

**Sesja: Bezpieczeństwo wód podziemnych.
Monitoring, zagrożenia, ochrona.
14.03.2025 r. Warszawa**

Nowa era w monitoringu zasobów wód podziemnych – Teledetekcja, Machine Learning, Artificial Intelligence

Tatiana Solovey – PIG-PIB

Justyna Śliwińska-Bronowicz – Centrum Badań Kosmicznych PAN

Rafał Janica – PIG-PIB

Agnieszka Brzezińska – PIG-PIB

Anna Stradczuk – Wydział Geologii UW



**Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna**





Zadanie PSG
w latach
2024-2025

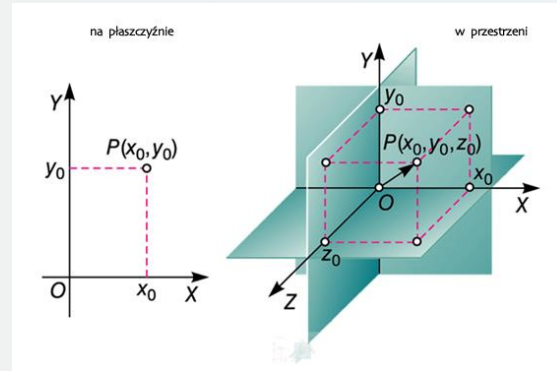
**Rozwój metodyk zastosowania danych satelitarnych z misji grawitacyjnych GRACE
oraz innych na potrzeby wsparcia monitoringu wód podziemnych
oraz obserwacji zmian retencji ich zasobów**



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



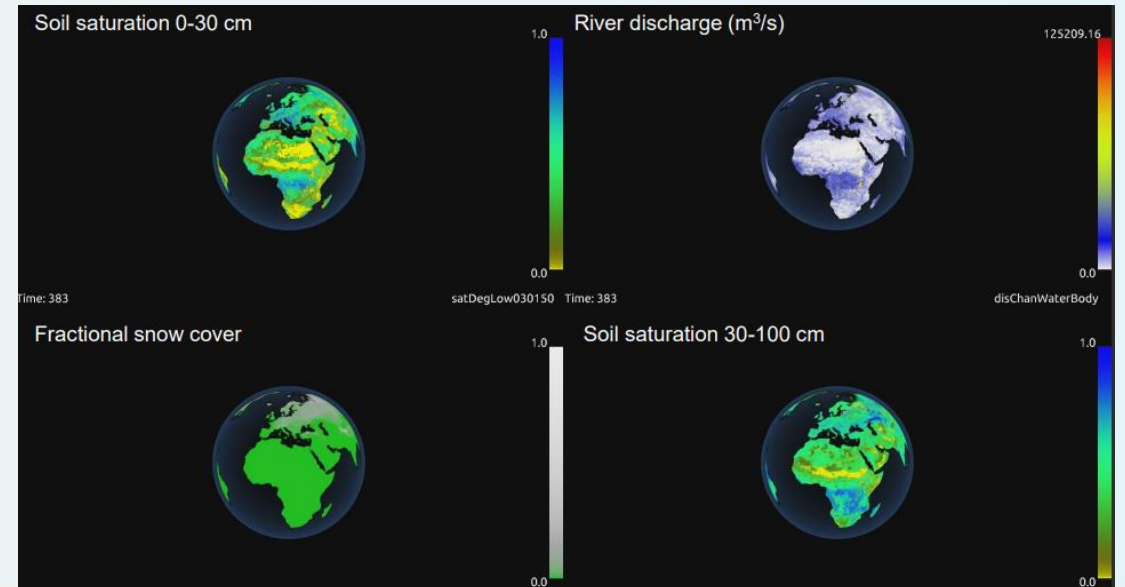
Na czym polega nowa era monitoringu?



Punktowe dane monitoringowe

Obserwacje ciągłe
w czasie i przestrzeni

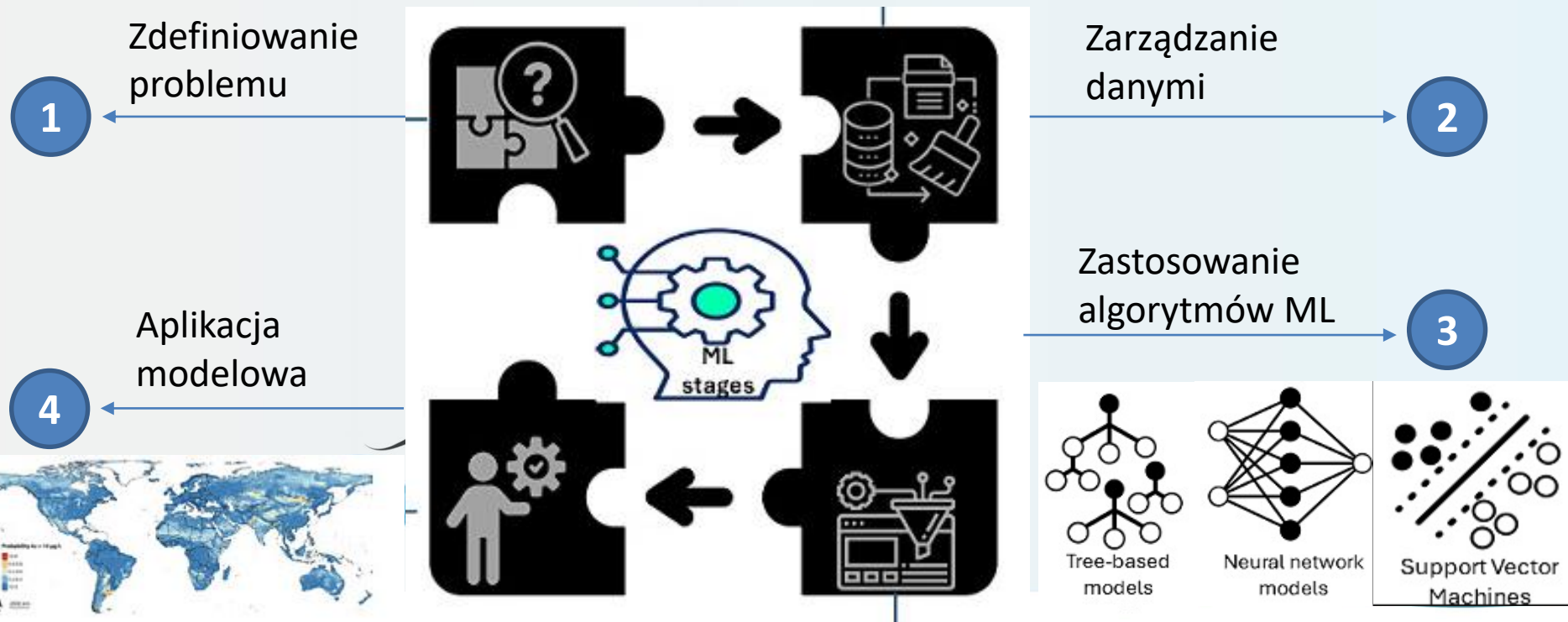
Przestrzenne dane monitoringowe



Generatory postępu

- Teledetekcja
- Machine Learning
- Artificial Intelligence

Nowelizacja Ramowej Dyrektywy Wodnej – uznanie **Teledetekcji** za równoważny in-situ sposób monitoringu.

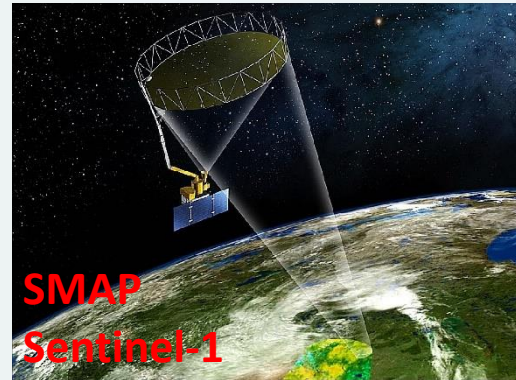


Teledetekcja satelitarna

Grawimetria satelitarna
zmiany całkowitej ilości
wody na Ziemi



Obserwacje radarowe
i radiometryczne
wilgotność gleby



Interferometria radarowa
deformacje gruntu
i osiadanie terenu



Obserwacje optyczne
monitoring wysychania
jezior, powodzi, susze,
zmian w pokryciu gleby



Altimetria satelitarna
poziom oceanów i wód
powierzchniowych



Spektrometria optyczna
temperatura, wilgotność
gleby, promieniowanie,
ewapotranspiracja



