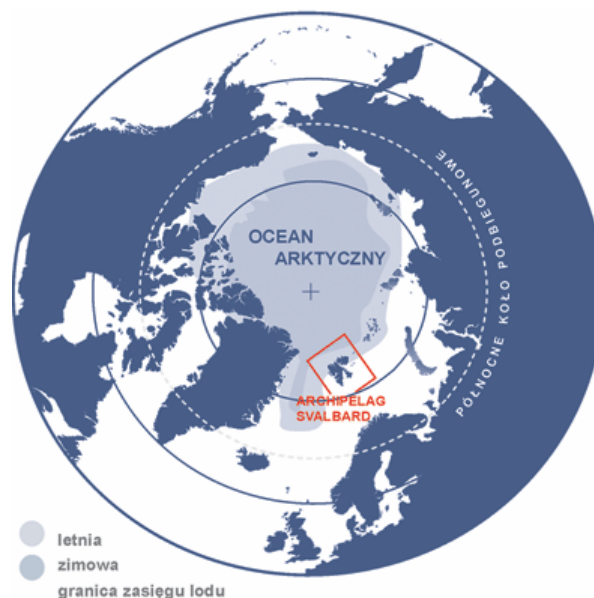


# Badanie powierzchniowego ruchu lodowca Hansa wzdłuż profilu poprzecznego

Janusz Walo, Andrzej Pachuta, Zdzisław Kurczyński, Artur Adamek  
Kinga Wężka, Zbigniew Malinowski, Marcin Rajner

## 1. Wprowadzenie

Prace geodezyjne na Spitsbergenie prowadzone są już od ponad 70 lat. Pierwsze pomiary geodezyjne wykonali A.Zawadzki i S.Zagrajski w 1934 roku w ramach wyprawy polarnej Służby Geograficznej. Badania ruchu czoła lodowca Hansa zapoczątkowane zostały pod koniec lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku i z małymi przerwami prowadzone są po dzień dzisiejszy. Zebrane materiały mają dużą wartość dla glaciologów w kontekście długookresowego badania dynamiki lodowca Hansa. Dzięki kompleksowym badaniom, lodowiec Hansa włączony został do Światowej Bazy Monitorowania Lodowców (WGMS – World Glaciar Monitoring Service), do której należy zaledwie 60 wybranych lodowców świata. Wyprawa miała w tym kontekście istotne znaczenie dla zachowania ciągłości badań kinematyki lodowca.



Rys. 1. Położenie Spitsbergenu ([www.narval.arktyka.com](http://www.narval.arktyka.com))

Zasadniczym celem projektu było wyznaczenie średniej dobowej prędkości powierzchniowego ruchu lodowca wzdłuż profilu poprzecznego na wysokości czwartej tyczki ablacyjnej (około 4 km od czoła lodowca). Do realizacji projektu założono 20 znaków

pomiarowych w odstępach średnio co 125 m. W pomiarach wykonane zostały obserwacje satelitarne GPS w technologii szybkiej statycznej i RTK. Należy dodać, że pierwszy pomiar prędkości ruchu lodowca na profilu poprzecznym wykonany został w latach 1987-1988 roku metodami fotogrametrii naziemnej, które wykazały, że ruch lodowca waha się od kilku centymetrów na dobę w strefie bocznej do około dwudziestu centymetrów na dobę w strefie środkowej. Uzyskane w ramach wyprawy wyniki zestawiono z badaniami sprzed 17 lat.

Z uwagi na fakt, że warunki atmosferyczne nie sprzyjały wykonaniu zdjęć fotogrametrycznych znaków profilu poprzecznego zrezygnowano z wykonania takich zdjęć. W zamian tego zyskano czas, który postanowiono wykorzystać na powtórny pomiar punktów poligonu geodynamicznego założonego w 1988 roku wokół fiordu Horsund. Pomiary w sieci geodynamicznej zostały dotychczas wykonane dwukrotnie. Pierwszy pomiar wykonano dalmierzem w roku założenia poligonu (PACHUTA, 1989). Drugi raz sieć pomierzono satelitarne w roku 2003 w ramach wyprawy Ogólnopolskiego Klubu Studentów Geodezji działającego przy Stowarzyszeniu Geodetów Polskich (ADAMEK, 2005).

Oprócz zasadniczego celu projektu wykonano prace związane z zmianą stabilizacji punktów bazy fotogrametrycznej, z której dotychczas wykonywane były naziemne zdjęcia fotogrametryczne wykorzystywane w śledzeniu dynamiki czoła lodowca. Zamarkowano punkty bazy bliżej obecnego czoła lodowca oraz wyznaczono ich współrzędne w nawiązaniu do „starych” punktów bazy (dla zachowania ciągłości badań) oraz stacji referencyjnej w pobliżu stacji polarnej *Hornsund* Instytutu Geofizyki PAN.

Należy również dodać, że był to projekt zespołowy realizowany w ramach sekcji naukowej działającej przy Stowarzyszeniu Studentów Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej „Geoida”.

## 2. Założenie i pomiar punktów profilu poprzecznego

Punkty profilu poprzecznego zostały zamarkowane za pomocą tyczek z tarczami. W lodowcu nawiercono otwory o głębokości średnio 1 m, w których umieszczono znaki pomiarowe. Zdecydowano, że profil przebiegać będzie w pobliżu czwartej tyczki ablacyjnej profilu podłużnego (blisko 4 km od czoła lodowca), a znaki zostaną rozmieszczone co około 125 m (rys.).



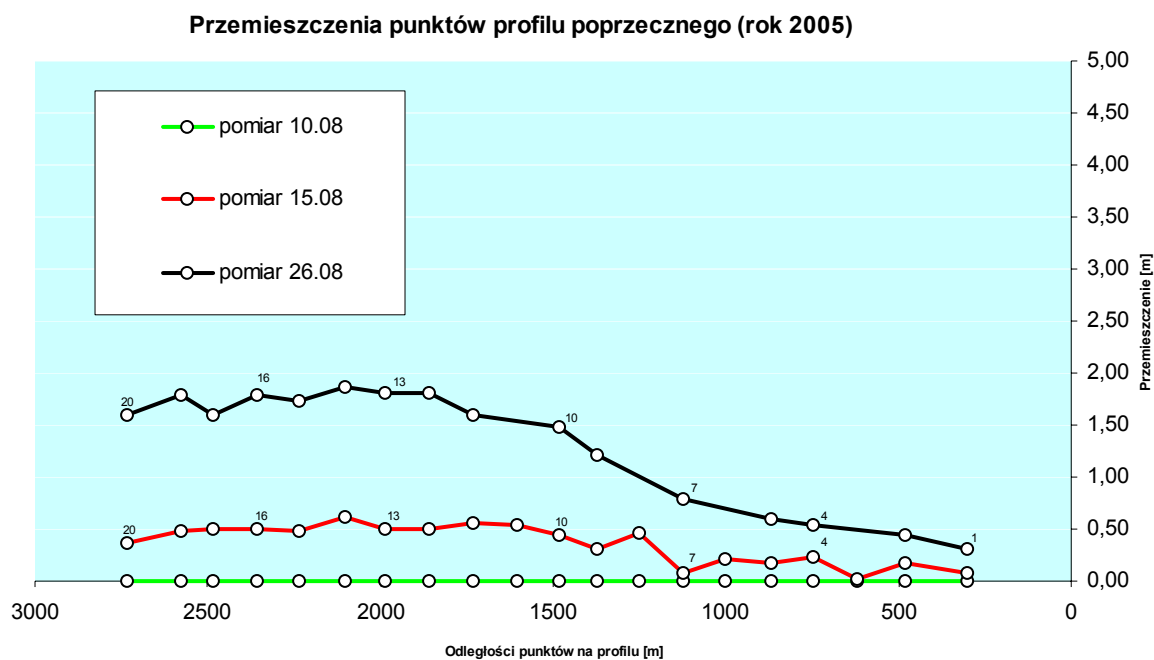
*Rys. 2. Stabilizacja i pomiar znaków pomiarowych profilu poprzecznego*

