

Analiza zmian przyspieszenia siły ciężkości na stanowiskach monitoringu geodynamicznego PIG-PIB

Mirosław Musiatewicz, Tomasz Czerwiński, Kamila Karkowska
Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy



Tomasz Olszak, Andrzej Pachuta, Viktor Szabo
Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii

Grybów 8 - 10.06.2022 r.



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

Projekt MoGePL - ewolucja

- 1) **Monitoring sejsmiczny Polski** – *obserwacje aktywności sejsmicznej na wybranych punktach (7) w wybranych regionach Polski (IGF PAN: 2008 – 2011)*
- 2) **Permanentny monitoring geodynamiczny Polski – etap I** - *projektowanie i budowa sieci obserwacyjnej oraz systemu informatycznego w zakresie gromadzenia danych, przetwarzania i automatycznego alertowania (PIG-PIB PSG: 2012 – 2016)*
- 3) **Monitoring geodynamiczny Polski – etap II** – *utrzymanie infrastruktury i systemu obserwacji (PIG-PIB PSG: 2017 – 2018)*
- 4) **Monitoring geodynamiczny – etap III** - *realizacja projektu funkcjonowanie i rozwój sieci monitoringu geodynamicznego (PIG-PIB PSG: 2019 – 2021 - zaakceptowany przez Głównego Geologa Kraju do realizacji w ramach zadań PSG)*



Projekt MoGePL – punkty badawcze

Baza materialna – obiekty do prowadzenia monitoringu (PSG):

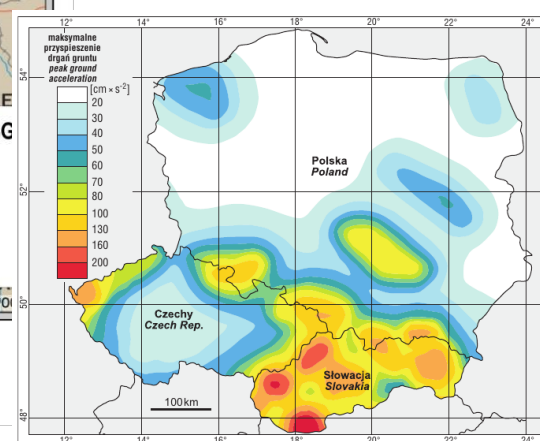
1. Obiekty 2 stałych stacji do obserwacji geodynamicznych z infrastrukturą techniczną i teleinformatyczną oraz zapleczem socjalnym:

- **stacja HOLO (Hołowno) w Hołownie, gm. Podedworze, pow. parczewski**
- **stacja DZIW (Dziwie) w Dziwiu, gm. Przedecz, pow. kolki**

2. Dzierżawa/wynajem pomieszczeń gospodarczych zlokalizowanych na terenie wyselekcjonowanych leśniczówek Lasów Państwowych.



Lokalizacja stacji sejsmicznych funkcjonujących na terytorium Polski w sieci państwowej służby geologicznej **PSG_Sejs_NET** wg. stanu na **25/01/2021 r.** (mapa bazowa – CIA)



Projekt MoGePL – infrastruktura pomiarowa

Permanentny monitoring geodynamiczny Polski – etap I

Baza instrumentalna (PSG):

1. Systemy akwizycji danych sejsmicznych:
 - **2 systemy szerokopasmowe (sejsmometr STS-2.5, rejestrator NDL-2),**
 - **10 systemów krótkookresowych (sejsmometr GeoSig VB55 BB, rejestrator NDL-2)**
2. Automatyczna stacja meteo Paroscientific MET4A (1 egz.)
3. Magnetometry protonowe **ENVI-MAG PRO** w wersji stacji bazowej do monitoringu wariacji czasowych modułu całkowitego wektora indukcji ziemskiego pola magnetycznego (2 kompl.)
4. Wyposażenie teleinformatyczne stałych stacji do transmisji danych i komunikacji on-line z systemami rejestracji danych oraz serwerem danych (2 kompl.)
5. **Grawimetr pływowy gPhone** – na stacji Hołowno wraz z sejsmometrem szerokopasmowym i GNSS

Baza instrumentalna (nienależąca do PIG) wykorzystywana w programie MoGePL:

1. Systemy akwizycji danych sejsmicznych (IGF PAN):
 - **20 systemów krótkookresowych (sejsmometr GeoSig VB55 BB, rejestrator NDL-a)**
2. Systemy akwizycji danych niesejsmicznych (GUGiK):
 - **2 anteny i odbiorniki GNSS Trimble NetRS z antenami Trimble Zephyr Geodetic**



Projekt MoGePL – stacja Hołowno

A

Stała stacja PSG monitoringu geodynamicznego w Hołownie



B



A – widok „bunkra”/ laboratorium pomiarowego

B – automatyczna stacja meteo

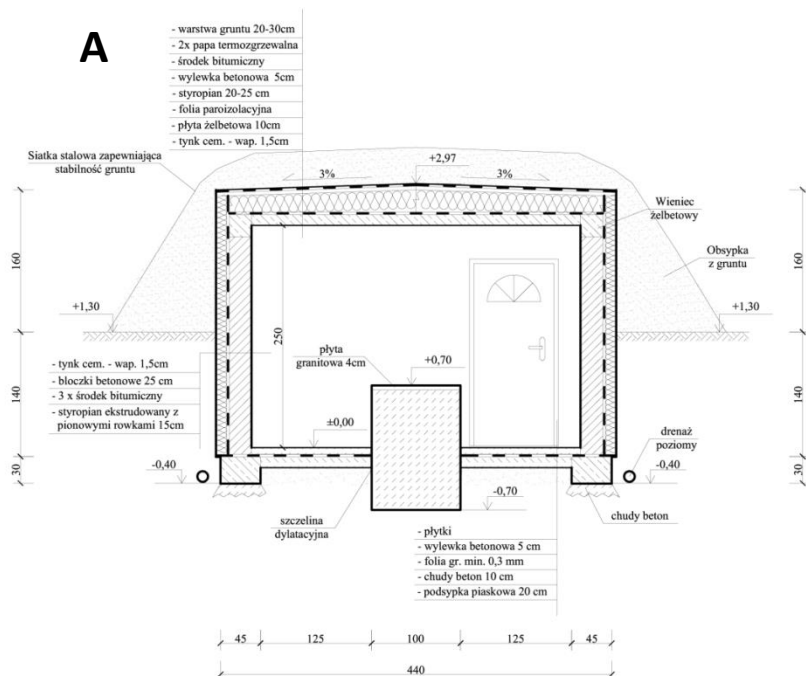
C – widok na sondę magnetyczną magnetometru ENVI_MAG oraz słup pomiarowy do pomiarów geodezyjnych z zainstalowaną anteną odbiornika GNSS

C



Projekt MoGePL – stacja permanentna Dziwie (bunkier)

Stała stacja PSG monitoringu geodynamicznego w Dziwiu



A – przekrój poprzeczny konstrukcji „bunkra” / laboratorium pomiarowego (z dokumentacji budowlanej)

B – pawilon socjalny na stacji w Dziwiu

C – widok pomieszczenia laboratoryjnego w „bunkrze” pomiarowym z zainstalowanymi urządzeniami aparatury pom. (na słupie pomiarowym sejsmometr szerokopasmowy STS-2.5)



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

Projekt MoGePL – stacje sejsmiczne „ruchome”

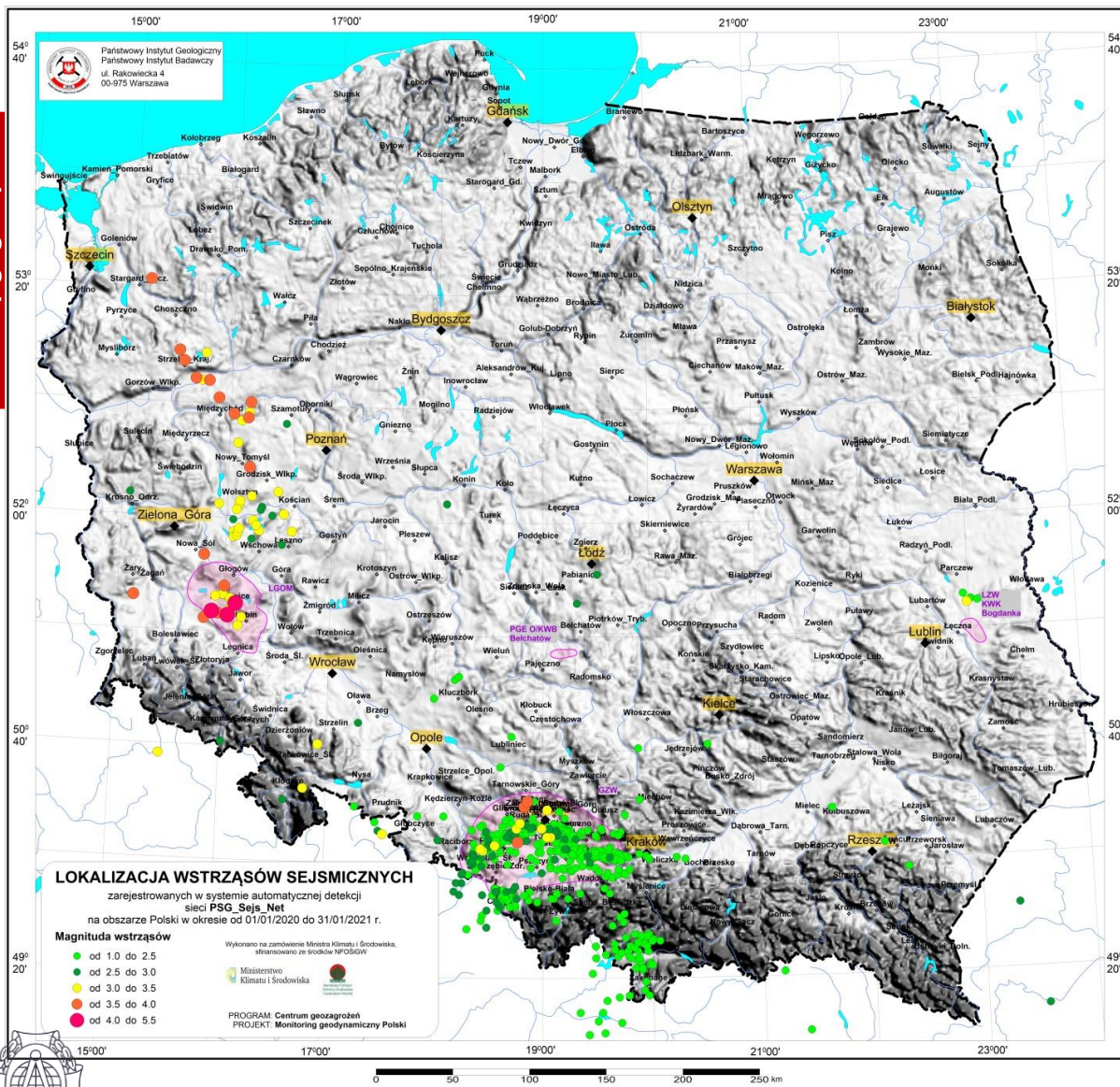
Mobilna stacja PSG monitoringu sejsmicznego w leśniczówce Cichobórz, gm. Mircze, pow. hrubieszowski



- A** – pomieszczenie gospodarcze, w którym zainstalowano mobilną stację sejsmiczną
- B** – antena kierunkowa do komunikacji stacji z serwerem z wykorzystaniem łączy telefonii komórkowej
- C, D** – mobilna stacja sejsmiczna na stanowisku monitoringu aktywności sejsmicznej na terenie leśniczówki Cichobórz, gm. Mircze, pow. hrubieszowski



Projekt MoGePL – wydarzenia sejsmiczne na obszarze Polski

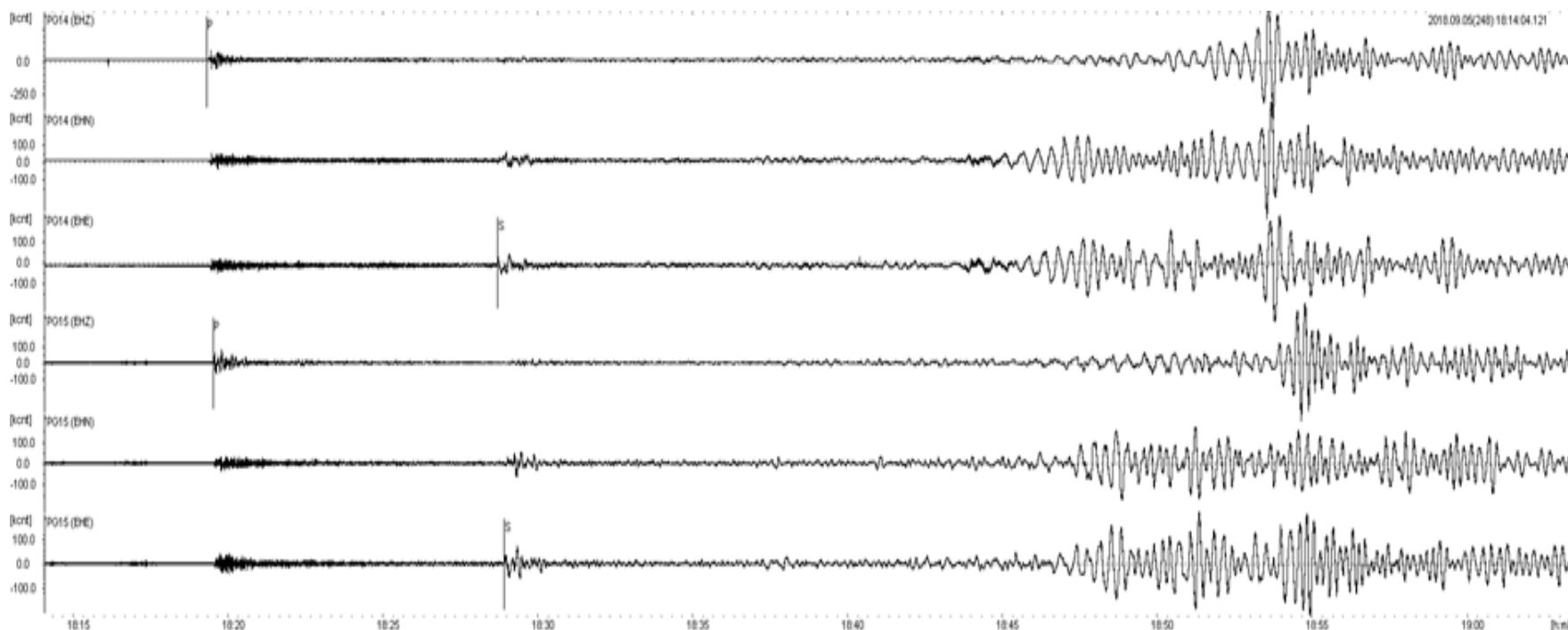


Statystyka wstrząsów *)
zarejestrowanych w sieci w obszarze
Polski i na terenach przygranicznych
w okresie 22.09.2016 - 31.08.2018 r.

