

Powierzchnie i wysokościowe układy odniesienia – obserwacje na stacjach mareograficznych Kronsztad i Amsterdam

**Dr hab. inż. Zygmunt Kurałowicz, prof. nadzw. PG, mgr inż. Agnieszka Słomska
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

Według Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 roku w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych, w Polsce od 01.01.2014 roku Państwowy system odniesień przestrzennych tworzą [19]:

- 1) geodezyjne układy odniesienia oznaczone symbolami PL-ETRF2000 i PL-ETRF89, będące matematyczną i fizyczną realizacją europejskiego ziemskiego systemu odniesienia ETRS89;
- 2) układy wysokościowe oznaczone symbolami PL-KRON86-NH i PL-EVRF2007-NH, będące matematyczną i fizyczną realizacją europejskiego ziemskiego systemu wysokościowego EVRS;
- 3) układy współrzędnych: geocentrycznych kartezjańskich oznaczone symbolem XYZ, geocentrycznych geodezyjnych oznaczone symbolem GRS80h oraz geodezyjnych oznaczone symbolem GRS80H;
- 4) układy współrzędnych płaskich prostokątnych oznaczone symbolami: PL-LAEA, PL-LCC, PL-UTM, PL-1992 i PL-2000.

Fizyczną realizacją geodezyjnego układu odniesienia PL-ETRF2000 jest sieć europejskich stacji permanentnych EPN (*European Permanent Network*) o dokładnie wyznaczonych współrzędnych oraz zmianach tych współrzędnych w czasie. Przenoszenie na obszar Polski i konserwacja geodezyjnego układu odniesienia PL-ETRF2000 odbywają się przez sieć stacji permanentnych ASG-EUPOS (Aktywna Sieć Geodezyjna EUPOS), a geodezyjnego układu odniesienia PL-ETRF89 odbywają się za pośrednictwem obserwacji satelitarnych GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). W Polsce są prowadzone prace nad modernizacją pionowej sieci podstawowej oraz doskonalszym modelem geoidy na obszarze Polski z zastosowaniem techniki pomiarów GPS [19, 20]. Praktyczne zastosowanie pomiarów GPS w geodezji opisano m.in. w pracach [12, 13, 15, 20].

UKŁADY ODNIESIENIA DO POMIARÓW WYSOKOŚCIOWYCH

W celu opracowania układu wysokościowego stosowanego w pomiarach niwelacyjnych należy zdefiniować powierzchnię odniesienia, względem której znajduje się mierzony punkt (w terenie albo na budowli). Powierzchnia ta tworzy układ odniesienia dla obszaru, w którym obowiązuje. Historycznie, przez dziesięciolecia przyjmowano lokalnie pewne powierzchnie, które służyły jako odniesienie wykonywanych pomiarów. Obecnie na całym świecie stosuje się ponad 300 wysokościowych układów odniesienia [1]. W Europie współistnieje dziś ponad 20 takich systemów dowiązanych do pobliskich mórz lub oceanów. Należy zauważyć, że niektóre kraje w przeszłości były dowiązane geodezyjnie do innych powierzchni odniesienia niż obecnie. Układy odniesienia w pomiarach geodezyjnych, do których nawiązuje się albo korzysta się obecnie, powstały kilkadziesiąt lub ponad sto lat temu. Każdy z tych układów jest odniesiony do średniego poziomu wody przyległego akwenu morskiego. Opracowanie układu wysokościowego wymagało przeprowadzenia wieloletnich obserwacji wykorzystujących tzw. pomiary mareograficzne, stanowiące niezbędne źródło danych do wyznaczenia powierzchni odniesienia. Wysokościowy układ odniesienia tworzy powierzchnia pozioma, do której są odniesione wysokości mierzonych punktów. Za powierzchnię odniesienia zwykle przyjmuje się średni poziom morza jednej lub kilku stacji mareograficznych, wyznaczony na podstawie pomiarów w określonym przedziale czasowym (zwykle od kilku do kilkunastu lat). Wybór średniego poziomu morza jako powierzchni odniesienia uzasadniony jest faktem, że kształt swobodnej powierzchni mórz i oceanów pokrywa się z powierzchnią geoidy. Definiowana jest ona jako powierzchnia stałego potencjału grawitacyjnego (powierzchnia ekwipotencjalna) na poziomie morza, do której kierunek linii pionu w każdym jej punkcie jest zawsze prostopadły. Jest to teoretyczna powierzchnia stałego potencjału siły ciężkości, pokrywająca się z powierzchnią mórz i oceanów Ziemi, przedłużona umownie pod lądami. Za geoidę zerową przyjmuje się powierzchnię, która przechodzi przez średni poziom morza w określonym punkcie Ziemi, wyznaczony na podstawie wieloletnich obserwacji. Praktyczną generalizacją geoidy jest quasi-geoida (powierzchnia powstająca przez odłożenie od punktów na powierzchni Ziemi w kierunku ku elipsoidzie odniesienia, wzdłuż normalnych linii pionu, ich wysokości normalnych) wykorzystywana w systemie wysokości normalnych. Na obszarze mórz i oceanów pokrywa się ona z geoidą, zaś na obszarze lądów przebiega ponad nią (jest to około 2 m).