Profil poprzeczny został pomierzony w trzech epokach obserwacyjnych. Pierwszy pomiar został wykonany 10 sierpnia 2005 bezpośrednio po stabilizacji znaków pomiarowych metodą szybką statyczną. Drugi pomiar wykonano 15 sierpnia przy wykorzystaniu technologii RTK oraz technologii szybkiej statycznej dla wybranych 5 znaków profilu. Zastosowanie dwóch technologii pomiarowych miało na celu porównanie uzyskanych wyników w kontekście dokładności wyznaczenia punktów w pomiarach na lodowcu. Ostatni pomiar wykonany został 26 sierpnia tuż przed wyjazdem ze Spitsbergenu technologią szybką statyczną. W ostatnim pomiarze część znaków pomiarowych została zniszczona (topnienie lodowca i silny wiatr), w związku z tym identyfikacja miejsca stabilizacji w kilku przypadkach była utrudniona lub wręcz niemożliwa. Cztery miejsca zostały zidentyfikowane błędnie, o czym świadczą „ruchy” tych znaków znacznie odbiegające od uzyskanych wartości na innych punktach profilu (zaciemnione komórki w tabeli 1).

**Tabela 1.** Przemieszczenia znaków profilu poprzecznego pomiędzy kolejnymi epokami pomiarowymi (15 i 26 sierpnia 2005) i epoką wyjściową z 10 sierpnia 2005

Punkt		15 sierpnia 2005				26 sierpnia 2005			
Nr	Odległość	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta d$	$\Delta d/h$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta d$	$\Delta d/h$
		[m]			[m/dobę]	[m]			[m/dobę]
P01	300	-0,07	0,14	0,16	<b>0,03</b>	-0,31	0,16	0,34	<b>0,03</b>
P02	482	-0,17	0,05	0,17	<b>0,03</b>	-0,45	0,22	0,50	<b>0,05</b>
P03	621	-0,02	0,08	0,08	<b>0,01</b>	-16,49	-27,63	32,17	2,90
P04	747	-0,22	0,17	0,28	<b>0,05</b>	-0,54	0,22	0,58	<b>0,05</b>
P05	870	-0,18	0,19	0,26	<b>0,05</b>	-0,60	0,34	0,69	<b>0,06</b>
P06	1000	-0,22	0,20	0,29	<b>0,05</b>	0,87	-4,05	4,14	0,38
P07	1122	-0,08	0,06	0,10	<b>0,02</b>	-0,80	0,40	0,89	<b>0,08</b>
P08	1251	-0,47	0,12	0,48	<b>0,09</b>				
P09	1372	-0,31	0,05	0,31	<b>0,05</b>	-1,22	0,34	1,27	<b>0,12</b>
P10	1483	-0,45	0,06	0,46	<b>0,08</b>	-1,48	0,20	1,49	<b>0,14</b>
P11	1607	-0,54	0,05	0,54	<b>0,09</b>	-2,24	0,60	2,32	0,21
P12	1732	-0,55	0,07	0,56	<b>0,10</b>	-1,59	0,09	1,59	<b>0,15</b>
P13	1860	-0,50	0,10	0,51	<b>0,09</b>	-1,80	0,22	1,81	<b>0,16</b>
P14	1984	-0,50	0,16	0,52	<b>0,09</b>	-1,81	0,24	1,83	<b>0,17</b>
P15	2104	-0,62	0,04	0,62	<b>0,11</b>	-1,87	-0,90	2,08	<b>0,19</b>
P16	2235	-0,47	0,12	0,49	<b>0,09</b>	-1,73	0,16	1,74	<b>0,16</b>
P17	2358	-0,51	-0,12	0,52	<b>0,09</b>	-1,80	0,16	1,81	<b>0,16</b>
P18	2482	-0,50	0,02	0,50	<b>0,09</b>	-1,59	0,07	1,59	<b>0,14</b>
P19	2575	-0,49	0,20	0,53	<b>0,09</b>	-1,79	0,18	1,80	<b>0,16</b>
P20	2734	-0,37	0,05	0,38	<b>0,07</b>	-1,60	0,18	1,61	<b>0,15</b>

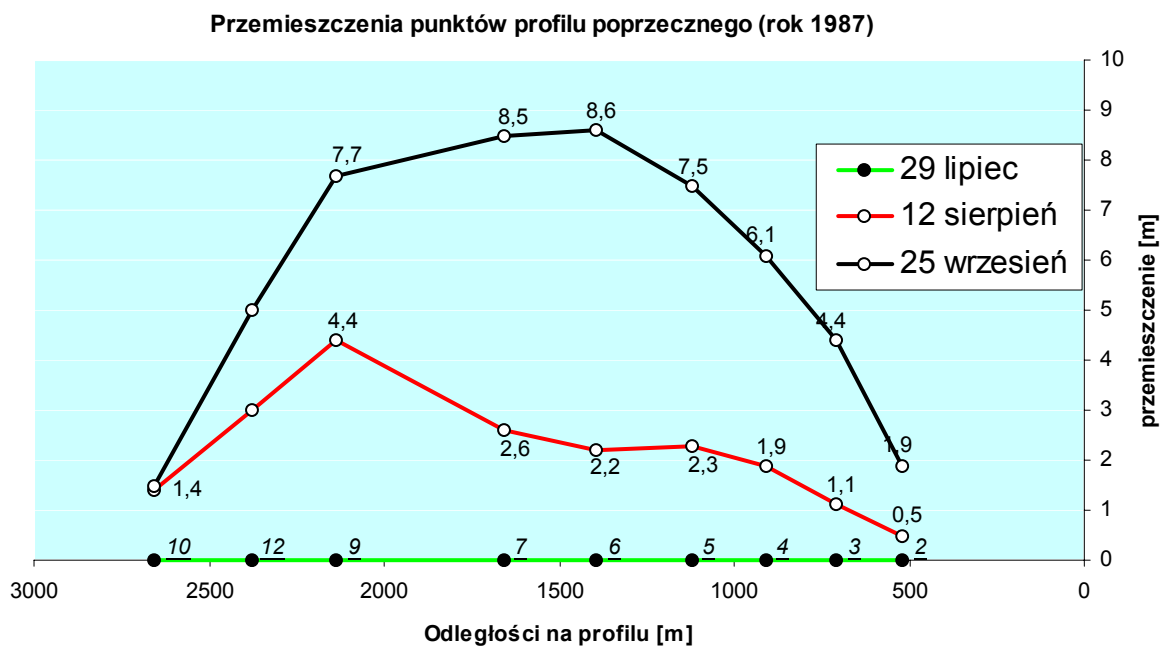
Łatwo zauważyć, że średni dobowy ruch lodowca waha się na profilu poprzecznym od pojedynczych centymetrów na dobę w zachodniej krawędzi lodowca do około 10 cm na dobę w pobliżu wschodniej jego krawędzi. Uzyskane rezultaty zbliżone są do tych jakie uzyskali Dąbrowski i Kurczyński w oparciu o pomiary fotogrametryczne w latach 1987/1988 (Cisak i Dąbrowski, 1990, tabela 3 i rys. 3). Należy jednak dodać, że tamte pomiary prowadzone były na profilu bliżej czoła lodowca (około 0.5 km), a zatem nie dokładnie odpowiadają tym z ostatniego roku. Jednak można powiedzieć, że uzyskane wyniki prowadzą do wstępnego wniosku, że średni dobowy ruch lodowca nie zmienił się w ciągu ostatnich 17 lat.



