AKADEMIA MARYNARKI WOJENNEJ

IM. BOHATERÓW WESTERPLATTE

WYDZIAŁ NAWIGACJI I UZBROJENIA OKRĘTOWEGO

mgr inż. Mariusz SPECHT

WYZNACZANIE PRZEBIEGU LINII PODSTAWOWEJ MORZA TERYTORIALNEGO Z ZASTOSOWANIEM BEZZAŁOGOWEJ JEDNOSTKI PŁYWAJĄCEJ NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH AKWENÓW MORSKICH RP

Rozprawa doktorska

przedłożona Radzie Wydziału Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego

Akademii Marynarki Wojennej

Promotor:

kmdr dr hab. inż. Mariusz WĄŻ, prof. AMW

Promotor pomocniczy:

kmdr por. dr inż. Adam CICHOCKI

Gdynia, 2019

Spis treści

Wy	kaz wa	żniejszyc	h oznaczeń	i skrótów	4
Ws	tęp				6
1.	Linia p	odstawo	wa morza t	terytorialnego państwa nadbrzeżnego	12
	1.1.	Konwen	ncja UNCLOS	5	12
	1.2.	Linia po	dstawowa i	morze terytorialne państwa	14
	1.3.	Zasady	wyznaczania	a linii podstawowej	16
	1.4.	Zasady	wyznaczania	a zewnętrznej granicy morza terytorialnego	19
	1.5.	Linia po	dstawowa i	zewnętrzna granica morza terytorialnego RP	22
	1.6.	Wybran	e aspekty p	omiaru linii podstawowej	23
		1.6.1.	Wymagani	a i planowanie sondażu	23
		1.6.2.	Pomiar po	ziomu wody	27
		1.6.3.	Pozostałe	pomiary oceaniczne	29
		1.6.4.	Hydrografi	czny pomiar głębokości	33
2.	Metod	lyka wyz	naczania lir	nii podstawowej morza terytorialnego z zastosowanie	m
	bezzał	ogowej j	ednostki hy	drograficznej oraz geodezyjnych sieci satelitarnych Gl	NSS . 35
	2.1.	Bezzało	gowe jedno	stki hydrograficzne	35
	2.2.	Systemy	/ pozycyjne		39
		2.2.1.	Geodezyjn	e sieci satelitarne GNSS	39
			2.2.1.1.	Geneza	39
			2.2.1.2.	ASG-EUPOS	41
			2.2.1.3.	SmartNet	42
			2.2.1.4.	TPI NETpro	43
			2.2.1.5.	VRSNet.pl	45
			2.2.1.6.	Strefa działania sieci GNSS	46
		2.2.2.	Systemy D	GNSS: DGPS i EGNOS	49
		2.2.3.	Wielosyste	emowe odbiorniki GNSS	52
	2.3.	Model c	lokładności	i dostępności pozycjonowania w pomiarach hydrografi	cznych
		przy uw	zględnieniu	norm IHO	
3.	Badan	ia możliv	vości wyko ografiany	rzystania systemów GNSS dla zapewnienia pozycjonov	wania
			ograficznyc	veh sigsi satalitarnych CNSS	05 65
	5.1.		Demierry		
		3.1.1.	Pomiary st		
	2.2	3.1.2.	Pomiary d		
	3. 2.	Badania			
		3.2.1. 2.2.2	Pomiary St		0/ حح
	2.2	3.2.2. Dadaa:-	Pointary d		
	5.5.	Badania		niowych oddiornikow GNSS	
		5.5. <u>1</u> .	Pointary St	aujunarne	ðU

		3.3.2.	Pomiary dynamiczne	84		
	3.4.	Optyma	ilizacja systemów pozycjonowania w aspekcie kategorii pomiarów			
		hydrogi	aficznych wg wymagań standardu IHO S-44	85		
4.	Pomia	rowe wy	znaczanie przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego	92		
	4.1.	Wyznac	zanie przebiegu linii podstawowej metodą geodezyjną (klasyczną)	92		
		4.1.1.	Planowanie i realizacja pomiarów	92		
		4.1.2.	Opracowanie danych pomiarowych	94		
		4.1.3.	Dyskusja wyników	103		
4.2. Wyznaczanie przebiegu linii podstawowej z wykorzystaniem bezzałogow iednostki pływającej				104		
		4.2.1.	Prowadzenie bezzałogowej jednostki pływającej po profilach sondażowych	104		
		4.2.2.	Planowanie i realizacja pomiarów	114		
		4.2.3.	Opracowanie danych pomiarowych	117		
		4.2.4.	Dyskusja wyników	120		
5.	Podsu	mowani	e i wnioski końcowe	122		
Bib	liografi	a		124		
Wy	Vykaz rysunków136					
Wy	kaz tab	el		140		

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

ASG-EUPOS	– Aktywna Sieć Geodezyjna EUPOS
ASV	– autonomiczna jednostka pływająca
AWFiS	– Akademia Wychowania Fizycznego i Sportu im. Jędrzeja Śniadeckiego
	w Gdańsku
В	 – szerokość elipsoidalna punktu
BDS	 – chiński satelitarny system nawigacyjny
BHMW	– Biuro Hydrograficzne Marynarki Wojennej
Bluetooth	– standard bezprzewodowej komunikacji krótkiego zasięgu pomiędzy
	różnymi urządzeniami elektronicznymi
CTE	 błąd określenia pozycji względem rzeczywistej trasy pomiarowej
$D_{\rm avp}(t)$	– dostępność określonej wartości błędu wyznaczenia współrzednych
exp ()	nozvcij wa kategorij IHO
DGNSS	– różnicowy globalny system nawigacji satelitarnej
DGPS	– różnicowy globalny system nawigacji satelitariej
d	– głebokość odpowiadająca przebiegowi linii podstawowej morzą
a_{LP}	
	terytoriainego
DOP	– parametr opisujący wpryw geometrii konstelacji satelitow na
DDMG	wyznaczenie pozycji
DRMS	– odległościowa srednia niepewność kwadratowa wyznaczen
	pozycji
	– numeryczny model terenu
ECEF	 – układ wspołrzędnych o początku w srodku masy Ziemi i nieruchomy względem niej
EDAS	– serwis komercyjny systemu EGNOS
EGM	– globalny model geopotencjalny
EGNOS	 – europejski geostacjonarny system pokrycia nawigacyjnego
ESA	– Europejska Agencja Kosmiczna
ETRF	 – europejski przestrzenny układ odniesienia
EUREF-POL	 bazowa (podstawowa) sieć 11 punktów geodezyjnych w Polsce
FGP	 – funkcja gęstości prawdopodobieństwa
FOC	– pełna zdolność operacyjna
Galileo	 – europejski satelitarny system nawigacyjny
GBAS	 naziemny system wspomagający
GGA	– komunikat standardu NMEA
GIS	– system informacji geograficznej
GLONASS	– rosyjski satelitarny system nawigacyjny
GNSS	– globalny system nawigacji satelitarnej
GPRS	 technika związana z pakietowym przesyłaniem danych w sieciach
	GSM
GPS	 amerykański satelitarny system nawigacyjny
GUGiK	– Główny Urząd Geodezji i Kartografii
h	 wysokość elipsoidalna punktu
Н	– wysokość normalna punktu
IALA	– Międzynarodowe Stowarzyszenie Służb Oznakowania Nawigacyjnego
IHO	– Międzynarodowa Organizacja Hydrograficzna

IMGW	– Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
L	– długość elipsoidalna punktu
LAT	– najniższy pływ astronomiczny
MBES	– echosonda wielowiązkowa
Mm	– mila morska
NMEA	– protokół komunikacji dla urządzeń morskich
NOAA	– Amerykańska Narodowa Służba Oceaniczna i Meteorologiczna
NTRIP	– transport sieciowy RTCM za pośrednictwem protokołu
05	– serwis otwarty systemów EGNOS i Galileo
n	– prawdonodobieństwo wystanienia jakiegoś zdarzenia
	prawaopodobienstwo wystąpienia jakiegos zadrzenia
PL-2000	obowiązujący w Polsce
PL-EVRF2007-NH	– układ wysokościowy Amsterdam
PL-geoid-2011	– model quasi-geoidy obowiązujący w Polsce
PL-KRON86-NH	– układ wysokościowy Kronsztad
<i>R</i> 68	 promień okręgu lub sfery, w którym znajduje się 68% populacji pomiarów
R95	 promień okręgu lub sfery, w którym znajduje się 95% populacji pomiarów
RMS	– średnia niepewność kwadratowa pojedynczego pomiaru
RTCM	– Radiotechniczna Komisia ds. Służb Morskich
RTK	– metoda pomiaru w czasie rzeczywistym
RTN	– metoda pomiaru w czasie rzeczywistym
SBAS	– satelitarny system wspomagający
SBES	– echosonda jednowiazkowa
SoL	– serwis bezpieczeństwa życia systemów EGNOS i Galileo
ТВС	– oprogramowanie geodezyjne Trimble Business Center
TIN	– nieregularna siatka trójkatów
UMG	– Uniwersytet Morski w Gdyni
UNCLOS	– Konwencja Narodów Zjednoczonych o prawie morza
URG	– uogólniony rozkład gamma
USA	– Stany Ziednoczone
USACE	– Korpus Inżynieryjny Armii Stanów Zjednoczonych
USV	– bezzałogowa jednostka pływająca
VRS	– wirtualna stacja referencyjna
WGS-84	– zbiór parametrów (z 1984 r.) określających wielkość i kształt Ziemi oraz właściwości jej potencjału grawitacyjnego
$X_{PL-2000}$	– współrzędna północna punktu w układzie PL-2000
Y _{PL 2000}	– współrzędna wschodnia punktu w układzie PL-2000
2DRMS	– podwojona wartość <i>DRMS</i>

Wstęp

Morze terytorialne jest integralną częścią terytorium Polski. Rozciąga się ono pasem szerokości 12 mil morskich (czyli 22.224 m) licząc od tzw. linii podstawowej **[DOALOS, 1982]**. Linia ta została zdefiniowana w art. 5 ust. 2 ustawy o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej jako: ... *"linia łącząca odpowiednie punkty wyznaczające najniższy stan wody wzdłuż wybrzeża albo inne punkty wyznaczone zgodnie z zasadami określonymi w Konwencji Narodów Zjednoczonych o prawie morza, sporządzonej w Montego Bay dnia 10 grudnia 1982 r. (Dz. U. z 2002 r. poz. 543)"* **[Sejm RP, 1991]**.

Matematyczne określenie przebiegu linii podstawowej jest warunkiem koniecznym dla ustalenia granicy zewnętrznej morza terytorialnego będącej granicą państwową **[Abidin H.Z. i in., 2005; Grafarend E., Okeke F., 2007; Horemuz M., 1999]**. Od jej wyznaczania zależy przede wszystkim określenie zasięgu suwerennych praw poszczególnych państw. W przypadku Polski, problem pomiaru przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego można rozpatrywać w aspektach: prawnym oraz pomiarowym.

W sensie prawnym aktualny przebieg morskiej granicy polskich obszarów morskich ustalają krajowe akty prawne przedstawione w uzasadnieniu do projektu rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie szczegółowego przebiegu linii podstawowej, zewnętrznej granicy morza terytorialnego oraz zewnętrznej granicy strefy przyległej Rzeczypospolitej Polskiej **[Rada Ministrów RP, 2015]**. Biorąc pod uwagę jedynie przytoczone daty dokumentów w wyżej wymienionym dokumencie (1957-1995 r.) oraz zmienność warunków hydrologicznych akwenu Morza Bałtyckiego można uznać, iż państwo polskie nie dysponuje dziś aktualnym zbiorem danych geograficznych ustalającym przebieg morskiej granicy państwa. Przytoczoną tezę potwierdzono w publikacji **[Wolny B., 2004]**, w której czytamy: ... *"pomimo upływu lat, morze terytorialne nadal jest ugorem geodezyjnym i kartograficznym"*. Zbliżony pogląd w tej kwestii prezentują inni Autorzy **[Klein N., 2014; Misiak W., Felczak J., 2013]** stwierdzając wprost: ... *"obecnie wyznaczonych jest około 430 granic morskich, co stanowi niewiele ponad połowę wszystkich granic"*. Pozostałe granice są zdefiniowane w sposób niewłaściwy pod względem: technicznym, niejasnego położenia, dyskusji politycznych i ekonomicznych **[Kabziński P., Weintrit A., 2008]**.

Drugim, lecz trudniejszym problemem, będącym genezą niniejszej rozprawy doktorskiej, jest pytanie o właściwy dobór metod realizacji pomiarów hydrograficznych (na akwenach ultrapłytkich cechujących się głębokościami poniżej 1 m) mających na celu określenie przebiegu linii podstawowej, przy wykorzystaniu bezzałogowych jednostek hydrograficznych. Obejmuje ono dwie zasadnicze kwestie: metody (a nawet i metodyki) pomiaru głębokości na akwenie ultra-płytkim oraz wykorzystania właściwego systemu pozycjonowania w pomiarach hydrograficznych.

Jeszcze do niedawna pomiar głębokości na akwenie ultra-płytkim, jakim jest obszar, na którym przebiega linia podstawowa, realizowany był z wykorzystaniem załogowej jednostki pływającej. Pomiar klasyczny polega na prowadzeniu jednostki hydrograficznej po profilach pomiarowych, które są prostopadłe do brzegu (zgodnie z największym gradientem głębokości). Jednakże ze względu na zanurzenie małych jednostek hydrograficznych (ok. 1 m i więcej) oraz umieszczenie na ich dziobie przetworników echosond, należy stwierdzić, że w praktyce pomiarów batymetrycznych dla głębokości poniżej 1 m się nie wykonuje. Może to skutkować uszkodzeniem kosztownej aparatury pomiarowej, a w konsekwencji powstaniem dużych obszarów, dla których nie pozyskano żadnych danych pomiarowych. W efekcie

otrzymuje się mapę batymetryczną akwenu, na której wszystkie izobaty dla małych głębokości są do siebie równoodległe. Jest to efekt liniowej interpolacji pomiędzy pomierzoną (najczęściej metodami geodezyjnymi) linią brzegową a pomiarami realizowanymi do izobaty 1 m. Proponowane w tytule rozprawy zastosowanie bezzałogowej jednostki pływającej jest rozwiązaniem alternatywnym względem metod klasycznych i pozwoli uzyskać rzeczywiste dane batymetryczne dla akwenu ultra-płytkiego. W tym kontekście wykorzystanie jednostki bezzałogowej o zanurzeniu ok. 20 cm wydaje się być alternatywnym i efektywnym rozwiązaniem, dla którego pojawia się wiele nowych problemów poznawczych związanych szczególnie z: metodyką sterowania jednostką, oraz planowaniem kampanii pomiarowej, manewrowaniem na profilach iei pozycjonowaniem.

Jak istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa nawigacji jest pozyskanie pomiarów batymetrycznych na akwenie ultra-płytkim pokazuje Rys. 1. Przedstawia on porównanie rzeźby dna wykonanej na podstawie dwóch kampanii pomiarowych okolic mola w Sopocie. Należy zauważyć, że w tym rejonie doszło do pojawienia się zjawiska o nazwie Tombolo, które tworzy się w przypadku zmniejszenia prędkości przepływu prądu przybrzeżnego. Było ono spowodowane wybudowaniem mariny jachtowej przylegającej do mola.



Rys. 1. Mapa batymetryczna okolic mola w Sopocie, na której dokonano liniowej interpolacji głębokości, będącej skutkiem braku prawdziwych danych pomiarowych (a) [Specht C. i in., 2018a] oraz przedstawiono rzeczywistą rzeźbę dna wraz z linią podstawową, będącą wynikiem pomiarów batymetrycznych dokonanych przez Autora rozprawy (wraz z zespołem Katedry Geodezji i Oceanografii UMG) do głębokości ok. 0.6 m.

Prezentowane wyniki otrzymano przy użyciu jednostki załogowej o zanurzeniu wynoszącym jedynie 30 cm. Należy podkreślić, że podczas pomiarów wielokrotnie ocierano dnem jednostki hydrograficznej o piasek znajdujący się na dnie, ryzykując tym samym uszkodzenie zarówno jednostki, jak i aparatury badawczej. Pomiary te jednoznacznie udowodniły, że zastosowanie załogowej jednostki hydrograficznej (nawet o najmniejszym możliwym zanurzeniu) jest niewłaściwe na akwenach ultra-płytkich. Podobne problemy pojawiają się w przypadku pomiaru linii podstawowej morza terytorialnego, której przebieg odpowiada izobacie ok. 1 m. Stąd w takich sytuacjach jedynym rozwiązaniem jest wykorzystanie bezzałogowych jednostek hydrograficznych **[Stateczny A. i in., 2018a; Stateczny A. i in., 2018b]**.

W zakresie poruszonej w rozprawie drugiej głównej tematyki badawczej (hydrograficznych systemów pozycjonowania), należy stwierdzić, że realizacja pomiarów batymetrycznych wykonywana była dotychczas w różnorodny sposób. Począwszy od badań wykorzystujących

metody tachimetryczne (powszechne do 1990 r.), system DGPS (dokładność wyznaczenia pozycji 1-2 m, p = 0.95), poprzez systemy RTK wykorzystujące system GPS, aż po bezpośredni pomiar realizowany przez geodetów na profilach dokonywany w toni morskiej **[Baptista P. i in., 2008]**. W niniejszej rozprawie zostaną porównane wszystkie dostępne dziś metody pozycjonowania: systemy DGPS i EGNOS **[Specht C. i in., 2019b]**, sieci geodezyjne GNSS **[Bogusz J. i in., 2012]** oraz wielosystemowe odbiorniki GNSS **[Liu W. i in., 2019]**, w kontekście wymagań określonych w standardzie IHO S-44 **[IHO, 2008]**. Pozwoli to na jednoznaczny i właściwy dobór metody pozycjonowania spełniającej wymagania poszczególnych kategorii IHO.

Konkludując, opisaną powyżej genezę tematu badawczego rozprawy, należy stwierdzić, iż głównymi ograniczeniami w zakresie precyzyjnego wyznaczania przebiegu linii podstawowej były i są dotychczas dwa aspekty techniczne o cechach poznawczych: hydrograficzny i pozycyjny, dla których wskazano następujące ograniczenia i propozycje ich rozwiązania w dysertacji:

W kwestii badań hydrograficznych:

- Należy rozważyć rezygnację z realizacji sondaży hydroakustycznych akwenów ultrapłytkich przy użyciu klasycznych jednostek załogowych. Jest to spowodowane tym, że mają one zbyt duże zanurzenie (min. 1 m), a ich typowa minimalna bezpieczna głębokość operacyjna jest na poziomie izobaty 2 m. Skutkuje to powstaniem dużych obszarów, dla których nie pozyskano rzeczywistych danych pomiarowych. W związku z tym należy uznać, że dotychczasowy pomiar przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego był i jest do dziś nieprecyzyjny ze względu na interpolację danych batymetrycznych [Specht C. i in., 2016c; Specht M., Specht C., 2018a].
- Powszechne w hydrografii sporządzanie map sondażowych akwenów ultra-płytkich (pozbawionych rzeczywistych danych pomiarowych, przy błędnym założeniu liniowego spadku głębokości w obszarze najmniejszych głębokości 0-1 m) jest podejściem błędnym, ze względu na brak rzeczywistych danych pomiarowych. Skutkuje ona zagrożeniem bezpieczeństwa nawigacji i żeglugi.
- Znaczne rozmiary części nadawczych systemów batymetrycznych (przetworników echosond i sonarów) uniemożliwiają wykonanie pomiarów na akwenach ultrapłytkich z zastosowaniem klasycznych jednostek załogowych, stąd winny one zostać zastąpione przez jednostki bezzałogowe o małym zanurzeniu oraz zminiaturyzowanych systemach pomiarowych.
- Ostatnim z kluczowych problemów pomiarów batymetrycznych realizowanych przez jednostkę bezzałogową jest metoda (lub metodyka) planowania sondaży i manewrowania nią na profilach sondażowych. Kluczowymi zagadnieniami badawczymi w tym zakresie są: odległość pomiędzy profilami, metoda tworzenia tychże profili (równoległe, spiralne i inne), sposób wykorzystania autopilota [Specht C. i in., 2017b] oraz optymalizacja jego współpracy z systemami pozycyjnymi.

W kwestii badań systemów pozycyjnych:

 Standardy dotyczące wymaganej dokładności określenia pozycji jednostki hydrograficznej oraz jej dostępności podczas sondaży są ściśle określone dla kategorii pomiarów hydrograficznych. Stąd kluczowym pytaniem, na które należy odpowiedzieć, brzmi: jakie systemy pozycyjne można wykorzystywać podczas realizacji pomiarów hydrograficznych? Należy zauważyć, że w związku z ciągłym zwiększaniem dokładności pozycji satelitarnych systemów autonomicznych (GPS, GLONASS, BDS i Galileo), skutkującym równoległym zwiększaniem dokładności wszystkich systemów wspomagających (DGPS, EGNOS, multi-GNSS i RTN), zasadnym jest podjąć próbę oceny: w jaki sposób dokonywać ewaluacji metod pozycjonowania polegającej na wyborze właściwego rozwiązania pozycyjnego, które spełniłoby wymagania przewidziane dla kategorii IHO?

• Wspomniany wybór systemu pozycjonowania spełniający normy IHO ma charakter optymalizacji stąd pojawia się pytanie badawcze: w jaki sposób dokonywać oceny spełnienia (lub nie) przez te systemy wymagań poszczególnych kategorii?

Wyszczególnione wstępnie przesłanki pozwalają zdefiniować cel naukowy rozprawy, którym jest: Opracowanie metod(y) wyznaczania przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego z wykorzystaniem bezzałogowej jednostki pływającej, echosondy jednowiązkowej oraz systemów pozycjonowania GNSS takich jak: DGPS, EGNOS, multi-GNSS i RTN, w aspekcie optymalizacji realizacji sondaży jednostką oraz optymalizacji metod pozycjonowania, spełniających wymagania poszczególnych kategorii pomiarowych IHO. Cząstkowe zagadnienia badawcze zdefiniowano w dwóch aspektach: hydrograficznym i pozycyjnym:

Cel I (hydrograficzny) rozprawy: Opracowanie metodyki wykorzystania bezzałogowej jednostki pływającej (drona hydrograficznego) dla realizacji pomiarów batymetrycznych morskich akwenów ultra-płytkich. Obejmuje on następujące hipotezy badawcze:

- Hipoteza I/1: Dotychczasowe metody manewrowania załogową (klasyczną) jednostką hydrograficzną mogą mieć jedynie ograniczone zastosowanie dla realizacji pomiarów hydrograficznych na akwenach ultra-płytkich z powodu zbyt dużego zanurzenia i nie nadają się do realizacji pomiarów linii podstawowej morza terytorialnego.
- Hipoteza I/2: Zasadnicze różnice we właściwościach manewrowych klasycznych jednostek oraz pływających obiektów bezzałogowych wymagają opracowania dla drugiej grupy oddzielnej metody realizacji sondaży hydrograficznych, realizowanych na akwenach ultra-płytkich.
- Hipoteza I/3: Możliwym jest ustalenie optymalnej odległości oraz kształtu geometrycznego profili sondażowych, po których poruszają się pływające bezzałogowe jednostki hydrograficzne na morskich akwenach ultra-płytkich.

Cel II (pozycyjny) rozprawy: Zapewnienie dokładności pozycjonowania bezzałogowej jednostki hydrograficznej spełniającej wymagania przewidziane dla czterech kategorii IHO: specjalnej, 1a, 1b i 2 **[IHO, 2008]**. Obejmuje on następujące hipotezy badawcze:

- Hipoteza II/1: Zastosowanie metod analizy niezawodnościowej wykorzystujących procesy stacjonarne z odnową, w których minimalne wymagania poszczególnych kategorii pomiarów hydrograficznych zostały odniesione do dokładności i dostępności wyznaczenia pozycji, umożliwi opracowanie metody, która oceni, czy system pozycyjny może być zastosowany do realizacji pomiarów.
- Hipoteza II/2: Wykonanie pomiarów stacjonarnych i dynamicznych systemów mających na celu pozyskanie prawdziwych danych o rozkładach statystycznych błędów współrzędnych pozycji jest kluczowe do oceny, które z potencjalnie dostępnych systemów nadają się do realizacji sondaży hydrograficznych

w poszczególnych kategoriach IHO. Aby skutecznie zastosować ww. metodę (niezawodnościową) niezbędnym jest uwzględnienie w badaniach następujących rozwiązań w zakresie pozycjonowania: systemy DGPS i EGNOS, sieci geodezyjne GNSS i wielosystemowe odbiorniki GNSS.

 Hipoteza II/3: Zaproponowana metoda niezawodnościowa jest lepsza od tradycyjnej analizy statystycznej błędu pozycji, bowiem zmienną losową podlegającą analizie jest czas przebywania w stanach zdatności i niezdatności, a nie błąd pozycji, który nie zależy od czasu. Dzięki temu możliwym będzie obliczenie *"zapasu dostępności"* konkretnego rozwiązania pozycyjnego, definiowanego przez różnicę pomiędzy dostępnością błędu pozycji dla 95% pomiarów (w podejściu klasycznym błędami są: *DRMS*, 2DRMS, R68, R95 i inne) a wartością dostępności wyznaczoną metodą niezawodnościową.

Cel główny i cele szczegółowe ukształtowały strukturę pracy i dobór odpowiednich metod badawczych. Osiągnięcie celów wymagało przeprowadzenia: analizy i syntezy światowego piśmiennictwa wraz z jego abstrahowaniem, modelowania matematycznego procesów niezawodnościowych opartego na ogólnej teorii niezawodności, badań eksperymentalnych bezzałogowej jednostki pływającej i systemów GNSS oraz statystycznego opracowania wyników pomiarów.

Niniejszą rozprawę podzielono na cztery rozdziały:

W rozdziale I "*Linia podstawowa morza terytorialnego państwa nadbrzeżnego*" poddano analizie i dyskusji krajowe, a także międzynarodowe uregulowania prawne związane z wyznaczaniem przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego (m.in. konwencja UNCLOS oraz akty krajowe), opisano stosowane współcześnie metody jej wyznaczania, zwrócono uwagę na wybrane - szczególnie istotne - uwarunkowania jej pomiaru obejmujące: poziom wody, warunki oceanograficzne i hydrologiczne, jak również na podstawie literatury światowej wskazano na ich istotne ograniczenia, wynikające zarówno z regulacji prawnych oraz ze stosowania wciąż klasycznych hydrograficznych systemów pomiarowych. Ponadto wykazano, że zastosowanie bezzałogowych jednostek hydrograficznych o zanurzeniu ok. 20-30 cm znacząco wpływa na precyzję wyznaczania przebiegu granicy państwa nadbrzeżnego.

W rozdziale II "Metodyka wyznaczania linii podstawowej morza terytorialnego z zastosowaniem bezzałogowej jednostki hydrograficznej oraz geodezyjnych sieci satelitarnych GNSS" dokonano opisu dwóch najważniejszych aspektów realizacji pomiarów hydrograficznych przez bezzałogową jednostkę pływającą: hydrograficznego i pozycyjnego oraz zaproponowano w nim spójną metodykę realizacji pomiarów linii podstawowej morza terytorialnego z zastosowaniem bezzałogowej jednostki hydrograficznej, w której wykorzystuje echosonde jednowiązkową systemy GNSS. Ponadto się oraz scharakteryzowano i opisano możliwości czterech możliwych rozwiązań w zakresie pozycjonowania: systemy DGPS i EGNOS, sieci geodezyjne GNSS oraz wielosystemowe odbiorniki GNSS. W jednym z podrozdziałów zaproponowano autorski model matematyczny umożliwiający ocenę spełnienia (lub nie) przez te cztery systemy wymagań określonych w standardzie IHO S-44.

W rozdziale III "**Badania możliwości wykorzystania systemów GNSS dla zapewnienia pozycjonowania jednostek hydrograficznych wg wymagań standardu IHO S-44**" zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych zarówno w trybie stacjonarnym, jak

i dynamicznym dla czterech możliwych rozwiązań w zakresie pozycjonowania: systemy DGPS i EGNOS, sieci geodezyjne GNSS oraz wielosystemowe odbiorniki GNSS. W oparciu o autorski model niezawodnościowy dokonano również oceny, czy ww. systemy spełniają (lub nie) wymagania określone w standardzie IHO S-44. Wykazano, że system DGPS i sieci geodezyjne GNSS spełniają wymagania przewidziane dla wszystkich kategorii IHO, a niebawem dołączy do nich również system EGNOS. Ponadto należy zauważyć, że wszystkie smartfony nadają się do zabezpieczenia pozycjonowania prac sondażowych zgodnie z kategorią 2.

W rozdziale IV "*Pomiarowe wyznaczanie przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego*" omówiono wyniki badań i eksperymentów wykonanych dwoma metodami: klasyczną (geodezyjną) oraz zrealizowanych przy użyciu bezzałogowej jednostki hydrograficznej. Ich zasadniczym celem było ustalenie podobieństw i różnic technicznowykonawczych oraz wskazanie wad i zalet obu rozwiązań. W tej części oceniono, weryfikowano metody planowania profili sondażowych, prowadzenia po nich jednostki i manewrowania nią z wykorzystaniem systemu automatycznego. Jednoznacznie wykazano, że pod względem precyzji obie metody są praktycznie identyczne, lecz zastosowanie bezzałogowej jednostki prowadzącej sondaż hydrograficzny w trybie automatycznym jest nieporównywalnie bardziej efektywne, bowiem skutkuje wykonywaniem znacznie większej liczby pomiarów, przez co uzyskany przebieg linii podstawowej jest precyzyjniejszy.

1. Linia podstawowa morza terytorialnego państwa nadbrzeżnego

1.1. Konwencja UNCLOS

Konwencja UNCLOS (ang. United Nations Convention on the Law of the Sea) z dnia 10 grudnia 1982 r. jest głównym dokumentem z zakresu międzynarodowego prawa morza regulującym m.in. zagadnienie wyznaczania granic państw nadbrzeżnych. W wyniku prac nad konwencją dokonano kodyfikacji dotychczasowych przepisów w zakresie morza terytorialnego oraz otwartego, jak również wprowadzono w niej szereg przepisów obejmujących sposoby eksploracji, badania i ochrony poszczególnych obszarów morskich **[Bierzanek R., Symonides J., 2016]**. Umowa obejmuje łącznie 320 artykułów i 9 aneksów **[Calderbank B. i in., 2006]**.

Polska, jako jeden z 168 krajów, zatwierdziła konwencję w dniu 6.11.1998 r. Dotychczas tylko 30 państw nie dokonało ratyfikacji tej umowy międzynarodowej, a są nimi **[DOALOS, 2019]**:

- państwa, które podpisały konwencję, lecz jej nie ratyfikowały (15): Afganistan, Bhutan, Burundi, Kambodża, Republika Środkowoafrykańska, Kolumbia, Salwador, Etiopia, Iran, Korea Północna, Libia, Liechtenstein, Rwanda, Zjednoczone Emiraty Arabskie, Stany Zjednoczone (ang. United States of America – USA),
- państwa, które nie podpisały konwencji (15): Andora, Erytrea, Izrael, Kazachstan, Kirgistan, Peru, San Marino, Sudan Południowy, Syria, Tadżykistan, Turcja, Turkmenistan, Uzbekistan, Watykan, Wenezuela.

Na Rys. 1.1 przedstawiono graficznie państwa, które ratyfikowały, podpisały lub nie konwencję UNCLOS.



📕 Państwa, które ratyfikowały konwencję

Państwa, które podpisały konwencję, lecz jej nie ratyfikowały

🖉 Pozostałe państwa

Rys. 1.1. Mapa przedstawiająca państwa będące stronami konwencji o prawie morza i państwa niebędące jej stronami. Należy dodać, że niektóre z państw w ogóle nie podpisały konwencji. Najczęstszymi przyczynami odmowy jej akceptacji są inne zobowiązania prawno-międzynarodowe, jak również specyficzne położenie geograficzne i geostrategiczne krajów. Dla przykładu, państwa Ameryki Łacińskiej (Peru, Wenezuela) nie akceptują nie tylko metody delimitacji obszarów morskich ale również prawa gremiów międzynarodowych do rozstrzygania problemów granic morskich. Najczęściej jednak prawdziwą przyczyną odmowy ratyfikacji były morskie zasoby naturalne oraz szeroko rozumiany handel morski. Z kolei jako państwa postkolonialne wspomniane kraje były szczególnie przywiązane do swojej suwerenności. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że USA nie podpisały konwencji mimo, że brały udział w pracach przygotowawczych. Stany Zjednoczone kwestionowały zapisy rozdziału XI dotyczącego obszarów znajdujących się poza granicami jurysdykcji państwowej - na dnie mórz i oceanów oraz w ich głębinach. Zgodnie z konwencją wyłączne prawo do badań i eksploracji tego obszaru miała Międzynarodowa Organizacja Dna Morskiego (ang. International Seabed Authority – ISA), co nie było zgodne z geostrategiczną polityką USA. Chociaż Stany Zjednoczone nie były stroną konwencji, to przestrzegały one jej postanowień w sprawie tradycyjnego korzystania z obszarów morskich [Józefowicz M., 2006]. W 1983 r. decyzją prezydenta Ronalda Reagana utworzono największą na świecie 200 Mm wyłączną strefę ekonomiczną (proklamacja nr 5030), a cztery lata później poszerzono wody terytorialne z 3 do 12 Mm ze względu na bezpieczeństwo narodowe (proklamacja nr 5928) [Remy C.E., 1992]. Dopiero w 1994 r. USA podpisały porozumienie w sprawie implementacji części XI konwencji, modyfikujące wcześniejsze jej postanowienia (przychylne stronie amerykańskiej) [Rufe R., 2003].

W związku z koniecznością precyzyjnego zdefiniowania w konwencji pojęcia: morska granica państwa niezbędnym było wprowadzenie szeregu przepisów z nią związanych takich jak: prawo pościgu, prawo wizyty i rewizji, czy nawet piractwo. Pierwsze z nich (prawo pościgu) to prawo przysługujące władzom państwa nadbrzeżnego, które stosuje się wobec jednostek morskich naruszających przepisy wynikające z art. 111 **[DOALOS, 1982]**, jak również zapisy prawa państwowego (art. 16-18) **[Sejm RP, 1990]**. Z kolei prawo wizyty i rewizji może być realizowane wyłącznie przez okręt wojenny innego państwa na morzu otwartym, jeżeli istnieje uzasadnione podejrzenie, że obca jednostka zajmuje się: piractwem, handlem niewolnikami, nadawaniem nielegalnych audycji itd. (art. 109-110) **[DOALOS, 1982]**. Trzeci z terminów związanych z akwenami morskimi i ich granicami jest piractwo, definiowane jako bezprawny akt przemocy, pozbawienia wolności, grabieży, czy groźby dokonany na morzu pełnym, poza granicami jurysdykcji państwowej (art. 3) **[Sejm RP, 1988]**, (art. 101) **[DOALOS, 1982]**.

Ponadto wprowadzenie konwencji UNCLOS spowodowało powołanie następujących instytucji: ISA, Międzynarodowego Trybunału Prawa Morza (ang. International Tribunal for the Law of the Sea – ITLOS) oraz Komisji Granic Szelfu Kontynentalnego (ang. Commission on the Limits of the Continental Shelf – CLCS). Organizacja ISA zajmuje się działalnością związaną z badaniami i eksploracją zasobów na obszarach znajdujących się poza granicami jurysdykcji państwowej - na dnie mórz i oceanów oraz w ich głębinach (art. 157). Kolejna z nich ITLOS rozstrzyga spory dotyczące interpretacji lub stosowania niniejszej konwencji (aneks VI). Natomiast organizacja CLCS wydaje zalecenia państwom, które chcą wyznaczyć zewnętrzną granicę szelfu kontynentalnego w odległości 200 Mm od linii podstawowej (art. 3 aneksu II) **[DOALOS, 1982]**.

Z punktu widzenia określania morskich granic państwa nadbrzeżnego istotnego znaczenia nabierają dwa pojęcia: jurysdykcji i suwerenności. Jurysdykcja to uprawnienie podmiotu (państwa) do rozpoznawania i rozstrzygania spraw spornych [Calderbank B. i in., 2006], natomiast suwerenność oznacza zdolność państwa do samodzielnego, niezależnego od innych podmiotów, sprawowania władzy nad określonym terytorium. W kontekście przywołanych powyżej pojęć można dokonać klasyfikacji obszarów morskich na (w każdej strefie przysługują odmienne uprawnienia państw) [Stefańska B., 2012]:

- obszary należące do terytorium państwa to: morskie wody wewnętrzne i morze terytorialne,
- obszary leżące poza terytorium państwa, gdzie państwo może wykonywać ograniczoną jurysdykcję (określone prawa suwerenne) obejmują: strefę przyległą, wyłączną strefę ekonomiczną i szelf kontynentalny,
- obszary leżące poza terytorium państwa, niepodlegające jego jurysdykcji to: morze otwarte oraz dno mórz i oceanów.

W celu uregulowania uprawnień władczych państw na obszarach morskich niezbędne jest precyzyjne wyznaczenie granic (delimitacja) stref morskich w oparciu o tzw. linie podstawowe [Weintrit A., Specht M., 2016].

1.2. Linia podstawowa i morze terytorialne państwa

Zgodnie z prawem międzynarodowym delimitacja oznacza ustalenie przebiegu granicy między państwami. W odniesieniu do obszarów morskich państwo może wytyczyć cztery rodzaje granic: morza terytorialnego, strefy przyległej, wyłącznej strefy ekonomicznej oraz szelfu kontynentalnego **[Klein N., 2014; Pina-Garcia F. i in., 2016]**. Ze względu na możliwość występowania zasobów naturalnych na akwenach morskich, wyznaczanie stref jurysdykcji państw nadbrzeżnych jest obecnie jednym z najważniejszych problemów w stosunkach międzynarodowych. Ich podstawą jest wyznaczenie linii podstawowej, bez której niemożliwe jest określenie związanych z nią granic obszarów morskich (Rys. 1.2).



Rys. 1.2. Granice obszarów morskich (opracowanie własne na podstawie: **[Rada Ministrów RP, 2015]**).

W praktyce międzynarodowej stosuje się najczęściej dwie definicje linii podstawowej. Pierwsza z nich to zwykła linia podstawowa, która została zdefiniowana jako: ... "linia najniższego stanu wody wzdłuż wybrzeża, oznaczona na mapach o dużej skali uznanych oficjalnie przez państwo nadbrzeżne" [DOALOS, 1982]. Ten typ linii stosuje się w przypadku brzegu, który jest ukształtowany regularnie. Druga z nich to prosta linia podstawowa, która może być stosowana: ... "w miejscach, gdzie linia wybrzeża jest bardzo wygięta i wcina się w głąb lądu albo gdzie wzdłuż wybrzeża w jego bezpośrednim sąsiedztwie znajduje się łańcuch wysp", ... "tam, gdzie wskutek istnienia delty lub innych warunków naturalnych linia wybrzeża jest w dużym stopniu niestała" [DOALOS, 1982]. Zatem linię tą wykorzystuje się wyłącznie w przypadku, gdy rzeźba wybrzeża jest urozmaicona.

Należy dodać, że niezmiernie istotnym elementem przy wyznaczaniu przebiegu linii podstawowej, zgodnie z pierwszą definicją, jest stosowanie przez państwa odmiennych poziomów odniesienia (zero mapy). W związku z tym, przyjmowanie przez państwa nadbrzeżne różnych poziomów odniesienia może wpływać bezpośrednio na przebieg granicy morskiej. Przykładowo, w Holandii dokonano zmiany poziomu odniesień linii podstawowej ze średniej z najniższych wód niskich syzygijnych (ang. Mean Lower Low Water Springs – MLLWS) na najniższy pływ astronomiczny (ang. Lowest Astronomical Tide – LAT). Spowodowało to wysunięcie linii brzegowej, a zarazem zwiększenie powierzchni lądowej (Rys. 1.3) [Elema I.A., Kwanten M.C., 2006]. Stąd wymienione tu aspekty mają istotny wpływ na:

- przesunięcie linii brzegowej, a zarazem zmianę położenia granicy państwa,
- obowiązek sporządzenia nowych map batymetrycznych oraz nawigacyjnych (przy zmianie),



• zaistnienie konfliktów między państwami (przy odmiennych poziomach odniesienia).



Mając na uwadze aspekt bezpieczeństwa nawigacji morskiej, większość narodowych biur hydrograficznych oraz Międzynarodowa Organizacja Hydrograficzna (ang. International Hydrographic Organization – IHO) przyjmuje za zero mapy najniższy pływ astronomiczny **[Calderbank B. i in., 2006]**. Jest on zdefiniowany jako najniższy poziom pływu, którego wystąpienie można przewidywać przy średnich warunkach meteorologicznych oraz przy dowolnej kombinacji warunków astronomicznych **[KE, 2011]**. Natomiast zero mapy to poziom morza poniżej którego woda nie opada oraz głębokości wskazane na mapie nie są zbyt płytkie (wiąże się to ze zbyt nisko przyjętym poziomem odniesienia) **[Farboud S., 2012]**.

W celu jego wyznaczenia wykorzystuje się mapy nawigacyjne, które wykonano na podstawie wieloletnich pomiarów **[Beazley P.B., 1994]**.

Istotne z punktu widzenia dokładności wyznaczania granic jest określenie powierzchni odniesienia, będącej podstawą stosowanych przez państwa narodowych systemów odniesień przestrzennych. Na przestrzeni lat państwa stosowały różne powierzchnie, co powodowało spore rozbieżności między współrzędnymi geograficznymi tego samego punktu. Aby tego uniknąć jako światowy system odniesienia przyjęto elipsoidę obrotową WGS-84 (ang. World Geodetic System 84). Przyjęcie jej przez większość państw świata wynika z faktu, że jest ona podstawową powierzchnią odniesienia w systemie nawigacji satelitarnej GPS **[Calderbank B. i in., 2006]**.

Wyznaczanie linii podstawowej przez państwa nadbrzeżne jest istotne przede wszystkim ze względu na potrzebę korzystania z zasobów morza terytorialnego. Stanowi ono pas wód przylegających do wybrzeży lub wód wewnętrznych, w którym dane państwo sprawuje władzę (w tym zwłaszcza stosuje swoje prawodawstwo). Pod względem prawnym morze terytorialne jest częścią morskiego terytorium danego kraju (wspólnie z wodami wewnętrznymi i archipelagowymi). W porównaniu z terytorium lądowym państwa nadbrzeżnego na takim akwenie obowiązuje dodatkowo prawo nieszkodliwego przepływu. Polega ono na zapewnieniu żeglugi statkom wszystkich bander, przy czym przepływ powinien być nieprzerwany i szybki. Dla Polski i wszystkich państw nadbałtyckich morze terytorialne rozciąga się pasem o szerokości 12 Mm, licząc od linii podstawowej **[Bugajski D.R., 2009]**.

1.3. Zasady wyznaczania linii podstawowej

Sposób wyznaczania linii podstawowej uzależniony jest od ukształtowania wybrzeża. Jeżeli linia brzegowa jest urozmaicona, to państwo może wyznaczyć proste i zwykłe linie stanowiące linie podstawowe w przypadku występowania na jego wybrzeżu następujących form geograficznych [Beazley P.B., 1978; Calderbank B. i in., 2006; DOALOS, 1982; DOS, 1987; Połatyńska J., 2008; UN, 1958; UN, 1989; UN, 2000]:

- Cieśniny z zasady nie można jej zaliczyć do morskich wód wewnętrznych. Dopuszczalnym jest *"zamknięcie"* cieśniny linią podstawową, która znajduje się pomiędzy lądem a wyspą, pod warunkiem, że istnieje możliwość żeglugi wokół tej wyspy.
- Kanału można go "zamknąć" linią podstawową, co oznacza zaliczenie kanału do morskich wód wewnętrznych. Jeżeli jednak dotychczasowe przejście tym kanałem było otwarte dla statków innych państw, to należy je zapewnić (przejście tranzytowe).
- Państwa archipelagowego jest to państwo, które obejmuje minimum jeden archipelag, jak również inne wyspy, których stosunek powierzchni wód do terytorium lądowego wynosi od 1:1 do 9:1. W tym przypadku stosuje się proste linie podstawowe, które określane są przez punkty stanowiące zewnętrzną granicę wysp wchodzących w skład archipelagu. Długość takich linii nie powinna przekraczać 100 Mm (maksymalnie 3% ogólnej liczby linii podstawowych może mieć większą długość, nieprzekraczającą jednak 125 Mm).
- Portu przy określaniu granic morza terytorialnego za część wybrzeża uważa się wysunięte najdalej w morze stałe urządzenia portowe stanowiące integralną część

systemu portowego. Przybrzeżnych instalacji sztucznych wysp nie uważa się za stałe urządzenia portowe.

- Rafy dla wysp położonych na atolach lub wysp obramowanych rafami (np. Wyspy Marshalla, Luizjady) wewnętrzną granicę morza terytorialnego stanowi linia najniższego stanu wody przy rafie od strony morza.
- Ujścia rzeki linię podstawową stanowi linia prosta łącząca punkty wytyczające ujście wyznaczone na jej brzegach, przy najniższym stanie wody.
- Wyspy jeżeli wyspa jest położna w bliskości wybrzeża, wtedy można ją zaliczyć do morskich wód wewnętrznych (np. Lofoty). Natomiast jeżeli wyspa leży w większej odległości od brzegu, to może zostać ograniczona "własnym" morzem terytorialnym, pod warunkiem, że jest zamieszkała (np. Jan Mayen). Należy dodać, że w przypadku wysp metoda prostych linii podstawowych może być z powodzeniem stosowana, gdy są one położone wzdłuż wybrzeża (w odległości 3-48 Mm). Jednakże gdy łańcuch wysp leży prostopadle do przebiegu linii brzegowej (Rys. 1.4), to zastosowanie metody prostych linii podstawowych (kolor czerwony) jest niedopuszczalne.



Rys. 1.4. Łańcuch wysp, który nie może być objęty prostymi liniami podstawowymi.

- Wzniesienia wynurzające się z wody tylko podczas odpływu jest to szczególny obszar lądu (utworzony w sposób naturalny), który znajduje się poniżej poziomu wody podczas odpływu. Jeżeli wzniesienie znajduje się całkowicie lub częściowo na obszarze morza terytorialnego, to przy takim wzniesieniu można wyznaczyć linię podstawową przy najniższym stanie wody. W przeciwnym razie obszar taki nie znajduje się na obszarze własnego morza terytorialnego.
- Zatoki w myśl konwencji jest to wgłębienie linii brzegowej, której powierzchnia jest równa lub większa od powierzchni półkola o średnicy równej linii poprowadzonej w poprzek naturalnego wejścia do tego wgłębienia, przy najniższym stanie wody (Rys. 1.5a i 1.5b). W przypadku, gdy wewnątrz zatoki znajdują się wyspy, to również ich powierzchnię wlicza się do całkowitej powierzchni tego wgłębienia (Rys. 1.5c). Jeżeli odległość między punktami tworzącymi naturalne wejście do zatoki, przy najniższym stanie wody, nie przekracza 24 Mm, to można między tymi dwoma punktami wytyczyć prostą linię podstawową zamykającą zatokę (Rys. 1.5a, 1.5b i 1.5c). Gdy odległość ta jest większa niż 24 Mm, to wewnątrz zatoki wytycza się prostą linię podstawową o długości 24 Mm w taki sposób, aby zamknąć nią możliwie

największy obszar wody (Rys. 1.5d). Powyższe zalecenie nie dotyczy tzw. zatok historycznych, które mogą być szersze (np. Morze Białe, Zatoka Hudsona).



max (X) = 24 Mm, A = powierzchnia półkola o średnicy X

Rys. 1.5. Graficzna interpretacja art. 10 konwencji UNCLOS (opracowanie własne na podstawie: **[Calderbank B. i in., 2006]**).

Wyznaczenie linii podstawowej ujść rzek i zatok jest szczególnie trudne na obszarach, gdzie występują wysokie pływy. Ponadto na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że nie zawsze można wyznaczyć punkty tworzące naturalne wejście do zatoki (Rys. 1.6). W sytuacji, gdy pole powierzchni zatoki jest zbliżone do powierzchni półkola o średnicy równej linii poprowadzonej w poprzek naturalnego wejścia (o niejednoznacznie wytyczonych punktach) przy najniższym stanie wody, niemożliwe jest stwierdzenie, czy dane wgłębienie linii brzegowej jest zatoką.



C. Niejednoznacznie wytyczone punkty tworzące naturalne wejście do zatoki



Rys. 1.6. Wyznaczanie linii podstawowej zatoki.

Podsumowując, należy stwierdzić, że państwo nadbrzeżne może, w zależności od różnych warunków, wytyczyć linie podstawowe, stosując na przemian którekolwiek spośród wyżej opisanych metod.

