

Roman KADAJ¹

OBLICZENIA I MODERNIZACJE OSNÓW III KLASY W UKŁADZIE „2000” Z UWZGLĘDNIENIEM POMIARÓW GPS I SERWISÓW ASG-EUPOS

1. Wprowadzenie

Zbliżamy się do roku 2010, kiedy to państwowy zasób geodezyjny i kartograficzny powinien bazować całkowicie na nowych układach współrzędnych zdefiniowanych w związku z realizacją w obszarze Polski europejskiego układu odniesienia ETRS89 [1]. W szczególności, czterostrefowy układ, o nazwie symbolicznej „2000” [3, 5], ma przeznaczenie dla wielkoskalowych opracowań kartograficznych (mapa zasadnicza i ewidencyjna) jak również do opracowania osnów poziomych niższych rzędów (osnowy klasy III lub pomiarowe). Zdefiniowany równolegle jednostrefowy układ, o symbolicznej nazwie „1992” [2], ze względu na relatywnie duże zniekształcenia odwzorowawcze długości ma zastosowanie dla map topograficznych lub opracowań osnów poziomych wyższych rzędów (klasy I i II) albo, generalnie, osnów wielkoobszarowych.

Zasadnicza problematyka niniejszej pracy dotyczy aspektów jakościowych osnów geodezyjnych w układzie „2000”, zarówno tych przeliczanych z dawnych układów („1965”, lokalnych) jak też osnów zakładanych już w nowych technologiach, zintegrowanych z pomiarami GPS, w tym przy wykorzystaniu serwisów polskiego systemu stacji referencyjnych ASG-EUPOS. Każda osnowa geodezyjna w określonym obszarze powierzchni ziemi, z określoną gęstością lokalizacji punktów, z właściwą dla danej klasy dokładnością i niezawodnością, realizuje pewien układ odniesienia obowiązujący dla wszelkich szczegółowych prac geodezyjnych i kartograficznych. Można powiedzieć, że układ odniesienia, utożsamiony w powyższym sensie z osnową geodezyjną, jest pewną fizyczną (techniczną) realizacją układu współrzędnych. Samo pojęcie układu współrzędnych ma znaczenie głównie teoretyczne. Status praktyczny w postaci układu odniesienia uzyskuje dopiero z chwilą powiązania tego układu z fizyczną Ziemią, a to dokonuje się poprzez punkty osnów geodezyjnych.

Dokładność i niezawodność osnowy stanowią o jakości lokalnej realizacji układu odniesienia, a tym samym o jakości lokalnych robót geodezyjnych. Prof. Czesław Kamela mawiał kiedyś, że „tam gdzie nie ma osnowy nie ma też geodezji”. Upraszczając, można więc powiedzieć, że pojęcia osnowy i układu odniesienia mają znaczenie fundamentalne w uprawianiu „sztuki geodezyjnej”, a o jakości prac geodezyjnych decydują w istotnej mierze cechy jakościowe osnowy. Niestety, podstawowe kategorie oceny jakimi są dokładność i niezawodność mogą być rozumiane niejednoznacznie, prowadząc do nieporozumień, zwłaszcza w konfrontacji z nowymi technologiami pomiarowymi. Przytoczymy w związku z tym kilka spostrzeżeń.

¹ Prof. dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Geodezji im. K. Weigla
Wyższa Szkoła Inżyniersko-Ekonomiczna w Ropczycach, Katedra Geodezji

Błąd położenia punktu, jako stosowana generalnie miara dokładności, w tradycyjnym znaczeniu odpowiada naczelniej zasadzie opracowań geodezyjnych „od ogółu do szczegółu”, co znaczy, że jest określana zwykle w stosunku do punktów osnowy wyższego rzędu, przy założeniu niezmienności współrzędnych jej punktów. Można powiedzieć, że tak określony parametr jest pewną lokalną (relatywną) miarą dokładności, nie uwzględniającą faktu, że same punkty nawiązania w odniesieniu do pewnego układu nadrzędnego (realizowanego np. przez stacje referencyjne systemu ASG-EUPOS lub sieć POLREF) są również błędne.

Dokładność lokalna (relatywna), na której opierały się dotychczas (w układzie „1965”) kryteria oceny i klasyfikacji osnów geodezyjnych, dzisiaj już nie wystarcza. Rozszerzenie tego pojęcia i kryteriów oceny (klasyfikacji) na dokładność bezwzględną, wymusza nowa technika pomiarowa, zwłaszcza wykorzystująca serwisy systemu ASG-EUPOS. Pozycja punktu wyznaczona w tym systemie jest odniesiona bezpośrednio do stacji referencyjnych, reprezentujących globalny (europejski) układ odniesienia ETRF’89. Aby ten aplikowany bezpośrednio układ odniesienia był spójny z układem realizowanym przez lokalną osnowę geodezyjną musimy postawić wymaganie, aby ta osnowa reprezentowała również wyższą dokładność bezwzględną. Efektu takiego na ogół nie możemy się spodziewać przeliczając dawne osnowy (zwłaszcza te zakładane jeszcze według instrukcji B-III) do układu „2000” przy zastosowaniu jedynie pierwotnej struktury nawiązań, zwłaszcza jeśli te osnowy charakteryzują się „słabymi” konstrukcyjnie elementami, jak np. zbyt długimi ciągami. Do podobnych skutków prowadzi także metoda transformacyjna, obciążona dodatkowo ryzykiem niewiadomego błędu współrzędnych pierwotnych. Można powiedzieć, że przeliczenia do układu „2000” oparte na dawnych, wielorzędowych strukturach nawiązań, bez pewnych koniecznych uzupełnień tracą generalnie sens - w „zderzeniu” z nową techniką ujawnią na ogół znacznie rozbieżności.

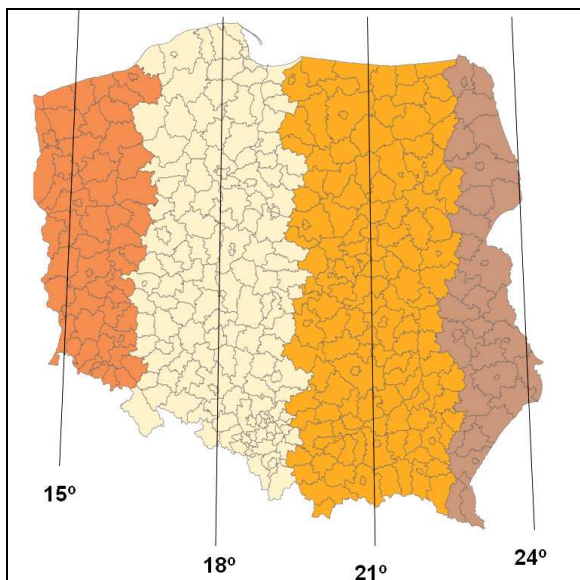
Dążąc do spójności dokładnościowej lokalnych osnów poziomych (osnów klasy III i pomiarowej) z układem podstawowym reprezentowanym obecnie przez stacje ASG-EUPOS, a w dalszej kolejności przez sieci EUREF-POL + POLREF oraz osnowy klasy I i II (które mają już pewną akceptowaną dokładność bezwzględną), należy dążyć do powiązania tych osnów z wymienionymi osnowami wyższego rzędu. Takie powiązanie zapewnia dziś przede wszystkim technika GPS, w szczególności użycie precyzyjnych serwisów ASG-EUPOS. Owo powiązanie powinno zapewnić efekt końcowy polegający na tym, że osnowy lokalne uzyskają bezwzględną porównywalną z analogiczną dokładnością osnów wyższych rzędów. Brak tego efektu będzie oznaczać, że osnowa, która być może wypełniała swoją funkcję dobrze w układzie „1965” lub lokalnym, straci faktycznie swą funkcję obecnie, a nawet będzie elementem pewnej komplikacji w procesach wykorzystujących nowe technologie, a zwłaszcza system ASG-EUPOS.

Można powiedzieć, że opisany problem nie dotyczy osnów nowozakładanych, zwłaszcza jeśli stosuje się technikę GPS. Niekiedy jednak, nazbyt przeceniając walory nowej techniki pomiarowej, możemy uzyskać efekt tylko pozornie poprawny. Kwestia dotyczy przede wszystkim problemu niezawodności (niezależnej kontroli wyznaczanych punktów lub ich pewnych podzbiorów). Przykładowo, jeśli pojedynczy punkt lub grupa punktów sieci jest wyznaczana tylko w jednej sesji obserwacyjnej GPS (przy równoczesnym korzystaniu z kilku odbiorników) z pewnością nie spełnia się konieczny warunek niezależnej kontroli. Na każdym punkcie (w każdym odbiorniku) jest tworzony pojedynczy zbiór obserwacyjny. Następnie w drodze tzw. post-processingu wyznacza się zbiór wektorów GPS. Podzbiór wektorów związanych z pojedynczym punktem sieci tworzy układ pseudoobserwacji wzajemnie zależnych, bo tworzonych przy wykorzystaniu tego samego zbioru obserwacyjnego w danym punkcie. Inaczej mówiąc, wyznaczone w jednej sesji punkty nie posiadają niezależnej kontroli.

Obok problemów dokładności i niezawodności w odniesieniu do określonych struktur sieci, istotna część tematu dotyczy poprawnego i możliwie pełnego wykorzystania zasobów archiwalnych dotyczących osnów w układzie „1965” lub lokalnym. Mamy tu na myśli przede wszystkim zastosowanie ścisłej metody przetwarzania, opartej na wyrównaniu odpowiedniej sieci metodą najmniejszych kwadratów. Mniej korzystną alternatywą jest metoda transformacyjna albo tzw. hybrydowa, polegająca na tym, że współrzędne punktów transformowanych poddaje się dodatkowo wyrównaniu przy udziale obserwacji (kątowności, długości).

2. Syntetyczne informacje dotyczące układów współrzędnych „2000” i „1992”

Przypomnijmy, że w obu zdefiniowanych układach posłużono się uniwersalnym, skalowanym odwzorowaniem *Gaussa-Kruegera*, dobierając skalę podobieństwa tak, by otrzymać w efekcie optymalny obszarowo rozkład zniekształceń długości.



Rys.1. Strefy układu „2000”; granice stref określone zgodnie z przebiegiem granic powiatów.

Zasada tworzenia współrzędnych:

$$x_{2000} = m_0 * x_{GK} ;$$

$$y_{2000} = m_0 * y_{GK} + 500000 + c * 1000000 ;$$

$m_0 = 0.999923$ = skala kurczenia

c – cecha strefy równa

5 dla strefy z południkiem 15°

6 dla strefy z południkiem 18°

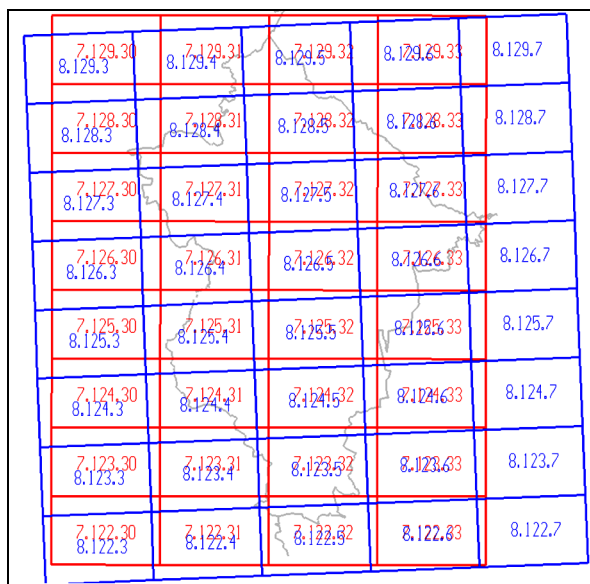
7 dla strefy z południkiem 21°

8 dla strefy z południkiem 24°

x_{GK} , y_{GK} – oryginalne współrzędne odwzorowania Gaussa-Kruegera

Źródło: plik powiaty_puwg2000.pgn w pl.wikipedia.org

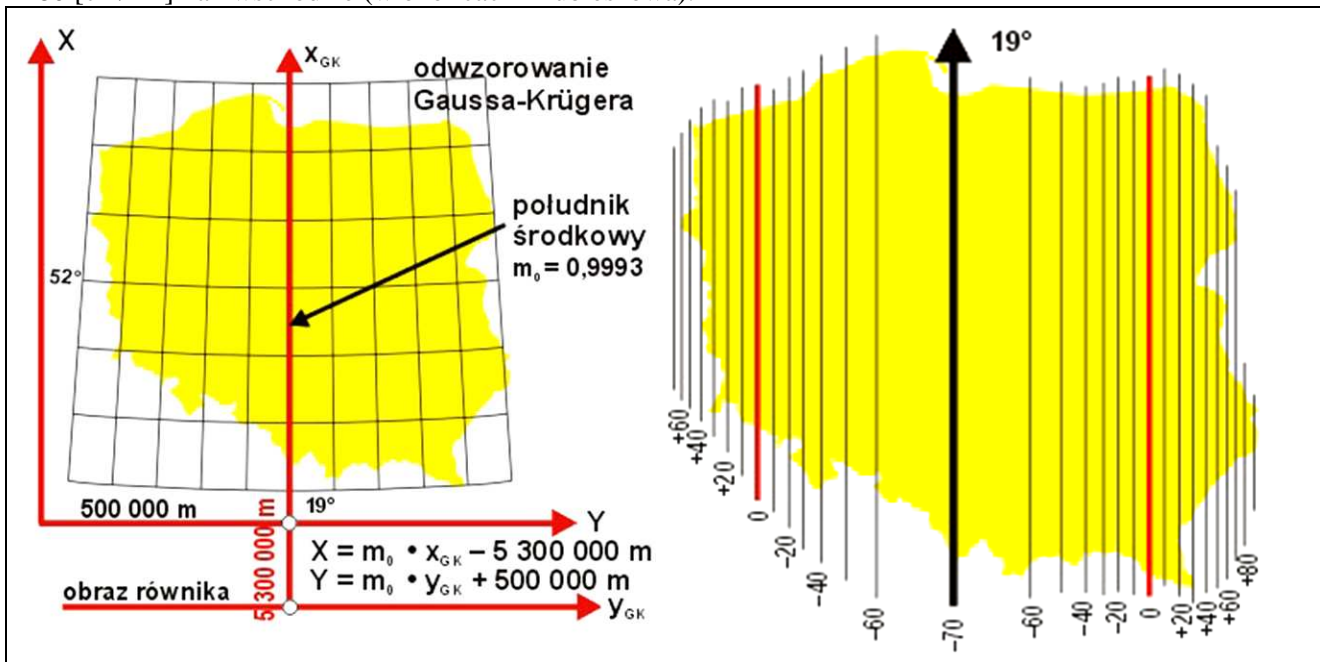
Dla każdej strefy układu „2000” (rys.1) przyjęto skalę $m_0 = 0.999923$ otrzymując wartości zniekształceń długości od -7.7 [cm/km] na południku osiowym do ok. $+8$ [cm/km] na brzegach strefy, które określono zgodnie z przebiegiem granic powiatów. Poszczególne strefy układu oznaczamy umownie: 2000/15, 2000/18, 2000/21, 2000/24 wskazując równocześnie odpowiednią długość geodezyjną L_0 południka osiowego strefy (L_0 równe odpowiednio: 15° , 18° , 21° , 24°).