**Rys. 3.** Wykres przemieszczeń znaków profilu poprzecznego wzdłuż lodowca wyznaczonych w sierpniu 2005

**Tabela 2.** Przemieszczenia znaków profilu poprzecznego pomiędzy kolejnymi epokami z pomiarów w 1987 roku (Cisak i Dąbrowski, 1990)

Punkt		Wartość przemieszczenia				
Nr	Odległość [m]	29.07.1987	12.08.1987		25.09.1987	
		[m]	[m]	[m/dobę]	[m]	[m/dobę]
2	519	0	0,5	<b>0,04</b>	1,9	<b>0,03</b>
3	706	0	1,1	<b>0,08</b>	4,4	<b>0,08</b>
4	906	0	1,9	<b>0,14</b>	6,1	<b>0,11</b>
5	1120	0	2,3	<b>0,16</b>	7,5	<b>0,13</b>
6	1392	0	2,2	<b>0,16</b>	8,6	<b>0,15</b>
7	1655	0	2,6	<b>0,19</b>	8,5	<b>0,15</b>
9	2140	0	4,4	<b>0,31</b>	7,7	<b>0,13</b>
12	2377	0	3,0	<b>0,21</b>	5,0	<b>0,09</b>
10	2655	0	1,4	<b>0,10</b>	1,5	<b>0,03</b>



**Rys. 4.** Wykres przemieszczeń znaków profilu poprzecznego wzdłuż profilu w trzech epokach z okresu lipiec-wrzesień 1987 (źródło Cisak i Dąbrowski, 1990)

W trakcie pomiarów znaków profilu poprzecznego 15 sierpnia 2005 zamarkowano i pomierzono punkty bazy fotogrametrycznej, które wykorzystywane są dla fotogrametrycznej rejestracji zasięgu czoła lodowca Hansa. Wyniki tych wyznaczeń zamieszczone są w tabeli 3. Podane są tam współrzędne geodezyjne i wysokości elipsoidalne wyznaczone w nawiązaniu do stacji permanentnej HORN założonej w sąsiedztwie stacji polarnej. Dodatkowo w dwóch ostatnich kolumnach zamieszczono współrzędne w odwzorowaniu UTM strefa 33X.

**Tabela 3.** Zestawienie współrzędnych punktów baz fotogrametrycznych

Numer punktu	B	L	H	X	Y
	[ ° ' " ]			[ m ]	
16	77° 00' 20.46558" N	15° 35' 55.92030" E	54,643	515031,644	8547484,098
17	77° 00' 20.46795" N	15° 35' 55.91754" E	54,716	515031,624	8547484,172
601	77° 00' 23.47517" N	15° 36' 05.57992" E	47,918	515098,037	8547578,072
602	77° 00' 18.21763" N	15° 36' 02.88480" E	49,743	515080,912	8547414,916
B01	77° 00' 47.89848" N	15° 35' 30.39025" E	69,891	514845,089	8548332,617
B02	77° 00' 42.82927" N	15° 35' 39.02363" E	62,375	514906,835	8548176,096

W trakcie pomiarów profilu poprzecznego pięć punktów profilu zostało zmierzonych dwoma technologiami: szybką statyczną i czasu rzeczywistego RTK. Wyniki zestawione w tabeli 4 świadczą o praktycznej równorzędności uzyskanych wyników. Różnice współrzędnych dla obu technologii kształtują się na poziomie pojedynczych centymetrów

i tylko w przypadku punktu P06 sięgają decymetra. Z zestawienia wynika, że dla celu śledzenia ruchu lodowca wystarczy stosować technologię czasu rzeczywistego RTK. Daje ona wystarczającą dokładność wyznaczenia pozycji znaków pomiarowych, a wymaga znacznie krótszego czasu obserwacji na punkcie (kilka sekund). W przypadku technologii szybkiej statycznej czas obserwacji nie powinien być krótszy od 10 minut, co dość wyraźnie wydłuża pomiary. Stosowanie technologii czasu rzeczywistego wymaga jednak modyfikacji stacji referencyjnej. Potrzebny jest przekaźnik radiowy, który ustawiony na najbliższym wzniesieniu pozwalałby na dystrybucję poprawki różnicowej na cały obszar lodowca.

**Tabela 4.** Różnice współrzędnych znaków profilu wyznaczonych technologią szybką statyczną i RTK

Punkt	dX [mm]	dY [mm]
P01	-2,6	2,5
P06	17,9	-109,9
P10	3,4	-14
P15	-5,1	16,8
P20	-23,3	8,4