Pań
Pań
pań

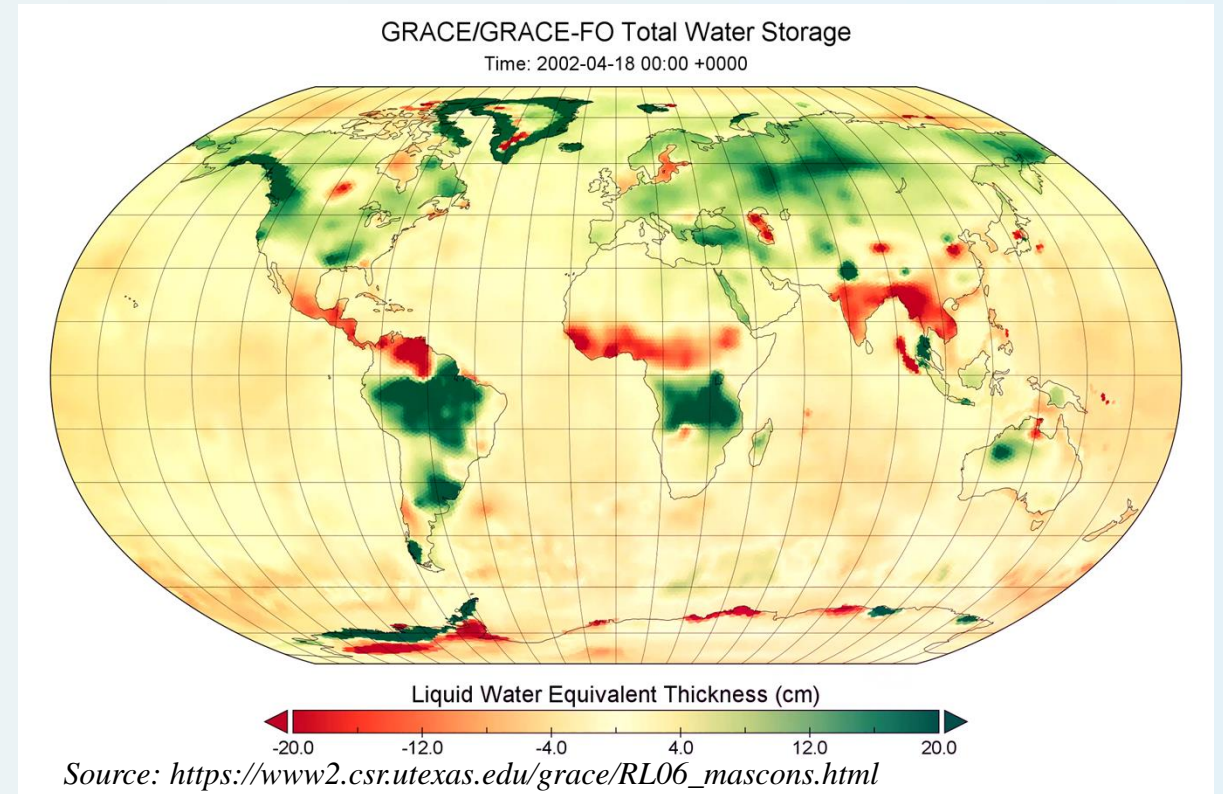
WATER
MARCA
WIATOWY
ZIEN WOD

Potencjał teledetekcji satelitarnej

Grawimetria satelitarna (misje GRACE i GRACE Follow-On) – monitorowanie czasowych zmian pola grawitacyjnego Ziemi wynikających ze zmian całkowitej ilości wody (w tym wód podziemnych). Jedyna misja, która dostarcza informacji na temat całkowitych zmian zasobów wody na Ziemi



Image credit: NASA JPL

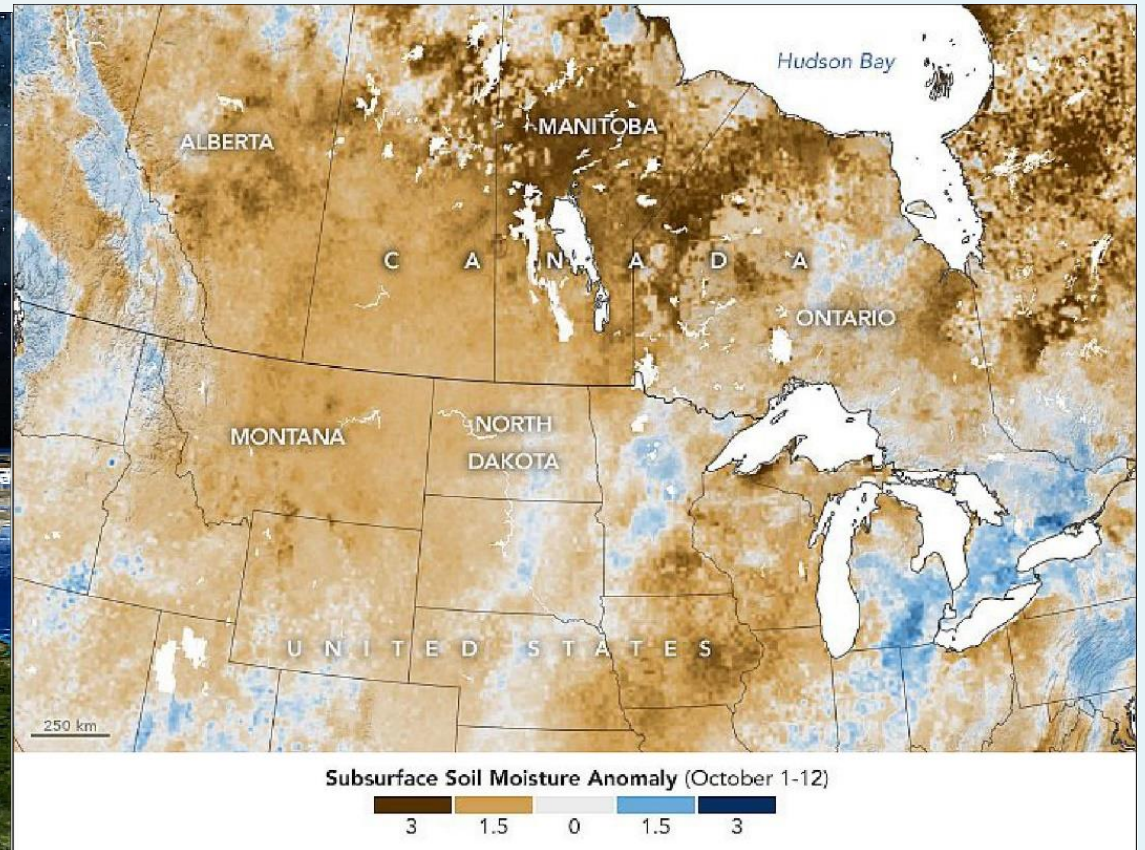
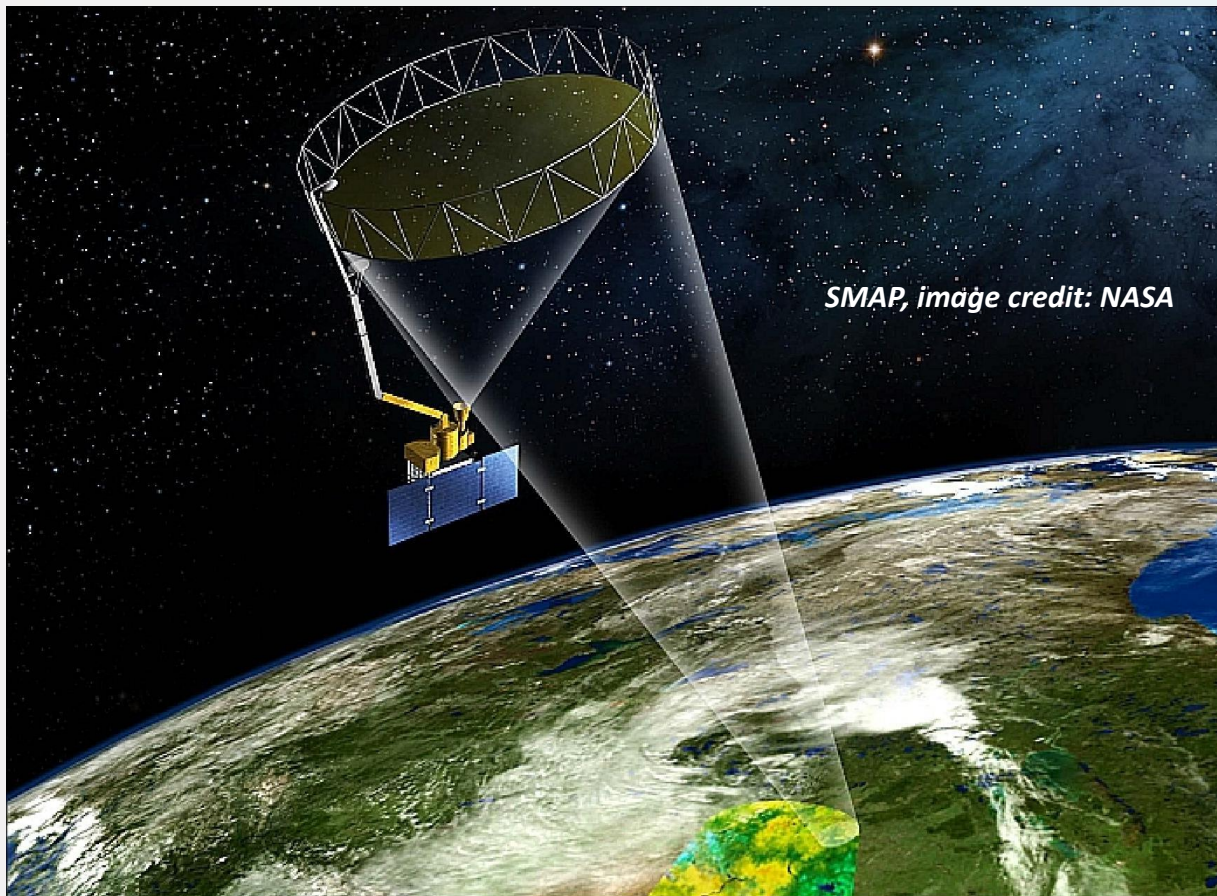


Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



Potencjał teledetekcji satelitarnej

Obserwacje radarowe i radiometryczne z pułapu satelitarne (np. satelity SMAP, Sentinel-1) – dostarczanie danych o zmianach wilgotności gleby, a także określanie jej stanu (zamarznięta/rozmarznięta)



<https://www.eoportal.org/satellite-missions/smap#mission-status>



państwowa służba geologiczna

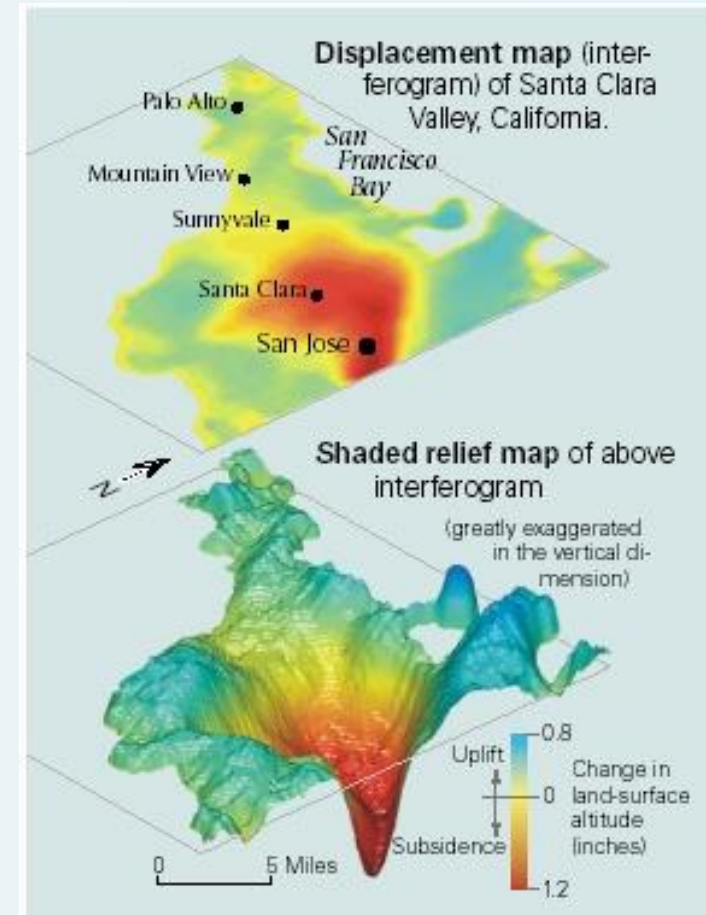
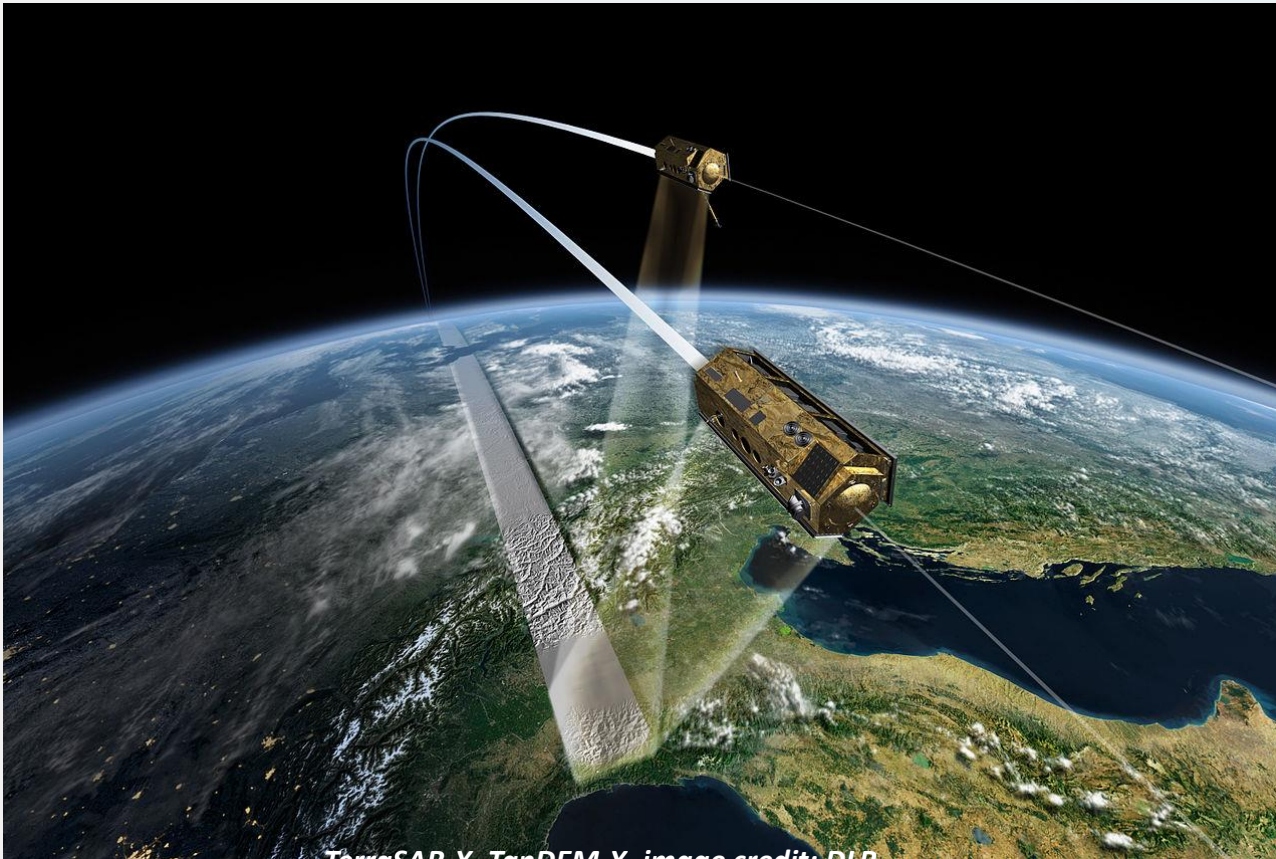


SWIATOWI
DZIEŃ WODY



Potencjał teledetekcji satelitarnej

Interferometria radarowa InSAR (satelity TerraSAR-X, TanDEM-X) – dostarczanie informacji na temat deformacji gruntu i osiadania terenu, których przyczyną mogą być zmiany poziomu wód podziemnych



Source: <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-051-00/>



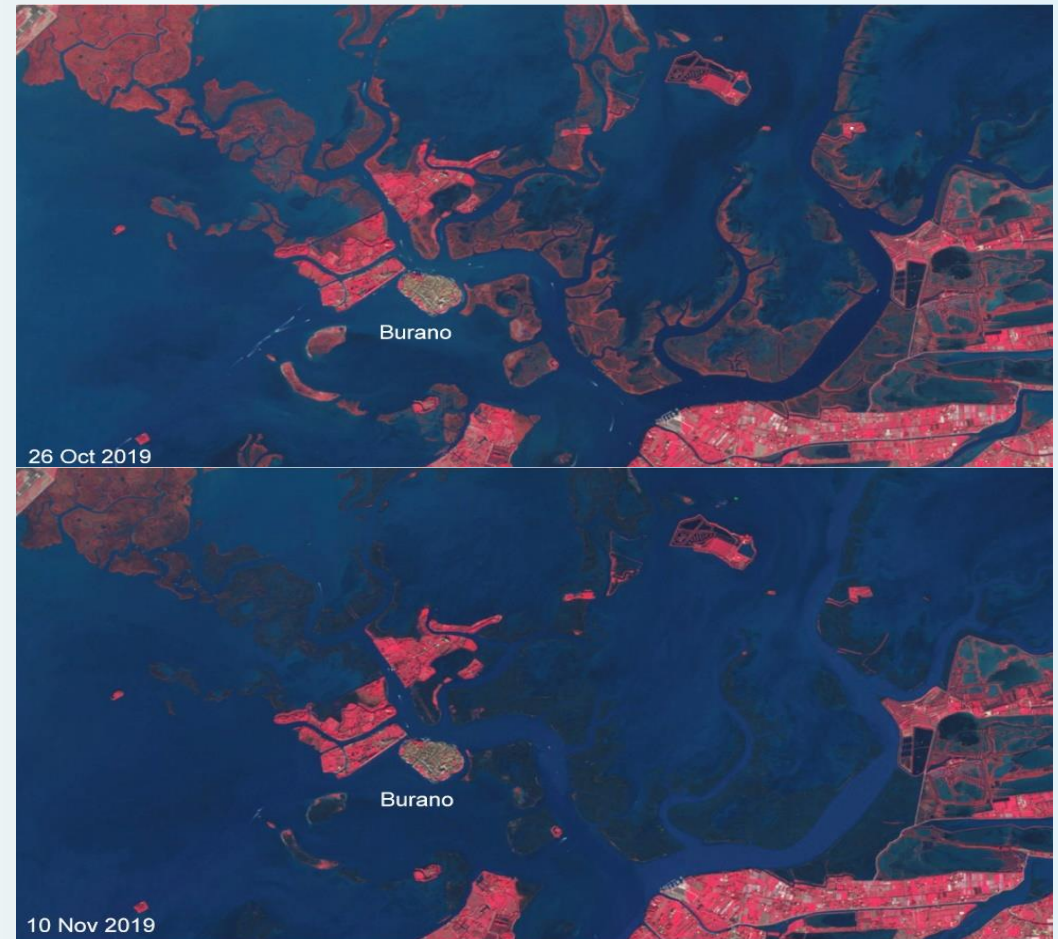
Państwowy Instytut Badawczy
Państwowa służba geologiczna