Rys.2. Obraz sekcji 1:10000 na styku stref 2000/21 i 2000/24

Podział na strefy minimalizuje wielkości liniowych zniekształceń odwzorawczych (taki był główny cel projektu układu), ale niestety, tworzy dla każdej z nich odrębny układ kartograficzny (rys. 2), co będzie stwarzać pewne problemy dla dużych, międzystrefowych projektów inwestycyjnych (jak np. trasy komunikacyjne).

Dla jednostrefowego układu „1992” (rys.3) skala na południku osiowym ($L_0 = 19^\circ$) wynosi $m_0 = 0.9993$, co oznacza zniekształcenie na tym południku wynoszące -70 [cm/km]. W miarę oddalania się od południka osiowego zniekształcenie to maleje bezwzględnie do 0, a następnie wzrasta maksymalnie do ok. $+80$ [cm/km] na wschodzie (w okolicach Hrubieszowa).

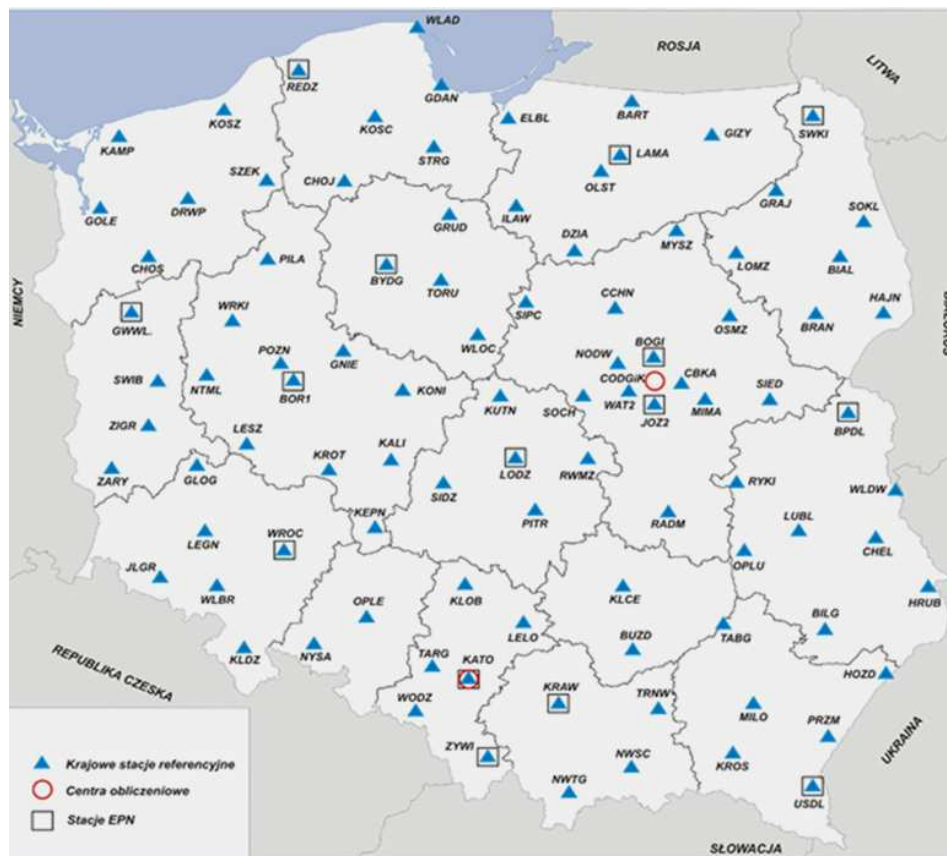


Rys. 3. Układ 1992: a) zasada tworzenia współrzędnych; x_{GK} , y_{GK} – współrzędne oryginalnego odwzorowania Gaussa - Kruegera, b) izolinie elementarnych zniekształceń odwzorowawczych długości [cm/km].

3. Układ współrzędnych a układ odniesienia

Pojęcie układu współrzędnych jest kategorią teoretyczną (projektem matematycznym), natomiast układ odniesienia oznacza już zrealizowany fizycznie układ współrzędnych. Owa realizacja dokonuje się poprzez punkty osnów geodezyjnych, począwszy od tych najwyższego rzędu (stacje obserwacyjne) poprzez osnowy podstawowe, szczegółowe i pomiarowe. Można powiedzieć, że układ odniesienia ma różne poziomy (rzędy) realizacji.

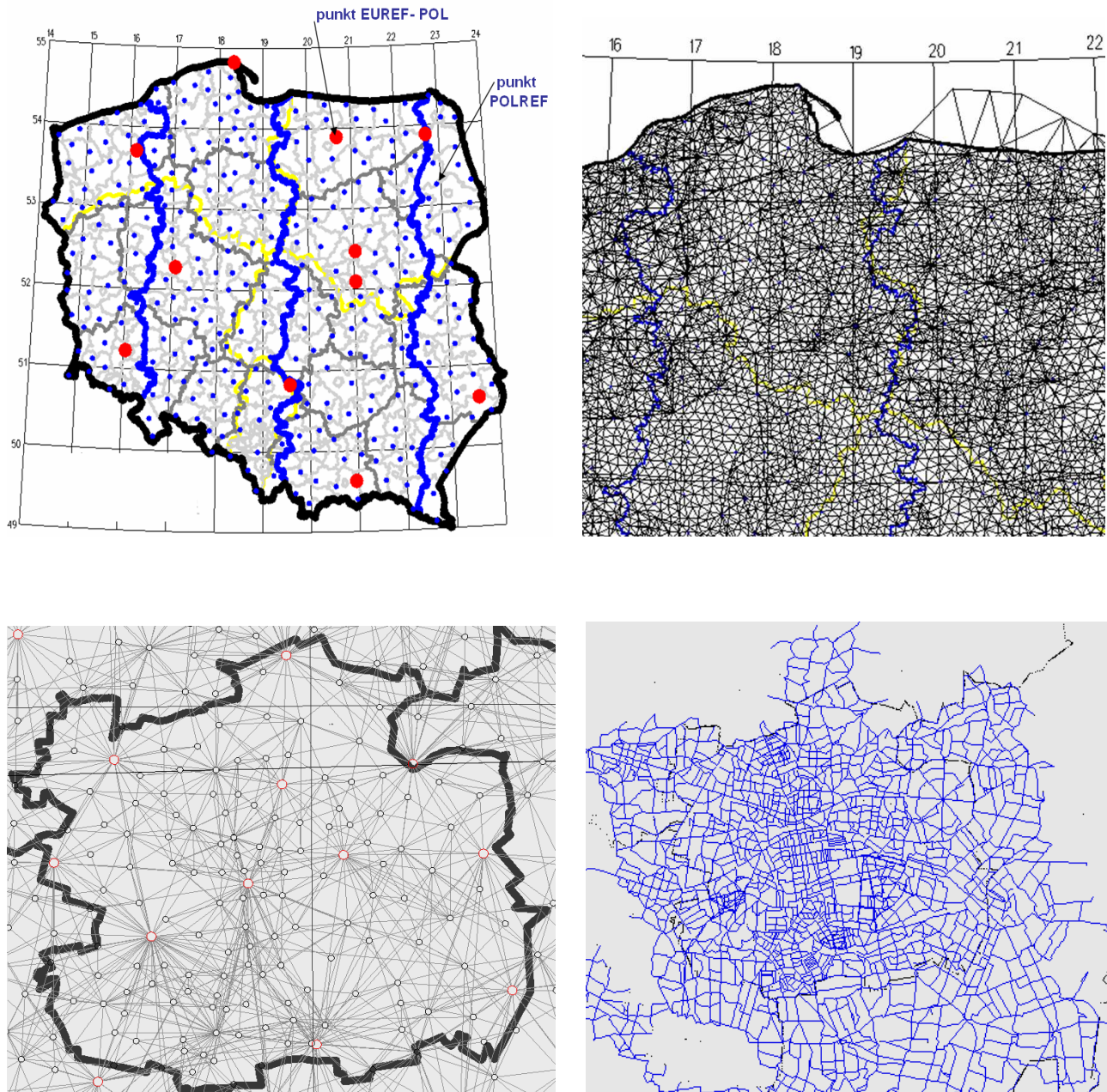
W Polsce, najwyższym rzędem realizacji europejskiego układu odniesienia ETRF'89 są obecnie stacje referencyjne systemu ASG-EUPOS (w tym specjalny priorytet mają niektóre stacje objęte europejskim systemem stacji permanentnych EPN – rys. 4). Precyzyjne serwisy nawigacyjne tego systemu: NAWGEO (RTK), POZGEO (z głównym modułem automatycznego postprocessingu APPS), POZGEO-D (udostępnianie danych w formacie RINEX dla tworzenia lokalnych sieci wektorowych GPS obejmujących najbliższe stacje referencyjne), pozwalają na lokalizację punktu z dokładnością kilkucentymetrową - zob. opis systemu: www.asgeupos.pl. Stwarza to zupełnie nową jakość w pomiarach geodezyjnych. Błąd wyznaczanej pozycji ma charakter absolutny, jest określony względem osnowy najwyższego rzędu, czyli stacji referencyjnych, a nie jak w technologiach klasycznych (lokalnie), względem najbliższych punktów lokalnej osnowy geodezyjnej. Ta nowa jakość nakłada na geodezję klasyczną specjalne wymagania. Osnowy geodezyjne niższych rzędów powinny cechować się równie wysoką dokładnością bezwzględną, a nie tylko wymaganą dotychczas odpowiednio dokładnością relatywną, względem punktów osnowy wyższego rzędu.



Rys. 4. Stacje referencyjne systemu ASG-EUPOS - podstawowa realizacja układu ETRF'89 w obszarze Polski (obraz ze strony www.asgeupos.pl)

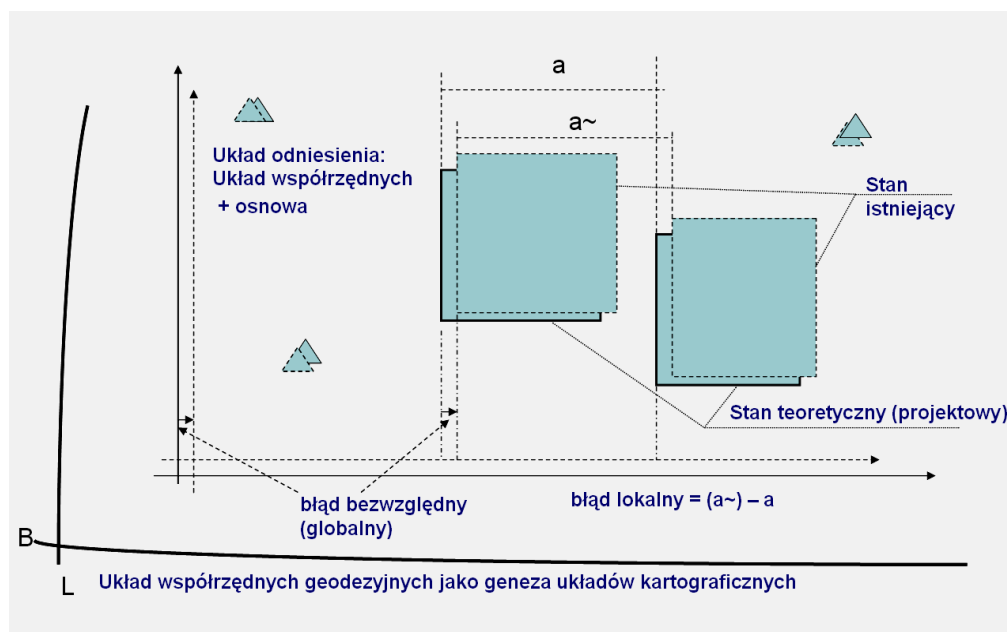
System ASG-EUPOS powstał dopiero w roku 2008, natomiast europejski odniesienia ETRF'89 (z polskimi układami: „2000”, „1992”) był realizowany w obszarze Polski już od początku lat 90-tych, najpierw poprzez bazowe sieci satelitarne EUREF-POL (11 punktów) i POLREF (350 punktów), a następnie przez powtórne wyrównanie w nowym układzie dawnej sieci astronomiczno-geodezyjnej i triangulacji wypełniającej (ok. 6500 punktów) jako obecnej I klasy oraz sieci klasy II, obecnie także zmodernizowanej techniką GPS (w sumie ok. 65000 punktów) – rys. 5. Obecnie trwają jeszcze prace związane z przeliczeniami i modernizacjami osnów klasy III.

