu centymetrów. Oznacza to, że układ WGS84 nie spełnia oczekiwań obecnie stawianym precyzyjnym pomiarom geodezyjnym w Europie.

1. Pierwsze decyzje

Koncepcja stworzenia nowego precyzyjnego systemu odniesienia dla Europy powstała w 1987 roku na Kongresie Międzynarodowej Unii Geodezyjno-Geofizycznej w Vancouver. Utworzono tam wówczas odpowiednią Podkomisję „EUREF”, która zajęła się aspektami naukowymi tego przedsięwzięcia. Jednocześnie profesjonalna organizacja CERCO (Comité Européen des Responsables de la Cartographie Officielle) zajęła się aspektami praktycznymi w świetle potrzeb geodezji i kartografii i podjęła decyzje realizacyjne. Celem prac obu organizacji było utworzenie europejskiego systemu odniesienia – European Terrestrial Reference System (ETRS).

2. Podstawowe wiadomości o istniejących układach

Obecnie najdokładniejsze pomiary geodezyjne długich (transkontynentalnych, transoceanicznych) linii są realizowane metodami geodezji satelitarnej. Obserwacje laserowe, zwane SLR (Satellite Laser Ranging) oraz interferometria długich baz VLBI (Very Long Baseline Interferometry) gwarantują wyznaczenie



linii rzędu 5 000 km z dokładnością $\pm 1-2$ cm. Istniejąca obecnie globalna sieć około 70 stacji SLR i 20 stacji VLBI prowadzi systematyczne obserwacje wyznaczając na bieżąco swoje pozycje. Wspomniana sieć stacji SLR i VLBI tworzy globalny Międzynarodowy System Odniesienia zwany ITRF (International Terrestrial Reference Frame), który jest najdokładniejszą realizacją geocentrycznego globalnego układu współrzędnych. Dlatego też obie europejskie organizacje (CERCO i EUREF) zgodziły się, że układ EUREF powinien bazować na systemie ITRS. W tym celu wybrano pozycje 35 europejskich stacji SLR i VLBI (wchodzących w skład ITRF) wyznaczone na epokę 1989.0. Zbiór ten uznano jako zbiór współrzędnych definiujący europejski układ współrzędnych ETRF. Tak więc ETRF jest **podzbiorem** globalnego rozwiązania ITRF dla epoki **1989.0**.

Z powodu ruchów tektonicznych, jakim podlegają kontynenty układ ETRF powoli zmienia swoje położenie w stosunku do ITRF z prędkością około 1-3 cm na rok, jednak nie ulega prawie wewnętrznej deformacji. W związku z tym można mu przypisać epokę, a następnie wyznaczać regularnie (raz na 10 lat) parametry transformacji w stosunku do WGS84 i ITRF. Tak zdefiniowany kontynentalny układ współrzędnych EUREF '89 zaspokaja wymagania pojawiające się w takich dziedzinach jak:

- kartografia klasyczna i cyfrowa,
- nawigacja morska, powietrzna i lądowa,
- międzynarodowe projekty inżynierskie (np. budowa tuneli).

3. Realizacja systemu ETRF w 1989 roku (= EUREF '89)

Europejska sieć SLR i VLBI. W 1989 roku w Europie Zachodniej działało osiem stacji laserowych i pięć stacji VLBI (rys. na str. 6). W rejonie Morza Śródziemnego w ramach programu naukowego badającego trzęsienia skorupy ziemskiej na tym obszarze istnieje 11 stacji laserowych obserwujących co drugi rok. Do listy tej należy dołączyć jeszcze kilkanaście punktów, których pozycje wyznaczane są za pomocą mobilnych systemów SLR i VLBI.