22 MARCA
ŚWIATOWY
DZIEŃ WODY

Potencjał teledetekcji satelitarnej

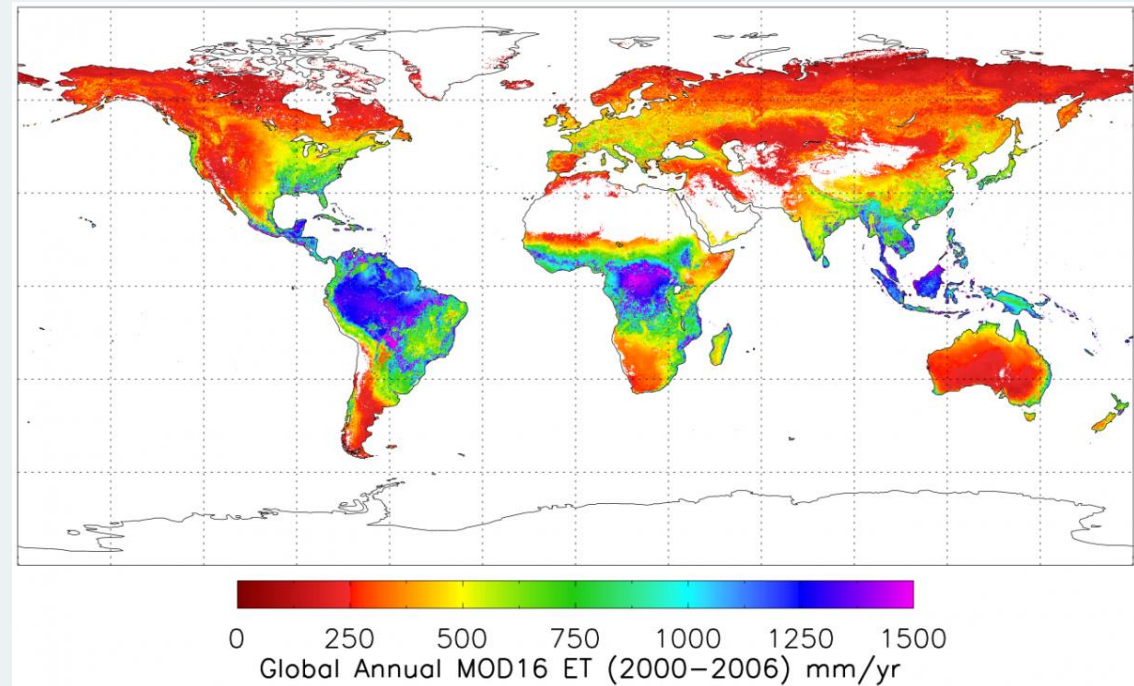
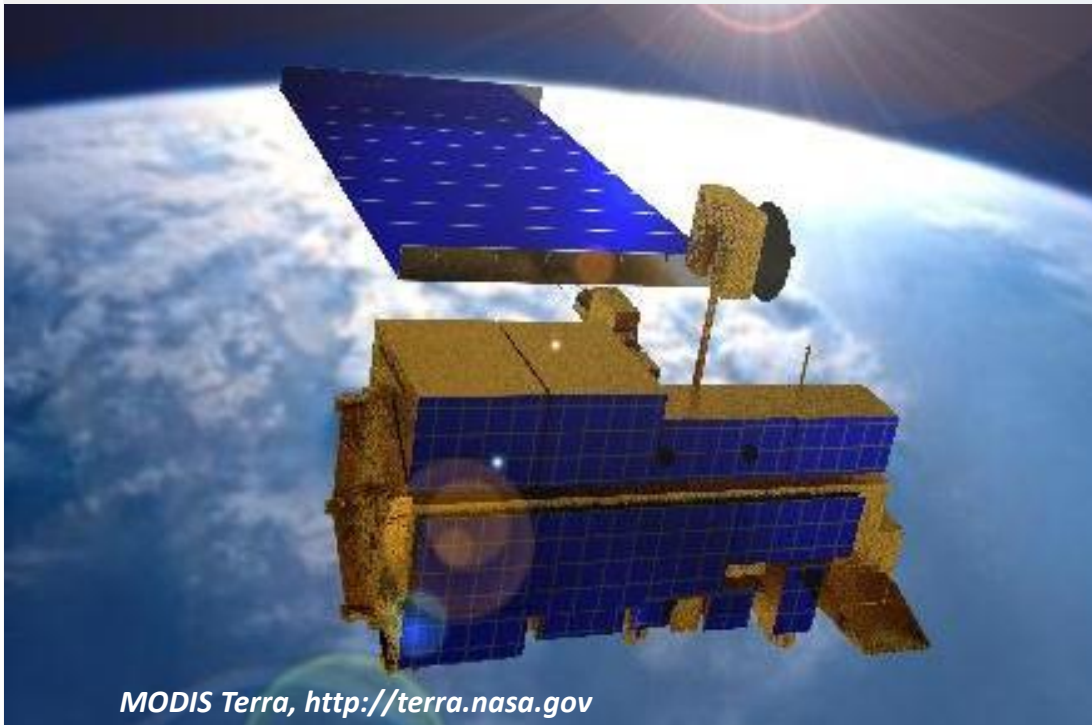
Obserwacje optyczne (np. Sentinel-2, Landsat) – dostarczanie zdjęć satelitarnych ukazujących np. wysychanie jezior, powodzie, susze, zmiany w pokryciu gleby



Source: <https://sentinel.esa.int>

Potencjał teledetekcji satelitarnej

Spektrometria optyczna (np. urządzenie MODIS na pokładzie satelitów Terra i Aqua) – monitorowanie powodzi, podnoszenia się poziomu morza na obszarach przybrzeżnych, zmian poziomu wody w dużych jeziorach; dostarczanie danych (temperatura, wilgotność gleby, promieniowanie słoneczne) do wyznaczenia ewapotranspiracji



Source: <https://www.umt.edu/numerical-terradyamic-simulation-group/project/modis>



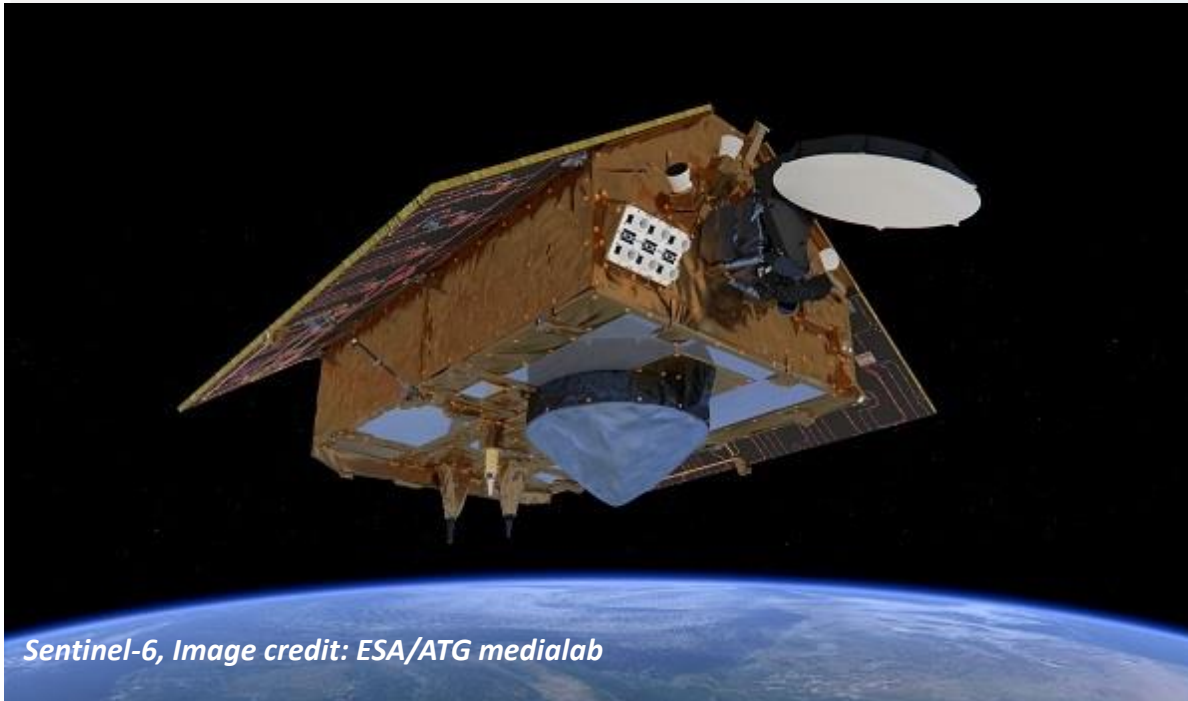
Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