1.4. Zasady wyznaczania zewnętrznej granicy morza terytorialnego

Art. 4 konwencji UNCLOS stanowi, że zewnętrzną granicę morza terytorialnego jest linia, której każdy punkt leży w jednakowej odległości (równej szerokości morza terytorialnego nieprzekraczającej 12 Mm) od najbliższego punktu linii podstawowej. W 1962 r. ze względu na zróżnicowany przebieg linii podstawowej, wynikający z geometrii przebiegu linii brzegowej, zasadnym było uściślenie metod wyznaczania zewnętrznej granicy państw nadbrzeżnych. W związku z powyższym Urząd Geodezji i Hydrografii Stanów Zjednoczonych (ang. United States Coast and Geodetic Survey – USC&GS) zasugerował trzy metody wyznaczania zewnętrznej granicy morza terytorialnego wykorzystując następujące rodzaje linii **[Calderbank B. i in., 2006; Shalowitz A.L., 1962]**:

- linia jednakowa,
- linia kombinacyjna,
- linia intersekcyjna.

Pierwsza z nich (linia jednakowa) to metoda wyznaczania zewnętrznej granicy państwa nadbrzeżnego, która polega na dokładnym odzwierciedleniu linii podstawowej w odległości odpowiadającej szerokości morza terytorialnego. W tej metodzie zewnętrzna granica morza

terytorialnego charakteryzuje się bardzo nieregularnym kształtem (Rys. 1.7). Należy jednak zauważyć, że w wyniku wykorzystania tej metody otrzymuje się krzywą a nie linię (lub łamaną składającą się z odcinków liniowych), która nie spełnia wymogu formalnego dotyczącego liniowości przebiegu zewnętrznej granicy państwa nadbrzeżnego, o którym mowa w art. 4 konwencji UNCLOS.



Rys. 1.7. Wyznaczanie zewnętrznej granicy morza terytorialnego metodą linii jednakowej (opracowanie własne na podstawie: **[Calderbank B. i in., 2006]**).

Druga metoda to kombinacja linii prostych i łuków. Stosuje się ją w przypadku urozmaiconej linii brzegowej. Nie ma ścisłych reguł dotyczących wyznaczania przebiegu zewnętrznej granicy morza terytorialnego metodą linii kombinacyjnej, w związku z czym mogą pojawić się rozbieżności pomiędzy uzyskanymi granicami, które przedstawiono na Rys. 1.8a i 1.8b. Ponadto metoda ta nie spełnia wymogu formalnego, o którym mowa w art. 4 konwencji UNCLOS.



Rys. 1.8. Wyznaczanie zewnętrznej granicy morza terytorialnego metodą linii kombinacyjnej (opracowanie własne na podstawie: **[Calderbank B. i in., 2006]**).

W metodzie intersekcyjnej każdy punkt linii granicznej leży w jednakowej odległości (równej szerokości morza terytorialnego) od najbliższego punktu linii podstawowej. Metoda ta polega na wykreślaniu okręgów o promieniu równym szerokości morza terytorialnego w punktach linii podstawowej wzdłuż wybrzeża, przy najniższym stanie wód określonym na podstawie wieloletnich pomiarów mareograficznych. W wyniku intersekcji poszczególnych okręgów otrzymuje się zewnętrzną granicę morza terytorialnego (Rys. 1.9a). W przypadku,

gdy część wybrzeża tworzą proste linie podstawowe, to wówczas linia intersekcyjna będzie złożona z linii prostych oraz okręgów poddanych procesowi intersekcji (Rys. 1.9b) [Kapoor D.C., Kerr A.J., 1986].



Rys. 1.9. Wyznaczanie zewnętrznej granicy morza terytorialnego metodą linii intersekcyjnej (opracowanie własne na podstawie: **[Calderbank B. i in., 2006]**).

Metoda ta wymaga, aby państwo było w posiadaniu aktualnych map prezentujących linię podstawową przy najniższym stanie wody.

Często zdarza się, że dwa państwa nadbrzeżne, których wybrzeża leżą naprzeciw siebie lub sąsiadują ze sobą, nie mogą rozciągać własnych mórz terytorialnych poza linię środkową (każdy punkt tej linii leży w jednakowej odległości od najbliższego punktu linii podstawowej państw) **[DOALOS, 1982]**. Punkty zmiany kierunku linii środkowej powstają przez złączenie się trzech (ewentualnie dwóch) linii rozpoczynających się na wybrzeżach obu państw o równej długości (Rys. 1.10a). Powyższego postanowienia nie stosuje w sytuacjach, gdy kraje zawarły umowę stanowiącą inaczej lub konieczna jest delimitacja morza terytorialnego w sposób odmienny. W związku z tym, granicę zewnętrzną morza terytorialnego mogą tworzyć punkty środkowe linii ustalonych przez państwa (Rys. 1.10b) **[Calderbank B. i in., 2006]**.





Rys. 1.10. Delimitacja morza terytorialnego między państwami (opracowanie własne na podstawie: **[Calderbank B. i in., 2006]**).

1.5. Linia podstawowa i zewnętrzna granica morza terytorialnego RP

Polska jest krajem, który ratyfikował konwencję UNCLOS, stąd w celu określenia przebiegu linii podstawowej w Polsce przyjęto najniższy stan wody wzdłuż całej długości wybrzeża. Zgodnie z ekspertyzą Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) z maja 1994 r. na temat "*Najniższe stany poziomu morza wzdłuż polskiego wybrzeża*" wynosi on -1.6 m. W oparciu o przyjęte ustalenia w dokumencie, wyznaczono wewnętrzną i zewnętrzną granicę morza terytorialnego na podstawie następujących materiałów źródłowych **[Rada Ministrów RP, 2015]**:

- sesji pomiarowej punktów linii podstawowej,
- skorygowanych współrzędnych punktów linii podstawowej uzgodnionych i przekazanych przez Urząd Morski w Szczecinie, Urząd Morski w Słupsku oraz Urząd Morski w Gdyni,
- umowy między Polską Rzecząpospolitą Ludową a Związkiem Socjalistycznych Republik Radzieckich o rozgraniczeniu wód terytorialnych, strefy ekonomicznej, strefy rybołówstwa morskiego i szelfu kontynentalnego na Morzu Bałtyckim, podpisana w Moskwie dnia 17 lipca 1985 r. (Dz. U. z 1986 r. nr 16 poz. 85),
- protokólarnego opisu przebiegu granicy państwowej między Polską Rzecząpospolitą Ludową a Związkiem Socjalistycznych Republik Radzieckich, w części przylegającej do Morza Bałtyckiego i w Zatoce Gdańskiej, wytyczonej w latach 1957-1958,
- umowy między Polską Rzecząpospolitą Ludową a Niemiecką Republiką Demokratyczną w sprawie rozgraniczenia obszarów morskich w Zatoce Pomorskiej (Dz. U. z 1989 r. nr 43 poz. 233),
- rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 22 lutego 1995 r. w sprawie ustalenia granicy redy dla portów morskich w Świnoujściu i Szczecinie (Dz. U. z 1995 r. nr 20 poz. 101).

Punkty te we wspomnianych regulacjach zostały przedstawione w układzie współrzędnych geograficznych. W związku z tym, zgodnie z § 15.1 pkt 3 **[Rada Ministrów RP, 2012]** na potrzeby wykonywania map morskich, dokonano ich transformacji do układu PL-UTM.

Zagadnienie przebiegu linii podstawowej i granicy morskiej Polski określono w rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 13 stycznia 2017 r. w sprawie szczegółowego przebiegu linii podstawowej, zewnętrznej granicy morza terytorialnego oraz zewnętrznej

granicy strefy przyległej Rzeczypospolitej Polskiej **[Rada Ministrów RP, 2017]**. Przyjęto w nim, że linię podstawową morza terytorialnego Rzeczypospolitej Polskiej stanowi linia geodezyjna łącząca kolejno ponumerowane punkty o współrzędnych zapisanych w formie tekstowej w załączniku nr 1 do rozporządzenia. Jej przebieg zobrazowano w formie graficznej na trzech arkuszach map stanowiących załącznik nr 2 do rozporządzenia (Rys. 1.11).



Rys. 1.11. Przebieg linii podstawowej morza terytorialnego Rzeczypospolitej Polskiej **[Rada Ministrów RP, 2017]**.

Natomiast zewnętrzną granicę morza terytorialnego Rzeczypospolitej Polskiej stanowi linia geodezyjna łącząca kolejno ponumerowane punkty o współrzędnych zapisanych w formie tekstowej w załączniku nr 3 do rozporządzenia. Jej przebieg zobrazowano w formie graficznej na trzech arkuszach map stanowiących załącznik nr 5 do rozporządzenia (Rys. 1.12).



Rys. 1.12. Przebieg zewnętrznej granicy morza terytorialnego Rzeczypospolitej Polskiej **[Rada Ministrów RP, 2017]**.

Przebieg linii podstawowej i zewnętrznej granicy morza terytorialnego określa odpowiednio: 166 i 902 punktów. Są to linie łamane łączące kolejne punkty według rosnącej współrzędnej wschodniej (Easting), których punkty początkowe stanowią przecięcie z granicą niemiecką, a punkty końcowe z granicą rosyjską. Na podstawie tych danych obliczono długości linii podstawowej i zewnętrznej granicy morza terytorialnego wynoszących odpowiednio: 406 i 501 km oraz obszar morza terytorialnego (8 773 km²) **[Specht C. i in., 2016d]**.

1.6. Wybrane aspekty pomiaru linii podstawowej

1.6.1. Wymagania i planowanie sondażu

Można wyróżnić kilka międzynarodowych standardów określających precyzyjne (szczegółowe) zalecenia dotyczące planowania prac hydrograficznych. Jednym z nich jest standard wydany przez Międzynarodową Służbę Hydrograficzną o nazwie "*S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys*" **[IHO, 2008]**, w którym podano odległości między profilami pomiarowymi dla czterech kategorii sondażu oraz zdefiniowano nominalne

odległości między liniami kontrolnymi przy zastosowaniu echosondy jednowiązkowej (ang. Single Beam Echo Sounder – SBES) oraz wielowiązkowej (ang. MultiBeam EchoSounder – MBES).

Kategoria	Specjalna	1a	1b	2
Opis akwenów	Akweny, na których zapas wody pod stępką jest krytyczny	Akweny z głębokościami mniejszymi niż 100 m, gdzie zapas wody pod stępką jest mniej krytyczny, ale mogą istnieć obiekty istotne dla żeglugi	Akweny z głębokościami mniejszymi niż 100 m, gdzie zapas wody pod stępką nie jest tak istotny dla żeglugi	Akweny z głębokościami ponad 100 m, gdzie ogólny opis dna morskiego uważa się za wystarczający
Pomiary z pełnym pokryciem dna	Wymagane	Wymagane	Nie wymagane	Nie wymagane
Rekomendowana maksymalna odległość między profilami	Nie zdefiniowano, wymagane jest pełne pokrycie dna pomiarami	Nie zdefiniowano, wymagane jest pełne pokrycie dna pomiarami	3-krotna średnia głębokość lub 25 m (w zależności która z nich jest większa)	4-krotna średnia głębokość

Tah 11 Zestawienie w	vhranvch w	vmagań dla	nomiarów hy	drograficzny	vch I	[IHO, 20	081
Tab. 1.1. Zestawienie w	y Dialiych w	yinagan ula		yurugranczn	yun	[IIIO, 20	<i>J</i> UOJ.

Z Tab. 1.1 wynika, że dla kategorii specjalnej i 1a nie określono odległości między sąsiednimi profilami pomiarowymi. Jednakże nakazano zapewnić pełne pokrycie dna pomiarami. Oznacza to, że w dzisiejszych czasach jest to tylko możliwe z wykorzystaniem echosondy wielowiązkowej. Dla dwóch pozostałych kategorii sondażu (1b i 2) zdefiniowano maksymalne odległości między profilami sondażowymi. W związku z tym można domniemać, że te dwie kategorie pomiarów odnoszą się do prac hydrograficznych z zastosowaniem echosondy jednowiązkowej. Dla kategorii 1b maksymalna odległość między profilami powinna wynosić 3-krotności średniej głębokości sondowanego akwenu lub 25 m (w zależności która z nich jest większa), natomiast dla kategorii 2 odpowiednio 4-krotności średniej zmierzonej głębokości. Należy jednak zauważyć, że na głębokościach ultra-płytkich zastosowanie echosondy wielowiązkowej, ze względu na bardzo małą głębokość, w sposób oczywisty mija się z celem **[IHO, 2008]**.

W standardzie IHO S-44 zdefiniowano również minimalne odległości między profilami kontrolnymi, które są prowadzone prostopadle do profili podstawowych w celu przeprowadzenia kontroli poprawności wykonanych pomiarów. Przy pracach hydrograficznych z zastosowaniem echosondy SBES odległość ta nie powinna być większa niż 15-krotność odległości między profilami podstawowymi. Natomiast dla echosond MBES pomiary kontrolne należy wykonywać w tych miejscach, gdzie pokrycia sąsiednich pasów pomiarowych wykazują znaczne błędy głębokości [da Silva Pereira D.L., Hughes Clarke J.E., 2015; Grządziel A., Wąż M., 2016; Lucieer V. i in., 2016].

Większość pozostałych standardów dotyczących wykonywania prac hydrograficznych powołuję się na wymagania podane w standardzie IHO S-44 w zakresie planowania sondażu. Istnieją jednak różnice dotyczące określania odległości między profilami sondażowymi. Przykładowo w standardzie wydanym przez Amerykańską Narodową Służbę Oceaniczną i Meteorologiczną (ang. National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) o nazwie *"NOS Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables"* **[NOAA, 2017]** można znaleźć informacje na temat dopuszczalnej odległości między profilami sondażowymi z wykorzystaniem echosondy jednowiązkowej. Powinna ona być nie mniejsza niż 3-5 m. Również w tym standardzie zdefiniowano odległość między sąsiednimi pasami profilowymi

z wykorzystaniem echosondy wielowiązkowej, jednakże nie określono w nim strefy przysłonu między sąsiednimi pasami. Jedyny warunek jaki należy spełnić podczas wykonywania prac hydrograficznych z zastosowaniem echosondy MBES, to zapewnienie pełnego pokrycia dna pomiarami **[NOAA, 2017]**. W innym standardzie wydanym przez Korpus Inżynieryjny Armii Stanów Zjednoczonych (ang. United States Army Corps of Engineers – USACE) o nazwie *"EM 1110-2-1003 USACE Standards for Hydrographic Surveys"* **[USACE, 2013]** określono odległość między sąsiednimi liniami pomiarowymi przy użyciu echosondy wielowiązkowej MBES (*O*):

$$O = 2 \cdot g \cdot \tan\left(\frac{a}{2}\right) \cdot (1 - s), \qquad (1.1)$$

gdzie:

g – głębokość sondowanego akwenu [m],

- a sektor kątowy promieniowania echosondy wielowiązkowej MBES [°],
- $s\,$ strefa przysłonu między sąsiednimi pasami pomiarowymi, która powinna wynosić od 20 do 100% [%].

Na podstawie przeprowadzonych analiz można zaobserwować, że w żadnym z międzynarodowych standardów odnoszących się do wykonywania prac hydrograficznych nie sprecyzowano pod jakim kątem i względem czego powinny być projektowane profile sondażowe. Informacje na temat można znaleźć w zaleceniach krajowych oraz książkach i publikacjach z hydrografii **[Kierzkowski W., 1984a]**.

Pomiary linii podstawowej morza terytorialnego są wykonywane na akwenach przybrzeżnych charakteryzujących się nieznacznymi głębokościami **[DOALOS, 1982; Sejm RP, 1991]**. W Polsce linia ta znajduje się na głębokości od kilkudziesięciu do 1-2 m poniżej aktualnego stanu powierzchni wody, a jej położenie zależy od dnia (wahania stanu wody) oraz miejsca lokalizacji wzdłuż wybrzeża (akweny różnią się między sobą ukształtowaniem dna morskiego). W związku z tym, postanowiono wyróżnić kilka reprezentatywnych rodzajów akwenów, na których wykonuje się pomiary linii podstawowej (Tab. 1.2) **[Specht M., Specht C., 2018a]**.

Nazwa akwenu	Cechy	Zdjęcie
Akwen nr 1: Otwarte morze plaża miejska w Gdyni	Typowo przebiegająca linia brzegowa (prostoliniowy odcinek piaszczysty), która jest umocniona gwiazdoblokami i betonowymi nabrzeżami.	
Akwen nr 2: Ujście rzeki ujście Wisły Śmiałej w pobliżu Narodowego Centrum Żeglarstwa (NCŻ) w Gdańsku	Akwen o dużej dynamice zmian hydromorfologicznych. Jest to obszar naturalny (pozbawiony budowli hydrotechnicznych).	

Tab. 1.2. Reprezentatywne akweny, na których wykonuje się pomiary linii podstawowej morza terytorialnego.

Akwen nr 3: Wyjście z dużego portu obszar w pobliżu podejścia do Górek Zachodnich od Zatoki Gdańskiej

Akwen o dużym nasyceniu budowli hydrotechnicznych.



Układ profili sondażowych różni się w zależności od miejsca realizacji pomiarów linii podstawowej (Tab. 1.2). Na Rys. 1.13 i 1.14 zaprezentowano profile pomiarowe dla dwóch reprezentatywnych akwenów, które zostały zaprojektowane z zgodnie ogólnymi zasadami dotyczącymi planowania prac sondażowych. Wyznaczono podstawowe profile pomiarowe prostopadle do kierunku przebiegu linii brzegowej oraz przyjęto, że odległości miedzy tymi profilami będą wynosić 5-10 m. Ponadto w celu przeprowadzenia kontroli poprawności wykonanych pomiarów zaprojektowano profile kontrolne prostopadle do kierunku przebiegu profili podstawowych, z zachowaniem zasad zawartych w **[IHO, 2008]**. Rys. 1.13 przedstawia przykładowy plan realizacji sondażu na akwenie nr 2 położonym w pobliżu ujścia Wisły Śmiałej.



Rys. 1.13. Układ profili podstawowych (kolor czerwony) oraz kontrolnych (kolor zielony) przy wyznaczaniu linii podstawowej morza terytorialnego RP dla akwenu nr 2.

Natomiast Rys. 1.14 prezentuje układ profili sondażowych na akwenie nr 3 znajdującym się przy podejściu do Górek Zachodnich od Zatoki Gdańskiej.



Rys. 1.14. Układ profili podstawowych (kolor czerwony) oraz kontrolnych (kolor zielony) przy wyznaczaniu linii podstawowej morza terytorialnego RP dla akwenu nr 3.

Istotne podczas realizacji prac sondażowych jest posiadanie oprogramowania służącego do planowania (rozmieszczania) profili pomiarowych oraz wizualizacji (jeśli potrzeba) położenia jednostki pływającej na mapie. Większość programów tego typu umożliwia projektowanie profili sondażowych (kierunku i odległości między nimi) w oparciu o podany akwen pomiarowy - najczęściej na podstawie ortofotomapy pochodzącej z serwisu Google Maps (Rys. 1.15a) **[Specht C. i in., 2017b]**. Niektóre z nich posiadają również możliwość monitoringu położenia jednostki w czasie rzeczywistym. Do najbardziej popularnych programów służących do prowadzenia nawigacji podczas podróży wodnych (morskich i śródlądowych), a także do ich planowania należą m.in. HYPACK, OpenCPN, QINSy (Rys. 1.15b), czy Transas iSailor.



Rys. 1.15. Aplikacje służące do planowania prac sondażowych, takie jak AutoDron (a) oraz QINSy (b).

1.6.2. Pomiar poziomu wody

W związku z dużą dynamiką zmian poziomu wód morskich wywoływanych czynnikami anemobarycznymi, hydrologicznymi oraz elementami pływowymi jednym z najważniejszych zadań każdego hydrografa jest uzyskiwanie informacji na temat aktualnego poziomu wody (stanu wód) w rejonie wykonywania pomiarów batymetrycznych. Informacja ta pozwala na wyrażenie zmierzonych wartości głębokości względem ustalonego poziomu odniesienia **[Kierzkowski W., 1984b]**. Ze względu na bezpieczeństwo nawigacji, większość narodowych biur hydrograficznych oraz IHO przyjmuje za zero mapy LAT **[Calderbank B. i in., 2006]**.

W Polsce zagadnieniem poziomu wód zajmują się Oddziały Morskie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (OM IMGW), które odpowiadają za rejestrację, udostępnianie, archiwizowanie informacji na ich temat. Do tego celu wykorzystują one posterunki wodne, zwane wodowskazami, znajdujące się w portach i przystaniach morskich. Każde stanowisko wodowskazowe składa się z przyrządu do obserwacji wahań poziomu wody (łata wodowskazowa) lub urządzenia do obserwacji i rejestracji danych pomiarowych (mareograf) oraz reperów geodezyjnych, względem których urządzenia te są dowiązane do geodezyjnego układu wysokościowego. Najprostszym wodowskazem, znajdującym dotychczas najszersze zastosowanie, jest łata wodowskazowa. Kolejnym powszechnie wykorzystywanym urządzeniem jest mareograf pozwalający w trybie ciągłym rejestrować zmiany poziomu wody. Obecnie coraz częściej stosowanymi urządzeniami do rejestracji poziomu wód są automatyczne telemetryczne stacje hydrologiczne (ATSH) wyposażone w czujniki stanu wody oraz funkcję przesyłania danych (modem GPRS lub radiowy) do baz danych IMGW-PIB. Dzięki tym funkcjom pozyskane wyniki mogą być automatycznie udostępniane w systemie teleinformatycznym (<u>http://www.pogodynka.pl/</u>). Należy zauważyć, że wszystkie opisane powyżej metody umożliwiają odczyt poziomu wody z dokładnością 1 cm oraz zarówno mareografy, jak i łaty wodowskazowe są coraz częściej zastępowane przez stacje ATSH **[IMGW-PIB, 2015]**.

Zgodnie z definicją zawartą w art. 5 konwencji UNCLOS, przed przystąpieniem do pomiarów linii podstawowej morza terytorialnego niezbędne jest określenie najniższego stanu wody, jaki kiedykolwiek odnotowano wzdłuż wybrzeża danego państwa nadbrzeżnego **[DOALOS, 1982]**. Wartym podkreślenia jest fakt, iż w żadnym międzynarodowym akcie prawnym regulującym zasady prowadzenia prac hydrograficznych nie sprecyzowano metody pozyskiwania danych dotyczących stanu wody. Jednakże najbardziej uzasadnione wydaje się pozyskiwanie tych informacji ze stanowiska wodowskazowego znajdującego się najbliżej miejsca wykonywania pomiarów hydrograficznych. Stąd dla celów niniejszej pracy uzyskano od Oddziału Morskiego IMGW-PIB w Gdyni informacje dotyczące najniższych stanów wody jakie kiedykolwiek zarejestrowano na polskich stacjach wodowskazowych w latach 1945-2015 (Rys. 1.16) **[Specht M., 2016]**.



Rys. 1.16. Absolutnie minimalne poziomy wody jakie kiedykolwiek zarejestrowano na polskich stacjach wodowskazowych w latach 1945-2015.

Rzędna zera każdego wodowskazu jest odniesiona do poziomu morza w Kronsztadzie w Rosji, który wynosi -508 cm, z wyjątkiem Darłowa (-507.3 cm). Znając dodatkowo najniższy i aktualny stan wody np. z serwisu pogodowego IMGW-PIB (Rys. 1.17), można było obliczyć głębokość, na której w momencie pomiarów znajdowała się linia podstawowa (d_{LP}) za pomocą wzoru:

$$d_{LP} = H_{ASW} - H_{NSW}, \qquad (1.2)$$

gdzie:

 $H_{\rm \scriptscriptstyle ASW}$ – aktualny stan wody w przyjętym układzie odniesienia [m],

 $H_{\rm NSW}$ – najniższy stan wody w przyjętym układzie odniesienia [m].

Jednakże należy zaznaczyć, że stany wody trzeba sprowadzić do jednolitego układu odniesienia obowiązującego w danym państwie. W Polsce zgodnie z rozporządzeniem **[Rada Ministrów RP, 2012]** poziomy wody można odnieść zarówno do układu wysokościowego Kronsztad (PL-KRON86-NH), nie dłużej niż do 2019 r., jak i Amsterdam (PL-EVRF2007-NH). Stosując transformację wysokości pomiędzy układami PL-EVRF2007-NH i PL-KRON86-NH,

można wyznaczyć potrzebny stan wody **[Kurałowicz Z., Słomska A., 2014; Kurałowicz Z., Słomska A., 2015]**:

$$H_{PL-KRON86-NH} = H_{PL-EVRF2007-NH} - dNH ,$$
 (1.3)

gdzie:

 $H_{PL-KRON86-NH}$ – wysokość normalna punktu w układzie PL-KRON86-NH [m], $H_{PL-EVRF2007-NH}$ – wysokość normalna punktu w układzie PL-EVRF2007-NH [m], dNH – różnica wysokości normalnych pomiędzy układami PL-EVRF2007-NH i PL-KRON86-NH, która jest zależna od szerokości (*B*) i długości (*L*) geodezyjnej punktu [m].



Rys. 1.17. Wykres zmienności poziomu morza obserwowany na mareografie w Gdyni według serwisu pogodowego IMGW-PIB.

Serwis pogodowy IMGW-PIB udostępnia informacje na temat wskazań poziomu wody (o pełnych godzinach) za ostatnie trzy doby (Rys. 1.17). W związku z tym, że w komunikacie standardu NMEA (zapisywanym w pamięci wewnętrznej odbiornika GNSS) oprócz współrzędnych płaskich oraz głębokości podawana jest również informacja na temat czasu realizacji pomiarów, to na etapie przetwarzania danych można dokładnie określić na jakiej głębokości znajdowała się linia podstawowa o wybranej godzinie. W przypadku akwenów bezpływowych np. Morze Bałtyckie różnice stanu wody pomiędzy kolejnymi godzinami na tych samych stacjach wodowskazowych są niewielkie i wynoszą (jeżeli w ogóle) kilka centymetrów. Natomiast w celu zapewnienia wysokiej dokładności pomiarów, dla akwenów pływowych, cogodzinne rejestracje poziomu wody ze stacji wodowskazowej mogą okazać się niewystarczające. Dlatego w takim przypadku należy porównać aktualny stan wody, który został odczytany z wodowskazu, ze stanem wody obliczonym na podstawie tablicy pływów, wydawanej corocznie przez Admiralicję Brytyjską **[UKHO, 2019]**. W tym momencie można określić na jakiej głębokości znajdowała się linia podstawowa w czasie pomiarów.

1.6.3. Pozostałe pomiary oceaniczne

Liczne i długotrwałe badania wykazały, że procesy hydrofizyczne zachodzące w środowisku wodnym wykazują czasowe i przestrzenne fluktuacje w skali globalnej. Dlatego zarówno przed, jak i w trakcie realizacji każdych pomiarów hydrograficznych należy dokładnie określić wzajemne związki między procesami i zjawiskami zachodzącymi w środowisku wodnym we

wzajemnym oddziaływaniu z atmosferą, lądem oraz dnem morskim. Zagadnieniem tym zajmuje się interdyscyplinarna nauka z pogranicza biologii, meteorologii, fizyki, geofizyki, zwana oceanografią **[Stewart R.H., 1997-2000; Talley L.D. i in., 2011]**. W niniejszym podrozdziale zostaną omówione wybrane parametry oceanograficzne, bez których niemożliwa byłaby realizacja pomiarów hydrograficznych. Poza zaprezentowanym wcześniej poziomem wody, należą do nich: temperatura warstwy powierzchniowej i na głębokościach, zasolenie, ciśnienie hydrostatyczne, falowanie oraz prądy morskie.

Nie zawsze w zaplanowanym przez nas dniu da się przeprowadzić pomiary hydrograficzne z zastosowaniem bezzałogowej jednostki pływającej. Na podstawie nabytych doświadczeń prace sondażowe w strefie przybrzeżnej z wykorzystaniem ważącej ok. kilkanaście kilogramów jednostki mogą być wyłącznie wykonywane przy niewielkim falowaniu (stan morza 0-1 w skali Douglasa) oraz wietrze (siła wiatru 0-1 w skali Beauforta). Wiatr wiejący z siłą blisko 10 km/h (2 w skali Beauforta) powoduje powstawanie małych falek o wysokości powyżej 10-20 cm na powierzchni wody, które mogą niekorzystnie wpływać na utrzymanie jednostki pomiarowej na profilu sondażowym, jak i zachowanie jej stabilności (bez znacznych przechyłów). Do określania przewidywanych warunków pogody mogą posłużyć krótkoterminowe prognozy meteorologiczne, których zasoby są udostępnione w sieci np. http://www.pogodynka.pl/. Opisane powyżej parametry oceanograficzne (falowanie i wiatr) pełnią kluczową rolę w procesie realizacji pomiarów hydrograficznych z zastosowaniem bezzałogowej jednostki pływającej. Brak korzystnych warunków hydrometeorologicznych skutkuje niemożnością wykonania tego typu prac. Dlatego też w okresie letnim, jak i zimowym należy ciągle obserwować krótkoterminowe prognozy pogody, a w przypadku wystąpienia "korzystnego" okna pogodowego powinno przystąpić do realizacji pomiarów batymetrycznych na danym akwenie.

Po ustaleniu korzystnego okna pogodowego należy dokonać oceny kolejnych parametrów oceanograficznych czyli temperatury, ciśnienia, zasolenia, które mają bezpośredni wpływ na prędkość rozchodzenia się dźwięku w wodzie (w głównej mierze od niej zależy dokładność rejestrowanych przez urządzenie hydroakustyczne głębokości). Wielkość tą można wyznaczyć z dokładnością do $\Delta c = \pm 0.03 \ m/s$, przy użyciu metod bezpośrednich, takich jak np. mierniki prędkości dźwięku (ang. Sound Velocity Profiles – SVPs), które mierzą rzeczywistą prędkość dźwięku w wodzie w funkcji głębokości. Można wyróżnić również metody pośrednie, do których zalicza się sondy oceanograficzne CTD (ang. Conductivity, Temperature, Depth), które są używane do pomiarów temperatury i zasolenia oceanu oraz innych własności fizycznych w głębi oceanu i na jego powierzchni, takich jak np. konduktywność (przewodność właściwa), czy zawartość tlenu [Makar A., 2008; WCNJIK, 2009b]. Następnie na podstawie pomierzonych wielkości fizycznych można obliczyć wartość prędkości dźwięku w wodzie, przy użyciu wzorów empirycznych: Wooda, Wilsona, Medwina, Chena i Millero, czy Del Grosso. Najbardziej rozpowszechnionym i uznanym za najbardziej dokładny jest wzór empiryczny Wilsona, ustalający zależność prędkości dźwięku w wodzie morskiej c [m/s] od temperatury T [°C], zasolenia S [‰] i ciśnienia P [kG/cm²]. Wzór ten ma postać wielomianu [Wilson W.D., 1962]:

$$c(S,T,P) = 1449.14 + \Delta c_s + \Delta c_T + \Delta c_P + \Delta c_{STP}.$$
(1.4)

Pozostałe składniki tego wzoru wyrażają poprawki na inne warunki, odbiegające od standardowych:

$$\Delta c_s = 1.39799 \cdot (S - 35) + 1.6920 \cdot 10^{-3} \cdot (S - 35)^2, \qquad (1.5)$$

$$\Delta c_T = 4.5721 \cdot T - 4.4531 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - 2.6045 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 7.9851 \cdot 10^{-6} \cdot T^4 , \qquad (1.6)$$

$$\Delta c_{p} = 1.60272 \cdot 10^{-1} \cdot P + 1.0268 \cdot 10^{-5} \cdot P^{2} + 3.5216 \cdot 10^{-9} \cdot P^{3} - 3.3606 \cdot 10^{-12} \cdot P^{4}, \qquad (1.7)$$

$$\Delta c_{STP} = (S - 35) \cdot (-1.1244 \cdot 10^{-2} \cdot T + 7.7711 \cdot 10^{-7} \cdot T^{2} + 7.7016 \cdot 10^{-5} \cdot P + + 1.2943 \cdot 10^{-7} \cdot P^{2} + 3.1580 \cdot 10^{-8} \cdot P \cdot T + 1.5790 \cdot 10^{-9} \cdot P \cdot T^{2}) + + P \cdot (-1.8607 \cdot 10^{-4} \cdot T + 7.4812 \cdot 10^{-6} \cdot T^{2} + 4.5283 \cdot 10^{-8} \cdot T^{3}) + (1.8) + P^{2} \cdot (-2.5294 \cdot 10^{-7} \cdot T + 1.8563 \cdot 10^{-9} \cdot T^{2}) + -P^{3} \cdot (-1.9646 \cdot 10^{-10} \cdot T) .$$

Dokładność tego wzoru szacuje się na ±0.3 m/s w zakresie zasoleń wody 0 < S < 37%, temperatur $4^{\circ}C < T < 30^{\circ}C$ i ciśnień $1 kG / cm^2 < P < 1000 kg / cm^2$.

Niemniej jednak do precyzyjnego określania prędkości dźwięku w wodzie (w przypadku nieposiadania mierników prędkości i sond oceanograficznych) można posłużyć się danymi oceanograficznymi udostępnianymi w systemie teleinformatycznym (o ile istnieje) przez instytucję odpowiedzialną za monitoring wybranego akwenu wodnego. Przykładem takiego serwisu może być SatBałtyk (<u>http://satbaltyk.iopan.gda.pl</u>), który w sposób ciągły rejestruje i podaje na swojej stronie internetowej informacje na temat zmian środowiska Morza Bałtyckiego. Udostępnia on co sześć godzin każdego dnia z wysoką rozdzielczością (wynoszącą 1 km) oraz dokładnością (do części dziesiętnych) informacje dotyczące m.in. temperatury powierzchni morza, temperatury wody na głębokości: 0, 3, 5, 10, 20, 30 m oraz zasolenia powierzchni morza **[Ostrowska M. i in., 2015b; Woźniak B. i in., 2011a; Woźniak B. i in., 2011b]**.

Najbardziej zmiennym i mającym największy wpływ parametrem na prędkość rozchodzenia się dźwięku w wodzie jest temperatura. Średnio prędkość dźwięku w wodzie zwiększa się o 4.5 m/s przy wzroście temperatury o 1°C. Drugim czynnikiem, który w sposób umiarkowany wpływa na prędkość dźwięku jest zasolenie. Parametr opisujący zawartość soli w wodzie zmienia się nieznacznie tzn. jego wartość rośnie w przybliżeniu o 1.3 m/s przy wzroście zasolenia o 1‰. Informacje na jego temat można pozyskiwać (bez konieczności używania aparatury pomiarowej) z dokładnością 0.1‰ np. dzięki systemowi SatBałtyk. Trzecim czynnikiem, wpływającym w najmniejszym (znikomym) stopniu na prędkość rozchodzenia się dźwięku w wodzie jest ciśnienie (głębokość), które rośnie w przybliżeniu o 1.6 m/s przy wzroście głębokości o 100 m. W przypadku pomiarów realizowanych w strefie przybrzeżnej wartość ciśnienia nie ma praktycznie żadnego wpływu. Jeśli przyjmie się założenie, że przyspieszenie ziemskie oraz gęstość wody są stałe, to ciśnienie hydrostatyczne będzie zależało wyłącznie od wysokości słupa cieczy. Przykładowo, jeżeli porówna się

wartości prędkości dźwięku w wodzie na głębokości 0 i 1 m, to różnica między nimi będzie niewielka, wynosząca ok. 0.01 m/s **[WCNJiK, 2009a]**.

Należy podkreślić, że znaczny wpływ na dokładność pomiarów hydrograficznych mogą mieć krótkookresowe (dobowe) zmiany temperatury powierzchni wody. Wykorzystując informacje z publikacji **[Makar A., 2008]**, można zauważyć, że w ciągu doby różnica temperatur jest wywołana przede wszystkim nagrzewaniem warstwy wody przez Słońce (Rys. 1.18). Zakres zmian prędkości dźwięku o charakterze dobowym może wynosić w sezonie letnim nawet 40 m/s.



Rys. 1.18. Zakres zmian prędkości dźwięku w okresie letnim o charakterze dobowym na Zatoce Gdańskiej według **[Makar A., 2008; Makar A., Naus K., 2003]**.

Dlatego w przypadku posiadania echosondy jednowiązkowej należałoby okresowo np. co jedną godzinę określać wartość temperatury powierzchni wody za pomocą termometru lub wspomnianych wcześniej urządzeń przeznaczonych do tego celu. Posłużyłyby one do wyznaczenia aktualnej prędkości kalibracyjnej urządzenia sondującego [Grządziel A., 2006; WCNJiK, 2009b].

Ostatnim omawianym parametrem oceanograficznym są prądy morskie, które z punktu widzenia utrzymania, sterowania jednostki pomiarowej wzdłuż ustalonego profilu sondażowego mogą okazać się niezwykle istotne. W niektórych sytuacjach nie jest możliwe wykonanie pomiarów batymetrycznych przy użyciu bezzałogowej jednostki pływającej (ze względu na zbyt silne prądy morskie w strefie przybrzeżnej). Informacje na temat prędkości i kierunku prądów morskich można pozyskiwać nieodpłatnie (podobnie jak temperaturę, czy internetowych udostepnianych zasolenie) Z portali przez np. NASA (http://oceanmotion.org/html/resources/oscar.htm), czy również Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk (http://www.satbaltyk.pl/en/sb product/salinity/salinity-pm3dmodel/). Mapy rozkładów prądów morskich informują w sposób graficzny (za pomocą strzałek) o kierunku przepływu wód oraz o ich prędkości (stosowanie do zamieszczonej na wykresie skali) [Ostrowska M. i in., 2015a].

1.6.4. Hydrograficzny pomiar głębokości

W niniejszej części zostanie przeprowadzona analiza wyposażenia bezzałogowych jednostek pływających, które umożliwia wykonanie założonego pomiaru. Należy przyjąć, że wyposażenie techniczne umożliwiające wykonanie pomiarów linii podstawowej morza terytorialnego (niezbędne do umieszczenia na jednostce bezzałogowej) obejmuje **[Specht C. i in., 2016c]**:

- miniaturową echosondę pionową,
- odbiornik GNSS wykorzystujący sieć geodezyjną GNSS lud odbiornik DGPS.

Obecnie jedynym urządzeniem hydroakustycznym przeznaczonym do pomiaru głębokości, który można zamontować na bezzałogowej jednostce pływającej jest miniaturowa echosonda jednowiązkowa. Pozostałe urządzenia takie jak echosonda wielowiązkowa oraz batymetryczny system wieloprzetwornikowy MTES (ang. Multiple Transducer Echo Sounder) ze względu na znaczne rozmiary i wagę części nadawczych nie mogą być umieszczone na jednostce pomiarowej. Przy wyborze echosondy SBES należy kierować się przede wszystkim częstotliwością jej pracy. Dlatego przy pomiarach batymetrycznych na akwenach ultrapłytkich powinno się stosować echosondy pracujące w zakresie wysokich częstotliwości. Pozostałe (mniej znaczące) wymagania dla echosond jednowiązkowych podczas pomiarów linii podstawowej zostały szczegółowo przedstawione w publikacji **[Specht C. i in., 2016c]**.

Przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów batymetrycznych należy dokonać kalibracji wskazań urządzeń pomiarowych w celu zweryfikowania poprawności działania oraz wyeliminowania błędów. Dlatego w przypadku echosondy SBES należy każdorazowo wykonać dwie czynności **[Grządziel A., 2006; WCNJiK, 2009b]**:

- pomiar pionowego rozkładu prędkości dźwięku w wodzie,
- pomiar zanurzenia przetwornika echosondy.

Określanie prędkości rozchodzenia się dźwięku w wodzie zostało dokładnie omówione we wcześniejszym podrozdziale dotyczącym pomiarów oceanograficznych. Jednakże należy pamiętać o ustawieniu tej prędkości w echosondzie. Do tego celu można wykorzystać darmowe oprogramowanie SonarMite App+, które należy pobrać, a następnie zainstalować na urządzeniu mobilnym (laptop, tablet, telefon komórkowy). Na początku trzeba sparować echosondę z urządzeniem mobilnym przy wykorzystaniu bezprzewodowej transmisji danych o krótkim zasięgu (Bluetooth). Następnie za pomocą przycisków SV+ i SV- można ustawić prędkość kalibracyjną w echosondzie. Program SonarMite App+ umożliwia również wyświetlanie zmierzonych głębokości na ekranie urządzenia mobilnego (Rys. 1.19).

Kolejną składową pomiaru głębokości jest zanurzenie przetwornika echosondy. W związku z tym, że zanurzenie przetwornika echosondy zamontowanego na bezzałogowej jednostce pływającej jest niewielkie (ok. 10 cm), to w celu określenia jego wartości można wykorzystać miarę zwijaną. Dzięki temu przyrządowi możliwe jest oszacowanie zanurzenia dolnej podstawy przetwornika względem lustra wody z dokładnością wynoszącą niespełna 1 cm. Ponieważ ta wielkość jest stała, to podczas przetwarzania (opracowywania) danych batymetrycznych należy ją dodać do zmierzonych przez echosondę głębokości.



Wyświetlanie danych w formacie KML

Rys. 1.19. Okno aplikacji służącej do ustawienia prędkości kalibracyjnej echosondy jednowiązkowej oraz wyświetlania zarejestrowanych głębokości.

2. Metodyka wyznaczania linii podstawowej morza terytorialnego z zastosowaniem bezzałogowej jednostki hydrograficznej oraz geodezyjnych sieci satelitarnych GNSS

2.1. Bezzałogowe jednostki hydrograficzne

Pomiary hydrograficzne, w tym pomiary linii podstawowej, są wykonywane przez państwowe urzędy ds. hydrografii morskiej. Szczególna specyfika pomiarów linii podstawowej związana jest z posiadaniem jednostki pomiarowej, która ma możliwość realizacji sondażu hydrograficznego na akwenach ultra-płytkich (na głębokościach poniżej 1 m). W Polsce w posiadaniu urzędów morskich oraz Dywizjonu Zabezpieczenia Hydrograficznego Marynarki Wojennej RP jest kilkanaście jednostek hydrograficznych, których dane (a w szczególności zanurzenie) zaprezentowano w Tab. 2.1.

Tab. 2.1. Wykaz jednostek hydrograficznych będących w posiadaniu urzędów morskich oraz Dywizjonu Zabezpieczenia Hydrograficznego Marynarki Wojennej RP **[Specht M., 2016]**.

Właściciel	Parametry	Zdjęcie
	Kutry hydrograficzne: K-4, K-10 , rok produkcji: 1988-1998, wymiary: 18.7 x 4.5 x <mark>1.5 m</mark>	
Dywizjon Zabezpieczenia Hydrograficznogo	Okręt hydrograficzny: ORP Heweliusz , rok produkcji: 1981, wymiary: 61.6 x 10.8 x <mark>3.3 m</mark>	
Marynarki Wojennej RP	Okręt hydrograficzny: ORP Arctowski , rok produkcji: 1982, wymiary: 61.6 x 10.8 x <mark>3.3 m</mark>	-
	Motorówki hydrograficzne: Wildcat-40 , rok produkcji: 2014, wymiary: 12.8 x 4.8 x 1.3 m	
	Kutry hydrograficzne: Hydrograf-7 , Hydrograf-10 , rok produkcji: 1960-1978, wymiary: 17.81-18.09 x 4.2-4.29 x 1.5-1.9 m	
	Łódź hydrograficzna: Sonar-4 , rok produkcji: 2010, wymiary: 10.5 x 3.16 x <mark>0.9 m</mark>	sting.
Urząd Morski w Gdyni	Motorówka inspekcyjno-patrolowa: Kontroler-20 , rok produkcji: 2014, wymiary: 20.34 x 5.79 x 1.7 m	
	Statek inspekcyjno-kontrolny: Kontroler-8 , rok produkcji: 1971, wymiary: 20.58 x 4.38 x 1.15 m	
	Stawiacze pław: s/v Zodiak , s/v Tucana , rok produkcji: 1981-1998, wymiary: 21.87-61.33 x 5.7-10.83 x <mark>2.1-3.27 m</mark>	
Urząd Morski w Słupsku	Łódź hydrograficzna: Hydrograf-1 , rok produkcji: 2012, wymiary: 10.5 x 3.5 x 0.7 m	
Urząd Morski w Szczecinie	Katamaran hydrograficzny: m/s Kastor , rok produkcji: 2007, wymiary: 12.1 x 4.8 x <mark>0.7 m</mark>	

Kutry hydrograficzne: m/s Galaktyka , m/s Wega , rok produkcji: 1974-1998, wymiary: 17.64-29.2 x 5.7-6.82 x 1.75-1.8 m	
Motorówki hydrograficzne: Hydrograf-22 , Hydrograf-27 , MOT-UMS-2 , rok produkcji: 1986-1990, wymiary: 10.89-10.97 x 3.41-3.42 x 0.6-0.72 m	
Jednostka inspekcyjno-patrolowa: Magda , rok produkcji: 2012, wymiary: 14.95 x 4.7 x 1.5 m	
Stawiacze pław: m/s Planeta , m/s Syriusz , rok produkcji: 1982-1992, wymiary: 21.64-55.21 x 8.8-10.81 x 1.8-3.19 m	

Analiza zaprezentowanych danych w formie tabelarycznej dowodzi, że żadna z instytucji odpowiedzialnych za realizację pomiarów linii podstawowej w Polsce nie dysponuje jednostką hydrograficzną zdolną do realizacji pomiarów na akwenach ultra-płytkich.

Należy również zauważyć, że zastosowanie klasycznych jednostek hydrograficznych do pomiaru linii podstawowej skutkowałoby koniecznością przerwania przez taką jednostkę realizacji pomiaru głębokości na izobacie zapewniającej jej bezpieczeństwo. Oznacza to, że nawet wykorzystując motorówki hydrograficzne BHMW (Hydrograf-22, Hydrograf-27, MOT-UMS-2), sondaż na głębokościach poniżej 2 m skutkowałby zagrożeniem uszkodzenia aparatury lub samej jednostki. W efekcie doszłoby do braku rzeczywistych danych pomiarowych umożliwiających określenie rzeczywistego przebiegu linii podstawowej. Należy krytycznie ocenić praktyki, w których dochodzi do liniowej interpolacji zmian głębokości pomiędzy zmierzoną linią brzegową a wartościami głębokości uzyskanymi na akwenach głębszych niż poziom linii podstawowej (Rys. 2.1).





Rys. 2.1. Profile sondażu hydroakustycznego (po lewej) oraz strefa pozbawiona ze względu na głębokość danych pomiarowych (po prawej) **[Makar A., Naus K., 2003]**. Rysunki okien programu pozyskano od prof. Krzysztofa Nausa.

W efekcie przedstawionego na rysunku przykładu otrzymuje się mapę batymetryczną akwenu, na której wszystkie izobaty dla małych głębokości są do siebie równoodległe. Jest to efekt liniowej interpolacji pomiędzy linią brzegową (głębokość 0 m) a pomiarami realizowanymi do izobaty 1 m.

Początek XXI wieku to era wykorzystania jednostek bezzałogowych w różnych aplikacjach pomiarowych. Współczesne autonomiczne i bezzałogowe jednostki pływające
(ang. Autonomous Surface Vehicle – ASV, Unmanned Surface Vehicle – USV) to różnorodne rozwiązania konstrukcyjne w zakresie budowy kadłuba oraz napędu jednostki: jednokadłubowe, dwukadłubowe z napędem śrubowym lub bezśrubowym o małym zanurzeniu. Umożliwiają one wpłynięcie w akwen trudnodostępny ze względu na występowanie płytkowodzia [Romano A., Duranti P., 2012]. Pomiary batymetryczne jako element pomiarów hydrograficznych, ukierunkowanych na pomiar ukształtowania dna, wymagają odpowiedniej dokładności określenia pozycji [IHO, 2008], stąd zastosowanie jednostek bezzałogowych w hydrografii można dziś traktować jako początek nowej ery w tym zakresie.

W zależności od wielkości oraz wyporności jednostki bezzałogowej istotną wagę odgrywa tu wyposażenie, a w szczególności przetworniki echosond jedno i wielowiązkowych. Echosondy jednowiązkowe, małe i zazwyczaj niewymagające stosowania kompensatorów zakłóceń ruchu, mogą być wykorzystywane na mniejszych jednostkach pływających do wyznaczania orientacji przestrzennej **[Makar A., Naus K., 2003]**. W przypadku stosowania echosond wielowiązkowych, jednostka pomiarowa będąca jej nosicielem będzie większa.