Stacje systemu ASG-EUPOS w stosunku do pozostałych osnów krajowych (EUREF-POL+POLREF + I + II klasa), są wyznaczone precyzyjnie, w wielodobowych sesjach obserwacyjnych, z dokładnością milimetrową, w układzie ITRF'2005. Pozostaje problem pewnej niespójności dokładnościowej na przeciętnym poziomie kilku centymetrów stacji ASG-EUPOS z wymienionymi osnowami krajowymi, które zostały wyznaczone wcześniej na epokę '1989. Różnice mają charakter systematyczny - można je (szczególnie w specjalnych pomiarach precyzyjnych) identyfikować i uwzględnić. W aktualnych pomiarach związanych z zakładaniem i modernizacją osnów poziomych III klasy, gdzie niemal powszechnie stosuje się już serwisy ASG-EUPOS, nie dokonuje się w istocie rozróżnienia pomiędzy układem realizowanym przez stacje ASG-EUPOS, a punktami I i II klasy czy też siecią POLREF, jakkolwiek nie jest to podejście w pełni ścisłe i może się objawiać niezgodnościami wewnętrznymi sieci wektorowych GPS, w których wykorzystuje się jako nawiązania zarówno stacje referencyjne (serwis POZGEO-D) jak też punkty POLREF, czy też punkty I i II klasy. Trzeba jednak stwierdzić, że jakkolwiek korekta układu związana ze zmianami epokowymi układu europejskiego nie jest już praktycznie możliwa, ponieważ prace związane z wdrażaniem tego układu (reprezentowanego przez układy: „2000”, „1992”) trwają w Polsce już od wielu lat. Odbywa się to na bazie osnów I i II klasy obliczonych w latach 1996-99, kiedy właściwie o systemie stacji referencyjnych jeszcze nie myślano.



Rys 5. Elementy hierarchiczne lokalnej realizacji układu odniesienia: a) sieć EUREF-POL + POLREF (ok. 350 punktów), b) fragment sieci I klasy (ok. 6500 punktów), d) fragment sieci I+II klasy dla obszaru miasta Łodzi, c) rys symboliczny fragmentu sieci III klasy dla obszaru miasta Łodzi.

W wielu powiatach, dokonano już prawie kompletnego przekształcenia do układu „2000” zarówno osnów poziomych (III klasy i pomiarowych) jak też map gospodarczych (zasadniczych, ewidencyjnych) w innych zaś podobne prace są planowane lub kontynuowane. Odnosząc się w szczególności do osnów geodezyjnych należy zaakcentować istotny cel jaki powinien przyświecać tym pracom. Otóż w odróżnieniu od dotychczasowej praktyki geodezyjnej w układach: „1965” lub lokalnych, gdzie interesowała nas głównie tzw. dokładność lokalna (względna) opracowania, dzisiaj stawiamy wymagania na odpowiednią dokładność bezwzględną (absolutną), osnowy i mapy (rys. 6), w odniesieniu do osnowy najwyższych rzędów. Ma to bowiem związek z najnowszymi technologiami pomiarowymi – a w istocie z serwisami ASG-EUPOS. Chcemy bowiem, by pozycja wyznaczona w tym systemie odpowiadała dokładnościowo pozycji wyznaczonej w oparciu o lokalne osnowy geodezyjne. W przeciwnym razie mielibyśmy swoisty dualizm układów odniesienia, inny z osnów lokalnych, a inny z ASG-EUPOS

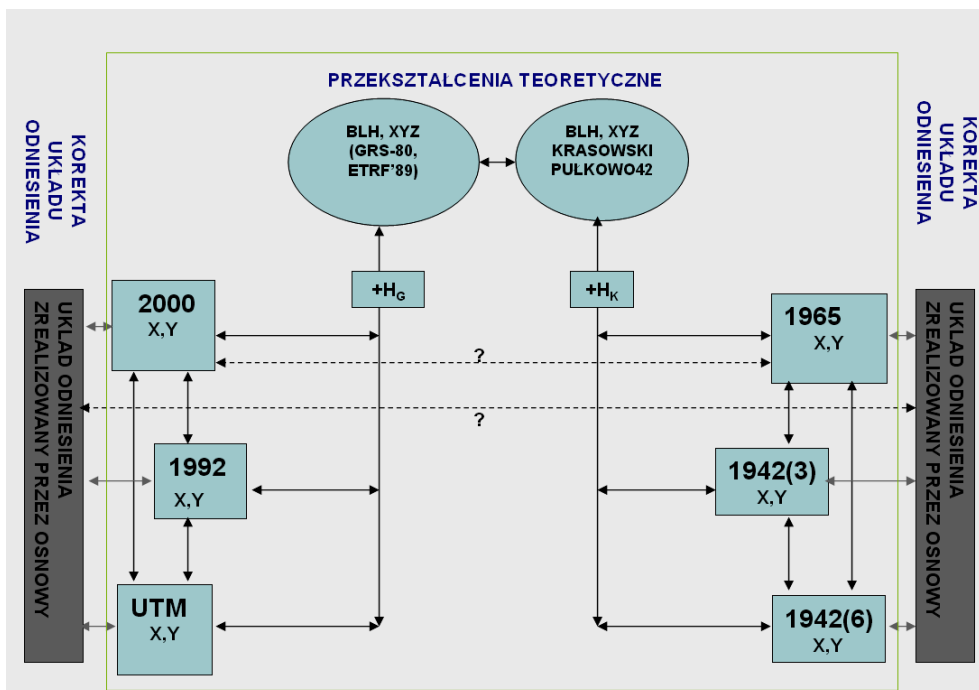


Rys.6. Ilustracja błędu bezwzględnego (globalnego) i lokalnego na mapie w układzie odniesienia zrealizowanym przez osnowy geodezyjne; o błędzie bezwzględnym położenia obiektu decyduje odpowiednio błąd bezwzględny (globalny, absolutny) osnowy.

W układzie „1965” błąd bezwzględny jest porównawczo bardzo duży (w strefie 3 sięga nawet 90cm, a przeciętnie w różnych wynosi od 17 do 44 cm – por. tab. 1), ale w przeszłości (przed epoką GPS, która dopiero ten efekt identyfikowała) nikogo to specjalnie nie interesowało. Dzisiaj, w układzie „2000”, ze względu na uprawiane technologie mamy sytuację zupełnie odmienną. Projektując, modernizując, wyznaczając lub przeliczając osnowy dbamy o ich wysoką dokładność bezwzględną, na co pozwala powszechna już w zastosowaniu technika GPS i system ASG-EUPOS. Można powiedzieć, że głównie system ASG-EUPOS (nowe „zjawisko” w polskiej geodezji) wymusza niejako nowe wymagania dokładnościowe dla osnów lokalnych, zwłaszcza osnów III klasy. Trzeba stwierdzić, że wobec nowych technologii zrodził się też projekt całkowitej rezygnacji z osnów pomiarowych. Często są to bowiem osnowy adaptowane z dawnych sieci poligonizacji technicznej, nie spełniających obecnych wymogów dokładnościowych, a w „zderzeniu” z nowymi technologiami mogą prowadzić do niepożądanych skutków jakościowych, a nawet do pewnej degradacji osnów nowych.

Niemal powszechnym zadaniem (realizowanym w szerokim zakresie zwłaszcza w roku bieżącym w związku z rychłą już koniecznością przejścia na układ „2000”) jest przeliczanie do układu „2000” istniejących już fizycznie i wyznaczonych dawniej w układzie „1965” osnów poziomych III klasy. Przyjmując, że wszystkie osnowy klasy wyższej reprezentują z pewną akceptowaną dokładnością w skali kraju nowy układ odniesienia (dane dotyczące tych osnów w układach: „1992”, „2000” są zawarte w bazie GEOS w CODGiK), najbardziej adekwatną metodą obliczenia osnów III klasy, w aspekcie omówionych kryteriów dokładnościowych, jest metoda ścisłego wyrównania sieci. Warunki poprawnego wyrównania sieci i ich obliczenia w układzie „2000”, w tym z ewentualnym wykonaniem i wykorzystaniem dodatkowych pomiarów, w szczególności sieci klasycznych zintegrowanych z pomiarami GPS będą omówione w kolejnym punkcie pracy. Tutaj wyjaśnimy jeszcze związki pomiędzy dawnym i nowym układem odniesienia, realizowanym przez tę samą fizycznie osnowę, która jest przedmiotem przeliczenia.

Związki między układami odniesienia można traktować jako związki pomiędzy współrzędnymi punktów osnowy, wyznaczonymi pierwotnie w układzie „1965” lub lokalnym i obecnie, niezależnie w układzie „2000”. Rys. 7 objaśnia symbolicznie, że związki pomiędzy układami odniesienia, a teoretycznymi (projektowanymi) układami współrzędnych różnią się na wejściu i wyjściu o wielkości, które można utożsamiać z błędami realizacji odpowiednich projektów układów.

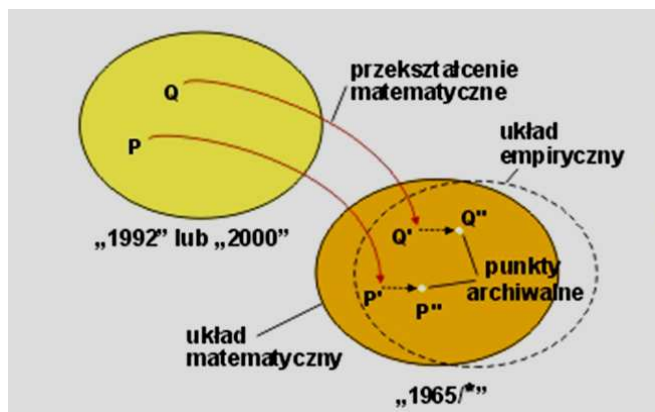


Rys.7. Związki pomiędzy układami odniesienia różnych systemów; linią przerywaną zaznaczono możliwe bezpośrednie przekształcenia pomiędzy układami odniesienia, zrealizowanymi niezależnie przez tę samą fizycznie osnowę geodezyjną, liniami ciągłymi zaznaczono teoretyczne przejścia pośrednie pomiędzy układami współrzędnych.

Tab.1. Efekt zastosowania korekty ogólnej (globalnej) dla układu „1965

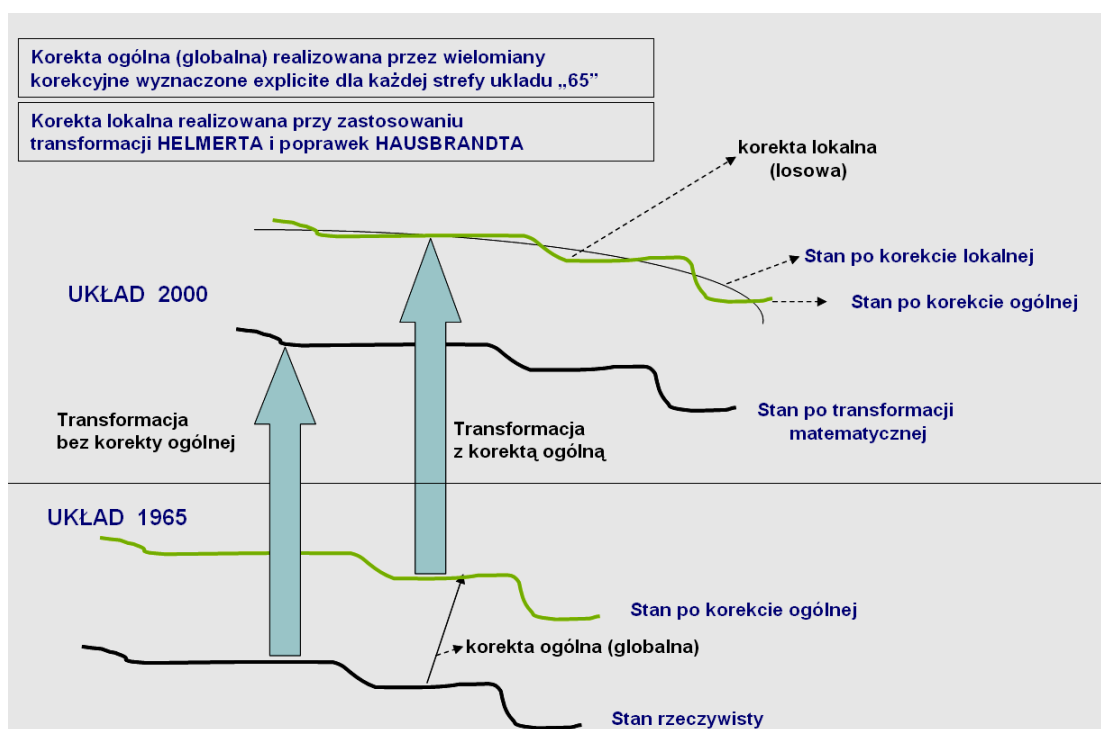
STREFA „65”	liczba punktów I+II klasy	Statystyki odchyłek bezwzględnych w q% punktów lub [n] liczebność dla próbek q% < 1%											Odchyłki średniokwadratowe [m]		
		przedziały odchyłek [cm]											sx	sy	
		00	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100			
PRZED KOREKTĄ															
1	22979	14	35	27	18	4	1	[12]	-	-	-	0.17	0.22		
2	13407	12	28	21	27	10	1	-	-	-	0.22	0.23			
3	12798	10	30	24	14	10	5	4	2	1	[5]	0.25	0.27		
4	14311	16	28	19	16	12	8	[42]	[1]	-	-	0.28	0.17		
5	6286	[1]	[5]	2	20	69	9	1	[5]	-	-	0.44	0.11		
PO KOREKCIE															
1	22979	97	2	[7]	[2]	-	-	-	-	-	0.03	0.04			
2	13407	99	1	[4]	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03			
3	12798	99	1	[5]	[1]	-	-	-	-	-	0.02	0.02			
4	14311	99	1	[7]	[2]	[1]	-	-	-	-	0.03	0.03			
5	6286	99	1	[7]	[6]	[2]	[1]	-	[1]	-	0.03	0.02			

W analogii do innej dyscypliny, możemy sobie wyobrazić relacje (odchyłki) pomiędzy projektem jakiegoś obiektu a wynikiem realizacji powykonawczej. Gdyby przyjąć, że pomiędzy układami odniesienia zachodzą związki czysto matematyczne, wówczas transformując punkty osnowy z jednego układu na drugi otrzymalibyśmy efekt uwidoczniiony na rys. 8.