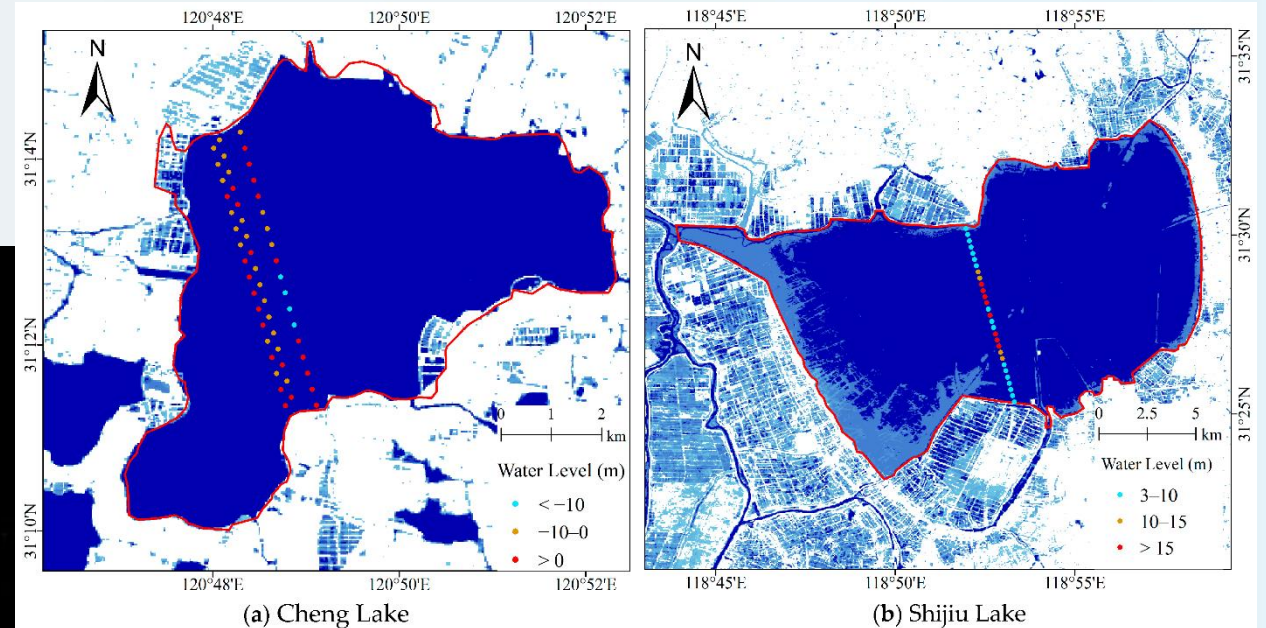
Potencjał teledetekcji satelitarnej

Altimetria satelitarna radarowa lub laserowa (np. satelity SWOT, ICESat-2, Jason-3, Sentinel-6)

– monitorowanie zmian poziomu oceanów i wód powierzchniowych (jeziora, rzeki, zbiorniki wodne), śledzenie topnienia śniegu i lodu



Sentinel-6, Image credit: ESA/ATG medialab



Xu, J., Xia, M., Ferreira, V. G., Wang, D., & Liu, C. (2024). Estimating and Assessing Monthly Water Level Changes of Reservoirs and Lakes in Jiangsu Province Using Sentinel-3 Radar Altimetry Data. *Remote Sensing*, 16(5), 808. <https://doi.org/10.3390/rs16050808>

Technologie teledetekcji w monitoringu ilościowym wód podziemnych

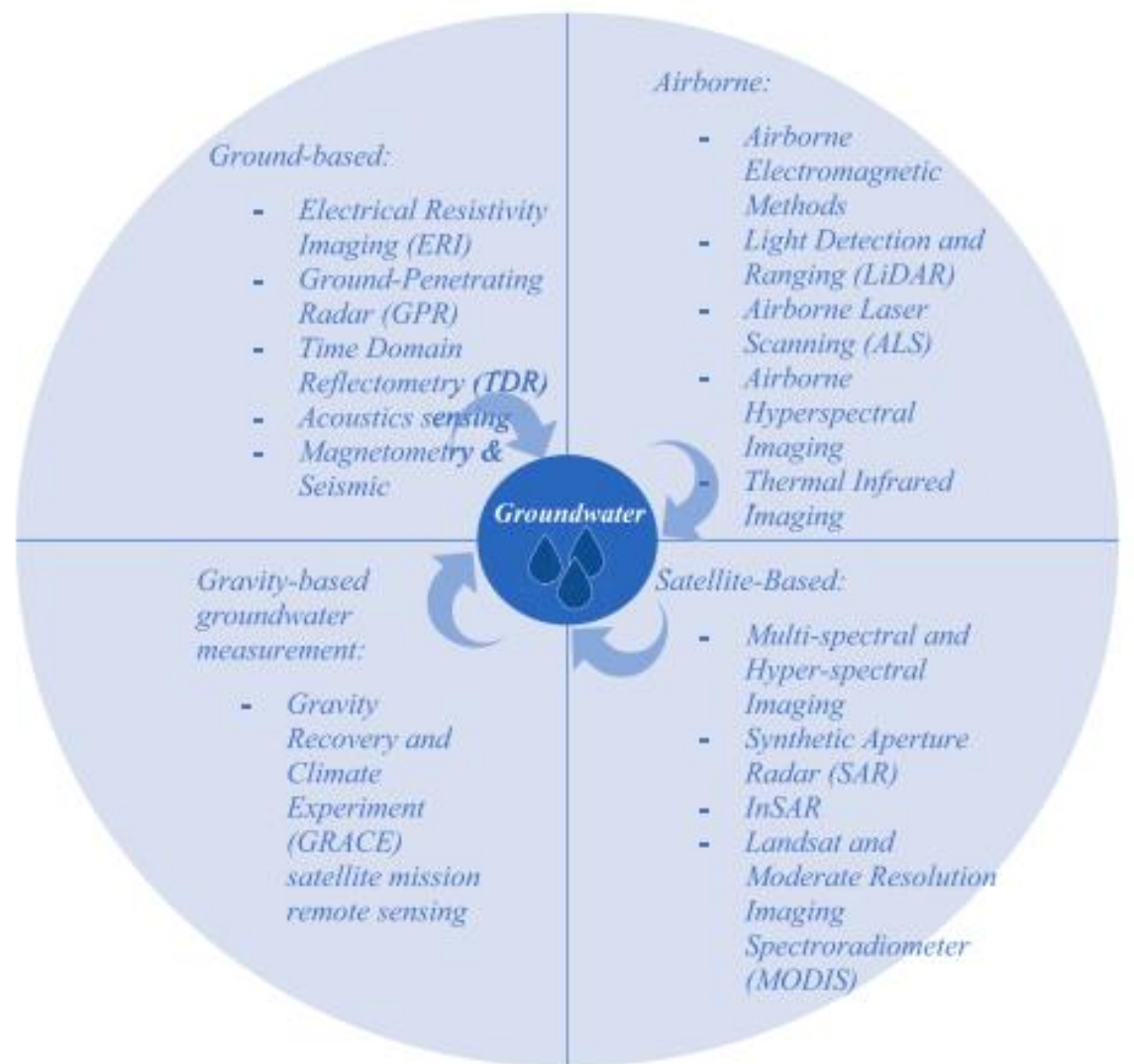


Fig. 4. Summary of RS technologies that can be applied to GW studies.

Ibrahim, A., Wayayok, A., Shafri, H., Toridi, N., 2024. *Remote Sensing Technologies for Unlocking New Groundwater Insights: A Comprehensive Review*. Journal of Hydrology, 23, 100175.

Kierunki rozwoju w PIG-PIB

- **Szacowanie miesięcznych zmian poziomu zwierciadła i retencji (Groundwater Storage GWS) wód podziemnych w oparciu o GRACE.**
- **Odtworzenie naturalnej dynamiki zwierciadła wód podziemnych w pierwszym kompleksie w dowolnej lokalizacji począwszy od 2002 roku.**
- Prognozowanie zmian poziomu zwierciadła i retencji wód podziemnych na podstawie danych teledetekcyjnych składowych bilansu wodnego.
- Ocena wpływu zmian klimatycznych na stan retencji wód podziemnych.

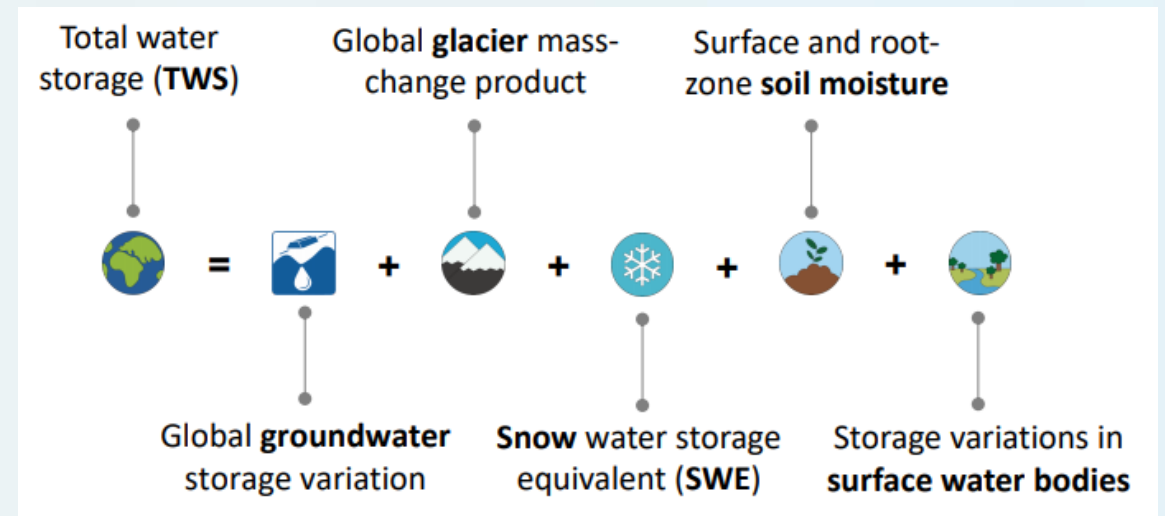
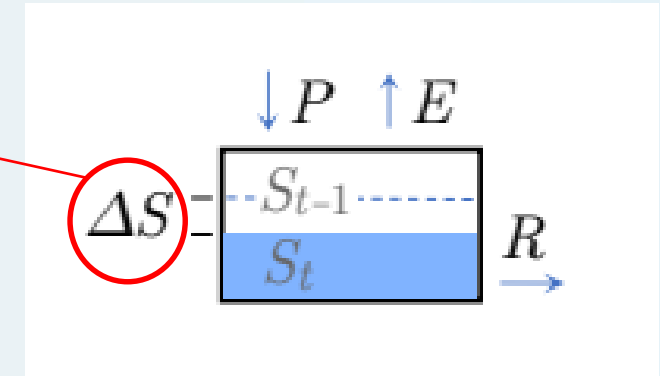