### 3. Pomiar poligonu geodynamicznego

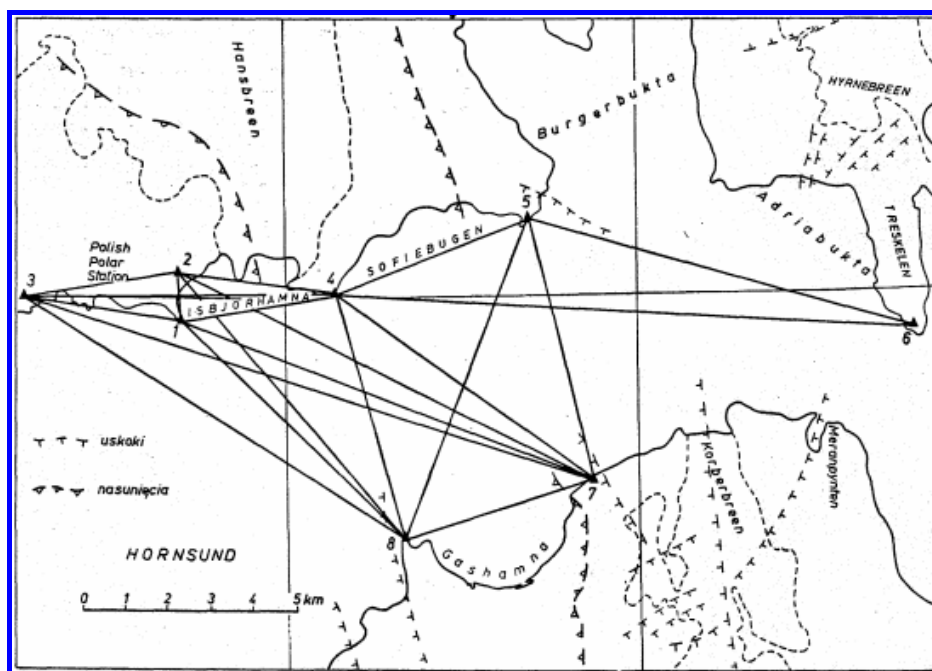
Geodezyjne badanie lokalnych ruchów skorupy Ziemi stanowi szczególną rolę w poznawaniu dynamiki naszej planety. Daje ono ilościowy opis zjawiska wraz z charakteryzującymi jakością tych danych błędami, co jest istotną informacją przy interpretacji tych ruchów. W większości przypadków, chcąc wykryć jakieś przemieszczenia w stosunkowo krótkim czasie (w stosunku do wieku Ziemi), metody geodezyjne jako jedyne znajdują zastosowanie. Obecne technologie (sprzęt pomiarowy i oprogramowanie) pozwalają na wyznaczanie pozycji punktów z subcentymetrową dokładnością nie tylko w układach lokalnych, lecz także w globalnym układzie odniesienia.



**Rys. 5.** Archipelag Svalbard ([www.narval.arktyka.com](http://www.narval.arktyka.com))

Fiord Hornsund kończy się ogromnym lodowcem Horn, który oddziela go od Morza Barentsa (rys. 5). Przypuszcza się, że gdyby lodowiec wytopił się - Hornsund okazałby się być cieśniną, a południowa jego część (Sørkapp) - odrębną wyspą. Dodatkowo geolodzy sugerują, iż Sørkapp przemieszcza się ze względu na bliskość uskoku tektonicznego. Przebiega on około 60 km od zachodniego wybrzeża. Potwierdzeniem tych przypuszczeń mogą być pomiary dynamiki struktur geologicznych wokół fiordu. Zaistniała potrzeba założenia poligonu geodynamicznego, którą zrealizowano w 1988 roku podczas Pierwszej Wyprawy Pracowników i Studentów Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej. Podstawą do założenia poligonu wokół fiordu Hornsund była mapa uskoków tektonicznych z tego obszaru sporządzona przez dr Ryszarda Szczęsnego. Projekt powstał przy współdziałaniu pracowników Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego (PACHUTA, 1989).

Założona sieć wraz z zaznaczeniem pomierzonych elementów jest przedstawiona na rysunku 6. Na rysunku tym naniesiono również linie uskoków tektonicznych i nasunięć, co pozwala zauważyć, że zastabilizowane punkty są położone w odmiennych strukturach geologicznych, a więc zgodnie z podstawowym celem, jakiemu osnowa ta ma służyć. Kształt sieci i jej konstrukcja zostały zdeterminowane przez istniejące warunki terenowe oraz możliwości techniczne. Wybór miejsca, a także sama stabilizacja zostały wykonane bardzo starannie. Poligon składa się z 8 punktów, są to: 1. WILCZEK, 2. BAZA, 3. REVDALEN, 4. FANNYPYNTEN, 5. GNALODEN, 6. TRESKELEN, 7. RASSTUPET i 8. HOFERPYNTEN.



**Rys. 5.** Szkic poligonu geodynamicznego

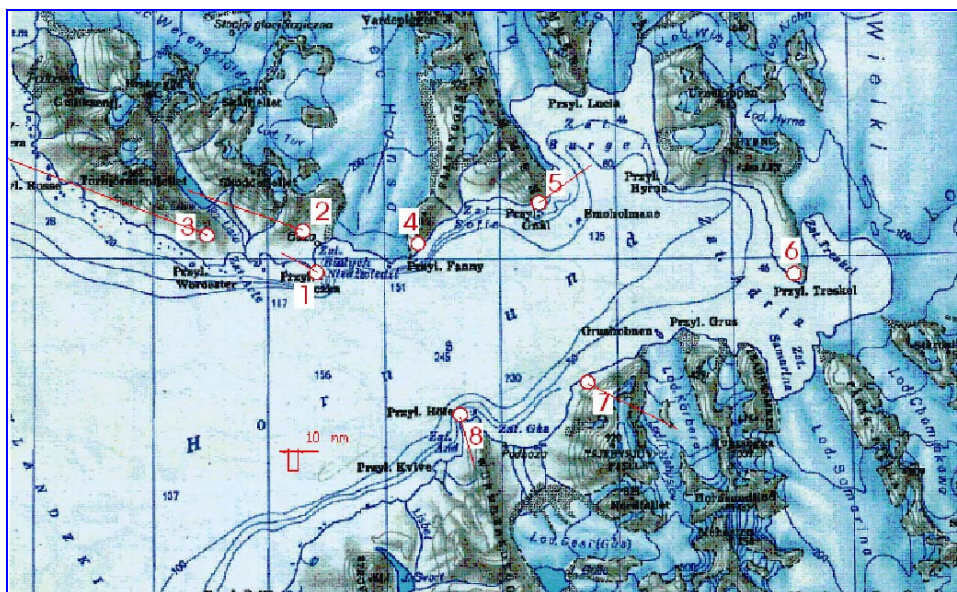
Do pomiaru wyjściowego sieci geodezyjnej wokół fiordu Hornsund wybrano najlepsze dostępne wówczas w kraju instrumenty geodezyjne oraz zastosowano optymalne metody pomiarów mając na uwadze trudne warunki polarne. Pomiary liniowe w sieci wykonano dalmierzem szwajcarskim Wild Di20, kąty zaś mierzono teodolitem Wild T2. W założonej sieci pomierzono ogółem 20 boków, z czego 12 w kierunku „tam” i „powrót”. Przeciętnie każdy z boków był mierzony w 4 niezależnych seriach, przy czym minimalna liczba serii wyniosła 2, a bok 7-8 pomierzono aż w 9 seriach.

## POMIAR W ROKU 2003

Na możliwość powtórnego wykonania pomiarów geodezyjnych w założonej sieci geodynamicznej wokół fiordu Hornsund przyszło poczekać ponad 15 lat. Pomiary podczas wyprawy w 2003 roku wykonano zestawem sprzętu satelitarnego GPS firmy Trimble: dwoma odbiornikami Trimble model 5700 z antenami bazowymi Zephyr i Zephyr Geodetic i dwoma odbiornikami model 4700 z antenami Micro-centered. Pomiary wykonano metodą statyczną podczas sześciu 48-godzinnych sesji pomiarowych. Obliczenia wykonano wykorzystując program firmowy Trimble Total Control v.2.60.