Bezzałogowa jednostka hydrograficzna to zdalnie sterowany pojazd pływający, sterowany radiowo, umożliwiający sprzętową integrację z odbiornikiem fazowym GNSS (ang. Global Navigation Satellite System) oraz echosondą pionową (wyposażenie minimalne). Przeznaczony jest on do realizacji pomiarów hydrograficznych: basenów portowych, jezior, rzek oraz małych zbiorników wodnych. Analiza porównawcza współcześnie stosowanych jednostek tego typu pozwoliła na określenie ich preferowanych charakterystyk eksploatacyjnych i technicznych, którymi są:

- sterowanie radiowe,
- zasięg min. 1 km,
- prędkość min. 5 w.,
- zasilanie elektryczne silników zapewniające minimalną autonomiczność 6 h,
- rekomendowane wymiary: 150 x 100 cm,
- dopuszczalna masa obiektu umożliwiająca jego swobodne przenoszenie 40 kg,
- preferowana jest jednostka dwukadłubowa,
- możliwie maksymalna dzielność morska.

Przykładowe jednostki zaprezentowano na Rys. 2.2.







Seafloor EchoBoat-ASV

Seafloor HyDrone-ASV

Seafloor EchoBoat-RCV

Rys. 2.2. Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne bezzałogowych jednostek hydrograficznych.

Należy w tym miejscu podkreślić, iż dostępne na rynku jednostki w większości przypadków wymagają sterowania bezpośredniego, co oznacza, że utrzymanie jej na profilu sondażowym wymaga od operatora nabycia odpowiednich w tym względzie umiejętności. Jednakże aktualnie dostępne są również w sprzedaży bezzałogowe jednostki hydrograficzne, które umożliwiają realizację pomiarów (misji) w sposób w pełni autonomiczny. To rozwiązanie zostanie opisanie w jednym z kolejnych rozdziałów.

Minimalne wyposażenie bezzałogowej jednostki hydrograficznej powinno obejmować (Rys. 2.3):

- system pozycjonowania mogący wykorzystać jedno z podanych rozwiązań: DGPS, EGNOS, multi-GNSS lub RTK/RTN,
- miniaturowa echosonda pionowa spełniająca wymagania dokładnościowe IHO,
- system automatycznego lub bezpośredniego sterowania jednostką.







Odbiornik GNSS

Miniaturowa echosonda z tyczką

Kompletna jednostka wraz z wyposażeniem



W opcji bardzo zaawansowanej należy zwrócić uwagę na rozwiązanie "HydroDron" (Rys. 2.4) zaproponowane przez prof. Andrzej Statecznego [Stateczny A. i in., 2018a; Stateczny A. i in., **2018b]**. Nie ulega wątpliwości, że jest to rozwiązanie odpowiadające najwyższym światowym standardom realizacji pomiarów hydrograficznych. Sensory nawigacyjne zamontowane są na składanym automatycznie maszcie, który zapewnia bezpieczeństwo transportu jednostki oraz dojścia do rejonu pomiarowego. Głowica hydrograficzna montowana jest na ruchomym siłowniku umożliwiającym zdalne podnoszenie i opuszczanie głowicy, a profilomierz prędkości dźwięku w wodzie jest automatycznie opuszczany i podnoszony za pomocą specjalnej windy kotwicznej. Jednostka wyposażona jest również w system sensorów do monitoringu sytuacji na i wokół platformy w celu zwiększenia świadomości sytuacyjnej, w tym dwie kamery wideo (obrotowa i stacjonarna) oraz stację pogodową. Poza danymi typowo nawigacyjnymi rejestrowane są: dane video, informacje pogodowe, poziom napięcia akumulatorów, pozycja masztu i siłownika głowicy hydrograficznej, itp. Dane te są transmitowane do stacji brzegowej. Stacja brzegowa składa się z dwóch konsol: dedykowanej konsoli nawigacyjnej z zabudowanym w skrzyni transportowej komputerem przemysłowym (oraz dodatkowo małej konsoli manewrowej do manewrowania bliskiego zasięgu w tym cumowania) i konsoli hydrograficznej z komputerem Getac [Marine Technology, 2019].

W skład wyposażenia tej jednostki wchodzą [Marine Technology, 2019]:

- zintegrowany system batymetryczny i sonarowy 3DSS-DX-450 firmy Ping DSP,
- komputer do akwizycji danych Getac S410,
- zewnętrzny inercyjny system nawigacyjny Ekinox2-D firmy SBG,
- profilomierz i miernik prędkości dźwięku w wodzie (SVP i SVS) Micro X firmy AML,
- echosonda jednowiązkowa dwuczęstotliwościowa HydroBox HD firmy Syqwest,
- echosonda jednowiązkowa wysokiej częstotliwości Echologger EU400,
- LiDAR PUCK VLP-16 firmy Velodyne,
- radar UMRR OC Type 42 firmy Smartmicro,
- odbiornik R10 GNSS System firmy Trimble.



Rys. 2.4. Bezzałogowa jednostka hydrograficzna *"HydroDron"* projektu prof. Andrzeja Statecznego **[Marine Technology, 2019]**.

2.2. Systemy pozycyjne

2.2.1. Geodezyjne sieci satelitarne GNSS

2.2.1.1. Geneza

Pierwsza koncepcja utworzenia sieci permanentnych stacji GNSS w Polsce została opracowana w 1995 r. **[Baran L.W., Zieliński J.B., 1998]** z inicjatywy Komisji Geodezji Satelitarnej Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych PAN oraz Sekcji Sieci Geodezyjnych Komitetu Geodezji PAN. Po przeanalizowaniu różnych aspektów sieci stacji permanentnych, przyjęto założenie, że powinna ona być siecią wielofunkcyjną, dostosowaną nie tylko do potrzeb geodezyjnych. W wyniku działań różnych ośrodków powstawały kolejno po sobie lokalne rozwiązania. W pierwszym etapie uruchomiono stacje na obszarze wybranych aglomeracji (Gdańsk, Łódź, Warszawa) oraz na obszarach intensywnej działalności wydobywczej (Górny Śląsk, Lubińsko-Głogowski Okręg Miedziowy). W dalszej kolejności utworzono sześciopunktową sieć na obszarze Śląska **[Baran L.W. i in., 2008]**. Powstała również trzypunktowa sieć na obszarze Trójmiasta **[Ciećko A. i in., 2003]**.

Dominującym trendem światowym początku XXI wieku stało się uruchamianie, przez organy do spraw geodezji poszczególnych państw, aktywnych sieci narodowych z przeznaczeniem oferowania użytkownikom odpłatnych lub nieodpłatnych usług (serwisów), w tym również

czasu rzeczywistego **[Specht C., Skóra M., 2009]**. W 2008 r. polski Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK) uruchomił Aktywną Sieć Geodezyjną EUPOS (ASG-EUPOS) będącą narodową siecią permanentnych stacji GNSS, oferującą usługi z zakresu geodezji i nawigacji. Wprowadzenie w lipcu 2014 r. opłat za korzystanie z tej sieci spowodowało szybki rozwój alternatywnych sieci komercyjnych. Obecnie w Polsce można otrzymywać dane korekcyjne przesyłane w czasie rzeczywistym oraz surowe obserwacje satelitarne do post-processingu z sieci obejmujących swym zasięgiem cały kraj: SmartNet, TPI NETpro, VRSNet.pl, lub obszar kilku województw: Małopolski System Pozycjonowania Precyzyjnego, Nadowski NET **[Ćwiąkała P. i in., 2015]**.

Użytkownicy sieci mogą wykonywać pomiary GNSS za pomocą jednej z dwóch metod pomiarowych. Pierwsza z nich polega na przetwarzaniu obserwacji zarejestrowanych podczas sesji pomiarowej po zakończeniu pomiarów (post-processing). Natomiast druga grupa to metody pozycjonowania w czasie rzeczywistym, w których współrzędne pozycji są wyznaczane na bieżąco przez odbiornik GNSS. Jeśli chodzi o metody pomiaru kinematycznego to wyróżnia się technikę RTK (ang. Real Time Kinematic) oraz coraz bardziej powszechną technikę RTN (ang. Real Time Network). Metoda pomiaru RTN polega na wypracowywaniu danych korekcyjnych w oparciu o obserwacje nie z jednej, tak jak w przypadku techniki RTK, a z co najmniej kilku stacji referencyjnych. Jej zaletą jest to, że błąd wyznaczenia współrzędnych pozycji nie rośnie wraz z odległością od stacji (nawet do 70-80 km) oraz otrzymywane wyniki nie są gorsze niż w przypadku zwykłych pomiarów RTK **[Nowak A., Naus K., 2014]**.

Jak sama nazwa wskazuje aktywne sieci geodezyjne znajdują szerokie zastosowanie w pracach geodezyjnych. Mogą być wykorzystywane w pomiarach statycznych do zakładania i kontroli osnów geodezyjnych, w niwelacji satelitarnej oraz w badaniach geodynamicznych [Bakuła M., 2013; Bogusz J. i in., 2012; Stępniak K. i in., 2013]. Jeśli chodzi o pomiary w czasie rzeczywistym, to sieci geodezyjne wykorzystuje się przy pracach: realizacyjnych, związanych z katastrem nieruchomości oraz z pozyskiwaniem danych do krajowego systemu informacji o terenie, w precyzyjnych pomiarach inżynierskich w zakresie inwentaryzacji diagnostyki, а także w innych pracach, jeżeli dokładności gwarantowane i w wykorzystywanych serwisach systemu są wystarczające dla konkretnych rodzajów robót [Ćwiąkała P. i in., 2015; Przestrzelski P., Bakuła M., 2014; Specht C. i in., 2016a; Specht C. i in., 2014; Specht M., Szot T., 2012]. Dodatkowo istnieje możliwość wyznaczenia współrzędnych pozycji z wysoką dokładnością w przypadku wystąpienia niekorzystnych warunków pomiaru, takich jak np. przeszkody terenowe [Bakuła M. i in., 2012].

Aktywne sieci geodezyjne mogą znaleźć szerokie zastosowanie, również w aplikacjach nawigacyjnych i monitorowaniu ruchu obiektów [Specht C., Rudnicki J., 2016]. Jednakże obecnie żaden z serwisów polskich sieci geodezyjnych nie posiada zdolności do ostrzegania użytkowników o spadku dokładności wyznaczeń w czasie rzeczywistym (wiarygodności). W związku z tym, sieci geodezyjne nie zapewniają monitoringu wiarygodności systemu wymaganej w krytycznych aplikacjach nawigacyjnych, które decydują o zapewnieniu bezpieczeństwa ludzkiego. Stąd jak pokazują chociażby statystyki, zainteresowanie serwisami dedykowanymi dla nawigacji i GIS (ang. Geographic Information System) jest znikome [Specht C., 2009]. Dlatego zdaniem Autora można byłoby poszerzyć grupę odbiorców o użytkowników, którzy potrzebują pewności dotyczącej jakości funkcjonowania serwisu pozycyjnego. Jest to możliwe poprzez wprowadzenie do architektury aktywnych sieci geodezyjnych stacji monitorujących (na wzór systemów morskich i lotniczych),

wspomagających te fazy nawigacji, w których pewność dotycząca poziomu dokładności wyznaczeń jest równie istotna jak sama dokładność **[Specht C., Nowak A., 2012]**.

2.2.1.2. ASG-EUPOS

Sieć ASG-EUPOS to komercyjna sieć stacji referencyjnych GNSS (wyposażonych w moduły GPS/GLONASS/BDS/Galileo), generujących poprawki DGNSS, RTK i RTN dla odbiorników ruchomych. Przez pierwsze kilka lat istnienia (2008-2014) była to jedyna darmowa sieć stacji referencyjnych w Polsce. Zgodnie z rozporządzeniem w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych punkty odniesienia stacji referencyjnych stanowia podstawowa poziomą osnowę geodezyjną i szczegółową wysokościową osnowę geodezyjną. Przez 24 godziny na dobę, przez 7 dni w tygodniu, system oferuje trzy serwisy czasu rzeczywistego: KODGIS, NAWGEO i NAWGIS oraz dwa serwisy umożliwiające wykonanie obliczeń w postprocessingu: POZGEO i POZGEO D. W celu zwiększenia bezpieczeństwa i zapewnienia ciągłości pracy serwisów systemu zbudowano dwa centra zarządzające w Warszawie i Katowicach. W razie awarii głównego centrum w Warszawie można udostępnianie usług przełączyć na będące w stałej gotowości centrum w Katowicach. Dzięki szerokiemu zakresowi usług, sieć ASG-EUPOS może być wykorzystywana w: budownictwie przemysłowym, geodezji i geodynamice, komunikacji drogowej, nawigacji morskiej, śródlądowej i powietrznej, hydrografii i hydrologii, rolnictwie i leśnictwie, systemach informacji przestrzennej itd. Sieć ASG-EUPOS jest elementem projektu EUPOS, którego celem było stworzenie na obszarze Europy Centralnej i Wschodniej jednolitego naziemnego systemu wsparcia GNSS. Polska sieć składa się ze 127 stacji permanentnych (w tym 103 stacji rozmieszczonych na terenie Polski oraz 24 stacji na terenach Czech, Litwy, Niemiec i Słowacji) zlokalizowanych w instytucjach naukowych oraz w Ośrodkach Dokumentacji Geodezyjno-Kartograficznych, ze średnią wzajemną odległością 70 km (Rys. 2.5). Stacje zagraniczne mają za zadanie zwiększenie dokładności i niezawodności systemu w strefie przygranicznej.



Rys. 2.5. Mapa stacji referencyjnych sieci ASG-EUPOS.

W przypadku usług czasu rzeczywistego użytkownik na początku łączy się z centrum zarządzającym w Warszawie za pomocą połączenia internetowego z wykorzystaniem protokołu NTRIP (ang. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol). Jeżeli użytkownik chce otrzymać dane korekcyjne z serwisów KODGIS i NAWGEO musi również wysłać przybliżoną pozycję odbiornika w formacie NMEA (ang. National Marine Electronics Association) typu GGA (ang. Global Positioning System Fix Data). Następnie na podstawie obserwacji GNSS przesyłanych ze stacji referencyjnych do centrum zarządzającego, oprogramowanie serwera (Trimble Pivot Platform) generuje strumień danych korekcyjnych, które są potem przekazywane protokołem NTRIP w formacie CMR (ang. Compact Measurement Record) lub RTCM (ang. Radio Technical Commission for Maritime) do użytkownika. Ostatni z formatów zapewnia możliwość otrzymywania poprawek sygnałów BDS, Galileo oraz do trzeciego sygnału GPS - L5.

Udostępniono również dwa serwisy post-processingu przeznaczone dla użytkowników pracujących z pomiarami statycznymi. Pierwszy z nich (POZGEO) umożliwia wysłanie pliku obserwacyjnego w formacie RINEX 2.11 do automatycznych obliczeń. Po pozytywnej weryfikacji przesłanego pliku i wykonaniu obliczeń, użytkownik otrzymuje raport ze współrzędnymi wyznaczanego punktu w polskim układzie odniesienia PL-ETRF2000. Dodatkowo wyznaczone współrzędne kartezjańskie przedstawione są w wybranych odwzorowaniach kartograficznych. Serwis POZGEO D przeznaczony jest dla użytkowników obeznanych z metodyką opracowania obserwacji satelitarnych. Jego zadaniem jest udostępnianie plików obserwacyjnych w formacie RINEX 2.1x lub RINEX 3.0x ze stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS oraz utworzonych wirtualnych stacji referencyjnych, na podstawie parametrów zadanych przez użytkownika.

Na stronie internetowej systemu ASG-EUPOS (<u>http://www.asgeupos.pl/</u>) udostępniono możliwe do uzyskania dokładności pomiarów. Zależą one od zastosowanej metody pomiarowej, serwisu oraz typu odbiornika.

2.2.1.3. SmartNet

Sieć SmartNet to kolejna komercyjna sieć stacji referencyjnych GNSS (wyposażonych w moduły GPS/GLONASS), generujących poprawki DGNSS, RTK i RTN dla odbiorników ruchomych. Została zbudowana w oparciu o urządzenia i oprogramowania firmy Leica Geosystems. Sieć SmartNet świadczy serwisy czasu rzeczywistego i post-processingu 24 godziny na dobę, przez 7 dni w tygodniu, dostarczając użytkownikom wiarygodnych i dokładnych poprawek radiowych, a także sieciowych. Dodatkowo jakość dostarczanych usług jest pod ciągłym nadzorem rozbudowanych centr przetwarzania i monitoringu danych. Dzięki szerokiemu zakresowi usług, sieć SmartNet może być wykorzystywana w: geodezji, inżynierii, budownictwie, rolnictwie, sterowaniu maszynami, pomiarach katastralnych, archeologii, monitoringu strukturalnym, badaniu miejsc wypadków itd. SmartNet nie jest siecią państwową i funkcjonuje ona w wielu krajach europejskich, Ameryce Północnej, czy Australii. Polska sieć SmartNet składa się ze 139 stacji permanentnych (dodatkowo 33 stacje są w trakcie realizacji) równomiernie rozmieszczonych na obszarze całego kraju (Rys. 2.6).



Rys. 2.6. Mapa stacji referencyjnych sieci SmartNet.

Odbiorniki stacji referencyjnych na bieżąco przesyłają informacje o swojej pozycji do centrum obliczeniowego zwanego w systemie SmartNet serwerem RTK. Oprogramowanie serwera, takie jak np. Leica GNSS Spyder, wykorzystując dane przesłane ze wszystkich (lub części) stacji oraz parametry określające aktualny stan atmosfery i konstelacji satelitów oblicza nieoznaczoność pomiarów fazowych. Po wyznaczeniu tego parametru możliwe jest wygenerowanie poprawki w formacie RTCM 2.3 lub 3x wysyłanej do odbiornika ruchomego. Jednakże w przypadku pomiarów metodą różnicową (ang. Differential Global Navigation Satellite System – DGNSS) bazującej przede wszystkim na pomiarach kodowych, nie istnieje konieczność wyznaczenia nieoznaczoności (procesu inicjalizacji). W sieci SmartNet poprawki DGNSS są nadawane drogą radiową, RTK (FKP, i-MAX, MAX, VRS) radiową oraz internetową za pomocą GPRS (ang. General Packet Radio Service), a RTN wyłącznie internetową za pomocą GPRS.

Producent Leica Geosystems gwarantuje możliwość wykonywania pomiarów w czasie rzeczywistym (przy użyciu dwuczęstotliwościowych fazowych odbiorników GNSS) z dokładnością do 2 cm w poziomie i do 4 cm w pionie. Zakładane dokładności dotyczą wyłącznie poprawek powierzchniowych RTK (RTN). W porównaniu do RTK metoda RTN wypracowuje dane korekcyjne w oparciu o obserwacje z co najmniej kilku stacji referencyjnych.

2.2.1.4. TPI NETpro

Sieć TPI NETpro to kolejna komercyjna sieć stacji referencyjnych GNSS (wyposażonych w moduły GPS/GLONASS/Galileo), generujących poprawki DGNSS, NET i RTK dla odbiorników ruchomych. Została zbudowana wyłącznie w oparciu o urządzenia i oprogramowanie firmy Topcon. Na stacjach referencyjnych zamontowano anteny CR-G5 i odbiorniki NET-G3A oraz zainstalowano oprogramowanie TopNET. Sieć świadczy serwisy czasu rzeczywistego i post-processingu wyłącznie dla klientów, którzy zakupili odbiorniki Sokkia bądź Topcon. Rejestrowane dane są na bieżąco monitorowane przez Centrum Geomatyki Stosowanej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, gwarantując uzyskiwanie najwyższych możliwych dokładności i stabilności pomiarów. Dzięki szerokiemu zakresowi usług, sieć TPI

NETpro może być wykorzystywana w: geodezji, budownictwie, rolnictwie precyzyjnym, aplikacjach GIS itd. Polska sieć TPI NETpro składa się ze 136 stacji referencyjnych (w tym 117 stacji rozmieszczonych na terenie Polski oraz 19 stacji na terenach Czech, Niemiec i Ukrainy) równomiernie rozmieszczonych na terenie całego kraju, ze średnią wzajemną odległością 54 km (Rys. 2.7). Stacje zagraniczne mają za zadanie zwiększenie dokładności i niezawodności systemu w strefie przygranicznej. TPI NETpro jest częścią światowej sieci TopNET Live działającej m.in. w krajach europejskich, Ameryce Północnej, czy Australii.



Rys. 2.7. Mapa stacji referencyjnych sieci TPI NETpro.

Sieć TPI NETpro udostępnia pięć rodzajów poprawek (DGNSS, NET RTCM 2.3, NET RTCM 3.0, RTK RTCM 2.3, RTK RTCM 3.0) różniących się sposobem generowania oraz otrzymywanymi dokładnościami. Niezależnie od rodzaju poprawek, przed przystąpieniem do pomiarów użytkownik sieci łączy się z centrum obliczeniowo-kontrolnym zwanym serwerem NTRIP i wysyła mu swoją przybliżoną pozycję za pomocą depeszy NMEA GGA. W przypadku poprawki NET RTCM 2.3 lub 3.0 system generuje dla użytkownika wirtualną stację referencyjną, najczęściej w odległości ok. 5 km od odbiornika, skierowaną w stronę najbliższej rzeczywistej stacji referencyjnej. Dzięki wykorzystaniu tej usługi użytkownicy systemu mogą uzyskiwać poprawki do obserwacji niezależnie od odległości od stacji referencyjnej, w przeciwieństwie do pracy z pojedynczą stacją referencyjną. Następnie system generuje dane korekcyjne, które są przesyłane do odbiornika w wybranym formacie RTCM 2.3 lub 3.0 za pomocą protokołu NTRIP.

W przypadku bardzo dużych zaburzeń jonosferycznych (można je sprawdzić w aplikacji TopNET Live Manager) zaleca się stosowanie dwóch kolejnych usług: RTK RTCM 2.3 lub 3.0. Sposób generowania i transmisji poprawek jest niemal identyczny jak w przypadku usługi NET z tą różnicą, że poprawki nie są generowane względem wirtualnej stacji referencyjnej, a najbliższej stacji referencyjnej od odbiornika. Aby korzystać z usługi NET lub RTK należy posiadać dwuczęstotliwościowy fazowy odbiornik GNSS.

Ostatnią, piątą usługę (DGNSS) zaleca się użytkownikom odbiorników z segmentu GIS rejestrujących jedynie sygnały kodowe. Podobnie jak wcześniej użytkownik łączy się z serwerem poprawek (NTRIP) i otrzymuje wiadomości w formacie RTCM 2.3 zawierające

dane obserwacyjne satelitów GPS, GLONASS oraz współrzędne najbliższej stacji referencyjnej, wybranej na podstawie przesyłanych przez odbiornik przybliżonych współrzędnych. Na podstawie różnicy rzeczywistych i pochodzących z bieżących pomiarów współrzędnych stacji referencyjnej wyznaczana jest poprawka, która jest następnie przesyłana do odbiornika GNSS. Podobnie jak w przypadku klasycznej metody RTK błąd wyznaczenia pozycji rośnie wraz z odległością od stacji referencyjnej.

Producent TPI Sp. z o.o. nie umieścił na swojej stronie internetowej zakładanych dokładności pomiarów w czasie rzeczywistym. Jednakże w jednym z artykułów pracownicy tej firmy wspomnieli, że użytkownicy korzystający z odbiorników klasy GIS mogą wykonywać pomiary DGNSS z dokładnością ok. 0.5 m. Natomiast osoby posiadające dwuczęstotliwościowe fazowe odbiorniki GNSS mogą uzyskiwać dokładności na poziomie 3-5 cm (przy wykorzystaniu poprawek NET/RTK).

2.2.1.5. VRSNet.pl

Sieć VRSNet.pl to kolejna komercyjna sieć stacji referencyjnych GNSS (wyposażonych w moduły GPS/GLONASS/BDS/Galileo), generujących poprawki DGNSS, RTK i RTN dla odbiorników ruchomych. Została zbudowana wyłącznie w oparciu o urządzenia i oprogramowanie firmy Trimble. Na stacjach referencyjnych zamontowano anteny Zephyr Geodetic 2/Zephyr Geodetic 3 i odbiorniki NetR5/NetR9. Sieć świadczy serwisy czasu rzeczywistego i post-processingu, a co najważniejsze jest dostępna dla wszystkich użytkowników odbiorników satelitarnych. Na stronie internetowej producenta oraz w żadnej publikacji nie podano zastosowań, do jakich przeznaczona jest sieć. VRSNet.pl jest siecią państwową i składa się ze 62 stacji referencyjnych (w tym 55 stacji rozmieszczonych na terenie Polski oraz 7 stacji na terenach Czech i Niemiec) (Rys. 2.8). Stacje zagraniczne mają za zadanie zwiększenie dokładności i niezawodności systemu w strefie przygranicznej. Sieć aktualnie jest zbudowana z czterech segmentów pokrywających województwa: mazowieckie, śląskie, świętokrzyskie i zachodniopomorskie. Dodatkowo do VRSNet.pl włączono pojedyncze stacje w różnych częściach kraju.



Rys. 2.8. Mapa stacji referencyjnych sieci VRSNet.pl.

Podobnie jak w innych sieciach geodezyjnych użytkownik komunikuje się z centrum obliczeniowo-zarządzającym, w celu uzyskania korekt obserwacyjnych do pomiarów GNSS. Cały proces wymiany danych odbywa się w czasie rzeczywistym poprzez wykorzystanie połączenia internetowego GPRS/EDGE/UTMS/3G. Użytkownik systemu ma możliwość odbioru trzech rodzajów poprawek: VRS (ang. Virtual Reference Station), VRS_GIS oraz GIS. Pierwsza z wyżej wymienionych usług polega na tworzeniu wirtualnej stacji referencyjnej w okolicy odbiornika. Poprawka VRS może być przesyłana do użytkownika w formatach CMR oraz RTCM. Pozostałe dwie usługi zawierają korekty jedynie do sygnału kodowego odpowiednio dla wirtualnej i rzeczywistej stacji referencyjnej oraz częstotliwości L1.

Sieć VRSNet.pl ma rozbudowane usługi post-processingowe przeznaczone zarówno dla początkujących, jak i doświadczonych użytkowników. Dla użytkowników posiadających doświadczenie oraz specjalistyczne oprogramowanie służące do obliczeń post-processingowych przeznaczona jest usługa Sklep RINEX. Umożliwia ona zamawianie i pobieranie plików w formatach RINEX z fizycznej stacji referencyjnej, jak i z dowolnego punktu, który znajduje się w obrębie sieci. Użytkownikom nie posiadającym doświadczenia oraz specjalistycznego oprogramowania zaleca się stosowanie usługi PNAS. Polega ona na przesłaniu surowych danych do systemu VRSNet.pl. Następnie oprogramowanie PNAS samodzielnie wyznacza współrzędne przesłanych punktów w najpopularniejszych układach państwowych.

Producent VRSNet.pl udostępnił na swojej stronie internetowej (<u>http://projekt.vrsnet.pl/</u>) możliwe do uzyskania dokładności pomiarów. Zależą one od zastosowanej metody pomiarowej, rodzaju przesyłanych korekt oraz typu odbiornika.

2.2.1.6. Strefa działania sieci GNSS

Strefa działania systemu radionawigacyjnego jest to powierzchnia lub przestrzeń, w której użytkownikowi zapewnione zostaną deklarowane przez system minimalne charakterystyki eksploatacyjne obejmujące: dokładność, dostępność, niezawodność, ciągłość, wiarygodność i inne jego parametry. Pod względem nawigacyjnym użytkownik w strefie działania winien mieć możliwość dokonywania pomiarów z taką dokładnością, która przy uwzględnieniu geometrycznego rozmieszczenia nadajników (parametru DOP) zapewni mu co najmniej minimalną dokładność określonych współrzędnych pozycji cechujących system. Natomiast w aspekcie radiokomunikacyjnym strefa działania zależna jest przede wszystkim od poziomu natężenia fali radiowej i wymaganej wartości stosunku sygnału do szumu związanej z zastosowanym rodzajem modulacji i bitowej stopy błędów **[Specht C., 2003]**. Na poniższym rysunku zaprezentowano przykładowe strefy działania: systemu Decca Navigator (Rys. 2.9a) oraz łańcuchów radiolatarni RC (Rys. 2.9b).



Rys. 2.9. Strefy działania: systemu Decca Navigator (a) oraz łańcuchów radiolatarni RC (b).

W przypadku sieciowych rozwiązań geodezyjnych i możliwości ich zastosowania w pomiarach hydrograficznych na morzu głównymi czynnikami decydującymi o strefie działania są [Specht M., Specht C., 2018b]:

- rozmieszczenie stacji sieci RTN umożliwiających wyznaczenie położenia na morzu metodą VRS,
- zasięg energetyczny sygnałów radiowych stacji operatora telefonii komórkowej wykorzystywanego podczas pomiarów.

Zagadnienie wyznaczania strefy działania sieci RTN dotyczy znacznego obszaru, stąd analiza zostanie ograniczona do akwenu Zatoki Gdańskiej.

Obecnie w Polsce można otrzymywać dane korekcyjne przesyłane w czasie rzeczywistym (RTK, RTN) oraz surowe obserwacje satelitarne do post-processingu z sieci obejmujących swym zasięgiem cały kraj: ASG-EUPOS, SmartNet, TPI NETpro, VRSNet.pl. Stąd dla celów niniejszej pracy na Rys. 2.10 zaprezentowano strefy działania tych sieci na obszarze Zatoki Gdańskiej.



Rys. 2.10. Mapy zasięgu działania wybranych sieci geodezyjnych GNSS na Zatoce Gdańskiej.

Na podstawie Rys. 2.10 można stwierdzić, że zaledwie dwie sieci (ASG-EUPOS, SmartNet) obejmują swym zasięgiem akwen Zatoki Gdańskiej. Wynika z tego, że użytkownicy mogą wyłącznie wykorzystywać wspomniane powyżej sieci do realizacji pomiarów GNSS w czasie rzeczywistym przy zakładanych przez producenta centymetrowych dokładnościach. W porównaniu z dwoma pozostałymi sieciami (TPI NETpro, VRSNet.pl), które nie obejmują swym zasięgiem Zatoki Gdańskiej, stan ten wynika z rozmieszczenia stacji referencyjnych

w tym rejonie. W przypadku sieci ASG-EUPOS oraz SmartNet stacje referencyjne zlokalizowano w okolicach Półwyspu Helskiego (Hel, Wejherowo), dzięki czemu mogą one zapewnić pokrycie akwenu Zatoki przez rozwiązanie sieciowe. Takie rozmieszczenie stacji jest niewątpliwie najbardziej korzystne z punktu widzenia wykorzystania sieci geodezyjnych GNSS na akwenach morskich Zatoki Gdańskiej.

Wart odnotowania jest również fakt, że ze względu na duże zagęszczenie stacji referencyjnych w tym rejonie oraz niewielką wzajemną odległość między nimi (54-80 km) zaleca się wypracowywanie danych korekcyjnych w oparciu o obserwacje nie z jednej, tak jak w przypadku techniki RTK, a z co najmniej kilku stacji referencyjnych (technika RTN). Dzięki temu otrzymywane wyniki nie są gorsze niż w przypadku zwykłych pomiarów RTK.

Podczas realizacji pomiarów GNSS w czasie rzeczywistym (RTK, RTN) równie istotne jest określenie zasięgu operatora komórkowego, dzięki któremu transmitowane są poprawki korekcyjne do użytkowników. W tym celu przedstawiono przybliżone mapy zasięgów czterech najpopularniejszych operatorów telefonii komórkowej w Polsce na obszarze Zatoki Gdańskiej (Rys. 2.11).



Rys. 2.11. Mapy zasięgu wybranych operatorów telefonii komórkowej na Zatoce Gdańskiej.

Na podstawie Rys. 2.11 należy stwierdzić, że obecnie jedynym operatorem telefonii komórkowej, którego strefa działania obejmuje akwen Zatoki Gdańskiej jest sieć T-Mobile oraz częściowo sieć Orange (w odległości od kilku do kilkunastu km od brzegu). Na podstawie badań przeprowadzonych w 2017 r. **[UKE, 2018]**, wynika, że ok. 10.3 mln użytkowników, stanowiących 19.7% ogólnej liczby klientów polskich sieci komórkowych, może korzystać

z usług sieciowych na tym obszarze i dzięki temu możliwa jest transmisja wypracowanych przez stacje referencyjne danych korekcyjnych do użytkowników. Natomiast abonenci pozostałych trzech sieci (Orange, Play, Plus), którzy liczą łącznie ok. 40.7 mln użytkowników, stanowiących niespełna 80% ogólnej liczby klientów polskich sieci komórkowych, nie mają zapewnionych usług sieciowych w tym rejonie.

Poza zasięgiem istotny jest również rodzaj wykorzystywanego standardu telefonii komórkowej. Przykładowo dla sieci T-Mobile systemy 2G i LTE 4G pozwalają na pokrycie zasięgiem całego obszaru Zatoki Gdańskiej, natomiast standard 3G tylko w jego wybranych miejscach.

Podsumowując, należy zauważyć, że z punktu widzenia użytkownika, wykonującego pomiary GNSS w czasie rzeczywistym, istotne jest zarówno rozmieszczenie stacji referencyjnych sieci geodezyjnych względem siebie oraz operatora, jak i standard telefonii komórkowej wykorzystywanej do transmisji danych korekcyjnych. W przypadku Zatoki Gdańskiej zalecane jest, aby do generowania poprawek sieciowych wykorzystywać stacje referencyjne sieci ASG-EUPOS i SmartNet. Natomiast do transmisji poprawek w czasie rzeczywistym (RTK, RTN) drogą internetową preferowane jest korzystanie z operatora telefonii komórkowej T-Mobile opartej o technologię 2G albo LTE 4G, lub w szczególnym przypadku z sieci Orange, gdy pomiary GNSS są wykonywane nieopodal brzegu morskiego (w odległości od kilku do kilkunastu km od linii brzegowej Zatoki Gdańskiej).

2.2.2. Systemy DGNSS: DGPS i EGNOS

Systemy nawigacji satelitarnej stanowią, pod względem techniki pomiaru, zróżnicowaną grupę, wśród której można wydzielić systemy autonomiczne i wspomagające. Do pierwszej z nich należą dwa w pełni operacyjne systemy (ang. Full Operational Capability – FOC): NAVSTAR GPS (ang. Global Positioning System) oraz GLONASS (ros. GLObalnaja NAwigacionnaja Sputnikowaja Sistiema), jak również będące w trakcie rozwijania: BDS (ang. BeiDou Navigation Satellite System) i Galileo. Systemy wspomagające stanowią rozwiązanie, którego zasadniczym celem jest zwiększenie dokładności określenia pozycji, jak również zapewnienia wybranym aplikacjom GNSS (takim jak nawigacja morska, czy powietrzna) dodatkowych właściwości eksploatacyjnych (przesyłania sygnałów dotyczących wiarygodności systemu). Do systemów wspomagających należą dwie grupy rozwiązań: satelitarne (ang. Satellite Based Augmentation Systems - SBAS) oraz naziemne (ang. Ground Based Augmentation Systems – GBAS). Pierwsze z nich to funkcjonujące dziś systemy: europejski geostacjonarny system pokrycia nawigacyjnego (ang. European Geostationary Navigation Overlay Service - EGNOS), amerykański system wspomagania rozległych obszarów (ang. Wide Area Augmentation System – WAAS), japoński wielofunkcyjny satelitarny system wspomagania (ang. Multi-Functional Satellite Augmentation System – MSAS), jak i będące w trakcie finalizacji: rosyjski system poprawek różnicowych i monitorowania (ang. System of Differential Correction and Monitoring - SDCM) oraz indyjski geostacjonarny satelitarny system wspomagający GPS (ang. GPS Aided GEO Augmented Navigation - GAGAN), których przeznaczeniem jest transmisja korekt różnicowych GPS/GLONASS oraz transmisja sygnałów dotyczących wiarygodności [Czaplewski K., Goward D., 2016].



Rys. 2.12. Strefy działania światowych systemów SBAS [GSA, 2016].

Systemy posiadające pełną zdolność operacyjną (GPS i GLONASS) dostarczają użytkownikom dwa rodzaje serwisów: standardowy serwis pozycyjny (ang. Standard Positioning Service – SPS) oraz precyzyjny serwis pozycyjny (ang. Precise Positioning Service – PPS). Pierwszy z serwisów przeznaczony jest dla użytkowników cywilnych, natomiast drugi dla potrzeb militarnych. W ramach każdej z usług dostarczane są użytkownikom sygnały umożliwiające wyznaczanie położenia (lokalizacji), jak również transmitowane są sygnały czasu. Analogiczne serwisy posiadać będzie chiński system BDS.

Państwa należące do Europejskiej Agencji Kosmicznej (ang. European Space Agency – ESA), realizując wspólną politykę kosmiczną, opracowały w latach 1999-2000 koncepcję cywilnego systemu nawigacji satelitarnej Galileo, którego pierwszego satelitę (GIOVE-A) wystrzelono na orbitę w dniu 28 grudnia 2005 r., rozpoczynając tym samym budowę jego segmentu kosmicznego. W kwietniu 2019 r. liczba satelitów w systemie wynosiła 26 sztuk, a planowany termin osiągnięcia pełnej zdolności operacyjnej (2020 r.) wydaje się być realistyczny do osiągnięcia. Budowa systemu Galileo jest finansowana ze środków ESA oraz Komisji Europejskiej. W przeciwieństwie do innych systemów GNSS, europejski system satelitarny będzie oferował pięć rodzajów serwisów: otwarty (ang. Open Service – OS), bezpieczeństwa życia (ang. Safety of Life Service – SoL), komercyjny (ang. Commercial Service – CS), regulowany publicznie (ang. Public Regulated Service – PRS) oraz poszukiwania i ratowania (ang. Search and Rescue Service – SAR) **[Januszewski J., 2014]**.

Głównym systemem wspomagającym ESA jest aktualnie system EGNOS. Jego działanie polega na transmitowaniu poprawek różnicowych przez satelity geostacjonarne (Inmarsat 3-F2, Astra 5B) oraz informowanie o awariach systemu GPS i GLONASS. Dzięki poprawkom wyliczanym na stacjach referencyjnych i retransmitowanym przez satelity geostacjonarne dokładność wyznaczania pozycji wzrasta nawet do ok. 1-2 m [Wajszczak E., Galas D., 2013]. W związku z tym, jest on przeznaczony do zastosowań, gdzie awarie systemu GPS mają wpływ na bezpieczeństwo życia ludzkiego, a przede wszystkim w: lotnictwie cywilnym podczas precyzyjnego podejścia do lądowania [Grunwald G. i in., 2016; Oliveira J.M.V., Tiberius C.C.J.M., 2008; Perrin O. i in., 2006], nawigacji morskiej i lądowej w warunkach ograniczonych [Banachowicz A. i in., 2014; Felski A., Nowak A., 2015; Zalewski P. i in., 2015], transporcie drogowym i kolejowym [Di Fazio A. i in., 2016; Fellner R., 2014], lokalizowaniu urządzeń mobilnych [Le Faucheur A. i in., 2017], pomiarach geodezyjnych, rolnictwie [D'Antonio P. i in., 2013], czy też w systemach GIS [Aina Y.A. i in., 2012]. Jednakże należy pamiętać, że system EGNOS zapewnia trzy rodzaje serwisów pozycyjnych różniących

się sposobem wykorzystania oraz uzyskiwanymi charakterystykami dokładnościowymi. Pierwszy z omawianych serwisów (OS) to bezpłatna, ogólnodostępna usługa dla wszystkich użytkowników systemu znajdujących się w zasięgu jego działania i dysponujących dowolnym odbiornikiem GBAS/SBAS. Zgodnie ze standardem **[GSA, 2017]** dokładność określenia pozycji przez serwis OS powinna być mniejsza niż 3 m (p = 0.95) w płaszczyźnie horyzontalnej i 4 m

(p = 0.95) w płaszczyźnie wertykalnej. Drugi z serwisów (SoL), oprócz poprawek dla sygnałów satelitarnych, zapewnia dane o ich wiarygodności. Ostrzega o niesprawności systemu w czasie nie dłuższym niż 6 sekund i jest dostępny tylko dla tych, którzy podpiszą specjalne porozumienie z nadzorującymi system. Zgodnie z dokumentem [GSA, 2019] serwis powinien spełniać identyczne wymogi dokładnościowe jak serwis OS. Ponadto Autorzy standardu gwarantuja, że prawdopodobieństwo wystapienia niepoprawnego funkcjonowania serwisu wynosi tylko 2.10⁻⁷. Ostatni z serwisów, serwis komercyjny (ang. EGNOS Data Access Service – EDAS), zapewnia autoryzowanym użytkownikom dostęp do pomiarów o zwiększonej precyzji poprzez dostarczanie im wiadomości EGNOS w czasie rzeczywistym. W przeciwieństwie do pozostałych serwisów w EDAS poprawki dla sygnałów GPS nie są transmitowane za pośrednictwem satelitów telekomunikacyjnych, ale przez internet. W związku z tym, odbiorniki satelitarne nie muszą mieć łączności z satelitami systemu EGNOS. Zgodnie ze standardem [GSA, 2014] do charakterystyk dokładnościowych serwisu EDAS zalicza się parametry określające jego dostępność i opóźnienie.

Kolejnym systemem wspomagającym, będącym powszechnie wykorzystywanym na całym świecie, jest system radionawigacyjny GPS w wersji różnicowej określany mianem różnicowego globalnego systemu pozycyjnego (ang. Differential Global Positioning System – DGPS). Idea działania tego systemu polega na wyznaczaniu błędu pomiaru zmierzonej pseudoodległości do satelitów systemu GPS oraz porównaniu jej z odległością rzeczywistą obliczoną na podstawie współrzędnych anten GPS stacji referencyjnej oraz współrzędnych satelitarnych. Ich różnica zwana poprawką pseudoodległościową jest transmitowana w zakresie częstotliwości 283.5-325 kHz do użytkowników, którzy wykorzystując odbiornik DGPS uwzględniają ją w procesie wyznaczenia pozycji [Specht C. i in., 2016b]. Użytkownicy mogą uzyskiwać dokładności rzędu 1-3 m w zależności od zastosowanej metody transmisji korekt w ramach systemu DGPS [Dziewicki M., Specht C., 2009; Kim J. i in., 2016]. Pierwsza z metod (ang. Local Area Differential GPS – LADGPS) polega na transmisji poprawek różnicowych z pojedynczej stacji referencyjnej, obejmującej stosunkowo mały obszar o powierzchni od kilkudziesięciu do kilkuset km², do użytkownika systemu. Dokładność wyznaczenia pozycji z zastosowaniem tej metody wynosi 1-3 m i maleje wraz z odległością użytkownika od stacji referencyjnej. W przypadku drugiej z metod (ang. Wide Area Differential GPS – WADGPS) wykorzystywana jest nie jedna, a sieć stacji referencyjnych do transmisji wektorowych korekt zawierających m.in. poprawki efemeryd satelitów, poprawki zegara satelity, czy też parametry umożliwiające modelowanie jonosfery i troposfery. W porównaniu z LADGPS, którego korekty pseudoodległościowe mają charakter skalarny, WADGPS pozwala na analizę poszczególnych źródeł błędu pozycji i modelowaniu ich zmian, przez co może zapewnić użytkownikom uzyskiwanie dokładności rzędu 1 m na stosunkowo dużym obszarze np. kontynentu bez względu na odległość użytkownika od stacji referencyjnej systemu [Cosentino R.J. i in., 2005; Retscher G., 2001].

Oficjalnie system DGPS musi zapewnić precyzję pomiarów (p = 0.95) wynoszącą do 10 m w płaszczyźnie horyzontalnej zgodnie ze standardem wydanym przez Międzynarodowe

Stowarzyszenie Służb Oznakowania Nawigacyjnego (ang. International Association of Lighthouse Authorities – IALA) [IALA, 2015]. Jednak w rzeczywistości system DPGS umożliwia przekraczającymi dokładnościami znacznie określanie pozycji Z autonomiczne pozycjonowanie GPS, przez co może być stosowany m.in. w: lokalizowaniu urządzeń mobilnych [Ji S. i in., 2015; Yoon D. i in., 2016], nawigacji morskiej, a przede wszystkim w żegludze przybrzeżnej oraz podczas dynamicznego pozycjonowania statków [Chen H. i in., 2009; Kim Y.W., 2014; Moore T. i in., 2001], rolnictwie precyzyjnym do wiarygodnego mapowania plonów lub zmienności glebowej roślin [Liu J. i in., 2015; Lubis M.Z. i in., 2017; Park J.K., Jung K.Y., 2016], hydrografii do pozycjonowania systemów hydroakustycznych [Ratheesh R. i in., 2018; Ward R.D. i in., 2016], procesie pozycjonowania autonomicznego pojazdów [Rathour S.S. i in., 2017; Ssebazza L., Pan Y.J., 2015; Vetrella A.R. i in., 2016], czy choćby do badania glacjologicznych zmian lodowców [Muhammad S., Tian L., 2015] oraz przemieszczeń np. zapór [Galan-Martin D. i in., 2013].

Polski system DGPS był jednym z pierwszych rozwiązań tego typu na świecie (1994 r.). Operatorem krajowego systemu jest Urząd Morski w Gdyni. Dwie morskie stacje DGPS znajdują się w Dziwnowie i Rozewiu. Kolejne modernizacje (systemów antenowych w 2009 r. oraz stacji referencyjnej w 2012 r.) sprawiły, że jego charakterystyki eksploatacyjne spełniają wymagania stawiane serwisom pozycyjnym w nawigacji przybrzeżnej, na podejściu do portu oraz jest on głównym systemem zapewniającym działalność hydrograficzną na akwenach morskich RP. System zapewnia kontrolę jego wiarygodności w czasie rzeczywistym. Strefa działania polskich stacji referencyjnych obejmuje akwen minimum w odległości 90 km od ich lokalizacji (Rys. 2.13) **[Specht C. i in., 2016b]**.



Rys. 2.13. Strefy działania (kolor zielony) stacji referencyjnych DGPS Dziwnów i Rozewie wraz z poziomem natężenia sygnału.

2.2.3. Wielosystemowe odbiorniki GNSS

Nawigacja jest procesem sterowania ruchem obiektów **[Specht C., 2007]**. Jej istotą jest wyznaczanie pozycji (współrzędnych określających położenie) obiektu w funkcji czasu oraz oddziaływanie (kierowanie) na kierunek i prędkość jego przemieszczania się. Wprowadzenie do użytkowania w połowie XX wieku pierwszych systemów pozycjonowania satelitarnego takich jak Transit (USA), czy CYKADA (ZSRR) rozpoczęło trwającą do dziś erę nawigacji satelitarnej. Pojęcie system nawigacji satelitarnej (ang. Navigation Satellite System – NSS) jest terminem ogólnym obejmującym globalne systemy nawigacji satelitarnej i regionalne systemy nawigacji satelitarnej (ang. Regional Navigation Satellite Systems – RNSS).

Umożliwiają one wyznaczenie pozycji odbiorników w przestrzeni oraz transmisję sygnałów czasu. Systemami zapewniającymi globalną strefę działania są: amerykański NAVSTAR GPS oraz rosyjski GLONASS. Aktualnie rozwijany jest europejski system nawigacji satelitarnej Galileo, którego pełne zdolności operacyjne planowane są na 2020 rok oraz chiński system BDS, który osiągnął zdolność operacyjną na obszarze regionalnym, natomiast pełną operacyjność uzyska w 2020 roku. Systemami nawigacji satelitarnej o regionalnej strefie działania są: indyjski regionalny system nawigacji satelitarnej (ang. Indian Regional Navigation Satellite System – IRNSS), który świadczy wstępne serwisy oraz japoński regionalny stan konstelacji autonomicznych systemów nawigacyjnych zestawiono w Tab. 2.2.

Rodzaj systemu	Stan ko	Rodzaj orbity					
	Aktualna liczba satelitów	Liczba aktywnych satelitów	MEO	GEO	GSO	IGSO	Uwagi
GPS	32	31	32	-	-	-	1 SV – naprawiany
GLONASS	26	24	26	-	-	-	1 SV - testowy 1 SV – zapasowy
Galileo	26	22	26	-	-	-	2 SVs - nieaktywne 2 SVs – testowe
BDS	39	33	23	6	-	10	6 SVs – testowe
IRNSS	8	8	-	3	-	5	-
QZSS	4	4	-	1	3	-	-
Razem satelitów	135	122	107	10	3	15	-

Tab. 2.2. Aktualny stan konstelacji autonomicznych systemów nawigacyjnych (stan na dzień 29.04.2019 r.).

Należy przyjąć, że w ciągu najbliższych kilku lat liczba satelitów systemów nawigacyjnych na świecie przekroczy 130 sztuk umożliwiając równoczesne wykorzystanie ich przez użytkownika, oczywiście w ramach dostępnej lokalizacji. Przedstawione w tabeli zestawienie nie uwzględnia systemów wspomagających oraz liczby planowanych jeszcze do wystrzelenia satelitów w ramach uzupełnienia ich do pełnych konstelacji. Na Rys. 2.14 zaprezentowano liczbę satelitów wszystkich systemów autonomicznych i wspomagania, które w najbliższych latach zwiększą liczbę dostępnych sygnałów GNSS.