Grawimetryczny monitoring ilościowy wód lądowych

- Kontynentalny obieg wody – jeden z najnowszych obszarów badań teledetekcyjnych.
- W 2002 roku NASA uruchomiła program GRACE - The **G**ravity **R**ecovery **A**nd **C**limate **E**xperiment.
- Celem misji jest monitorowanie zmian zasobów wód lądowych (ang. Total Water Storage, Terrestrial Water Storage, TWS) w skali globalnej.
- GRACE mierzy zmiany w polu grawitacyjnym Ziemi spowodowane redystrybucją zasobów wodnych na lądzie.

Składowe cyklu wodnego

Rejestruje GRACE

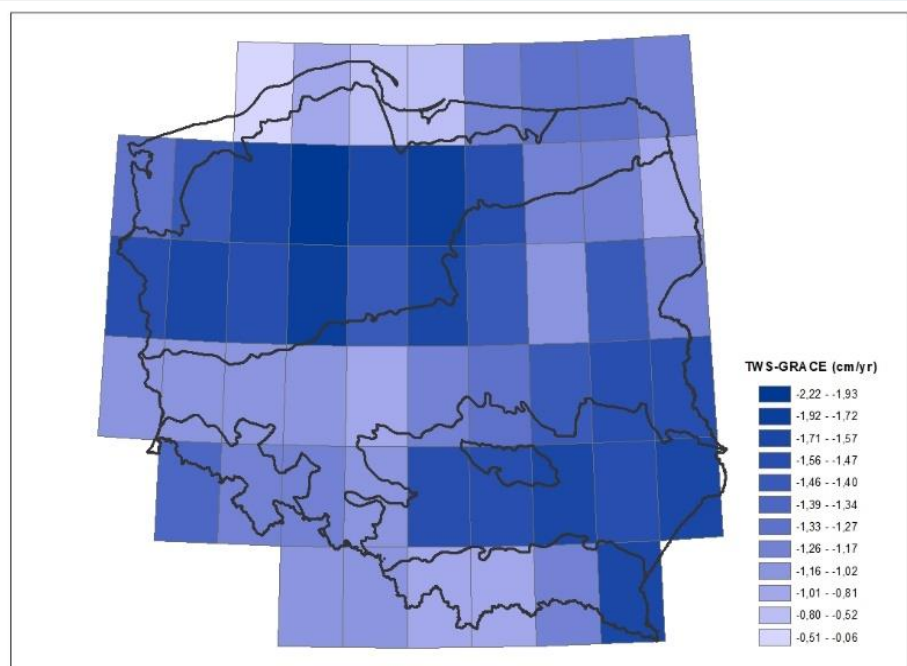


Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna

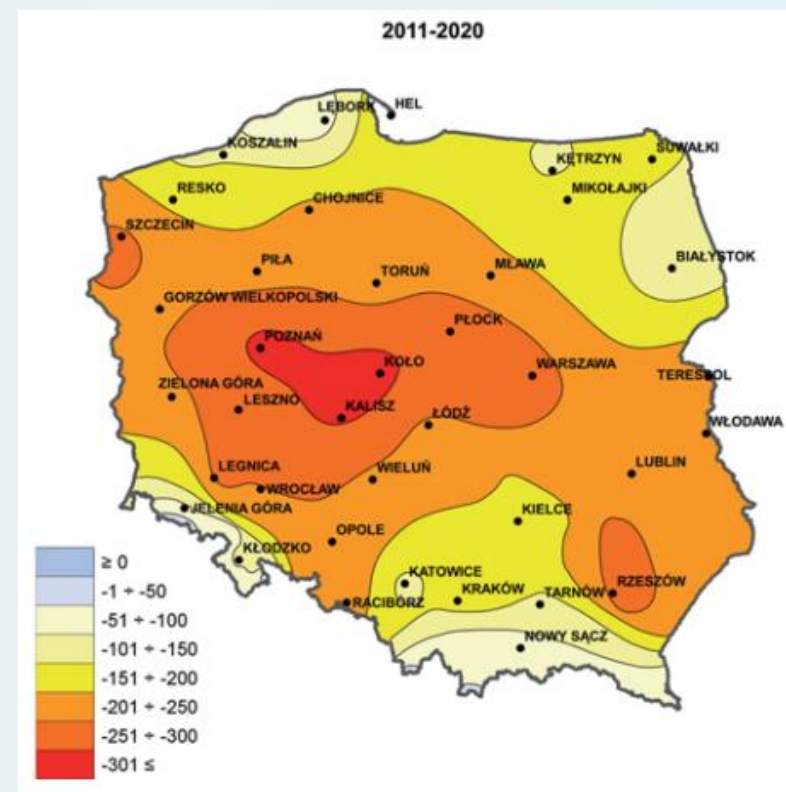


Zmiany retencji lądowej – Total Water Storage-GRACE

Długoterminowe zmiany 2009-2022



Precipitation Evapotranspiration Index PEI



Solovey, T., Śliwińska-Bronowicz, J., Janica, R., Brzezińska, A., 2025. Assessment of the effectiveness of GRACE observations in monitoring groundwater storage in Poland. *Water Resources Research*...

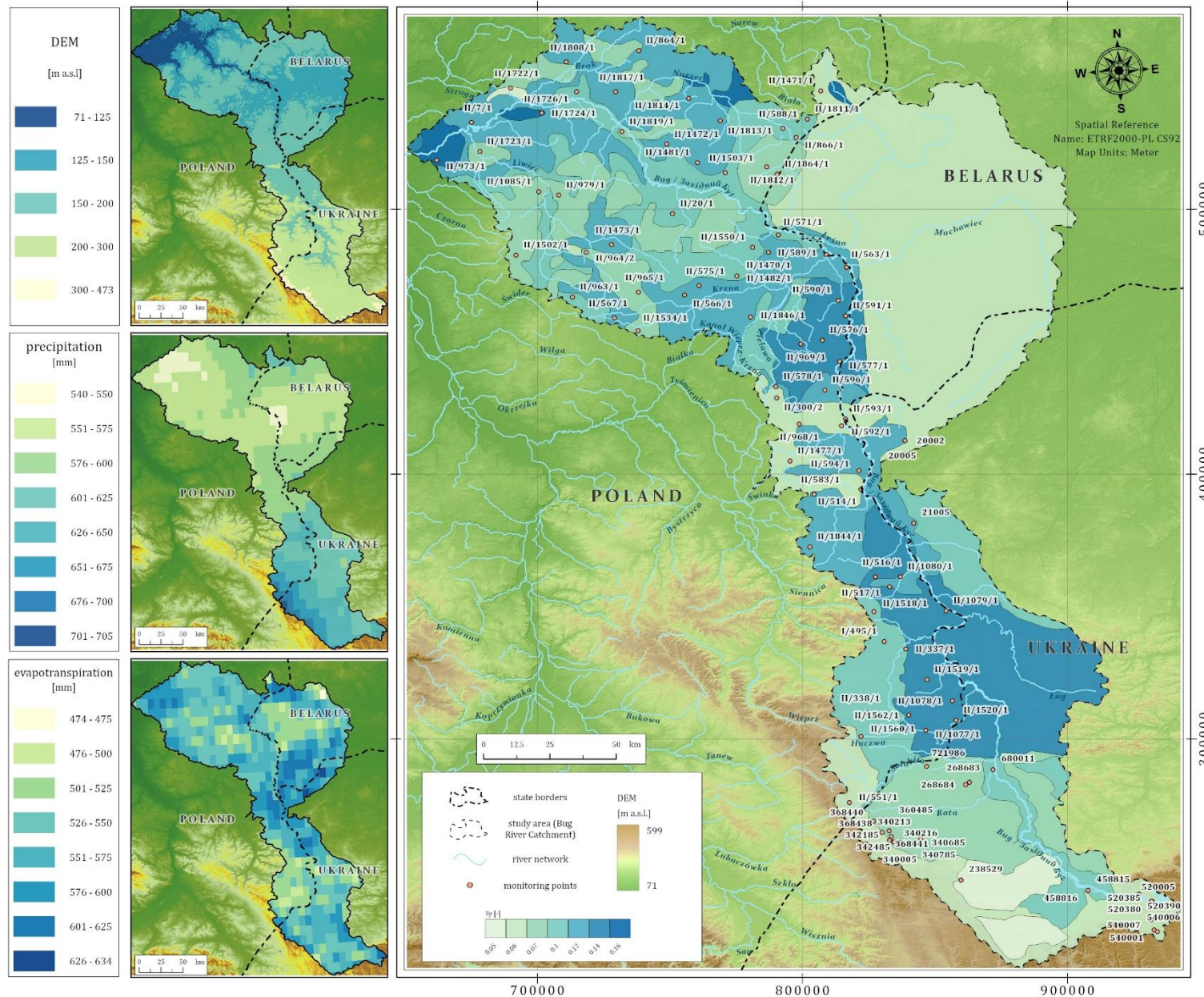
Urban, G. et al., 2023. A Climatic water balance variability during the growing season in Poland in the context of modern climate change. *Meteorol. Z.*, Vol. 31, No. 5