Ze względów praktycznych, poziom geoidy odpowiada powierzchni odniesienia średniego poziomu morza MSL (*Mean Sea Level*) – wysokości. W obszarach, gdzie dane dotyczące wysokości nie są dostępne z tradycyjnej niwelacji, przybliżenie średniego poziomu morza można określić, stosując wysokość ortometryczną, którą można otrzymać z następującego równania:

$$h = H + N \quad (1)$$

gdzie:

h – wysokość odniesiona do powierzchni elipsoidy,
 H – undulacja geoidy (przebieg geoidy w stosunku do elipsoidy WGS84 – *World Geodetic System 1984*),
 N – wysokość ortometryczna (względem geoidy).

Alternatywnie, niektóre państwa zastępują wysokości ortometryczne wysokościami normalnymi oraz undulacje geoidy anomaliami wysokości. Zastosowanie anomalii wysokości eliminuje różnice dotyczące gęstości mas pomiędzy geoidą i Ziemią, wówczas zależność (1) można wyrazić w postaci:

$$h = H + N = H^* + \zeta \quad (2)$$

gdzie:

H^* – wysokości normalne,
 ζ – anomalia wysokości.

Według opisu zawartego w *National Imagery and Mapping, Technical Report, Department of Defense World Geodetic System 1984. Its definition and relationships with local Geodetic Systems. NIMA TR8350.2. Third edition amendment 1. 3 January 2000* [17], obliczenie undulacji geoidy zgodnie z WGS-84 EGM96 należy rozpocząć od wyznaczenia anomalii wysokości ζ , korzystając z równania:

$$\zeta(\phi, \lambda, r) = \frac{GM}{\zeta(\phi)r} \left[\sum_{n=2}^m \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \phi) \right] \quad (3)$$

gdzie:

ϕ – szerokość geocentryczna.

W celu obliczenia undulacji geoidy N w metrach, należy użyć formuły:

$$N(\phi, \lambda) = N_0 + \zeta(\phi, \lambda, r) + \frac{\Delta g_{BA}(\phi, \lambda)}{\gamma} H(\phi, \lambda) \quad (4)$$

gdzie:

$N_0 = -0,53$ m,
 $\Delta g_{BA}(\phi, \lambda)$ – anomalia grawitacyjna Bouguera względem EGM96,
 γ – wartość średnia normalnej pola grawitacyjnego,
 $H(\phi, \lambda)$ – zdefiniowana wartość wysokości z wartości harmonicznych modelu JGP95E (ang. *Joint Gravity Project 95*).

Model JGP95E jest oparty o dane wysokości pochodzące z obszarów obejmujących 5' szerokości i długości geograficznej. Wartość anomalii grawitacyjnej $\Delta g_{BA}(\phi, \lambda)$, zgodnie z EGM96 można wyliczyć, jako:

$$\Delta g_{BA}(\phi, \lambda) = \Delta g_{FA}(\phi, \lambda) - 0,1119 \cdot H(\phi, \lambda) \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta g_{FA}(\phi, \lambda)$ – wartość anomalii grawitacyjnej zgodnie z EGM96, pozbawionego oddziaływania atmosfery.

Powierzchnia ekwipotencjalna ma różną wartość w różnych miejscach kuli ziemskiej, co powoduje, że średni poziom morza nie jest wszędzie jednakowy. Z tego faktu wynikają różnice wysokości pomiędzy układami odniesienia, nawet w obrębie jednego akwenu morskiego (np. układ Helsinki i układ Kronsztad w obrębie Morza Bałtyckiego).

Uśredniony poziom morza może być obliczony w różny sposób, na przykład: z wszystkich stanów wody (Kronsztad w Zatoce Fińskiej Morza Bałtyckiego i Newlyn w południowo-zachodniej części Wielkiej Brytanii na Półwyspie Comish na wodach Atlantyku), wysokich pływów (Amsterdam) lub z niskich pływów (NAVD 88 – układ odniesienia Ameryki Północnej). Jednak okres obserwacji poziomów wody, na podstawie którego wyznacza się powierzchnię odniesienia, powinien być odpowiednio długi. Ma to na celu zarejestrowanie krótkoterminowych i długoterminowych wahań powierzchni morza, uwarunkowanych działaniem pływów, sztormów, wiatru oraz dłu-

goterminowych oscylacji. Optymalny okres powinien wynosić 18,6 lat. Skrócenie czasu obserwacji może prowadzić do błędnego wyznaczenia średniej powierzchni morza, co miało miejsce na przykład dla układu Triest [4]. W praktyce, gdy w przeszłości na ówczesne potrzeby wyznaczano układy odniesienia, w większości przypadków nie dysponowano tak długim czasem obserwacji. Z tego powodu średnie poziomy morza określano na podstawie obserwacji rocznych lub kilkuletnich.

UKŁADY WYSOKOŚCIOWE W POLSCE OD 2014 ROKU

Przejście Polski na Europejski System Odniesień Wysokości (EVRF 2000), który jest odniesiony do poziomu NAP (*Normaal Amsterdams Peil*) [3], spowodowało zmianę dotychczas obowiązującego układu wysokościowego z „Kronsztad” (PL-

-KRON86-NH) na „Amsterdam” (PL-EYRF2007-NH). Geodezyjny układ wysokościowy PL-KRON86-NH jest i będzie stosowany w okresie przejściowym do czasu wdrożenia układu wysokościowego PL-EYRF2007-NH na obszarze całej Polski, jednak nie dłużej niż do 31 grudnia 2019 roku (§ 24.1 [19]). Układ PL-KRON86-NH tworzą wysokości normalne H odniesione do średniego poziomu Morza Bałtyckiego, wyznaczonego dla mareografu w Kroszadzcie koło Sankt Petersburga w Federacji Rosyjskiej (rys. 1). Natomiast geodezyjny układ wysokościowy PL-EYRF2007-NH tworzą wysokości normalne H odniesione do średniego poziomu Morza Północnego, wyznaczonego dla mareografu w Amsterdamie (Normaal Amsterdams Peil) w Holandii (rys. 2).