Magnituda		Ilość zdarzeń	%
od	do		
1.0	2.5	496	66.3
2.5	3.0	141	18.9
3.0	3.5	69	9.2
3.5	4.0	26	3.5
≥ 4.0		16	2.1
Razem:		748	100.0

*) zjawiska zarejestrowane w
procesie automatycznego
przetwarzania danych i
identyfikacji zdarzeń sejsmicznych
w systemie powiadamiania sieci
PSG_Sejs_NET

Projekt MoGePL – przykład rejestracji sejsmicznej



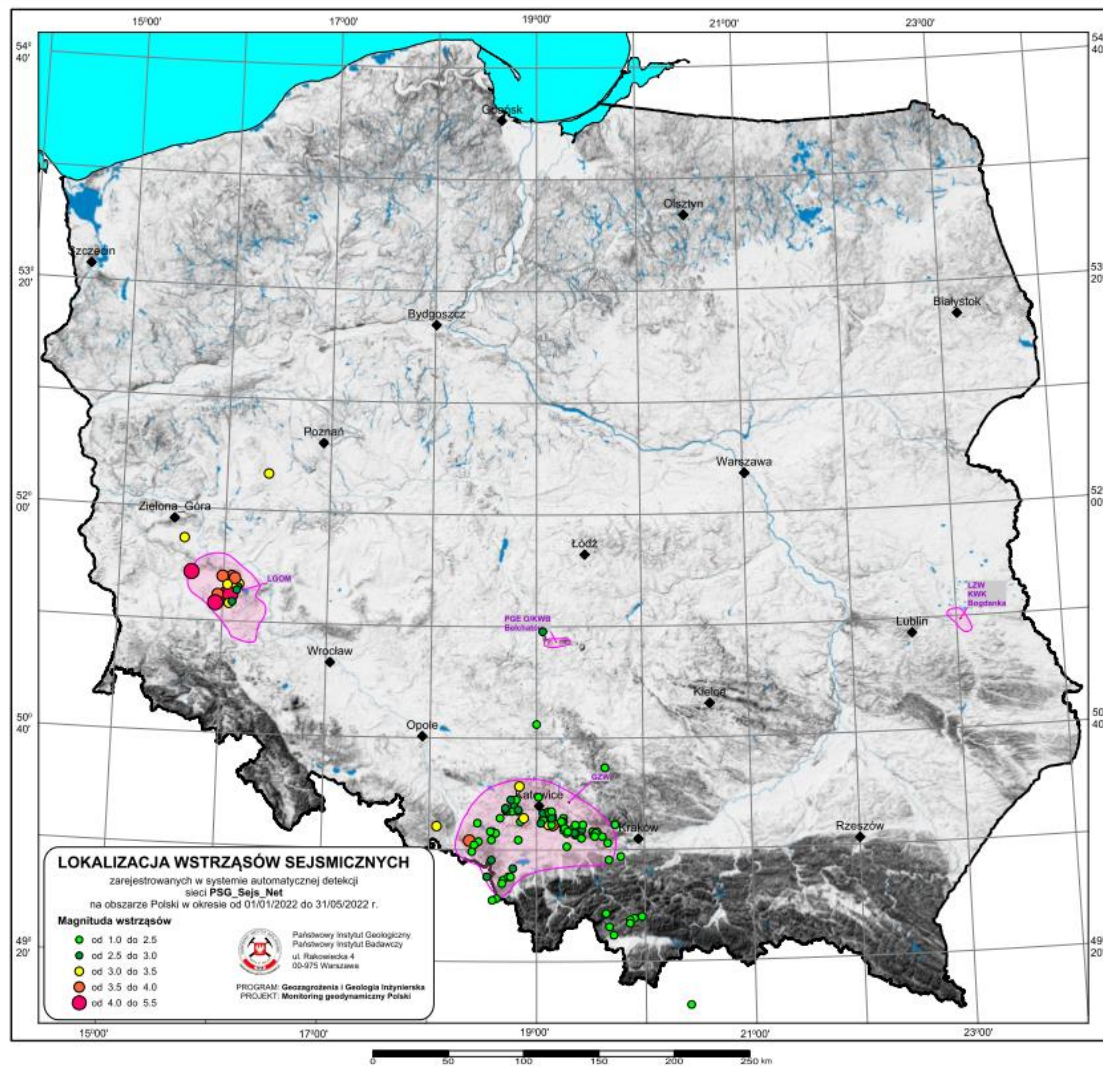
Zapis wstrząsu sejsmicznego z dnia 05/09/2018 r., godz. 18:07:58 (UTC) zarejestrowanego na stacji sejsmologicznej **Hołowno (PG14)** i **Dziwie (PG15)** w sieci PSG_Sejs_NET państwowej służby geologicznej.

Parametry trzęsienia Ziemi wyznaczone przez NEIC			
Data (UTC)	05.09.2018	Data lokalna	06.09.2018
Czas (UTC)	18:07:58	Czas lokalny	03:07:58
Lokalizacja epicentrum	42.671N		
Współrzędne (φ, λ)	141.933E		
Głębokość	33.4		
Magnituda	6.6		
Region	Hokkaido Island, Japan		
Rejonizacja epicentrum			
Ofiary	Co najmniej 11		



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

Projekt MoGePL – przykład raportu miesięcznego z akwizycji danych sejsmicznych



Załącznik nr 2

RAPORT MIESIĘCZNY

z dnia 02/06/2022 r.
aktywności sejsmicznej na obszarze Polski zarejestrowanej
w systemie automatycznej detekcji sieci PSG_Sejs_Net
w okresie od 01/01/2022 do 31/05/2022 r.
MONITORING GEODYNAMICZNY POLSKI - etap IV

Statystyka zdarzeń sejsmicznych
zarejestrowanych w systemie automatycznej detekcji
sieci PSG_Sejs_Net
w obszarze Polski i na terenach przygranicznych
w okresie 01/01/2022 - 31/05/2022 r.

Magnituda		Liczba zdarzeń	%
>			
1.0	2.5	72	61.5
2.5	3.0	23	19.7
3.0	3.5	12	10.3
3.5	4.0	6	5.1
4.0	4.5	2	1.7
M=4.5		2	1.7
Razem:		117	100.0
w tym:	M<=2.5	72	61.5
	M>2.5	45	38.5
	M _{min}	1.1	
	M ₀	2.5	
	M _{max}	4.7	

obszary występowania sejsmiczności indukowanej
górnictwa i górnictwo-tektonicznej

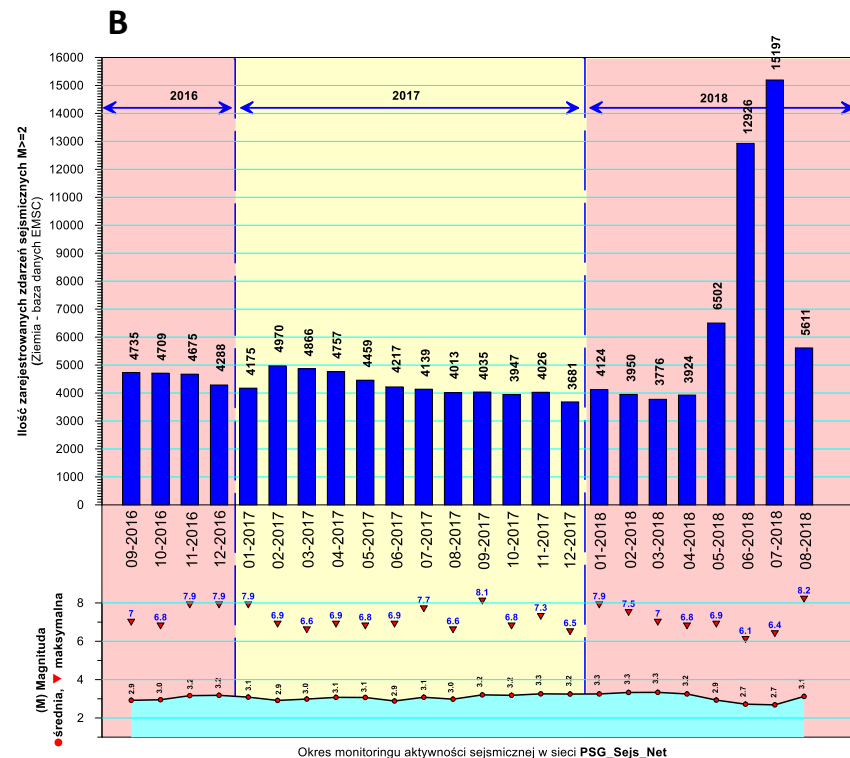
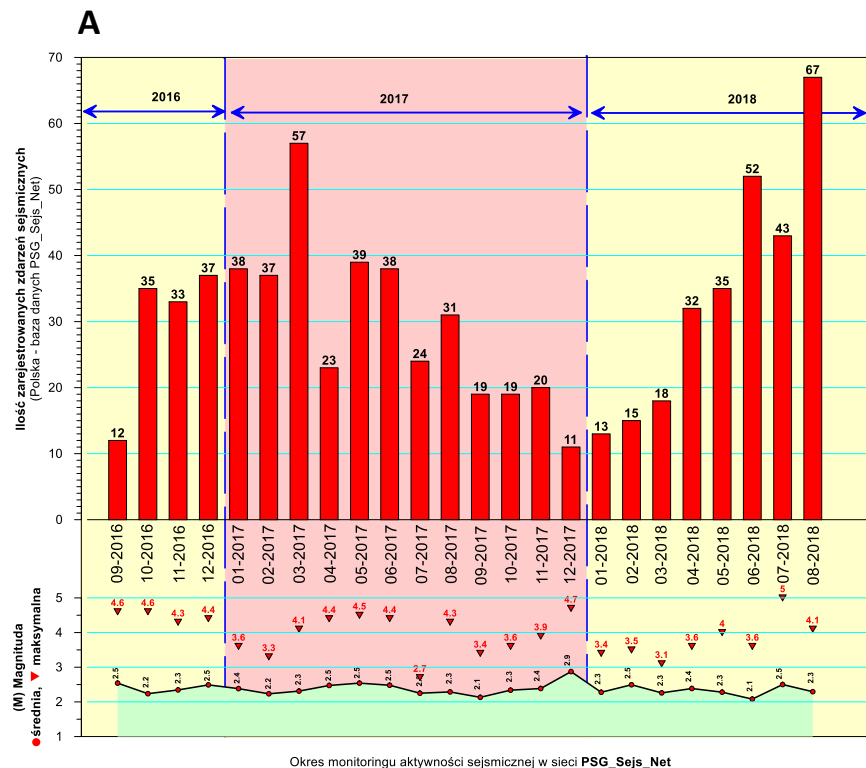
Raport wykonano na zamówienie Ministra Klimatu i Środowiska,
sfinansowano ze środków NFOŚiGW

Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

Projekt MoGePL – statystyka zdarzeń sejsmicznych



Syntetyczne charakterystyki aktywności sejsmicznej na obszarach:

A - Polski (dane PSG_Sejs_NET) *)

B - świata (na podstawie danych EMSC)

*) zjawiska zarejestrowane w procesie automatycznego przetwarzania danych i identyfikacji zdarzeń sejsmicznych w systemie powiadamiania sieci PSG_Sejs_NET



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

Projekt MoGePL – monitoring GNSS

Stałe stacje monitoringu geodynamicznego PSG w systemie ASG-EUPOS

- dwusystemowe odbiorniki GNSS przekazane przez GUGiK
- wsparcie stacją meteo + łącze światłowodowe
- obecnie niezgodne z infrastrukturą multiGNSS pozostałych punktów sieci ASG
- stabilizacja ziemna z „kloszem” i instalacją odgromową

Lp	Stacja	B	L	h _{el.}
1	HOLO	51 39 05,41283 N	23 11 47,70975	187,860
2	DZWE	52 19 21,41835 N	18 55 25,33150	162,034

Hołowno (HOLO)



Dziwie (DZWE)



Projekt MoGePL – monitoring GNSS

Raporty roczne z CIBD GNSS WAT (dr inż. Andrzej Araszkiewicz)