Z przedstawionej analizy wynika, że odbiorniki multi-GNSS mogą dziś wykorzystywać ponad 130 satelitów różnych systemów nawigacji satelitarnej. Jednakże należy pamiętać, że pojedynczy satelita zdolny jest do transmisji kilku częstotliwości jednocześnie, co znacząco zwiększa liczbę pomiarów pseudoodległościowych, które może wykorzystać odbiornik, a przez co zwiększenie dokładności pozycjonowania jest nieuchronne. Z tego właśnie względu rozwój odbiorników wielosystemowych jest dziś głównym kierunkiem wykorzystania systemów GNSS w nawigacji lotniczej, morskiej, a szczególnie w lądowej. Rozwój ten realizowany jest poprzez tanie odbiorniki kodowe multi-GNSS, które można obecnie podzielić na trzy zasadnicze kategorie:

- Odbiorniki dedykowane konkretnym aplikacjom to urządzenia, których oprogramowanie przeznaczone jest konkretnemu zastosowaniu. Do tej grupy należą przede wszystkim odbiorniki sportowe, turystyczne oraz systemy nawigacji samochodowej. Istotą ich szerokiego spektrum zastosowania jest rozbudowane i specjalistyczne oprogramowanie, które realizuje szczególne funkcje związane z ich przeznaczeniem. Ponadto techniczne cechy telekomunikacyjne, związane ze śledzeniem sygnałów, dostosowane są do charakteru tej aplikacji nawigacyjnej.
- Uniwersalne odbiorniki rejestrujące zwane powszechnie data loggerami to odbiorniki multi-GNSS, których zadaniem jest zapisywanie danych pomiarowych (szczególnie współrzędnych pozycji z wykorzystaniem standardu NMEA). Drugą ich główną funkcją jest zdolność do podłączenia ich do urządzenia nadawczego np. przez port USB (ang. Universal Serial Bus). Dzięki temu są one wykorzystywane w systemach przeznaczonych do lokalizacji i monitoringu w czasie rzeczywistym np. rejestracja trasy pojazdu. Odbiorniki tej grupy często nie posiadają wyświetlacza, a opracowanie danych odbywa się często na komputerze dyspozytora lub użytkownika, który musi dysponować odpowiednim oprogramowaniem.
- Odbiorniki systemów mobilnych to grupa urządzeń stosowana w smartfonach, tabletach i innych urządzeniach mobilnych [Liu W. i in., 2019]. Odbiorniki tego typu nie posiadają wyświetlacza, a zasadniczą ich funkcją jest przesyłanie danych (NMEA, surowych i innych) do urządzenia mobilnego [Zhu F. i in., 2019], które wykorzystywane są przez różne dedykowane aplikacje.



Rys. 2.15. Typowe rodzaje odbiorników multi-GNSS: turystyczny (a), data logger (b) i systemów mobilnych (c).

Powszechne wykorzystanie odbiorników kodowych multi-GNSS względem rozwiązania jednosystemowego (np. GPS) skutkuje następującymi dodatkowymi właściwościami:

• jednoczesne śledzenie satelitów kilku systemów pozycyjnych GNSS zwiększa liczbę mierzonych pseudoodległości, co skutkuje wzrostem dokładności określenia pozycji wynikającym z licznych obserwacji nadmiarowych (Rys. 2.16),

- w wyniku śledzenia większej liczby satelitów zmniejsza się wartość wszystkich współczynników DOP (ang. Dilution of Precision), co w terenie zurbanizowanym jest głównym czynnikiem umożliwiającym zwiększenie dostępności pozycji o wyższej dokładności względem rozwiązań jednosystemowych,
- odbiorniki wielosystemowe zapewniają wyższy poziom wiarygodności określenia pozycji ze względu na znacznie nadmiarową liczbę mierzonych pseudoodległości,
- wykorzystanie większej liczby systemów pozycyjnych GNSS zwiększa odporność odbiornika na celowe zakłócenia sygnału satelitarnego np. zagłuszanie.



Rys. 2.16. Porównanie liczby wykorzystywanych satelitów w wielosystemowym (GPS/SBAS/QZSS/GLONASS) oraz w jednosystemowym (GPS/SBAS) odbiorniku satelitarnym [Furuno, 2019].

Przyczyną, dla której odbiorniki multi-GNSS zostały włączone do rozprawy i rozważań nad możliwością ich wykorzystania jako systemów pozycyjnych w hydrografii morskiej, były wyniki uzyskiwanych przez nie dokładności określenia pozycji wynoszących 2-5 m (p = 0.95)

[Liu W. i in., 2019; Specht C. i in., 2019a]. W związku z tym, że zbliżone wymagania dokładnościowe posiadają kategorie pomiarów hydrograficznych: 1a, 1b i 2, stąd podjęto próbę dodania tego typu rozwiązań pozycyjnych do badanych w ramach rozprawy systemów.

2.3. Model dokładności i dostępności pozycjonowania w pomiarach hydrograficznych przy uwzględnieniu norm IHO

Aby bezpiecznie realizować proces nawigacji (lądowej, lotniczej lub morskiej) winno się dysponować systemem pozycyjnym spełniającym jednocześnie wszystkie charakterystyki nawigacyjne przypisane konkretnej aplikacji. Jawi się stąd pytanie o fundamentalnym charakterze: w jaki sposób oceniać, czy dany system pozycyjny jest w stanie sprostać przytoczonym wymaganiom. Dodatkowym utrudnieniem takiej oceny jest ciągłe udoskonalanie systemów pozycyjnych, które skutkuje ciągłymi zmianami (z reguły podwyższaniem) charakterystyk nawigacyjnych przez większość współczesnych systemów pozycyjnych. Głównym parametrem ulegającym zmianie jest dokładność wyznaczenia pozycji i jej wzrost. Przykładowo, rozważmy system GPS, który na przestrzeni ostatnich kilkunastu

lat, permanentnie zwiększa dokładność określenia pozycji **[Specht C. i in., 2015]**. Parametr ten dla systemu GPS wynosił w płaszczyźnie horyzontalnej: 100 m (2DRMS) w 1993 r. **[U.S.**

DoD, 1993], 13 m (2*DRMS*) w 2001 r. **[U.S. DoD, 2001]** i 9 m (2*DRMS*) w 2008 r. **[U.S. DoD, 2008]**. Skutkiem zwiększania dokładności określenia pozycji przez system GPS jest zwiększanie liczby aplikacji tego systemu. Przykładowo, jeszcze w 1993 r. system ten nie spełniał wymagań pozycjonowania dla nawigacji samochodowej ze względu na zbyt małą dokładność (100 m), natomiast już w 2001 r. mógł być z powodzeniem wykorzystywany w tej aplikacji nawigacyjnej (10 m). Podobnie dzieje się ze wszystkimi, związanymi z GPS, systemami wspomagającymi. Dlatego też istnieje potrzeba, aby ustalić metodę, która umożliwiłaby określenie, czy dany system nadaję się lub nie do aplikacji, której wymagania pozycyjne (w szczególności dokładność i dostępność pozycji) są znane i zapewnią bezpieczeństwo jej procesu nawigacji.

Pomiary hydrograficzne, zgodnie z międzynarodowym standardem IHO S-44 **[IHO, 2008]**, realizowane mogą być w czterech kategoriach: specjalnej, 1a, 1b i 2. Każdej z nich przypisano szereg wymagań, a wśród nich zdefiniowano przede wszystkim dwa parametry nawigacyjne dla systemów pozycjonowania: dokładność pozycji i jej poziom ufności - czyli dostępność określonej wartości błędu pozycji, która dla wszystkich kategorii jest identyczna i wynosi 95%. Poniżej zaprezentowano charakterystyki tych kategorii pod względem dokładności i dostępności pozycji:

- Kategoria specjalna stawia najwyższe wymagania w zakresie dokładności określenia pozycji. Pomiary hydrograficzne realizuje się wg tej kategorii na takich akwenach, dla których wolna przestrzeń pod stępką jest krytyczna. Przykładami takich obszarów są: miejsca postoju, porty i krytyczne obszary żeglugi, takie jak kanały, czy wąskie tory wodne. Maksymalny dopuszczalny błąd określenia pozycji wynosi 2 m przy poziomie ufności równym 95%.
- Kategoria 1a dotyczy akwenów o głębokościach nieprzekraczających 100 m, dla których zapas wody pod stępką jest mniej krytyczny, ale istnieje możliwość wystąpienia obiektów podwodnych zagrażających bezpiecznej żegludze nawodnej. Maksymalny dopuszczalny błąd określenia pozycji wynosi 5 m + 5% głębokości przy poziomie ufności równym 95%.
- Kategoria 1b dotyczy akwenów o głębokościach nieprzekraczających 100 m, dla których zapas wody pod stępką nie jest istotny dla spodziewanego rodzaju żeglugi tranzytowej. Maksymalny dopuszczalny błąd określenia pozycji wynosi 5 m + 5% głębokości przy poziomie ufności równym 95%.
- Kategoria 2 stawia wymagania systemom pozycyjnym (i nie tylko) wykorzystywanym do pomiarów hydrograficznych akwenów o głębokościach powyżej 100 m, gdzie ogólny opis dna morskiego jest wystarczający dla spodziewanego rodzaju żeglugi. Maksymalny dopuszczalny błąd określenia pozycji wynosi 20 m + 5% głębokości przy poziomie ufności równym 95%.

Na Rys. 2.17 zaprezentowano syntezę wymagań stawianych aplikacjom transportowym (lądowym, lotniczym i morskim) w funkcji dokładności określenia pozycji (oś x) oraz dostępności (oś y). Diagram opracowano w oparciu o analizę danych zawartych w publikacjach światowych definiujących wymagania dla procesu nawigacji, którymi najczęściej są plany radionawigacyjne **[EC, 2018; GLA, 2007; SMA, 2009; U.S. DoD i in.,**

2017]. Przedstawioną propozycję graficzną uzupełniono wymaganiami stawianymi systemom pozycjonowania stosowanymi w hydrografii morskiej **[IHO, 2008]**.



Rys. 2.17. Wymagania dokładności i dostępności systemów pozycjonowania w hydrografii na tle pozostałych rodzajów nawigacji.

W celu dokonania oceny możliwości wykorzystania poszczególnych metod pozycjonowania (DGPS, EGNOS, multi-GNSS i RTN) na bezzałogowej jednostce hydrograficznej podczas realizacji sondażu, zaproponowano autorski model matematyczny umożliwiający ocenę spełnienia (lub nie) przez te cztery systemy wymagań określonych w standardzie IHO S-44 **[IHO, 2008]**. Rozważmy system pozycyjny o zmiennej wartości błędu pozycji w funkcji czasu. Zaproponowany model ma na celu umożliwić ocenę, czy i który ze wspomnianych systemów pozycyjnych jest w stanie zapewnić wymagania dokładnościowe stawiane określonej kategorii IHO, przy zachowaniu co najmniej wymaganego poziomu ufności. Rozważmy system pozycyjny, który w funkcji czasu wyznacza pozycję z błędem δ_n oraz dla którego określono cztery maksymalne dopuszczalne wartości błędów określenia pozycji odpowiadające minimalnym wymaganiom dokładnościowym przewidzianym dla czterech kategorii IHO: specjalnej, 1a, 1b i 2.

Na Rys. 2.18 (wykres górny) zaprezentowano krzywą prezentującą błąd określenia pozycji w funkcji czasu. Jak widać jego wartość zmienia się w funkcji czasu, stąd na początku posiada dokładność powyżej 20 m, przez co nie jest w stanie spełnić wymagań żadnej z kategorii IHO. Po pewnym czasie błąd pozycji zmniejszył się do niespełna 2 m, co oznacza, że system przez pewien czas może być wykorzystywany we wszystkich kategoriach, aby potem osiągnąć wartość wynoszącą ok. 8 m, przez co spełni jedynie wymagania przewidziane dla kategorii 2 itd. Na wykresie naniesiono również maksymalne dopuszczalne wartości błędów określenia pozycji dla poszczególnych kategorii: specjalnej (kolor zielony), 1a/1b (kolor niebieski) i 2 (kolor czerwony).

Pod wykresem błędu pozycji w funkcji czasu znajdują się trzy wykresy, na których przedstawiono stan pracy systemu, w rozumieniu ogólnej teorii niezawodności, z zastosowaniem dwustanowych procesów z odnową. Zgodnie z tą teorią system może przebywać w dwóch stanach: zdatności (pracy) oznaczanym wartością binarną 1 oraz niezdatności (awarii) oznaczanym wartością binarną 0. O tym, w którym stanie przebywa system pozycjonowania decyduje relacja pomiędzy aktualnym błędem pozycji a maksymalną dopuszczalną wartością błędu określenia pozycji przypisaną do konkretnej kategorii IHO. Trzy kolorowe wykresy prezentują stan pracy systemu w odniesieniu do czterech kategorii IHO: specjalnej, 1a/1b (łącznie) i 2.



Rys. 2.18. Błąd wyznaczenia współrzędnych pozycji w funkcji czasu (wykres górny) oraz trzy wykresy odpowiadające stanom pracy dla kategorii: specjalnej (kolor zielony), 1a/1b (kolor niebieski) i 2 (kolor czerwony).

W ten sposób proces określania pozycji został przetransformowany do dwustanowego procesu stacjonarnego z odnową. Dzięki temu dokonano przejścia ze zmiennej losowej, którą był błąd pozycji (podejście klasyczne) **[Specht C., 2003]**, do systemu niezawodnościowego, w którym czasy pracy i awarii stały się zmiennymi losowymi. W dalszej kolejności to właśnie one pozwolą na określenie dostępności konkretnego rozwiązania pozycyjnego, która zapewni maksymalną dopuszczalną wartość błędu pozycji przypisaną do wybranej kategorii IHO.

Wprowadźmy zmienną U, która odpowiada maksymalnej dopuszczalnej wartości błędu określenia pozycji dla czterech kategorii IHO związanych z akwenami:

$$U = \begin{cases} 2 m (p = 0.95) dla kategorii specjalnej \\ 5 m (p = 0.95) + 5\% głębokości dla kategorii 1a/1b. \\ 20 m (p = 0.95) + 5\% głębokości dla kategorii 2 \end{cases}$$
 (2.1)

Przyjmując, że proces wyznaczania współrzędnych pozycji jest procesem alternującym z odnową, zgodnie z ogólną teorią niezawodności [Grabski F., 2002], wtedy można przypisać mu dwa stany w funkcji czasu: pracy (zdatności) - stan, w którym błąd pozycji jest mniejszy niż ustalona arbitralnie wartość odpowiadająca wymaganiom poszczególnych kategorii IHO, co zapiszemy jako $\delta_n \leq U$ dla n=1,2,... oraz czas awarii (niezdatności), w którym zachodzi zależność przeciwna $\delta_n > U$ dla $n = 1, 2, \dots$ Niech X_1, X_2, \dots oznaczają długości czasów pracy, a Y_1, Y_2, \dots odpowiadają czasom ich awarii (Rys. 2.19). Ich skutkiem jest zmiana stanu pracy przez zmienną $\alpha(t)$. Stąd systemu reprezentowana momenty czasu $Z_n = X_1 + Y_1 + X_2 + Y_2 + \dots + Y_{n-1} + X_n$ dla $n = 1, 2, \dots$ stają się chwilami awarii (co oznacza, że dokładność systemu pozycyjnego nie spełnia wymagań określonych dla kategorii IHO), natomiast momenty $Z_n = Z_n + Y_n$ dla n = 1, 2, ... są momentami odnowy. Załóżmy, że zmienne losowe X_i, Y_i dla i = 1, 2, ... są niezależne oraz, że czasy pracy i awarii mają jednakowe rozkłady.



Rys. 2.19. Stany pracy: zdatności (zdolność systemu do spełnienia wymagań w zakresie pozycjonowania dla kategorii IHO) oraz niezdatności (zdarzenie przeciwne) [Specht C., 2003].

Dla modelu niezbędnym jest wprowadzenie kilku dodatkowych oznaczeń i założeń wynikających z właściwości matematycznych tego procesu. Przyjmijmy, że dystrybuanty czasów pracy F(x) i awarii G(y) są prawostronnie ciągłe. Wtedy:

$$P(X_i \le x) = F(x)$$
, $P(Y_i \le y) = G(y) \ dla \ i = 1, 2, ...$ (2.2), (2.3)

Wprowadźmy również oznaczenia wartości oczekiwanej i wariancji, które można wyrazić jako:

$$E(X_i) = E(x)$$
, $E(Y_i) = E(y)$, (2.4), (2.5)

$$V(X_i) = \sigma_1^2$$
, $V(Y_i) = \sigma_2^2$ dla $i = 1, 2, ...$ (2.6), (2.7)

gdzie:

 $E(X_i)$ – wartość oczekiwana czasu pracy,

 $E(Y_i)$ – wartość oczekiwana czasu awarii,

 $V(X_i)$ – wariancja czasu pracy,

 $V(Y_i)$ – wariancja czasu awarii.

Ponadto przyjmijmy również, że:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 > 0.$$
 (2.8)

W oparciu o przyjęte założenia określmy proces niezawodnościowy, w którym o jego stanie (pracy lub awarii) decyduje relacja pomiędzy błędem pojedynczego pomiaru δ_n oraz parametrem U przypisanym do konkretnej kategorii IHO. Niech $\alpha(t)$ będzie binarną interpretacją stanu niezawodnościowego procesu postaci:

$$U = \begin{cases} 1 \ dla \ Z_n^{"} \le t < Z_{n+1}^{"} \\ 0 \ dla \ Z_{n+1}^{'} \le t < Z_{n+1}^{"} \end{cases} \ dla \ n = 0, 1, \dots.$$
(2.9)

Stan $\alpha(t) = 1$ oznacza, że w chwili t błąd pojedynczego pomiaru był mniejszy lub równy U ustalonego wg wzoru (2.1). W przeciwnym wypadku dla $\delta_n > U$ przyjmijmy, że system znajduje się w stanie awarii. Zdefiniujmy pojęcie dostępności jako prawdopodobieństwo tego, iż w dowolnym momencie czasu t błąd wyznaczenia współrzędnych pozycji δ_n będzie mniejszy lub równy względem przyjętej arbitralnie wartości U. Oznaczmy go zmienną D(t), przypisując mu równocześnie formułę matematyczną postaci:

$$D(t) = P\left[\delta(t) \le U\right].$$
(2.10)

Dla wyznaczenia wartości D(t) rozważmy następujący ciąg zdarzeń: $V_0, V_1, ..., V_n$ taki, że:

$$V_n = \left\{ Z_n^{''} \le t < Z_{n+1}^{'} \right\} dla \ n = 0, 1, \dots.$$
(2.11)

Zdarzenie V_n polega na tym, że w chwili t system był zdatny $(\delta(t) \le U)$ oraz do momentu wystąpienia t nastąpiło dokładnie n odnów (zmian stanu pracy). Ze względu na to, że zdarzenia $V_0, V_1, ..., V_n$ wykluczają się parami stąd:

$$P\left[\delta(t) \le U\right] = P\left(\bigcup_{n=0}^{\infty} V_n\right) = \sum_{n=0}^{\infty} P(V_n).$$
(2.12)

Dla określenia wartości $P(V_n)$ wprowadźmy oznaczenia:

$$S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$
, $S_n = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n$, (2.13), (2.14)

gdzie:

$$P(S_n' \le x) = F_n(x), \qquad P(S_n' \le y) = G_n(y) \ dla \ n = 1, 2, \dots$$
 (2.15), (2.16)

Zmienne $S_n^{'}$ oraz $S_n^{''}$ odpowiadają odpowiednio skumulowanym czasom pracy i awarii procesu wyznaczania współrzędnych pozycji, a ich interpretację przedstawiono na Rys. 2.20.



Rys. 2.20. Skumulowany czas pracy i awarii procesu wyznaczania współrzędnych pozycji wg określonej kategorii IHO **[Specht C., 2003]**.

Dystrybuanty czasów pracy $F_n(x)$ i awarii $G_n(y)$ znajdujemy przez n-krotną operację splotu. Dla n=2 otrzymując:

$$F_{2}(t) = \int_{0}^{t} F(t-x) dF(x), \qquad G_{2}(t) = \int_{0}^{t} G(t-y) dG(y). \qquad (2.17), (2.18)$$

Natomiast dla n = 3 otrzymujemy:

$$F_{3}(t) = P(X_{1} + X_{2} + X_{3} \le t), \qquad G_{3}(t) = P(Y_{1} + Y_{2} + Y_{3} \le t). \qquad (2.19), (2.20)$$

Ze wzorów (2.13) i (2.14) wynika, iż:

$$S_{2} = X_{1} + X_{2}$$
, $S_{2}^{"} = Y_{1} + Y_{2}$, (2.21), (2.22)

stąd:

$$F_{3}(t) = P(S_{2}' + X_{3} \le t) = \int_{0}^{t} F_{2}(t-x) dF(x), \qquad (2.23)$$

$$G_{3}(t) = P(S_{2}^{"} + Y_{3} \le t) = \int_{0}^{t} G_{2}(t - y) dG(y).$$
(2.24)

Dla dowolnego *n* otrzymujemy ostateczną postać:

$$F_{n}(t) = \int_{0}^{t} F_{n-1}(t-x) dF(x), \qquad (2.25)$$

$$G_{n}(t) = \int_{0}^{t} G_{n-1}(t-y) dG(y) dla \ n = 2, 3, ...,$$
(2.26)

gdzie:

$$F_1(x) = F(x),$$
 $G_1(y) = G(y).$ (2.27), (2.28)

Ponadto, w związku z tym, że $Z_n^{"} = S_n^{'} + S_n^{"}$ to:

$$\Phi_n(t) = P(Z_n^{"} \le t) = \int_0^t F_n(t-u) dG_n(u) dla \ n = 1, 2, ...,$$
(2.29)

gdzie:

 $\Phi_n(t)$ – jest dystrybuantą rozkładu zmiennej $Z_n^{"}$.

Dla wyznaczenia D(t) obliczmy oddzielnie prawdopodobieństwa zdarzeń $P(V_0)$ oraz $\sum_{n=1}^{\infty} P(V_n)$. Jeżeli $t \ge 0$ to:

$$V_0 = \left\{ Z_0^{''} \le t < Z_{n+1}^{'} \right\} = \left\{ 0 \le t < X_1 \right\},$$
(2.30)

stąd:

$$P(V_0) = P(X_1 > t) = 1 - P(X_1 \le t) = 1 - F(t).$$
(2.31)

Natomiast $P(V_n)$ dla n = 1, 2, ... wyznacza się ze wzoru na prawdopodobieństwo całkowite:

$$P(V_{n}) = P(Z_{n}^{"} \le t < Z_{n+1}^{'}) =$$

$$= P(Z_{n}^{"} \le t < Z_{n}^{"} + X_{n+1}) = ,$$

$$= \int_{0}^{t} P[Z_{n}^{"} \in [x, x + dx]] \cdot P(X_{n+1} > t - x)$$
(2.32)

wtedy:

$$P(V_n) = \int_0^t \left[1 - F(t - x) \right] d\Phi_n(x).$$
 (2.33)

Dostępność określonej wartości błędu wyznaczenia współrzednych pozycji (D(t)) obliczamy jako sumę prawdopodobieństw zdarzeń wykluczających się:

$$D(t) = P\left[\delta(t) \le U\right] = \sum_{n=0}^{\infty} P(V_n) = P(V_0) + \sum_{n=1}^{\infty} P(V_n).$$
(2.34)

Podstawiając (2.31) i (2.33) do (2.34) otrzymujemy:

$$D(t) = 1 - F(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{0}^{t} \left[1 - F(t - x) \right] d\Phi_n(x), \qquad (2.35)$$

stąd:

$$D(t) = 1 - F(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{0}^{t} \left[1 - F(t-x) \right] d\left[\sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n}(x) \right].$$
(2.36)

W ostatecznej formie wzór na dostępność określonej wartości błędu wyznaczenia współrzędnych pozycji przyjmie postać:

$$D(t) = 1 - F(t) + \int_{0}^{t} \left[1 - F(t - x) \right] dH_{\Phi}(x), \qquad (2.37)$$

gdzie:

$$H_{\Phi}\left(x\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_{n}\left(x\right), \qquad (2.38)$$

jest funkcją odnowy strumienia utworzonego przez momenty odnowy pracy systemu nawigacyjnego spełniającego normy IHO dla określonej kategorii pomiarów hydrograficznych.

Dostępność określonej wartości błędu wyznaczenia współrzędnych pozycji wg kategorii IHO można zaprezentować w sposób geometryczny. Pozycje wewnątrz okręgu odpowiadają warunkowi $\delta(t) \leq U$, co oznacza, że system znajduje się w stanie zdatności, natomiast pozycje znajdujące się poza okręgiem odpowiadają stanom niezdatności (Rys. 2.21).



Rys. 2.21. Geometryczna interpretacja dostępności wymaganej dla kategorii IHO. Pozycje wewnątrz okręgu reprezentują stan zdatności, a na zewnątrz stan niezdatności.

W zastosowaniach nawigacyjnych przyjmuje się, że rozkłady czasów pracy i awarii są wykładnicze, stąd ich funkcje gęstości można zapisać wzorami:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \ dla \ t > 0 \\ 0 \ dla \ t \le 0 \end{cases}, \qquad g(t) = \begin{cases} \mu \cdot e^{-\mu \cdot t} \ dla \ t > 0 \\ 0 \ dla \ t \le 0 \end{cases}, \qquad (2.39), (2.40)$$

przy dystrybuantach odpowiednio:

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda \cdot t} \ dla \ t > 0 \\ 0 \ dla \ t \le 0 \end{cases}, \qquad G(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\mu \cdot t} \ dla \ t > 0 \\ 0 \ dla \ t \le 0 \end{cases}, \qquad (2.41), (2.42)$$

gdzie:

f(t) – funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu pracy,

g(t) – funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu awarii,

- λ intensywność uszkodzeń,
- μ intensywność napraw.

Przyjmując powyższe założenia, postać końcową można zapisać jako:

$$D_{\exp}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}, \qquad (2.43)$$

gdzie $D_{exp}(t)$ jest dostępnością określonej wartości błędu wyznaczenia współrzednych pozycji wg kategorii IHO, przy założeniu rozkładu wykładniczego czasów pracy i awarii.

3. Badania możliwości wykorzystania systemów GNSS dla zapewnienia pozycjonowania jednostek hydrograficznych wg wymagań standardu IHO S-44

3.1. Badania geodezyjnych sieci satelitarnych GNSS

3.1.1. Pomiary stacjonarne

Ze względu na możliwość wykorzystania przez bezzałogową jednostkę hydrograficzną różnych systemów pozycyjnych, w tym geodezyjnych sieci satelitarnych GNSS, zasadnym było podjęcie badań mających na celu pomiarowe określenie możliwych do uzyskania dokładności pozycji [Specht C. i in., 2017a]. W badaniach wykorzystano wszystkie dostępne w Polsce cztery sieci geodezyjne GNSS: ASG-EUPOS, SmartNet, TPI NETpro oraz VRSNet.pl. Pomiary pozwoliły nie tylko ustalić aktualny poziom dostępnych dokładności pozycji, ale umożliwiły również porównanie ich między sobą. Badania sieci w pomiarach stacjonarnych przeprowadzono na punkcie EUREF-POL znajdującym się na Rozewiu (ROZE). Został on wyznaczony w trakcie międzynarodowej kampanii pomiarowej EUREF-POL zrealizowanej w 1992 r., której celem było włączenie Polski do sieci EUREF (ang. Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe). Punkt ROZE należy do polskiej sieci EUREF składającej się z 11 punktów geodezyjnych, dla których zostały określone współrzędne geodezyjne w nawiązaniu do europejskiej sieci geodezyjnej ETRF (ang. European Terrestrial Reference Frame), która pełni funkcję podstawowej bazowej osnowy geodezyjnej. Badania zrealizowano wspólnie z mgr inż. Pawłem Dąbrowskim z Katedry Geodezji i Oceanografii UMG.

Punkt EUREF-POL na Rozewiu znajduje się na zewnątrz wieloboków wyznaczających strefy działania poszczególnych sieci geodezyjnych GNSS (Rys. 3.1). Jednakże należy zauważyć, że jedna ze stacji referencyjnych sieci SmartNet (JAGA) znajduje się w jego bezpośrednim sąsiedztwie (w odległości 913 m). Pomimo tego faktu linia łącząca stację JAGA z sąsiednią stacją znajdującą się w Helu przebiega w odległości niespełna 370 m na południowy-zachód od punktu ROZE, pozostawiając go poza wielobokiem wyznaczającym strefę działania sieci SmartNet (Rys. 3.1b).



Rys. 3.1. Granice wieloboków wyznaczających strefy działania sieci geodezyjnych: ASG-EUPOS (a), SmartNet (b), TPI NETpro (c) oraz VRSNet.pl (d) na terenie województwa pomorskiego.

Pomiar statyczny przeprowadzono w dniu 28 marca 2017 r. z wykorzystaniem odbiornika GNSS Trimble R10. Podczas trzygodzinnego pomiaru zarejestrowano surowe dane satelitarne systemów GPS, GLONASS, BDS, Galileo oraz SBAS, z których dwa pierwsze zostały wykorzystane do wyznaczenia współrzędnych mierzonego punktu. Odbiornik GNSS śledził średnio 20.9 satelitów przy współczynniku geometrycznym GDOP wynoszącym 1.03.

Do wyznaczenia współrzędnych pozycji w tzw. post-processingu wykorzystano jedynie fizyczne stacje referencyjne. Zrezygnowano ze stacji wirtualnych z powodu ekstrapolacji obserwacji satelitarnych dla punktów położonych poza granicami wieloboków wyznaczających strefy działania poszczególnych sieci geodezyjnych GNSS. Na potrzeby badań pozyskano surowe dane obserwacyjne z okolicznych stacji referencyjnych czterech ogólnopolskich sieci. W przypadku sieci ASG-EUPOS skorzystano z czterech stacji: GDA1, KOSC, REDZ oraz WLAD. Z sieci SmartNet wykorzystano dane satelitarne z siedmiu stacji: GDPG, HELO, JAGA, KART, LEBI, LEBO oraz REDA. W przypadku sieci TPI NETpro skorzystano z sześciu stacji: BYTO, GDAN, SLUP, STGD, WEJH oraz WICK. Sieć VRSNet.pl dostarczyła surowe dane obserwacyjne z czterech stacji: BRUS, GDSK, KWID oraz SLAW. Średnie odległości punktu ROZE do wykorzystywanych stacji referencyjnych wyniosły dla poszczególnych sieci odpowiednio: 58.17 km (ASG-EUPOS), 39.70 km (SmartNet), 78.98 km (TPI NETpro) oraz 120.55 km (VRSNet.pl) (Rys. 3.2).



Rys. 3.2. Wektory GNSS łączące stacje referencyjne sieci geodezyjnych: ASG-EUPOS (a), SmartNet (b), TPI NETpro (c) oraz VRSNet.pl (d) z punktem EUREF-POL na Rozewiu.

Stacje referencyjne wszystkich sieci są wyposażone w dwuczęstotliwościowe odbiorniki geodezyjne GNSS śledzące satelity systemów GPS i GLONASS. Wartym odnotowania jest fakt, że dla tych dwóch systemów satelitarnych są generowane w czasie rzeczywistym poprawki RTK i RTN, które nie zostały wykorzystane w niniejszej rozprawie.

Do obliczenia wektorów GNSS wykorzystano precyzyjne orbity IGS (ang. International GNSS Service) dla systemu GPS oraz CDDIS (ang. Crustal Dynamics Data Information System) dla systemu GLONASS. Następnie dla każdej sieci geodezyjnej GNSS przeprowadzono wyrównanie ścisłe, w wyniku czego otrzymano cztery niezależne położenia mierzonego punktu (Tab. 3.1). Całość obliczeń wykonano w oprogramowaniu geodezyjnym Trimble Business Center (TBC).

Współrzędna / błąd pozycji	ASG-EUPOS	SmartNet	TPI NETpro	VRSNet.pl	
Szerokość elipsoidalna	N54°49'39.01529"	N54°49'39.01555"	N54°49'39.01529"	N54°49'39.01546"	
Długość elipsoidalna	E18°19'35.35820"	E18°19'35.35898"	E18°19'35.35876"	E18°19'35.35860"	
Wysokość elipsoidalna [m]	70.718	70.742	70.770	70.792	
Błąd ECEF dla X [m]	0.009	0.011	0.009	0.027	
Błąd ECEF dla Y [m]	0.005	0.006	0.004	0.011	
Błąd ECEF dla Z [m]	0.013	0.015	0.013	0.038	
Błąd ECEF dla 3D [m]	0.017	0.020	0.016	0.048	
Błąd ENU dla Easting [m]	0.005	0.006	0.004	0.008	
Błąd ENU dla Northing [m]	0.007	0.007	0.004	0.012	
Błąd ENU dla Up [m]	0.015	0.017	0.015	0.046	

Tab. 3.1. Raport z wyrównania ścisłego wykorzystywanych sieci geodezyjnych GNSS.

Wielkościami referencyjnymi były współrzędne punktu ROZE w układzie PL-ETRF2000 na epokę 2011.0, które przeliczono z układu PL-ETRF89 (Tab. 3.2). Do transformacji współrzędnych wykorzystano model różnic pomiędzy układami odniesienia PL-ETRF89 i PL-ETRF2000, który jest udostępniony na stronie internetowej GUGiKu.

Tab. 3.2. Współrzędne punktu EUREF-POL na Rozewiu w układach odniesienia PL-ETRF89 i PL-ETRF2000.

Współrzędna	PL-ETRF89	PL-ETRF2000		
Szerokość elipsoidalna	N54°49'39.01589"	N54°49'39.015639"		
Długość elipsoidalna	E18°19'35.36004"	E18°19'35.359339"		
Wysokość elipsoidalna [m]	70.807	70.7383		

W końcowym etapie badań dokonano analizy różnic pomiędzy współrzędnymi punktu EUREF-POL na Rozewiu a współrzędnymi wyznaczonymi przy użyciu poszczególnych sieci geodezyjnych GNSS (Tab. 3.3).

Tab. 3.3. Różnice pomiędzy współrzędnymi punktu EUREF-POL na Rozewiu a współrzędnymi wyznaczonymi przy użyciu poszczególnych sieci geodezyjnych GNSS.

Sieć	Układ odniesienia	Szerokość e	lipsoidalna	Długość elipsoidalna		Wysokość elipsoidalna [m]
ASG-EUPOS	PL-ETRF89	0.00060"	0.011 m	0.00184"	0.028 m	0.089
	PL-ETRF2000	0.00035"	0.011 m	0.00114"	0.033 m	0.020
SmartNet	PL-ETRF89	0.00035"	0.011 m	0.00097"	0.028 m	0.081
	PL-ETRF2000	0.00010"	0.003 m	0.00027"	0.008 m	0.012
TPI NETpro	PL-ETRF89	0.00060"	0.018 m	0.00128"	0.038 m	0.037
	PL-ETRF2000	0.00035"	0.011 m	0.00058"	0.017 m	-0.032
VRSNet.pl	PL-ETRF89	0.00043"	0.013 m	0.00144"	0.042 m	0.015
	PL-ETRF2000	0.00018"	0.005 m	0.00074"	0.021 m	-0.054

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że dokładność określenia pozycji przy użyciu polskich sieci geodezyjnych GNSS wynosi 1-5 cm. Błędy wyznaczenia pozycji w odniesieniu do układu PL-ETRF2000 wyniosły w płaszczyźnie horyzontalnej: 3.5 cm (ASG-EUPOS), 0.8 cm (SmartNet), 2 cm (TPI NETpro), 2.2 cm (VRSNet.pl) oraz w płaszczyźnie wertykalnej: 2.0 cm (ASG-EUPOS), 1.2 cm (SmartNet), 3.2 cm (TPI NETpro), 5.4 cm (VRSNet.pl). W związku z tym należy stwierdzić, że dokładności pozycjonowania uzyskane poza strefami działania poszczególnych sieci są zbliżone do tych deklarowanych przez producentów.

Biorąc pod uwagę średnie długości wektorów GNSS łączących stacje referencyjne poszczególnych sieci geodezyjnych GNSS z punktem EUREF-POL na Rozewiu, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem odległości użytkownika od stacji referencyjnych rośnie błąd wyznaczenia pozycji. Najmniejsze błędy wynoszące ok. 1 cm zarówno w płaszczyźnie horyzontalnej, jak i wertykalnej odnotowano w przypadku sieci SmartNet, której stacje referencyjne znajdowały się najbliżej miejsca realizacji pomiarów (średnio 39.70 km). Natomiast największe wartości błędów (2-5 cm) uzyskano w przypadku sieci VRSNet.pl, której stacje referencyjne były zlokalizowane najdalej (średnio 120.55 km) - ponad trzykrotnie dalej niż stacje referencyjne sieci SmartNet. Stacje pozostałych sieci ASG-EUPOS i TPI NETpro były położone w średniej odległości 60-80 km od punktu pomiarowego, a ich dokładność określenia pozycji była do siebie zbliżona i wahała się w przedziale od 2 do 3 cm. Ponadto należy zauważyć, że dokładność wyznaczenia pozycji horyzontalnej jest średnio 1.5-2.5 raza wyższa w porównaniu z pozycją wertykalną. Wyjątek od tej reguły stanowi sieć ASG-EUPOS, dla której zaobserwowano odwrotną zależność.

3.1.2. Pomiary dynamiczne

Głównym problemem realizacji pomiarów z wykorzystaniem bezzałogowych jednostek hydrograficznych jest dostępność sygnałów satelitów wynikających ze zróżnicowania zabudowy. W przypadku pomiarów batymetrycznych realizowanych w basenach portowych decydującym o dokładności elementem jest rodzaj, wysokość i gęstość zabudowy portowej oraz liczba systemów satelitarnych wykorzystywanych przez odbiornik geodezyjny GNSS **[Czaplewski K., Goward D., 2016]**.

Aby ocenić wpływ zabudowy portowej na dostępność określonej wartości błędu pozycji odbiorników geodezyjnych GNSS dokonano badania rozwiązań sieciowych GNSS w różnych rodzajach basenów portowych **[Specht C. i in., 2018b]**. Celem pomiarów było określenie przez ile procent czasu jego dokładność spełnia wymagania poszczególnych kategorii IHO. Analizie poddano trzy reprezentatywne rodzaje basenów portowych opisanych w Tab. 3.4.

Tab. 3.4. Rodzaje basenów portowych poddane badaniu wraz z trasą jednostki hydrograficznej oraz modelem 3D.



Port rybacki (Hel) o niskiej zabudowie i małej gęstości infrastruktury



Średniej wielkości port handlowy (Gdynia) o umiarkowanie gęstej zabudowie



Kanał portowy (Gdańsk Motława) o gęstej zabudowie i wąskich kanałach portowych

Rejestracje odbiorników z sondaży hydrograficznych pozyskano od prof. Artura Makara z Instytutu Nawigacji i Hydrografii Morskiej AMW, natomiast Autor rozprawy przeprowadził wszystkie obliczenia matematyczne wykorzystując model niezawodnościowy zaproponowany w podrozdziale 2.3.

Podczas sondażu portu Gdańsk wykonano 2 353 pomiarów, w porcie Gdynia zarejestrowano 19 023 pomiarów, a w porcie Hel 30 116 pozycji, które poddano analizie w oparciu o prezentowane w części 2.3 zależności. W obliczeniach wykorzystano dane zarejestrowane

przez odbiorniki GNSS oraz oprogramowanie Mathcad 15. W analizach za miarę błędu pozycji przyjęto jego horyzontalną reprezentację, istotną w prowadzeniu pomiarów hydrograficznych. Zbiorcze wyniki analiz dostępności pozycji o określonym błędzie (1 cm, 2 cm, 5 cm, 10 cm, 1 m, 2 m) dla analizowanych portów zaprezentowano w Tab. 3.5.

Tab. 3.5. Wartości współczynników dostępności dla błędów pozycji wynoszących: 1 cm, 2 cm, 5 cm, 10, cm, 1 m i 2 m, obliczone na podstawie pomiarów zrealizowanych w portach: Gdańsk, Gdynia i Hel.

Dort	Współczynnik dostępności [%]						
POIL	1 cm	2 cm	5 cm	10 cm	1 m	2 m	
Gdańsk	8.23	74.41	82.81	82.95	83.12	88.74	
Gdynia	47.04	97.10	98.37	98.80	99.34	99.81	
Hel	64.69	85.67	100	100	100	100	

Na Rys. 3.3 przedstawiono przykładowe funkcje i wartości współczynników dostępności dla błędów pozycji wynoszących: 10 cm, 1 m i 2 m, obliczone na podstawie pomiarów zrealizowanych w porcie Gdynia.



Rys. 3.3. Przykładowe funkcje (*D1(t)*, *D2(t)*, *D3(t)*) i wartości współczynników (*D1*, *D2*, *D3*) dostępności dla błędów pozycji wynoszących: 10 cm (kolor czerwony), 1 m (kolor niebieski) i 2 m (kolor brązowy), obliczone na podstawie pomiarów zrealizowanych w porcie Gdynia.

Pomiary hydrograficzne zrealizowane zarówno w Gdyni, jak i w Helu wykazały, że sieci geodezyjne GNSS mogą być z powodzeniem wykorzystywane w morskich pomiarach hydrograficznych portów. Ponadto potwierdziły one wysoką aplikacyjność tej techniki na morzu, dzięki uzyskanej bardzo wysokiej dostępności pozycji przekraczającej 99%. Należy zauważyć, że przesłony terenowe występujące w porcie Gdynia nie miały istotnego wpływu na pogorszenie dokładności określenia pozycji. Jednakże głównym ograniczeniem wykorzystania sieci geodezyjnej GNSS był zasięg operatora sieci telefonii komórkowej.

Szczególnym przypadkiem jest port Gdańsk, gdzie pomiary realizowano blisko gęstej zabudowy, jak i jednostek morskich stojących przy nabrzeżach. Pomiary wykazały, że osiągnięcie dostępności pozycji dla wartości błędów wynoszących: 10 cm, 1 m i 2 m wymaga dodatkowego planowania kampanii minimalizującego wartość współczynników DOP.

3.2. Badania systemów DGPS i EGNOS

3.2.1. Pomiary stacjonarne

Badania dokładności określenia pozycji systemów DGPS i EGNOS prowadzone były w Polsce od wielu lat **[Dziewicki M., Specht C., 2009; Specht C., 2011]**. Ze względu na zmieniające się wartości błędów pozycji systemu GPS, które skutkowały zwiększaniem dokładności systemów wspomagających DGPS i EGNOS, przeprowadzono je regularnie w latach 2006-2014. W pracy dokonano analizy trzech długoterminowych kampanii:

- Pierwsza kampania pomiarowa odbyła się w marcu 2006 r. W trakcie tej kampanii zarejestrowano odpowiednio 2 187 842 pomiarów dla systemu DGPS i 1 774 705 dla systemu EGNOS z częstotliwością rejestracji co 1 s.
- Druga kampania pomiarowa odbyła się w lipcu i w sierpniu 2010 r. W trakcie tej kampanii zarejestrowano odpowiednio 214 842 pomiarów dla systemu DGPS i 2 110 265 dla systemu EGNOS z częstotliwością rejestracji co 1 s.
- Trzecia kampania pomiarowa odbyła się w kwietniu i w maju 2014 r. W trakcie tej kampanii zarejestrowano odpowiednio 951 698 pomiarów dla systemu DGPS i 927 553 dla systemu EGNOS z częstotliwością rejestracji co 1 s.

W ramach badań odbiorniki systemów DGPS i EGNOS montowano zawsze w tym samym miejscu - na radiolatarni w porcie Gdynia (Rys. 3.4). Był to punkt referencyjny o współrzędnych elipsoidalnych wynoszących odpowiednio: $B = 54^{\circ} 31.75524^{\circ} N$, $L = 18^{\circ} 33.57418^{\circ} E$, h = 68.07 m. W trakcie kampanii pomiarowych wykorzystywano jednoczęstotliwościowy odbiornik z możliwością zapisu danych w formacie NMEA typu GGA. W wyniku pomiarów otrzymywano pliki tekstowe ze współrzędnymi pozycji zgodnymi ze wspomnianym wcześniej protokołem transmisji danych. Zawierały one współrzędne geograficzne wyznaczonych punktów, które były prezentowane w mierze kątowej (krzywoliniowej). W celu wyznaczenia błędów poszczególnych pomiarów dokonano ich rzutowania z powierzchni elipsoidy obrotowej WGS-84 na powierzchnię płaską przy wykorzystaniu transformacji Gaussa-Krügera.



Rys. 3.4. Lokalizacja miejsca pomiarów - radiolatarnia portu Gdynia.

Zestawienie statystyczne wyników pomiarów systemów DGPS i EGNOS zaprezentowano w Tab. 3.6 i 3.7. Dla systemu DGPS zostały one przedstawione poniżej.

Miara błodu	DGPS	2006	DGPS	2010	DGPS 2014	
pozycji	Dokładność przewidywana	Dokładność powtarzalna	Dokładność przewidywana	Dokładność powtarzalna	Dokładność przewidywana	Dokładność powtarzalna
Liczba pomiarów	2 187	842	214	842	951	698
RMS (B)	0.81 m	0.78 m	0.13 m	0.12 m	0.40 m	0.37 m
RMS (L)	0.62 m	0.61 m	0.17 m	0.16 m	0.26 m	0.25 m
RMS (h)	1.43 m	1.43 m	0.34 m	0.33 m	0.60 m	0.60 m
DRMS(2D)	1.02 m	0.99 m	0.21 m	0.20 m	0.48 m	0.44 m
2DRMS (2D)	2.04 m	1.98 m	0.42 m	0.40 m	0.96 m	0.88 m
DRMS (3D)	1.76 m	1.74 m	0.40 m	0.39 m	0.77 m	0.75 m
2DRMS (3D)	3.52 m	3.48 m	0.80 m	0.78 m	1.54 m	1.50 m
	Wyznac	zanie błędów p	ozycji z populacj	ji (poprzez sorto	owanie)	
CEP (2D)	0.83 m	0.78 m	0.16 m	0.16 m	0.36 m	0.33 m
R68 (2D)	1.06 m	1.01 m	0.21 m	0.21 m	0.47 m	0.43 m
R95 (2D)	1.79 m	1.77 m	0.40 m	0.39 m	0.83 m	0.75 m
SEP (3D)	1.39 m	1.35 m	0.38 m	0.29 m	0.59 m	0.55 m
R68 (3D)	1.77 m	1.74 m	0.51 m	0.39 m	0.76 m	0.72 m
R95 (3D)	3.04 m	3.02 m	1.20 m	1.00 m	1.40 m	1.39 m

Tab. 3.6. Statystyki błędów pozycji systemu DGPS dla kampanii pomiarowych wykonanych w latach 2006-2014.

Natomiast statystyki błędów pozycji systemu EGNOS zaprezentowano poniżej.

Tab. 3.7. Statystyki błędów pozycji systemu EGNOS dla kampanii pomiarowych wykonanych w latach 2006-2014.

Miara błodu	EGNOS	2006	EGNOS	2010	EGNOS 2014	
pozycji	Dokładność przewidywana	Dokładność powtarzalna	Dokładność przewidywana	Dokładność powtarzalna	Dokładność przewidywana	Dokładność powtarzalna
Liczba pomiarów	1 774 705		2 110 265		927 553	
RMS (B)	3.74 m	3.52 m	0.47 m	0.46 m	1.61 m	0.38 m
RMS (L)	2.33 m	2.28 m	0.94 m	0.38 m	0.29 m	0.23 m
RMS (h)	6.51 m	6.22 m	0.96 m	0.73 m	1.09 m	0.69 m
DRMS(2D)	4.41 m	4.19 m	1.05 m	0.59 m	1.64 m	0.45 m
2DRMS (2D)	8.82 m	8.39 m	2.11 m	1.19 m	3.27 m	0.90 m
DRMS (3D)	7.87 m	7.50 m	1.42 m	0.94 m	1.97 m	0.82 m
2DRMS (3D)	15.74 m	15.00 m	2.84 m	1.88 m	3.94 m	1.64 m
Wyznaczanie błędów		zanie błędów p	ozycji z populacj	i (poprzez sorto	owanie)	
CEP (2D)	2.36 m	1.67 m	1.00 m	0.41 m	1.52 m	0.30 m
R68 (2D)	2.99 m	2.28 m	1.14 m	0.55 m	1.68 m	0.40 m
R95 (2D)	7.62 m	7.64 m	1.51 m	1.16 m	2.31 m	0.84 m
SEP (3D)	3.90 m	2.80 m	1.29 m	0.71 m	1.75 m	0.51 m
R68 (3D)	4.91 m	3.96 m	1.48 m	0.93 m	1.99 m	0.66 m
R95 (3D)	13.44 m	12.86 m	2.20 m	1.76 m	2.90 m	1.65 m

Na podstawie zebranych danych na Rys. 3.5 przedstawiono dystrybuanty oraz funkcje gęstości prawdopodobieństwa błędu 2D pozycji przewidywanej systemu DGPS na przestrzeni lat.