W obu układach wysokości normalne H [m] określa się na podstawie pomiarów geodezyjnych odniesionych do pola grawitacyjnego Ziemi, względem przyjętej powierzchni odniesienia albo na podstawie pomiarów satelitarnych GNSS, z uwzględnieniem wysokości obowiązującej quasi-geoidy nad elipsoidą odniesienia. Fizyczną realizacją układów wysokościowych jest podstawowa osnowa wysokościowa. Dla obu układów elipsoidą normalnego pola siły ciężkości jest elipsoida odniesienia GRS80. Jednakże, w pracach geodezyjnych i kartograficznych, pracach hydrograficznych na akwenach morskich, a także przy tworzeniu zbiorów danych przestrzennych, będących przedmiotem umów międzynarodowych, których Polska jest sygnatariuszem, mogą być stosowane inne układy odniesienia, układy wysokościowe lub układy współrzędnych (Rozdział 3, § 15.3 [19]).

Należy zaznaczyć, że parametry geodezyjnych układów odniesienia, układów wysokościowych i układów współrzędnych płaskich prostokątnych obowiązujących na mocy dotychczasowych przepisów, w przypadku wycofania tych układów, archiwizuje się w sposób zapewniający w razie potrzeby wykonanie przeliczeń lub transformacji współrzędnych i wysokości określonych w tych układach do układów tworzących państwowy system odniesień przestrzennych (§24.2 [19]). W Biuletynie Informacji Publicznej Urzędu Geodezji i Kartografii (styczeń 2014 rok) przedstawiono zbiory danych określające wartości: różnic współrzędnych pomiędzy układami odniesienia PL-ETRF2000 oraz PL-ETRF89, różnic wysokości pomiędzy układami wysoko-



Rys. 1. Lokalizacja mareografu w Kroszadzcie, w Zatoce Fińskiej Morza Bałtyckiego – układ wysokościowy PL-KRON86-NH [7]



Rys. 2. Lokalizacja mareografu w Amsterdamie – układ wysokościowy PL-EYRF2007-NH [7]

ściowymi PL-EVRF2007-NH oraz PL-KRON86-NH i obowiązującej quasi-geoidy. Opracowane modele utworzono na bazie regularnej siatki referencyjnej dla obszaru opisanego długością geodezyjną wschodnią od $\lambda = 14,00^\circ\text{E}$ do $24,20^\circ\text{E}$ oraz szerokością geodezyjną północną od $\varphi = 49,00^\circ\text{N}$ do $\varphi = 55,00^\circ\text{N}$, wraz z zewnętrzną strefą przygraniczną o szerokości około 5 km na terenie państw sąsiednich. Różnica pomiędzy układem Kronsztad i Amsterdam wynosi około +15 cm i zależy od φ szerokości geodezyjnej północnej (N°) i λ długości geodezyjnej wschodniej (E°). Stosując transformację wysokości pomiędzy układami wysokościowymi „Amsterdam” PL-EVRF2007-NH i „Kronsztad” PL-KRON86-NFI, można wyznaczyć potrzebną wysokość punktu. W celu określenia wysokości w układzie PL-EVRF2007-NH, pozyskane z interpolacji (biliniowej) przyrosty dH należy dodać do wysokości w układzie wysokościowym PL-KRON86-NH (6), natomiast w celu wyznaczenia wysokości w układzie PL-KRON86-NH należy od wysokości w układzie PL-EVRF2007-NH odjąć przyrosty dH (7):

$$H_{PL-EVRF2007-NH} = H_{PL-KRON86-NH} + dH \quad (6)$$

$$H_{PL-KRON86-NH} = H_{PL-EVRF2007-NH} - dH \quad (7)$$

Jednoznaczne określenie położenia dowolnego punktu w przestrzeni wymaga określenia jego współrzędnych x i y , zdefiniowanych w obowiązującym układzie współrzędnych płaskich oraz wysokości h , zdefiniowanej w obowiązującym układzie wysokościowym – odległości punktu od powierzchni odniesienia.

Fizyczną realizacją przyjętego układu wysokościowego jest osnowa wysokościowa. Wyróżnia się 4 rodzaje układów wysokościowych:

- układ wysokości ortometrycznych (geoida jako powierzchnia odniesienia),
- układ wysokości normalnych (quasi-geoida jako powierzchnia odniesienia),
- układ wysokości geodezyjnych lub geometrycznych (elipsoida referencyjna jako powierzchnia odniesienia),
- układ wysokości normalnych – ortometrycznych.