Stacja: HOLO

Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy

Raport za okres od 2019/01/01 do 2019/12/31

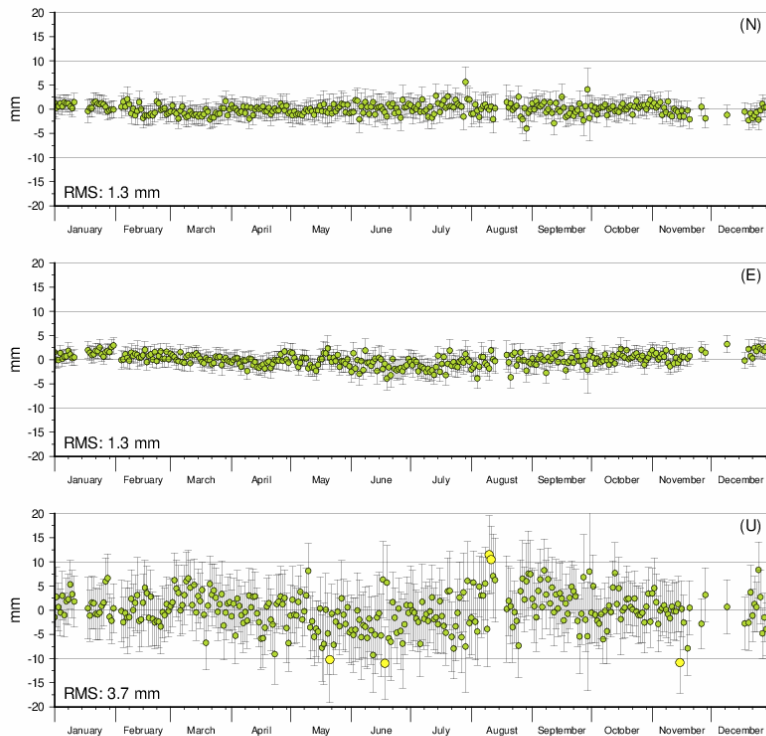
Stabilność pozioma: 1.2 mm

Stabilność pionowa: 3.7 mm

Liczba rozwiązań: 324

Współrzędne średnie:

	3644978.305 m		3644978.916 m
ITRF2014	1561983.308 m	ETRF2000	1561982.879 m
	4978985.871 m		4978985.550 m



Centrum Infrastruktury Badawczej Danych GNSS współfinansowane ze środków EFRR
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego
gnss@wat.edu.pl

Stacja: DZWE

Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy

Raport za okres od 2019/01/01 do 2019/12/31

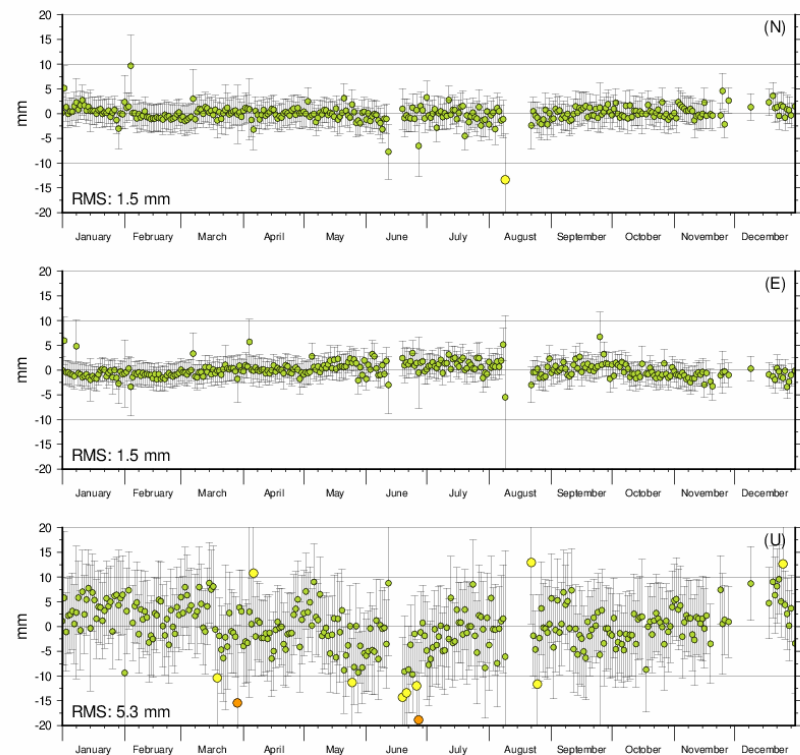
Stabilność pozioma: 1.6 mm

Stabilność pionowa: 5.3 mm

Liczba rozwiązań: 321

Współrzędne średnie:

	3695556.454 m		3695557.033 m
ITRF2014	1266980.718 m	ETRF2000	1266980.282 m
	5024952.950 m		5024952.621 m



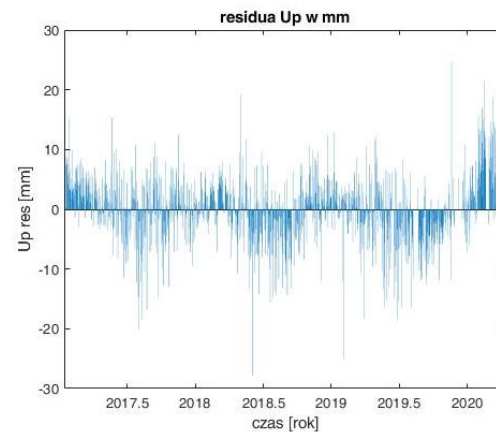
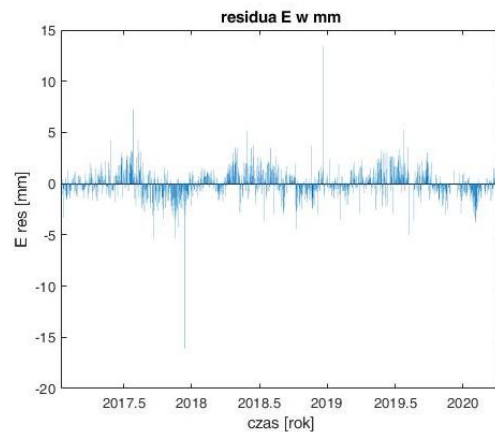
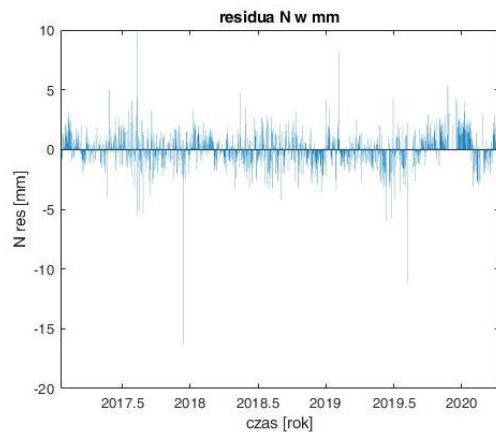
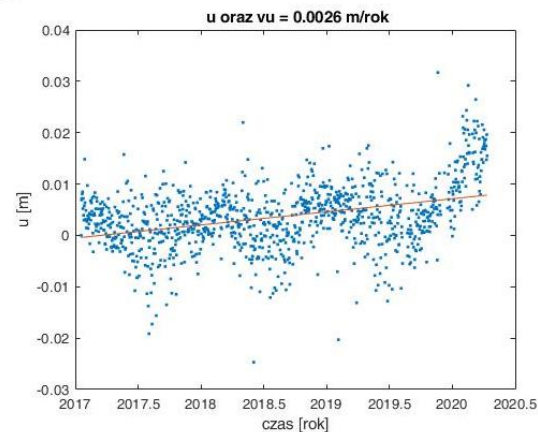
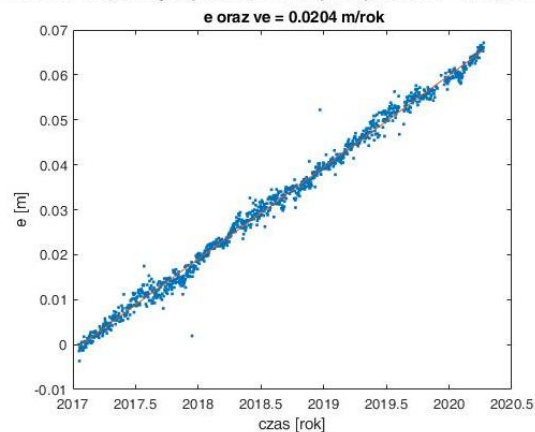
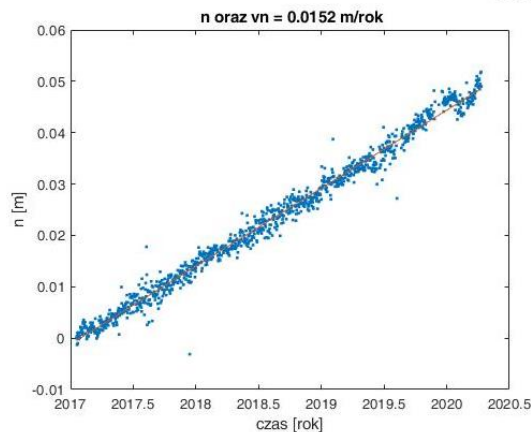
Centrum Infrastruktury Badawczej Danych GNSS współfinansowane ze środków EFRR
Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego
gnss@wat.edu.pl



Projekt MoGePL – monitoring GNSS

Szeregi zmian współrzędnych w układzie topocentrycznym dla stacji DZIWIE

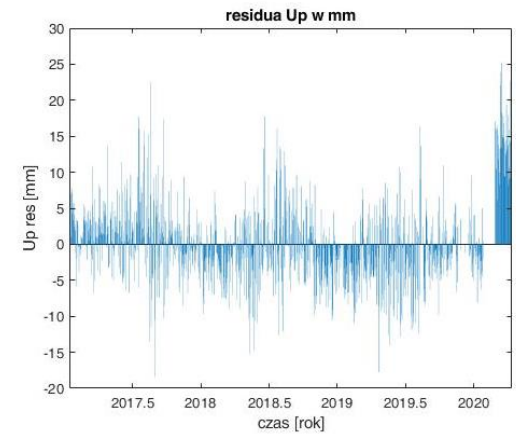
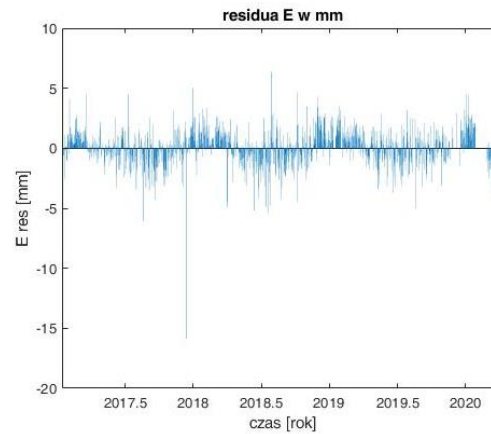
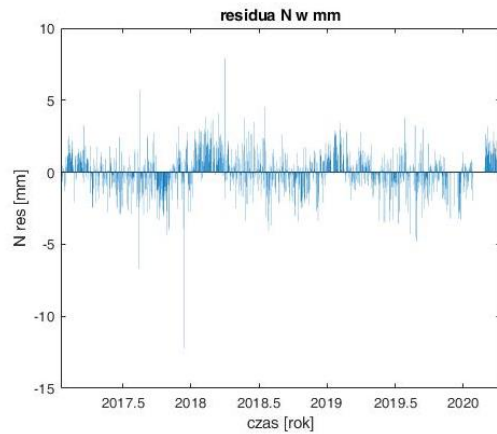
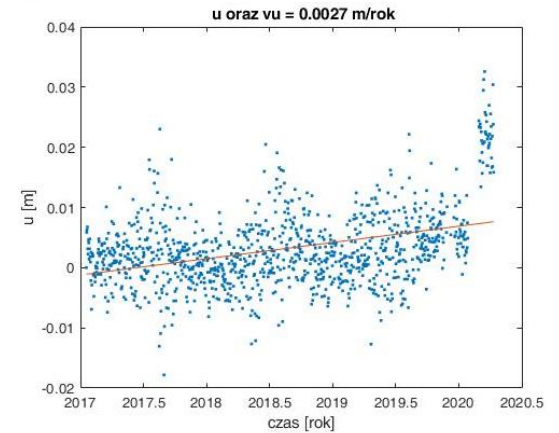
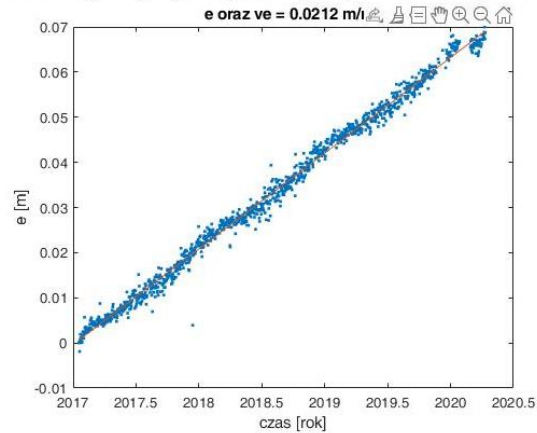
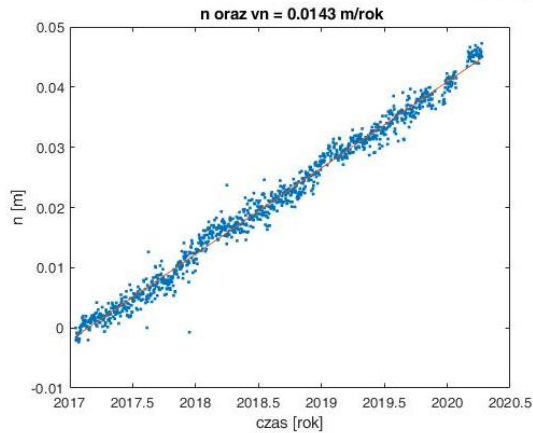
szeregi czasowe współrzędnych topocentrycznych neu - stacja DZIWIE