Zagęszczenie sieci ETRF '89. Transformacja lokalnych krajowych systemów odniesienia do geocentrycznego systemu ETRF '89 w ymaga znajomości co najmniej trzech punktów wspólnych. W praktyce minimalna liczba punktów wspólnych nie powinna być mniejsza niż 6-8. Liczba stacji SLR i VLBI w poszczególnych państwach Europy **nie spełnia** tego warunku i sieć ETRF '89 musiała być zagęszczona. W październiku 1988 roku zaakceptowano projekt sieci zagęszczającej o nazwie EUREF '89, składającej się z 93 punktów rozmieszczonych względem siebie w odległościach około 300-500 km (rys. na str. 6). Kampania obserwacyjna GPS nastąpiła w maju 1989 roku w dwóch etapach, gdyż liczba odbiorników GPS wówczas dostępnych w Europie była zbyt niska (69 sztuk), aby obserwacje na wszystkich punktach wykonać jednocześnie.

Należy pamiętać, że w roku 1989 konstelacja satelitów GPS nie była jeszcze kompletna, okno obserwacyjne trwało zaledwie 5 godzin dziennie (obecnie 24 godzin dziennie), odbiorniki GPS nie były najlepiej dopracowane, a poza tym, wbrew zasadom sztuki, używano czterech różnych rodzajów odbiorników.

Końcowe wyrównanie całej sieci zostało przeprowadzone przez grupę naukowców z Astronomisches Institut w Bernie, Institut

Géographique National we Francji, Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung w Monachium i Institut für Angewandte Geodäsie we Frankfurcie. Po wyrównaniu obserwacji lista współrzędnych punktów sieci została opublikowana w ten sposób system EUREF '89 **zaistniał** w Europie Zachodniej.

Ocena dokładności tej sieci nie jest zbyt oczywista. Formalne błędy średnie są na poziomie kilku milimetrów i jest to nierealistyczne. Inne oceny wskazują, że dokładność składowych poziomych jest rzędu $\pm 3-4$ cm, a składowej pionowej około 6 cm. W sieci jest jednak szereg stacji, które zanotowały problemy w czasie obserwacji i mogą one mieć dokładność nawet parokrotnie gorszą. Pionierskość prac związanych z utworzeniem sieci EUREF '89 sprawiła, że jakość tej sieci nadaje się do poprawy w przyszłości.

4. Ekspansja sieci EUREF w Europie w latach 1990-1995

W lipcu 1990 roku sieć została rozszerzona na północ: Islandia, Grenlandia, Spitzbergen. W tym celu 12 punktów łącznych zostało użytych na kontynencie europejskim i dodatkowo 10 punktów łącznych na obszarze Ameryki Północnej. Na przełomie sierpnia i września 1990 roku przeprowadzono kampanię obserwacyjną GPS na 16 wybranych punktach tureckiej sieci triangulacyjnej pierwszego rzędu.