Rys.8. Ilustracja niespójności lokalnej układów odniesienia.

W procesie transformacji pomiędzy układami odniesienia (metodę transformacyjną stosujemy w zasadzie tylko do konwersji map, punktów granicznych, ale także, chociaż z pewnym ryzykiem, do przeliczeń współrzędnych punktów osnow pomiarowych) odchylenia pomiędzy układem współrzędnych (teoretycznym) a układem odniesienia kompensuje się poprzez stosowanie tzw. korekt empirycznych (rys. 9). Odchylenia (tym samym korekty) w układzie „1965” są znacznie większe niż w układzie „2000” (o tym decyduje błędność osnowy). Korekty w układzie „1965” mają częściowo składnik systematyczny (zwany korektą ogólną lub globalną), wynikający z deformacji całej strefy układu „1965”, oraz składnik losowy, zwany korektą lokalną, a wynikający z błędności lokalnej realizacji układu odniesienia na różnych poziomach (rzędach) osnowy. Korekta ogólna została wyznaczona w postaci wielomianowych funkcji interpolacyjnych, aproksymowanych w oparciu punkty dostosowania I i II klasy. Efekt zastosowania tej korekty ilustruje wynik testów wykonanych na wszystkich punktach osnowy I i II klasy podany w tabeli 1. Funkcje interpolacyjne wyznaczają pewne zgeneralizowane wartości poprawek do współrzędnych. Zostały one zaimplementowane w identycznej postaci we wszystkich polskich programach do obliczeń geodezyjnych i opracowań kartograficznych.



Rys. 9. Interpretacja korekt przy transformacji $xy_{65} \Leftrightarrow xy_{2000}$

Celem dokładniejszego wpasowania obiektów transformowanych do układu odniesienia stosuje się oprócz powyższego korektę lokalną (rys. 9), opartą na punktach osnów geodezyjnych wyznaczonych w obu układach, tworzących zbiór punktów dostosowania. W stosowanych algorytmach transformacji korekta lokalna z założenia ma eliminować sumaryczny efekt losowych odchyleń lokalnych zarówno układu pierwotnego („1965”) jak też układu wtórnego („2000”). Realizuje się ją na płaszczyźnie układu wtórnego („2000”) poprzez zastosowanie transformacji HELMERTA i wyrównania powstałych odchylek metodą HAUSBRANDTA. Zasada korekty lokalnej jest opisana szczegółowo w Wytycznych Technicznych G-1.10 [5].

Można rozważyć zastosowanie metody transformacyjnej, zamiast metody ścisłego wyrównania, do przeliczeń osnów geodezyjnych, ale wadliwość takiego sposobu polega na tym, że korekta lokalna nie uwzględni faktycznej (nieznanej) deformacji tych osnów w układzie pierwotnym, bo korekta ta jest oparta na punktach klasy wyższej niż klasa osnowy transformowanej. Oczywiście, mogą zachodzić różne przypadki szczególne (hybrydowe) opracowań, które należy oceniać jednostkowo.

4. Obliczenia osnów klasycznych III klasy i ich integracja z pomiarami GPS w układzie „2000”

4.1. Ogólne uwagi dotyczące przeliczeń osnów istniejących do układu „2000”

Poprawność przetworzenia istniejącej osnowy z układu „1965” (lub lokalnego) do układu „2000” (lub „1992”), z zastosowaniem ścisłego wyrównania sieci, zależy od kilku warunków, przy czym ich spełnienie niekoniecznie musi zależeć tylko od możliwości pozyskania odpowiednio kompletnych zbiorów danych z istniejącego zasobu (operatów technicznych). Wiele zależy od poprawności samej metodologii przetwarzania, na przykład w zakresie eliminacji różnych czynników systematycznych, czy też założeń w zakresie modelu stochastycznego obserwacji (wag). Ponadto, dla zapewnienia odpowiedniej (bezwzględnej) dokładności osnowy może być konieczne wykonanie dodatkowych pomiarów, wzmacniających wewnętrzną konstrukcję sieci lub ulepszających jej warunki nawiązania, do czego służy głównie technika GPS. Powyższa problematyka obejmuje następujące tematy szczegółowe:

- a) kompletność i dostateczna gęstość punktów nawiązania sieci,
- b) kompletność i wiarygodność danych obserwacyjnych oraz niezawodność sieci
- c) dokładność sieci, diagnostyka kontrolna ze względu na występowanie błędów grubych,
- d) poprawność redukcji i eliminacji błędów systematycznych,
- e) poprawność zastosowania odpowiednich modeli stochastycznych (wag),
- f) wybór i poprawność zastosowania metod i algorytmów przetwarzania,
- g) ocena poprawności wyników wyrównania sieci,
- h) diagnostyki kontrolne baz danych dotyczących osnów.

Kompletność i dostateczna gęstość punktów nawiązania.

Kompletność oznacza, że punkty nawiązania sieci w układzie „1965” powinny znajdować się również w bazie osnów układu „2000”. Jeśli np. przetwarzaniu podlega osnowa III klasy, wówczas wymagamy, by wszystkie punkty oparcia tej sieci w układzie „1965” istniały już w bazie osnowy I lub II klasy w układzie „2000” (GUGiK dostarcza oryginalną bazę w układzie „1992” ale jej przekształcenie do układu „2000” jest zabiegiem czysto matematycznym). Niestety, warunek powyższy nie jest na często spełniony, tzn. niektóre punkty nawiązania w układzie „1965” (np. niektóre punkty dawnych struktur sieci triangulacyjnych lub poligonizacji precyzyjnych w osnowach kolejowych, górniczych lub specjalnych, a także niektóre punkty kierunkowe) nie znajdują odpowiedników w bazie układu „2000”. Doraźnie (dla celów wstępnej analizy jakościowej) można posłużyć się transformacjami tych punktów do układu „2000” ale dla uzyskania w pełni poprawnego produktu finalnego, należy takie punkty objąć pomiarem uzupełniającym,

np. techniką GPS. Alternatywą powinno być wskazanie i wyłączenie odpowiednich fragmentów sieci ze zbioru punktów danej klasy.

Niekiedy zdarza się również, że nawiązaniem jest punkt tej samej klasy (np. wyznaczony wcześniej w obszarze granicznym z sąsiednią jednostką administracyjną). Taka sytuacja powinna obligować do adaptacji odpowiednich fragmentów sieci „obcej” tak, by tworzyła konstrukcję technicznie poprawną, w nawiązaniu do punktów osnowy wyższego rzędu. Wyjątkiem może być sytuacja, gdy ciąg kończy się na punkcie węzłowym, który był już wcześniej wyznaczony poprawnie w układzie „2000”. Wówczas do wyrównania przyjmujemy ten punkt jako nawiązanie z błędnościami współrzędnych określonymi już we wcześniejszym procesie obliczeniowym. Jeśli jednak opisana sytuacja ma miejsce w ramach jednolitego obszaru objętego opracowywaną osnową (np. w ramach tego samego powiatu), problem może się rozwiązać automatycznie w wyniku integracji różnych fragmentów sieci (podsieci) w jedną całość.

Inną kwestią jest to, czy sama gęstość nawiązań występująca w pierwotnej strukturze sieci poligonowej (np. zakładanej według dawnej instrukcji B-III) jest wystarczająca dla poprawnego (zgodnie z wymogami aktualnych przepisów technicznych) wyznaczenia tej sieci w układzie „2000”. W grę wchodzi np. zbyt długie ciągi, fragmenty sieci oparte na niewielkiej liczbie punktów nawiązania, czyli generalnie niedostateczna gęstość punktów osnowy wyższego rzędu, jako punktów oparcia sieci. Analiza istniejącego układu nawiązań w odniesieniu do wymagań aktualnych przepisów technicznych, powinna skłaniać do wytypowania pewnych punktów (np. niektórych węzłów poligonowych, punktów środkowych długich ciągów) koniecznych do niezależnych wyznaczeń bezwzględnych techniką GPS, co zapewni odpowiednie „ułożenie” sieci obliczanej bezpośrednio w układzie globalnym realizowanym przez stacje ASG-EUPOS.

Dla pewnej profilaktyki związanej z dobrym wpasowaniem całości osnowy w globalny układ odniesienia takie pomiary uzupełniające są bardzo wskazane, niezależnie od wyników jakiejś wstępnej analizy jakościowej osnowy istniejącej. Posłuży to bowiem pewnemu „komfortowi” prac geodezyjnych realizowanych nową techniką pozycjonowania w systemie ASG-EUPOS w połączeniu z techniką klasyczną, bo skutkiem tego powinien być efekt, że układ odniesienia realizowany przez stacje referencyjne „nie odstaje” od układu reprezentowanego przez osnowy klasyczne.

Kompletność i wiarygodność danych obserwacyjnych oraz niezawodność sieci

Przy przetwarzaniu dawnych materiałów analogowych (wykazów miar i wykazów współrzędnych) w formę cyfrową istnieją ryzyka popełnienia różnego rodzaju błędów. Przede wszystkim najważniejsza jest ocena wiarygodności źródła danych. Pisane ongiś ręcznie wykazy miar mogą zawierać wiele błędów grubych. Można nawet orzec „radykałnie” (z korzyścią dla jakości produktu końcowego), że same manualne wykazy miar, jeśli nie towarzyszą im równoległe jakiegokolwiek dokumenty kontrolne (np. dzienniki polowe, zasoby bazowe operatorów technicznych) nie nadają się do wykorzystania, a nawet mogą być w efekcie szkodliwe dla określonego celu przetwarzania. Istotny błąd w kącie lub długości może się równie dobrze „wpasować” w słabą lokalnie konstrukcję geometryczną sieci (np. długi ciąg), ale wynikowe współrzędne punktów ciągu będą obciążone istotnym błędem. Dlatego wykorzystanie wszelkich przepisanych dokumentów analogowych może być w powyższym sensie ryzykowne. Dla „dobrej sprawy” takie dokumenty nie powinny być więc wykorzystywane. Najbardziej adekwatne stają się więc miary „pobrane” wprost z dzienników pomiarowych lub oryginalnych dokumentacji zasobów bazowych operatorów technicznych (tabele lub tabulogramy obliczeniowe), gdzie wykonawcy dokonywali równoległe kontroli i weryfikacji odpowiednich miar.

Pomimo wiernego przetworzenia analogowych wykazów miar w postać cyfrową, mogą wystąpić lokalne braki pewnych danych, koniecznych dla uzyskania dostatecznego bezpieczeństwa (niezawodności) konstrukcji geometrycznej sieci. Przykładem mogą być sytuacje ciągów „wliczeniowych”, nie mających końcowych orientacji kątowych. Stwarzają one ryzyko zniekształcenia geometrii, zwłaszcza ciągu długiego, bo z powodu „słabości” geometrycznej takiego ciągu (tylko 1 element nadwymiarowy) jakiegokolwiek błąd jest słabo identyfikowalny, a wyniki mogą być tylko pozornie poprawne. Mniej „dolegliwe” ale również wadliwe są sytuacje braku orientacji tylko na jednym z punktów końcowych ciągu. Analogiczny efekt braku orientacji kątowej powstaje w przypadku braku w układzie „2000” danych dla jakiegoś punktu kierunkowego, pełniącego tę funkcję w układzie „1965”. Uzupełnieniem wymienionych

braków może być dodatkowy pomiar klasyczny lub techniką GPS wybranych punktów ciągu lub konstrukcji sieci w miejscu jej osłabienia geometrycznego. Dotyczy to w ogólności sytuacji, w których elementy pierwotnej struktury sieci nie odpowiadają obecnym wymaganiom technicznym.

Dokładność sieci, diagnostyka kontrolna ze względu na występowanie błędów grubych

Biorąc pod uwagę dokładność, zasięg i możliwości aktualnych technik pomiarowych i związanej z tym potrzeby odpowiednio dokładnej i spójnej z systemem ASG-EUPOS realizacji układu odniesienia przez klasyczne osnowy geodezyjne należy rozważyć sens tworzenia i konserwacji w układzie „2000” osnow, których błąd położenia punktu jest większy od 0.10m. Do tej grupy będą należeć osnowy kwalifikowane aktualnie jako pomiarowe, a także zakładane dawniej, obecnie niesklasyfikowane sieci poligonizacji, dla których struktura nawiązań w wielu przypadkach nie ma odpowiedników w bazie nowego układu („2000”, „1992”). Pewnym kryterium kwalifikacji wstępnej może być technika pomiarów długości. Osnowy zakładane ongiś przy wykorzystaniu pomiarów bezpośrednich taśmą lub dalmierzami optycznymi, w zasadzie nie kwalifikują się do obecnych wymagań dokładnościowych.