Projekt MoGePL – monitoring GNSS

Szeregi zmian współrzędnych w układzie topocentrycznym dla stacji HOŁOWNO

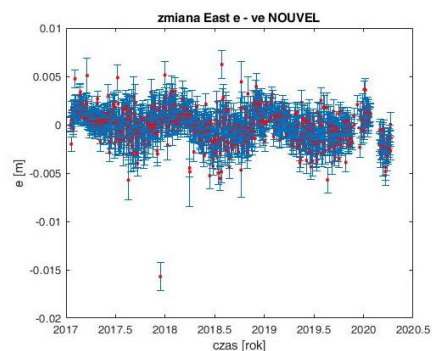
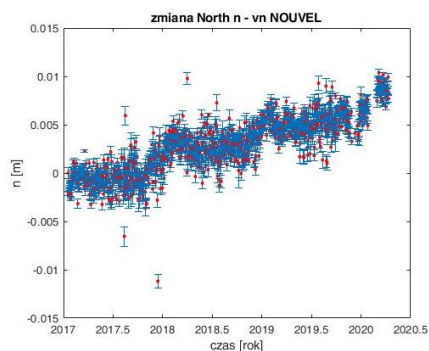
szeregi czasowe współrzędnych topocentrycznych neu - stacja HOŁOWNO



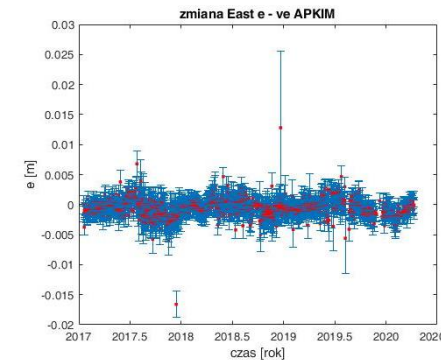
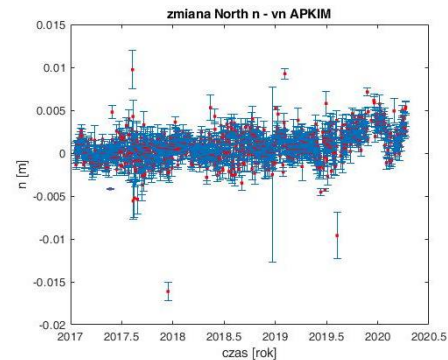
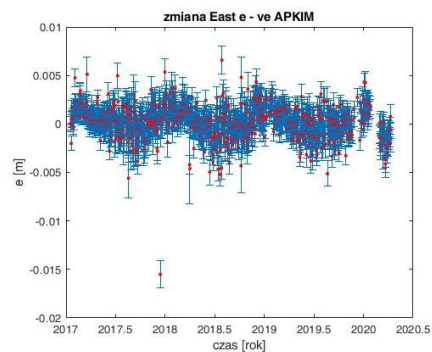
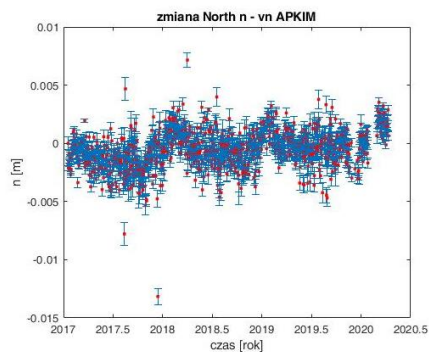
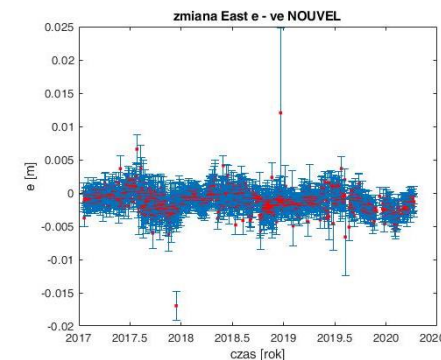
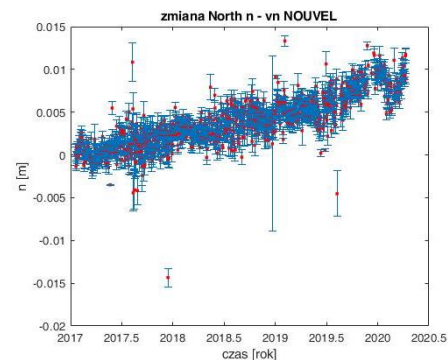
Projekt MoGePL – monitoring GNSS

Residua prędkości względem modelu płyty E-A (APKIM2014, NOUVEL)

Hołowno (HOLO)



DZIWIE (DZWE)



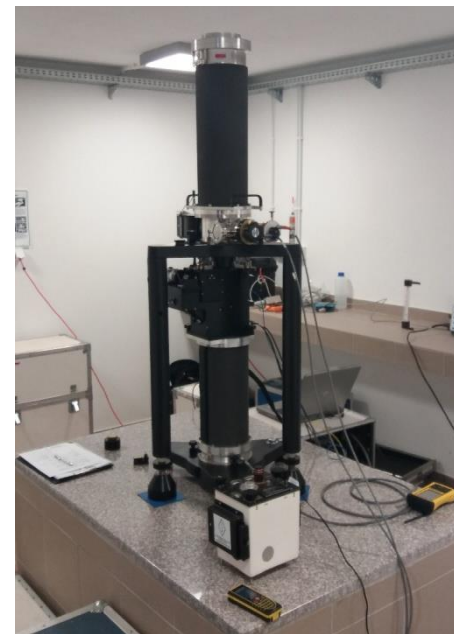
Projekt MoGePL – monitoring grawimetryczny

Pierwsze dwa cykle obserwacyjne grawimetrem absolutnym FG-5 wykonano w listopadzie 2017 i 2018 roku na stacjach monitoringu permanentnego w Dziwiu i Hołownie. Od roku 2019 do 2021 wykonywano dwa cykle rocznie, w schemacie wiosna – jesień. **Opracowanie zgodne ze standardem realizacji IGRF.** Pomiary obejmowały również obserwacje pionowego gradientu przyspieszenia siły ciężkości oraz wilgotności względnej w każdej epoce pomiaru.

Dziwie 2017

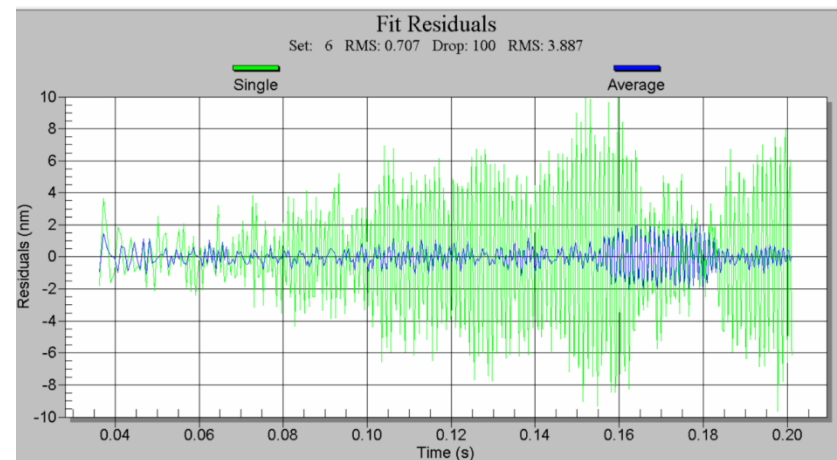
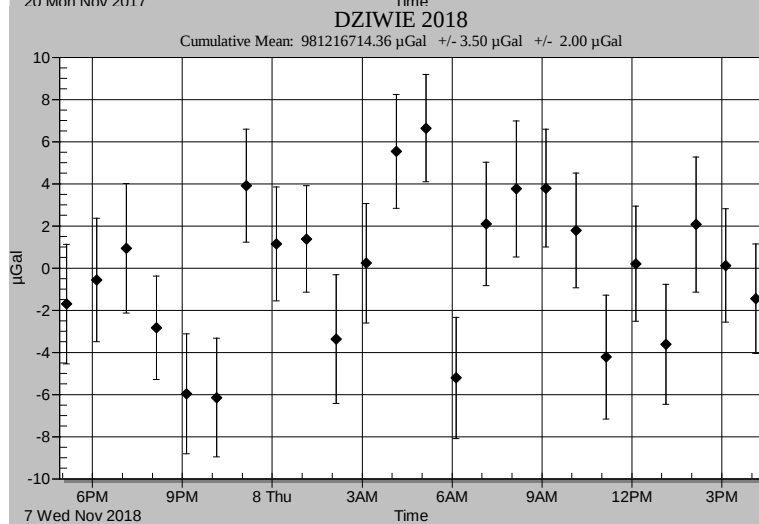
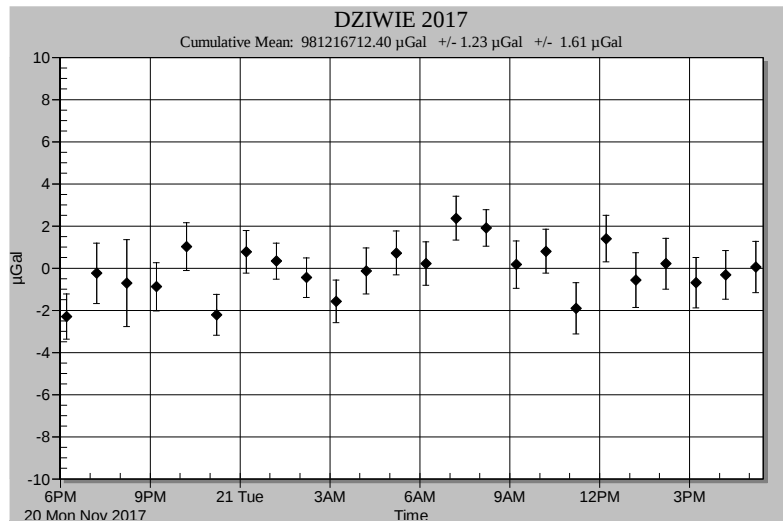


Hołowno 2017

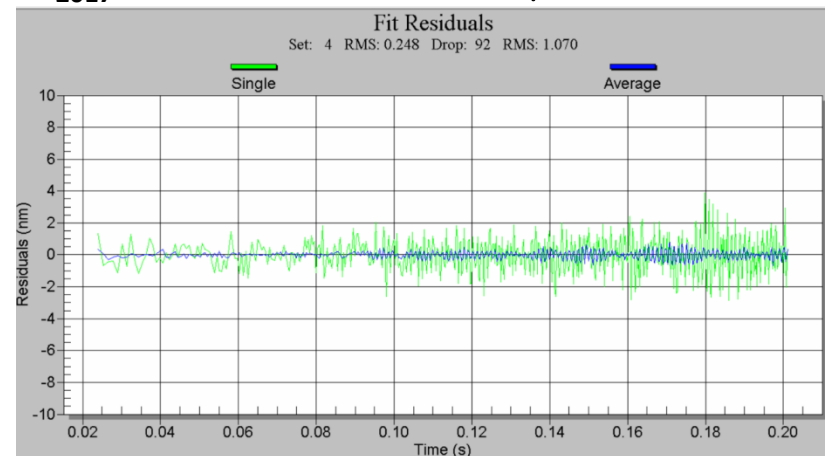


Projekt MoGePL – monitoring grawimetryczny warunki mikrosejsmiczne na stanowisku Dziwie