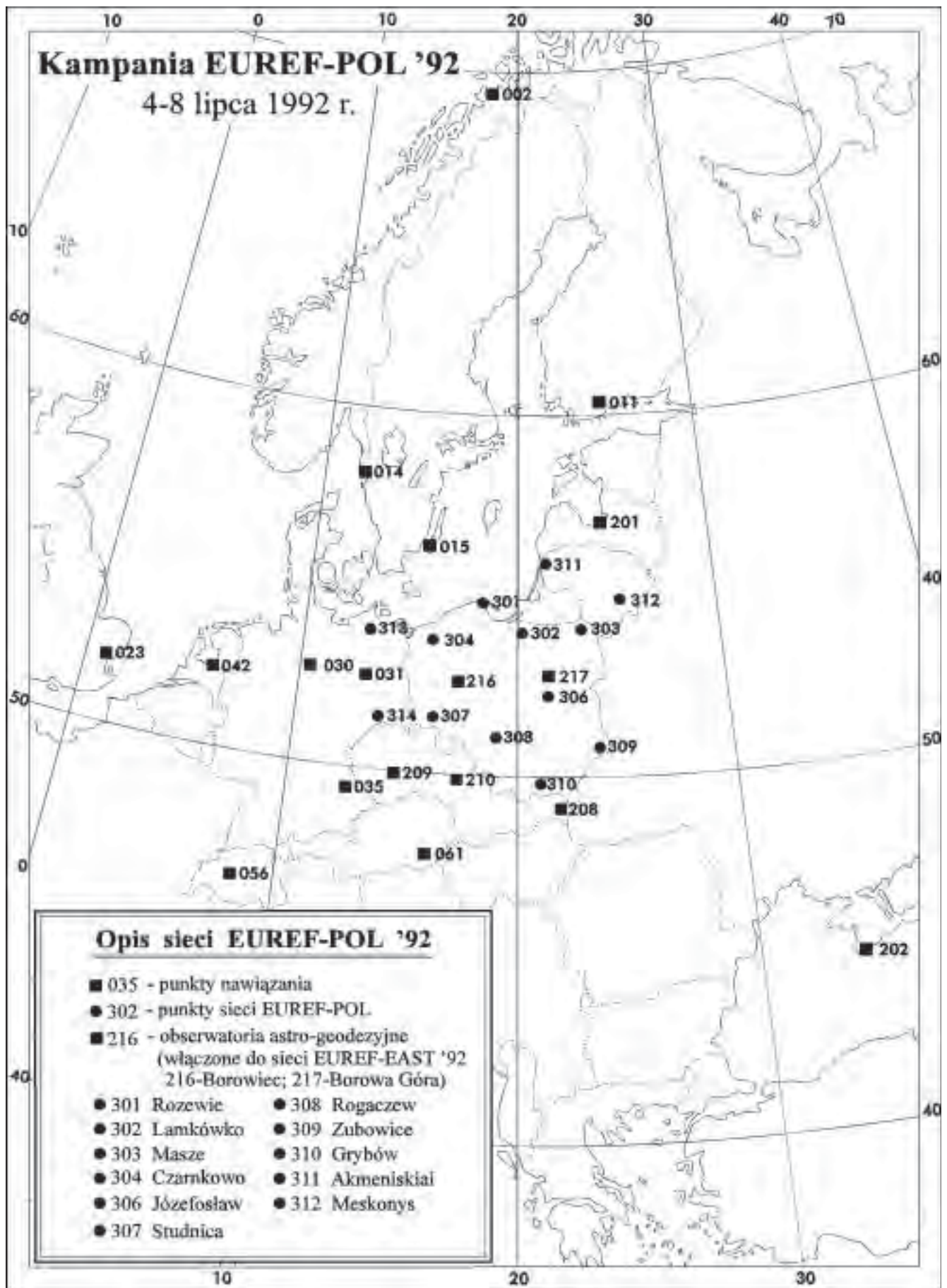
Zmiany polityczne w Europie umożliwiły wielu państwom dawnego bloku wschodniego wstąpienie do organizacji CERCO i podjęcie prac nad włączeniem swoich krajowych sieci triangulacyjnych do systemu EUREF '89. Już w październiku 1992 przeprowadzono kampanię obserwacyjną na obszarze byłego NRD (na 11 punktach). Pod koniec października 1991 zorganizowano kampanię obserwacyjną na obszarze Republiki Czeskiej (5 punktów) i na obszarze Węgier (4 punkty).

W pierwszych dniach lipca 1992 roku zorganizowano kampanię obserwacyjną na obszarze Polski (11 punktów). Następnie we wrześniu 1992 roku przeprowadzono kampanię obserwacyjną na terytorium Bułgarii (7 punktów). W tym samym czasie zorganizowano kampanię obserwacyjną w republikach bałtyckich. Na przełomie stycznia i lutego 1993 roku zorganizowano kampanię obserwacyjną na Cyprze (6 punktów), (Seeger i Franke, 1994).