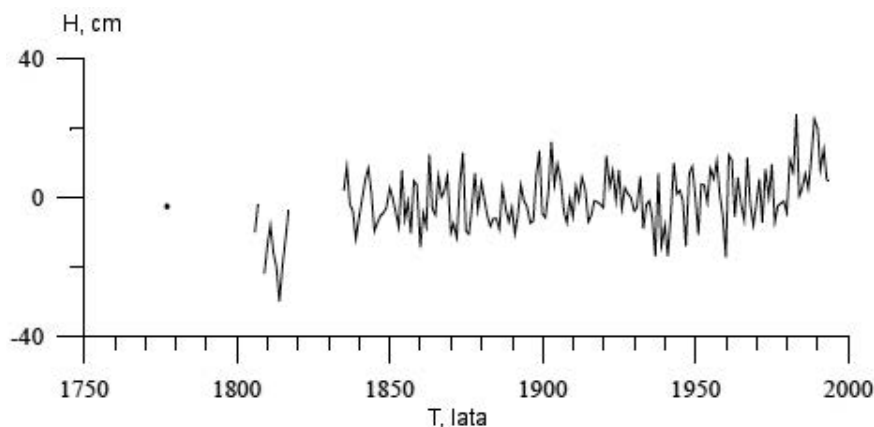
Kolejne etapy opracowania istniejących obecnie układów wysokościowych opartych na pomiarach mareograficznych obejmują:

- ustalenie pionowego układu odniesienia względem poziomej powierzchni, do której miały być odniesione wysokości wszystkich punktów osnowy wysokościowej,
- montaż repera kontrolnego w sąsiedztwie mareografu na nabrzeżu lub w pomieszczeniu stacji (*Tide – Gauge Benchmark* TGBM) dowiązanego niwelacją precyzyjną do reperów fundamentalnych (do wyznaczania różnicy między ustalonym średnim poziomem morza a reperem kontrolnym),
- dowiązanie osnowy wysokościowej do repera kontrolnego za pomocą niwelacji precyzyjnej w celu wyznaczenia rzędnych punktów podstawowej osnowy wysokościowej,
- kontrolne kampanie pomiarowe poprawności wysokości reperów, co kilkanaście – kilkadziesiąt lat nawiązane do reperów fundamentalnych.

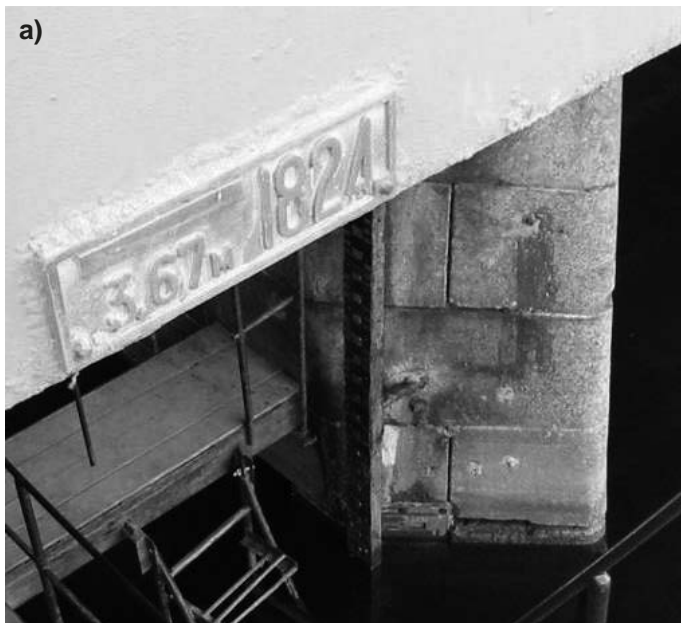
OBSERWACJE NA STACJI MAREOGRAFICZNEJ KRONSZTAD

Stacja mareograficzna Kronsztad jest usytuowana w Zatoce Newskiej (wschodnia część Zatoki Fińskiej) na Wyspie Kotlin, 30 km na zachód od Sankt Petersburga (rys. 1).

Pierwsze obserwacje poziomu wody w Zatoce Fińskiej i na rzece Newie prowadzono już na początku XVIII wieku z rozkazu cara Piotra I. Ich celem było rozpoznanie warunków żeglugowych dla przepływających statków. W 1707 roku zainstalowano znak wysokościowy w murze Twierdzy Kronsztadt w Kronsztad, w 1715 roku w murze Twierdzy Piotra i Pawła, zaś w 1741 roku na Wyspie Wasiljewskiej w Sankt Petersburgu. Były to jednak obserwacje nieregularne, a ich wyniki nie zachowały się do czasów współczesnych [2]. W 1777 roku Sankt Petersburg nawiedziła katastrofalna powódź. W celu zapobieżenia wielkim stratom w przyszłości i możliwości ostrzegania mieszkańców Sankt Petersburga oraz Kronsztadu o zbliżającej się wielkiej wodzie władze zdecydowały o stworzeniu systemu obserwacyjnego. Od 1777 roku były prowadzone regularne obserwacje, których wyniki archiwizowano. Obecnie są dostępne dane z pomiarów z 1777 roku oraz od 1806 roku (rys. 3). Danych z okresu od 1778 do 1806 roku nie odnaleziono [2, 10].



Rys. 3. Średnie roczne poziomy wody z okresu od 1777 do 1993 roku w Kronsztad [2]



Rys. 4. Stacja mareograficzna w Kronsztad: tabliczka wskazująca poziom wody w czasie powodzi w 1824 roku i lata wodowskazowa na Błękitnym Moście (a) oraz pawilon z mareografem (b) [10]

Mareograf Kronsztad znajduje się obecnie na Kanale Obwodnyj. Kanał ten jest połączony z morzem poprzez basen Italski i Port Kupieckaja. Lata wodowskazowa oraz znak wskazujący poziom wody z katastrofalnej powodzi z 1824 roku są zainstalowane na podporze Sinij Most (Niebieski Most, rys. 4a). Dwanaście metrów dalej znajduje się wybudowany w 1950 roku nowoczesny pawilon z mareografem (rys. 4b). Poziom wody jest rejestrowany przez automatyczny mareograf transmitujący dane do komputera, ale również w sposób tradycyjny, tzn. 4 razy na dobę dokonuje się odczytów z łąty i papierowej taśmy na bębnie. Od początku prowadzenia obserwacji kilkakrotnie zmieniano położenie stacji pomiarowych (zatem i lokalny poziom odniesienia), przyrządy pomiarowe, częstotliwość i godziny rejestracji, obowiązujący kalendarz (Juliański lub Gregoriański), obowiązujący czas (MSL – średni czas słoneczny i MT – czas moskiewski).