www.pgi.gov.pl



$$g_{2017} = 981216712,40 \pm 1,23 \mu\text{Gal}$$



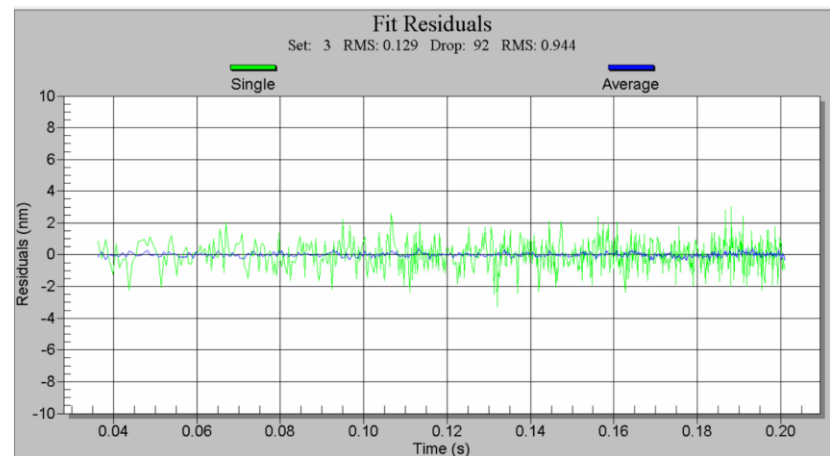
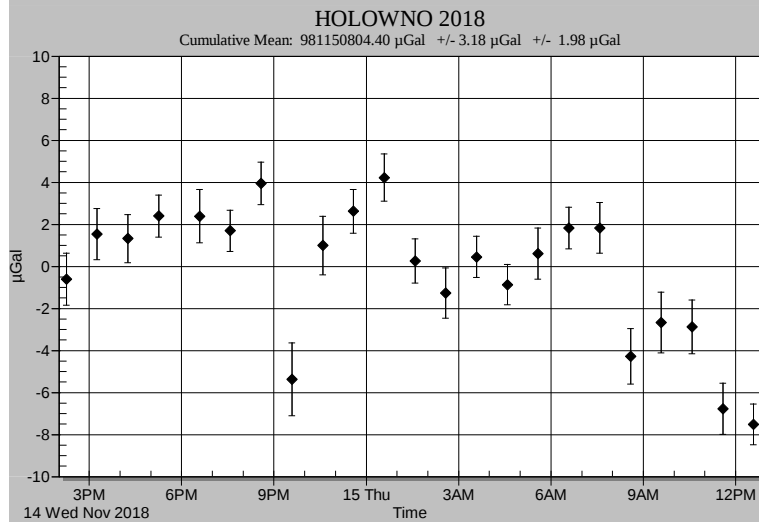
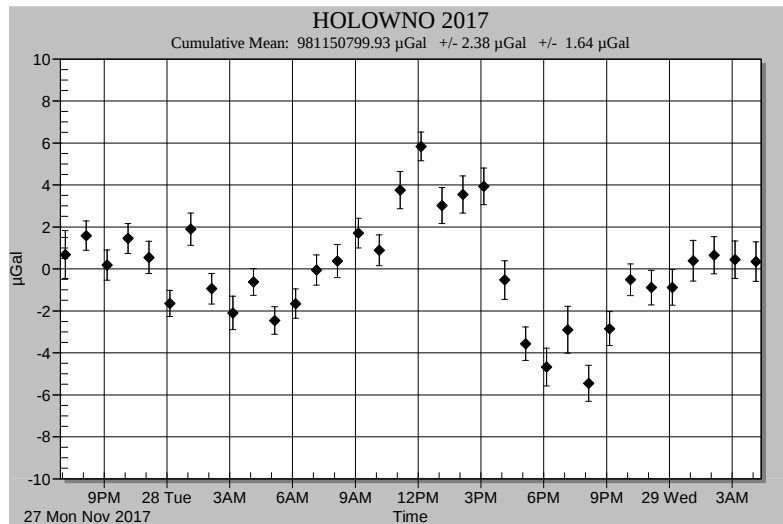
$$g_{2018} = 981216714,36 \pm 3,50 \mu\text{Gal}$$



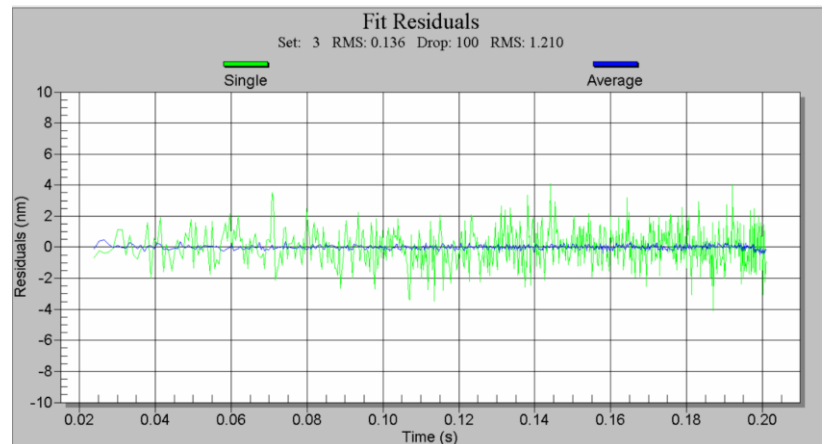
Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

Projekt MoGePL – monitoring grawimetryczny warunki mikrosejsmiczne na stanowisku Hołowno

www.pgi.gov.pl



$$g_{2017} = 981150799,93 \pm 2,38 \mu\text{Gal}$$



$$g_{2018} = 981150804,40 \pm 3,18 \mu\text{Gal}$$



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

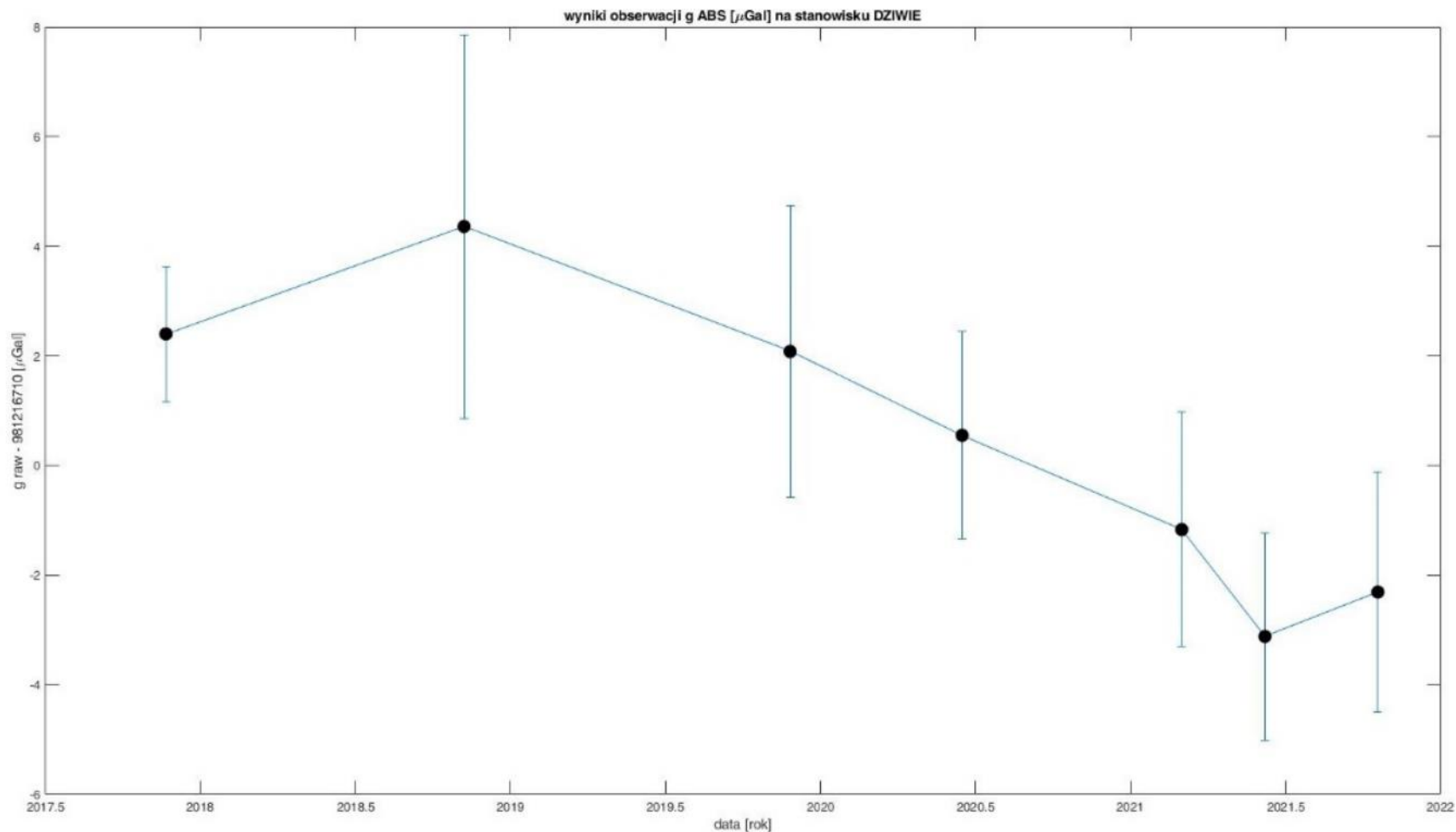
Projekt MoGePL – standard opracowania

- pływy litosferyczne (*tide*) wg procedury PREDICT programu ETGTAB, czyli procedury obliczania efemerydy pływowej z wykorzystaniem rozwinięcia potencjału pływowego w myśl katalogu Tamury do stopnia 1280 przy wykorzystaniu globalnych wartości współczynników fal pływowych odpowiadających modelowi WDD (*Dehant V., Defraigne P., and Wahr J.M., Tides for a convective Earth, J. Geophys. Res., 104, B1, 1035-1058, 1999*).
- pływy oceaniczne (*ocean loading*) wyznaczane na podstawie modelu pływów oceanicznych reprezentowanym przez model FES2004 (*Lyard, F., F. Lefèvre, T. Letellier and O. Francis. Modelling the global ocean tides: a modern insight from FES2004, Ocean Dynamics, 56, 394-415, 2006*)
- poprawkę atmosferyczną (*barometric correction*) ze współczynnikiem zmiany przyspieszenia $c = 0,3 \mu\text{Gal}/\text{mbar}$;
- nieliniowe współczynniki rzeczywistego modelu zmian przyspieszenia siły ciężkości – wyznaczane na każdym punkcie na potrzeby wyznaczenia wartości przyspieszenia (parametr w równaniu drogi) i redukcji wartości przyspieszenia wyznaczonej w początku drogi spadku do przyspieszenia w centrum znaku grawimetrycznego (*transfer height correction*).
- zmianę orientacji osi obrotu Ziemi poprawką (*polar motion*) uwzględniającą ruch bieguna wyznaczaną na podstawie współrzędnych bieguna – x , y – wyznaczonych na średni moment obserwacji całej sesji obserwacyjnej na podstawie Biuletynu B publikowanego przez służbę International Earth Rotation Service (IERS).
- poprawkę ze względu na dyfrakcję wiązki laserowej przyjęto na podstawie publikacji (*D van Westrum and T M Niebauer: The diffraction correction for absolute gravimeters, 2003 Metrologia 40*) na wartość $+1,2 \mu\text{Gal}$.
- poprawkę ze względu na własne przyciąganie grawimetru „self attraction correction” przyjęto w wartości wynikającej z opracowania: (*V Pálinkáš, J Liard and Z Jiang On the effective position of the free-fall solution and the self-attraction effect of the FG5 gravimeters 2012 Metrologia 49 doi:10.1088/0026-1394/49/4/552*) z wartością $-1.34 \mu\text{Gal}$. Wielkość tej poprawki jest niezależna od czasu i miejsca obserwacji.

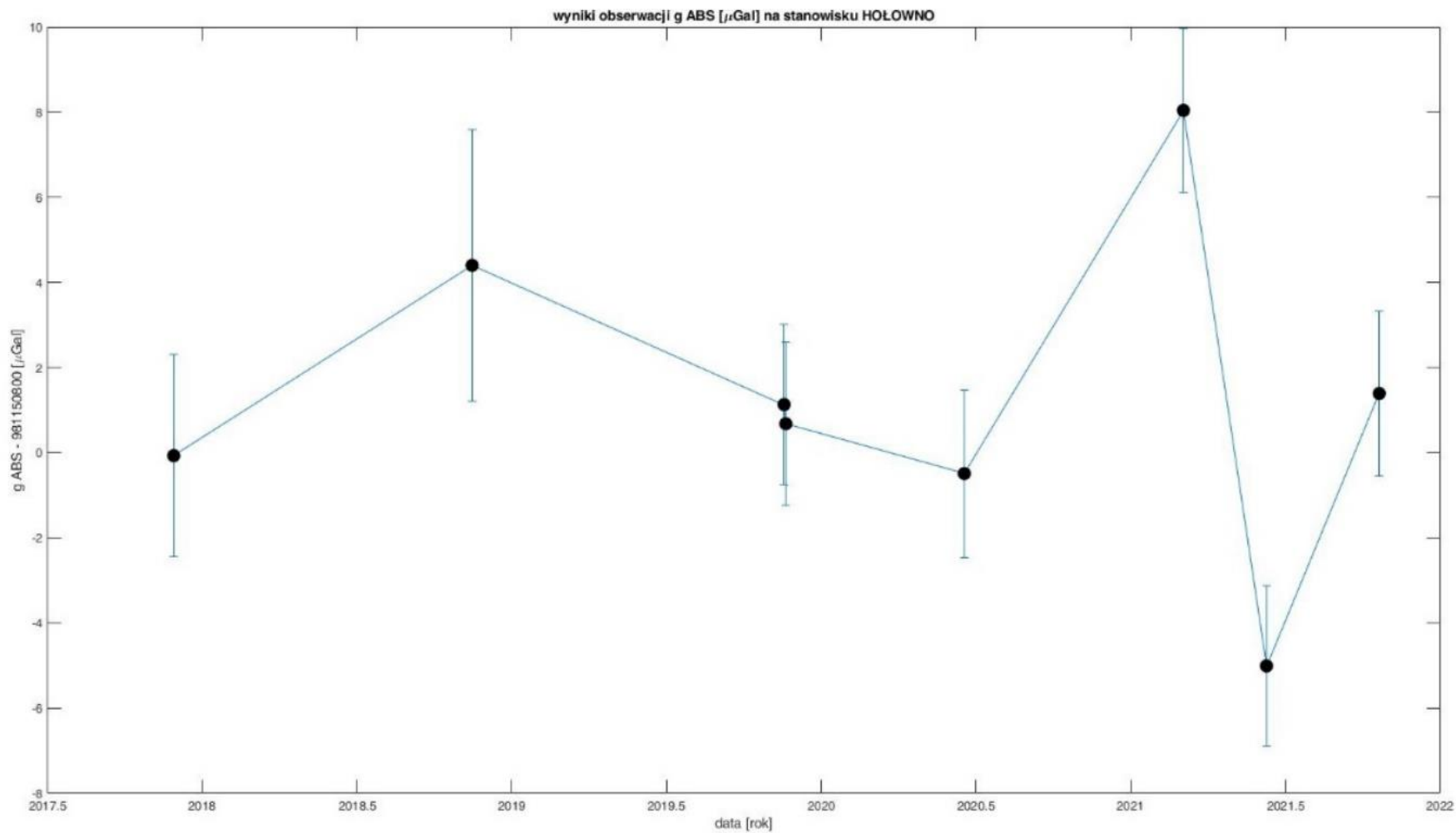
Opracowanie danych stosowane w analizie materiału pomiarowego odpowiada w pełni definicji realizacji układu International Gravimetric Reference Frame, tworzonego pod egidą International Association of Geodesy. Szczegółowy opis znajduje się w publikacji: Wziontek, H., Bonvalot, S., Falk, R. et al. *Status of the International Gravity Reference System and Frame. J Geod* **95**, 7 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>. Jest to współcześnie najnowocześniejszy i rekomendowany sposób opracowywania danych grawimetrycznych pozyskiwanych z wykorzystaniem metod obserwacji absolutnej wartości przyspieszenia.