Rys. 3.5. Wykresy dystrybuant (po lewej) i funkcji gęstości prawdopodobieństwa (po prawej) błędu 2D pozycji przewidywanej systemu DGPS dla kampanii pomiarowych wykonanych w latach 2006-2014.

Analiza wyników przeprowadzonych badań wskazuje, że rozkłady błędu 2D pozycji przewidywanej systemu DGPS dla kampanii pomiarowych wykonanych w latach 2010 i 2014 wyniosły odpowiednio: 0.40 m i 0.83 m (p = 0.95), a dla kampanii z 2006 r. 1.83 m (p = 0.95). Różnice te wynikały przede wszystkim ze stosowania (od 2009 r.) bardziej zaawansowanych technologicznie odbiorników GPS, które są podstawowym elementem stacji referencyjnych systemu DGPS.

W dalszej kolejności na podstawie zarejestrowanych danych na Rys. 3.6 zaprezentowano dystrybuanty oraz funkcje gęstości prawdopodobieństwa błędu 2D pozycji przewidywanej systemu EGNOS na przestrzeni lat.



Rys. 3.6. Wykresy dystrybuant (po lewej) i funkcji gęstości prawdopodobieństwa (po prawej) błędu 2D pozycji przewidywanej systemu EGNOS dla kampanii pomiarowych wykonanych w latach 2006-2014.

Pierwsza kampania pomiarowa z 2006 r. została przeprowadzona w momencie, gdy system EGNOS nie był jeszcze w pełni operacyjny, a miał charakter testowy (ang. EGNOS System Test Bed – ESTB). Statystyki błędów 2D pozycji systemu EGNOS dla kampanii pomiarowych wykonanych w latach 2010 i 2014 były znacząco lepsze niż w trakcie kampanii z 2006 r. Wyniosły one odpowiednio: 1.12 m (p = 0.68) i 1.81 m (p = 0.95) w 2010 r. oraz 1.75 m (p = 0.68) i 2.82 m (p = 0.95) w 2014 r. Należy również zauważyć, iż wykresy funkcji gęstości prawdopodobieństwa błędu 2D pozycji przewidywanej dla dwóch ostatnich kampanii pomiarowych są zbliżone do rozkładu Gaussa.
3.2.2. Pomiary dynamiczne

Na potrzeby rozprawy zrealizowano pomiary dynamiczne systemów DGPS i EGNOS, których celem była pomiarowa ocena dokładności obu systemów w kontekście możliwości ich zastosowania dla pozycjonowania bezzałogowej jednostki hydrograficznej. Do tego celu wykorzystano należącego do Urzędu Morskiego w Gdyni stawiacza pław *"Tucana"* (Rys. 3.7a). Pomiary przeprowadzono w rejonie basenu i na redzie portu Gdynia. Szczegóły odnośnie planowanego kursu, prędkości i manewrów statku przedstawiono na Rys. 3.7b. Badania były realizowane wspólnie z zespołem Katedry Geodezji i Oceanografii UMG.



Rys. 3.7. Stawiacz pław "Tucana" (a) oraz zaplanowana trasa badań (b).

Przed rozpoczęciem testów przygotowano platformę pomiarową umożliwiającą montaż aparatury. Umieszczono na niej cztery odbiorniki GNSS: dwa egzemplarze Trimble R10 (oznaczone jako R_1 i R_2), Trimble GA530 (S_1) oraz Simrad MXB5 (S_2). Odbiorniki zostały wykorzystane do przeprowadzenia pomiarów satelitarnych z użyciem trzech rodzajów poprawek: DGPS (S_2), EGNOS (S_1) i RTK (R_1 i R_2). Platformę zamocowano na górnym pokładzie statku "*Tucana*" w osi konstrukcyjnej jednostki (Rys. 3.8).



Rys. 3.8. Umiejscowienie anten odbiorczych systemów GNSS na statku "Tucana".

Na potrzeby badań wprowadzono lokalny (statkowy) układ współrzędnych, którego początek znajdował się w środkowym punkcie górnej pokrywy pierwszego odbiornika R_1 . We wspomnianym powyżej układzie współrzędnych przyjęto, że: horyzontalna oś X była skierowana na środek górnej pokrywy drugiego odbiornika R_2 , wertykalna oś Z była skierowana prostopadle do górnej pokrywy odbiornika R_1 , natomiast oś Y uzupełniała

prawoskrętny układ współrzędnych kartezjańskich (Rys. 3.8). Kolejnym etapem przygotowawczym do zasadniczej części pomiarów było określenie wzajemnych relacji geometrycznych pomiędzy odbiornikami. Precyzyjne umiejscowienie aparatury pomiarowej przeprowadzono w oparciu o technikę tachimetryczną. W tym celu wykorzystano dalmierz elektrooptyczny Leica TPS 1103, za pomocą którego wyznaczono współrzędne we wprowadzonym lokalnym układzie współrzędnych. Odbiorniki GNSS posiadały w układzie lokalnym współrzędne x, y, z wynoszące odpowiednio: R_1 (0.000, 0.000, 0.000) [m], S_1 (0.372, 0.003, -0.115) [m], S_2 (0.746, 0.003, -0.105) [m], R_2 (0.000, 1.116, -0.003) [m]. Następnie na ich podstawie możliwe było wyznaczenie wektorów kierunkowych vd_{S1} i vd_{S2} testowanych odbiorników S_1 i S_2 względem odbiornika referencyjnego R_1 :

$$vd_{S1}^{T} = \begin{bmatrix} 0.372\\ 0.003\\ -0.115 \end{bmatrix}, vd_{S2}^{T} = \begin{bmatrix} 0.746\\ 0.003\\ -0.105 \end{bmatrix}. (3.1), (3.2)$$

Po przygotowaniu i kalibracji aparatury pomiarowej przystąpiono do realizacji morskich pomiarów dynamicznych. Badania przeprowadzono w dniu 20 czerwca 2017 r., w godzinach okołopołudniowych. W dniu realizacji pomiarów panowały następujące warunki pogodowe: wiatr południowo-zachodni 4-5, skręcający na północno-zachodni 5-6, miejscami do 7 stopni w skali Beauforta, stan Zatoki Gdańskiej 2-3 stopnie w skali Douglasa, temperatura powietrza ok. 16°C oraz dobra widzialność **[IMGW-PIB, 2017]**. Pomiary przeprowadzono podczas typowych - korzystnych warunków pogodowych. Należy jednak dodać, że wśród Autorów analogicznych publikacji ustalił się pogląd, że badania systemów pozycyjnych w nawigacji prowadzone są w warunkach występujących najczęściej - czyli typowych, bez anomalii pogodowych.

"Tucana" odcumowała od Nabrzeża Prezydenta w Gdyni ok. godziny 10 i wyszła na redę portu Gdynia. Po rozpoczęciu rejestracji danych statek skierował się w stronę toru wodnego prowadzącego do głównego wejścia do gdyńskiego portu. Po wykonaniu prób zygzakowania, cyrkulacji w przeciwnych kierunkach i zatrzymywania statku *"Tucana"* weszła głównym wejściem do awanportu w Gdyni i wykonała symulowany obrót dużego statku na znajdującej się tam obrotnicy. Następnie poruszając się z prędkością kilku węzłów kontynuowała podróż do basenów portowych wykonując kolejny symulowany obrót dużego statku na obrotnicy znajdującej się w Basenie VIII Kontenerowym. Po cyrkulacji jednostka kontynuowała ruch do zachodniego końca basenu i podeszła do Nabrzeża Helskiego I, gdzie cumują statki przewożące kontenery. Po odejściu od nabrzeża statek rozpoczął rejs powrotny do Nabrzeża Prezydenta wykonując po drodze symulowane podejście do Nabrzeża Duńskiego w Basenie III Węglowym. Po wykonaniu manewru *"Tucana"* popłynęła prosto do swojego miejsca postoju przy Nabrzeżu Prezydenta, gdzie zacumowała ok. godziny 14. Zapis trajektorii *"Tucany"* podczas pomiarów został przedstawiony na Rys. 3.9.



Rys. 3.9. Zapis trajektorii jednostki pływającej podczas morskich pomiarów dynamicznych.

Zasadnicza część pomiarów polegała na rejestracji współrzędnych pozycji przez odbiorniki GNSS. Dwa z nich (R_1 i R_2) spełniały rolę referencyjną, tzn. dostarczały informacje pozwalające określić błędy wyznaczenia pozycji dwóch pozostałych odbiorników (S_1 i S_2). W tym celu wykorzystano poprawki RTK komercyjnej, aktywnej sieci geodezyjnej VRSNet.pl zapewniające dokładność rzędu 2-3 cm. Biorąc pod uwagę oczekiwane dokładności odbiorników S_1 i S_2 (0.5-3 m) przyjęto ten rząd wielkości za wystarczający na potrzeby niniejszej pracy. Wszystkie odbiorniki pracowały z częstotliwością 1 Hz. Rejestracja danych odbiorników S_1 i S_2 polegała na zapisie komunikatów NMEA typu GGA. Z kolei odbiorniki referencyjne R_1 i R_2 podczas pomiarów RTK przeliczały w czasie rzeczywistym uzyskiwane współrzędne ortokartezjańskie ECEF (ang. Earth-Centered, Earth-Fixed) na współrzędne płaskie w odwzorowaniu Gaussa-Krügera. W związku z zapisem dwóch rodzajów współrzędnych w odbiornikach S_1 i S_2 (B,L,h) oraz R_1 i R_2 ($x_{PL-2000}, y_{PL-2000}, H$) konieczne było sprowadzenie ich do jednolitego układu odniesienia (takiego jak w odbiornikach referencyjnych).

Współrzędne w lokalnym (statkowym) układzie odniesienia można przedstawić w postaci wektorów określających położenie odbiorników R_2 , S_1 i S_2 względem odbiornika R_1 . Wektory te pozwoliły na dalszym etapie wyznaczyć wielkości referencyjne (odniesienia) dla chwilowych współrzędnych testowanych odbiorników S_1 i S_2 . Dodatkowo, znając z wysoką dokładnością współrzędne (błędy milimetrowe w pomiarach tachimetrycznych) dysponujemy prawdziwymi (nominalnymi) wartościami przyrostów współrzędnych pomiędzy odbiornikami referencyjnymi R_1 i R_2 . Zważywszy, że również te odbiorniki wyznaczają swoje współrzędne w czasie rzeczywistym (ze znacznie mniejszym błędem rzędu 2-3 cm w metodzie RTK), to można wykorzystać te informacje do obliczenia korekt współrzędnych.

Wzajemne relacje geometryczne pomiędzy odbiornikami referencyjnymi były następujące: odległość pozioma między nimi wynosiła d = 1.116 m, natomiast różnica wysokości dH = -0.003 m. Mając na uwadze wysoką dokładność techniki tachimetrycznej wielkości te przyjęto za prawdziwe. Na podstawie powyższych danych oraz zarejestrowanych

współrzędnych odbiorników $R_1(x_{R1}, y_{R1}, H_{R1})$ i $R_2(x_{R2}, y_{R2}, H_{R2})$ możliwe było wyznaczenie błędów przypadkowych w każdej epoce pomiarowej:

$$md = |R_1R_2| - d$$
, (3.3)

$$mH = (H_{R2} - H_{R1}) - dH , \qquad (3.4)$$

gdzie:

md – chwilowy błąd odległości pomiędzy odbiornikami R_1 i R_2 ,

 $|R_{1}R_{2}| = \sqrt{(x_{R2} - x_{R1})^{2} + (y_{R2} - y_{R1})^{2}} - \text{odległość pomiędzy odbiornikami } R_{1} \text{ i } R_{2},$ wyznaczona na podstawie pomiaru GNSS współrzędnych odbiorników $R_{1}(x_{R1}, y_{R1})$ i $R_{2}(x_{R2}, y_{R2}),$

d – rzeczywista odległość pomiędzy odbiornikami $R_{\rm i}$ i $R_{\rm 2}$,

- $m\!H\,$ chwilowy błąd różnicy wysokości pomiędzy odbiornikami ${\it R}_{\rm l}$ i ${\it R}_{\rm 2}$,
- dH rzeczywista różnica wysokości pomiędzy odbiornikami R_1 i R_2 .

Odbiorniki referencyjne przy każdym wyznaczeniu pozycji obliczają chwilowe błędy współrzędnych horyzontalnych: m_{XYR1} i m_{XYR2} oraz wysokości normalnej: m_{HR1} i m_{HR2} . Dzięki nim możliwe było wyznaczanie korekt do pomierzonych współrzędnych:

$$\Delta d_{R1} = \left(\frac{m_{XYR1}}{m_{XYR1} + m_{XYR2}}\right) md , \qquad \Delta d_{R2} = \left(\frac{m_{XYR2}}{m_{XYR1} + m_{XYR2}}\right) md , \qquad (3.5), (3.6)$$

$$\Delta H_{R1} = \left(\frac{m_{HR1}}{m_{HR1} + m_{HR2}}\right) mH, \qquad \Delta H_{R2} = \left(\frac{m_{HR2}}{m_{HR1} + m_{HR2}}\right) mH, \qquad (3.7), (3.8)$$

gdzie:

 $\Delta d_{R_1}, \Delta d_{R_2}$ – poprawki do obliczonej odległości horyzontalnej pomiędzy odbiornikami referencyjnymi, odpowiednio dla R_1 i R_2 ,

 $\Delta H_{R1}, \Delta H_{R2}$ – poprawki do obliczonej różnicy wysokości normalnych pomiędzy odbiornikami referencyjnymi, odpowiednio dla R_1 i R_2 .

W oparciu o wyżej obliczone poprawki możliwe było wyznaczanie skorygowanych współrzędnych odbiorników referencyjnych:

$$x_{R1}^{*} = x_{R1} + \Delta d_{R1} \frac{x_{R2} - x_{R1}}{|R_1 R_2|}, \qquad x_{R2}^{*} = x_{R2} - \Delta d_{R2} \frac{x_{R2} - x_{R1}}{|R_1 R_2|}, \qquad (3.9), (3.10)$$

$$y_{R1}^{*} = y_{R1} + \Delta d_{R1} \frac{y_{R2} - y_{R1}}{|R_1 R_2|}, \qquad y_{R2}^{*} = y_{R2} - \Delta d_{R2} \frac{y_{R2} - y_{R1}}{|R_1 R_2|}, \qquad (3.11), (3.12)$$

$$H_{R1}^{*} = H_{R1} + \Delta H_{R1}, \qquad H_{R2}^{*} = H_{R2} + \Delta H_{R2}, \qquad (3.13), (3.14)$$

gdzie:

 $(x_{R_1}^*, y_{R_1}^*, H_{R_1}^*), (x_{R_2}^*, y_{R_2}^*, H_{R_2}^*)$ – skorygowane współrzędne odbiorników R_1 i R_2 .

Zastosowanie poprawek do wyznaczonych współrzędnych pozwoliło na uzyskanie nominalnej konfiguracji geometrycznej pomiędzy odbiornikami. Dzięki temu w każdej epoce pomiarowej błąd wynikający z zastosowanej techniki pomiarowej RTK był dodatkowo zredukowany. Odbiorniki referencyjne, z racji umieszczenia ich w osi statku, umożliwiały wyznaczanie chwilowego kursu jednostki *HDG* na podstawie ich skorygowanych współrzędnych horyzontalnych (x_{R1}^*, y_{R1}^*) i (x_{R2}^*, y_{R2}^*) :

$$HDG = \arctan\left(\frac{y_{R2}^* - y_{R1}^*}{x_{R2}^* - x_{R2}^*}\right).$$
 (3.15)

Dysponując w każdej epoce pomiarowej dwoma wektorami współrzędnych odbiorników referencyjnych $(x_{R1}^*, y_{R1}^*, H_{R1}^*)$ i $(x_{R2}^*, y_{R2}^*, H_{R2}^*)$ oraz znając aktualny kurs jednostki *HDG* i wzajemną konfigurację przestrzenną platformy pomiarowej możliwe było obliczanie chwilowych współrzędnych testowanych odbiorników S_1 i S_2 :

$$x_i = x_{R1}^* + vd_{ix} \cdot \cos(HDG) - vd_{iy} \cdot \sin(HDG), \qquad (3.16)$$

$$y_i = y_{R1}^* + vd_{ix} \cdot \sin(HDG) + vd_{iy} \cdot \cos(HDG),$$
 (3.17)

$$H_i = H_{R1}^* + v d_{iH} , (3.18)$$

gdzie:

i – numer testowanego odbiornika (1 lub 2),

 x_i, y_i, H_i – chwilowe współrzędne testowanych odbiorników,

 vd_{ix} , vd_{iy} , vd_{iH} – współrzędne wektora kierunkowego i-tego odbiornika w lokalnym (statkowym) układzie współrzędnych.

Przechodząc do wniosków można stwierdzić, że prace obliczeniowe mające na celu określenie błędów wyznaczenia pozycji przez odbiorniki S_1 i S_2 rozpoczęto od porównania współrzędnych pomierzonych z referencyjnymi. Dla każdej epoki pomiarowej obliczono różnice współrzędnych płaskich ($\Delta x, \Delta y$) oraz wysokości normalnej (ΔH). Następnie na podstawie znanych wartości przyrostów współrzędnych ($\Delta x, \Delta y$) obliczano chwilowy błąd w płaszczyźnie horyzontalnej (odległość 2D) stosując twierdzenie Pitagorasa o stosunku długości boków w trójkącie prostokątnym. Z kolei błąd w płaszczyźnie wertykalnej wynikał wprost z przyrostu wysokości normalnych.

Na poniższym Rys. 3.10 zaprezentowano rozkłady błędów wyznaczenia pozycji horyzontalnej odbiorników S_1 i S_2 wyznaczonych względem wartości referencyjnych. Umieszczone na wykresach okręgi w kolorach czerwonym i zielonym wyznaczają prawdopodobieństwo

wystąpienia błędu horyzontalnego wynoszącego odpowiednio: 68.3% (DRMS) i 95.4% (2DRMS).



Rys. 3.10. Rozkłady błędów wyznaczenia pozycji 2D zarejestrowane przez odbiorniki EGNOS (a) oraz DGPS (b).

Odbiornik S_1 wykorzystywał podczas morskich pomiarów dynamicznych poprawki EGNOS. Rejestracja współrzędnych była ciągła i nie wystąpiły w niej istotne przerwy. Porównując uzyskane w badaniach współrzędne ze współrzędnymi referencyjnymi można zauważyć wyraźny trend rozkładu błędów współrzędnych płaskich. Zdecydowana większość z nich wystąpiła na kierunku północno-wschodnim względem rzeczywistego położenia odbiornika. Promień okręgu wyznaczającego średni błąd pozycji horyzontalnej (*DRMS*) przy poziomie ufności 1 σ wyniósł 1.20 m (kolor zielony na Rys. 3.10a). Z kolegi druga z analizowanych miar (*2DRMS*) osiągnęła wartość 2.39 m (kolor czerwony na Rys. 3.10a). Powyższy rozkład błędów wyznaczenia pozycji horyzontalnej cechuje się stosunkowo dużą precyzją z nielicznie występującymi anomaliami. Natomiast uzyskana dokładność jest zdecydowanie mniejsza ze względu na stałe przesunięcie błędów o ok. 1 m względem rzeczywistego położenia odbiornika.

Drugi odbiornik S_2 wykorzystujący poprawki DGPS zarejestrował niemal identyczną liczbę pomiarów jak odbiornik S_1 wykorzystujący poprawki EGNOS (Rys. 3.10b). Rejestracja danych przebiegła pomyślnie, bez niepożądanych zdarzeń (podobnie jak w przypadku odbiornika S_1). Na podstawie powyższego rozkładu błędów wyznaczenia pozycji horyzontalnej należy stwierdzić, że system DGPS charakteryzuje się stosunkowo wysoką precyzją, jak i dokładnością. Wartości średnich błędów wyznaczenia pozycji horyzontalnej są niemal dwukrotnie mniejsze niż w przypadku systemu EGNOS i wynoszą odpowiednio: DRMS = 0.74 m (okrąg zielony na Rys. 3.10b) oraz 2DRMS = 1.48 m (okrąg czerwony na Rys. 3.10b).

Do oceny miar statystycznych błędów wyznaczenia współrzędnych pozycji testowanych odbiorników wykorzystano powszechnie stosowane w nawigacji i geodezji miary dokładności określenia pozycji, które zostały przedstawione zbiorczo w formie tabelarycznej (Tab. 3.8)

[NovAtel Positioning Leadership, 2003; Specht M., 2015; van Diggelen F., 2007; Whelan B., Taylor J., 2013].

Miara błędu pozycji	RMS (x)	RMS (y)	RMS (H)	DRMS (2D)	2DRMS (2D)	DRMS (3D)
S ₁ (EGNOS)	0.98 m	0.68 m	1.04 m	1.20 m	2.39 m	1.58 m
S ₂ (DGPS)	0.54 m	0.51 m	0.83 m	0.74 m	1.48 m	1.12 m
Miara błędu pozycji	CEP (2D)	R68 (2D)	R95 (2D)	SEP (3D)	R68 (3D)	R95 (3D)
S ₁ (EGNOS)	1.00 m	1.17 m	1.79 m	1.26 m	1.55 m	2.80 m
S ₂ (DGPS)	0.53 m	0.68 m	1.42 m	0.86 m	1.11 m	2.07 m

Tab. 3.8. Miary dokładności określenia pozycji odbiorników GNSS wykorzystujących poprawki DGPS i EGNOS.

Na podstawie Tab. 3.8 można stwierdzić, że system DGPS cechuje się wyższymi (lepszymi) charakterystykami dokładnościowymi od systemu EGNOS. Jest to spowodowane tym, że we wszystkich badanych miarach dokładności określenia pozycji uzyskano mniejsze wartości błędów (średnio o ok. 1.5 raza). Miary jednowymiarowe (*RMS*) dla obu systemów mieszczą się w przedziale 0.5-1 m. Jednakże można również dostrzec, że błędy wyznaczenia wysokości (H) są większe w porównaniu z błędami wyznaczenia poszczególnych współrzędnych płaskich (x, y). Natomiast jeśli chodzi o miary dwuwymiarowe to można je podzielić na trzy grupy ze względu na prawdopodobieństwo wystąpienia błędu pozycji wynoszącego odpowiednio: 50% (*CEP*), 68.3% (*DRMS*, *R*68) i 95.4% (*2DRMS*, *R*95). W przypadku systemu DGPS miary CEP, DRMS, R68 wyniosły nieco ponad 0.5 m, a dla systemu EGNOS mieściły się w przedziale 1-1.2 m. Z kolei miary w płaszczyźnie horyzontalnej o podwyższonym poziomie wystąpienia błędu (2DRMS, R95) były w systemie DGPS zbliżone i nie przekroczyły wartości 1.5 m, natomiast w systemie EGNOS były one mniej zbieżne i wyniosły odpowiednio: 2.39 m (2DRMS) i 1.79 m (R95). W analizie wzięto pod również trójwymiarowe miary dokładności określenia uwagę pozycji (SEP, DRMS, R68, R95). Miara SEP (p = 0.5) wyniosła 0.86 m dla systemu DGPS i 1.26 m dla systemu EGNOS. Kolejne dwie pary miar (DRMS, R68) przy poziomie ufności 2σ były większe od poprzednich o 25-30 cm i wyniosły ok. 1.1 m (DGPS) i 1.6 m (EGNOS). Największe wartości zaobserwowano wśród miar (R95(3D)), które dla obu systemów przekroczyły 2 m.

Podsumowując, obie kampanie systemów DGPS i EGNOS należy stwierdzić, że system EGNOS cechuje się nieznacznie gorszymi charakterystykami dokładnościowymi od systemu DGPS zarówno w pomiarach stacjonarnych, jak i dynamicznych. We wszystkich badanych miarach dokładności określenia pozycji uzyskano większe wartości błędów (średnio o ok. 1.5-2 raza). Jak wykazały badania przeprowadzone w 2017 r., system DGPS spełnia wymogi dokładnościowe opisane w standardzie wydanym przez IALA **[IALA, 2015]**. Miara R95(2D) jest ponad 7-krotnie mniejsza od wartości dopuszczalnej wynoszącej 10 m w płaszczyźnie horyzontalnej (p = 0.95). Natomiast uzyskane dokładności serwisu otwartego systemu EGNOS były o ok. 1.5 raza większe od wartości dopuszczalnych wynoszących 3 m

w płaszczyźnie horyzontalnej (p = 0.95) i 4 m w płaszczyźnie wertykalnej (p = 0.95) [GSA, 2017].

Badania dowiodły, że systemy DGPS i ENOS spełniają wymogi w zakresie dokładności określenia pozycji, które zdefiniowano w rezolucji IMO A.953(23) - Światowy System Radionawigacyjny **[IMO, 2011]**. Przepisy te odnoszą się do procesu nawigacji morskiej obejmujący następujące fazy: na wodach wewnętrznych, na podejściu i wejściu do portu, na wodach przybrzeżnych (min. dokładność - 10 m, p = 0.95) oraz oceaniczną (min. dokładność - 10 m, p = 0.95) oraz oceaniczną (min. dokładność - 100 m, p = 0.95). Należy dodać, że testowane systemy pozycyjne nie spełniają wielu wymagań w zakresie działalności ludzkiej na morzu, które nie są związane z bezpieczeństwem nawigacji. Należą do nich np. poszukiwanie zasobów, roboty budowlano-inżynieryjne itd. **[U.S. DoD i in., 2017]**. Z punktu widzenia celów rozprawy związanych z zastosowaniami obu systemów w hydrograficznych we wszystkich kategoriach IHO. Natomiast system EGNOS nie spełnia minimalnych wymagań w zakresie pozycjonowania dla kategorii specjalnej zdefiniowanej w standardzie IHO S-44 **[IHO, 2008]**.

3.3. Badania wielosystemowych odbiorników GNSS

3.3.1. Pomiary stacjonarne

Dla oceny możliwości wykorzystania wielosystemowych odbiorników GNSS jako systemów pozycyjnych w hydrografii, zdecydowano się przebadać urządzenia multi-GNSS zamontowane w telefonach komórkowych. Do badań wybrano siedem modeli smartfonów firmy Samsung serii Galaxy S. Szczególnie interesującą cechą tej serii jest to, że wśród nich występują odbiorniki jedno, dwu, trzy i czterosystemowe, stąd z punktu widzenia celu badań próbę należy uznać za w pełni reprezentatywną. Podobnie jak w przypadku poprzednich odbiorników, przeprowadzono rozległe badania stacjonarne i dynamiczne. W pomiarach uczestniczył zespół Katedry Geodezji i Oceanografii UMG oraz dr Tomasz Szot z Zakładu Biomechaniki i Inżynierii Sportowej AWFiS. Autor rozprawy przeprowadził badania odbiorników (wraz z dr Szotem) oraz wykonał pełną analizę statystyczną wyników **[Szot T. i in., 2019]**.

Smartfony stały się na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat nieodzownym elementem codziennego życia rozwiniętych społeczeństw. Dzięki bogatemu wyposażeniu, możliwym do zainstalowania aplikacjom połączonym z dostępem do Internetu, awansowały do miana wielofunkcyjnych urządzeń, które pomagają przetwarzać, przechowywać i rozpowszechniać informacje różnego typu, niezależnie od miejsca i czasu. Ich zwiększające się możliwości spowodowały, że w 2013 r. po raz pierwszy sprzedano ich na świecie więcej, aniżeli telefonów komórkowych innego typu. Według ostatnich globalnych badań posiada je np. 72% osób dorosłych w USA, 67% w Kanadzie, 77% w Australii **[Pew Research Center, 2016]**, a łączna liczba użytkowników sięgnie w 2020 r. blisko 2.9 mld **[Statista, 2017]**. Wiodącymi światowymi sprzedawcami są Samsung oraz Apple, z udziałem po około 18% w światowym rynku **[Gartner, 2017]**.

Bardzo duża grupa aplikacji i rozwiązań jest oparta w całości lub w części o globalne i lokalne systemy nawigacji satelitarnej **[Boulos M.N.K., Yang S.P., 2013; Donaire-Gonzalez D. i in., 2016; Korpilo S. i in., 2017; Wang L. i in., 2013; Wiehe S.E. i in., 2008]**. Najnowsze smartfony, takie jak np. Samsung Galaxy (modele: S5-S8), odbierają nie tylko sygnały

posiadających pełne możliwości operacyjne systemów GPS (USA) i GLONASS (Rosja), ale także będących w trakcie rozbudowy - chińskiego BDS i europejskiego Galileo. Wykorzystanie więcej niż jednego systemu przyspiesza proces wyznaczania pozycji i zwiększa dokładność jej wyznaczenia, co jest o tyle istotne, że brak możliwości uzyskania wysokiej dokładności może w dalszym etapie skutkować błędami m.in. w nawigacji poruszającego się pojazdu, wyznaczaniu drogi lub prędkości osoby podejmującej aktywność fizyczną, turystyczną lub inną **[Rao B., Minakakis L., 2003]**. Producenci telefonów komórkowych zazwyczaj nie informują użytkowników o technicznych aspektach zaimplementowanych układów GNSS. Wiadomo jednak, że należą one do grupy odbiorników autonomicznych, tzn. wyznaczające odległość na podstawie korelacyjnych właściwości kodów pseudoprzypadkowych, w taki sam sposób, jak w popularnych odbiornikach dedykowanych do sportu i rekreacji.

Wspomniana różnorodność rozwiązań multi-GNSS oraz powszechność wykorzystania smartfonów do pozycjonowania skłoniły Autora rozprawy do badania tej grupy urządzeń GNSS pod kątem spełniania wymagań pozycyjnych przewidzianych dla kategorii IHO.

Do analizy porównawczej wybrano pięć smartfonów Samsung serii Galaxy S oznaczonych kolejno numerami: 3 Mini, 4, 5, 6, 7 oraz jeden Galaxy Y. Ich wybrane specyfikacje przedstawia Tab. 3.9. Pierwotnie zamierzano również wykorzystać telefony Galaxy S pierwszej generacji oraz Mini 2, jednakże zrezygnowano z nich, z uwagi na niekontrolowane zaprzestawanie pracy aplikacji.

Wybrane cechy	Seria Samsung Galaxy										
modelu	Y	S3 Mini	S4	S5	S 6	S7					
Numer modelu	GT-S5360	GT-18190N	GT-19505	SM-G900F	SM-G920F	SM-G930					
Wprowadzenie na rynek	2011	2012	2013	2014	2015	2016					
GPS	+	+	+	+	+	+					
GLONASS	-	+	+	+	+	+					
BDS	-	-	-	+	+	+					
RAM	384 MB	1.5 GB	2 GB	2 GB	3 GB	4 GB					

Tab. 3.9. Wybrane parametry testowanych smartfonów Samsung.

W ramach badań przeprowadzono dwie stacjonarne kampanie pomiarowe trwające odpowiednio 24 i 12 h. Jako miejsce pomiarowe wybrano najwyższą kondygnację dachu Narodowego Centrum Żeglarstwa AWFiS Gdańsk, które było pozbawione jakichkolwiek przeszkód terenowych. Na dachu zamontowano specjalnie zaprojektowaną platformę, na której umieszczono w pozycji pionowej telefony komórkowe (Rys. 3.11a). W razie wystąpienia niekorzystnych warunków atmosferycznych (wysoka wilgotność powietrza, mżawka, deszcz itp.) na platformę można było zamontować plastikową pokrywę, która szczelnie łączyła się z jej podstawą (Rys. 3.11b). Wewnątrz znajdowała się listwa zasilająca z podłączonymi do niej ładowarkami telefonów.



Rys. 3.11. Platforma pomiarowa z umieszczonymi na niej telefonami komórkowymi (a) wraz z zamontowaną na niej plastikową pokrywą (b).

Przed przystąpieniem do pomiarów stacjonarnych (po umieszczeniu smartfonów na platformie) niezbędne było precyzyjne wyznaczenie współrzędnych odbiorników GNSS telefonów komórkowych. Centymetrową dokładność wyznaczonych współrzędnych osiągnięto poprzez wykorzystanie satelitarnych i klasycznych geodezyjnych technik pomiarowych. Odstąpiono od rozwiązania kinematycznego (RTK) i sieciowego (RTN). Zamiast niego wykorzystano statyczne pomiary satelitarne do założenia sieci punktów osnowy geodezyjnej oraz tachimetrię do wyznaczenia współrzędnych anten badanych telefonów. W ramach wywiadu terenowego wybrano lokalizację czterech punktów przyszłej geodezyjnej osnowy pomiarowej. Do trwałej stabilizacji użyto bolców stalowych.

Drugim etapem prac pomiarowych było wyznaczenie pozycji telefonów klasyczną techniką tachimetryczną przy użyciu tachimetru elektronicznego Leica TPS 1103. Stanowisko założono metodą przestrzennego wcięcia wstecz polegającej na rejestracji kierunków oraz odległości do punktów o znanych współrzędnych (Rys. 3.12b). W oparciu o zbiór czterech punktów osnowy pomiarowej wyznaczono współrzędne stanowiska z błędami poniżej 0.01 m. Posiadając informacje o pozycji oraz orientacji instrumentu możliwy był pomiar pozycji telefonów oraz określenie ich współrzędnych.



Rys. 3.12. Zakładanie punktu osnowy z wykorzystaniem statycznych pomiarów satelitarnych (a) oraz wyznaczanie współrzędnych stanowiska pomiarowego metodą tachimetryczną (b).

Po wyznaczeniu współrzędnych pozycji odbiorników w telefonach uruchomiono aplikację GPS NMEA oraz usługę lokalizacji. Po włączeniu oprogramowania wybrano opcję "*NMEA Raw Data*" (umożliwiającą rejestrację komunikatów NMEA), a następnie opcję "*Save*" (umożliwiającą zapis pomiarów na kartę pamięci microSD). Pierwsza kampania pomiarowa (24 h) rozpoczęła się o godz. 13:15 (UTC+2:00) dnia 17.07.2017 r. i zakończyła się o godz. 13:15 dnia kolejnego. Natomiast druga, weryfikacyjna sesja pomiarowa (12 h) rozpoczęła się o godz. 21:45 dnia 24.08.2017 r.

Po przeliczeniu współrzędnych geograficznych na współrzędne płaskie oraz wyznaczeniu wysokości normalnych (względem średniego poziomu morza) wyniki poddano opracowaniu statystycznemu. Do tego celu wykorzystano powszechnie stosowane w nawigacji miary dokładności określenia pozycji. Dzięki wyznaczeniu współrzędnych odbiorników GNSS telefonów przedstawione wcześniej miary dokładności określenia pozycji mogły zostać odniesione do wartości rzeczywistych (dokładność przewidywana). Dla oceny wartości statystycznych poszczególnych miar dokładności stworzono arkusz w oprogramowaniu Mathcad 15, który wyznaczał je w sposób automatyczny. Rozkłady współrzędnych badanych smartfonów zaprezentowano względem rzeczywistych wartości pozycji na Rys. 3.13.



Rys. 3.13. Wizualizacja miar *DRMS (2D)* i *2DRMS (2D)* pozycji przewidywanej poszczególnych telefonów.

Wyniki badań prezentuje Rys. 3.14, gdzie przedstawiono dystrybuanty i funkcje gęstości prawdopodobieństwa błędu 2D pozycji przewidywanej poszczególnych telefonów.



Rys. 3.14. Wykresy dystrybuant (po lewej) i funkcji gęstości prawdopodobieństwa (po prawej) błędu 2D pozycji przewidywanej poszczególnych telefonów.

Wyniki badań statycznych jasno wskazują, że część z odbiorników multi-GNSS telefonów Samsung serii Galaxy S (szczególnie modele S4 i S5) może spełniać nawet wymagania w zakresie dokładności określenia pozycji przewidziane dla kategorii specjalnej, natomiast pozostałe modele wymagania niższych kategorii. Należy jednak mieć na względzie, iż pomiary dynamiczne mogą gruntownie zweryfikować tą tezę. Autor celowo nie przedstawił tabelarycznie pełnych wyników otrzymanych miar dokładności w tej części, bowiem uczyni to w podrozdziale, w którym podda je analizie przy użyciu modelu zaproponowanego w rozprawie i zestawi je z wynikami pomiarów dynamicznych.

3.3.2. Pomiary dynamiczne

Pomiary dynamiczne zrealizowano jednocześnie z badaniami odbiorników DGPS i EGNOS, które zostały opisane w podrozdziale 3.2.2, stąd nie będą tu ponownie opisywane. Na jednostce *"Tucana"* poza platformą badawczą DGPS/EGNOS zamontowano drugą platformę pomiarową pozwalającą na umocowanie na niej dziewięciu telefonów komórkowych w ściśle określonych odstępach. Sześć testowanych telefonów umieszczono w płaszczyźnie wertykalnej (typowej przy ich użytkowaniu) w dwóch równoległych rzędach (Rys. 3.15b). Obie platformy zamocowano na górnym pokładzie statku *"Tucana"*. Pierwszą z nich umieszczono w osi konstrukcyjnej jednostki, natomiast drugą zamocowano w rogu pokładu celem minimalizacji przesłaniania sygnałów satelitarnych. Platformy pomiarowe wraz z aparaturą przedstawiono na Rys. 3.15.



Rys. 3.15. Położenie względne platformy pomiarowej referencyjnych odbiorników GNSS (a) oraz platformy pomiarowej telefonów komórkowych (a, b).

Dzięki pomiarowi tachimetrycznemu ustalono zależności geometryczne pomiędzy antenami GNSS odbiorników referencyjnych oraz smartfonów, które przedstawiono na Rys. 3.16.



Rys. 3.16. Horyzontalny schemat rozmieszczenia geometrycznego odbiorników referencyjnych (R_1 , R_2) oraz smartfonów (a) wraz z przykładowym wektorem kierunkowym (b) oraz wartościami przyrostów współrzędnych w statkowym układzie współrzędnych (c).

Do obliczenia współrzędnych odbiorników telefonów Samsung podczas pomiarów dynamicznych wykorzystano państwowy układ współrzędnych prostokątnych płaskich obowiązujący w Polsce (PL-2000), będący modyfikacją 3-stopniowego konforemnego poprzecznego walcowego odwzorowania Gaussa-Krügera elipsoidy obrotowej GRS-80 na płaszczyznę. Wyniki pomiarów współrzędnych wszystkich odbiorników telefonów serii Galaxy poprzez transformację współrzędnych elipsoidalnych *B* i *L* zapisanych w plikach NMEA GGA przeliczono do współrzędnych prostokątnych płaskich $x_{PL-2000}$ i $y_{PL-2000}$. Mierzone wysokości normalne odniesiono do modelu quasi-geoidy EGM2008 (ang. Earth Gravitational Model 2008).

W nawigacji, jak i hydrografii morskiej (2D), do oceny dokładności określenia pozycji stosuje się najczęściej miarę 2DRMS (p = 0.95), która zakłada, że błędy pomiarów podlegają rozkładowi normalnemu. Alternatywnie dopuszczalnym jest wyznaczenie wartości R95 (2D) z próby poprzez określenie wielkości błędu względem której 95% wyników z całej populacji będzie mniejsza. Wyniki wskazują, że odbiorniki GNSS zamontowane w telefonach S6 (2DRMS = 8.32 m) i S7 (2DRMS = 10.54 m) cechuje wyraźnie wyższy błąd określenia współrzędnych niż modele S4 (2DRMS = 6.59 m) i S5 (2DRMS = 6.72 m). Również średni błąd pomiaru wysokości RMS(h) modeli S7 (RMS(h) = 3.46 m) i S6 (RMS(h) = 4.36 m) jest nieznacznie wyższy względem modeli S4 (RMS(h) = 3.36 m) i S5 (RMS(h) = 3.97 m). Ze względu na tematykę pracy, odniesioną jedynie do hydrografii morskiej, wyniki pomiarów 3D nie będą dalej analizowane.

Oceniając pozostałe dwa modele (Y i S3 Mini) należy zauważyć, że wyniki S3 Mini są wysoce obiecujące. Jednakże liczba zarejestrowanych pomiarów (wynosząca 3410) znacznie odbiega od liczebności prób modeli S4, S5, S6 i S7. Z tego względu porównywanie wspomnianych modeli nie wydaje się reprezentatywne.

Należy tu szczególnie podkreślić, że wyniki badania dokładności odbiorników multi-GNSS w pomiarach dynamicznych odbiegają bardzo (na niekorzyść) od pomiarów stacjonarnych, stąd wydaje się, że to one powinny być przyjęte przy ustalaniu możliwości wykorzystania odbiorników multi-GNSS w pomiarach hydrograficznych wg IHO.

Podobnie jak w przypadku pomiarów stacjonarnych, Autor rozprawy zrezygnował z przedstawiania w formie tabelarycznej pełnych wyników otrzymanych miar dokładności w tej części, bowiem uczyni to w podrozdziale, w którym podda je analizie przy użyciu modelu zaproponowanego w rozprawie i zestawi je z wynikami pomiarów stacjonarnych.

3.4. Optymalizacja systemów pozycjonowania w aspekcie kategorii pomiarów hydrograficznych wg wymagań standardu IHO S-44

W podrozdziale 2.3 zaproponowano autorską metodę umożliwiającą ocenę możliwości spełnienia przez dowolny system pozycyjny wymagań poszczególnych kategorii IHO w zakresie dokładności i dostępności. Jej celem było udzielenie odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób badając statystyki błędów pozycji określonego systemu GNSS można ocenić możliwości wypełnienia przez niego wymagań czterech kategorii: specjalnej, 1a, 1b i 2. W tym celu w ramach rozprawy przeprowadzono szereg kampanii pomiarowych dla czterech możliwych do wykorzystania przez bezzałogową jednostkę pływającą systemów

pozycjonowania: DGPS, EGNOS, sieci geodezyjnych GNSS oraz odbiorników wielosystemowych. Badania prowadzono w latach 2014-2018 zarówno w trybie stacjonarnym, jak i dynamicznym. Ze względu na przyjętą w standardzie IHO S-44 miarę dokładności określenia pozycji odniesioną do prawdopodobieństwa 95%, w analizach statystycznych metodami klasycznymi (podrozdziały 3.1, 3.2 i 3.3) przyjęto dokładnie taką wartość. Na potrzeby badań przyjęto, że rozkład statystyczny błędów wyznaczenia pozycji może zostać zaprezentowany za pomocą rozkładu Rayleigha w postaci funkcji gęstości prawdopodobieństwa $h(b;\sigma)$ i dystrybuanty H(b) [Śniegocki H. i in., 2014]:

$$h(b;\sigma) = \frac{b}{\sigma^2} e^{\frac{-b^2}{2\cdot\sigma^2}}, \qquad H(b) = 1 - e^{\frac{-b^2}{2\cdot\sigma^2}}, \qquad (3.19), (3.20)$$

dla $b \in [0,\infty)$, gdzie parametr skali σ jest definiowany jako:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot N} \sum_{i=1}^{N} b_i^2} , \qquad (3.21)$$

gdzie:

N – liczba pomiarów.

Do analiz wykorzystano następujące wybrane kampanie pomiarowe:

- Pomiary stacjonarne systemów DGPS i EGNOS zrealizowano w [Specht M., 2015]:
 - marcu 2006 r. W trakcie tej kampanii zarejestrowano odpowiednio 2 187 842 pomiarów dla systemu DGPS i 1 774 705 dla systemu EGNOS z częstotliwością rejestracji co 1 s.
 - lipcu i w sierpniu 2010 r. W trakcie tej kampanii zarejestrowano odpowiednio 214 842 pomiarów dla systemu DGPS i 2 110 265 dla systemu EGNOS z częstotliwością rejestracji co 1 s.
 - kwietniu i w maju 2014 r. W trakcie tej kampanii zarejestrowano odpowiednio 951 698 pomiarów dla systemu DGPS i 927 553 dla systemu EGNOS z częstotliwością rejestracji co 1 s.
- Pomiary dynamiczne systemów DGPS i EGNOS zrealizowano podczas manewrowania jednostki morskiej na akwenie Zatoki Gdańskiej w dniu 20 czerwca 2017 r. W ramach badań wykorzystano dwa odbiorniki: Simrad MXB5 (DGPS) i Trimble GA530 (EGNOS), które równolegle rejestrowały swoje współrzędne pozycji. Następnie uzyskane wartości porównano ze wskazaniami precyzyjnych odbiorników geodezyjnych GNSS (Trimble R10) wykorzystujących poprawki z aktywnej sieci geodezyjnej, zapewniającej dokładność na poziomie 2-3 cm (p = 0.95). Podczas 4-godzinnej sesji pomiarowej określono statystyki dokładnościowe wspomnianych systemów w oparciu o ok. 11 500 wyznaczeń pozycji [Specht C. i in., 2019b].

W Tab. 3.10 przedstawiono wybrane wyniki analizy statystycznej w zakresie dokładności określenia pozycji systemów DGPS i EGNOS w trakcie stacjonarnej i dynamicznej kampanii pomiarowej.

Tab. 3.10. Statystyki błędów pozycji przewidywanej systemów DGPS i EGNOS w trakcie stacjonarnej (S) i dynamicznej (D) kampanii pomiarowej.

Miara błędu pozycji	DGPS 2014 (S)	EGNOS 2014 (S)	DGPS 2017 (D)	EGNOS 2017 (D)
Liczba pomiarów	951 698	927 553	11 751	11 698
2DRMS (2D)	0.96 m	3.27 m	1.48 m	2.39 m
R95 (2D)	0.83 m	2.31 m	1.42 m	1.79 m

 Pomiary stacjonarne systemów multi-GNSS na przykładzie telefonów Samsung serii Galaxy S, zrealizowano na dachu budynku Narodowego Centrum Żeglarstwa AWFiS Gdańsk w dniach 17 lipca i 24 sierpnia 2017 r. Do badań wykorzystano modele: S2, S3 Mini, S4, S5, S6, S7 oraz Y, których współrzędne (anten) wyznaczono metodami geodezyjnymi i z ich wykorzystaniem przeprowadzono całodobową (właściwą) i 12-godzinną (sprawdzającą) kampanię pomiarową polegająca na równoległym rejestrowaniu wyznaczonych współrzędnych GNSS przez wszystkie telefony. Podczas właściwej sesji pomiarowej zarejestrowano od 71 438 do 86 371 wyznaczeń pozycji w zależności od modelu smartfonu, natomiast w trakcie sprawdzającej kampanii pomiarowej niemal dwukrotnie mniej (31 835-43 185) [Szot T. i in., 2019].

W Tab. 3.11 i 3.12 przedstawiono wybrane wyniki analizy statystycznej w zakresie dokładności określenia pozycji odbiorników multi-GNSS w trakcie stacjonarnych kampanii pomiarowych.

Tab. 3.11. Statystyki błędów pozycji przewidywanej telefonów Samsung Galaxy w trakcie 24-godzinnej, stacjonarnej kampanii pomiarowej.

Miara bładu nanusii		Samsung									
ivilara biędu pozycji	Y	S3 Mini	S4	S5	S6	S7					
Liczba pomiarów	73 699	71 438	86 290	86 346	86 371	86 355					
2DRMS (2D)	5.61 m	6.79 m	2.04 m	2.06 m	13.69 m	8.93 m					
R95 (2D)	4.93 m	3.76 m	1.65 m	1.76 m	12.64 m	8.39 m					

Tab. 3.12. Statystyki błędów pozycji przewidywanej telefonów Samsung Galaxy w trakcie 12-godzinnej, stacjonarnej kampanii pomiarowej.

Miara bładu nanusii		Samsung									
ivilara biędu pozycji	Y	S3 Mini	S4	S5	\$6	S7					
Liczba pomiarów	43 013	37 771	43 159	43 181	43 185	31 835					
2DRMS (2D)	4.68 m	3.39 m	2.70 m	4.98 m	15.90 m	12.29 m					
R95 (2D)	4.42 m	2.79 m	1.86 m	4.97 m	17.88 m	12.94 m					

• Pomiary dynamiczne systemów multi-GNSS na przykładzie telefonów Samsung serii Galaxy S, zrealizowano podczas manewrowania jednostki morskiej na akwenie Zatoki Gdańskiej w dniu 20 czerwca 2017 r. Do analizy porównawczej wybrano pięć smartfonów Samsung serii Galaxy S oznaczonych kolejno numerami: 3 Mini, 4, 5, 6, 7 oraz jeden Galaxy Y. W ramach prowadzonych badań porównano współrzędne pozycji, które były rejestrowane równolegle przez odbiorniki GNSS telefonów Samsung ze wskazaniami precyzyjnych odbiorników geodezyjnych GNSS wykorzystujących poprawki z aktywnej sieci geodezyjnej, zapewniającej dokładność na poziomie 2-3 cm (p = 0.95). W wyniku 4-godzinnego pomiaru określono statystyki dokładnościowe dla każdego z omawianych modeli telefonów w oparciu o ok. 10 000 wyznaczeń pozycji **[Specht C. i in., 2019a]**.