Zmiany lokalizacji mareografu (tabl. 1) wynikały z różnych czynników. Głównie były to uszkodzenia znaku wodowskazowego (na przykład w 1824 roku z powodu powodzi), remont Mostu Sinij (w 1874 roku), działania wojenne (w 1941 roku), w trakcie których uszkodzono nie tylko wodowskaz, ale również reper kontrolny na stałym lądzie w miejscowości Łomonosow. Uszkodzony wodowskaz był naprawiany lub przenoszony w inne miejsca w dowiązaniu do reperów operacyjnych (od 1886 roku) lub innych punktów. Przeniesienie wodowskazu stanowiło potencjalne źródło błędów w wyznaczaniu poziomu wody. Istnieje wzmianka, że po remoncie Błękitnego Mostu znak zera przeniesiono z błędem 10 cm [2]. Pomiary poziomu wody prowadzono za pomocą urządzeń różnego rodzaju. Najpierw była to zainstalowana w 1777 roku na ścianie kanału Piotra Wielkiego kamienna płyta z wyrytą poziomą linią, której odległość od dna kanału wynosiła 6,4 m. Od 1841 roku były to mosiężne płyty z wyrytą

Tabl. 1. Lokalizacje stacji pomiarowej Kronsztad w latach 1707-1993 [2]

Lata	Lokalizacja	Źródło
1707-1730	Kronshlott	(Reference 1972)
1731-1776	SrednyayaGavan'	(Reference 1972)
1777	Kanal Petra Velikogo	(Krafft, 1780)
1777-1799	Kupecheskaya Gavan	(Reference 1972)
1800-1972	Obvodnyy Kanal, Sinij Most	(Reference 1972)
1806-1809	Voyennaya Gavan	(Notes 1807-1827)
1810	Harbour	(Notes 1807-1827)
1811-1812	Channel	(Notes 1807-1827)
1841-1873	Western wall of Obvodnyy Kanal near Sinij Most	(Tlilo. 1876: Cinger, 1878: Bogdanov, 1993a)
1874	Ital'yanskiy Prud	(The Russian Navy State Archives, file 275)
1875-1929	Obvodnyy Kanal, Sinij Most pier	(Reference 1972)
1930-1940	Kupecheskaya Gavan'	(The Archives 1951)
1941-1993	Obvodnyy Kanal. Sinij Most pier	(Sundukova, 1951)

poziomą linią oraz łaty wodowskazowe, mareograf klasyczny (od 1896 roku) oraz mareograf automatyczny (od 1950 roku). Do pomiaru stabilności zer mareografów w 1886 roku zainstalowano reper operacyjny na Pomniku Pachtuzowa, niedaleko Kanału Obwodnyj. Niwelacja precyzyjna wykazała, że reper operacyjny znajduje się 5,2252 m powyżej poziomu zera. Wcześniej, od 1872 roku prowadzono niwelacje precyzyjne (hydrostatyczne) do repera lądowego nr 173 MTD HQ w miejscowości Łomonosow zamontowanego w ścianie budynku dworca. Niwelację powtórzono w latach 1888, 1890 i 1892.

Według zachowanych materiałów, w historii pomiarów poziomu wody w Kronsztadzie istnieje wiele „białych plam” – krótszych lub dłuższych okresów, z których brakuje danych lub są one niepewne z powodu złego funkcjonowania sprzętu albo tych wymienionych powyżej. W 1980 roku rozpoczęto budowę wielkiej zapory – systemu chroniącego Sankt Petersburg przed powodzią, oddzielającej Sankt Petersburg od otwartego morza. Centralnym punktem, przez który przebiega zaporą, jest Wyspa Kotlin. Na skutek realizacji tego systemu zmienił się reżim wodny w okolicy Kronsztad.

Poziom wody wskazywany przez mareograf w prawie całkowicie zamkniętym teraz akwenie przestał odzwierciedlać faktyczny poziom wody w morzu. Z tego powodu zbudowano „duplikaty” mareografu Kronsztad w miejscowościach Łomonosow i Szepelewo – w rejonach wolnych od wpływu zapory na poziom wody – rejestrację rozpoczęto 01.11.1987 roku. W miejscowościach Kronsztad, Łomonosow i Szepelewo zainstalowano również 3 wiekowe repery głębinowe (fundamentalne), stanowiące punkt odniesienia i kontroli mareografów oraz okolicznych reperów. Reperem operacyjnym stacji Szepelewo jest reper ścienny o numerze 7271 usytuowany w ścianie komory, w której umieszczony jest reper głębinowy. Zamontowano również piezometry hydrogeologiczne i stacje grawimetryczne. Umożliwiło to prowadzenie precyzyjnych obserwacji wahań poziomu wody i ruchów skorupy ziemskiej. Włączenie w 1993 roku Stacji Szepelewo, a w 1997 roku Stacji Kronsztad do pomiarów GPS w ramach międzynarodowego projektu „*Baltic Sea Level*” prowadzonego przez Międzynarodowe Towarzystwo Geodezyjne umożliwiła stałą precyzyjną kontrolę stabilności zer mareografów.