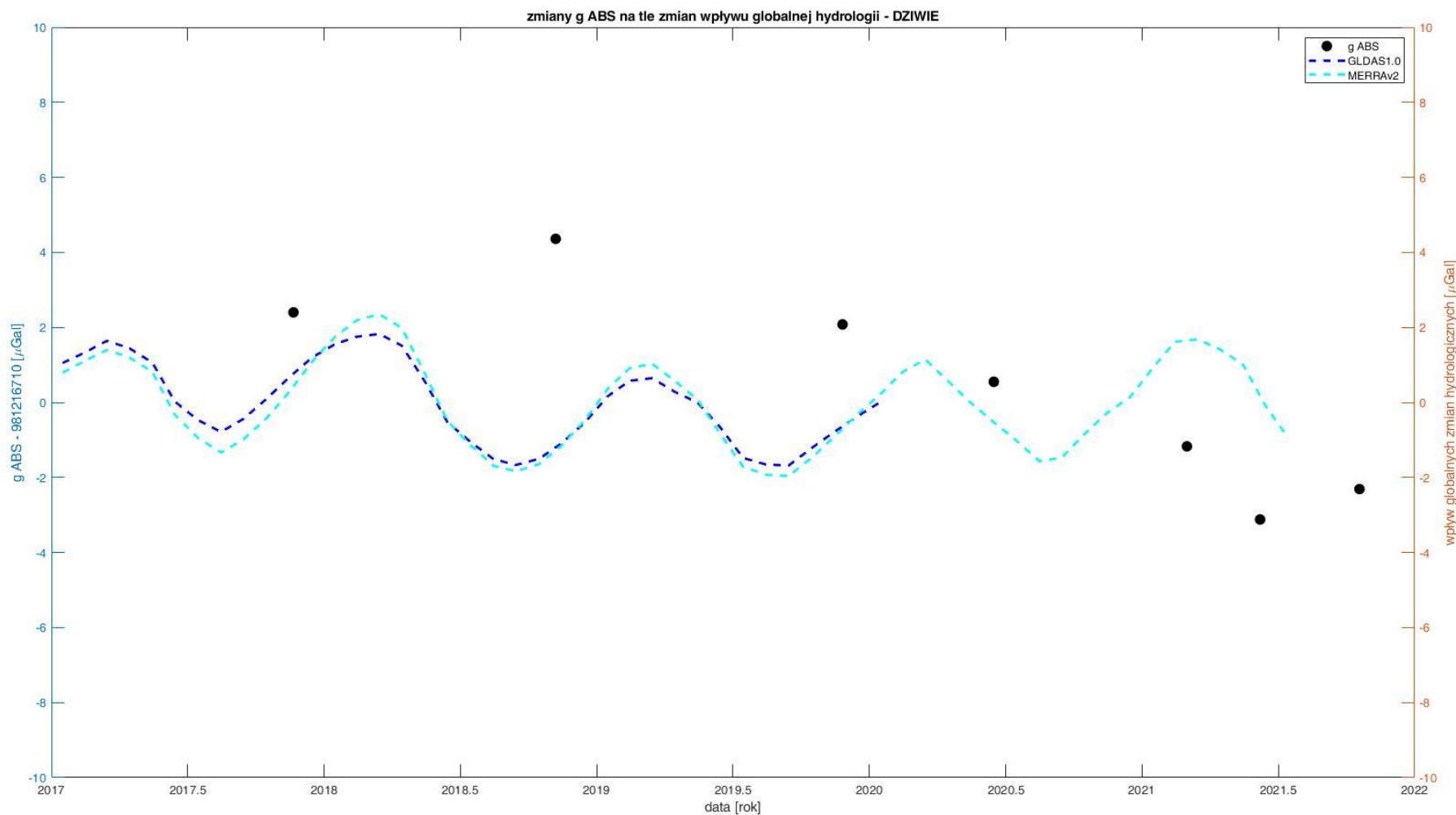
Projekt MoGePL – monitoring grawimetryczny – stacja Dziwie



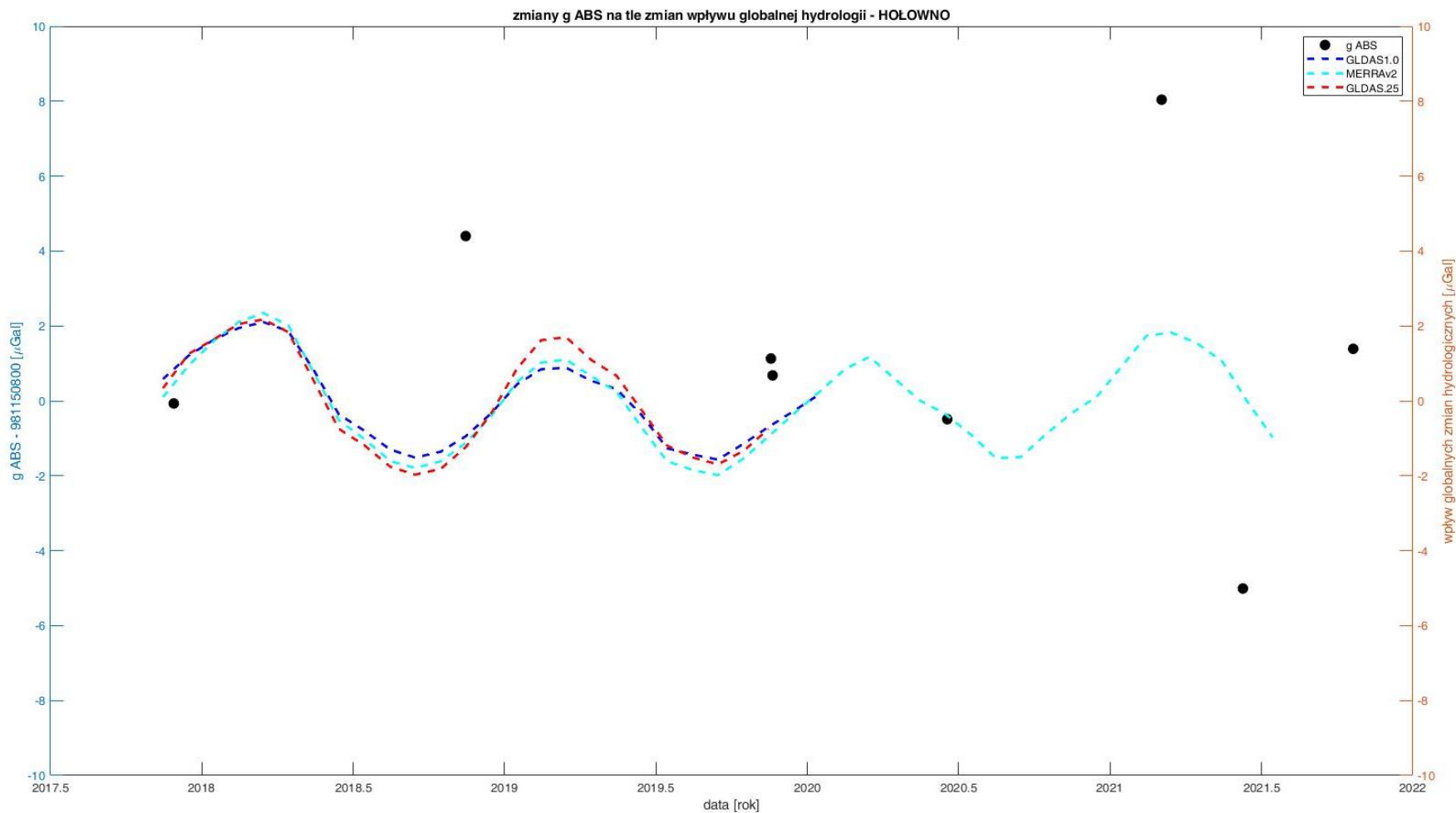
Projekt MoGePL – monitoring grawimetryczny – stacja Hołowno



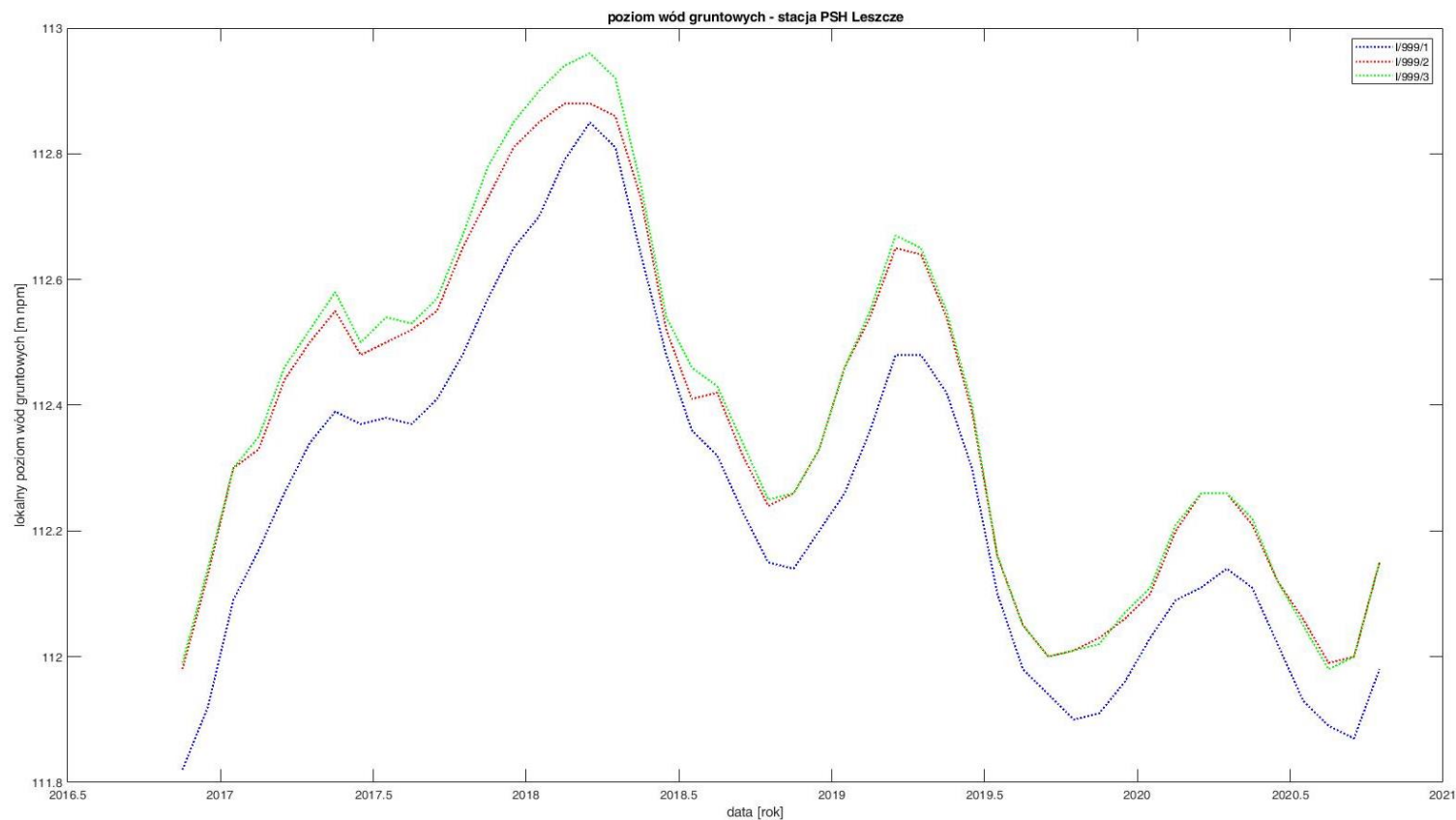
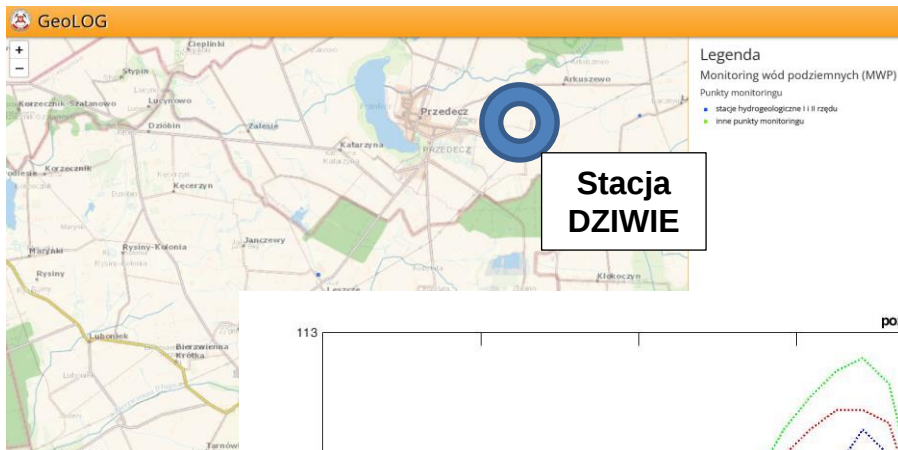
monitoring grawimetryczny – wpływ globalnego modelu hydrologicznego



monitoring grawimetryczny – wpływ globalnego modelu hydrologicznego



monitoring grawimetryczny – rejestracja warunków środowiskowych przez pobliskie stacje PSH



monitoring grawimetryczny – rejestracja warunków środowiskowych przez pobliskie stacje PSH