Badania telefonów w pomiarach dynamicznych prezentuje poniższa Tab. 3.13.

Tab. 3.13. Statystyki błędów pozycji przewidywanej telefonów Samsung Galaxy w trakcie dynamicznej kampanii pomiarowej.

Miara błodu pozwcii			Sam	sung		
wilara biędu pozycji	Y	S3 Mini	S4	S5	S6	S7
Liczba pomiarów	6 041	3 410	10 950	10 939	10 906	10 926
2DRMS (2D)	9.47 m	5.23 m	6.59 m	6.72 m	8.32 m	10.54 m
R95 (2D)	6.84 m	3.67 m	5.80 m	5.77 m	9.38 m	9.62 m

Należy podkreślić, że zaprezentowane w tabelach wyniki systemów: DGPS, EGNOS, multi-GNSS i RTN odnoszą się do poziomu ufności 0.95 i otrzymano je dwoma metodami: poprzez wyznaczenie odchylenia standardowego, przy założeniu rozkładu normalnego błędów oraz poprzez sortowanie błędów od wartości najmniejszej do największej.

Zaproponowana w podrozdziale 2.3 metoda oceny dostępności systemów GNSS (DGPS, EGNOS, multi-GNSS i RTN) została zweryfikowana w oparciu o te same dane, których zestawienie wyników przedstawiono powyżej. W dalszej części prezentowane będą wyniki modelu niezawodnościowego.

Model ten prezentuje wartości graniczne dostępności (D_{exp}) , lecz uzupełniono go również o zależności na wartości graniczne niezawodności $(N_{exp}(t,\tau))$ i ciągłości $(C_{exp}(t,\tau))$ w oparciu o następujące wzory **[Specht C., 2003]**, przy założeniu rozkładu wykładniczego czasów pracy i awarii:

$$D_{\exp} = \frac{\frac{1}{\lambda}}{\frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda},$$
(3.22)

$$\lim_{t \to \infty} N_{\exp}(t,\tau) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \cdot e^{-\lambda \tau}, \qquad (3.23)$$

$$\lim_{t \to \infty} C_{\exp}(t,\tau) = e^{-\lambda\tau} .$$
(3.24)

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych prezentują dwie tabele odnoszące się do pomiarów stacjonarnych (Tab. 3.14) i dynamicznych (Tab. 3.15). W tabelach umieszczono wszystkie wyniki badań wykonanych systemami: DGPS, EGNOS, multi-GNSS i RTN.

Dla każdej kategorii pomiarów hydrograficznych (charakteryzujących się różnymi dopuszczalnymi błędami pozycji) obliczono wartość dostępności jaką może zapewnić ten system. Do obliczeń przyjęto te same dane pomiarowe, które wykorzystano w modelu klasycznym, lecz w przeciwieństwie do niego wyznaczano wartość graniczną dostępności, niezawodności i ciągłości. W modelu klasycznym poziom ufności wynosił 95%. Na Rys. 3.17 przedstawiono przykład objaśniający sposób obliczania wyników, na którym zaprezentowano trzy funkcje dostępności: D1(t), D2(t), D3(t) oraz ich wartości graniczne: D1, D2, D3.

Odpowiadają one czterem kategoriom IHO: specjalnej, 1a, 1b i 2. Należy dodać, że kategorię 1a i 1b połączono ze względu na identyczne wymagania.



Rys. 3.17. Funkcje dostępności: *D1(t)*, *D2(t)*, *D3(t)* oraz ich wartości graniczne: *D1*, *D2*, *D3*. Odpowiadają one czterem kategoriom IHO: specjalnej (kolor czerwony), 1a/1b (kolor niebieski) i 2 (kolor brązowy).

W prezentowanych poniżej tabelach poza wynikami badań symulacyjnych, zaznaczono kolorem niebieskim te rozwiązania GNSS, które spełniają wymagania poszczególnych kategorii IHO. Natomiast kolorem czerwonym wskazano te systemy, które nie spełniają standardu IHO S-44 w odniesieniu do analizowanej kategorii.

Tab. 3.14. Wartości graniczne dostępności, niezawodności i ciągłość obliczone na podstawie rzeczywistych pomiarów stacjonarnych systemów: DGPS, EGNOS, multi-GNSS i RTN przy użyciu modelu niezawodnościowego.

Del	Svatam	Kategoria specjalna		Kategoria 1 i 1a			Kategoria 2			
ROK	System	Dostepność	Niezawodność	Ciągłość	Dostepność	Niezawodność	Ciągłość	Dostepność	Niezawodność	Ciągłość
2014	DGPS	99.76	99.76	99.99	100	100	100	100	100	100
2014	EGNOS	89.11	88.98	99.85	100	100	100	100	100	100
2017	Samsung Galaxy Y	54.88	54.87	99.98	99.39	99.38	99.99	100	100	100
2017	Samsung Galaxy S3 Mini	14.39	14.39	99.96	99.16	99.15	99.99	100	100	100
2017	Samsung Galaxy S4	95.70	95.68	99.82	99.98	99.97	99.98	100	100	100
2017	Samsung Galaxy S5	96.36	96.34	99.98	100	100	100	100	100	100
2017	Samsung Galaxy S6	14.99	13.72	91.52	58.82	57.53	97.80	97.54	97.52	99.97
2017	Samsung Galaxy S7	25.35	23.14	91.29	75.38	73.92	98.06	99.76	99.75	99.99
2017	Sieć GNSS (Rozewie)	100	100	100	100	100	100	100	100	100



Dak	Sustam	Kategoria specjalna		Kategoria 1 i 1a			Kategoria 2			
ROK	System	Dostepność	Niezawodność	Ciągłość	Dostepność	Niezawodność	Ciągłość	Dostepność	Niezawodność	Ciągłość
2017	DGPS	98.09	97.94	99.84	100	100	100	100	100	100
2017	EGNOS	97.52	97.19	99.65	100	100	100	100	100	100
2017	Samsung Galaxy Y	30.73	19.87	64.67	66.02	58.68	88.88	100	100	100
2017	Samsung Galaxy S3 Mini	25.52	24.01	94.06	97.85	97.67	99.82	100	100	100
2017	Samsung Galaxy S4	28.67	25.36	88.46	88.68	86.92	98.01	100	100	100
2017	Samsung Galaxy S5	27.92	23.98	85.88	88.28	86.06	97.48	100	100	100
2017	Samsung Galaxy S6	45.92	40.69	88.60	87.70	86.40	98.50	99.45	99.36	99.91
2017	Samsung Galaxy S7	20.84	18.35	87.62	74.21	71.95	96.94	98.67	98.56	99.88
2017	Sieć GNSS (Gdańsk)	88.77	86.52	97.46	97.35	96.72	99.35	100	100	100
2017	Sieć GNSS (Gdynia)	99.85	99.81	99.95	100	100	100	100	100	100
2017	Sieć GNSS (Hel)	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Porównanie wyników badań odbiorników systemów DGPS i EGNOS w pomiarach stacjonarnych, jak i dynamicznych jasno dowodzi, że oba te systemy spełniają wszystkie wymagania przewidziane dla kategorii IHO i zdaniem Autora rozprawy powinny być stosowane podczas realizacji sondaży hydrograficznych. Porównując oba rozwiązania należy stwierdzić, że system DGPS zapewnia nieznacznie większe dokładności niż system EGNOS. Skomentowania wymaga jedynie wynik dostępności systemu EGNOS z Tab. 3.14, który podczas pomiarów stacjonarnych wyniósł 89.11%, nie osiągając wartości minimalnej (95%). Zdaniem Autora prezentowane wieloletnie badania dowodzą, że system ten poprawia z roku na rok swoje charakterystyki pozycyjne, co dowodzą badania z 2014 r., stąd wykorzystanie go w hydrografii morskiej będzie niebawem możliwe dla wszystkich kategorii IHO.

Badania stacjonarne i dynamiczne potwierdziły, że osiągane przez systemy RTN dokładności zdecydowanie spełniają wszystkie wymagania przewidziane dla kategorii IHO. Jednakże pomiary basenu portowego w Gdańsku na rzece Motława potwierdziły, że w przypadku wystąpienia gęstej zabudowy portowej pojawiają się wciąż spadki liczby śledzonych satelitów. Oczywistym jest, że spadki te będą dotyczyć również systemów DGPS i EGNOS.

Najbardziej nieoczekiwane wyniki odnotowano dla urządzeń multi-GNSS, gdzie różnice w uzyskanych wartościach granicznych sięgają nawet kilkudziesięciu procent. Nie ulega wątpliwości, że dokładność określenia pozycji przez odbiornik smartfonu nie jest ściśle zależna od tego, czy jest to najnowszy, czy tańszy model. W przypadku telefonów serii Galaxy S najlepszymi urządzeniami okazały się modele S4 i S5 (posiadające dwusystemowe moduły GPS/GLONASS), gdzie odbiornik nie jest zintegrowany z kartą innych urządzeń, a wykonany został przez producenta o światowej renomie. Nie budzi wątpliwości, że wszystkie smartfony nadawałyby się do zabezpieczenia pozycjonowania prac sondażowych zgodnie z kategorią 2. Poza tym telefony: S3 Mini, S4 i S5 mogą zapewnić realizację pomiarów hydrograficznych z wymaganiami przewidzianymi dla kategorii 1a i 1b, gdy systemy BDS i Galileo osiągną fazę pełnej zdolności operacyjnej.

Zbiorcze zestawienie wyników, pozwalające na łatwiejszą czytelność badanych odbiorników w pomiarach stacjonarnych i dynamicznych zaprezentowano na Rys. 3.18 i 3.19.



Rys. 3.18. Zbiorcze zestawienie wyników badanych rozwiązań GNSS w pomiarach stacjonarnych.



Rys. 3.19. Zbiorcze zestawienie wyników badanych rozwiązań GNSS w pomiarach dynamicznych.

4. Pomiarowe wyznaczanie przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego

4.1. Wyznaczanie przebiegu linii podstawowej metodą geodezyjną (klasyczną)

4.1.1. Planowanie i realizacja pomiarów

Metoda geodezyjna, wykorzystująca systemy GNSS, została wprowadzona do badań hydrograficznych w Polsce przez prof. Stanisława Kołaczyńskiego [Czaplewski K. i in., 2000; Czaplewski K., Specht C., 2002] i polegała na wchodzeniu mierniczego w toń morską na zadaną głębokość. W ramach rozprawy podjęto próbę ponownego zastosowania tej metody, jednakże dysponowano odbiornikami wykorzystującymi nie jeden (GPS), a wiele systemów GNSS. Ponadto skorzystano z dokładnego modelu quasi-geoidy, który był jednym z głównych problemów badań zespołu prof. Kołaczyńskiego oraz nie napotkano problemów związanych z ograniczeniem zasięgu sygnału referencyjnego do 2-3 km odległości od stacji odniesienia. Pomiary wyznaczania przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego metodą tradycyjną (geodezyjną) realizowano w rozprawie na akwenie Zatoki Gdańskiej. Obszar testowy obejmował akwen przyległy do plaży miejskiej w Gdyni - w pobliżu basenu jachtowego. Badania odbyły się dnia 23.06.2016 r. w godzinach: 8:30-18:00 oraz dnia 19.07.2018 r. w godzinach: 11:00-14:00. Głównym czynnikiem determinującym czas realizacji pomiarów były warunki hydrometeorologiczne panujące na badanym obszarze. Dlatego też pomiary zrealizowano podczas stanu morza 0, przy bezwietrznej pogodzie. W tym celu do określenia przewidywanych warunków pogodowych posłużono się krótkoterminowymi prognozami meteorologicznymi, których zasoby są udostępniane w sieci przez IMGW (<u>http://www.pogodynka.pl/</u>).

Przed rozpoczęciem badań, w celu równomiernego rozmieszczenia punktów pomiarowych na badanym obszarze, zaplanowano profile sondażowe, po których docelowo miała poruszać się osoba wykonująca pomiar przy użyciu odbiornika GNSS zamontowanego na tyczce geodezyjnej. W tym celu wyznaczono 40 podstawowych profili pomiarowych, które były rozmieszczone prostopadle do kierunku przebiegu linii brzegowej (Rys. 4.1). Dodatkowo podczas planowania tego sondażu przyjęto założenie, że odległość miedzy profilami będzie wynosić ok. 10 m **[Kierzkowski W., 1984a]**. Ze względu na nieliniowy przebieg linii brzegowej profile podzielono na 4 sekcje prostopadłe do brzegu.



Rys. 4.1. Układ profili sondażowych przy wyznaczaniu linii podstawowej morza terytorialnego na akwenie przyległym do plaży miejskiej w Gdyni.

W latach 2016 i 2018 r. zrealizowano dwie kampanie pomiarowe, których celem było wyznaczenie przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego metodą geodezyjną przy użyciu odbiornika GNSS. Podczas pierwszej z nich zrealizowanej dnia 23.06.2016 r. pomiarów ukształtowania dna morskiego dokonano na następujących głębokościach: 0 (granica wody z lądem), 20, 40, 60, 79 (linia podstawowa), 100 cm, które zaznaczono na tyczce geodezyjnej (Rys. 4.2). W sposób analogiczny, jak w przypadku pierwszej serii badań, zrealizowano pomiary batymetryczne akwenu w trakcie drugiej kampanii pomiarowej. W analizowanych okresach stan wody na stacji wodowskazowej w Gdyni pokazywał 494 cm (dnia 23.06.2016 r.) i 511 cm (dnia 19.07.2018 r.) względem zera wodowskazu w Kronsztadzie. W oparciu o te dane można było obliczyć głębokości, na których w momencie pomiarów znajdowała się linia podstawowa (d_{IP}).



Rys. 4.2. Tyczka geodezyjna wraz z zaznaczonymi na niej głębokościami przy użyciu taśmy samoprzylepnej oraz samodzielnie skonstruowaną nakładką na jej ostrzu.

Pomiaru poszczególnych głębokości dokonywano na 40 profilach, które zostały wyznaczone w trakcie kampanii pomiarowej z 2016 r. **[Specht C. i in., 2017c]**. Ze względu na to, że podczas pierwszej serii badań osoba wykonująca pomiary linii podstawowej wzdłuż 400-metrowego odcinka plaży realizowała je przez blisko 10 godzin, to w trakcie drugiej kampanii pomiarowej postanowiono przyśpieszyć czas realizacji badań poprzez zwiększenie liczby członków w zespole do dwóch osób. Podczas pomiarów użyto dwóch rodzajów odbiorników GNSS: Leica GS15, który wykorzystywał stację sieci geodezyjnej SmartNet zlokalizowaną w Gdańsku (GDAN) oraz Trimble R10, który pracował w oparciu o stację sieci geodezyjnej VRSNet.pl usytuowaną również w Gdańsku (GDSK). Oba odbiorniki posiadały funkcję tyczenia punktów na linii metodą RTK i dzięki temu można było dokonywać pomiaru punktów wzdłuż pomierzonych w 2016 r. 40 profili sondażowych **[Specht C. i in., 2017c; Specht M., Specht C., 2018a]**.

Podczas pierwszej kampanii pomiarowej zarejestrowano 313 punktów, natomiast w trakcie drugiej serii badań zmierzono 477 punktów (Rys. 4.3).



Rys. 4.3. Pomiar linii podstawowej morza terytorialnego realizowany przez osobę nr 1 (po lewej) oraz zarejestrowane punkty pomiarowe z podziałem na osoby wykonujące badania (po prawej) metodą geodezyjną podczas drugiej kampanii pomiarowej.

Do opracowania wyników wykorzystano geodezyjne oprogramowanie TBC, które jest powszechnie stosowane do przetwarzania danych pomiarowych tzw. post-processingu.

4.1.2. Opracowanie danych pomiarowych

Parametry przetwarzania danych pomiarowych oraz odwzorowania zaprezentowano w Tab. 4.1. Wykorzystano m.in. walcowe wiernokątne poprzeczne odwzorowanie Gaussa-Krügera, układ PL-2000 (narodowy system współrzędnych stosowany w Polsce), układ wysokościowy Kronsztad 86 oraz model quasi-geoidy PL-geoid-2011.

Tab. 4.1. Raport z przetwarzania danych podczas pomiarów linii podstawowej morza terytorialnego na akwenie przyległym do plaży miejskiej w Gdyni.

Kraj	Polska
Układ/strefa	2000/18
Elipsoida odniesienia	WGS-84
Duża półoś elipsoidy	6378137
Spłaszczenie elipsoidy	0.00335281067183
Typ odwzorowania	Gaussa-Krügera
Równoleżnik osiowy	0
Południk osiowy	18
Punkt główny X	0
Punkt główny Y	6 500 000
Skala w punkcie	0 000022
głównym	0:555523
Azymut	Na północ
Orientacja siatki	Rosnąca północ-wschód
Transformacja	Geoida
wysokościowa	Geolua
Model geoidy	Geoida_PL_2011
Układ odniesienia	Kronsztad

W oparciu o dane pomiarowe z 2016 i 2018 r. opracowano numeryczne modele terenu (ang. Digital Terrain Models – DTMs) w postaci nieregularnych siatek trójkątów (ang. Triangulated Irregular Networks – TINs) (Rys. 4.4). Model TIN powstaje w wyniku triangulacji punktów głębokości spełniającej warunek Delaunaya, mówiący o tym, że okrąg wyznaczony przez trzy wierzchołki trójkąta nie może zawierać innych punktów interpolacyjnych. Wierzchołki trójkątów stanowią punkty o znanych współrzędnych. Triangulacja Delaunaya oparta jest na wielobokach Thiessena lub diagramach Voronoi posiadających tę własność, że każdy punkty położony wewnątrz wieloboku ma najbliżej do punktu węzłowego, który w kolejnym etapie przetwarzania stanowi wierzchołek trójkąta **[Jingsheng Z., Yi L., 2005; Peters R. i in., 2014; Sui H. i in., 2005]**. Model TIN obok modelu GRID, B-splines, NURBS zalicza się do najczęściej stosowanych metod modelowania powierzchni dna w hydrografii **[Lihua Z. i in., 2013; Makar A., 2016; Sassais R., Makar A., 2011]**.



Rys. 4.4. Numeryczne modele dna akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni pozyskane metodą geodezyjną w 2016 (a) i 2018 r. (b).

Aby dokonać analizy zmian batymetrii utworzono na podstawie modeli DTM siatkę wysokości o kwadracie bazowym 1 x 1 m. Dzięki niej można było porównać jak zmieniła się wysokość normalna (H) punktu w przeciągu ostatnich dwóch lat. Do stworzenia siatki wysokości wykorzystano narzędzie do tworzenia powierzchni i siatki wysokości. Funkcja ta wykorzystuje wygenerowany model DTM i na jego podstawie interpoluje wysokość punktu P_p powierzchni terenowej, którego rzut P_p' na płaszczyznę poziomą leży w trójkącie $P_A'P_B'P_C'$ (Rys. 4.5).



Rys. 4.5. Ilustracja wyznaczania wysokości punktu w nieregularnej siatce trójkątów.

Wysokość punktu P_p określono wzorem:

$$H_{P_{P}} = \frac{H_{P_{A}} \cdot S_{P_{A}} + H_{P_{B}} \cdot S_{P_{B}} + H_{P_{C}} \cdot S_{P_{C}}}{S_{P_{A}} + S_{P_{B}} + S_{P_{C}}},$$
(4.1)

gdzie:

 $H_{P_A}, H_{P_B}, H_{P_C}$ – wysokości normalne trójkąta $P_A 'P_B 'P_C '$, $S_{P_A}, S_{P_B}, S_{P_C}$ – pola powierzchni przeciwległych trójkątów, powstających przez podział trójkąta $P_A 'P_B 'P_C '$ odcinkami łączącymi wierzchołki tego trójkąta z punktem $P_p '$.

Do wyznaczenia pól powierzchni trójkątów $(S_{P_A}, S_{P_B}, S_{P_C})$ wykorzystano wzór Herona. Pozwala on na obliczenie pola trójkąta jeśli znane są długości jego boków. W związku z tym, że podane są współrzędne wierzchołków trójkąta $P_A P_B P_C$ oraz współrzędne płaskie prostokątne punktu P_P , to na ich podstawie możliwe jest określenie pól powierzchni składowych trójkątów. Wzór Herona można zapisać następująco:

$$r = \frac{D_A + D_B + D_C}{2},$$
 (4.2)

$$S_{C} = \sqrt{r \cdot (r - D_{A}) \cdot (r - D_{B}) \cdot (r - D_{C})}, \qquad (4.3)$$

gdzie:

r – połowa obwodu trójkąta $P_{A}'P_{B}'P_{C}'$.

 $D_{\!\scriptscriptstyle A}, D_{\!\scriptscriptstyle B}, D_{\!\scriptscriptstyle C}$ – długości boków trójkąta $P_{\!\scriptscriptstyle A}\,'P_{\!\scriptscriptstyle B}\,'P_{\!\scriptscriptstyle C}\,'.$

W wyniku utworzenia siatki wysokości 1 x 1 m otrzymano 25 244 punktów dla modelu z 2016 r. i 21 561 punktów dla modelu z 2018 r., które w dalszej kolejności posłużyły do obliczenia różnic wysokości normalnych w tych samych punktach $(\Delta H_{2018-2016})$. W celu określenia zmienności czasowo-przestrzennej ukształtowania dna morskiego akwenu porównywano wyłącznie te pary punktów (o tych samych współrzędnych płaskich

prostokątnych na obu DTM-ach), dla których mogły zostać obliczone wysokości normalne. Na badanym terenie znajdowało się 21 322 takich par punktów.

W kolejnym etapie prac stworzono model DTM (ponownie wykorzystując model triangulacyjny) przedstawiający różnice wysokości normalnych między punktami o tych samych współrzędnych prostokątnych płaskich $(X_{PL-2000}, Y_{PL-2000})$. Do wyznaczenia $\Delta H_{2018-2016}$ wykorzystano poniższy wzór:

$$\Delta H_{2018-2016} = H_{2018} - H_{2016}, \qquad (4.4)$$

gdzie:

 H_{2016}, H_{2018} – wysokości normalne punktu na DTM-ach powstałych na podstawie danych pozyskanych metodą geodezyjną odpowiednio w 2016 i 2018 r.

Po wygenerowaniu numerycznego modelu dna wykorzystano narzędzie do tworzenia warstwic, w celu naniesienia na DTM izobat o następujących głębokościach: -60 cm, -40 cm, -20 cm, 0 cm, 20 cm, 40 cm (Rys. 4.6). Należy dodać, że wyznaczone, stałe wartości głębokości zostały zaprezentowane w postaci gładkich krzywych przy użyciu metody splajnów.



Rys. 4.6. Różnice wysokości między modelami DTM powstałymi na podstawie danych pozyskanych metodą geodezyjną w 2016 i 2018 r.

Na podstawie pozyskanych danych można zauważyć, że największa zmienność ukształtowania dna morskiego akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni występuje wzdłuż linii brzegowej. Różnice wysokości normalnych osiągają tam wartości od -60 do -20 cm (Rys. 4.6). W związku z tym, że wysokości normalne pozyskane metodą geodezyjną w 2016 r. odejmowano od tych pomierzonych w 2018 r., to można stwierdzić, że linia brzegowa akwenu przesunęła się w głąb lądu, zmniejszając tym samym powierzchnię plaży miejskiej w Gdyni. Natomiast jeśli chodzi o pozostały obszar akwenu (nieprzylegający bezpośrednio do linii brzegowej), to można zauważyć, że zmienność rzeźby dna morskiego w tym rejonie jest dosyć zróżnicowana i waha się w granicach od -30 do 30 cm, niezależnie od odległości do linii brzegowej. W celu dokonania analizy statystycznej zmian batymetrii akwen podzielono na 12 obszarów według przewyższenia co 10 cm (Tab. 4.2).

Przewyższenie minimalne (m)	Przewyższenie maksymalne (m)	Rzeczywisty obszar powierzchni (m²)	Procent pola powierzchni całkowitej (%)
-0.605	-0.600	2.3	0.01
-0.600	-0.500	172.7	0.82
-0.500	-0.400	709.6	3.37
-0.400	-0.300	1227.9	5.83
-0.300	-0.200	2317.9	11.00
-0.200	-0.100	3182.2	15.10
-0.100	0.000	3587.1	17.02
0.000	0.100	4511.0	21.41
0.100	0.200	3964.3	18.81
0.200	0.300	1128.5	5.36
0.300	0.400	254.6	1.21
0.400	0.438	12.7	0.06
		Pc = 21070.7 m ²	

Tab. 4.2. Podział powierzchni akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni ze względu na różnice wysokości między modelami DTM z 2016 i 2018 r.

Z Tab. 4.2 wynika, że dla niemal 2/3 pola powierzchni terenu (64.53%) wysokość zmieniła się nieznacznie do 20 cm, natomiast dla blisko 90% pola powierzchni terenu do 30 cm. Dla pozostałej części akwenu (11.3% pola powierzchni całkowitej) zmiany wysokości normalnych wyniosły ponad 30 cm, przy czym większość tego obszaru znajdowała się wzdłuż brzegu. Oprócz podziału powierzchni akwenu ze względu na różnice wysokości między DTM-ami dokonano również analizy zmiany jego objętości (Tab. 4.3).

Tab. 4.3. Zmiany objętości akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni z podziałem na różnice wysokości między modelami DTM.

Przewyższenie minimalne	Przewyższenie maksymalne	Objętość wykopu	Procent całkowitej objętości wykopu	Objętość nasypu	Procent całkowitej objętości nasypu
(m)	(m)	(m³)	(%)	(m³)	(%)
-0.605	-0.600	0	0	0	0
-0.600	-0.500	7.4	0.97	0	0
-0.500	-0.400	47.7	6.28	0	0
-0.400	-0.300	133.1	17.54	1.4	0.08
-0.300	-0.200	211.4	27.85	39.7	2.34
-0.200	-0.100	207.8	27.38	230.3	13.58
-0.100	0.000	117.1	15.43	467.4	27.57
0.000	0.100	34.4	4.53	578.5	34.12
0.100	0.200	0.1	0.01	293.9	17.34
0.200	0.300	0	0	75.7	4.47
0.300	0.400	0	0	8.2	0.48
0.400	0.438	0	0	0.2	0.01
		Vcw =		Vcn =	
		759.1 m ³		1695.2 m ³	

Z Tab. 4.3 wynika, że na obszarze o powierzchni wynoszącej 21070.7 m² przybyło 1695.2 m³ oraz ubyło 759.1 m³ piasku (plaża miejska w Gdyni ma dno piaszczyste) w przeciągu ostatnich dwóch lat. Jeśli dokona się bilansu mas ziemnych, czyli różnicy między ogólną objętością wykopów a ogólną objętością nasypów, to na jej podstawie można stwierdzić, że na badanym akwenie przybyło 936.1 m³ piasku. Jest to stosunkowo niewiele, ponieważ gdyby równomiernie rozsypać naddatek piasku na całym obszarze, to dno akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni podniosłoby się średnio o 4 cm.

Kolejnym elementem analiz była ocena zmienności przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego w przeciągu ostatnich dwóch lat. Jako miarę oceny zmian wewnętrznej granicy morza terytorialnego przyjęto odległość linii podstawowej od linii brzegowej. W związku z tym, że w analizowanym okresie linia brzegowa przesunęła się o kilka metrów w głąb lądu, to w pierwszej kolejności postanowiono wyznaczyć linię odniesienia, na podstawie której obliczano odległości do linii podstawowych. Do jej określenia wykorzystano współrzędne punktów pomierzonych wzdłuż linii brzegowej w trakcie badań przeprowadzonych w 2016 i 2018 r. Następnie na podstawie pozyskanych danych wyliczono metodą najmniejszych kwadratów współczynniki regresji liniowej (linii odniesienia) za pomocą poniższych wzorów:

$$b_{LO} = \frac{\sum (X_{LB} \cdot Y_{LB}) - N_{LB} \cdot \overline{X}_{LB} \cdot \overline{Y}_{LB}}{\sum Y_{LB}^2 - N_{LB} \cdot \overline{Y}_{LB}^2}, \qquad (4.5)$$

$$a_{LO} = \overline{X}_{LB} - b_{LO} \cdot \overline{Y}_{LB}, \qquad (4.6)$$

gdzie:

 X_{LB}, Y_{LB} – współrzędne płaskie prostokątne PL-2000 punktów pomierzonych wzdłuż linii brzegowej w trakcie badań przeprowadzonych w 2016 i 2018 r.,

 $N_{\rm LB}$ – liczba punktów pomierzonych wzdłuż linii brzegowej w trakcie badań przeprowadzonych w 2016 i 2018 r.,

 $X_{\rm LB}$ – średnia arytmetyczna współrzędnych północnych punktów pomierzonych wzdłuż linii brzegowej w trakcie badań przeprowadzonych w 2016 i 2018 r.,

 \overline{Y}_{LB} – średnia arytmetyczna współrzędnych wschodnich punktów pomierzonych wzdłuż linii brzegowej w trakcie badań przeprowadzonych w 2016 i 2018 r.

Przy czym linia odniesienia ma postać:

$$X_{LO} = b_{LO} \cdot Y_{LO} + a_{LO}, \tag{4.7}$$

gdzie:

 X_{LO}, Y_{LO} – współrzędne płaskie prostokątne PL-2000 punktów wyznaczających linię odniesienia.

Po wyznaczeniu linii odniesienia, przystąpiono do obliczenia odległości od aproksymowanej linii do linii podstawowych. W celu ich określenia poprowadzono proste prostopadłe do linii odniesienia, które można zapisać za pomocą wzoru:

$$X_{PP_{j}} = -\frac{1}{b_{LO}} \cdot Y_{PP_{j}} + a_{LO_{j}}, \qquad (4.8)$$

gdzie:

 X_{PP_j}, Y_{PP_j} – współrzędne płaskie prostokątne PL-2000 punktów wyznaczających j-tą prostą prostopadłą poprowadzoną do linii odniesiona,

j – numeracja prostych prostopadłych rosnąca w kierunku południowym.

We wzorze (4.8) nie podano wartości liczbowej parametru a_{LO_j} , ponieważ jest on uzależniony od wzajemnej odległości między kolejnymi prostymi prostopadłymi. Dla potrzeb niniejszej pracy przyjęto założenie, że wspomniana odległość będzie wynosiła 1 m.

Odległości między linią odniesienia a linią podstawową (o_j) obliczano na podstawie współrzędnych punktów przecięcia tych linii z prostą prostopadłą poprowadzoną do linii odniesienia (Rys. 4.7):

$$o_{j} = \sqrt{\left(X_{LO_{j}} - X_{LP_{j}}\right)^{2} + \left(Y_{LO_{j}} - Y_{LP_{j}}\right)^{2}}, \qquad (4.9)$$

gdzie:

 X_{LO_j}, Y_{LO_j} – współrzędne płaskie prostokątne PL-2000 punktów przecięcia linii odniesienia z j-tą prostą prostopadłą poprowadzoną do niej,

 X_{LP_j}, Y_{LP_j} – współrzędne płaskie prostokątne PL-2000 punktów przecięcia linii podstawowej z j-tą prostą prostopadłą poprowadzoną do linii odniesienia.



Rys. 4.7. Graficzny sposób wyznaczania odległości od linii odniesienia do linii podstawowej.

W przypadku gdy prosta prostopadła przecięła linię podstawową w więcej niż jednym punkcie (Rys. 4.8), to w pierwszej kolejności uśredniano współrzędne punktów przecięcia tych linii $(\overline{X}_{LP_i}, \overline{Y}_{LP_i})$:

$$\overline{X}_{LP_{j}} = \frac{\sum_{k=1}^{l} X_{LP_{j,k}}}{l},$$
(4.10)

$$\overline{Y}_{LP_{j}} = \frac{\sum_{k=1}^{l} Y_{LP_{j,k}}}{l},$$
(4.11)

gdzie:

 k – numer punktu przecięcia linii podstawowej z j-tą prostą prostopadłą poprowadzoną do linii odniesienia,

l – liczba punktów przecięcia linii podstawowej z j-tą prostą prostopadłą poprowadzoną do linii odniesienia,

a następnie na ich podstawie obliczano odległość do linii odniesienia:



Rys. 4.8. Szczególny przypadek, gdy prosta prostopadła poprowadzona do linii odniesienia przecina linię podstawową w więcej niż jednym punkcie.

Po obliczeniu odległości między linią odniesienia a liniami podstawowymi (pomierzonymi w latach 2016 i 2018) przystąpiono do określenia zmienności czasowo-przestrzennej wewnętrznej granicy morza terytorialnego. W tym celu wyznaczano odległości między liniami podstawowymi $(\Delta o_{2018-2016_j})$, wykorzystując następujący wzór:

$$\Delta o_{2018-2016_i} = o_{2018_i} - o_{2016_i}, \qquad (4.13)$$

gdzie:

 o_{2016_j} – odległość między linią podstawową pomierzoną w 2016 r. a linią odniesienia liczona wzdłuż j-tej prostej prostopadłej poprowadzonej do linii odniesienia,

 o_{2018_j} – odległość między linią podstawową pomierzoną w 2018 r. a linią odniesienia liczona wzdłuż j-tej prostej prostopadłej poprowadzonej do linii odniesienia.



Na Rys. 4.9 zaprezentowano, jak zmienił się przebieg linii podstawowej morza terytorialnego na akwenie przyległym do plaży miejskiej w Gdyni w przeciągu ostatnich dwóch lat.

Rys. 4.9. Odległości między liniami podstawowymi morza terytorialnego wyznaczonymi metodą geodezyjną w 2016 i 2018 r.

Na podstawie Rys. 4.9 można zauważyć, że zmienność czasowo-przestrzenna przebiegu linii podstawowej jest dość znaczna. Największe różnice zaobserwowano w przypadku środkowego odcinka akwenu, gdzie w niektórych miejscach wewnętrzna granica morza terytorialnego cofnęła się o kilkanaście metrów w kierunku lądu (kilometraż brzegu: 0.125-0.175 km), a nawet przesunęła się o ponad dwadzieścia metrów w głąb morza (kilometraż brzegu: 0.2 km). Ponadto w południowej części akwenu (kilometraż brzegu: 0.325 km) dostrzeżono znaczne różnice w odległości między liniami podstawowymi sięgające od kilkunastu do prawie 25 m.

W sensie statystycznym w przeciągu ostatnich dwóch lat linia podstawowa przesunęła się średnio o 89 cm w kierunku lądu. W związku z tym należy stwierdzić, że położenie wewnętrznej granicy morza terytorialnego wzdłuż akwenu zmieniło się nieznacznie i jest dosyć ustabilizowane. Jednakże tej tezy nie potwierdza inna miara statystyczna, jaką jest odchylenie standardowe odległości między liniami podstawowymi ($\sigma_{\Delta \sigma_{2018-2016}}$), które wyniosło 9.49 m. Obie wspomniane miary statystyczne zostały obliczone na podstawie poniższych wzorów:

$$\Delta \bar{o}_{2018-2016} = \frac{\sum_{j=1}^{M} \Delta o_{2018-2016_j}}{M}, \qquad (4.14)$$

$$\sigma_{\Delta o_{2018-2016}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{M} \left(\Delta o_{2018-2016_j} - \Delta \overline{o}_{2018-2016} \right)^2}{M}}, \qquad (4.15)$$

gdzie:

M – liczba prostych prostopadłych poprowadzonych do linii odniesienia.

W kolejnym etapie prac postanowiono dodatkowo zwizualizować przebieg linii podstawowych pomierzonych w latach 2016 i 2018. W tym celu wykorzystano platformę Google Earth Pro do wizualizacji ich przebiegu (Rys. 4.10).



Rys. 4.10. Przebieg linii podstawowej morza terytorialnego akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni wyznaczony metodą geodezyjną w 2016 (kolor żółty) i 2018 r. (kolor czerwony).

4.1.3. Dyskusja wyników

Celem niniejszych badań była analiza zmienności przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego wyznaczonej dwukrotnie, w latach 2016 i 2018, metodą geodezyjną przy użyciu odbiornika GNSS na akwenie o długości 400 metrów przylegającym do plaży miejskiej w Gdyni. Dodatkowo w celu weryfikacji przeprowadzonych badań określono zmiany batymetrii na analizowanym obszarze.

Pomiary wykazały znaczną zmienność czasowo-przestrzenną przebiegu linii podstawowej, nawet na tak krótkim odcinku brzegu. Na podstawie Rys. 4.9 można stwierdzić, że wewnętrzna granica morza terytorialnego jest bardzo niestabilna, ponieważ w niektórych miejscach przesunęła się nawet o ok. 20-25 m zarówno w głąb lądu, jak i morza. Jest to szczególnie zauważalne na środkowym odcinku akwenu między kilometrażem linii brzegowej wynoszącym 0.1 a 0.2 km. Wpływ na tak dużą zmienność przebiegu linii podstawowej mogły mieć następujące po sobie kolejno "*wypłycenia*", które pojawiły się na kilku profilach (Rys. 4.10). Między tymi "*wypłyceniami*" znajdowały się "*zagłębienia*" o głębokościach odpowiadających linii podstawowej. Dlatego też można domniemać, że wspomniane lokalne podwyższenia powierzchni dna podlegają okresowej zmianie. Stąd można wnioskować, że dane pomiarowe mogą ulegać dezaktualizacji.

W sensie statystycznym w przeciągu ostatnich dwóch lat linia podstawowa przesunęła się średnio o 89 cm w kierunku lądu. W związku z tym należy stwierdzić, że położenie wewnętrznej granicy morza terytorialnego wzdłuż akwenu zmieniło się nieznacznie i jest dosyć ustabilizowane. Jednakże tej tezy nie potwierdza inna miara statystyczna, jaką jest odchylenie standardowe odległości między liniami podstawowymi ($\sigma_{\Delta\sigma_{2018-2016}}$) wyznaczonymi w latach 2016 i 2018, które wyniosło 9.49 m.

4.2. Wyznaczanie przebiegu linii podstawowej z wykorzystaniem bezzałogowej jednostki pływającej

4.2.1. Prowadzenie bezzałogowej jednostki pływającej po profilach sondażowych

Dnia 7 marca 2019 r. przeprowadzono pomiary hydrograficzne, których celem była ocena dokładności prowadzenia bezzałogowej jednostki pływającej (ASV/USV) po profilach sondażowych zaprojektowanych zgodnie z zasadami zawartymi w standardzie IHO S-44 **[IHO, 2008]**. Ponadto podjęto próbę określenia optymalnej trajektorii ruchu jednostki hydrograficznej, gdzie poddano weryfikacji dwie metody: równoległych profili oraz spirali. W badaniach wykorzystano bezzałogowy pojazd nawodny, który zmodernizowano do trybu automatycznego - umożliwiającego samodzielną realizację zadanej trasy.

Badania zrealizowano na zbiorniku retencyjnym w Gdańsku przy ul. Wileńskiej. Istotnym czynnikiem wpływającym na otrzymane wyniki mają warunki hydrometeorologiczne, stąd pomiary zrealizowano przy bezwietrznej pogodzie i stanie wody wynoszącym 0 w skali Douglasa (brak falowania oraz prądów morskich). Do badań wykorzystano bezzałogową jednostkę pływającą wyposażoną w odbiornik GPS/GLONASS, która miała za zadanie przepłynąć po zaprojektowanych wcześniej trasach testowych. Profile sondażowe poprowadzono względem siebie na cztery sposoby. Dla pierwszych dwóch tras (Rys. 4.11a i 4.11b) zostały one zaprojektowane w taki sposób, aby linie sondażowe były względem siebie równoległe. Przyjęto, że wzajemna odległość między profilami będzie wynosiła odpowiednio 5 i 10 m. Układ profili sondażowych dwóch kolejnych tras (Rys. 4.11c i 4.11d) przypominał swoim kształtem *"zwężające się kwadraty"* (spiralę) w kierunku środka sondowanego akwenu. Odległość między kolejnymi wielobokami była stała i wynosiła dla obu wariantów, podobnie jak w przypadku pierwszej pary tras, 5 i 10 m.





Rys. 4.11. Układ profili sondażowych tras, po których poruszała się bezzałogowa jednostka pływająca w trakcie pomiarów hydrograficznych.

Trasy zostały zaprojektowane w oprogramowaniu TBC. Następnie współrzędne punktów załamania osi poszczególnych tras wyeksportowano do czterech plików o rozszerzeniu *.kml. Punkty te zapisano jako współrzędne geodezyjne odniesione do elipsoidy obrotowej WGS-84 z dokładnością do dziewięciu miejsc po przecinku. Z kolei tak utworzone dane przekonwertowano do plików o rozszerzeniu *.shp dedykowanym dla oprogramowania ArduPilot Mission Planner. Program ten służy do planowania tras, po których w trybie automatycznym/autonomicznym mogą poruszać się bezzałogowe pojazdy latające, jak i nawodne (Rys. 4.12). W ten sposób przygotowane dane są przesyłane dzięki telemetrii (radioliniom TBS Crossfire TX LITE) z laptopa, na którym jest zainstalowane oprogramowanie ArduPilot Mission Planner do autopilota (3DR PX4 Pixhawk) zamontowanego na dronie. Po przełączeniu z trybu FLIGHT MODE na tryb AUTO jednostka rozpoczyna płynąć po zadanych punktach w trybie automatycznym.



Rys. 4.12. Okno aplikacji ArduPilot Mission Planner służącej do planowania i rejestrowania trasy jednostki pływającej.

Wartym podkreślenia jest fakt, iż w osi symetrii jednostki pływającej zamontowano dwa odbiorniki: GPS/GLONASS (u-blox NEO-7) oraz RTK (Trimble R10). Pierwszy z nich był wykorzystywany do prowadzenia jednostki wzdłuż zaplanowanych profili sondażowych, natomiast odbiornik geodezyjny GNSS posłużył do określenia rzeczywistego położenia pojazdu nawodnego. Montaż dwóch różnych odbiorników na dronie był spowodowane tym, że dedykowana dokładność określenia współrzędnych pozycji przez odbiornik GPS/GLONASS

wynosi 2-4 m, a odbiornik RTK wykorzystując wybraną sieć geodezyjną GNSS umożliwia wykonywanie pomiarów w czasie rzeczywistym z dokładnością wynoszącą 1-2 cm (p = 0.95) zarówno w płaszczyźnie horyzontalnej, jak i wertykalnej. Należy zauważyć, że producent odbiornika u-blox NEO-7 nie podał jaka jest dokładność pomiaru metodą GPS/GLONASS, a określił ją jedynie dla każdego systemu z osobna. Wykorzystując satelity systemu GPS zapewniona jest dokładność określenia pozycji na poziomie 2-2.5 m (ang. Circular Error Probable – CEP), natomiast przy użyciu satelitów systemu GLONASS wynosi ona 4 m w płaszczyźnie horyzontalnej (producent nie podał prawdopodobieństwa wystąpienia błędu dla podanej wartości).

Odbiornik GPS/GLONASS został zamontowany na przodzie ramy montażowej łączącej oba pływaki jednostki pływającej, a odbiornik geodezyjny GNSS umieszczono na 1-metrowej tyczce, która była przytwierdzona do tylnej części ramy montażowej za pomocą specjalnego uchwytu. Po skompletowaniu i skonfigurowaniu aparatury pomiarowej przystąpiono do realizacji badań. Przebiegły one bez żadnych zakłóceń. Dane rejestrowane w trakcie pomiarów były zapisywane na karcie wewnętrznej kontrolera odbiornika GNSS, natomiast w przypadku dwusystemowego odbiornika były one przesyłane w czasie rzeczywistym do laptopa, na którym zainstalowano oprogramowanie u-center firmy u-blox. Dzięki niemu możliwe jest m.in. zapisywanie komunikatów w standardzie NMEA rejestrowanych przez odbiornik GPS/GLONASS (Rys. 4.13).



Rys. 4.13. Okno aplikacji u-center służącej do zapisywania komunikatów w standardzie NMEA rejestrowanych przez odbiornik GPS/GLONASS.

Podczas pomiarów hydrograficznych oba odbiorniki równolegle rejestrowały swoje współrzędne pozycji. W przypadku odbiornika GPS/GLONASS otrzymano współrzędne geodezyjne odniesione do elipsoidy obrotowej WGS-84, natomiast odbiornik GNSS zapisywał w kontrolerze współrzędne płaskie prostokątne, które były wyrażone w układzie PL-2000. W celu obliczenia odległości między zaprojektowanymi a przebytymi trasami przez bezzałogową jednostkę pływającą (q), postanowiono sprowadzić pomierzone współrzędne do jednolitego układu odniesienia. Przetransformowano je do układu PL-2000, który od roku

2012 zgodnie z rozporządzeniem Rady Ministrów w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych jest podstawowym układem współrzędnych geodezyjnych obowiązującym w Polsce **[Rada Ministrów RP, 2012]**.

Współrzędne pozycji (szerokość i długość) geograficznej prezentowane w mierze kątowej (krzywoliniowej) uniemożliwiają wyznaczenie błędów poszczególnych pomiarów. Z tego względu zasadnym jest dalsze prowadzenie obliczeń w metrach. W tym celu dokonano rzutowania współrzędnych geograficznych (kątowych) z powierzchni elipsoidy obrotowej WGS-84 (o parametrach: $a_e = 6378137.00 m$, $b_e = 6356752.314 m$) [NIMA, 2004] na powierzchnię płaską przy wykorzystaniu transformacji Gaussa-Krügera, która jest powszechnie stosowana w geodezji [Deakin R.E. i in., 2010]. W wyniku obliczeń uzyskuje się współrzędne płaskie (x, y), gdzie wartość x oznacza odległość (w metrach) punktu od równika, liczoną po łuku południka (na elipsoidzie obrotowej WGS-84), a zmienna y to odległość (w metrach) od ustalonego arbitralnie południka środkowego. Znak minus oznacza, że punkt znajduje się na zachód od południka, natomiast plus odpowiada położeniu na wschód od południka. Celem uniknięcia ujemnych wartości współrzędnych na osi y często do wyniku dodaje się stałą wartość wynoszącą np. 500 000 m (dla 3-stopniowego pasa odwzorowawczego w układzie PL-2000) [Gajderowicz I., 2009; Kadaj R.J., 2002].

W referowanych badaniach wykorzystano układ PL-2000, a zamianę współrzędnych kątowych na kartezjańskie zrealizowano w oparciu o następujące zależności matematyczne **[Hofmann-Wellenhof B. i in., 1994]**:

$$x_{PL-2000} = m_0 \cdot N_e \cdot \left[\frac{S(B)}{N_e} + \frac{(\Delta L)^2}{2} \cdot \sin(B) \cdot \cos(B) + \frac{(\Delta L)^4}{24} \cdot \sin(B) \cdot \cos^3(B) \cdot (5 - \xi^2 + 9 \cdot \eta^2 + 4 \cdot \eta^4) + \frac{(\Delta L)^6}{720} \cdot \sin(B) \cdot \cos^5(B) \cdot (61 - 58 \cdot \xi^2 + \xi^4 + 270 \cdot \eta^2 - 330 \cdot \eta^2 \cdot \xi^2 + 445 \cdot \eta^4 \right]$$
(4.16)

$$y_{PL-2000} = m_0 \cdot N_e \cdot \left[\Delta L \cdot \cos(B) + \frac{(\Delta L)^3}{6} \cdot \cos^3(B) \cdot (1 - \xi^2 + \eta^2) + \frac{(\Delta L)^5}{120} \cdot \cos^5(B) \cdot (5 - 18 \cdot \xi^2 + \xi^4 + 14 \cdot \eta^2 - 58 \cdot \eta^2 \cdot \xi^2 + 13 \cdot \eta) \right], \quad (4.17)$$

+ 500000 + $\frac{L_0}{3} \cdot 1000000$

gdzie:

 m_0 – współczynnik skali [-],

 N_e – promień krzywizny przekroju poprzecznego elipsoidy [m],

S(B) – długość łuku południka od równika do danego punktu o szerokości B [m],

 ΔL – odległość punktu od południka osiowego [rad],

B, L –współrzędne elipsoidalne punktu [°],

 L_0 – długość południka osiowego wybranej strefy [°],

pozostałymi parametrami odwzorowania do współrzędnych płaskich prostokątnych w układzie PL-2000 są:

$$\xi = \tan\left(B\right),\tag{4.18}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{e^2 \cdot \cos^2(B)}{1 - e^2}},$$
(4.19)

gdzie:

 η – kąt orientacji zniekształceń elipsy [-],

e – pierwszy mimośród elipsoidy [-].