W obawie przed wpływem wielodrożności sygnału zdecydowano się ustawiać **anteny na statywach**. Okazało się to niezbyt trafnym pomysłem (wspomina o tym sam autor, por. ADAMEK, 2005). W sieciach geodynamicznych zależy nam na względnych milimetrowych dokładnościach. Rezygnując z wymuszonego centrowania popełnia się dodatkowo błąd, który może osiągnąć nawet  $\pm 1-2$  mm. Nie bez znaczenia są także często wiejące silne wiatry w fiordzie, które mogą wpływać na stabilność anteny satelitarnej (pomimo mocowania statywów, zdarza się, że statyw poruszy się lub wręcz może się wywrócić). Natomiast błąd powodowany odbiciem od podłoża można wyeliminować poprzez stosowanie odpowiednich anten lub ekranów, natomiast odbić od gór nie wyeliminuje nawet najwyższy statyw. Poza tym dysponując bardzo licznymi obserwacjami można numerycznie osłabić wpływ błędu wielodrożności.

Wyniki pomiarów z roku 2003 porównano z pomiarami z roku 1988. Otrzymane przemieszczenia mają charakter radialny, a wartości wektorów przemieszczeń są dość duże (rys. 7). Po obliczeniu współczynnika zmiany skali (**+2,4 ppm**) oraz ponownym wyznaczeniu wartości przemieszczeń (po przeskalowaniu) okazało się, że wartości samych przemieszczeń są rzędu błędów pomiarowych. Stąd też nie było podstaw do stwierdzenia względnych ruchów punktów poligonu (ze względu na duże błędy średnie nie można także mówić o braku ruchu!).



Rys. 7. Otrzymane wartości i kierunki przemieszczeń pomiędzy pomiarami w latach 2003 i 1988 (ADAMEK, 2005)



Prowadzi to do wniosku, że obserwacje (być może oba pomiary) były obarczone błędem systematycznym (z wyciągnięciem takich wniosków też trzeba uważać, gdyż rzeczywiste ruchy mogą czasem być zaskakujące i nie można twierdzić, że to błąd pomiarowy). Trudno wnioskować czym powodowany był ten błąd. Jednakże jego wpływ na tym poziomie dokładności uniemożliwia interpretację wyników pomiarowych. Nie można zatem porównywać przeskalowanych współrzędnych. Wyznaczając współczynnik skali z wyników całej sieci, przeskalowana sieć się „rozmywa” i „gubi się” rzeczywiste wartości przemieszczeń. Należałoby przeprowadzić głębsze analizy doszukując się przyczyn błędów systematycznych. Planuje się wykonanie powtórnych analiz w ramach pracy dyplomowej-magisterskiej M.Rajnera.

## **POMIAR W ROKU 2005**

W roku 2005 powtórzono pomiary punktów poligonu wykorzystując dwa odbiorniki Leica System 1200<sup>1</sup> i odbiornik Trimble 4700. Obserwacje wykonano w sesjach dobowych. Wprawdzie okres od poprzedniego pomiaru był stosunkowo krótki (dwa lata), to jednak ze względu na wysoką dokładność względnych pomiarów satelitarnych przeprowadzenie pomiaru jest w pełni uzasadnione. Poza tym dwie epoki pomiarowe wzajemnie „kontrolują się” stanowiąc dobrą bazę wyjściową do przyszłych badań geodynamicznych w tym rejonie.

W pomiarach wykorzystano o trzy odbiorniki satelitarne:

LEICA GRX1200	numer 456660
LEICA GRX1200	numer 457811
TRIMBLE4700	numer 220224420

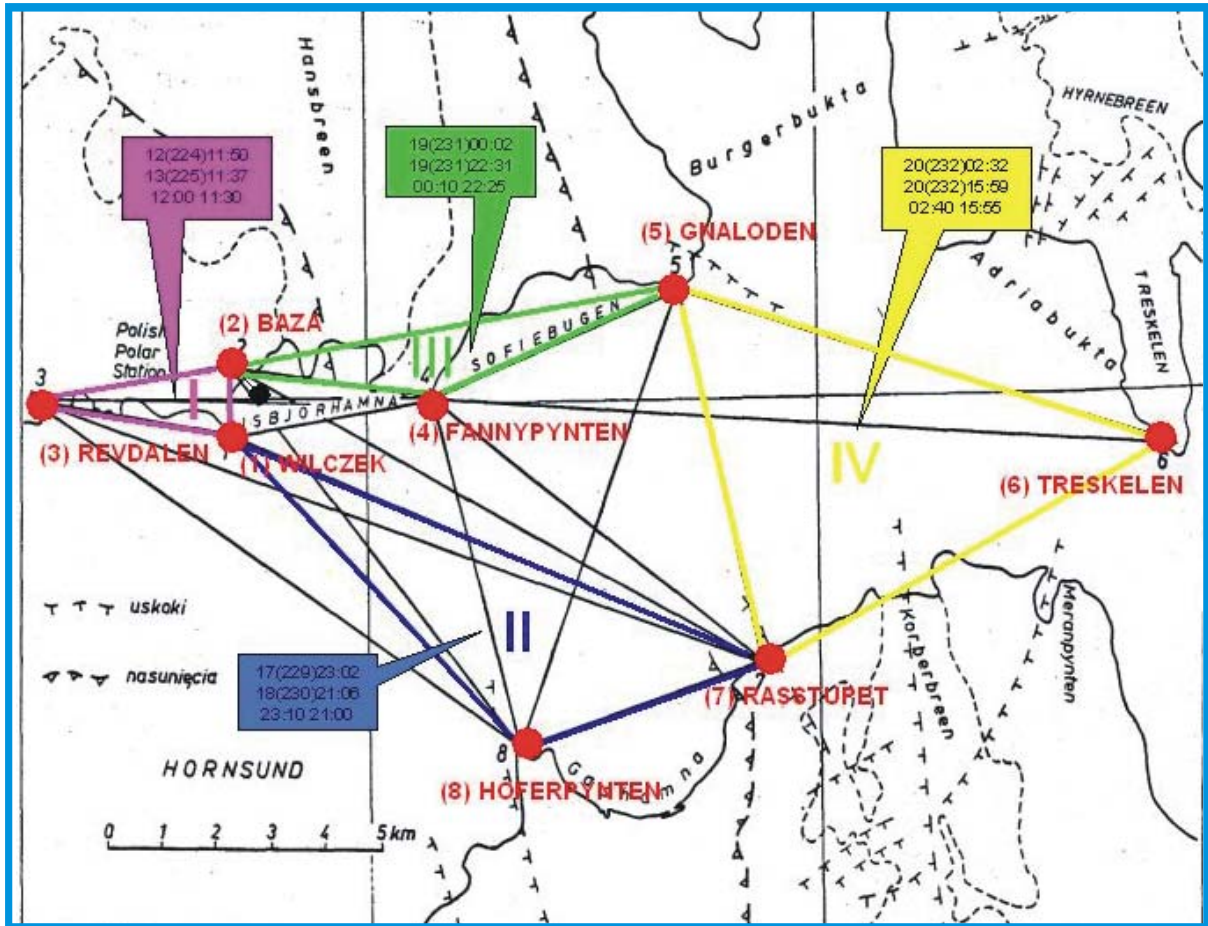
oraz dwa typy anten: Leica LEIAT1202 i Trimble TRM33429.00-GP (Micro-centered L1/L2).