W latach 1926-1927 odbyły się w ZSRR dwie konferencje geodezyjne, podczas których rozpatrywano kwestię nadania mareografowi Kronsztad statusu początku wysokościowej sieci geodezyjnej dla regionu. W ramach zaplanowanych pomiarów w 1930 roku zainstalowano kilka reperów fundamentalnych w miejscowości Chudowo. W 1931 roku przeprowadzono niwelację precyzyjną między mareografem a reperami. Jednak duża odległość między mareografem i reperami ograniczała częste wykonywanie niwelacji. Dlatego po II Wojnie Światowej zainstalowano kilka reperów fundamentalnych w Łomonosowie. W kwietniu 1946 roku władze ZSRR podjęły decyzję dotyczącą podwyższenia rangi mareografu Kronsztad, który zyskał miano początku Regionalnej Sieci Niwelacyjnej i początku Bałtyckiego Narodowego Wysokościowego Układu Odniesienia. Za zero układu odniesienia przyjęto średnią z obserwacji z 1833 roku. Rozpoczęto prace pomiarowe i regulacyjne mareografu i wybudowano pawilon mareograficzny, wzmocniono miejsce zera mareografu poprzez umieszczenie „ramki” z brązu, przeprowadzono niwelacje precyzyjne, wykonano w okolicy sieć punk-

tów wysokościowych dowiązanych do poziomu morza [2]. W połowie lat pięćdziesiątych XX wieku Stację mareograficzną przekazano z Departamentu Marynarki Wojennej do Instytutu Hydrometeorologicznego. W odniesieniu do układu Kronsztad powstał Bałtycki Układ Wysokościowy obowiązujący w republikach ZSRR i w Niemieckiej Republice Demokratycznej. Układ odniesienia Kronsztad od 1953 roku (II kampania niwelacyjna) do 31 grudnia 2019 roku jest obowiązującym układem odniesienia w Polsce.

OBSERWACJE NA STACJI MAREOGRAFICZNEJ AMSTERDAM

Amsterdam, położony nad rzeką Amstel, jest połączony z Morzem Północnym wieloma kanałami i obejmuje jednocześnie duże obszary położone poniżej poziomu tego morza. Jednak system zapór zabezpiecza miasto przed powodzią od strony morza. Pierwsze wzmianki o obserwacjach poziomu wody w kanałach i oznaczaniu ich na ścianach budowli pochodzą z 1565 roku, jednak z danych tych nie wynika, w jaki sposób utrwalano je. Po silnym sztormie i powodzi w 1675 roku [21] rozpoczęto systematyczne obserwacje poziomu wody w kanałach oraz *HET IJ* – głównym szlaku żegludowym Amsterdamu, mającym do 1932 roku bezpośrednie połączenie z Morzem Północnym. W jednej ze śluz – *Zuiderzeeweg* (okolice portu) dokonywano odczytu poziomu wody raz lub dwa razy na godzinę. W latach 1682-1930 zgromadzono obszerny zbiór danych. W 1930 roku rozpoczęto budowę zapory *Afsluitdijk* oddzielającą Zatokę Zuiderzee od Morza Północnego, która miała wpływ na zakończenie prowadzenia obserwacji, ponieważ poziom wody w zamkniętym już zbiorniku nie odzwierciedlał poziomu wody w Morzu Północnym [9, 17].

W 1684 roku wyznaczono *Amsterdams Peil* (A.P.) - poziom odniesienia dla miasta Amsterdam stanowiący średnią z wysokich letnich pływów z lat: 1683-1684 na *HET IJ* na śluźie *Zuiderzeeweg*. Była ona wyższa od ówczesnego średniego poziomu morza o 17 cm. W 1684 roku na polecenie burmistrza Amsterdamu, a zarazem znanego matematyka Johannes’a Hudde, w śluzach kanałów, których wody wpływały do *HET IJ* zainstalowano 8 marmurowych płyt z wyżłobioną poziomą linią. Na każdej z nich wryty był napis: *ZEE DYKSHOOGHTE, ZYNDE NEGEN VOET VYF DUYM BOVEN STADTSPEYL* oznaczający wysokość grobli równą 9 stopom i 5 calom ponad poziomem odniesienia miasta Amsterdam, co stanowiło 2,676 m ponad A.P. Taką wysokość wału przeciwpowodziowego (grobli) uznano za wystarczającą, by chronić Amsterdam przed powodzią. Wyżłobione linie na płytach stały się liniami – punktami referencyjnymi wyznaczającymi układ odniesienia Amsterdam [14]. Do dziś zachowała się tylko jedna, która znajduje się w śluźie *Eenhoornsluis* (rys. 5).