Następnie, aby wyznaczyć odległości między zaprojektowanymi a przebytymi trasami przez bezzałogową jednostkę pływającą, należało opisać każdą trasę w sposób matematyczny. W związku z tym, że składały się one od kilkunastu do dwudziestu kilku odcinków prostych, to każdy segment trasy został przedstawiony w postaci funkcji liniowej wyrażonej wzorem:

$$X_{m,v} = a_{m,v} \cdot Y_{m,v} + b_{m,v}, \qquad (4.20)$$

gdzie:

m – numer trasy,

v – numer odcinka dla m-tej trasy,

 $X_{m,v}, Y_{m,v}$ – współrzędne płaskie prostokątne PL-2000 punktu v zarejestrowanego przez dany odbiornik na m-tej trasie,

 $a_{m,v}$ – współczynnik kierunkowy prostej v dla m-tej trasy zdefiniowany następująco:

$$a_{m,v} = \frac{X_{m,v+1} - X_{m,v}}{Y_{m,v+1} - Y_{m,v}},$$
(4.21)

 $b_{m,v}$ – wyraz wolny prostej v dla m-tej trasy zdefiniowany następująco:

$$b_{m,\nu} = X_{m,\nu} - a_{m,\nu} \cdot Y_{m,\nu}.$$
 (4.22)

Po matematycznym określeniu przebiegu każdego segmentu zaprojektowanej trasy, można było obliczyć odległości między zarejestrowanymi współrzędnymi przez odbiornik a zaprojektowanymi odcinkami trasy. Podczas wykonywania obliczeń należało rozpatrzyć dwa warianty. Pierwszy z nich polegał na tym, że dla pomierzonych punktów można było poprowadzić proste prostopadłe względem zaprojektowanych segmentów trasy (Rys. 4.14a), natomiast w drugim wariancie niemożliwe było wyznaczenie prostej prostopadłej, przechodzącą między drogą a zarejestrowanym punktem (Rys. 4.14b). W pierwszym przypadku obliczano najmniejszą odległość między pomierzonym punktem a trasą za pomocą wzoru:
$$q_{m,w} = \frac{\left|-a_{m,v} \cdot Y_{PP_{m,w}} + X_{PP_{m,w}} - b_{m,v}\right|}{\sqrt{\left(-a_{m,v}\right)^2 + 1}},$$
(4.23)

gdzie:

w – numer punktu zarejestrowanego przez dany odbiornik,

 $X_{PP_{m,w}}, Y_{PP_{m,w}}$ – współrzędne płaskie prostokątne PL-2000 punktu *w* zarejestrowanego przez dany odbiornik na m-tej trasie.

Natomiast w drugim wariancie wyznaczano odległość do najbliższego punktu załamania osi trasy za pomocą wzoru:



Rys. 4.14. Graficzny sposób wyznaczania odległości pomierzonego punktu od zaprojektowanej trasy.

Po obliczeniu odległości między zaprojektowanymi a przebytymi trasami przez bezzałogową jednostkę pływającą, można było dokonać analizy statystycznej tej zmiennej. Jako kryterium oceny przyjęto dwie miary dokładności: *CTE*68 i *CTE*95 (ang. Cross Track Error – CTE). Miary te opisują, jakiej wartości nie przekracza 68% (*CTE*68) i 95% (*CTE*95) odległości w przestrzeni dwuwymiarowej (2D), obliczonych na podstawie zarejestrowanych punktów przez odbiornik oraz punktów należących do trasy. W Tab. 4.4 zaprezentowano wartości miar *CTE*68 i *CTE*95, które wyznaczono w oparciu o wskazania odbiorników GPS/GLONASS oraz RTK dla poszczególnych tras.

Miara dokładności Trasa nr 1		nr 1	Trasa nr 2		Trasa nr 3		Trasa nr 4	
Odbiornik	GPS/ GLONASS	RTK	GPS/ GLONASS	RTK	GPS/ GLONASS	RTK	GPS/ GLONASS	RTK
Liczba pomiarów	484	458	850	848	518	506	909	869
CTE68	0.60 m	0.92 m	0.58 m	1.15 m	0.56 m	1.40 m	0.55 m	1.27 m
CTE95	1.25 m	2.01 m	1.20 m	2.38 m	1.17 m	2.20 m	1.16 m	2.39 m

Tab. 4.4. Miary dokładności prowadzenia bezzałogowej jednostki pływającej dla poszczególnych tras.

Na podstawie wyników zaprezentowanych w Tab. 4.4 należy stwierdzić, że miary dokładności prowadzenia bezzałogowej jednostki pływającej dla czterech reprezentatywnych tras są do siebie bardzo zbliżone. Różnice między poszczególnymi miarami dokładności *CTE*68 (0.55-0.60 m) i *CTE*95 (1.16-1.25 m) dla odbiornika GPS/GLONASS były nieznaczne i wynosiły zaledwie kilka centymetrów. Natomiast wyniki otrzymane na podstawie współrzędnych pozycji zarejestrowanych przez odbiornik RTK sugerowałyby, że dokładność prowadzenia jednostki pływającej po profilach sondażowych jest ok. dwukrotnie mniejsza niż to, co zapisał odbiornik GPS/GLONASS i wynosi ona odpowiednio: 0.92-1.40 m (*CTE*68) oraz 2.01-2.39 m (*CTE*95). Ponadto pomiary wykazały, że na dokładność utrzymania jednostki wzdłuż profilu nie miały wpływu: kształt trasy (równoległe linie sondażowe i "*zwężające się kwadraty*") oraz wzajemna odległość między profilami (5 i 10 m) (Rys. 4.15).



Rys. 4.15. Zarejestrowane punkty pomiarowe przez odbiorniki GPS/GLONASS (kolor pomarańczowy) i RTK (kolor brązowy) wzdłuż zaprojektowanych tras.

W ramach badań dokonano również analizy rozkładu zmiennej losowej jaką jest odległość między zarejestrowaną trasą przez odbiornik RTK a zaprojektowaną trasą. W tym celu wykorzystano darmowe oprogramowanie Easy Fit, które automatycznie dopasowuje zaimportowane dane przez użytkownika do kilkudziesięciu najczęściej stosowanych rozkładów prawdopodobieństwa. Następnie program sprawdza za pomocą testów zgodności (Kołmogorowa-Smirnowa, Andersona-Darlinga i Chi-kwadrat), czy rozkład w populacji dla pewnej zmiennej losowej, różni się od założonego rozkładu teoretycznego. W dalszej

kolejności Easy Fit klasyfikuje rozkłady prawdopodobieństwa według otrzymanych statystyk dla poszczególnych testów zgodności i wybiera najlepszy z nich.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wynika, że empiryczny rozkład odległości między zarejestrowaną trasą przez odbiornik RTK a zaprojektowaną trasą jest najbardziej zbliżony do czteroparametrowego uogólnionego rozkładu gamma (URG). Ten typ rozkładu jest stosowany w analizie przeżycia m.in. do wykrywania awarii systemu lub urządzenia. Podobne zastosowanie jak URG mają rozkłady: wykładniczy, gamma oraz Weibulla, który jest powszechnie stosowany m.in. do badania parametrów nawigacyjnych (dokładność, dostępność, ciągłość, wiarygodność) systemów nawigacji satelitarnej **[Śniegocki H i in., 2014]**.

Funkcję gęstości prawdopodobieństwa (FGP) czteroparametrowego URG zmiennej q wyraża się wzorem **[Stacy E.W., 1962; Sulewski P., 2000]**:

$$f(q;\chi,\varepsilon,\phi) = \frac{\varepsilon}{\chi \cdot \Gamma(\phi)} \cdot \left(\frac{q}{\chi}\right)^{\varepsilon \cdot \phi^{-1}} \cdot e^{-\left(\frac{q}{\chi}\right)^{\varepsilon}}, \qquad (4.25)$$

gdzie:

- χ parametr skali ($\chi > 0$),
- ε parametr kształtu ($\varepsilon > 0$),
- ϕ parametr kształtu (ϕ > 0),
- $\Gamma(\phi)$ funkcja gamma Eulera zdefiniowana następująco:

$$\Gamma(\phi) = \int_{0}^{\infty} u^{\phi-1} \cdot e^{-u} du .$$
(4.26)

W celu interpretacji przebiegu FGP dla URG postanowiono przedstawić ją na wykresie liniowym znajdującym się na Rys. 4.16.



Rys. 4.16. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czteroparametrowego uogólnionego rozkładu gamma zmiennej *q*.

W dalszej kolejności wychodząc z definicji dystrybuanty i uwzględniając wzór (4.25), można było obliczyć dystrybuantę URG zmiennej q:

$$F(q;\chi,\varepsilon,\phi) = \frac{\Gamma_n\left[\phi,\left(\frac{q}{\chi}\right)^{\varepsilon}\right]}{\Gamma(\phi)}.$$
(4.27)

Aby uzyskać dogodne do wykonywania obliczeń wyrażenia, wprowadzono zmienną pomocniczą:

$$\gamma = \left(\frac{q}{\chi}\right)^{\varepsilon},\tag{4.28}$$

oraz niepełną funkcję gamma:

$$\Gamma_n(\phi,\gamma) = \int_0^{\gamma} u^{\phi-1} \cdot e^{-u} du . \qquad (4.29)$$

Przebieg dystrybuanty, podobnie jak w przypadku funkcji gęstości prawdopodobieństwa, został zaprezentowany na wykresie liniowym wygenerowanym przez oprogramowanie Easy Fit (Rys. 4.17).



Rys. 4.17. Dystrybuanta czteroparametrowego uogólnionego rozkładu gamma zmiennej q.

Na podstawie Rys. 4.17 można stwierdzić, że kwantyl rzędu 0.68 (percentyl) w badanej populacji wynosi 1.21 m, natomiast kwantyl rzędu 0.95 odpowiednio 2.34 m. Należy to interpretować w taki sposób, że 68% odległości między zarejestrowaną trasą przez odbiornik RTK a zaprojektowaną jest nie większa od 1.21 m oraz analogicznie 95% elementów tej populacji nie przekracza wartości 2.34 m.

W statystyce i rachunku prawdopodobieństwa kwantylem rzędu p, gdzie $0 \le p \le 1$, w rozkładzie empirycznym P_q zmiennej losowej q nazywa się taką wartość zmiennej losowej q_p , dla której spełnione są nierówności:

$$P_q\left(\left(-\infty, q_p\right]\right) \ge p , \qquad (4.30)$$

$$P_q\left(\left[q_p, +\infty\right)\right) \ge 1 - p , \qquad (4.31)$$

gdzie:

p – prawdopodobieństwo wystąpienia zmiennej q w badanej populacji.

W kolejnym etapie prac postanowiono określić, o ile różni się empiryczna dystrybuanta względem teoretycznej. W tym celu policzono różnice pomiędzy prawdopodobieństwem wystąpienia zmiennej q liczonym dla empirycznego i teoretycznego URG za pomocą wzoru:

$$\Delta p(q) = F_n(q) - F(q), \qquad (4.32)$$

gdzie:

 $F_n(q)$ – empiryczna dystrybuanta rozkładu zmiennej q ,

F(q) – teoretyczna dystrybuanta rozkładu zmiennej q.

Wykres różnicy między prawdopodobieństwami wystąpienia zmiennej q dla empirycznego i teoretycznego URG przedstawiono na Rys. 4.18.



Rys. 4.18. Różnica między prawdopodobieństwami wystąpienia zmiennej *q* dla empirycznego i teoretycznego uogólnionego rozkładu gamma.

Na podstawie Rys. 4.18 można zauważyć, że rozkład empiryczny jest niemal identycznie dopasowany do teoretycznego URG. Maksymalna różnica między prawdopodobieństwami wystąpienia zmiennej q dla empirycznego i teoretycznego URG wynosi niespełna

±0.01-0.015. Przykładowo dla rozkładu normalnego (Gaussa), będącego najważniejszym teoretycznym rozkładem prawdopodobieństwa stosowanym w statystyce, analizowana miara jest kilkukrotnie większa i wynosi ok. ±0.08.

4.2.2. Planowanie i realizacja pomiarów

Pomiary wyznaczania przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego z wykorzystaniem bezzałogowej jednostki pływającej realizowano w rozprawie na akwenie Zatoki Gdańskiej **[Specht C. i in., 2019c]**. Obszar testowy obejmował akwen przyległy do plaży miejskiej w Gdyni - w pobliżu basenu jachtowego. Badania odbyły się dnia 19.07.2018 r. w godzinach: 7:00-10:00. Podobnie jak w przypadku pomiarów linii podstawowej metodą geodezyjną, zrealizowano je podczas stanu morza 0, przy bezwietrznej pogodzie.

Przed odbyciem pomiarów musiano osobno zaplanować trasę dla drona oraz dla osoby wykonującej pomiar geodezyjny. Wynikało to w głównej mierze z faktu, iż ze względu na zbyt duże zanurzenie bezzałogowej jednostki pływającej (10 cm) oraz minimalny zakres pracy echosondy (30 cm) postanowiono ograniczyć trasę drona wyłącznie do punktów pomierzonych na głębokościach 40, 60, 79, 100 cm w trakcie kampanii pomiarowej z 2016 r. (Rys. 4.19). Natomiast w przypadku pomiaru geodezyjnego poszczególne profile pomiarowe wyznaczono w oparciu o punkty, które znajdowały się na styku wody z lądem (0 cm) oraz na głębokości 100 cm poniżej ówczesnego stanu wody (Rys. 4.1).



Rys. 4.19. Zaprojektowana trasa bezzałogowej jednostki pływającej w trakcie pomiarów z dnia 19.08.2018 r.

Pomiary zostały wykonane dwuetapowo. Na początku w godzinach: 7:00-10:00 zrealizowano pomiar linii podstawowej przy wykorzystaniu drona hydrograficznego, a w godzinach: 11:00-14:00 dokonano pomiaru tego samego akwenu metodą geodezyjną. Jednakże zanim przystąpiono do realizacji badań należało skonfigurować i zamontować aparaturę pomiarową na bezzałogowej jednostce pływającej (Rys. 4.20).



Rys. 4.20. Zespół montujący aparaturę pomiarową na bezzałogowej jednostce pływającej (po lewej) oraz osoba mierząca zanurzenie przetwornika echosondy przy użyciu miary zwijanej (po prawej).

Przed pomiarem skonfigurowano miniaturową echosondę pionową SonarMite BTX oraz odbiornik geodezyjny Trimble R10 z kontrolerem Trimble TSC3. W tym celu połączono przewodowo (za pomocą kabla IP67) przetwornik z echosondą, a potem sparowano odbiornik i echosondę z kontrolerem przy wykorzystaniu bezprzewodowej transmisji danych o krótkim zasięgu (Bluetooth).

Po podłączeniu aparatury pomiarowej można było przystąpić do jej montażu na bezzałogowej jednostce pływającej. Należy pamiętać, że odbiornik DGPS/GNSS oraz echosonda jednowiązkowa powinny być zdolne do integracji sprzętowej z dronem hydrograficznym. Zaleca się, aby odbiornik i przetwornik echosondy były umieszczane na stosunkowo krótkiej (o długości ok. 1 m) tyczce geodezyjnej, która jest zamontowana na specjalnym uchwycie. Ten zaś powinien być przytwierdzony stabilnie do jednostki pomiarowej np. na ramie montażowej łączącej oba pływaki jednostki. Pozostałe urządzenia, takie jak echosonda i kontroler odbiornika GNSS, należy umieścić w bezpiecznym miejscu chroniącym przed wodą (Rys. 4.21) **[Specht C. i in., 2017b]**.



Rys. 4.21. Bezzałogowa jednostka pływająca wraz z zamontowaną na niej aparaturą pomiarową.

Po zamontowaniu wszystkich urządzeń pomiarowych na jednostce dokonano kalibracji ich wskazań w celu zweryfikowania poprawności działania oraz wyeliminowania błędów. Dlatego w przypadku echosondy SBES wykonano dwie czynności **[Grządziel A., 2006; WCNJiK, 2009b]**:

- pomiar pionowego rozkładu prędkości dźwięku w wodzie,
- pomiar zanurzenia przetwornika echosondy.

Pierwsza z wyżej wymienionych czynności ze względu na brak miernika prędkości ultradźwiękowych nie mogła zostać eksperymentalnie wyznaczona. Przyjęto, że wartość prędkości dźwięku w wodzie będzie wynosiła 1500 m/s. Jednakże nie miała ona istotnego wpływu na dokładność przeprowadzonych pomiarów batymetrycznych, ponieważ maksymalna zarejestrowana głębokość wyniosła zaledwie 1.37 m, zatem błąd pojedynczego pomiaru głębokości był rzędu kilku centymetrów. Do jej ustawienia wykorzystano oprogramowanie SonarMite App+.

Kolejną składową pomiaru głębokości jest zanurzenie przetwornika echosondy, którą określono przy użyciu miary zwijanej. Podczas przeprowadzonych pomiarów wielkość ta wynosiła 10 cm (wartość stała). Po zakończeniu badań, w trakcie przetwarzania (opracowywania) danych batymetrycznych, zanurzenie przetwornika dodano do zmierzonych przez echosondę głębokości.

Kolejnym aspektem pomiarowym jest precyzyjne pozycjonowanie pomiarów batymetrycznych. W tym celu zastosowano sieciowy odbiornik GNSS Trimble R10 wykorzystujący wszystkie globalne systemy nawigacji satelitarnej (GPS, GLONASSS, BDS, Galileo), systemy wspomagające typu SBAS, a także sieci geodezyjne GNSS. Dzięki temu średnia liczba dostępnych satelitów przez odbiornik wynosi typowo 16-20 sztuk, powodując możliwość realizacji precyzyjnych wyznaczeń pozycji podczas sondażu hydrograficznego na poziome 1-2 cm (RMS) [Czaplewski K., 2015; Czaplewski K., Goward D., 2016; Specht C. i in., 2014; Specht C. i in., 2017a]. W ramach badań wykorzystano stację sieci geodezyjnej VRSNet.pl zlokalizowaną w Gdańsku (GDSK), która generowała poprawki RTK dla odbiornika ruchomego zamontowanego na bezzałogowej jednostce pływającej wykonującej sondaż hydrograficzny.

Po wykonaniu wszystkich zaprezentowanych powyżej czynności przystąpiono do zasadniczej części pomiarów. Osoba manewrująca jednostką (operator) starała się płynąć wzdłuż zaplanowanych 40 profili podstawowych (Rys. 4.19) oraz 2 profili kontrolnych zlokalizowanych w odległości ok. 10 i 50 m od linii brzegowej **[IHO, 2008; Specht M., Specht C., 2018a]**. W tym celu wykorzystano oprogramowanie Mission Planner firmy ArduPilot służące do planowania trasy nalotów dronami latającymi. Program ten pokazywał w czasie rzeczywistym położenie drona hydrograficznego oraz punkty tworzące jego trasę do przebycia (Rys. 4.22b). Czynność ta wymagała od operatora jednoczesnego sterowania jednostką pływającą oraz obserwowania jej położenia w oprogramowaniu Mission Planner, które zainstalowano na laptopie.

a)





Rys. 4.22. Operator drona hydrograficznego w trakcie pomiarów z dnia 19.07.2018 r. (a) oraz zrzut ekranu oprogramowania służącego do planowania jego trasy (b).

Po zakończeniu pomiarów, a przed rozpoczęciem prac nad opracowaniem danych pomiarowych otrzymano przebytą trasę drona liczącą 5349 punktów. Ze względu na niewielką dzielność morską jednostki (ok. 20 kg) oraz panujący w tym rejonie wiatr niezwykle trudne okazało się utrzymanie drona przez operatora wzdłuż zaplanowanych profili sondażowych.

4.2.3. Opracowanie danych pomiarowych

Parametry przetwarzania danych pomiarowych oraz odwzorowania były takie same jak w przypadku pomiarów linii podstawowej metodą geodezyjną (Tab. 4.1). Ze względu na zanurzenie przetwornika oraz minimalny zakres pracy echosondy (30 cm) pomiary wykonywano w odległości nie mniejszej niż 10 m od linii brzegowej. Dlatego też najmniejsza zarejestrowana głębokość przez drona wyniosła 41 cm. W związku z powyższym, przy tworzeniu DTM (Rys. 4.23) wykorzystano 37 punktów wyznaczających linię brzegową akwenu, które zostały zmierzone metodą geodezyjną. Należy również zauważyć, że podczas modelowania dna morskiego nie dysponowano rzeczywistymi danymi pomiarowymi pomiędzy linią brzegową a izobatą wynoszącą 40 cm.



Rys. 4.23. Model DTM wraz z naniesionymi izobatami powstały na podstawie danych pozyskanych metodą hydrograficzną.

W celu określenia, jak daleko znajduje się linia podstawowa od brzegu wykorzystano narzędzie do cięcia powierzchni, które jest dostępne w oprogramowaniu TBC. Na Rys. 4.23 zaznaczono kolorem czarnym wybrane przekroje poprzeczne, które poddano dalszym analizom. Pierwszy z nich (przekrój powierzchni nr 1) poprowadzono w rejonie, gdzie występują okresowo wspomniane wcześniej *"wypłycenia"*. Na przekroju powierzchni nr 1 można zaobserwować, że głębokość na której w dniu pomiarów znajdowała się linia podstawowa występuje kilkukrotnie. Po raz pierwszy linia ta pojawia się w odległości odpowiednio: 13.28, 17.62 m (metoda geodezyjna) oraz 14.08, 17.29 m (metoda hydrograficzna) od linii brzegowej. Podobną tendencję zaobserwowano również w trakcie pomiarów realizowanych we Władysławowie w 1999 r., gdzie linia podstawowa znajdowała

się również w odległości kilkunastu metrów od brzegu **[Czaplewski K. i in., 2000; Czaplewski K., Specht C., 2002]**. Natomiast po raz drugi (na przekroju powierzchni nr 1) wewnętrzna granica morza terytorialnego leży odpowiednio: 42.75 m (metoda geodezyjna) oraz 44.09 m (metoda hydrograficzna) od linii brzegowej. Należy również podkreślić, że odległości linii podstawowej od brzegu w obu metodach są do siebie zbliżone, a różnice między nimi wynoszą nieco ponad 1 m.



Rys. 4.24. Przekrój powierzchni nr 1 wykonany na danych pozyskanych metodą hydrograficzną.

Drugi z analizowanych przekrojów jest niemal identyczny dla obu numerycznych modeli dna. Charakteryzuje się on łagodnym, ciągłym spadkiem głębokości (nachylenie wynoszące ok. 1-2°), a linia podstawowa znajduje się odpowiednio: 49.19 m (metoda geodezyjna) oraz 49.79 m (metoda hydrograficzna) od linii brzegowej. Taka forma ukształtowania terenu występuje na większości obszaru badanego akwenu.



Rys. 4.25. Przekrój powierzchni nr 2 wykonany na danych pozyskanych metodą geodezyjną.

Na podstawie Rys. 4.24 i 4.25 można zaobserwować zbieżność przebiegu linii podstawowej zmierzonej zarówno metodą geodezyjną, jak i dronem hydrograficznym. W podobnych miejscach pojawiają się również wspomniane wcześniej *"zagłębienia"* wyznaczające tą linię. Jednakże w porównaniu z Rys. 4.4b model DTM (powstały na podstawie danych pozyskanych metodą hydrograficzną) przedstawia bardziej rzeczywisty obraz ukształtowania dna morskiego, ponieważ do jego stworzenia wykorzystano kilkunastokrotnie więcej punktów. Dzięki temu odnaleziono większą liczbę *"wypłyceń"* i *"zagłębień"* na badanym akwenie (Rys. 4.26). W celu dokonania analizy porównawczej stworzonych modeli postanowiono nanieść na mapy udostępnione przez platformę Google Earth Pro izobaty o głębokościach: 0, 20, 40, 60, 80, 96, 100 cm, które zostały wyznaczone na podstawie uzyskanych wyników pomiarów.



Rys. 4.26. Mapy głębokości akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni otrzymane metodą geodezyjną (po lewej) oraz metodą hydrograficzną (po prawej).

Poza wskazanymi na Rys. 4.26 różnicach w obu modelach (geodezyjnym i hydrograficznym) linie podstawowe przebiegają niemal identycznie. W kolejnym etapie prac postanowiono zwizualizować jedynie przebieg wewnętrznej granicy morza terytorialnego wyznaczonej obiema metodami pomiarowymi. W tym celu ponownie wykorzystano platformę Google Earth Pro do wizualizacji jej przebiegu (Rys. 4.27).



Rys. 4.27. Przebieg linii podstawowej morza terytorialnego akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni wyznaczony metodą geodezyjną (kolor czerwony) oraz metodą hydrograficzną (kolor zielony).

Tą samą metodykę pomiaru linii podstawowej morza terytorialnego zastosowano dla dwóch innych reprezentatywnych akwenów morskich opisanych w Tab. 1.2. W związku

z powyższym, szczegóły realizacji tych pomiarów nie będą dokładnie prezentowane i analizowane. Zostaną przedstawione jedynie mapy warstwicowe akwenów położonych w pobliżu ujścia Wisły Śmiałej (Rys. 4.28) oraz przy podejściu do Górek Zachodnich od Zatoki Gdańskiej (Rys. 4.29), na których kolorem czerwonym zaznaczono przebieg linii podstawowej morza terytorialnego.



Rys. 4.28. Przebieg linii podstawowej morza terytorialnego akwenu położonego w pobliżu ujścia Wisły Śmiałej wyznaczony metodą hydrograficzną.



Rys. 4.29. Przebieg linii podstawowej morza terytorialnego akwenu położonego przy podejściu do Górek Zachodnich od Zatoki Gdańskiej wyznaczony metodą hydrograficzną.

4.2.4. Dyskusja wyników

Przez wiele lat pomiary batymetryczne na ultra-płytkich akwenach były realizowane w różnorodny sposób. Począwszy od badań wykorzystujących metody tachimetryczne (powszechne do 1990 r.), system DGPS (dokładność wyznaczenia pozycji 1-2 m, p = 0.95), poprzez systemy RTK wykorzystujące system GPS, aż po bezpośredni pomiar realizowany przez geodetów na profilach dokonywany w toni morskiej **[Baptista P. i in., 2008]**. Przedstawione powyżej metody pomiarowe były mało efektywne ze względu na: dokładność

prowadzonych badań, niewielkie pokrycie pomiarami mierzonego terenu oraz czas trwania badań. Pomiary przebiegu linii podstawowej były możliwe wyłącznie dzięki wspomnianymi powyżej metodom geodezyjnym, natomiast sondaży hydroakustycznych nie realizowano na ultra-płytkich wodach ze względu na zbyt duże zanurzenie załogowych jednostek pływających oraz umieszczaniu na ich dziobie przetworników echosond **[Specht C. i in., 2016c]**.

Na przestrzeni ostatnich kilku lat nastąpił rozwój technik pomiarowych, które usprawniły wykonywanie pomiarów batymetrycznych na ultra-płytkich akwenach. Były nimi bezzałogowe jednostki pływające cechujące się małymi gabarytami, a w szczególności niewielkim zanurzeniem (10-20 cm) [Aucelli P. i in., 2016; Giordano F. i in., 2015; Kum B.C. i in., 2018; Liang J. i in., 2017; Stateczny A. i in., 2018a; Stateczny A. i in., 2018b; Suhari K.T. i in., 2017] oraz sieci geodezyjne GNSS uruchamiane przez organy do spraw geodezji poszczególnych państw, w celu oferowania użytkownikom odpłatnych lub nieodpłatnych usług (serwisów) czasu rzeczywistego lub postprocessingu [Jang W.S. i in., 2018; Specht C. i in., 2017a]. Wykorzystanie zaprezentowanych powyżej technik pomiarowych umożliwia wykonywanie pomiarów batymetrycznych w sposób bardzo dokładny (1-5 cm, p = 0.95) [EI-Hattab A.I., 2014; Jang W.S. i in., 2016; Specht C. i in., 2017a; Specht C. i in., 2017b], szczegółowy (pokrycie pomiarami mierzonego terenu jest o wiele większe w porównaniu z metodami klasycznymi przedstawionymi wcześniej) oraz szybki. Przykładowo Autorzy publikacji [Specht C. i in., 2017c] wyznaczyli przebieg linii podstawowej morza terytorialnego tego samego akwenu metodą geodezyjną polegającą na wchodzeniu mierniczego w toń morską na zadaną głębokość przy użyciu odbiornika GNSS zamontowanego na tyczce. Obszar badawczy obejmował 400-metrowy akwen przyległy do publicznej plaży miejskiej w Gdyni. Pomiary, które wykonywano metodą geodezyjną trwały niemal 10 godzin (metodą hydrograficzną zajęło to niespełna 3 godziny) oraz najistotniejsze jest to, że w 2016 r. zmierzono kilkunastokrotnie mniej punktów (313) niż w 2018 r. przy użyciu drona (5349). Porównując numeryczne modele terenu pozyskane w trakcie pomiarów przeprowadzonych w 2016 i 2018 r. można stwierdzić, że model DTM pozyskany metodą hydrograficzną odzwierciedla w sposób bardziej rzeczywisty ukształtowanie dna morskiego badanego akwenu, niż ten utworzony za pomocą punktów pomierzonych metodą geodezyjną. Tą tezę potwierdzają również ubiegłoroczne pomiary, które zrealizowano dwoma wspomnianymi wcześniej metodami pomiarowymi. Po przeanalizowaniu modeli DTM oraz map warstwicowych można zauważyć, że dron wykrył większą liczbę "wypłyceń" i "zagłębień" w porównaniu z pomiarami zrealizowanymi metodą geodezyjną. Należy również pamiętać o tym, że bezzałogowa jednostka pływająca nie jest w stanie pomierzyć w zupełności całego akwenu. Jest to spowodowane następującymi czynnikami: zanurzeniem jednostki pływającej oraz minimalnym zakresem pracy przetwornika echosondy (dla zastosowanej echosondy parametr ten wynosi 30 cm). W związku z powyższym, na głębokościach mniejszych niż 30-40 cm nie można wykonać pomiarów batymetrycznych przy użyciu jednostek USV. Dlatego proponuje się, aby linię brzegową oraz punkty pośrednie pomiędzy linią brzegową a izobatą 30/40 cm mierzyć metodą geodezyjną [Specht C. i in., 2017c] lub metodą fotogrametryczną za pomocą bezzałogowych [Albuquerque M. i in., 2018] oraz załogowych statków powietrznych [Kim H. i in., 2017], które są coraz częściej wykorzystywane do analizy zmian strefy brzegowej akwenów oraz cieków wodnych. Ponadto alternatywną metodą określania głębokości wód przybrzeżnych jest analiza zdjęć satelitarnych o wysokiej rozdzielczości [Chybicki A., 2018; Hogrefe K.R. i in., 2008; Kulawiak M., Chybicki A., 2018; Warnasuriya T.W.S. i in., 2018].

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Celem rozprawy było opracowanie metod(y) wyznaczania przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego z wykorzystaniem bezzałogowej jednostki pływającej, echosondy jednowiązkowej oraz systemów pozycjonowania GNSS takich jak: DGPS, EGNOS, multi-GNSS i RTN, w aspekcie optymalizacji realizacji sondaży jednostką oraz optymalizacji metod pozycjonowania, spełniających wymagania poszczególnych kategorii pomiarowych IHO. Cząstkowe zagadnienia badawcze zdefiniowano w dwóch głównych aspektach: hydrograficznym i pozycyjnym.

hydrograficzny zrealizowano poprzez opracowanie metodyki wykorzystania Cel bezzałogowej jednostki pływającej (drona hydrograficznego) dla realizacji pomiarów batymetrycznych morskich akwenów ultra-płytkich. W ramach tego celu wykazano, że dotychczasowe metody manewrowania załogową (klasyczną) jednostką hydrograficzną mogą mieć jedynie ograniczone zastosowanie dla realizacji pomiarów hydrograficznych na akwenach ultra-płytkich z powodu zbyt dużego zanurzenia i nie nadają się do realizacji pomiarów linii podstawowej morza terytorialnego. Udowodniono również, że zasadnicze różnice we właściwościach manewrowych klasycznych jednostek oraz pływających obiektów bezzałogowych wymagają opracowania dla drugiej grupy oddzielnej metody realizacji sondaży hydrograficznych, realizowanych na akwenach ultra-płytkich. Ponadto wskazano, że dla bezzałogowej jednostki hydrograficznej, która posiada automatyczny system prowadzenia jej po profilach sondażowych, kształt profili (równoległe, spiralne i inne) nie odgrywa istotnego znaczenia, podobnie jak odległość pomiędzy liniami sondażowymi. Stąd hipotezę stwierdzającą, że możliwym jest ustalenie optymalnej odległości oraz kształtu geometrycznego profili sondażowych, po których poruszają się pływające bezzałogowe jednostki hydrograficzne na morskich akwenach ultra-płytkich należy uznać za chybioną i trywialną.

Drugim głównym celem rozprawy była ocena zdolności systemów GNSS do zapewnienia dokładności pozycjonowania bezzałogowej jednostki hydrograficznej spełniającej wymagania przewidziane dla czterech kategorii IHO: specjalnej, 1a, 1b i 2 [IHO, 2008]. Do jego zastosowanie rozwiązania zaproponowano metod analizy niezawodnościowej wykorzystujących procesy stacjonarne z odnową, w których minimalne wymagania poszczególnych kategorii pomiarów hydrograficznych zostały odniesione do dokładności i dostępności wyznaczenia pozycji. Opracowano autorską metodę, której efektem jest możliwość oceny każdego rozwiązania (systemu) pozycyjnego GNSS (jak i innych) pod kątem spełniania (lub nie) wymagań pozycyjnych przewidzianych dla kategorii IHO. Należy dodać, że metoda wymaga rozległych i rzetelnych badań stacjonarnych, jak i dynamicznych ocenianych systemów, które wykonano w rozprawie względem: systemów DGPS i EGNOS, sieci geodezyjnych GNSS oraz wielosystemowych odbiorników GNSS. Wykazano, że zaproponowana metoda niezawodnościowa jest lepsza od tradycyjnej analizy statystycznej błędu pozycji, bowiem zmienną losową podlegającą analizie jest czas przebywania w stanach zdatności i niezdatności, a nie błąd pozycji, który nie zależy od czasu. Dzięki temu możliwym było obliczenie "zapasu dostępności" konkretnego rozwiązania pozycyjnego, definiowanego przez różnicę pomiędzy dostępnością błędu pozycji dla 95% pomiarów (w podejściu klasycznym błędami są: DRMS, 2DRMS, R68, R95 i inne) a wartością dostępności wyznaczoną metodą niezawodnościową.

Elementami badawczymi o charakterze poznawczym rozprawy, zdaniem Autora, są:

- Opracowanie autorskiej metody opartej na ogólnej teorii niezawodności, której efektem jest możliwość oceny każdego rozwiązania (systemu) pozycyjnego GNSS (jak i innych) pod kątem spełniania (lub nie) wymagań pozycyjnych przewidzianych dla kategorii IHO.
- Przeprowadzenie rozległych badań eksperymentalnych (stacjonarnych i dynamicznych) różnych systemów pozycjonowania GNSS (DGPS, EGNOS, multi-GNSS i RTN), które umożliwiły zastosowanie opracowanego modelu niezawodnościowego wraz ze wskazaniem aktualnych możliwości ww. systemów pod kątem spełniania (lub nie) wymagań pozycyjnych przewidzianych dla kategorii IHO.
- Wieloaspektowe porównanie metod (geodezyjnych i hydrograficznych) stosowanych do wyznaczania przebiegu linii podstawowej morza terytorialnego. Badania objęły zarówno analizę aspektów eksploatacyjnych, naukowych, jak i efektywność realizacji prac pomiarowych.

Rozprawa posiada również szereg wniosków utylitarnych o charakterze praktycznym. Szczególnie istotne wnioski dotyczą rekomendacji zastosowania bezzałogowych jednostek hydrograficznych do realizacji pomiarów, które omówiono i podsumowano w podrozdziale 4.2.4. Zdaniem Autora zaskakujące wyniki otrzymano w badaniach wielosystemowych odbiorników GNSS, gdzie różnice w uzyskanych dostępnościach podczas pomiarów stacjonarnych i dynamicznych sięgały nawet kilkudziesięciu procent, dowodząc tym samym, że jednym z wielu aspektów przyszłych badań będzie próba odpowiedzenia na pytanie o przyczynę takiego stanu rzeczy.

Bibliografia

- 1. Abidin H.Z., Sutisna S., Padmasari T., Villanueva K.J., Kahar J., 2005, Geodetic Datum of Indonesian Maritime Boundaries: Status and Problems, Marine Geodesy, Vol. 28(4), pp. 291-304.
- 2. Aina Y.A., Hasan M.M., Kheder K., 2012, Preliminary Evaluation of EGNOS Performance for GIS Applications, Yanbu Journal of Engineering and Science, Vol. 4, pp. 57-64.
- 3. Albuquerque M., Alves D.C.L., Espinoza J.M.A., Oliveira U.R., Simoes R.S., 2018, Determining Shoreline Response to Meteo-Oceanographic Events Using Remote Sensing and Unmanned Aerial Vehicle (UAV): Case Study in Southern Brazil, Journal of Coastal Research, No. 85, pp. 766-770.
- 4. Aucelli P., Cinque A., Mattei G., Pappone G., 2016, Historical Sea Level Changes and Effects on the Coasts of Sorrento Peninsula (Gulf of Naples): New Constrains from Recent Geoarchaeological Investigations, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 463, pp. 112-125.
- 5. **Bakuła M., 2013**, Study of Reliable Rapid and Ultrarapid Static GNSS Surveying for Determination of the Coordinates of Control Points in Obstructed Conditions, Journal of Surveying Engineering, Vol. 139(4), pp. 188-193.
- 6. **Bakuła M., Pelc-Mieczkowska R., Walawski M., 2012**, Reliable and Redundant RTK Positioning for Applications in Hard Observational Conditions, Artificial Satellites, Vol. 47(1), pp. 23-33.
- 7. Banachowicz A., Bober R., Szewczuk T., Wolski A., 2014, Monitoring of Cargo Transport in Urban Areas Using GPS/EGNOS Technologies as Part of the Safety System, Procedia – Social and Behavioral Sciences, Vol. 151, pp. 371-380.
- 8. **Baptista P., Bastos L., Bernardes C., Cunha T., Dias J., 2008**, Monitoring Sandy Shores Morphologies by DGPS – A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models, Journal of Coastal Research, Vol. 24(6), pp. 1516-1528.
- 9. **Baran L.W., Oszczak S., Zieliński J.B., 2008**, Wykorzystanie technik kosmicznych w geodezji i nawigacji w Polsce, Nauka, Nr 4, str. 43-63.
- 10. **Baran L.W., Zieliński J.B., 1998**, Active GPS Stations as a New Generation of the Geodetic Network, Geodesy and Cartography, Vol. 47, No. 1-2, pp. 33-40.
- 11. **Beazley P.B., 1978**, Maritime Limits and Baselines: A Guide to Their Delineation, The Hydrographic Society, Special Publication No. 2, London.
- 12. **Beazley P.B., 1994**, Technical Aspects of Maritime Boundary Delimitation, Maritime Briefing, Vol. 1(2), Durham.
- 13. **Bierzanek R., Symonides J., 2016**, Prawo międzynarodowe publiczne, Wydawnictwo Wolters Kluwer, Wyd. 8, Warszawa.
- 14. **Bogusz J., Figurski M., Kontny B., Grzempowski P., 2012**, Horizontal Velocity Field Derived from EPN and ASG-EUPOS Satellite Data on the Example of South-Western Part of Poland, Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 9, No. 3(167), pp. 349-357.
- 15. **Boulos M.N.K., Yang S.P., 2013**, Exergames for Health and Fitness: The Roles of GPS and Geosocial Apps, International Journal of Health Geographics, Vol. 12, pp. 18.
- 16. **Bugajski D.R., 2009**, Prawa żeglugowe okrętu w świetle prawa międzynarodowego, Wydawnictwo Naukowe Scholar, Warszawa.
- 17. **Calderbank B., MacLeod A.M., McDorman T.L., Gray D.H., 2006**, Canada's Offshore: Jurisdiction, Rights and Management, Trafford Publishing, 3rd Edition, Victoria.

- 18. **Chen H., Moan T., Verhoeven H., 2009**, Effect of DGPS Failures on Dynamic Positioning of Mobile Drilling Units in the North Sea, Accident Analysis & Prevention, Vol. 41(6), pp. 1164-1171.
- 19. **Chybicki A., 2018**, Three-Dimensional Geographically Weighted Inverse Regression (3GWR) Model for Satellite Derived Bathymetry Using Sentinel-2 Observations, Marine Geodesy, Vol. 41(1), pp. 1-23.
- 20. Ciećko A., Oszczak B., Oszczak S., 2003, Determination of Accuracy and Coverage of Permanent Reference Station DGPS/RTK in Gdynia, Reports on Geodesy, No. 2(65), pp. 45-51.
- 21. **Cosentino R.J., Diggle D.W., Haag M.U., Hegarty C.J., Milbert D., Nagle J., 2005**, Differential GPS, In: Kaplan E.D., Hegarty C.J. (eds.), Understanding GPS Principles and Application (pp. 379-454), Artech House, 2nd Edition, Boston-London.
- 22. **Czaplewski K., 2015**, Global Positioning System: Political Support, Directions of Development, and Expectations, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 9(2), pp. 229-232.
- 23. **Czaplewski K., Goward D., 2016**, Global Navigation Satellite Systems Perspectives on Development and Threats to System Operation, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10(2), pp. 183-192.
- Czaplewski K., Kołaczyński S., Specht C., 2000, Wykorzystanie zestawu fazowego GPS do wyznaczania linii podstawowej i brzegowej morza terytorialnego R.P., Materiały na XII Międzynarodową Konferencję Naukowo-Techniczną "Rola Nawigacji w Zabezpieczeniu Działalności Ludzkiej na Morzu" (Gdynia, Polska), str. 77-86.
- 25. **Czaplewski K., Specht C., 2002**, Determination of Coast and Base Line by GPS Techniques, Navigation and Hydrography, No. 14, pp. 137-144.
- 26. Ćwiąkała P., Gabryszuk J., Krawczyk K., Krzyżek R., Leń P., Oleniacz G., Puniach E., Siejka Z., Wójcik-Leń J., 2015, Technologia GNSS i jej zastosowanie w pomiarach realizacyjnych i kontrolnych, Wyższa Szkoła Inżynieryjno-Ekonomiczna w Rzeszowie, Rzeszów.
- 27. **D'Antonio P., D'Antonio C., Evangelista C., Doddato V., 2013**, Satellite Guidance Systems in Agriculture: Experimental Comparison Between EZ-Steer/RTK and AUTOPILOT/EGNOS, Journal of Agricultural Engineering, Vol. 44(2s), pp. 173-177.
- 28. **da Silva Pereira D.L., Hughes Clarke J.E., 2015**, Improving Shallow Water Multibeam Target Detection at Low Grazing Angles, Proceedings of the U.S. Hydrographic Conference 2015 (National Harbor, USA), pp. 1-21.
- 29. **Deakin R.E., Hunter M.N., Karney C.F.F., 2010**, The Gauss-Krüger Projection, Proceedings of the 23rd Victorian Regional Survey Conference (Warrnambool, Australia), pp. 1-20.
- Di Fazio A., Bettinelli D., Louette E., Mechin J.P., Zazza M., Vecchiarelli P., Domanico L., 2016, European Pathways to Introduce EGNOS and Galileo for Dangerous Goods Transport, Transportation Research Procedia, Vol. 14, pp. 1482-1491.
- 31. **DOALOS, 1982**, United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1982.
- DOALOS, 2019, Chronological Lists of Ratifications of, Accessions and Successions to the Convention and the Related Agreements, <u>https://www.un.org/depts/los/reference_files/chronological_lists_of_ratifications.htm</u> [05.05.2019].

- Donaire-Gonzalez D., Valentin A., de Nazelle A., Ambros A., Carrasco-Turigas G., Seto E., Jerrett M., Nieuwenhuijsen M.J., 2016, Benefits of Mobile Phone Technology for Personal Environmental Monitoring, JMIR mHealth and uHealth, Vol. 4(4), pp. e126.
- 34. **DOS, 1987**, Developing Standard Guidelines for Evaluating Straight Baselines, Limits in the Seas, No. 106, Washington.
- 35. **Dziewicki M., Specht C., 2009**, Position Accuracy Evaluation of the Modernized Polish DGPS, Polish Maritime Research, Vol. 16(4), pp. 57-61.
- 36. **EC, 2018**, European Radio Navigation Plan, Version 1.1.
- 37. **Elema I.A., Kwanten M.C., 2006**, Introduction of Vertical Reference Level Lowest Astronomical Tide (LAT) in the Products of the Netherlands Hydrographic Service, Proceedings of the 15th International Congress of the International Federation of Hydrographic Societies (Antwerp, Belgium), pp. 24-28.
- 38. **El-Hattab A.I., 2014**, Investigating the Effects of Hydrographic Survey Uncertainty on Dredge Quantity Estimation, Marine Geodesy, Vol. 37(4), pp. 389-403.
- 39. **Farboud S., 2012**, Determination of Accurate Sea Border Lines of Countries, Proceedings of the FIG Working Week 2012 (Rome, Italy), pp. 1-10.
- 40. **Fellner R., 2014**, Analysis of the EGNOS/GNSS Parameters in Selected Aspects of Polish Transport, Transport Problems, Vol. 4(9), pp. 27-37.
- 41. **Felski A., Nowak A., 2015**, Has EGNOS Its Own Place in Maritime Navigation?, Proceedings of the 2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (Prague, Czech Republic), pp. 160-165.
- 42. **Furuno, 2019**, Multi-GNSS (Multi-Frequency GNSS), <u>https://www.furuno.com/en/gnss/technical/tec_multi</u> [29.04.2019].
- 43. **Gajderowicz I., 2009**, Odwzorowania kartograficzne: podstawy, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn.
- Galan-Martin D., Marchamalo-Sacristan M., Martinez-Marin R., Sanchez-Sobrino J.A., 2013, Geomatics Applied to Dam Safety DGPS Real Time Monitoring, International Journal of Civil Engineering, Vol. 11(2), pp. 134-141.
- Gartner, 2017, Gartner Says Worldwide Sales of Smartphones Grew 7 Percent in the Fourth Quarter of 2016, <u>http://www.gartner.com/newsroom/id/3609817</u> [27.04.2019].
- 46. Giordano F., Mattei G., Parente C., Peluso F., Santamaria R., 2015, MicroVEGA (Micro Vessel for Geodetics Application): A Marine Drone for the Acquisition of Bathymetric Data for GIS Applications, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 40(5), pp. 123-130.
- 47. **GLA, 2007**, GLA Radio Navigation Plan.
- 48. **Grabski F., 2002**, Semi-markowskie modele niezawodności i eksploatacji, Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa.
- 49. **Grafarend E., Okeke F., 2007**, Transformation of Lambert Conic Conformal Coordinates from a Global Datum to a Local Datum, Marine Geodesy, Vol. 30(4), pp. 297-313.
- 50. **Grunwald G., Bakuła M., Ciećko A., 2016**, Study of EGNOS Accuracy and Integrity in Eastern Poland, Aeronautical Journal, Vol. 120(1230), pp. 1275-1290.
- 51. **Grządziel A., 2006**, Echosonda jednowiązkowa w pomiarach hydrograficznych, Przegląd Morski, Nr 4, str. 11-28.
- 52. **Grządziel A., Wąż M., 2016**, Estimation of Effective Swath Width for Dual-Head Multibeam Echosounder, Annual of Navigation, No. 23, pp. 173-183.
- 53. **GSA, 2014**, EGNOS Data Access Service (EDAS) Service Definition Document, v2.1.