4.2. Problem odtworzenia i scalania podsieci klasycznych (utworzonych na podstawie różnych operatów jednostkowych)

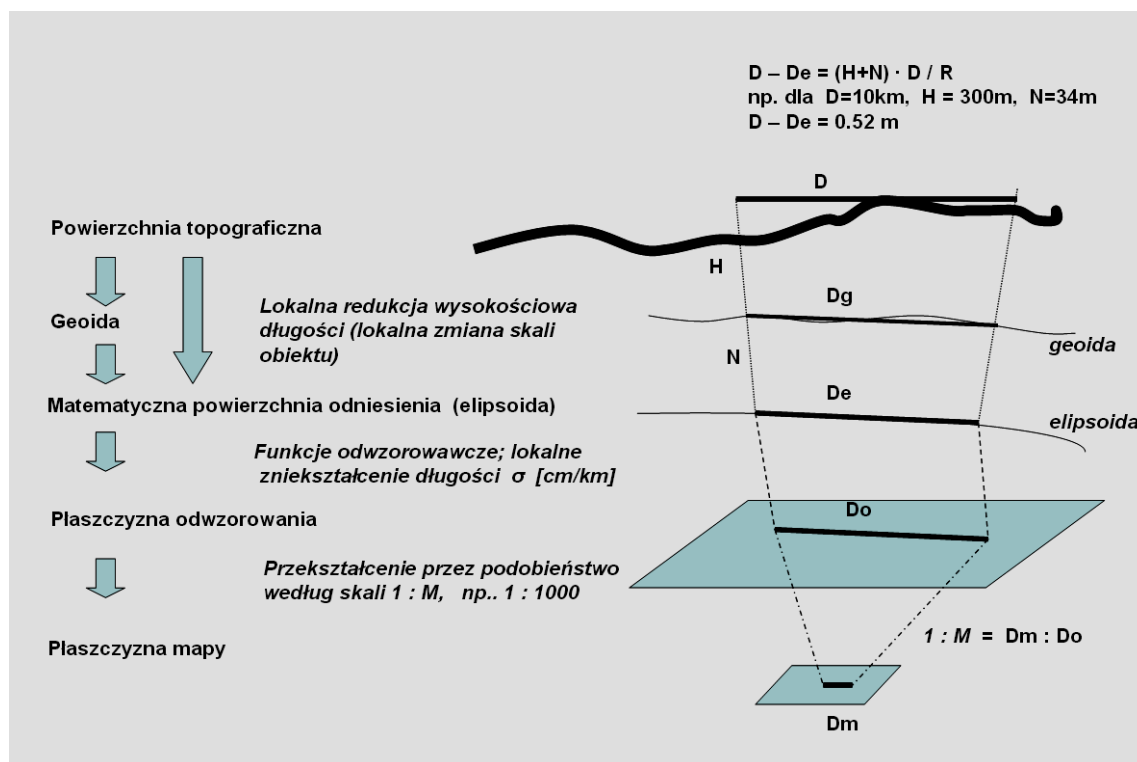
Podsiecią nazywamy fragment sieci (np. w obszarze powiatu) objęty oddzielnym procesem pomiarowo-obliczeniowym (operatem jednostkowym) o jednorodnej charakterystyce techniczno-dokładnościowej. Łączenie podsieci, często pochodzących z różnych epok, technik i metod pomiaru, w jeden układ obserwacyjny jest uzasadnione tylko wówczas, gdy:

- podsieci mają wspólne punkty (połączenie w jeden układ polepszy warunki wyznaczalności),
- pomiędzy łączonymi podsieciami nie ma znaczącej różnicy dokładnościowej. Na ogół nie nadają się do wspólnego wyrównania dawne sieci poligonowe, zawierające pomiary długości taśmą, czy dalmierzem optycznym, z sieciami nowszymi, gdzie pomiary długości wykonano już dalmierzem elektromagnetycznym.

Istotnym warunkiem poprawnego połączenia układów obserwacyjnych różnych podsieci jest wcześniejsze doprowadzenie tych podsieci do wspólnej przestrzeni (wspólnego poziomu odniesienia). Dla osnow szczegółowych III klasy chodzi tu o miary długości. W zasobach archiwalnych, z których korzystamy, miary te mogą być już w różnym zakresie przetworzenia - nie zawsze są to, pochodzące wprost z pomiaru, długości horyzontalne – mogą też być na przykład długości zredukowane do układu „1965” albo miary długości obarczone pewnym niewiadomym błędem systematycznym: niedokładnym zredukowaniem na poziom morza (na geoidę), nieuwzględnieniem istotnej poprawki komparacyjnej dalmierza. Dlatego pierwszy etap procesu obliczeniowego (przed utworzeniem zintegrowanego układu obserwacyjnego) powinien polegać na kompletnym, niezależnym odtworzeniu i wyrównaniu każdej podsieci (objętej danym operatem jednostkowym) w układzie pierwotnym, wraz z usunięciem ewentualnych błędów systematycznych długości i sprowadzenie wszystkich miar długości do poziomu geoidy (n.p.m.). W tym zadaniu dokonuje się równocześnie ustalenia optymalnego sposobu wagowania elementarnych obserwacji (określenie ich błędów średnich). Generalnie, w pierwszym etapie przetwarzania można wyróżnić następujące zadania elementarne dotyczące każdej podsieci:

- a) Przetworzenie danych obserwacyjnych i wykazów współrzędnych z formy analogowej na postać cyfrową i sformatowanie ich do postaci wymaganej przez program komputerowy wyrównania sieci.
- b) Wstępne wyrównanie podsieci w układzie pierwotnym („1965” lub lokalnym), wraz z usunięciem ewentualnych defektów liczbowych, w tym błędów grubych w miarach i numeracji punktów; rozszerzenie numeracji o identyfikatory (godła lub numery ewidencyjne) sekcji mapy 1:10000.
- c) Redukcja wszystkich długości na poziom morza (na geoidę) wraz z usunięciem ewentualnego czynnika systematycznego oraz ustalenie optymalnego wagowania obserwacji.
- d) Finalne wyrównanie podsieci w układzie pierwotnym.

Przytoczymy dla jasności kilka komentarzy do powyższych zadań: rys. 10 pokazuje symbolicznie, jak na poszczególnych etapach przejścia z przestrzeni pomiarowej na płaszczyznę odwzorowawczą układu zmienia się miara i skala obiektu liniowego. W rozważanym etapie przetwarzania każdej podsieci sprowadzamy wszystkie długości tylko do poziomu geoidy, natomiast kolejne redukcje – najpierw na elipsoidę, a następnie na płaszczyznę układu odwzorowawczego (tutaj „1965” ale w finalne wyrównania sieci zintegrowanej - do układu „2000” lub „1992”) dokonuje zazwyczaj program komputerowy w ramach procesu wyrównania sieci, po określeniu odpowiedniego rodzaju układu.



Rys. 10. Redukcja obiektów geometrycznych z przestrzeni pomiarowej na płaszczyznę odwzorowawczą (redukcje pośrednie: na geoidę i elipsoidę).

Rozszerzenie numeracji własnej punktów o identyfikatory sekcji 1:10000 jest istotne ze względu na łączenie podsieci jeden układ obserwacyjny i możliwość powtórzenia numeru własnego w innym obszarze sieci zintegrowanej.

Powstaje jeszcze problem punktów wspólnych różnych podsieci, który należy zweryfikować jeszcze przed dokonaniem scalenia układów obserwacyjnych. Otóż może się okazać, że punkty teoretycznie tożsame mają w ramach kontrolnych wyrównań podsieci istotnie różniące się współrzędne na poziomie układu pierwotnego. Koniecznym jest więc zweryfikowanie tych sytuacji w oparciu o pewne kryterium dopuszczalności odchyłki współrzędnej, a także w oparciu o informacje zawarte w sprawozdaniu technicznym danego operatu jednostkowego. Jeśli na przykład pomiary dwóch podsieci pochodzą z różnych epok pomiarowych, w epoce późniejszej mogły nastąpić przykładowo: odtworzenia zniszczonych znaków, nieodnotowane przesunięcia w stosunku do podcentrów, niezidentyfikowane przemieszczenia znaków. Jeśli istnieją jakiegokolwiek wątpliwości co do identyczności znaków, czy wskazuje na to znacząca odchyłka współrzędnej, lepiej będzie założyć na tym etapie, że punkty teoretycznie wspólne, nie są identyczne. Na kolejnym etapie przetwarzania, przy wyrównaniu całości sieci to założenie można jeszcze zweryfikować. Założenie nieidentyczności punktów oznacza konieczność ustalenia w sąsiednich podsięciach różniących się numerów punktów, na przykład dodając w wybranym przypadku do numeru własnego literę „a”.

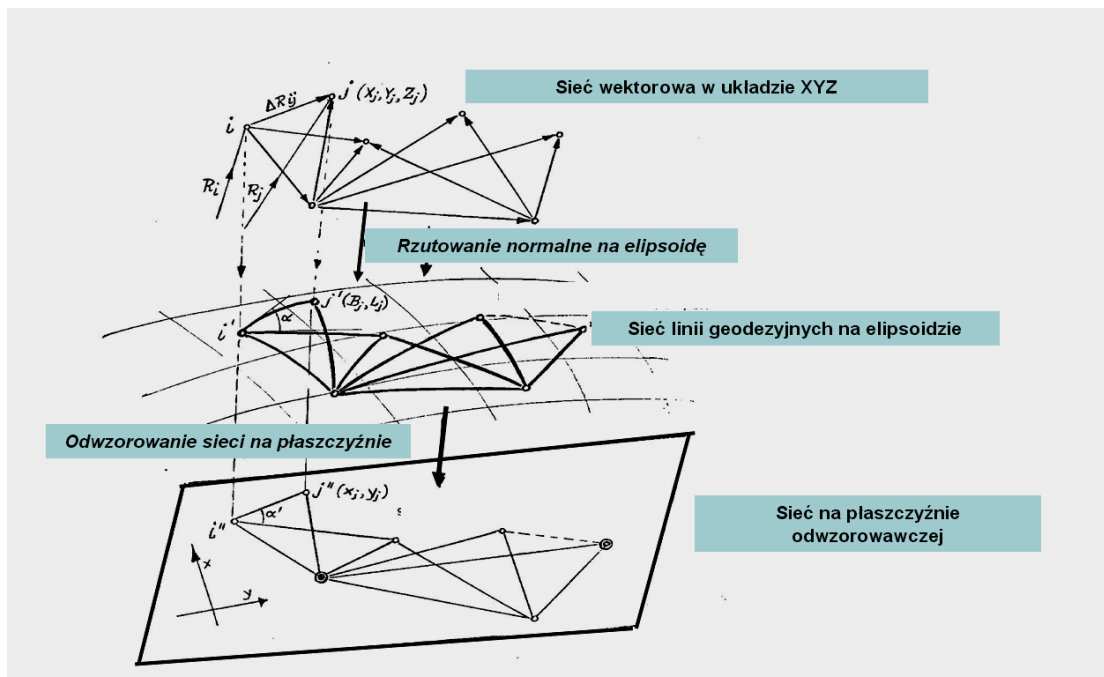
Zachowując opisane zasady diagnostyczne i metodologiczne uzyskamy podzbiory obserwacji, które po połączeniu w jedną sieć powinny „podać się” łącznemu wyrównaniu, najpierw w układzie pierwotnym

(„1965” lub lokalnym), a następnie – po stosownej wymianie elementów nawiązania – w układzie „2000” (lub też w innym układzie nowego systemu, na przykład „1992” lub elipsoidalnym, związanym z układem „2000” formułami czysto matematycznymi). Szczegóły dotyczące finalnego wyrównania pozostawiamy do jednego z kolejnych punktów niniejszej pracy, gdyż wymagają one specjalnych tematycznie komentarzy.

Wszystkie omówione powyżej zadania obliczeniowe mogą być realizowane w systemie GEONET [4], który jest stosowany obecnie w Polsce w większości prac obliczeniowych związanych z osnowami geodezyjnymi i transformacjami współrzędnych.

4.3. Dołączenie do sieci klasycznej pomiarów GPS

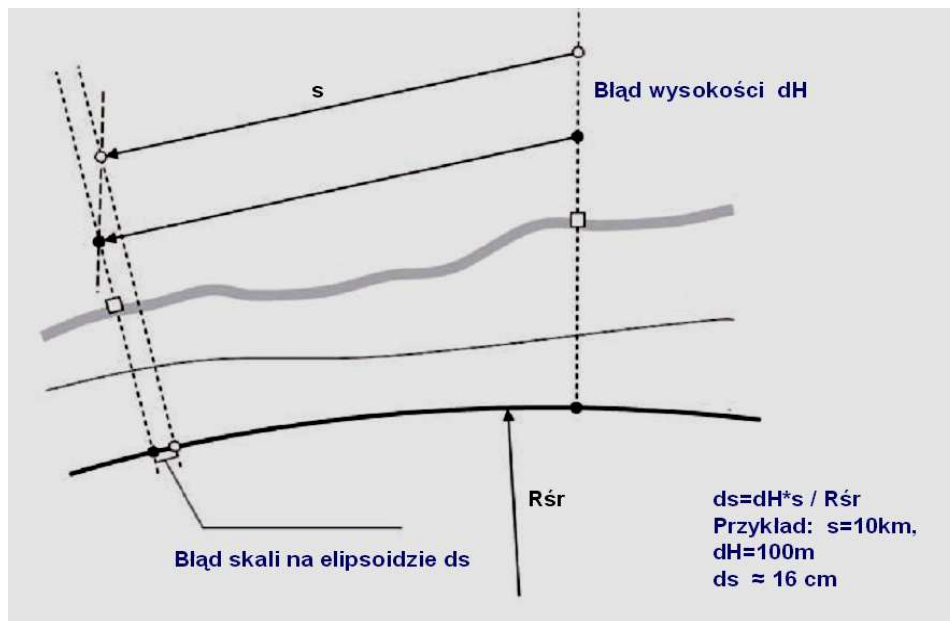
Program komputerowy GEONET [4], który ma możliwość integracji pomiarów klasycznych z wektorami GPS, zakłada że wektory te zostają wcześniej przekształcone (zrutowane) do postaci wektorów linii geodezyjnych na elipsoidzie. Ściśle biorąc, algorytm rzutowania (rys. 11) polega na tym, że rzutuje się najpierw, zgodnie z kierunkami normalnych do elipsoidy, punkty końcowe wektora. Następnie otrzymane rzuty łączy się na elipsoidzie łukami linii geodezyjnych, wyznaczając zarówno długości jak też azymuty geodezyjne tych linii (zadanie odwrotne do podstawowego zadania geodezji wyższej). Oczywiście, rzutowanie na elipsoidę GRS-80 (w układzie ETRF'89) da inne wyniki niż rzutowanie na elipsoidę Krasowskiego (kilkusekundowa zmiana azymutu oraz pewna, zależna od lokalizacji, zmiana długości linii), ponieważ, jak wiadomo, elipsoidy mają różne parametry, niecentryczne położenia wzajemne i nierównoległe osie główne (przeciętnie w obszarze Polski odstęp pomiędzy powierzchniami elipsoid wynosi ok. 34 m ale zmienia się w obie strony o kilka metrów, zależnie od położenia). Dlatego przy docelowym wyrównaniu sieci w układach nowego systemu należy w programie wybrać opcję rzutowania na elipsoidę GRS-80, natomiast dla kontrolnego wyrównania sieci (podsieci) w układzie „1965” rzutowanie należy wykonać na elipsoidę Krasowskiego.