W latach 1700-1861 średni poziom wysokich letnich pływów w *HET IJ* wzrósł o 10 cm (rys. 6), jednak poziom odniesienia Amsterdam pozostał taki sam, jak wyznaczono go w 1684 roku [14]. Pod koniec XIX wieku na wybrzeżu Holandii zainstalowano 9 mareografów, które od 1870 roku rejestrowały poziom morza. Za zero mareografów przyjęto *Amsterdams Peil* (A.P.), przemianowany na *Normaal Amsterdams Peil* (N.A.P.) [17]. Van Veen w 1945 roku na podstawie obserwacji mareogra-



Rys. 5. Oryginalna (i w powiększeniu) tablica z wyżłobioną linią na ścianie śluzy Eenhoornsluis w Amsterdamie [21]

ficznych z wybrzeża oraz Zatoki Zuiderzee opracował krzywą przedstawiającą wzrost poziomu wody o 17 cm w okresie do 1945 roku. Na tej podstawie opracowano prognozę dalszego wzrostu poziomu wody. Dla Holandii, kraju, którego 60% powierzchni leży poniżej poziomu morza, wiarygodna prognoza jest bardzo istotna, ponieważ od niej zależała wysokość budowli chroniących ląd przed napływającą wodą.

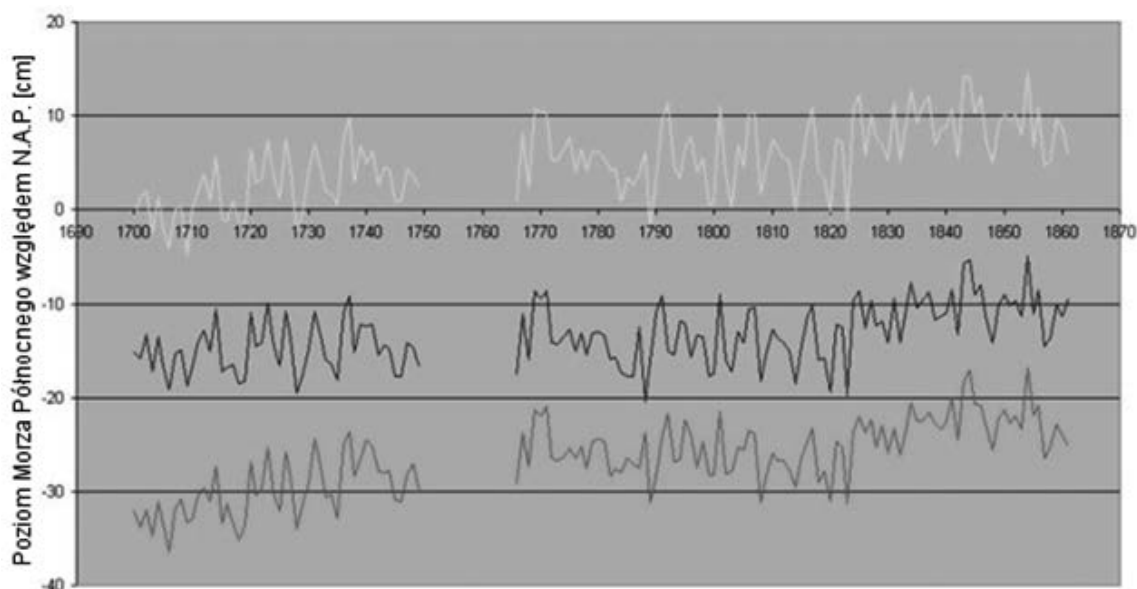
W 1988 roku w Amsterdamie utworzono Centrum N.A.P. (w kompleksie *Stopera*, w którym jest również ratusz miejski oraz opera). Zgromadzono w nim fotografie i modele, które wizualizują poziom wody w Morzu Północnym oraz położenie Amsterdamu względem tego poziomu. W jednym z pomiesz-

czeń przyziemia znajduje się bolec z brązu umieszczony na betonowym słupie symbolizujący poziom N.A.P. (rys. 7). Obok znajdują się szklane kolumny, spośród których w jednej z nich jest wskazywany aktualny poziom wody w *HET IJ*, a w drugiej poziom wody z katastrofalnej powodzi w 1955 roku wynoszący 4,55 m powyżej N.A.P. Od 1684 roku *Amsterdams Peil* (A.P.) był zdefiniowany jako poziom leżący 2,676 m poniżej poziomej linii na kamieniach Hudde'a. Początkowo był to lokalny układ odniesienia, jednak wraz z upływem lat przenoszono go na coraz większe obszary kraju, instalując nowe znaki wysokościowe A.P.

Ponadto, prowadząc niwelację hydrostatyczną, A.P. przeniesiono na okoliczne wyspy. W 1818 roku uznano go za oficjalny układ odniesienia dla całego państwa [17]. W latach 1875-1885 przeprowadzono pierwszą niwelację precyzyjną, sprawdzając rzędne punktów wysokościowych. Dowiązano się wówczas do 5 zachowanych z 1875 roku kamieni Hudde'a. Kolejne niwelacje precyzyjne przeprowadzono w latach 1926-1939, 1950-1959, 1965-1980 oraz w 2005 roku. W 1891 roku zmieniono nazwę układu odniesienia z *Amsterdams Peil* (A.P.) na *Normaal Amsterdams Peil* (N.A.P.). Od tego czasu rzędne podaje się jako +/-N.A.P. [14].

Ze względu na to, że na obszarze Holandii brak jest skalistego podłoża, w którym można by zainstalować stabilne repery fundamentalne, montuje się je na betonowych fundamentach, posadowionych na piaskach plejstocenu, kilkadziesiąt metrów poniżej poziomu terenu. Jednak, pomimo takiego rozwiązania, repery po kilkudziesięciu latach ulegają przemieszczeniu - nie są stabilne. Z tego powodu nie można jednoznacznie i dokładnie określić, jaki jest udział zmiany zaobserwowanego wzrostu poziomu wody na holenderskim wybrzeżu spowodowany faktycznym wzrostem poziomu morza, a jaki jest wpływ osiadania podłoża na łądzie [5, 17].