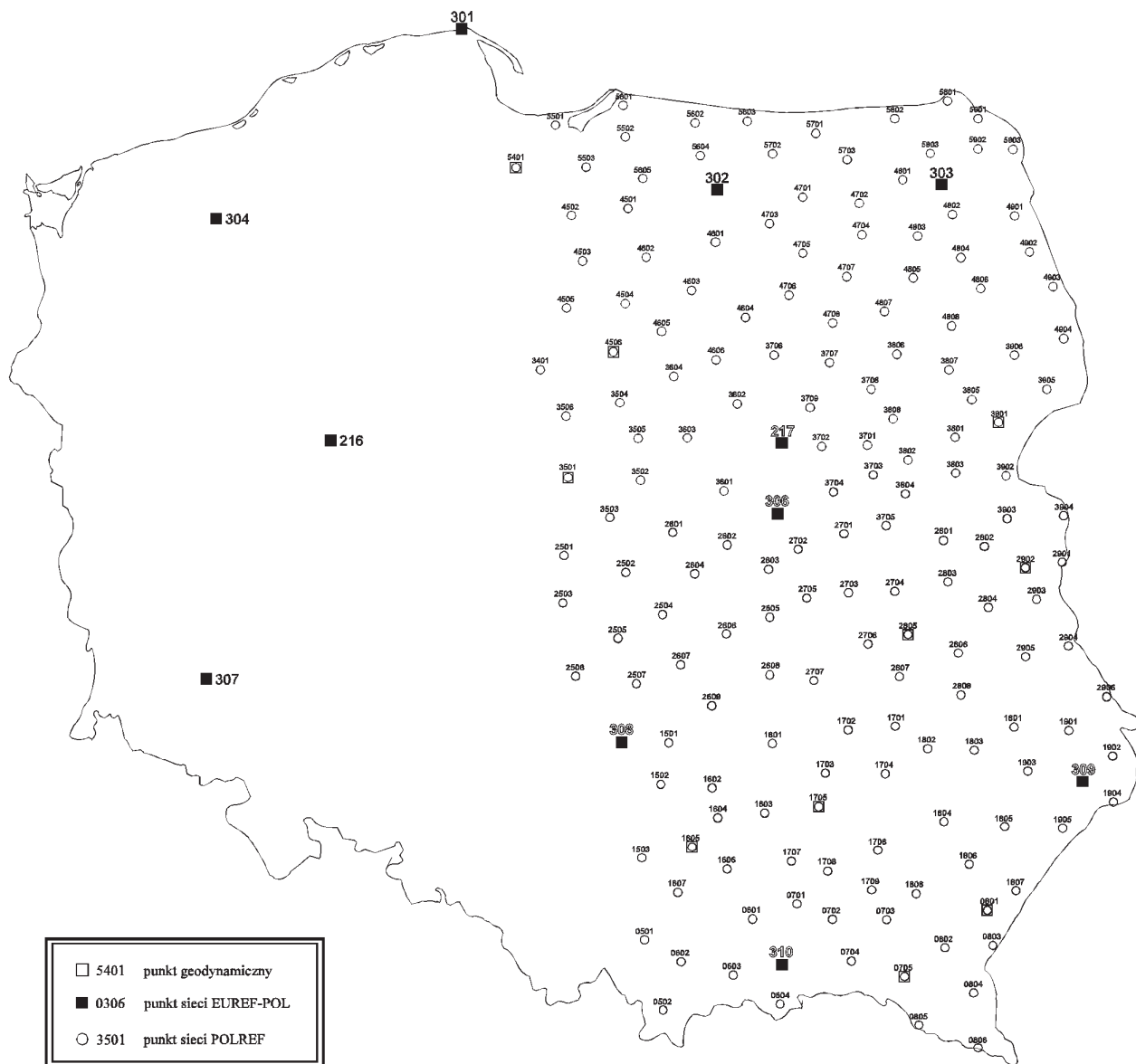
Na przełomie maja i czerwca zrealizowano kampanię obserwacyjną na obszarze Chorwacji (10 punktów) i Słowenii (6 punktów). We wrześniu 1993 roku poprzez obserwacje GPS na 7 punktach na terytorium Rumunii kraj ten został włączony do systemu EUREF '89. Latem 1995 roku próbowano przeprowadzić kampanię GPS na obszarze Ukrainy. Kampania ta została przerwana przez służby specjalne i jak do tej pory nie została ukończona (Seeger i Franke, 1995).