Rys. 11 Rzutowanie wektorów GPS na elipsoidę i na płaszczyznę układu odwzorowawczego

Poprawne rzutowanie wektorów GPS na elipsoidę zależy od spełnienia bardzo ważnego warunku, aby każdy rzutowany na elipsoidę wektor nie był „zbyt” przesunięty względem rzeczywistej pozycji określonej w układzie geocentrycznym XYZ. Teoretycznie, sieć wektorowa GPS może być wewnętrznie wyrównana jako sieć swobodna, przy dowolnym jej jednopunktowym „zaczepieniu” w przestrzeni ale dla poprawnego jej rzutowania na elipsoidę owo zaczepienie nie może być dowolne. Wykazuje się, że przesunięcie w poziomie nawet o kilkadziesiąt metrów nie spowoduje znaczących zmian w otrzymanych długościach i azymutach geodezyjnych linii, natomiast przesunięcie w wysokości może mieć wpływ istotny.

Efekt zmiany wysokości ilustruje sytuacja na rys. 12 oraz podany tamże przykład: przesunięcie pionowe o 100m (być może ekstremalne) wektora o długości 10 km powoduje zmianę długości linii o ok. 16 cm. Wielkość ta zmienia się proporcjonalnie w stosunku odpowiedniej zmiany długości lub wysokości.



Rys.12. Wpływ błędu wysokości na zmianę długości rzutu wektora GPS

Trzeba podkreślić, że wektory o długości nawet kilkudziesięciu kilometrów nie są już w praktyce rzadkością, zwłaszcza jeśli stosujemy serwis POZGEO-D w systemie ASG-EUPOS. Duże długości wektorów mamy po włączeniu do sieci nawet najbliższych stacji referencyjnych.

Celem zapewnienia poprawności rzutowania wektorów GPS na elipsoidę najlepiej jest dokonać wcześniej wyrównania sieci, z założeniem jako elementów nawiązania punktów osnowy o znanych współrzędnych. W układzie „minimalnym” może to być alternatywnie:

- WARIANT 1: 1 punkt o określonych trzech współrzędnych geodezyjnych: B, L, H(elipsoidalne)
- WARIANT 2: 1 punkt o określonych dwóch współrzędnych geodezyjnych: B, L oraz 1 punkt o określonej wysokości elipsoidalnej H(elipsoidalne)

Współrzędne geodezyjne B, L (lub ich matematyczne odpowiedniki w układach kartograficznych „2000”, „1992”) są dostępne w bazie danych osnów klas I i II, a przede wszystkim dla stacji referencyjnych oraz sieci EUREF-POL + POLREF. Dla tzw. swobodnego wyrównania sieci GPS (dostatecznego dla celu zadania jakim jest rzutowanie wektorów na elipsoidę) współrzędne geodezyjne B, L dla pojedynczego punktu zaczepienia sieci można nawet pozyskać z przekształcenia współrzędnych dowolnego punktu sieci z układu „1965”.

Wysokości elipsoidalne są bezpośrednio dostępne dla stacji referencyjnych i punktów sieci EUREF-POL + POLREF ale dla minimalnego układu nawiązań (dla pojedynczego punktu) wysokość elipsoidalną, z dokładnością wystarczającą dla określonego celu można wyznaczyć pośrednio, na podstawie znanej wysokości normalnej i dostępnego numerycznego modelu geoidy. Jest bowiem:

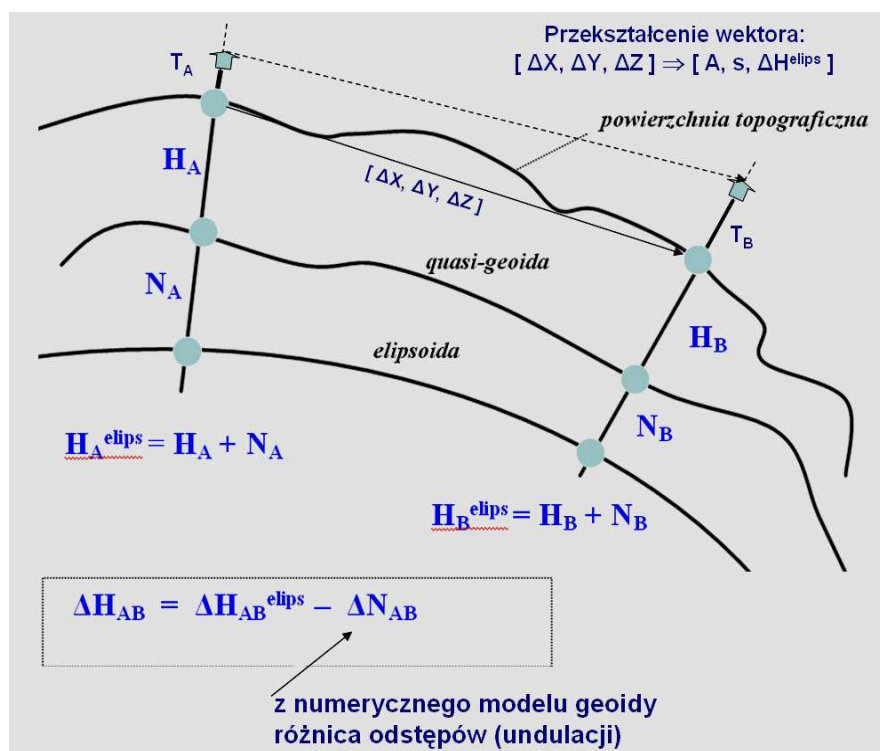
$$H(\text{elipsoidalne}) = H(\text{normalne}) + N \quad (1)$$

gdzie N jest lokalnym odstępem geoidy od elipsoidy (dla obszaru Polski wynosi przeciętnie 34m)

4.4. Zadanie niwelacji satelitarnej

W każdej sieci wektorowej GPS nie można pominąć zadania niwelacji satelitarnej jako ważnego dopełnienia do trzeciego wymiaru zadania obliczenia sieci III klasy. Przy zachowaniu pewnych warunków technicznych (dostateczny dla danej długości wektora czas trwania sesji obserwacyjnej, precyzyjny pomiar wysokości anten, odkryty horyzont – warunki określone w szczegółowych przepisach technologicznych) niwelacja satelitarna dla wektorów krótkich jest dokładnościowo porównywalna z niwelacją techniczną, ale jej wartość (dokładność względna) wzrasta wraz ze wzrostem długości wektora, ponieważ utrzymuje stałość błędu bezwzględnego.

Rys. 13. ujmuje syntetycznie zasadę niwelacji satelitarnej, z której wynika, że przeliczenie pozyskanych z wektora GPS różnicy wysokości elipsoidalnych na odpowiadającą różnicę wysokości normalnych odbywa się przy wykorzystaniu numerycznego modelu geoidy. Od różnicy wysokości elipsoidalnych odejmuje się odpowiednią różnicę wysokości (undulacji) geoidy. Dostępne aktualnie modele geoidy, wywodzą się z zasadniczego modelu geoidy grawimetrycznej, opracowanej przez prof. A. Łyszkowicza. Geoida grawimetryczna została w różny sposób dostosowana do punktów satelitarnych sieci geodezyjnych, które nawiązano równocześnie do podstawowej osnowy wysokościowej. Praktyka geodezyjna oczekuje aktualnie na zapowiadziany przez GUGiK ujednolicony model geoidy.



Rys. 13. Zasada niwelacji satelitarnej

Stosując model geoidy w sensie bezwzględnym, czyli przekształcając wprost wysokości elipsoidalne na normalne według zasady $H(\text{normalne}) = H(\text{elipsoidalne}) - N$, należy mieć pewność, czy model ten odpowiada układowi (epoce), w którym wyznacza się wysokości elipsoidalne (np. w systemie ASG-EUPS wysokości elipsoidalne są określone na epokę '2000). Jeśli zachodzi niezgodność, należy dokonać odpowiedniej transformacji undulacji (N). Na wyznaczone bezpośrednio wysokości normalne nakłada się dodatkowo rzeczywisty błąd empiryczny undulacji (pochodzący z modelu pierwotnego geoidy grawimetrycznej). Szacuje się, że wartość standardowa tego błędu wynosi przeciętnie od 1 do 3 cm w obszarach nizinnych i płaskich oraz kilkanaście centymetrów w terenach górzyszych.

W niwelacji satelitarnej, zgodnie z formułą podaną na rys. 13, stosujemy jednak model geoidy w sensie względnym. Dla wyznaczenia różnic wysokości normalnych potrzebujemy tylko różnicy wysokości

geoidy, a ta – jak wynika z wielu testów – jest co najmniej dziesięciokrotnie dokładniejsza niż sama wartość bezwzględna pojedynczej wysokości (undulacji). W tworzeniu różnicy eliminują się bowiem ewentualne lokalne błędy bezwzględne modelu geoidy. Nawet jeśli model geoidy nie jest przetransformowany na odpowiednią epokę, ewentualne jego lokalne przesunięcia pionowe zostają w tej różnicy zredukowane. Dlatego niwelacja satelitarna (w sensie różnicowym) jest istotnie odporna na ewentualne błędy systematyczne modelu geoidy.

Określony na powyższej drodze, w sieci wektorowej GPS, zbiór różnic wysokości normalnych tworzy sieć niwelacyjną zupełnie analogiczną do klasycznej sieci niwelacji geometrycznej lub trygonometrycznej. Można ją zatem wyrównywać analogicznie po określeniu odpowiednich warunków początkowych (zbiór punktów nawiązania o znanych wysokościach normalnych), można także uzupełniać tę sieć o pomiary klasyczne (różnice wysokości z niwelacji geometrycznej) tworząc zintegrowaną sieć niwelacyjną.

Istnieją też inne, transformacyjne, metody obliczeniowe niwelacji satelitarnej, lecz opisana wyżej wydaje się być najbardziej naturalną i niezawodną. Sam proces finalnego wyrównania pozwala na kontrolowanie odchyłek wewnętrznych sieci, a tym samym rzeczywistą ocenę dokładności niwelacji satelitarnej.

Metody transformacyjne opierają się na punktach dostosowania (posiadających wysokości w obu układach:

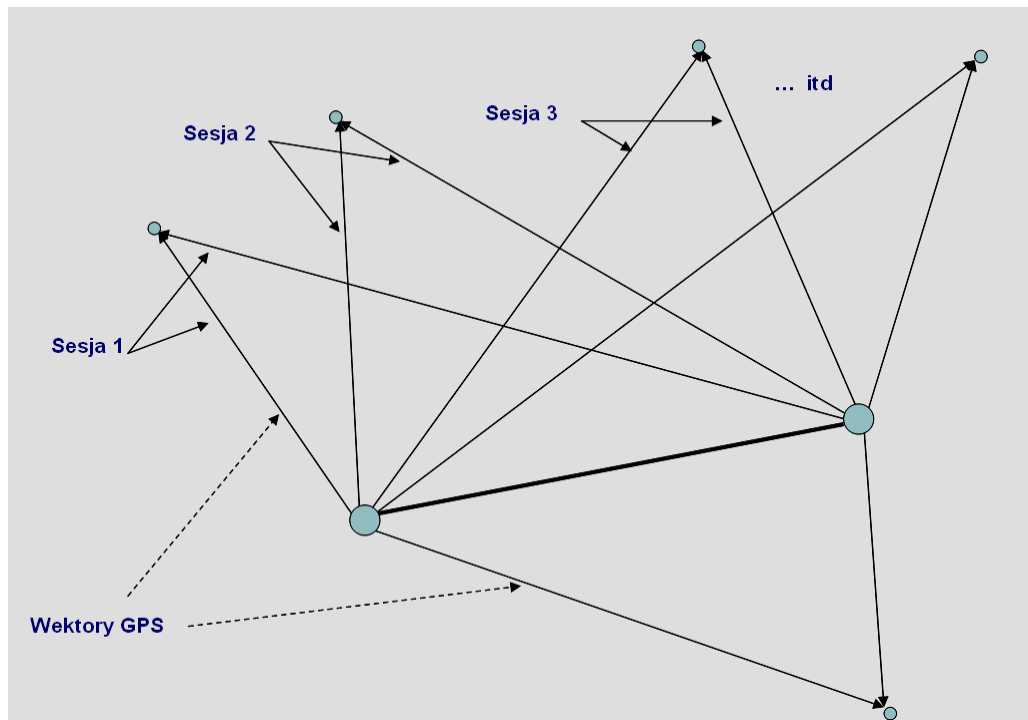
- elipsoidalne, wyznaczone z wyrównania trójwymiarowej sieci GPS,
- normalne, z niwelacji geometrycznej.