Pomiar wykonano w 4 sesjach, które zostały opisane poniżej oraz przedstawione na rysunku 8 wraz z datami oraz godzinami wspólnych momentów rejestracji obserwacji satelitarnych.

<b>Sesja</b>	<b>Punkty obserwowane</b>	<b>Wysokości anten [m ARP]</b>	<b>DOY</b>
1	WILC(1)-BAZA(2)-REVD(3)	(0.000;0.000;0.197)	224 225
2	WILC(1)-RASS(7)-HOFE(8)	(0.000;0.197;0.133)	229 230
3	BAZA(2)-FANN(4)-GNAL(5)	(0.000;0.195;0.135)	230 231
4	GNAL(5)-TRES(6)-RASS(7)	(0.135;0.004;0.197)	232

---

<sup>1</sup> Odbiorniki wypożyczone przez firmę Nadowski Instrumenty Geodezyjne z Tychów



**Rys. 8.** Sesje pomiarowe w roku 2005. Żółte kółko oznacza odbiornik Trimble'a. W dymkach podano czasy wspólnych obserwacji (kolejny dzień sierpnia, DOY, czas UT). Wykorzystano podkład z publikacji (PACHUTA, 1989) za zgodą autora.

Anteny stawiano bezpośrednio na punkcie lub na spodarce, korzystając z wymuszonego centrowania (rys. 9). Okazało się jednak, że antena na punkcie (7) RASS (pomiar w dniu 229-230) została przewrócona w trakcie pomiaru. Przeprowadzono szereg analiz (w Trimble Total Control, Bernese) starając się określić moment, w którym nastąpiło zdarzenie. Zdecydowano się na skrócenia czasu obserwacji do godziny 8:45. Zdecydowany ruch anteny nastąpił o godzinie 8:55 UT (TTC), jednak skoro antena była niezbyt dobrze ustawiona możliwe jest, że już wcześniej występował niewielki ruch oscylacyjny, na co wskazuje rozwiązanie kinematyczne (Bernese). Stąd też wdarła się niepewność co do stabilności punktu od samego początku pomiaru (nie wykryte w TTC ze względu na znaczną różnicę wielkości ruchu przed i po 8:55). Dodatkowymi testami było porównanie wyznaczonych długości na podstawie współrzędnych (wyniki w dalszej części) oraz porównanie ich między sobą oraz z wartościami z roku 2005. Sugerowanie się wynikami z poprzedniego roku jest nie do końca uzasadnione (zwłaszcza, że poszukujemy ruchu!), natomiast odrzucenie 9 godzin obserwacji znacznie osłabia konstrukcję geometryczną (zwłaszcza punkt 8). Autorzy zdecydowali się na wersje pomijającą całkowicie obserwacje z feralnego dnia wychodząc z założenia, że nieuprawnione jest korzystanie z obserwacji, co do której nie mamy pewności. Jednak dla formalności, a także dla pełnego obrazu uzyskanych wyników, podane są dwie wersje wyników (oznaczone jako **C** - całość oraz **BR** - czyli **bez** obserwacji na punkcie **RASS** w dniu 229-230).

W kolejnym etapie opracowania pliki z „surowymi” obserwacjami DAT i EPH (Trimble) oraz MDB (Leica) przekonwertowano na pliki tekstowe w formacie RINEX (ang. *Receiver INdependent EXchange*). Całość obliczeń wykonano w programie Trimble Geomatics Office.



**Rys. 9.** Anteny satelitarne ustawione na punktach sieci geodynamicznej GNALODEN, FANYPYNTEN, HOFERPYNTEN, RASSTUPET (fot. autorów)

**Tabela 5.** Wysokości punktów (wg. Pachuta, 1989).

Nr	Nazwa	Wysokość [m]
1	Wilczek	10,0
2	Baza	16,0
3	Revdalen	24,0
4	Fannypynten	25,7
5	Gnaloden	5,0
6	Treskelen	32,8
7	Rasstupet	20,0
8	Hoferpynten	16,5

Wyniki porównano do danych z poprzednich pomiarów (ADAMEK, 2005) i zestawiono w tabeli 6. Tabela zawiera odległości zredukowane na poziom morza. Przedstawione zostały tylko „bezpośrednio” pomierzone długości (tzn. pomierzone dalmierzem i obliczone cięciwy –

trudno mówić o całkowicie bezpośrednich pomiarach). Aby nie obarczać odległości z roku 2005 błędami redukcji do obliczenia odległości na poziomie morza przyjęto „oryginalne” wysokości punktów wyznaczonych metodą niwelacji trygonometrycznej w roku 1988 (tabela 5).

**Tabela 6.** Uzyskane długości pomiędzy punktami poligonu w poszczególnych latach. Wszystkie wartości podane są w metrach.

L.P.	Bok	NAZWA	1988	2003	2005C	2005BR	2003-1988	2005BR-1988	2005BR-2003
1	2-4	BAFA	3811,890	3811,898	-	-	0,0080	-	-
2	2-7	BARA	11012,561	11012,574	-	-	0,0130	-	-
3	4-7	FARA	7676,994	7676,990	-	-	-0,0040	-	-
4	4-5	FAGN	4907,848	4907,854	4907,8370	4907,8370	0,0060	-0,0110	-0,0170
5	3-1	REWI	3625,533	3625,543	3625,5281	3625,5281	0,0100	-0,0049	-0,0149
6	2-1	BAWI	756,003	756,004	755,9922	755,9922	0,0010	-0,0108	-0,0118
7	5-7	GNRA	6408,213	6408,215	6408,2091	6408,2091	0,0020	-0,0039	-0,0059
8	3-7	RERA	14190,108	14190,171	-	-	0,0630	-	-
9	1-7	WIRA	10604,172	10604,177	10604,1553	10604,1553	0,0050	-0,0167	-0,0217
10	3-8	REHO	10897,073	10897,093	-	-	0,0200	-	-
11	3-2	REBA	3425,714	3425,715	3425,7117	3425,7117	0,0010	-0,0023	-0,0033
12	4-1	FAWI	3746,132	-	-	-	-	-	-
13	3-4	REFA	7237,076	7237,107	-	-	0,0310	-	-
14	6-5	TRGN	9418,267	-	9418,2614	9418,2614	-	-0,0056	-
15	6-4	TRFA	13761,723	-	-	-	-	-	-
16	4-8	FAHO	6260,519	-	-	-	-	-	-
17	5-8	GNHO	8146,628	-	-	-	-	-	-
18	1-8	WIHO	7659,865	-	7659,8417	7659,8417	-	-0,0233	-
19	2-8	BAHO	8279,928	-	-	-	-	-	-
20	7-8	RAHO	4589,116	-	4589,1096	4589,1096	-	-0,0064	-