GeoLOG

Stacja
HOŁOWNO

Legenda

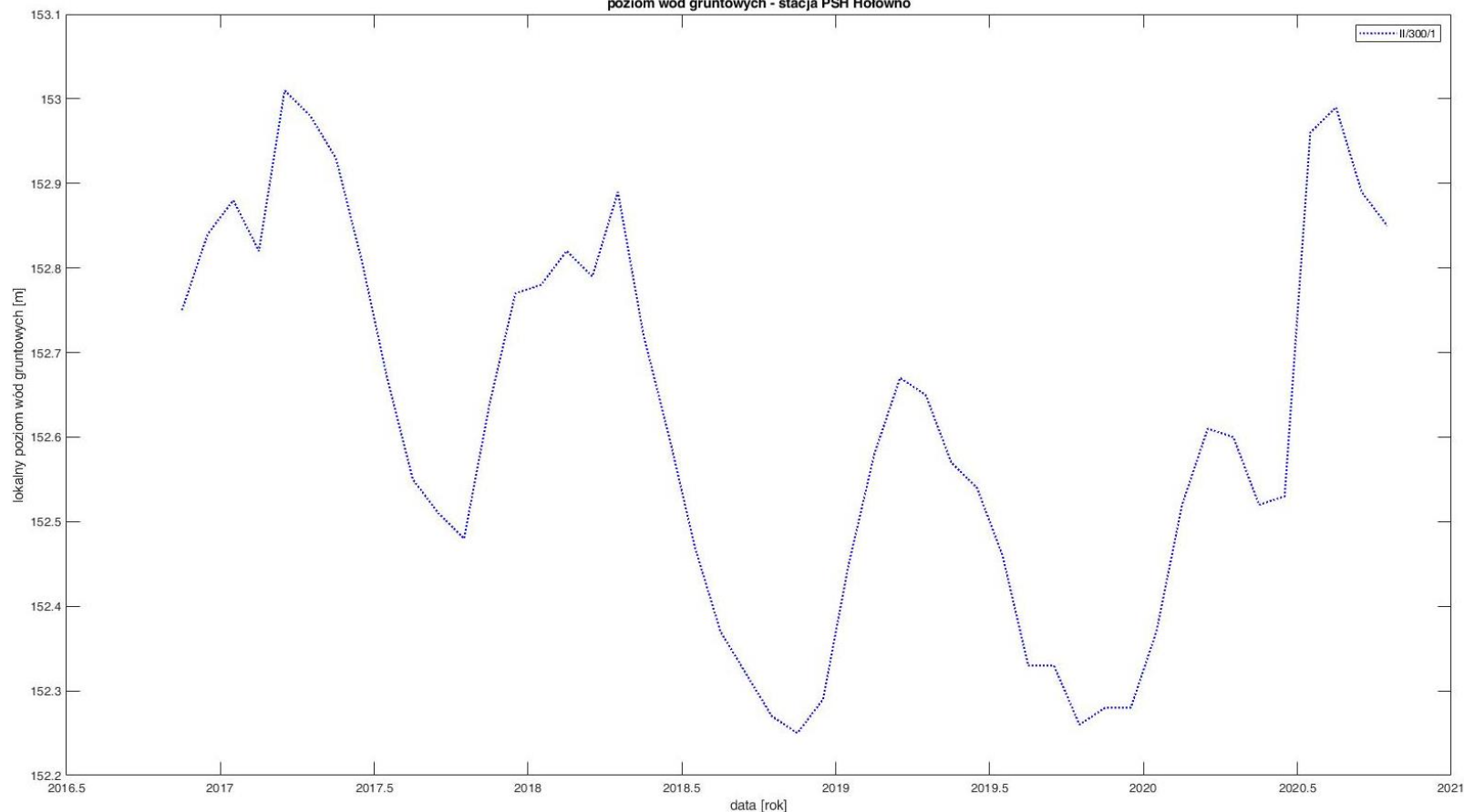
Monitoring wód podziemnych (MWP)

Punkty monitoringu

• stacje hydrogeologiczne I i II rzędu

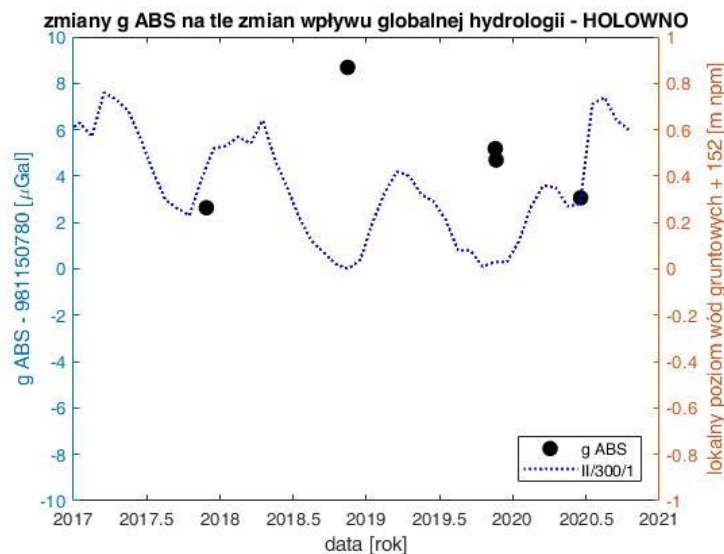
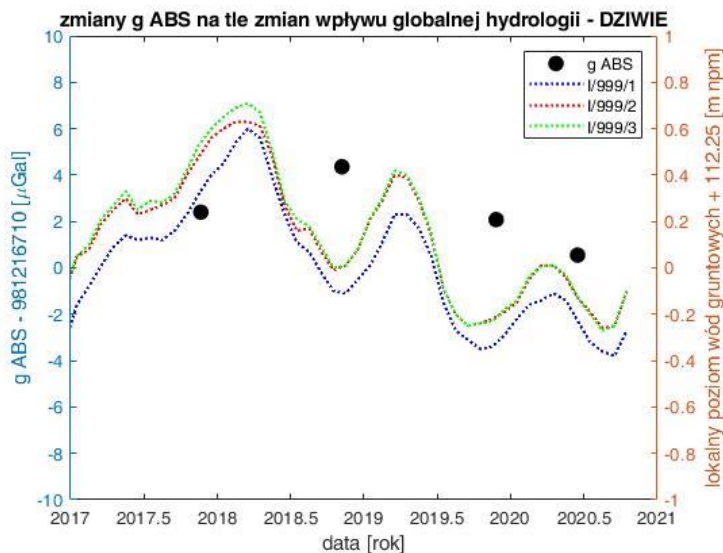
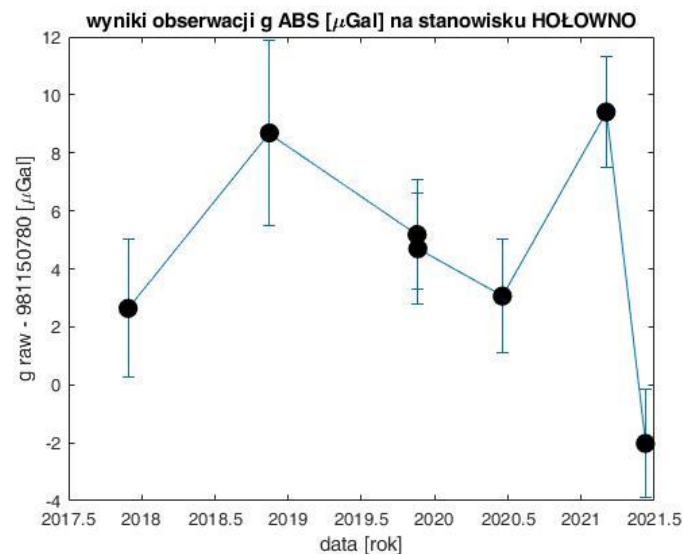
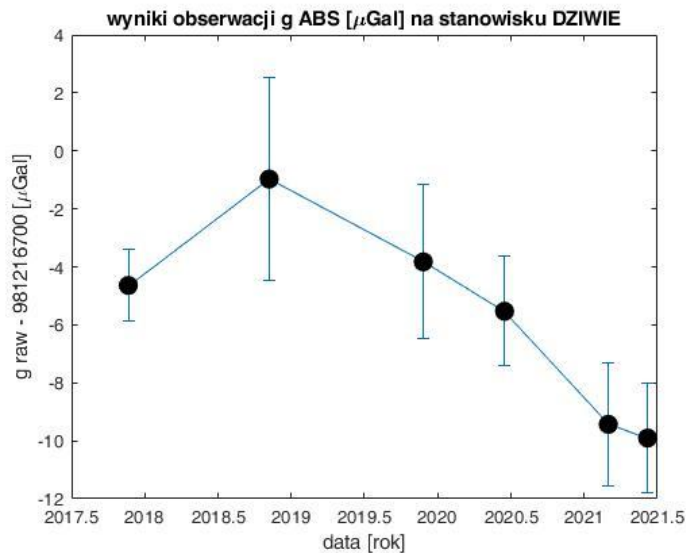
• inne punkty monitoringu

poziom wód gruntowych - stacja PSH Hołowno



monitoring grawimetryczny – po wyłączeniu globalnego oddziaływania hydrologicznego

Wartości przyspieszenia siły ciężkości z wyłączeniem wpływu globalnego efektu środowiskowego na stanowisku Dziwie



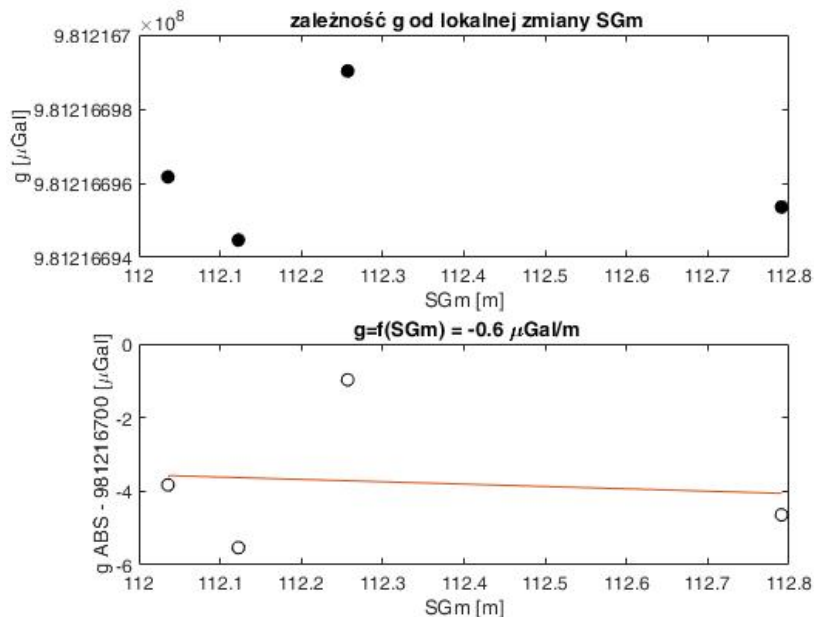
Wartości przyspieszenia siły ciężkości z wyłączeniem wpływu globalnego efektu środowiskowego na stanowisku Holowno

czny
zy



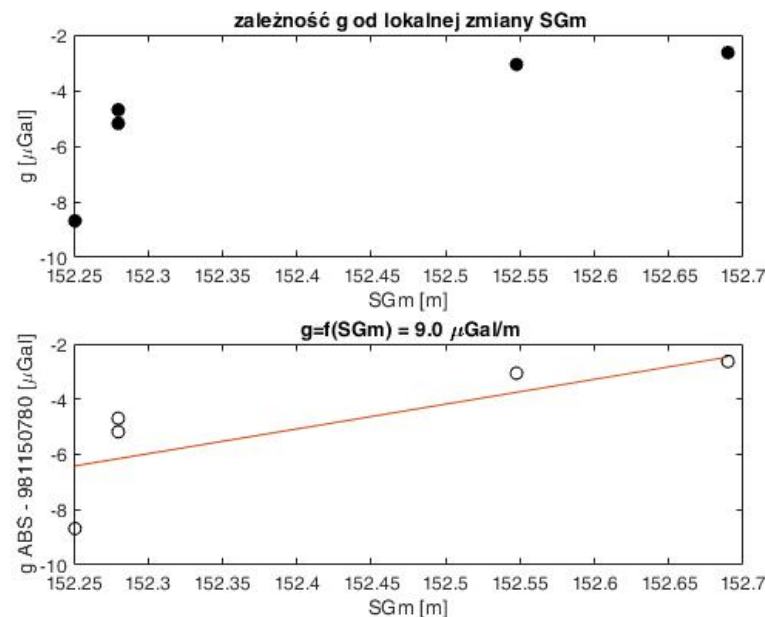
monitoring grawimetryczny – zależność zmiany przyspieszenia od zmiany poziomu wód gruntowych

Punkt Dziwie



W tym punkcie uzyskane wyniki nie są specjalnie zadowalające. Uzyskana wartość jest niewielka, ma sprzeczny z logiką znak i charakteryzuje się zbyt dużym błędem wyznaczenia. Jest bowiem oparta na zaledwie czterech wyznaczeniach w wąskim zakresie zmian głębokości.