W 1850 roku układ *Amsterdams Peil* został przyjęty przez Belgię, a w 1874 r. przez Niemcy, które dowiązały do niego pierwszą krajową niwelację precyzyjną [21]. W 1955 roku opisywany układ odniesienia przejęły inne kraje Europy. Stał się on



Rys. 6. Wykres poziomu wody średnich wysokich pływów (najwyższy wykres), średnich niskich pływów (najniższy wykres), średniego poziomu Morza Północnego (środkowy wykres) w latach 1700-1861 [14]



Rys. 7. Bolec z brązu na betonowym podłożu symbolizujący poziom N.A.P. [8]

Wspólnym Wysokościowym Układem Odniesienia Europy *United European Leveling NetWork* (EULN), a potem Europejskim Pionowym Układem Odniesienia *European Vertical Reference System* (EVRS). Obecnie układ odniesienia Amsterdam stosowany jest w wielu krajach europejskich, w tym od 2014 roku ponownie w Polsce.

PODSUMOWANIE

Pomiary mareograficzne stanowiły bardzo ważne i jedyne źródło danych na temat poziomu odniesienia. Pomiary poziomu wody na stacjach mareograficznych w Kronsztad i Amsterdamie miały i mają bardzo ważne znaczenie w opracowaniu układów wysokościowych oraz układów odniesienia. W wyniku rozwoju technologii pomiarowych dąży się do unifikacji układów odniesienia i układów wysokościowych. Jednak, pomimo, współczesnych technologii pomiarowych rola pomiarów mareograficznych jest i będzie istotna w zakresie gromadzenia danych potrzebnych do analizy istniejących powierzchni odniesienia, względem których w geodezji określa się wysokości mierzonych punktów. Obecnie pomiary mareograficzne są jednym z wielu źródeł danych geodezyjnych. Poza powierzchnią odniesienia również dane z mareografów pozwalają wyznaczyć poziomy morza przydatne w gospodarce morskiej, m.in.: poziom morza bezwzględnie najwyższy, poziom morza wysoki, poziom morza najniższy i szczególnie ważny do celów inżynierskich średni poziom morza i innych potrzeb gospodarki morskiej.

LITERATURA

1. Balasubramanian N.: Definition and Realization of a Global Vertical Datum. Phillips Laboratory, Scientific Report No. 1, 1994.
2. Bogdanov V.I. i inni: Mean Monthly Series of Sea Level Observations (1777-1993) at the Kronstadt Gauge. Reports of the Finnish Geodetic Institute, Kirkkonummi, 2000.
3. Borkowski A., Bosa J., Pażus R.: Państwowy system odniesień przestrzennych, część I: Systemy i układy odniesienia w Polsce. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Departament Geodezji, Kartografii i Systemów Informacji Geograficznej (opr. 2012).

4. Grgić I., Lučić M. i inni.: Preliminary Project of the Height System Reconstruction in the Republic of Croatia. EUREF Symposia – Meetings, Presentations & Resolutions, 2011.
5. http://www.amsterdam.no/norske_spor/nap-project/nap-project-no.html: 18.06.2013 r.
6. <http://georepository.com>: 05.04.2013 r., 17.05.2013 r., 20.06.2013 r., 13.08.2013 r.
7. www.maps.google.pl: 27.05.2013 r., 06.06.2013 r., 30.07.2013 r., 14.08.2013 r.
8. <http://www.ntsif.org>: 06.04.2013 r., 10.05.2013 r., 23.07.2013 r., 22.08.2013 r.
9. <http://www.wikipedia.org>: 14.06.2013 r., 20.06.2013 r.
10. www.visit-saint-petersburg.ru/sea-gauge: 14.04.2013 r., 24.05.2013 r.
11. Jagielski A.: Geodezja I. Wydawnictwo GEODPIS, Kraków, 2005.
12. Januszewski J.: Systemy satelitarne GPS, Galileo i inne. Wyd. Naukowe PWN. Warszawa 2006.
13. Kurałowicz Z.: Geodezja. Od taśmy mierniczej i krokiewki do GPS. Wyd. PG. Gdańsk, 2010.
14. Kwaad F.J.P.M.: Het NAP – niveau – de dijkpeilstenen van burgemeester Hudde en de geschiedenis van het Normaal Amsterdams Peil, 2005, <http://home.tiscali.nl/~wr2777/NAP-niveau.htm>
15. Lamparski J., Świątek K.: GPS w praktyce geodezyjnej. Wyd. Gall. Katowice, 2007.
16. Liebsch G.: Relations between sea level and vertical reference frame. Workshop on Vertical Reference Systems for Europe, Frankfurt Main 5-7 April 2004.
17. National Imagery and Mapping. Technical Report. Department of Defense Word Geodetic System 1984. Its definition and relationships with local Geodetic Systems. NIMATR8350.2. Third edition amendment 1. 3 January 2000.
18. Rietveld H.: Land subsidence in the Netherlands, Proceedings of the Third International Symposium on Land Subsidence. Venice, 19-25 March 1984.
19. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 roku w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej.
20. Specht C.: System GPS. Biblioteka Nawigacji nr 1. Wydawnictwo Berwardinum. Pelplin 2007.
21. Van der Weele P.I.: De Geschiedenis van het N.A.P. Publication of the Netherlands Geodetic Commission, 1971.