Do obliczenia długości zredukowanych skorzystano ze wzoru:

$$S_0 = \left( \sqrt{s^2 - \Delta H^2 \left( 1 - \frac{s^2}{4(R+H)^2} \right)} - \Delta H \frac{s}{2(R+H)} \right) \cdot \frac{R}{R+H} \quad (1)$$

gdzie  $S_0$  – odległość na poziomie morza,  $s$  – odległość skośna pomiędzy centrami punktów,  $R$ - średni promień krzywizny (dla Hornsundu przyjęto 6397412 m),  $\Delta H$  – różnica wysokości ( $H_K - H_P$ ),  $H = H_P$ .

Mając dane odległości skośne z roku 1988 oraz poprzez odwrócenie wzoru (1), a także po konsultacji z autorem (PACHUTA, 1989), upewniono się, że różnice powodowane błędami redukcji są znikome (<0,5 mm) w stosunku do samych wielkości redukcji (Tabela 7).

**Tabela 7.** Porównanie odległości skośnych (centr-centr) pomiędzy pomiarami 1988 i 2003. 1988 oznacza wartość odległości z publikacji (Pachuta, 1989) a 1988 (1) wartość obliczoną z poprzez odwrócenie wzoru (1) korzystając z wysokości zawartych w tab. 2). Wszystkie wartości podane są w metrach.

L.P.	BOK	NAZWA	1988 (1)	1988 [2]	1988(1)-1988[2]	2005C	2005BR	2005BR-1988 (1)
1	2-4	BAFA	3811,9148	3811,915	-0,0002	-	-	-
2	2-7	BARA	11012,5927	11012,593	-0,0003	-	-	-
3	4-7	FARA	7677,0235	7677,023	0,0005	-	-	-
4	4-5	FAGN	4907,9034	4907,903	0,0004	4907,8924	4907,8924	-0,0110
5	3-1	REWI	3625,5697	3625,570	-0,0003	3625,5648	3625,5648	-0,0049
6	2-1	BAWI	756,0283	756,028	0,0003	756,0175	756,0175	-0,0108
7	5-7	GNRA	6408,2431	6408,243	0,0001	6408,2392	6408,2392	-0,0039
8	3-7	RERA	14190,1574	14190,157	0,0004	-	-	-
9	1-7	WIRA	10604,2016	10604,202	-0,0004	10604,1849	brak	-
10	3-8	REHO	10897,1101	10897,110	0,0001	-	-	-
11	3-2	REBA	3425,7341	3425,734	0,0001	3425,7318	3425,7318	-0,0023
12	4-1	FAWI	3746,1754	3746,175	0,0004	-	-	-
13	3-4	REFA	7237,1043	7237,104	0,0003	-	-	-
14	6-5	TRGN	9418,3359	9418,336	-0,0001	9418,3303	9418,3303	-0,0056
15	6-4	TRFA	13761,7878	13761,788	-0,0002	-	-	-
16	4-8	FAHO	6260,5464	6260,546	0,0004	-	-	-
17	5-8	GNHO	8146,6498	8146,650	-0,0002	-	-	-
18	1-8	WIHO	7659,8836	7659,884	-0,0004	7659,8603	7659,8600	-0,0236
19	2-8	BAHO	8279,9490	8279,949	0,0000	-	-	-
20	7-8	RAHO	4589,1304	4589,131	-0,0006	4589,1240	brak	-

Analizując wyniki tabeli 6. widać, że różnice 2003-1988 są znacznie mniejsze od tych dla otrzymanych z ostatniego pomiaru. Jednak, gdy „odskalujemy” wartości odległości z roku 2003 przez opisany w pracy współczynnik skali +2,4 ppm, okazują się one znacznie bliższe naszemu pomiarowi (tabela 8.) co potwierdza wcześniejsze domniemania co do różnic pomiędzy rokiem 1988 i pomiarami z lat 2003 i 2005 spowodowanych błędem systematycznym. Potwierdza to także konieczność głębszej analizy przyczyn tych różnic chcąc porównywać wyniki z rokiem 1988 (jest to cenny materiał ze względu na długi okres, jaki upłynął od tamtego pomiaru).

W załączniku nr 2 podane są także współrzędne wyrównane w układzie WGS84 (2003, 2005), porównania odległości obliczonych ze współrzędnych wyrównanych (2003, 2005), a także zestawione z nimi odległości skośne z pomiaru bezpośredniego (1988, 2005).

Obliczone zostały również współrzędne punktów w układzie ITRF00 na średnią epokę obserwacji (18.08.2005). Obliczenia przeprowadzone były w programie Bernese v.5.0 dowiązując się do trzech stacji odniesienia: Ny Alesund, Tromso, Hoefn (Islandia). Właściwe obliczenia poprzedzono obliczeniami w dwóch serwisach internetowych: OGPSP (Liwosz, 2005) (<http://ogpsp.gik.pw.edu.pl>) oraz australijskiego serwisu AUSPOS (<http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl>). Takie przybliżone współrzędne każdego punktu liczonego niezależnie w odniesieniu do 3 stacji serwisu IGS (*ang. International GNSS Service*) służyły jako współrzędne przybliżone do właściwego wyrównania. Okazało się jednak, że pomimo bardzo starannego opracowania (uwzględniono wiele subtelnych efektów), uzyskane wyniki nie są satysfakcjonujące (głównie z uwagi na odległość do stacji nawiązania).

**Tabela 8.** Odległości zredukowane na poziom morza. 2003 – odl. z tab. 1, 2003' odległości „odskalowane”. Wszystkie wartości podane są w metrach.