Punkt Hołowno



W punkcie Hołowno zaś uzyskane wyniki wyglądają zupełnie inaczej i co do dokładności i co do logiki. Uzyskana wartość zależności $g=f(H)$ odpowiada porowatości gleby rzędu 22%, ma zgodny logiką znak i pokazuje tendencję wpływu lokalnych czynników.



ŹRÓDŁA NIEPEWNOŚCI: odległość studni od punktu, ruchy pionowe?



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

Projekt MoGePL – monitoring grawimetryczny, rozbudowa instrumentarium

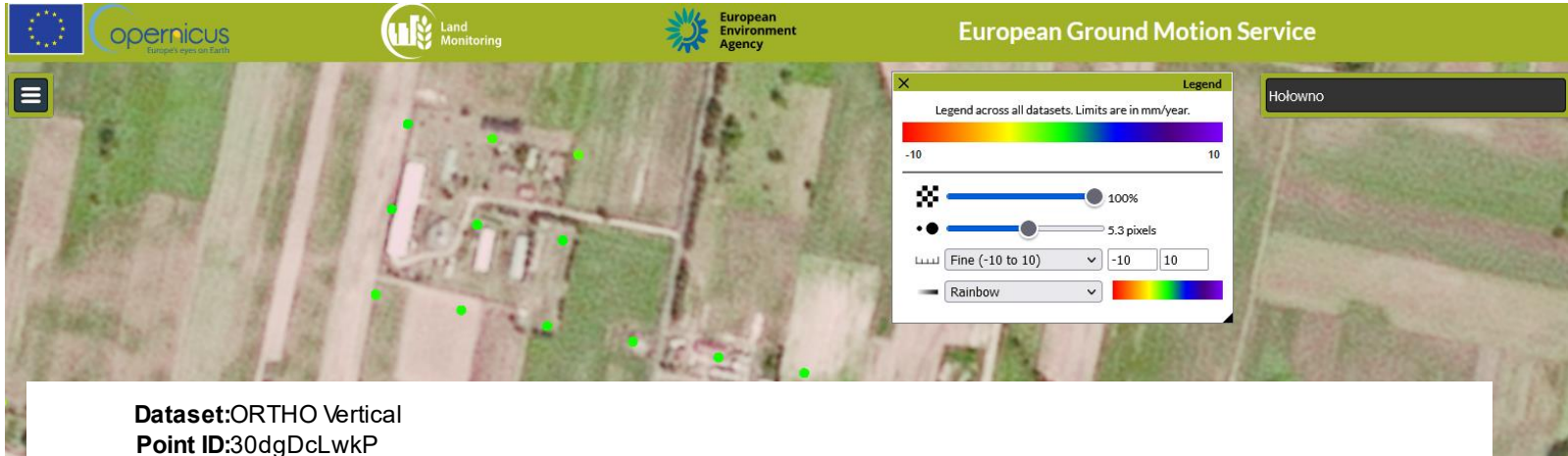
www.pgi.gov.pl



Eksperyment sejsmiczno-grawimetryczny



Projekt MoGePL – ruchy pionowe inSar



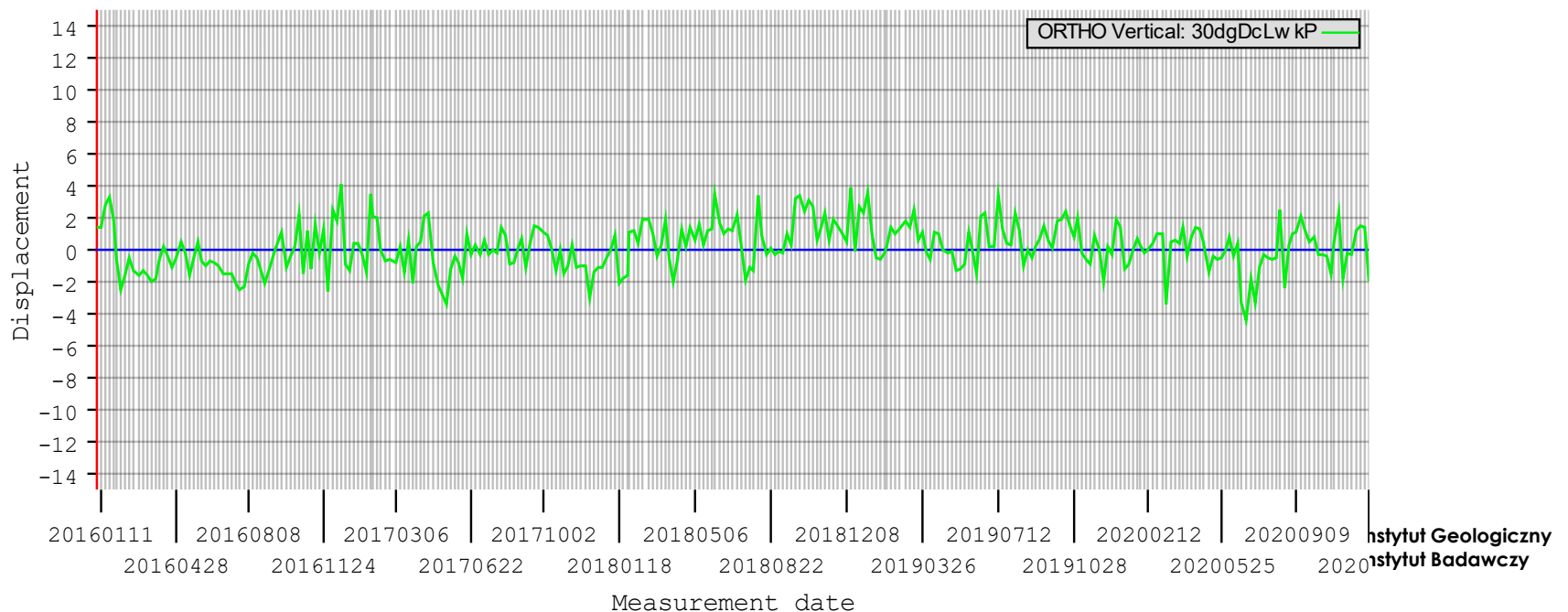
Dataset: ORTHO Vertical

Point ID: 30dgDcLwkP

Position: 3253650.00 N 5228550.00 E 155.00 m

Mean velocity: 0.10

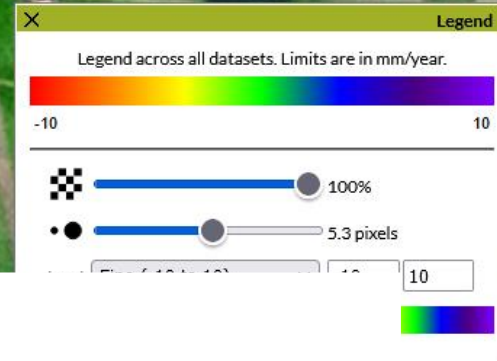
RMSE: 1.40



Projekt MoGePL – ruchy pionowe inSar



European Ground Motion Service



Przedecz

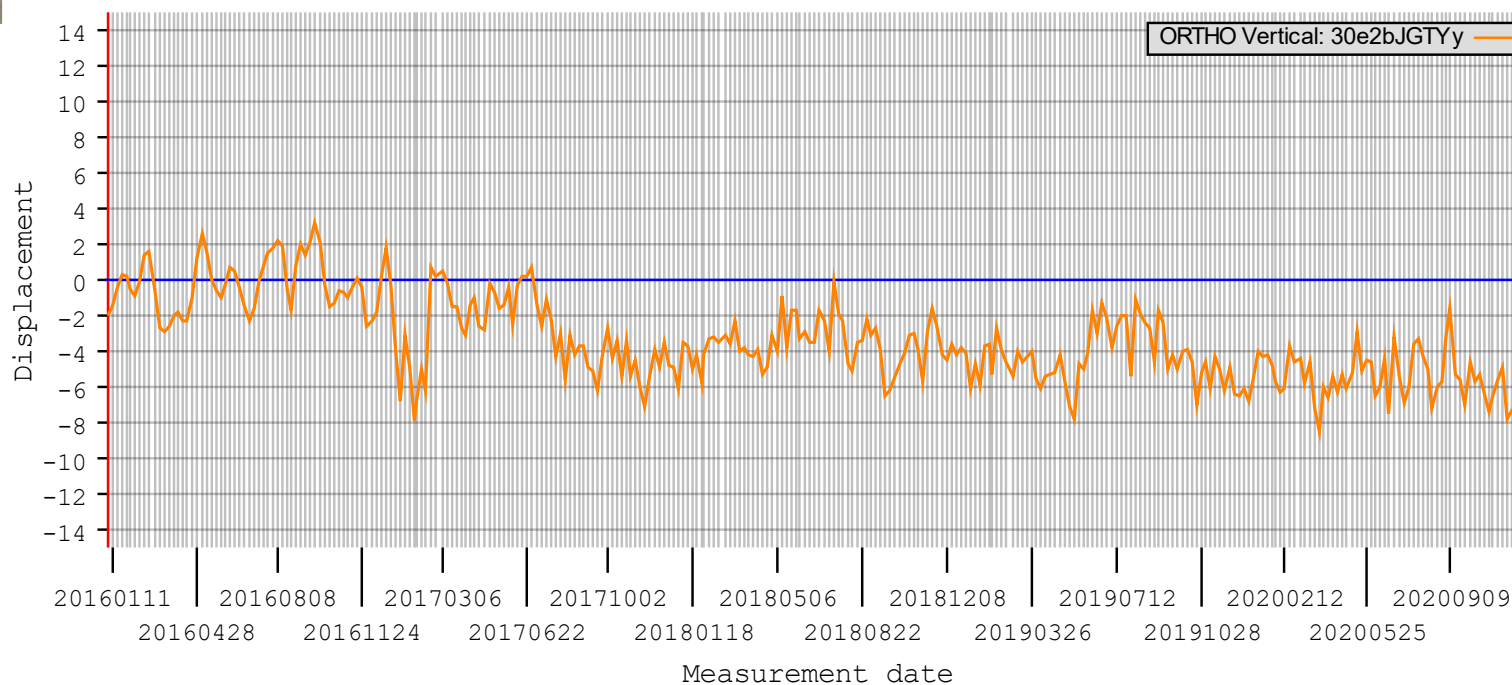
Dataset: ORTHO Vertical

Point ID: 30e2bJGTy

Position: 3283250.00 N 4927650.00 E 121.00 m

Mean velocity: -1.20

RMSE: 1.60



Instytut Geologiczny
Instytut Badawczy



Wnioski

- Sieć Monitoringu Geodynamicznego stanowi znakomite uzupełnienie sieci sejsmicznej IGF (7 punktów w Polsce), **rozszerzające możliwości interpretacyjne o możliwości wykrywania również mniejszych, lokalnych trzęsień Ziemi**. Ma to znaczenie dla wielu aspektów gospodarki, takich jak: bezpieczeństwo inwestycji, lokalizacja agresywnych obiektów infrastruktury, bezpieczeństwo wrażliwych obiektów itd.
- Na stacjach monitoringu permanentnego prowadzony jest szeroki wachlarz obserwacji z możliwościami jego wzbogacenia, **z punktu widzenia geodezji najciekawsze są obserwacje GNSS, ET, AG oraz MAG**. Oba stanowiska oferują również możliwości skorzystania z sieci monitoringu ilościowego wód podziemnych Państwowej Służby Hydrogeologicznej.
- Na obu stanowiskach **są znakomite warunki do prowadzenia wspomnianych typów obserwacji**.



Wnioski

W aspekcie obserwacji grawimetrycznych należy zwrócić uwagę na:

- **Zmniejszenie wartości przyspieszenia na punkcie Dziwie, o około $8\mu\text{Gal}$ w ujęciu 2017-2021 i towarzyszącą tej tendencji regresję tego obszaru (inSar), zaskakujące złożenie tych efektów ma wytłumaczenie w stopniowym opadaniu wód gruntowych zmniejszającym natężenie pola siły ciężkości i skutkujące efektem deformacyjnym**
- **Na punkcie Hołowno obserwuje się lepszą stabilność obserwacji i większą amplitudę zmian, znajduje ona swoje wyraźne uzasadnienie w zmienności poziomu wód gruntowych.**
- **Stworzone modele oddziaływania lokalnego będą używane w planowanej na lata 2022-2022 kontynuacji tych badań we współpracy PIG-PIB – GIK PW.**
- **Aplikacja kombinacji modelu oddziaływania hydrologii globalnej (MERRA) wraz ze stworzonym modelem lokalnym pozwala na definicję wartości przyspieszenia z precyzją lepszą niż dokładność instrumentu klasy FG-5.**



Dziękujemy za uwagę