5. Sieć EUREF w Polsce

W Polsce już w 1990 roku Sekcja Sieci Geodezyjnych Komitetu Geodezji PAN podjęła starania w sprawie włączenia Polski do układu EUREF. Powołany przez tę sekcję zespół pod kierownictwem prof. Lubomira Barana opracował raport mówiący *O potrzebie i zasadach założenia zintegrowanej podstawowej sieci geodezyjnej Polski w układzie EUREF* (Baran i inni, 1991). Raport ten zawiera m.in. projekt sieci EUREF na terytorium Polski. Sieć ta,



Wschodnia część sieci POLREF zrealizowana w 1994 roku



zwana siecią rzędu zerowego, składa się z 11 punktów. W 1992 roku Główny Geodeta Kraju dr R. Piotrowski po konsultacjach zaakceptował przedstawione propozycje i skierował projekt do realizacji. Organizację pomiarów i opracowanie wyników powierzo no instytucji mającej w kraju największe doświadczenie w prowadzeniu dużych projektów międzynarodowych i kampanii pomiarowych GPS, a mianowicie Zakładowi Geodezji Planetarnej Centrum Badań Kosmicznych PAN (Zieliński i Jaworski, 1993). Kampania obserwacyjna o nazwie EUREF-POL 1992, miała miejsce

w dniach 4-8 lipca 1992 roku. Wraz z 11 punktami na terenie Polski w kampanii uczestniczyło 19 stacji i obserwatoriów z innych krajów Europy, zapewniając dowiązanie do istniejącej już części sieci EUREF (rys. 2). Ostatecznie otrzymano współrzędne 11 punktów z dokładnością rzędu 2 cm dla składowych poziomych i około 3 cm dla składowej pionowej *. Wyniki wyrównania sieci przedstawiono i zaakceptowano na sympozjum EUREF 1994 roku w Warszawie (Zieliński i inni, 1994). W ten sposób europejski system odniesienia EUREF '89 zaistniał w Polsce.

6. Krajowa zintegrowana sieć podstawowa - POLREF

Prace związane z tworzeniem nowej osnowy podstawowej kraju zostały rozpoczęte w 1993 roku od opracowania projektu i wykonania stabilizacji punktów, zlokalizowanych w południowo-wschodniej części kraju (rys. na str. 9). Wszędzie tam, gdzie było możliwe spełnienie warunków wymaganych przy wykonywaniu obserwacji GPS, lokalizacja punktów sieci POLREF pokryła się z usytuowaniem punktów klasycznej sieci poziomej I klasy. W każdym takim przypadku musiała jednak nastąpić wymiana znaków naziemnych. Przy stabilizacji punktów nowej sieci brano pod uwagę fakt, że poza obserwacjami GPS będą na nich wykonywane pomiary niwelacyjne oraz pomiary gravimetryczne.

Zakład Geodezji Planetarnej Centrum Badań Kosmicznych PAN przeprowadził dwie kampanie obserwacyjne związane z tworzeniem pierwszego etapu sieci POLREF. W początkach lipca 1994 roku pomiarami objęto 103 punkty południowo-wschodniej części sieci POLREF, a w październiku 1994 roku wykonano obserwacje GPS na północno-wschodniej części sieci (75 punktów, w tym 8 łącznych). Latem 1995 roku Instytut Geodezji i Kartografii przeprowadził trzecią i ostatnią kampanię związaną z realizacją sieci POLREF na obszarze Polski. Obecnie w Zakładzie Geodezji Planetarnej trwają prace obliczeniowe nad łącznym wyrównaniem 348 punktów, z jakich składa się obecnie sieć POLREF. Łączne wyrównanie powinno być ukończone wiosną 1996 roku.

Oczekuje się (Baran, 1995), że dokładność sieci POLREF będzie około 15 mm dla ΔB i ΔL oraz około 20 mm dla Δh .