Pewne ryzyko poprawności metody transformacyjnej wynika z potrzeby równomiernego, powierzchniowego rozkładu punktów dostosowania oraz z wyboru adekwatnego dla ilości punktów dostosowania i ich rozkładu powierzchniowego, modelu transformacji (liniowa, biliniowa, kwadratowa lub wyższego stopnia). W przypadku stosowania modelu geoidy powyższe problemy odpadają (funkcję modelu transformacji przejmuje w pewnym sensie geoida, a wyrównanie sieci niwelacyjnej może być wykonane już przy ograniczonej liczbie punktów nawiązania. Oczywiście, poprawność techniczna wyrównywanej sieci niwelacyjnej stawia też wymagania na niezawodność, czyli nadwymiarowość zbioru punktów nawiązania, ale z pewnością dla metody transformacyjnej analogiczne warunki na punkty dostosowania są bardziej rygorystyczne.

4.5. Niezawodność sieci III klasy zintegrowanej z wektorami GPS

Niezawodność (bezpieczeństwo lub odporność na jakieś defekty) jest pojęciem stosowanym w wielu produktach technicznych. W sieci geodezyjnej kojarzymy je z możliwością niezależnej kontroli wyznaczeń punktów. Najprostszą miarą niezawodności w odniesieniu do pojedynczego punktu jest ilość niezależnych elementów (obserwacji) kontrolnych (dodatkowych) wyznaczających punkt. Niezależność jest tu rozumiana łącznie, zarówno w sensie geometrycznym (miary dwóch elementów wyznaczających nie pozostają we wzajemnym związku geometrycznym), jak też stochastycznym (dwie obserwacje jako zmienne losowe są wzajemnie niezależne).

Weźmy dla przykładu sytuację pokazaną na rys. 14. Pary wektorów GPS wcinających pojedyncze punkty sieci pochodzą z jednej sesji obserwacyjnej. To oznacza, że wektory wcinające są utworzone w oparciu o jeden i ten sam zbiór obserwacyjny powstały w odbiorniku na punkcie wyznaczanym. Wektory wcinające są wprawdzie niezależne geometrycznie ale nie są niezależne stochastycznie. Może się zdarzyć, że z powodu jakiegoś błędu w zapisie ciągu obserwacji fazowych spowodują niepoprawność obu wektorów.



Rys. 14. Problem niezawodności w pomiarach statycznych (przykład negatywny) – pojedyncze punkty wyznaczone w jednej sesji obserwacyjnej GPS; dwa odbiorniki są stałe, trzeci (ROWER) przemieszcza się po punktach wyznaczanych.

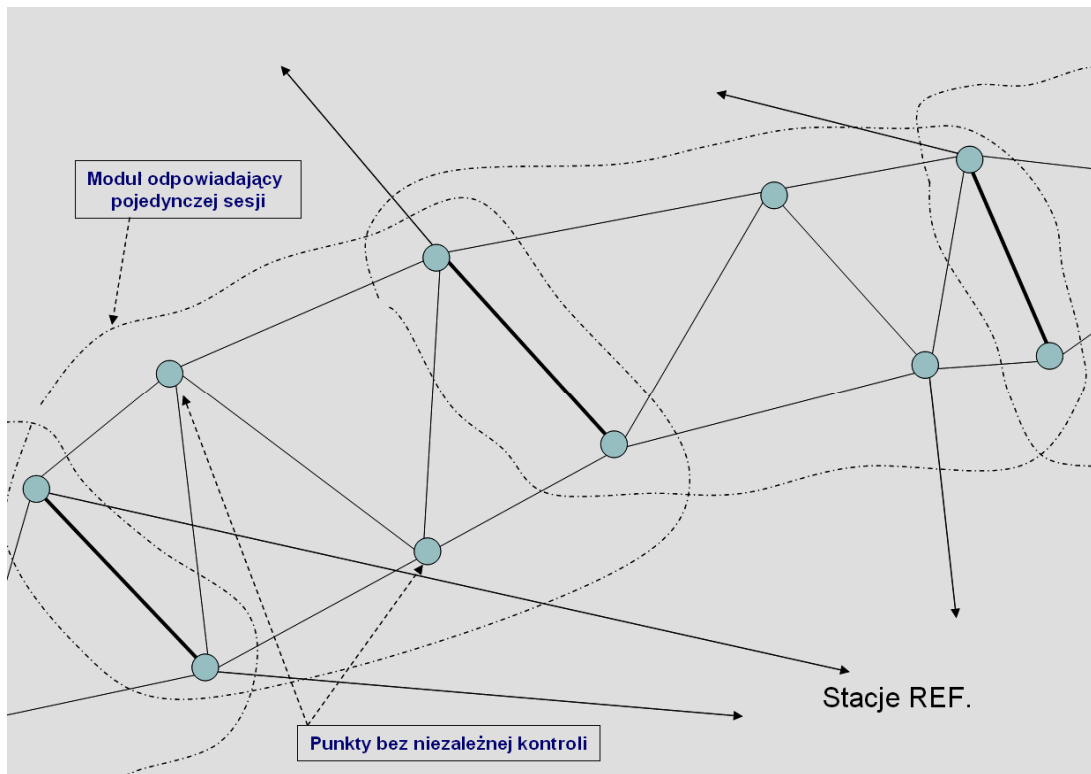
Pełna niezależność w powyższym znaczeniu byłaby spełniona, gdyby wektory wcinające pochodziły z różnych sesji obserwacyjnych. Niestety, opisana konstrukcja geometryczna w pomiarach statycznych GPS jest często stosowana, być może bez świadomości braku pełnej kontroli wyznaczenia punktu.

Podobną, ale bardziej rozbudowaną geometrycznie sytuację przedstawia rys. 15. Sieć wektorowa GPS składa się z sześciopunktowych modułów, z których każdy odpowiada obserwacjom w jednej sesji (sześć odbiorników „pracujących” równocześnie). Moduły są wiązane za pomocą par punktów. W każdym module wystąpi więc para punktów wyznaczanych tylko za pomocą wektorów pojedynczej sesji. Łatwo zauważyć, że punkty te nie mają pełnej niezależnej kontroli wyznaczenia. Można powiedzieć, że wymóg pełnej niezależności wyznaczenia staje się bardziej kosztowny (praktycznie podwaja koszt roboty) ale nie ma na to dobrej alternatywy.

Problem kontroli i niezawodności wystąpi również w przypadku korzystania z modułu automatycznego postprocessingu APPS w serwisie POZGEO systemu ASG-EUPOS [8]. Wyznaczana na zlecenie użytkownika pozycja punktu jest obliczana z wektorów do najbliższych sześciu stacji referencyjnych, ale wszystkie te wektory dotyczą pojedynczej sesji obserwacyjnej, odpowiednio do przedziału czasu obserwacji użytkownika. W rezultacie wyznaczona pozycja nie ma niezależnej kontroli. Użytkownik powinien więc zadbać o wykonanie dodatkowych pomiarów kontrolnych (klasycznych, GPS).

W szczególności może to być też powtórne niezależne wyznaczenie pozycji w serwisie POZGEO.

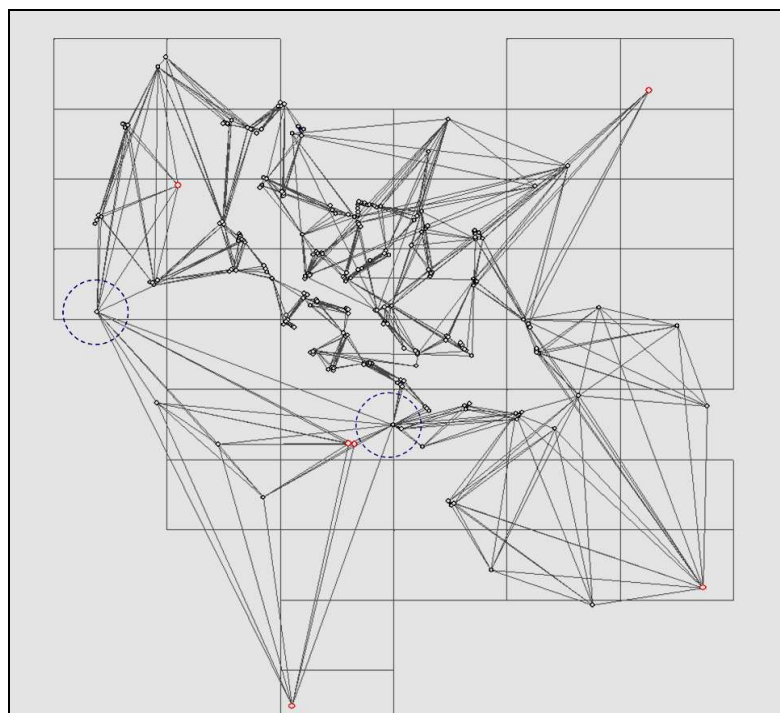
Dla ilustracji weźmy też przykład z sieci klasycznej. Wszelkie powtórzenia pomiarów tych samych elementów geometrycznych sieci albo ich prostych równoważników geometrycznych (np. pomiar jakiegoś kąta i kąta dopełniającego do „pełnego horyzontu”) nie zwiększają niezawodności sieci, bo są to elementy wzajemnie zależne geometrycznie.



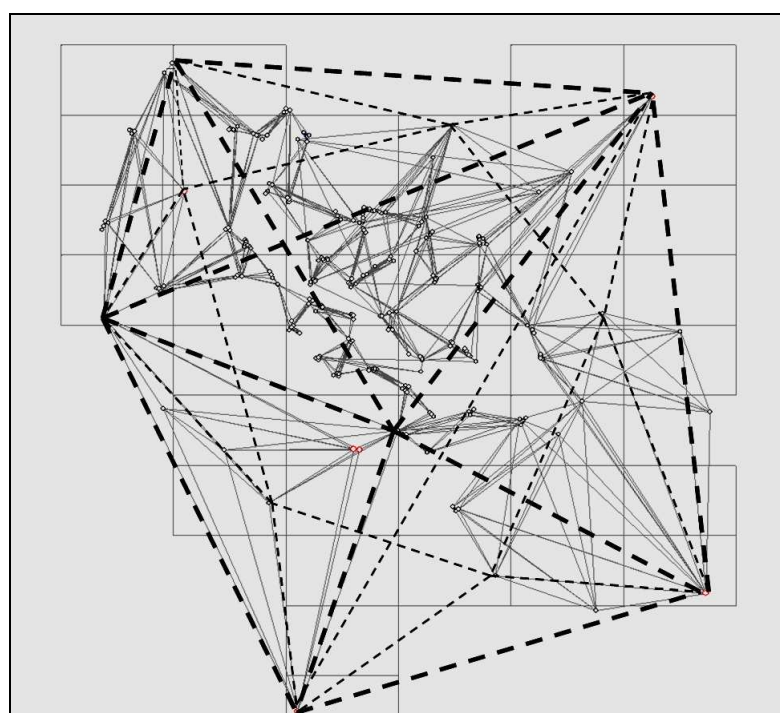
Rys. 15. Sieć modułowa GPS (przykład dla trasy komunikacyjnej) z punktami bez niezależnej kontroli obserwacyjnej (wyznaczone tylko w pojedynczej sesji obserwacyjnej).

Dla oceny niezawodności całego układu obserwacyjnego sieci nie wystarczy ograniczyć się do oceny kontroli wyznaczalności pojedynczych punktów względem innych punktów sieci. Jest to tylko pierwszy, konieczny krok oceny. Może się zdarzyć, że wszystkie punkty sieci spełniają powyższy warunek, a sieć (w całości) nie jest nawet matematycznie wyznaczalna. Problem niezawodności uogólnia się na każdy podzbiór punktów sieci i jego wyznaczalność względem punktów nawiązania. O generalnej niezawodności decyduje więc, obok struktury geometrycznej sieci również liczba i rozkład punktów nawiązania. W układzie całej sieci niezawodność przekłada się w pewnym sensie na dokładność wyznaczenia punktów: wzrost nadwymiarowości (niezawodności) polepsza dokładność sieci ale wzrost dokładności, np. poprzez wykonywanie dokładniejszych pomiarów nie przekłada się bezpośrednio na wzrost niezawodności (nawet precyzyjnie pomierzony „bagnet” lub ciąg „wiszący”) nie spełniają minimalnych warunków niezawodności (brak niezależnej kontroli).

Rys. 16 ilustruje inną wadliwość projektu sieci wektorowej GPS, w której wielopunktowe fragmenty sieci są powiązane z pozostałą częścią sieci („ryzykownie”) tylko parami punktów. W odróżnieniu od tego rysunek 17 wskazuje, że poprzez tworzenie odpowiednich struktur hierarchicznych („kłania się” klasyczna triangulacja) możemy zapewnić odpowiednią globalną niezawodność sieci GPS.