- 54. **GSA, 2016**, What is SBAS?, <u>https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas</u> [01.05.2019].
- 55. **GSA, 2017**, EGNOS Open Service (OS) Service Definition Document, v2.3.
- 56. **GSA, 2019**, EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document, v3.3.
- 57. **Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., 1994**, Global Positioning System: Theory and Practice, Springer-Verlag, 3rd Edition, New York.
- 58. **Hogrefe K.R., Wright D.J., Hochberg E.J., 2008**, Derivation and Integration of Shallow-Water Bathymetry: Implications for Coastal Terrain Modeling and Subsequent Analyses, Marine Geodesy, Vol. 31(4), pp. 299-317.
- 59. **Horemuz M., 1999**, Error Calculation in Maritime Delimitation Between States with Opposite or Adjacent Coasts, Marine Geodesy, Vol. 22(1), pp. 1-17.
- 60. **IALA, 2015**, IALA Recommendation R-121 on the Performance and Monitoring of DGNSS Services in the Frequency Band 283.5-325 kHz, Edition 2.0.
- 61. **IHO, 2008**, IHO Standards for Hydrographic Surveys, Special Publication No. 44, 5th Edition.
- 62. **IMGW-PIB, 2015**, Vademecum Pomiary i obserwacje hydrologiczne, <u>http://www.imgw.pl/wp-content/uploads/2017/03/Vadamecum-METEO-</u> wer.1 16092015 cmok.pdf [03.05.2019].
- 63. IMGW-PIB, 2017, Prognoza rybacka, http://baltyk.pogodynka.pl/index.php?page=2&subpage=6&data=25 [27.04.2019].
- 64. IMO, 2011, Worldwide Radionavigation System, Resolution A.1046(27).
- 65. Jang W.S., Park H.S., Park S.G., 2018, Analysis of Positioning Accuracy of PPP, VRS, DGPS in Coast and Inland Water Area of South Korea, Journal of Coastal Research, No. 85, pp. 1276-1280.
- 66. Jang W.S., Park H.S., Seo K.Y., Kim Y.K., 2016, Analysis of Positioning Accuracy Using Multi Differential GNSS in Coast and Port Area of South Korea, Journal of Coastal Research, No. 75, pp. 1337-1341.
- 67. **Januszewski J., 2014**, Perspektywy rozwoju nawigacyjnych i wspomagających systemów satelitarnych w bliskiej i dalszej przyszłości, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, Nr 5, str. 116-123.
- 68. **Ji S., Gao Z., Wang W., 2015**, M-DGPS: Mobile Devices Supported Differential Global Positioning System Algorithm, Arabian Journal of Geosciences, Vol. 8(9), pp. 6667-6675.
- 69. **Jingsheng Z., Yi L., 2005**, Recognition and Measurement of Marine Topography for Sounding Generalization in Digital Nautical Chart, Marine Geodesy, Vol. 28(2), pp. 167-174.
- Józefowicz M., 2006, Stanowisko USA w sprawie konwencji o prawie morza, <u>http://www.e-</u> polityka.pl/a.1109.d.40.Stanowisko USA w sprawie konwencji o prawie morza cz <u>1 .html</u> [05.05.2019].
- 71. **Kabziński P., Weintrit A., 2008**, Zastosowanie aplikacji GIS w zagadnieniach wyznaczania granic morskich, Przegląd Hydrograficzny, Nr 4, str. 86-12.
- 72. **Kadaj R.J., 2002**, Polskie układy współrzędnych. Formuły transformacyjne, algorytmy i programy, <u>http://www.geonet.net.pl/images/2002_12_uklady_wspolrz.pdf</u> [23.04.2019].
- 73. **Kapoor D.C., Kerr A.J., 1986**, A Guide to Maritime Boundary Delimitation, Carswell, Toronto.

- 74. **KE, 2011**, Rozporządzenie Komisji (UE) nr 102/2011 z dnia 4 lutego 2011 r. zmieniające rozporządzenie (UE) nr 1089/2010 w sprawie wykonania dyrektywy 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w zakresie interoperacyjności zbiorów i usług danych przestrzennych.
- 75. **Kierzkowski W., 1984a**, Pomiary morskie. Cz. I. Pomiary hydrograficzne. T. 1, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte, Gdynia.
- 76. **Kierzkowski W., 1984b**, Pomiary morskie. Cz. I. Pomiary hydrograficzne. T. 2, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte, Gdynia.
- 77. **Kim H., Lee S.B., Min K.S., 2017**, Shoreline Change Analysis Using Airborne LiDAR Bathymetry for Coastal Monitoring, Journal of Coastal Research, No. 79, pp. 269-273.
- Kim J., Song J., No H., Han D., Kim D., Park B., Kee C., 2016, Accuracy Improvement of DGPS for Low-Cost Single-Frequency Receiver Using Modified Flachen Korrektur Parameter Correction, ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol. 6(7), pp. 222.
- 79. **Kim Y.W., 2014**, DGPS Service Analysis in the Korean Coastal Ferry Route, Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 18(9), pp. 2073-2078.
- 80. Klein N., 2014, Litigating International Law Disputes: Weighing the Options, Cambridge University Press, New York.
- 81. **Korpilo S., Virtanen T., Lehvavirta S., 2017**, Smartphone GPS Tracking Inexpensive and Efficient Data Collection on Recreational Movement, Landscape and Urban Planning, Vol. 157, pp. 608-617.
- 82. **Kulawiak M., Chybicki A., 2018**, Application of Web-GIS and Geovisual Analytics to Monitoring of Seabed Evolution in South Baltic Sea Coastal Areas, Marine Geodesy, Vol. 41(4), pp. 405-426.
- 83. **Kum B.C., Shin D.H., Lee J.H., Moh T.J., Jang S., Lee S.Y., Cho J.H., 2018**, Monitoring Applications for Multifunctional Unmanned Surface Vehicles in Marine Coastal Environments, Journal of Coastal Research, No. 85, pp. 1381-1385.
- 84. **Kurałowicz Z., Słomska A., 2014**, Powierzchnie i wysokościowe układy odniesienia obserwacje na stacjach mareograficznych Kronsztad i Amsterdam, Inżyniera Morska i Geotechnika, Nr 5, str. 377-384.
- 85. **Kurałowicz Z., Słomska A., 2015**, Stacje mareograficzne i wybrane wysokościowe układy odniesienia w Europie, Inżyniera Morska i Geotechnika, Nr 6, str. 843-853.
- 86. Le Faucheur A., Chaudru S., de Mullenheim P.Y., Noury-Desvaux B., 2017, Impact of the EGNOS Feature and Environmental Conditions on GPS Accuracy During Outdoor Walking, Proceedings of the 5th International Conference on Ambulatory Monitoring of Physical Activity and Movement (Bethesda, USA).
- 87. Liang J., Zhang J., Ma Y., Zhang C.Y., 2017, Derivation of Bathymetry from High-Resolution Optical Satellite Imagery and USV Sounding Data, Marine Geodesy, Vol. 40(6), pp. 466-479.
- 88. Lihua Z., Shuaidong J., Rencan P., Jian D., Ning L., 2013, A Quantitative Method to Control and Adjust the Accuracy of Adaptive Grid Depth Modeling, Marine Geodesy, Vol. 36(4), pp. 408-427.
- 89. Liu J., Wang L., Teng F., Li D., Wang X., Cao H., 2015, Crop Area Ground Sample Survey Using Google Earth Image-Aided, Transactions of the Chinese Society of Agricultural

Engineering, Vol. 31(24), pp. 149-154.

- 90. Liu W., Shi X., Zhu F., Tao X., Wang F., 2019, Quality Analysis of Multi-GNSS Raw Observations and a Velocity-Aided Positioning Approach Based on Smartphones, Advances in Space Research, Vol. 63(8), pp. 2358-2377.
- 91. Lubis M.Z., Anggraini K., Kausarian H., Pujiyati S., 2017, Review: Marine Seismic and Side-Scan Sonar Investigations for Seabed Identification with Sonar System, Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology, Vol. 2(2), pp. 166-170.
- 92. Lucieer V., Huang Z., Siwabessy J., 2016, Analyzing Uncertainty in Multibeam Bathymetric Data and the Impact on Derived Seafloor Attributes, Marine Geodesy, Vol. 39(1), pp. 32-52.
- 93. **Makar A., 2008**, Method of Determination of Acoustic Wave Reflection Points in Geodesic Bathymetric Surveys, Annual of Navigation, No. 14, pp. 1-89.
- 94. **Makar A., 2016**, The Sea Bottom Surface Described by Coons Pieces, Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, No. 45(117), pp. 187-190.
- 95. **Makar A., Naus K., 2003**, Pozyskiwanie danych do tworzenia numerycznego modelu dna, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 13A, str. 163-170.
- 96. **Marine Technology, 2019**, HYDRODRON, <u>http://www.marinetechnology.pl/hydrodron.html</u> [29.04.2019].
- 97. **Misiak W., Felczak J., 2013**, Morskie granice i obszary przygraniczne, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: seria Organizacja i Zarządzanie, z. 65, str. 237-255.
- 98. **Moore T., Hill C., Monteiro L., 2001**, Is DGPS Still a Good Option for Mariners?, The Journal of Navigation, Vol. 54(3), pp. 437-446.
- 99. **Muhammad S., Tian L., 2015**, Hunza, Gilgit and Astore Valley Glacier Elevation Changes During 2003 to 2014 Using ICESat and DGPS Data, Proceedings of the International Symposium on Glaciology in High Mountain Asia (Kathmandu, Nepal).
- 100. **NIMA, 2004**, Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems, NIMA TR8350.2, 3rd Edition.
- 101. NOAA, 2017, NOS Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables.
- 102. NovAtel Positioning Leadership, 2003, GPS Position Accuracy Measures, https://www.novatel.com/assets/Documents/Bulletins/apn029.pdf [27.04.2019].
- 103. Nowak A., Naus K., 2014, Dostępność poprawek sieciowych w pomiarach GNSS/RTN na Zatoce Gdańskiej, w kontekście określania parametrów ruchu statku, Logistyka, Nr 6, str. 7913-7922.
- 104. **Oliveira J.M.V., Tiberius C.C.J.M., 2008**, EGNOS Performance for Landing, European Journal of Navigation, Vol. 6(2), pp. 34-39.
- 105. **Ostrowska M., Darecki M., Kowalewski M., Krężel A., Dera J., 2015a**, System SatBałtyk satelitarny monitoring środowiska Bałtyku struktura, funkcjonowanie, możliwości operacyjne, Instytut Oceanologii PAN, Sopot.
- 106. **Ostrowska M., Darecki M., Krężel A., Ficek D., Furmańczyk K., 2015b**, Practical Applicability and Preliminary Results of the Baltic Environmental Satellite Remote Sensing System (Satbałtyk), Polish Maritime Research, Vol. 22(3), pp. 43-49.
- 107. **Park J.K., Jung K.Y., 2016**, Availability Evaluation of DGPS and Smart Device for Field Survey, Asia-Pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology, Vol. 6(12), pp. 631-638.
- 108. Perrin O., Scaramuzza M., Buchanan T., Brocard D., 2006, Flying EGNOS Approaches in the Swiss Alps, The Journal of Navigation, Vol. 59(2), pp. 177-185.

- 109. **Peters R., Ledoux H., Meijers M., 2014**, A Voronoi-Based Approach to Generating Depth-Contours for Hydrographic Charts, Marine Geodesy, Vol. 37(2), pp. 145-166.
- Pew Research Center, 2016, Smartphone Ownership and Internet Usage Continues to Climb in Emerging Economies, <u>http://www.pewglobal.org/2016/02/22/smartphone-ownership-and-internet-usage-continues-to-climb-in-emerging-economies</u> [27.04.2019].
- 111. Pina-Garcia F., Pereda-Garcia R., de Luis-Ruiz J.M., Perez-Alvarez R., Husillos-Rodriguez R., 2016, Determination of Geometry and Measurement of Maritime-Terrestrial Lines by Means of Fractals: Application to the Coast of Cantabria (Spain), Journal of Coastal Research, Vol. 32(5), pp. 1174-1183.
- 112. **Połatyńska J., 2008**, Rozdział 5 Prawo morza, <u>http://www.grocjusz.edu.pl/Materials/skrypt/05.pdf</u> [05.05.2019].
- 113. **Przestrzelski P., Bakuła M., 2014**, Performance of Real-Time Network Code DGPS Services of ASG-EUPOS in North-Eastern Poland, Technical Sciences, No. 17(3), pp. 191-207.
- 114. **Rada Ministrów RP, 2012**, Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 15 października 2012 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych (Dz. U. z 2012 r. poz. 1247).
- 115. **Rada Ministrów RP, 2015**, Uzasadnienie do projektu rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie szczegółowego przebiegu linii podstawowej, zewnętrznej granicy morza terytorialnego oraz zewnętrznej granicy strefy przyległej Rzeczypospolitej Polskiej, https://www.senat.gov.pl/download/gfx/senat/pl/senatposiedzeniatematy/2737/drukisejmowe/3661.pdf [03.05.2019].
- 116. Rada Ministrów RP, 2017, Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 13 stycznia 2017 r. w sprawie szczegółowego przebiegu linii podstawowej, zewnętrznej granicy morza terytorialnego oraz zewnętrznej granicy strefy przyległej Rzeczypospolitej Polskiej (Dz. U. z 2017 r. poz. 183).
- 117. **Rao B., Minakakis L., 2003**, Evolution of Mobile Location-Based Services, Communications of the ACM – Mobile Computing Opportunities and Challenges, Vol. 46(12), pp. 61-65.
- 118. Ratheesh R., Ritesh A., Remya P.G., Nagakumar K.Ch.V., Demudu G., Rajawat A.S., Nair B., Nageswara Rao K., 2018, Modelling Coastal Erosion: A Case Study of Yarada Beach Near Visakhapatnam, East Coast of India, Ocean & Coastal Management, Vol. 146, pp. 239-248.
- 119. **Rathour S.S., Boyali A., Zheming L., Mita S., John V., 2017**, A Map-Based Lateral and Longitudinal DGPS/DR Bias Estimation Method for Autonomous Driving, International Journal of Machine Learning and Computing, Vol. 7(4), pp. 67-71.
- 120. **Remy C.E., 1992**, U.S. Territorial Sea Extension: Jurisdiction and International Environmental Protection, Fordham International Law Journal, Vol. 16(4), pp. 1208-1252.
- 121. **Retscher G., 2001**, Analysis of the System Performance of LADGPS and WADGPS Services in Europe, Journal of Geospatial Engineering, Vol. 3(2), pp. 97-107.
- 122. Romano A., Duranti P., 2012, Autonomous Unmanned Surface Vessels for Hydrographic Measurement and Environmental Monitoring, Proceedings of the FIG Working Week 2012 (Rome, Italy), pp. 1-15.
- 123. **Rufe R., 2003**, Statement of Roger Rufe: On the U.N. Convention on the Law of the Sea (October 21, 2003),

https://www.foreign.senate.gov/imo/media/doc/RufeTestimony031021.pdf [05.05.2019].

- 124. **Sassais R., Makar A., 2011**, Methods to Generate Numerical Models of Terrain for Spatial ENC Presentation, Annual of Navigation, No. 18, pp. 1-13.
- 125. Sato K., Tatashita H., Yaka W., Kakimoto H., Kogure S., 2014, Asia Oceania Multi-GNSS Demonstration Campaign, <u>https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/ppt/ts03b/TS03B</u> sato 7351 ppt.pdf [29.04.2019].
- 126. **Sejm RP, 1988**, Konwencja w sprawie przeciwdziałania bezprawnym czynom przeciwko bezpieczeństwu żeglugi morskiej, sporządzona w Rzymie dnia 10 marca 1988 r. (Dz. U. z 1994 r. nr 129 poz. 635).
- 127. **Sejm RP, 1990**, Ustawa z dnia 12 października 1990 r. o Straży Granicznej (Dz. U. z 2019 r. poz. 147, 125, 235).
- 128. **Sejm RP, 1991**, Ustawa z dnia 21 marca 1991 r. o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej (Dz. U. z 2018 r. poz. 2214, z 2019 r. poz. 125, 730).
- 129. **Shalowitz A.L., 1962**, Shore and Sea Boundaries, U.S. Government Printing Office, Vol. 1, Washington.
- 130. SMA, 2009, Swedish Radio Navigation Plan, Policy and Plans.
- 131. **Specht C., 2003**, Availability, Reliability and Continuity Model of Differential GPS Transmission, Annual of Navigation, No. 5, pp. 1-85.
- 132. Specht C., 2007, System GPS, Wydawnictwo Bernardinum, Pelplin.
- Specht C., 2009, Zastosowanie aktywnej sieci geodezyjnej ASG-EUPOS w nawigacji, W: Kawalec A. (red.), Urządzenia i systemy radioelektroniczne – wybrane problemy (str. 361-367), Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie, Warszawa.
- 134. **Specht C., 2011**, Accuracy and Coverage of the Modernized Polish Maritime Differential GPS System, Advances in Space Research, Vol. 47(2), pp. 221-228.
- 135. Specht C., Dąbrowski P., Specht M., Koc W., Chrostowski P., Szmagliński J., Dera M., Skóra M., 2016a, Mobilne pomiary satelitarne na liniach Pomorskiej Kolei Metropolitalnej, Przegląd Komunikacyjny, Nr 5, str. 9-16.
- 136. **Specht C., Dąbrowski P.S., Pawelski J., Specht M., Szot T., 2019a**, Comparative Analysis of Positioning Accuracy of GNSS Receivers of Samsung Galaxy Smartphones in Marine Dynamic Measurements, Advances in Space Research, Vol. 63(9), pp. 3018-3028.
- 137. Specht C., Dąbrowski P.S., Specht M., Makar A., Marchel Ł., Skóra M., Cywiński P., Szychowski P., 2018a, Badania efektu Tombolo mariny w Sopocie, <u>https://www.researchgate.net/publication/328998312 Badania efektu Tombolo mariny w Sopocie</u> [08.05.2019].
- 138. Specht C., Koc W., Smolarek L., Grządziela A., Szmagliński J., Specht M., 2014, Diagnostics of the Tram Track Shape with the Use of the Global Positioning Satellite Systems (GPS/GLONASS) Measurements with a 20 Hz Frequency Sampling, Journal of Vibroengineering, Vol. 16(6), pp. 3076-3085.
- 139. **Specht C., Makar A., Specht M., 2018b**, Availability of the GNSS Geodetic Networks Position During the Hydrographic Surveys in the Ports, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 12(4), pp. 657-661.

- 140. **Specht C., Mania M., Skóra M., Specht M., 2015**, Accuracy of the GPS Positioning System in the Context of Increasing the Number of Satellites in the Constellation, Polish Maritime Research, Vol. 22(2), pp. 9-14.
- 141. **Specht C., Nowak A., 2012**, Koncepcja stacji monitorującej aktywnej sieci geodezyjne na potrzeby nawigacji i monitorowania ruchu obiektów, TTS Technika Transportu Szynowego, Nr 9, str. 3677-3686.
- 142. **Specht C., Pawelski J., Smolarek L., Specht M., Dąbrowski P., 2019b**, Assessment of the Positioning Accuracy of DGPS and EGNOS Systems in the Bay of Gdansk Using Maritime Dynamic Measurements, The Journal of Navigation, Vol. 72(3), pp. 575-587.
- 143. **Specht C., Rudnicki J., 2016**, A Method for the Assessing of Reliability Characteristics Relevant to an Assumed Position-Fixing Accuracy in Navigational Positioning Systems, Polish Maritime Research, Vol. 23(3), pp. 20-27.
- 144. **Specht C., Skóra M., 2009**, Analiza porównawcza wybranych aktywnych sieci geodezyjnych, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, Nr 3(178), str. 39-54.
- 145. **Specht C., Specht M., Cywiński P., Skóra M., Marchel Ł., Szychowski P., 2019c**, A New Method for Determining the Territorial Sea Baseline Using an Unmanned, Hydrographic Surface Vessel, Journal of Coastal Research, pp. 1-12.
- 146. **Specht C., Specht M., Dąbrowski P., 2017a**, Comparative Analysis of Active Geodetic Networks in Poland, Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO SGEM2017 (Albena, Bulgaria), pp. 163-176.
- 147. **Specht C., Świtalski E., Specht M., 2017b**, Application of an Autonomous/Unmanned Survey Vessel (ASV/USV) in Bathymetric Measurements, Polish Maritime Research, Vol. 24(3), pp. 36-44.
- 148. **Specht C., Weintrit A., Specht M., 2016b**, A History of Maritime Radio-Navigation Positioning Systems Used in Poland, The Journal of Navigation, Vol. 69(3), pp. 468-480.
- 149. Specht C., Weintrit A., Specht M., 2016c, Determination of the Territorial Sea Baseline – Aspect of Using Unmanned Hydrographic Vessels, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10(4), pp. 649-654.
- 150. **Specht C., Weintrit A., Specht M., Dąbrowski P., 2016d**, Wyznaczanie linii podstawowej i zewnętrznej granicy morza terytorialnego aspekt metodyczny, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Nr 97, str. 185-200.
- 151. **Specht C., Weintrit A., Specht M., Dąbrowski P., 2017c**, Determination of the Territorial Sea Baseline Measurement Aspect, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 95, pp. 1-10.
- 152. **Specht M., 2015**, The Evaluation of the Positioning Accuracy of the EGNOS and DGPS Systems Based on the Long-Term Measurements in the Years 2006-2014, Polish Cartographical Review, Vol. 47(2), pp. 99-108.
- 153. **Specht M., 2016**, Wyznaczanie współrzędnych punktów linii podstawowej morza terytorialnego RP, Praca magisterska, Akademia Morska w Gdyni, Gdynia.
- 154. Specht M., Specht C., 2018a, Hydrographic Survey Planning for the Determination of Territorial Sea Baseline on the Example of Selected Polish Sea Areas, Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO SGEM2018 (Albena, Bulgaria), pp. 829-837.
- 155. Specht M., Specht C., 2018b, The Use of GNSS Geodetic Networks on the Approach to the Ports – Gulf of Gdańsk Study, Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO SGEM2018 (Albena, Bulgaria), pp.

1075-1082.

- 156. **Specht M., Szot T., 2012**, Accuracy Analysis of GPS Sport Receivers in Dynamic Measurements, Annual of Navigation, No. 19(1), pp. 165-176.
- 157. **Ssebazza L., Pan Y.J., 2015**, DGPS-Based Localization and Path Following Approach for Outdoor Wheeled Mobile Robots, International Journal of Robotics and Automation, Vol. 30(1), pp. 13-25.
- 158. **Stacy E.W., 1962**, A Generalization of the Gamma Distribution, Annals of Mathematical Statistics, Vol. 33(3), pp. 1187-1192.
- 159. **Stateczny A., Grońska D., Motyl W., 2018a**, Hydrodron New Step for Professional Hydrography for Restricted Waters, Proceedings of the 2018 Baltic Geodetic Congress (Gdańsk, Poland), pp. 226-230.
- 160. Stateczny A., Włodarczyk-Sielicka M., Grońska D., Motyl W., 2018b, Multibeam Echosounder and LiDAR in Process of 360-Degree Numerical Map Production for Restricted Waters with HydroDron, Proceedings of the 2018 Baltic Geodetic Congress (Gdańsk, Poland), pp. 288-292.
- Statista, 2017, Number of Smartphone Users Worldwide from 2014 to 2020 (in Billions), <u>https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide</u> [27.04.2019].
- 162. Stefańska B., 2012, Prawo morza a "Prawa" terrorystów, Logistyka, Nr 5, str. 755-763.
- 163. **Stewart R.H., 1997-2000**, Introduction to Physical Oceanography, Texas A & M University, Texas.
- 164. **Stępniak K., Baryła R., Wielgosz P., Kurpiński G., 2013**, Optimal Data Processing Strategy in Precise GPS Leveling Networks, Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 10, No. 4(172), pp. 443-452.
- 165. Suhari K.T., Karim H., Gunawan P.H., Purwanto H., 2017, Small ROV Marine Boat for Bathymetry Surveys of Shallow Waters – Potential Implementation in Malaysia, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 42(4), pp. 201-208.
- 166. Sui H., Zhu X., Zhang A., 2005, A System for Fast Cartographic Sounding Selection, Marine Geodesy, Vol. 28(2), pp. 159-165.
- 167. **Sulewski P., 2000**, Zastosowanie numerycznych metod estymacji uogólnionego rozkładu gamma w badaniach niezawodnościowych, Praca doktorska, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa.
- 168. Szot T., Specht C., Specht M., Dąbrowski P.S., 2019, Comparative Analysis of Positioning Accuracy of Samsung Galaxy Smartphones in Stationary Measurements, PLoS ONE, Vol. 14(4), pp. e0215562.
- 169. **Śniegocki H., Specht C., Specht M., 2014**, Testing Accuracy of Maritime DGPS System Based on Long-Term Measurements Campaigns Over the Years 2006-2014, International Journal of Civil Engineering and Technology, Vol. 5(10), pp. 1-8.
- 170. **Talley L.D., Pickard G.L., Emery W.J., Swift J.H., 2011**, Descriptive Physical Oceanography: An Introduction, Academic Press, 6th Edition, Amsterdam-Boston.
- 171. **U.S. DoD, 1993**, Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification, 1st Edition.
- 172. **U.S. DoD, 2001**, Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 3rd Edition.
- 173. **U.S. DoD, 2008**, Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 4th Edition.

- 174. U.S. DoD, U.S. DHS, U.S. DOT., 2017, 2017 Federal Radionavigation Plan.
- 175. **UKE, 2018**, Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w Polsce w 2017 r., <u>https://www.uke.gov.pl/download/gfx/uke/pl/defaultaktualnosci/36/93/1/raport o s</u> <u>tanie rynku telekomunikacyjnego - 2017 r..pdf</u> [29.04.2019].
- 176. UKHO, 2019, ADMIRALTY Tide Tables.
- 177. **UN, 1958**, Convention on the Territorial Sea and the Contiguous Zone.
- 178. **UN, 1989**, The Law of the Sea. Baselines: An Examination of the Relevant Provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea, UN, New York.
- 179. UN, 2000, Handbook on the Delimitation of Maritime Boundaries, UN, New York.
- 180. USACE, 2013, EM 1110-2-1003 USACE Standards for Hydrographic Surveys.
- 181. van Diggelen F., 2007, GNSS Accuracy: Lies, Damn Lies, and Statistics, GPS World, Vol. 18(1), pp. 26-32.
- 182. Vetrella A.R., Fasano G., Accardo D., Moccia A., 2016, Differential GNSS and Vision-Based Tracking to Improve Navigation Performance in Cooperative Multi-UAV Systems, Sensors, Vol. 16(12), pp. 2164.
- 183. **Wajszczak E., Galas D., 2013**, EGNOS Use of GPS System for Approach Procedures, Advances in Science and Technology Research Journal, Vol. 7(17), pp. 62-65.
- 184. Wang L., Groves P.D., Ziebart M.K., 2013, Urban Positioning on a Smartphone: Real-Time Shadow Matching Using GNSS and 3D City Models, Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013) (Nashville, USA), pp. 1606-1619.
- 185. Ward R.D., Burnside N.G., Joyce C.B., Sepp K., Teasdale P.A., 2016, Improved Modelling of the Impacts of Sea Level Rise on Coastal Wetland Plant Communities, Hydrobiologia, Vol. 774(1), pp. 203-216.
- 186. Warnasuriya T.W.S., Gunaalan K., Gunasekara S.S., 2018, Google Earth: A New Resource for Shoreline Change Estimation Case Study from Jaffna Peninsula, Sri Lanka, Marine Geodesy, Vol. 41(6), pp. 1-35.
- 187. WCNJiK, 2009a, PDNO-06-A072:2009. Hydrografia morska Organizacja i zasady prowadzenia badań.
- 188. **WCNJiK, 2009b**, PDNO-06-A073:2009. Hydrografia morska Zasady gromadzenia danych i przedstawianie wyników.
- 189. Weintrit A., Specht M., 2016, Wyznaczanie linii podstawowej morza terytorialnego – aspekt prawny, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, Nr 97, str. 177-184.
- 190. Whelan B., Taylor J., 2013, Precision Agriculture for Grain Production Systems, CSIRO Publishing, Clayton.
- 191. Wiehe S.E., Carroll A.E., Liu G.C., Haberkorn K.L., Hoch S.C., Wilson J.S., Fortenberry J.D., 2008, Using GPS-Enabled Cell Phones to Track the Travel Patterns of Adolescents, International Journal of Health Geographics, Vol. 7, pp. 22.
- 192. **Wilson W.D., 1962**, Extrapolation of the Equation for the Speed of Sound in Sea Water, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 34(6), pp. 866.
- 193. **Wolny B., 2004**, Geodezja i kartografia na obszarze morza terytorialnego, <u>http://www.geodezja-szczecin.org.pl/Grafika/wolny/morze.pdf</u> [05.05.2019].
- 194. Woźniak B., Bradtke K., Derecki M., Dera M., Dudzińska-Nowak J., Dzierzbicka-Głowacka L., Ficek D., Furmańczyk K., Kowalewski M., Krężel A., Majchrowski R., Ostrowska M., Paszkuta M., Stoń-Egiert J., Stramska M., Zapadka T., 2011a, SatBałtyk – A Baltic Environmental Satellite Remote Sensing System – An Ongoing Project in

Poland. Part 1: Assumptions, Scope and Operating Range, Oceanologia, Vol. 53(4), pp. 897-924.

- 195. Woźniak B., Bradtke K., Derecki M., Dera M., Dudzińska-Nowak J., Dzierzbicka-Głowacka L., Ficek D., Furmańczyk K., Kowalewski M., Krężel A., Majchrowski R., Ostrowska M., Paszkuta M., Stoń-Egiert J., Stramska M., Zapadka T., 2011b, SatBałtyk – A Baltic Environmental Satellite Remote Sensing System – An Ongoing Project in Poland. Part 2: Practical Applicability and Preliminary Results, Oceanologia, Vol. 53(4), pp. 925-958.
- 196. **Yoon D., Kee C., Seo J., Park B., 2016**, Position Accuracy Improvement by Implementing the DGNSS-CP Algorithm in Smartphones, Sensors, Vol. 16(6), pp. 910.
- 197. Zalewski P., Gucma L., Born A., Urbańska K., Schlueter S., Born A., Poretta M., 2015, Assumptions of Full Mission Ship Bridge Simulation Including EGNOS, Proceedings of the 2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (Prague, Czech Republic).
- 198. Zhu F., Tao X., Liu W., Shi X., Wang F., Zhang X., 2019, Walker: Continuous and Precise Navigation by Fusing GNSS and MEMS in Smartphone Chipsets for Pedestrians, Remote Sensing, Vol. 11(2), pp. 139.

Wykaz rysunków

Rys. 1.1. Mapa przedstawiająca państwa będące stronami konwencji o prawie morza	
i państwa niebędące jej stronami1	2
Rys. 1.2. Granice obszarów morskich (opracowanie własne na podstawie: [Rada Ministrów	
RP, 2015])1	4
Rys. 1.3. Zmiana poziomu odniesienia na przykładzie Holandii (opracowanie własne na	
podstawie: [Elema I.A., Kwanten M.C., 2006])1	5
Rys. 1.4. Łańcuch wysp, który nie może być objęty prostymi liniami podstawowymi1	7
Rys. 1.5. Graficzna interpretacja art. 10 konwencji UNCLOS (opracowanie własne na	
podstawie: [Calderbank B. i in., 2006])1	8
Rys. 1.6. Wyznaczanie linii podstawowej zatoki1	9
Rys. 1.7. Wyznaczanie zewnętrznej granicy morza terytorialnego metodą linii jednakowej	
(opracowanie własne na podstawie: [Calderbank B. i in., 2006])	0
Rys. 1.8. Wyznaczanie zewnętrznej granicy morza terytorialnego metodą linii kombinacyjnej	
(opracowanie własne na podstawie: [Calderbank B. i in., 2006])	0
Rys. 1.9. Wyznaczanie zewnętrznej granicy morza terytorialnego metodą linii intersekcyjnej	
(opracowanie własne na podstawie: [Calderbank B. i in., 2006])	1
Rys. 1.10. Delimitacja morza terytorialnego między państwami (opracowanie własne na	
podstawie: [Calderbank B. i in., 2006])2	2
Rys. 1.11. Przebieg linii podstawowej morza terytorialnego Rzeczypospolitej Polskiej [Rada	
Ministrów RP, 2017]	3
Rys. 1.12. Przebieg zewnętrznej granicy morza terytorialnego Rzeczypospolitej Polskiej [Rad	a
Ministrów RP, 2017]	3
Rys. 1.13. Układ profili podstawowych (kolor czerwony) oraz kontrolnych (kolor zielony) przy	1
wyznaczaniu linii podstawowej morza terytorialnego RP dla akwenu nr 22	6
Rys. 1.14. Układ profili podstawowych (kolor czerwony) oraz kontrolnych (kolor zielony) przy	1
wyznaczaniu linii podstawowej morza terytorialnego RP dla akwenu nr 3	6
Rys. 1.15. Aplikacje służące do planowania prac sondażowych, takie jak AutoDron (a) oraz	
QINSy (b)	7
Rys. 1.16. Absolutnie minimalne poziomy wody jakie kiedykolwiek zarejestrowano na	
polskich stacjach wodowskazowych w latach 1945-2015	8
Rys. 1.17. Wykres zmienności poziomu morza obserwowany na mareografie w Gdyni według	5
serwisu pogodowego IMGW-PIB2	9
Rys. 1.18. Zakres zmian prędkości dźwięku w okresie letnim o charakterze dobowym na	
Zatoce Gdańskiej według [Makar A., 2008; Makar A., Naus K., 2003]	2
Rys. 1.19. Okno aplikacji służącej do ustawienia prędkości kalibracyjnej echosondy	
jednowiązkowej oraz wyświetlania zarejestrowanych głębokości	4
Rys. 2.1. Profile sondażu hydroakustycznego (po lewej) oraz strefa pozbawiona ze względu	
na głębokość danych pomiarowych (po prawej) [Makar A., Naus K., 2003] . Rysunk	i
okien programu pozyskano od prof. Krzysztofa Nausa	6
Rys. 2.2. Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne bezzałogowych jednostek hydrograficznych	۱.
	7
Rys. 2.3. Minimalne wyposażenie bezzałogowej jednostki hydrograficznej z przeznaczeniem	
dla realizacji pomiarów linii podstawowej morza terytorialnego	8
Rys. 2.4. Bezzałogowa jednostka hydrograficzna "HydroDron" projektu prof. Andrzeja	
Statecznego [Marine Technology, 2019]	9

Rys. 2.5.	Mapa stacji referencyjnych sieci ASG-EUPOS4	1
Rys. 2.6.	Mapa stacji referencyjnych sieci SmartNet4	13
Rys. 2.7.	Mapa stacji referencyjnych sieci TPI NETpro4	14
Rys. 2.8.	Mapa stacji referencyjnych sieci VRSNet.pl4	15
Rys. 2.9. 3	Strefy działania: systemu Decca Navigator (a) oraz łańcuchów radiolatarni RC (b)4	16
Rys. 2.10	. Mapy zasięgu działania wybranych sieci geodezyjnych GNSS na Zatoce Gdańskiej.	
		17
Rys. 2.11	. Mapy zasięgu wybranych operatorow telefonii komorkowej na Zatoce Gdańskiej. «	10
Rvs 212	Strefy działania światowych systemów SBAS [GSA 2016]	10 10
Rvs 2.12	Strefy działania (kolor zielony) stacji referencyjnych DGPS Dziwnów i Rozewie wra	17
11,95. 2.10	z noziomem nateżenia svgnału	52
Rvs. 2.14	. Liczba dostępnych satelitów do wykorzystania w ramach systemów multi-GNSS	
	[Sato K. i in., 2014]	53
Rys. 2.15	. Typowe rodzaje odbiorników multi-GNSS: turystyczny (a), data logger (b)	-
,	i systemów mobilnych (c)	54
Rys. 2.16	. Porównanie liczby wykorzystywanych satelitów w wielosystemowym	
	(GPS/SBAS/QZSS/GLONASS) oraz w jednosystemowym (GPS/SBAS) odbiorniku	
	satelitarnym [Furuno, 2019]5	55
Rys. 2.17	. Wymagania dokładności i dostępności systemów pozycjonowania w hydrografii n	а
	tle pozostałych rodzajów nawigacji5	57
Rys. 2.18	. Błąd wyznaczenia współrzędnych pozycji w funkcji czasu (wykres górny) oraz trzy	
	wykresy odpowiadające stanom pracy dla kategorii: specjalnej (kolor zielony),	
	1a/1b (kolor niebieski) i 2 (kolor czerwony)5	58
Rys. 2.19	. Stany pracy: zdatności (zdolność systemu do spełnienia wymagań w zakresie	
	pozycjonowania dla kategorii IHO) oraz niezdatności (zdarzenie przeciwne) [Speck	nt
	C., 2003]	;9
Rys. 2.20	. Skumulowany czas pracy i awarii procesu wyznaczania współrzędnych pozycji	
D . 2.24	wg okresionej kategorii IHO [Specht C., 2003])1
Rys. 2.21	. Geometryczna interpretacja dostępności wymaganej dla kategorii IHO. Pozycje	
Duc 2.1	wewnątrz okręgu reprezentują stan zdatności, a na zewnątrz stan niezdatności e	5
Rys. 3.1.	Granice wielobokow wyznaczających strefy uziałania sieci geouezyjnych. ASG-	
	EUPOS (a), Smartnet (b), TPI NETPIO (c) oraz VRSNet.pi (d) na tereme	
Rvs 22	Wolewouziwa pomorskiego	5
Nys. 5.2.	SmartNet (b) TPI NETpro (c) oraz VRSNet pl (d) z punktem EUREE-POL na Rozewij	
		3. 56
Rvs. 3.3.	Przykładowe funkcie (D1(t), D2(t), D3(t)) i wartości współczynników (D1, D2, D3)	,0
Ny5. 5.5.	dostepności dla błędów pozycji wynoszących: 10 cm (kolor czerwony), 1 m (kolor	
	niebieski) i 2 m (kolor brazowy), obliczone na podstawie pomiarów zrealizowanyc	h
	w porcie Gdynia	59
Rys. 3.4.	Lokalizacja miejsca pomiarów - radiolatarnia portu Gdynia	0
Rys. 3.5. V	Wykresy dystrybuant (po lewej) i funkcji gestości prawdopodobieństwa (po prawej)
-	błędu 2D pozycji przewidywanej systemu DGPS dla kampanii pomiarowych	
	wykonanych w latach 2006-2014	2′2

Rys. 3.6. Wykresy dystrybuant (po lewej) i funkcji gęstości prawdopodobieństwa (po prawej) błędu 2D pozycji przewidywanej systemu EGNOS dla kampanii pomiarowych
wykonanych w latach 2006-2014
Rys. 3.7. Stawiacz pław "Tucana" (a) oraz zaplanowana trasa badań (b)
Rys. 3.8. Umiejscowienie anten odbiorczych systemów GNSS na statku "Tucana"73
Rys. 3.9. Zapis trajektorii jednostki pływającej podczas morskich pomiarów dynamicznych. 75
Rys. 3.10. Rozkłady błędów wyznaczenia pozycji 2D zarejestrowane przez odbiorniki
EGNOS (a) oraz DGPS (b)78
Rys. 3.11. Platforma pomiarowa z umieszczonymi na niej telefonami komórkowymi (a) wraz
z zamontowaną na niej plastikową pokrywą (b)
Rys. 3.12. Zakładanie punktu osnowy z wykorzystaniem statycznych pomiarów satelitarnych
(a) oraz wyznaczanie współrzędnych stanowiska pomiarowego metodą
tachimetryczna (b)
Rys. 3.13. Wizualizacja miar <i>DRMS (2D)</i> i <i>2DRMS (2D)</i> pozycji przewidywanej poszczególnych
telefonów
Rvs. 3.14. Wykresy dystrybuant (po lewei) i funkcji gestości prawdopodobieństwa (po
prawei) błędu 2D pozycji przewidywanej poszczególnych telefonów
Rys. 3.15. Położenie względne platformy pomiarowej referencyjnych odbiorników GNSS (a)
oraz nlatformy nomiarowei telefonów komórkowych (a h)
Rys. 3.16. Horvzontalny schemat rozmieszczenia geometrycznego odbiorników
referency invch (R_{4}, R_{3}) oraz smartfonów (a) wraz z przykładowym wektorem
kierunkowym (b) oraz wartościami przyrostów współrzednych w statkowym
układzie współrzednych (c)
D_{1} D2/t) D2/
Nys. 5.17. Fullkoje dostępności. <i>D1(t), D2(t), D3(t)</i> oraz ich wartości graniczne. <i>D1, D2, D</i> 5.
(kolor piebioski) i 2 (kolor brozowy)
(KOIOF HIEDIESKI) I Z (KOIOF DFąZOWY)
Rys. 3.18. Zbiorcze zestawienie wyników badanych rozwiązan GNSS w pomiarach
stacjonarnycn
Rys. 3.19. Zbiorcze zestawienie wynikow badanych rozwiązan GNSS w pomiarach
dynamicznych
Rys. 4.1. Układ profili sondazowych przy wyznaczaniu linii podstawowej morza terytorialnego
na akwenie przyległym do plazy miejskiej w Gdyni
Rys. 4.2. Tyczka geodezyjna wraz z zaznaczonymi na niej głębokościami przy użyciu taśmy
samoprzylepnej oraz samodzielnie skonstruowaną nakładką na jej ostrzu93
Rys. 4.3. Pomiar linii podstawowej morza terytorialnego realizowany przez osobę nr 1 (po
lewej) oraz zarejestrowane punkty pomiarowe z podziałem na osoby wykonujące
badania (po prawej) metodą geodezyjną podczas drugiej kampanii pomiarowej. 94
Rys. 4.4. Numeryczne modele dna akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni pozyskane
metodą geodezyjną w 2016 (a) i 2018 r. (b)
Rys. 4.5. Ilustracja wyznaczania wysokości punktu w nieregularnej siatce trójkątów96
Rys. 4.6. Różnice wysokości między modelami DTM powstałymi na podstawie danych
pozyskanych metodą geodezyjną w 2016 i 2018 r
Rys. 4.7. Graficzny sposób wyznaczania odległości od linii odniesienia do linii podstawowej.
Rys. 4.8. Szczególny przypadek, gdy prosta prostopadła poprowadzona do linii odniesienia
przecina linię podstawową w więcej niż jednym punkcie

Rys.	4.9. (Odległości między liniami podstawowymi morza terytorialnego wyznaczonymi
	_	metodą geodezyjną w 2016 i 2018 r 102
Rys.	4.10.	Przebieg linii podstawowej morza terytorialnego akwenu przyległego do plaży
		miejskiej w Gdyni wyznaczony metodą geodezyjną w 2016 (kolor żółty) i 2018 r.
		(kolor czerwony)
Rys.	4.11.	Układ profili sondażowych tras, po których poruszała się bezzałogowa jednostka
		pływająca w trakcie pomiarów hydrograficznych 105
Rys.	4.12.	Okno aplikacji ArduPilot Mission Planner służącej do planowania i rejestrowania
-		trasy jednostki pływającej
Rvs.	4.13.	Okno aplikacji u-center służacej do zapisywania komunikatów w standardzje
,		NMEA rejestrowanych przez odbiornik GPS/GLONASS
Rvs.	4.14.	Graficzny sposób wyznaczania odległości pomierzonego punktu od
,		zaprojektowanej trasv 109
Rvs	4 15	Zarejestrowane punkty pomiarowe przez odbiorniki GPS/GLONASS (kolor
куз.	4.13.	pomarańczowy) i PTK (kolor brazowy) wzdłuż zaprojektowanych tras
Duc	1 1 6	Funkcia gostości przydonodobiośstwa cztoroparametrowogo upgólniopogo
куз.	4.10.	runkcja gęstości prawdopodobienstwa czteroparametrowego dogomionego
D .		rozkiadu gamma zmiennej q
Rys.	4.17.	Dystrybuanta czteroparametrowego uogoinionego rozkładu gamma zmiennej q.
_		
Rys.	4.18.	Roznica między prawdopodobienstwami wystąpienia zmiennej q dla empirycznego
		i teoretycznego uogólnionego rozkładu gamma
Rys.	4.19.	Zaprojektowana trasa bezzałogowej jednostki pływającej w trakcie pomiarów
		z dnia 19.08.2018 r 114
Rys.	4.20.	Zespół montujący aparaturę pomiarową na bezzałogowej jednostce pływającej (po
		lewej) oraz osoba mierząca zanurzenie przetwornika echosondy przy użyciu miary
		zwijanej (po prawej)115
Rys.	4.21.	Bezzałogowa jednostka pływająca wraz z zamontowaną na niej aparaturą
		pomiarową
Rys.	4.22.	Operator drona hydrograficznego w trakcie pomiarów z dnia 19.07.2018 r. (a) oraz
		zrzut ekranu oprogramowania służącego do planowania jego trasy (b) 116
Rys.	4.23.	Model DTM wraz z naniesionymi izobatami powstały na podstawie danych
-		pozyskanych metodą hydrograficzną
Rys.	4.24.	Przekrój powierzchni nr 1 wykonany na danych pozyskanych metodą
,		hvdrograficzna
Rvs.	4.25.	Przekrój powierzchni nr 2 wykonany na danych pozyskanych metoda geodezyjna.
,		118
Rvs	4 26	Many głebokości akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni otrzymane
1195.	4.20.	metoda geodezvina (no lewei) oraz metoda hydrograficzna (no prawei)
Duc	4 27	Przebiog linii podstawowej morzą tentorialnogo akwonu przylogłago do plaży
nys.	4.27.	misickiej w Cduni wyznaszany matoda goodozyjna (koler szerweny) erez metoda
		miejskiej w Guym wyznaczony metodą geodezyjną (kolor czerwony) oraz metodą
-	4.20	nydrograficzną (kolor zielony)
Kys.	4.28.	Przebieg ilnii podstawowej morza terytorialnego akwenu położonego w poblizu
_		ujscia Wisły Smiałej wyznaczony metodą hydrograficzną
Rys.	4.29.	Przebieg linii podstawowej morza terytorialnego akwenu położonego przy
		podejściu do Górek Zachodnich od Zatoki Gdańskiej wyznaczony metodą
		hydrograficzną

Wykaz tabel

Tab. 1.1. Zestawienie wybranych wymagań dla pomiarów hydrograficznych [IHO, 2008] 24
Tab. 1.2. Reprezentatywne akweny, na których wykonuje się pomiary linii podstawowej
morza terytorialnego25
Tab. 2.1. Wykaz jednostek hydrograficznych będących w posiadaniu urzędów morskich oraz
Dywizjonu Zabezpieczenia Hydrograficznego Marynarki Wojennej RP [Specht M.,
2016]
Tab. 2.2. Aktualny stan konstelacji autonomicznych systemów nawigacyjnych (stan na dzień
29.04.2019 r.)
Tab. 3.1. Raport z wyrównania ścisłego wykorzystywanych sieci geodezyjnych GNSS 67
Tab. 3.2. Współrzędne punktu EUREF-POL na Rozewiu w układach odniesienia PL-ETRF89
i PL-ETRF200067
Tab. 3.3. Różnice pomiędzy współrzędnymi punktu EUREF-POL na Rozewiu a współrzędnymi
wyznaczonymi przy użyciu poszczególnych sieci geodezyjnych GNSS67
Tab. 3.4. Rodzaje basenów portowych poddane badaniu wraz z trasą jednostki
hydrograficznej oraz modelem 3D68
Tab. 3.5. Wartości współczynników dostępności dla błędów pozycji wynoszących: 1 cm, 2 cm,
5 cm, 10, cm, 1 m i 2 m, obliczone na podstawie pomiarów zrealizowanych
w portach: Gdańsk, Gdynia i Hel 69
Tab. 3.6. Statystyki błędów pozycji systemu DGPS dla kampanii pomiarowych wykonanych
w latach 2006-201471
Tab. 3.7. Statystyki błędów pozycji systemu EGNOS dla kampanii pomiarowych wykonanych
w latach 2006-201471
Tab. 3.8. Miary dokładności określenia pozycji odbiorników GNSS wykorzystujących poprawki
DGPS i EGNOS
Tab. 3.9. Wybrane parametry testowanych smartfonów Samsung
Tab. 3.10. Statystyki błędów pozycji przewidywanej systemów DGPS i EGNOS w trakcie
stacjonarnej (S) i dynamicznej (D) kampanii pomiarowej
Tab. 3.11. Statystyki błędów pozycji przewidywanej telefonów Samsung Galaxy w trakcie
24-godzinnej, stacjonarnej kampanii pomiarowej
Tab. 3.12. Statystyki błędów pozycji przewidywanej telefonów Samsung Galaxy w trakcie
12-godzinnej, stacjonarnej kampanii pomiarowej
Tab. 3.13. Statystyki błędów pozycji przewidywanej telefonów Samsung Galaxy w trakcie
dynamicznej kampanii pomiarowej88
Tab. 3.14. Wartości graniczne dostępności, niezawodności i ciągłość obliczone na podstawie
rzeczywistych pomiarów stacjonarnych systemów: DGPS, EGNOS, multi-GNSS
i RTN przy użyciu modelu niezawodnościowego 89
Tab. 3.15. Wartości graniczne dostępności, niezawodności i ciągłość obliczone na podstawie
rzeczywistych pomiarów dynamicznych systemów: DGPS, EGNOS, multi-GNSS
i RTN przy użyciu modelu niezawodnościowego
Tab. 4.1. Raport z przetwarzania danych podczas pomiarów linii podstawowej morza
terytorialnego na akwenie przyległym do plaży mieiskiej w Gdyni.
Tab. 4.2. Podział powierzchni akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni ze względu na
różnice wysokości między modelami DTM z 2016 i 2018 r
Tab. 4.3. Zmiany objętości akwenu przyległego do plaży miejskiej w Gdyni z podziałem na
różnice wysokości miedzy modelami DTM.
, . ,

Tab. 4.4. Miary dokładności prowadzenia bezzałogowej jednostki pływającej dla	
poszczególnych tras	110