7. Transformacja układów

Jednym z typowych i często występujących zadań geodezyjnych jest transformacja współrzędnych punktów geodezyjnych. Zagadnienie to pojawia się zawsze, gdy współrzędne punktów należące do jednego układu muszą być przeliczone na współrzędne nowego układu i sprowadza się do wyznaczenia pewnej liczby parametrów transformacji. Dlatego też kolejnym etapem, po zakończeniu wyrównania sieci EUREF-POL będzie wyznaczenie siedmiu parametrów transformacji sieci SAG. Przeliczenie sieci SAG do układu EUREF i odwrotnie jest stosunkowo proste z punktu widzenia obliczeń matematycznych. Problemem jest dalsze utrzymywanie tajemnicy układu „1942” w Polsce. Układ ten w wyniku zjednoczenia Niemiec definitywnie utracił swoją tajemność. Jedynym efektem utrzymywania statusu jego tajemności w Polsce będą trudnienia w prowadzeniu krajowych prac geodezyjnych.

W celu zilustrowania czytelnikowi różnic współrzędnych pomiędzy nowym polskim geocentrycznym układem EUREF '89 a układem „42” podajemy uproszczoną zależność, jaka została opublikowana w pracy (Ihde, 1993), a mianowicie

$$\begin{aligned} B^{EUREF} - B^{42} &\sim -1,4'' \\ L^{EUREF} - L^{42} &\sim -6,7'' \end{aligned}$$

Oznacza to, że początki układów są przesunięte względem siebie o około 160 metrów. Różnice pomiędzy geocentrycznymi układami WGS84 a EUREF '89 są znacznie mniejsze i wyrażają się przesunięciami początków układów rzędu 0,55 metra.

Instytut Dróg i Mostów PW
Zakład Inżynierskich Pomiarów Geodezyjnych
Warszawa, ul. Armii Ludowej 16

Literatura:

- Baran L. W. (Ed.), 1995, *Polish National Report On Geodesy, 1991-1994*, Presented to XXI General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics in Boulder, Colorado;
- Ihde J., 1993, *Some remarks on geodetic reference system in Eastern Europe in preparation of a uniform European geoid*, Bulletin Géodésique, vol. 67, str. 81-85;
- Baran L. W., Śledziński J., Barlik M., Czarnecki K., Dobrzycka M., Gajderowicz I., Oszczak St., Pachelski W., Rogowski W., Cisak J., 1991, *Raport o potrzebie i zasadach założenia zintegrowanej podstawowej sieci geodezyjnej EUREF*, Raport Komisji Geodezji PAN, Sekcja Sieci Geodezyjnych, Warszawa;
- Seeger H., Franke P., 1994, *EUREF Activity from May 1993 to May 1995*, Prace sympozjum EUREF w Warszawie, 8-11 lipca, str. 82-86;
- Seeger H., Franke P., 1995, *EUREF Activity from June 1994 to April 1995*, referat wygłoszony na sympozjum EUREF w Helsinkach, 3-6 maja 1995;
- Zieliński J., Jaworski L., 1993, *Europejska geodezyjna sieć podstawowa EUREF*, Przegląd Geodezyjny nr 12;
- Zieliński J. B., Jaworski L., Zdunek R., Seeger H., Engelhardt G., Toppe F., Lunthardt J., 1994, *Final report about EUREF-POL 1992 GPS Campaign*, Prace sympozjum EUREF w Warszawie, 8-11 lipca, 92-99.

* co jest równoważne błędowi względnemu rzędu $0,03 \times 10^{-6}$. Oznacza to, że sieć EUREF-POL jest około 10 razy dokładniejsza niż sieć JSAG.

GEOSPRZĘT

Teresa Spychalska
60-178 Poznań
ul. Dziewińska 67a
tel. 68-93-23

■ Instrumenty i akcesoria firmy SOKKIA

■ Materiały kreślarskie i reprodukcyjne

firm: **REGMA** – Francja
FOLEX – Szwajcaria
KIMOTO – Japonia
RENKER – Niemcy
COFACET – Włochy

■ Papiery, kalki i folie do ploterów

Tanio, szybko
i z dostawą do klienta