Rys. 16. Przykład sieci wektorowej GPS – konstrukcja wewnętrzna złożona ze „słabo” powiązanych modułów (zaznaczona para punktów wskazuje na sytuację krytyczną)



Rys. 17. Na sieć z rys. 16 „nałożony” przykładowo projekt hierarchicznej struktury sieci

4.5. Diagnostyka bazy punktów nawiązania I i II klasy

Zawartość, źródła i cechy lokalnej bazy danych dotyczących punktów I i II klasy

Baza GEOS w CODGiK dostarcza dla powiatowych lub miejskich ośrodków dokumentacji geodezyjnej i kartograficznej pełny zbiór informacyjny dotyczący osnowy I i II klasy w dwóch układach: „1965” i „1992”. Zbiór zapisany w formacie SWING obejmuje zasięgiem obszar powiatu lub miasta wraz z pewnym zapasem wychodzącym poza granice jednostki (ma to znaczenie dla poprawnej realizacji zadań

transformacji, np. transformacji map). Oprócz tzw. punktów macierzystych I i II klasy, tworzących jednolicie wyrównane sieci, zbiór zawiera też wszystkie punkty zespołów stabilizacyjnych (ekscentry, punkty przeniesienia) a także dane dla punktów kierunkowych (kąąt kierunkowy czyli azymut topograficzny i przybliżona odległość, zaokrąglona do 0.5 lub 1.00 m), oddzielnie dla układu „1965” i oddzielnie dla układu „1992”.

Dla celów informacyjnych dodajmy, że sieć I klasy (ok.. 6500 punktów), złożona z dawnej sieci astronomiczno-geodezyjnej i triangulacji wypełniającej, została wyrównana w roku 1996, zarówno wprost na elipsoidzie GRS-80 (w układzie ETRF'89), tj. we współrzędnych geodezyjnych B,L, jak też (kontrolnie) w układzie „1992” w nawiązaniu do istniejącej już wtedy sieci EUREF-POL+POLREF. Oczywiście, przeliczenie (B,L) \Leftrightarrow xy1992, w obu kierunkach ma charakter czysto matematyczny i stanowiło pewną kontrolę numeryczną wyrównań. Dodatkową kontrolą było użycie dwóch różnych systemów komputerowych; GEONET[4] użyto do wyrównania sieci w układach: BL, 1992, natomiast system SIEĆPOZ tylko do wyrównania w układzie „1992”. Uzyskany przeciętny błąd położenia punktu 0.025 wskazywał, że sieć ta, pomimo, że pochodziła z obserwacji klasycznych, nie ustępuje istotnie dokładnościowo sieci POLREF. Przeprowadzona w latach późniejszych inwentaryzacja punktów I klasy stworzyła podstawę do wykorzystania tych punktów we wszelkich pracach związanych z wdrażaniem nowego układu na obszar Polski. W latach późniejszych (do końca lat 90-tych), do bazy osnów poziomych w nowych układach dołączono całą II klasę (w sumie ok. 65 000 punktów). Sieć tą wyrównano najpierw w kilku grupach, a następnie również kontrolnie w całości, przy zastosowaniu algorytmów specjalnych zaimplementowanych w systemie GEONET (tzw. zmodyfikowanego procesu Gaussa-Seidla). W wielu obszarach osnowa II klasy została także zmodernizowana lub uzupełniona przy zastosowaniu statycznych pomiarów GPS.

Inne uzupełnienia bazy osnów I i II klasy dotyczyły ekscentrów i punktów przeniesienia oraz kątów kierunkowych na punkty kierunkowe. Ekscentry i punkty przeniesienia wyznaczono w układzie „1992” w podrzędnych w stosunku do jednolitej osnowy procesach obliczeniowych (wyrównanie siatek kątowno-liniowych) i dlatego, w odniesieniu do tych punktów istnieje pewne uzasadnione ryzyko niespójności z układem „1965”. Niespójność ową stwierdzono empirycznie w wielu przypadkach, nawet na poziomie kilkunastu centymetrów. Trudno jest obecnie dociekać przyczyn tego stanu rzeczy ale można sugerować dla pewności zasadę, by w sieciach III nie przyjmować tych punktów jako bezwzględnie stałych lecz dokonywać uzmiennienia ich współrzędnych przy zastosowaniu formuły HAUSBRANDTA (wyrównanie z odrzuceniem bezbłędności pewnych punktów nawiązania). Przyjmując błędność ich współrzędnych, nawet na poziomie 0.01-0.03m uzyskujemy w wyniku wyrównania informację, czy dany punkt ma tendencję do przesunięcia (wyrównanie sieci przyporządkowuje wówczas poprawki do tych współrzędnych). W przypadku poprawek znaczących, przy dostatecznie nadwymiarowej (niezawodnej) konstrukcji sieci III klasy w otoczeniu danego punktu (ekscentru, punktu przeniesienia) powinniśmy przyjąć zasadę ponownego wyznaczenia współrzędnych tego punktu.

Niektóre wadliwości bazy danch dla punktów I i II klasy.

Szkoda, że z bazy GEOS usunięto punkty fizycznie zniszczone, a są one bardzo potrzebne w procesie odtwarzania dawnych struktur sieci poligonowych, adaptowanych do klasy III – obecnie w nowym układzie. Niektóre z tych punktów znajdujemy w bazach lokalnych, ale tylko w układzie „1965”.

Drugą wadliwością bazy GEOS jest dołączenie do niej punktów tzw. sieci wojskowej (w opisie znaku jest symbol „WP”). Punkty te, jak już wielokrotnie potwierdzono praktycznie, mają błędnie określone współrzędne, bo niespójne pomiędzy układami „1965” i „1992” (odchyłki są nawet rzędu 40 cm). Należy stwierdzić, że punkty te nie miały związku z sieciami cywilnymi. Dlatego pierwszą czynnością związaną z wprowadzeniem danych z bazy GEOS do lokalnego banku osnów powinno być usunięcie z tej bazy wszystkich punktów sieci wojskowej. Pozostawienie tych punktów w bazie oznacza, że mogą być one użyte w procesach transformacji jako punkty dostosowania, co spowoduje istotne błędy wyników.

Trzecia wadliwość bazy GEOS dotyczy danych dla punktów kierunkowych. Jeśli punktem kierunkowym jest punkt I lub II klasy, w bazie są niepotrzebnie przechowywane (wcześniej obliczane) kąty kierunkowe i przybliżone odległości do tego punktu. Przy obliczaniu osnów III klasy, zamiast tych danych powinno się wykorzystywać wprost współrzędne punktu celu jako punktu macierzystego I lub II klasy. Zapis w bazie kąta kierunkowego i przybliżonej odległości jest nie tylko zbędny, ale sprawia wrażenie istnienia jakiegoś samoistnego punktu kierunkowego, co nie jest prawdą. Innymi słowy, w bazie powinny pozostać jedynie kąty kierunkowe dla tzw. samoistnych punktów kierunkowych (zakładanych specjalnie do tego celu), zaś kąty kierunkowe do punktów macierzystych powinny być wykasowane.

Diagnostyki kontrolne i przeliczenia współrzędnych punktów I i II klasy do układu „2000”

Jak już wspomnieliśmy, baza danych dla osnów I i II klasy jest zasadniczo serwowana w układach „1965” i „1992”. Przeliczenie współrzędnych z układu „1992” do określonej strefy układu „2000” nie powinno nastroczać żadnych problemów metodologicznych czy software’owych, ponieważ przeliczenie to jest czysto matematyczne, zgodnie z definicjami tych układów (por. Wytyczne Techniczne G-1.10 [5]). Realizują go właściwie wszystkie, dostępne w Polsce, programy obliczeń geodezyjnych (pierwotnie program TRANSPOL dołączony do cytowanych wytycznych). Równie dokładnie (matematycznie) dokonuje się przeliczenia z układu „1992” na współrzędne geodezyjne B,L elipsoidy GRS-80 w układzie ETRF’89.

Wykorzystanie danych z bazy GEOS powinno być poprzedzone diagnostyką kontrolną mającą na celu sprawdzenie spójności (zgodności) współrzędnych w układach: „1965” i „1992”. Sprawdzenia tego dokonuje się poprzez pełne zadanie transformacji $xy65 \Rightarrow xy92$, które sprowadza się do dwóch etapów:

- I. Przekształcenie matematyczne $xy65 \Rightarrow xy92mat$
(ewentualnie z użyciem tzw. korekty ogólnej (globalnej) dla danej strefy układu „1965”)
- II. Wpasowanie lokalne na płaszczyźnie układu „1992”: $xy92mat \Rightarrow xy92katalogowe$
za pomocą transformacji HELMERTA (punktami dostosowania są wszystkie punkty transformowane).

Odchyłki transformacji HELMERTA są obrazem zgodności obu układów. W zasadzie standardowe wartości odchyłek oscylują w granicach 0.01 – 0.04 m. Sporadyczne odchyłki odstające (nawet o wartościach kilkunastocentymetrowych) powinny uzasadniać ewentualne uzmiennianie współrzędnych lub ich powtórne wyznaczenie jako punktu sieci III klasy.

4.6. Wyrównanie sieci zintegrowanej

Scalone podsieci klasyczne wraz z wektorami GPS zrzutowanymi na elipsoidę (wektorami linii geodezyjnych) mogą być przedmiotem łącznego wyrównania w jednym z wybranych układów kartograficznych nowego systemu („2000”, „1992”), a także bezpośrednio na elipsoidzie (we współrzędnych geodezyjnych B,L. Wprawdzie przeliczenie współrzędnych finalnych (po wyrównaniu sieci) pomiędzy wymienionymi układami jest operacją czysto matematyczną, to ze względu na zasięg obszarowy sieci wybór układu, w którym dokonuje się wyrównania nie jest zupełnie obojętny. Zasadniczo najbardziej adekwatny wydaje się być układ „2000”, ze względu na to, że bezpośrednie wyniki wyrównania sieci uzupełniają bazę o zasadniczy dla wszelkich opracowań wielkoskalowych w danym obszarze układ współrzędnych. Wystąpią jednak sytuacje, w których do wyrównania sieci wskazany lub wręcz konieczny będzie wybór układu elipsoidalnego, co uzasadniamy poniżej.

We współczesnych pomiarach osnów geodezyjnych w Polsce coraz powszechniej będzie mieć zastosowanie system ASG-EUPOS, a w szczególności serwis POZGEO-D, udostępniający obserwacje satelitarne (w formacie RINEX) ze stacji referencyjnych systemu, lub tzw. stacji wirtualnych (VRS) o lokalizacji definiowanej przez użytkownika. Włączając do sieci kilka nawet najbliższych stacji referencyjnych musimy się liczyć z faktem, że niektóre z wektorów sieci będą mieć długości

kilkudziesięciokilometrowe. Nawet nie biorąc pod uwagę, że niektóre stacje będą przekraczać granice strefy układu „2000” (matematycznie każdą strefę można przedłużyć), powinniśmy zrezygnować z użycia układu „2000” jako „platformy” wyrównania sieci. Powodem jest fakt, że same wielkości poprawek odwzorowawczych mają ograniczoną dokładność numeryczną, nie uwzględniającą odwzorowania bardzo długich linii geodezyjnych. Skutkiem tego istniało by ryzyko wprowadzenia do wyrównania błędów numerycznych deformującym wyniki wyrównania. Podobny efekt błędu numerycznego miałby również miejsce w układzie „1992”. Dlatego jedynym rozsądnym wyjściem jest wykonanie wyrównania sieci bezpośrednio na elipsoidzie. W finale, wyrównane współrzędne geodezyjne B, L przekształcamy już matematycznie do układu „2000”.

Gdyby zamiast sieci zintegrowanej (klasyczna w połączeniu z GPS) wyrównaniu podlegała jedynie sieć wektorowa GPS, wówczas typową procedurą postępowania jest wyrównanie tej sieci w kartezyjskim układzie geocentrycznym XYZ elipsoidy, skąd równie dobrze można przejść transformacyjnie do innych układów. Istnieją jednak powody, dla których również w takiej jednorodnej sieci GPS uzasadnione jest dokonanie rzutowania wektorów na elipsoidę i wyrównanie sieci w układzie współrzędnych elipsoidalnych. Rzutowanie powoduje bowiem eliminację pozostałości błędów pomiaru wysokości anten, a także błędów wynikających z mniej dokładnego określenia różnicy wysokości elipsoidalnych w stosunku do składowych poziomych. Empiryczne testy porównawcze wykonane na wielu obiektach wykazują, że w wyrównaniu na elipsoidzie uzyskuje się lepsze parametry dokładnościowe niż w wyrównaniu sieci trójwymiarowej. Program do wyrównania sieci na elipsoidzie jest dostępny np. w systemie GEONET [4]. Pewne uzupełniające informacje z omawianego tu zakresu można znaleźć też we wcześniejszych publikacjach [6, 7].

Literatura

- [1] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 8 sierpnia 2000r w sprawie „państwowego systemu odniesień przestrzennych. (Dz. U. z 2000 r Nr 70, poz.821).
- [2] Balcerzak J.: Odwzorowanie Gaussa-Kruegera w szerokiej 12o strefie dla obszaru Polski. IX Szkoła Kartograficzna. Komorowo, 10-14.10.1994
- [3] Baran W. (red) i in.: Ekspertyza dotycząca odwzorowania kartograficznego dla wielkoskalowych Opracowań geodezyjnych i kartograficznych w Polsce. PAN, Komitet Geodezji, 1995
- [4] GEONET – system geodezyjny © 1992-2009 ALGORES-SOFT, www.geonet.net.pl
- [5] Kadaj R: *Formuły odwzorowawcze i parametry układów współrzędnych*. Wytyczne Techniczne G-1.10 Wyd. GUGiK, 2001, ISBN-83-239-1473-7
- [6] Kadaj R.: *Jak rachować pomiary GPS?* NAVI – dodatek do GEODETY, 2009, Nr 1 (19), s. 10-13.
- [7] Kadaj R.: *Sieci wektorowe GPS z obserwacjami klasycznymi w aspekcie modernizacji państwowych osnów geodezyjnych*, Mat. II Konf. N-T. Rzeszów-Polańczyk–Solina 27-29 września 2007, Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, ISBN 978-83-7199-460-9
- [8] Kadaj R, Świętoń T.: *Algorytm i oprogramowanie modułu automatycznego postprocessingu w polskim systemie satelitarnych stacji referencyjnych ASG-EUPOS*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2009 (w druku).