L.P.	BOK	NAZWA	2003	2005BR	2005BR-2003	2003·2,4ppm	2003'	2005BR-2003'
1	2-4	BAFA	3811,898	-	-	0,0091	3811,8889	-
2	2-7	BARA	11012,574	-	-	0,0264	11012,5476	-
3	4-7	FARA	7676,990	-	-	0,0184	7676,9716	-
4	4-5	FAGN	4907,854	4907,8370	-0,0170	0,0118	4907,8422	-0,0053
5	3-1	REWI	3625,543	3625,5281	-0,0149	0,0087	3625,5343	-0,0062
6	2-1	BAWI	756,004	755,9922	-0,0118	0,0018	756,0022	-0,0100
7	5-7	GNRA	6408,215	6408,2091	-0,0059	0,0154	6408,1996	-
8	3-7	RERA	14190,171	-	-	0,0341	14190,1369	-
9	1-7	WIRA	10604,177	10604,1553	-0,0217	0,0255	10604,1515	0,0038
10	3-8	REHO	10897,093	-	-	0,0262	10897,0668	-
11	3-2	REBA	3425,715	3425,7117	-0,0033	0,0082	3425,7068	0,0050
12	4-1	FAWI	-	-	-	-	-	-
13	3-4	REFA	7237,107	-	-	0,0174	7237,0896	-
14	6-5	TRGN	-	9418,2614	-	-	-	-
15	6-4	TRFA	-	-	-	-	-	-
16	4-8	FAHO	-	-	-	-	-	-
17	5-8	GNHO	-	-	-	-	-	-
18	1-8	WIHO	-	7659,8417	-	-	-	-
19	2-8	BAHO	-	-	-	-	-	-
20	7-8	RAHO	-	4589,1096	-	-	-	-
				[vv]	0,0012		[vv]	0,0002

Dla niewielkich sieci geodynamicznych rzędu 15 kilometrów **wystarczające** jest standardowe opracowanie np. w TGO (pomiar względne na małym obszarze niwelują tutaj wpływ takich efektów jak niedokładności satelitów, wpływ refrakcji troposferycznej, wpływ pływów skorupy Ziemi, efektów obciążeniowych pływów oceanicznych itd.). Natomiast **duże odległości** do stacji odniesienia (200, 1000, 1800 km) oraz słaba geometria nawiązania **zniekształcają** wzajemne relacje położenia punktów samego poligonu. Ponadto problematyczne jest uwzględnianie wszystkich efektów w sesjach, które obejmują po kilka godzin dwóch kolejnych dni względu na standardy IGS i jej centrów analiz, które podają dobowe rozwiązania. Takie współrzędne **nie mogą** służyć do celów geodynamicznych (stąd dla uniknięcia pomyłek ich nie podano).

#### 4. Posumowanie i wnioski

W ramach czwartej wyprawy pracowników i studentów wykonane zostały wszystkie zadania. Dodatkowo pomierzono sieć geodynamiczną wokół fiordu Horsund. Wyniki z wykonanych pomiarów i przeprowadzonych analiz prowadzą do następujących wniosków:

1. Średni dobowy ruch lodowca wzdłuż profilu poprzecznego oscyluje w granicach od 3 do 19 cm. Jest on porównywalny do ruchu zarejestrowanego w 1987 roku przez Dąbrowskiego i Kurczyńskiego. Nie pozwala to na wyciągnięcie jednoznacznego wniosku co do zmiany prędkości ruchu lodowca w okresie ostatnich 18 lat. Niemniej zalecane jest powtórzenie pomiarów w roku 2006, co pozwoliłoby na wyznaczenie średniorocznego dobowego ruchu co uwiarygodniłoby uzyskane wyniki.
2. W pomiarach ruchu lodowca na znakach profilu poprzecznego najkorzystniej jest stosować technologię czasu rzeczywistego RTK. Daje ona wystarczająco dokładne wyznaczenie współrzędnych i znacząco skraca czas pomiaru. Ponadto w okresie, kiedy na lodowcu jest dostateczna pokrywa śnieżna w pomiarach można korzystać ze skuterów, co dodatkowo ułatwia i przyspiesza pomiary.
3. Zamarkowane i zmierzone nowe punkty bazy fotogrametrycznej pozwolą na łatwiejsze i bardziej dokładne śledzenie zmian stanu czoła lodowca Hansa. Założenie stacji referencyjnej w okolicach stacji polarnej pozwala też na doraźną stabilizację punktów bazy, dogodną z punktu widzenia warunków panujących w trakcie pomiaru fotogrametrycznego. Można wykorzystać technologię RTK i wyznaczać położenie stanowiska fotogrametrycznego niemal w trakcie pomiaru.
4. Pomiary satelitarne w sieci geodynamicznej nie przyniosły jednoznacznej odpowiedzi co do ewentualnych ruchów punktów sieci. Porównanie z pomiarem wyjściowym z roku 1988 wskazuje raczej na istnienie różnicy skali pomiędzy pomiarem klasycznym i pomiarami GPS w latach 2003 i 2005. Problem ten wymaga dalszych analiz, które planuje wykonać dyplomant – uczestnik wyprawy Marcin Rajner w ramach swojej pracy magisterskiej. Należy jednak podkreślić, że materiał obserwacyjny zebrany z dwóch ostatnich pomiarów sieci geodynamicznej stanowi dobry punkt wyjścia do dalszych badań dynamiki fiordu Horsund.
5. Pomiary odbywały się w trudnych warunkach, a każdy z nich trwał około 4 godzin. Dodatkowe czasochłonne jest dotarcie do profilu. Marsz wzdłuż lodowca zabiera blisko dwie godziny i często trzeba nadkładać drogi omijając szerokie szczeliny. Czas trwania pomiarów i warunki „terenowe” na lodowcu wymagają starannego przygotowania zespołu pomiarowego od strony logistycznej i sprzętowej.

## Literatura

- ADAMEK A. (2004), *Geodezja ekstremalna*, Magazyn Geoinformacyjny „Geodeta”, nr 12/2004;
- ADAMEK A. (2005), *Badanie dynamiki lodowców i struktur geologicznych na Spitsbergenie geodezyjnymi metodami klasycznymi i satelitarnymi*. Praca dyplomowa-magisterska, Warszawa, 2005
- CISAK, J., S.DĄBROWSKI, (1990), *Polish geodetic and cartographic studies in the Arctic and Antarctic regions*, Polish Polar Research, 11, 3-4, 1990,
- JANIA J. (1997), *Glacjologia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997;
- KURCZYŃSKI Z. (2003), *Studenci przemierzają Arktykę*, Magazyn Geoinformacyjny „Geodeta” nr 10/2003;
- LIWOSZ, T., (2005), *System automatycznego opracowania obserwacji GPS dla użytkowników indywidualnych*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2005;
- PACHUTA A. (1989), *Pierwsza wyprawa Wydziału GiK PW na Spitsbergen*, Przegląd Geodezyjny 1989, No 4-5 (18-21), Warszawa 1989;
- PACHUTA, A., K.PACHUTA, A.ADAMEK, J.WALO, M.WOŹNIAK, Z.KURCZYŃSKI, (2005): *Zastosowanie metody GPS w badaniach polarnych na Spitsbergenie*. Materiały z konferencji „Geodeticke siete a priestorove informacie”, Podbanske, 24-26 października 2005;
- PAŁUBSKI A. (2003), *Wyrównanie i analiza sieci punktów dla otoczenia fiordu Hornsund*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2003;
- SAGAN M. (2005), *Opracowanie zasięgu czoła lodowca Hansa na podstawie zdjęć wieloczasowych*, Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, 2005;
- WALO, J., A.ADAMEK, A.PACHUTA, K.WĘZKA, Z.MALINOWSKI, M.RAJNER, (2005): *Badanie ruchu lodowca Hansa na Spitsbergenie*. Materiały z konferencji „Geodeticke siete a priestorove informacie”, Podbanske, 24-26 października 2005;