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna



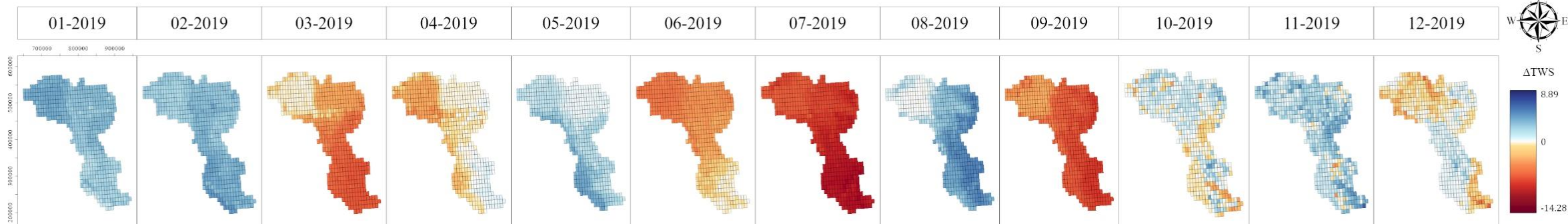
Obszar badań – transgraniczna zlewnia Bugu



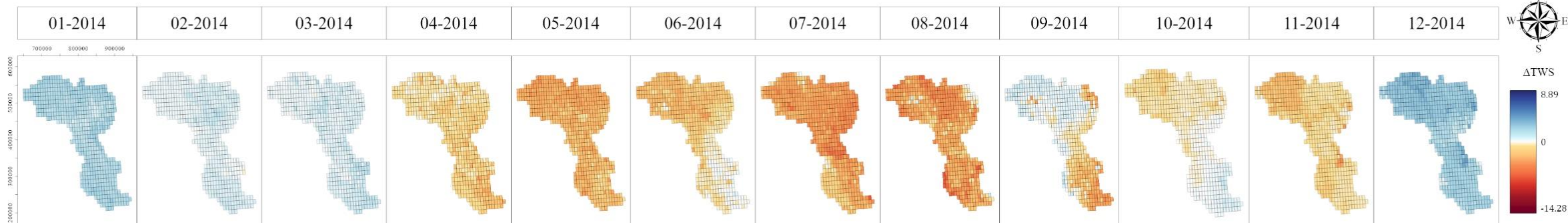
Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna

Wysokorozdzielczy Total Water Storage-GRACE - wynik

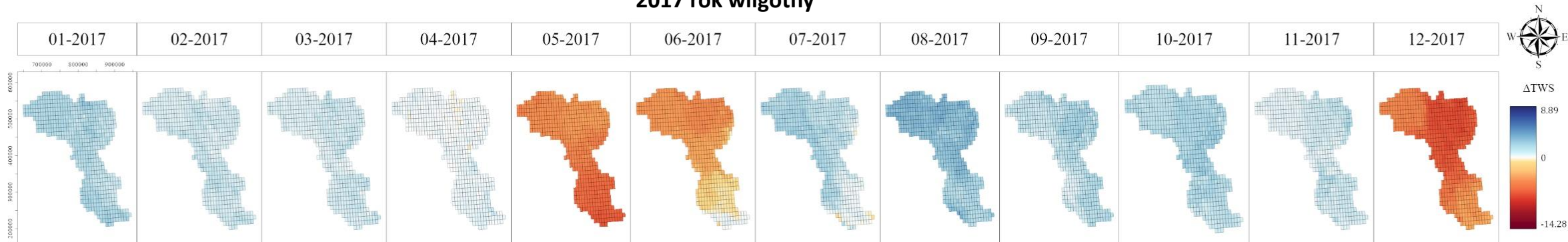
2019 rok suchy



2014 rok przeciętny

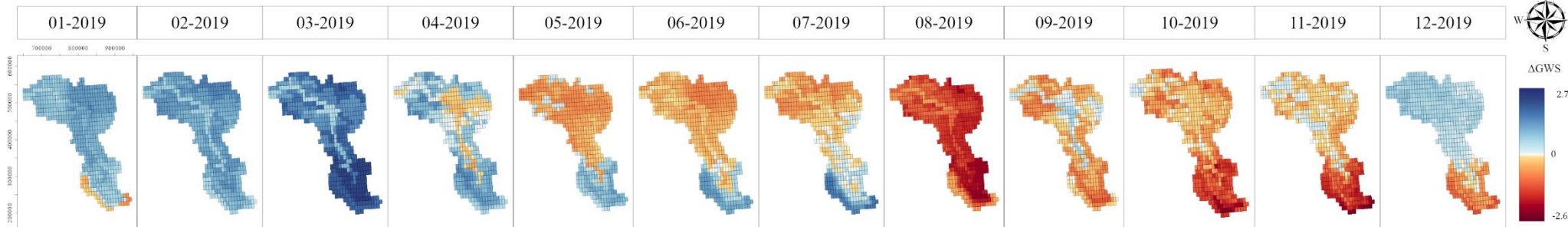


2017 rok wilgotny

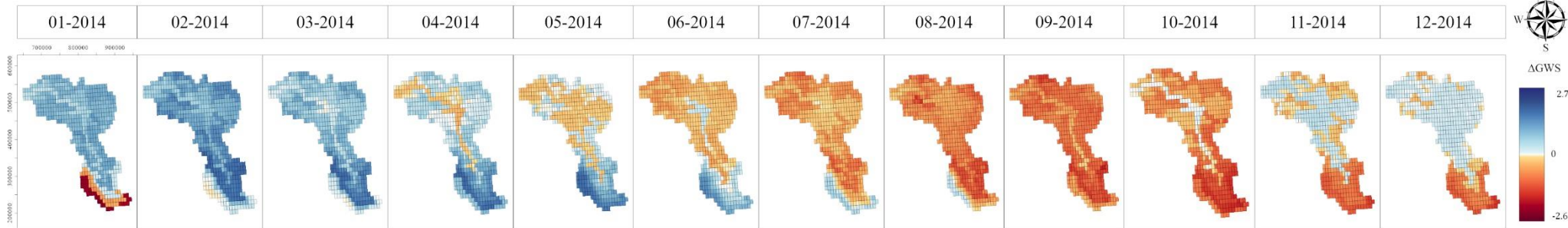


Wysokorozdzielczy Groundwater Storage-GRACE - wynik

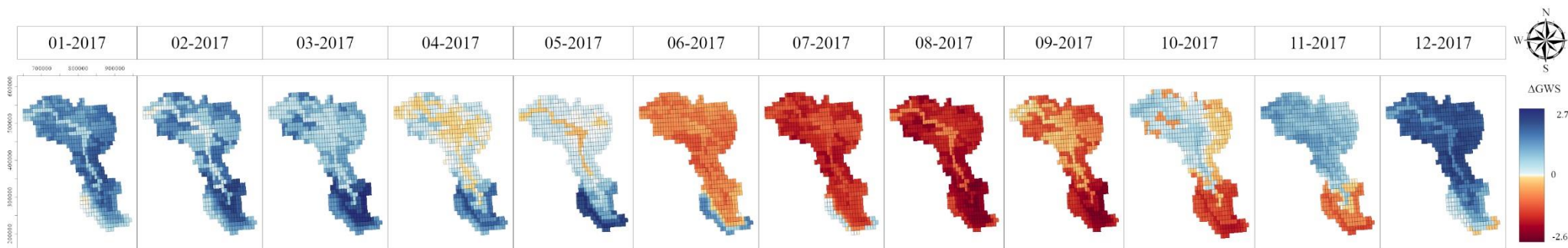
2019
rok suchy



2014
rok przeciętny



2017
rok wilgotny

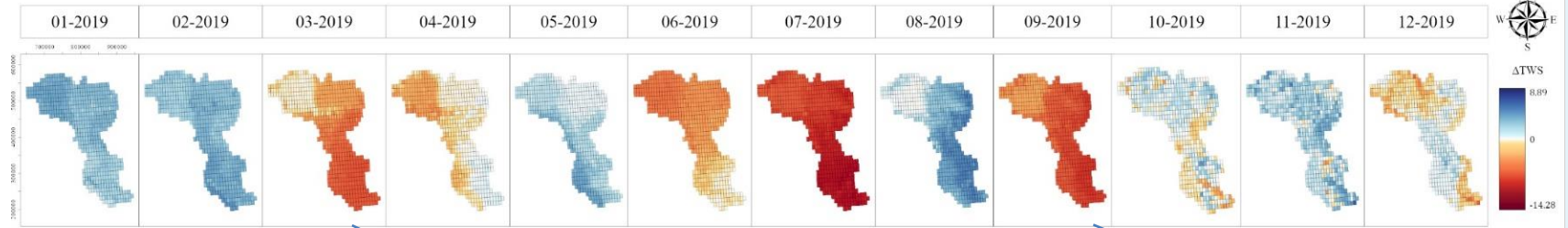


Państwowy
Państwowy
państwowe

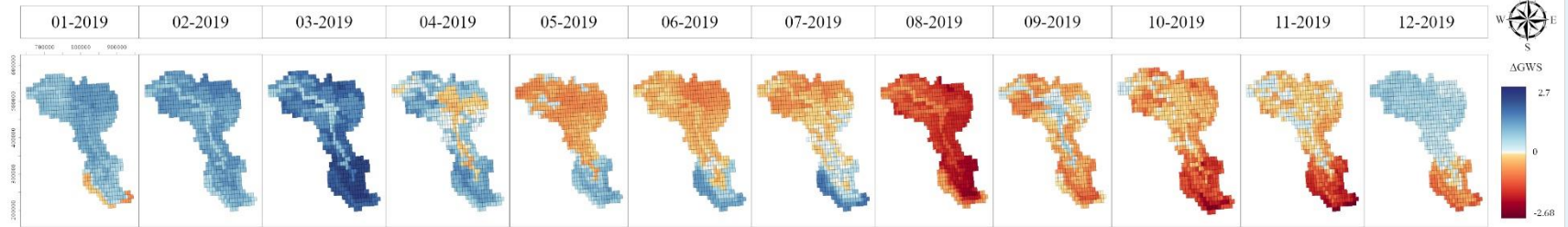
Porównanie TWS i GWS

2019
rok suchy

TWS

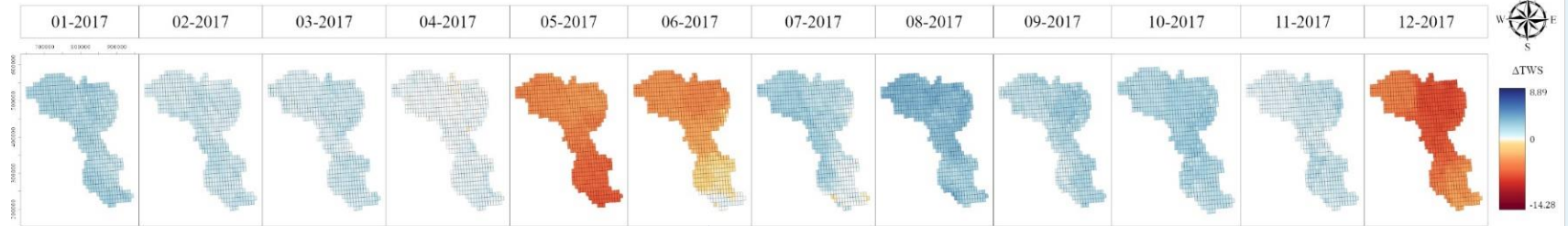


GWS

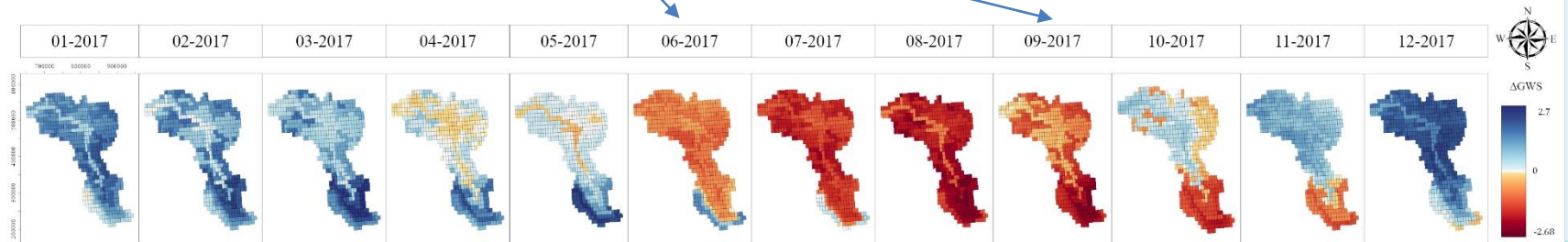


2017
rok wilgotny

TWS

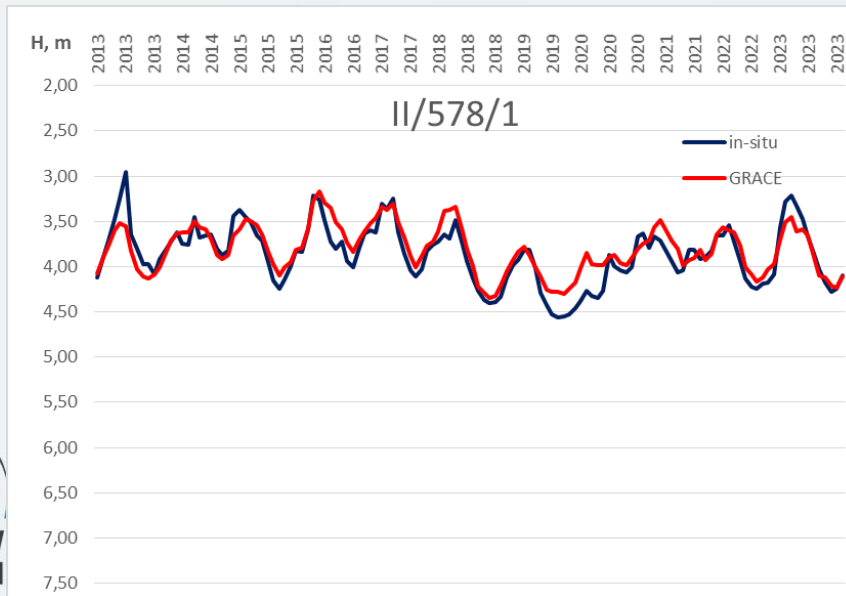
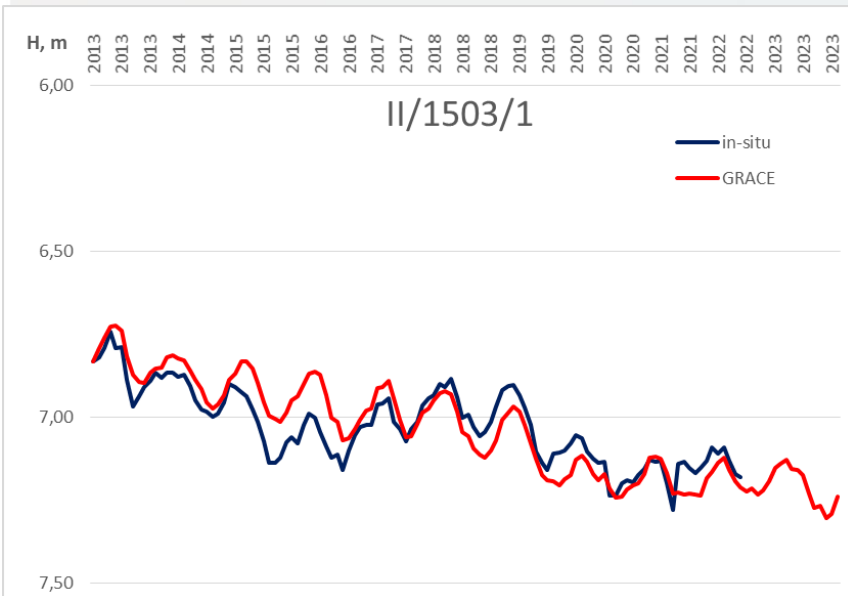
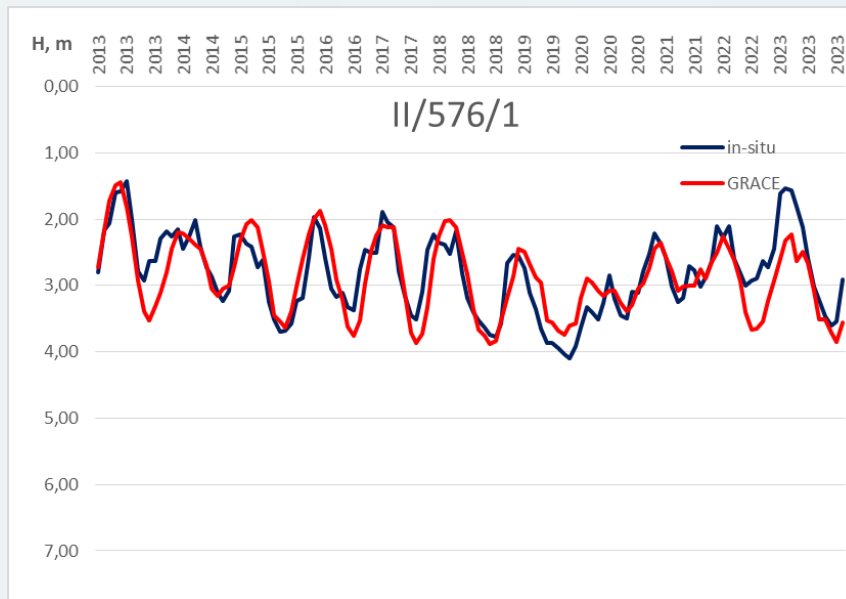
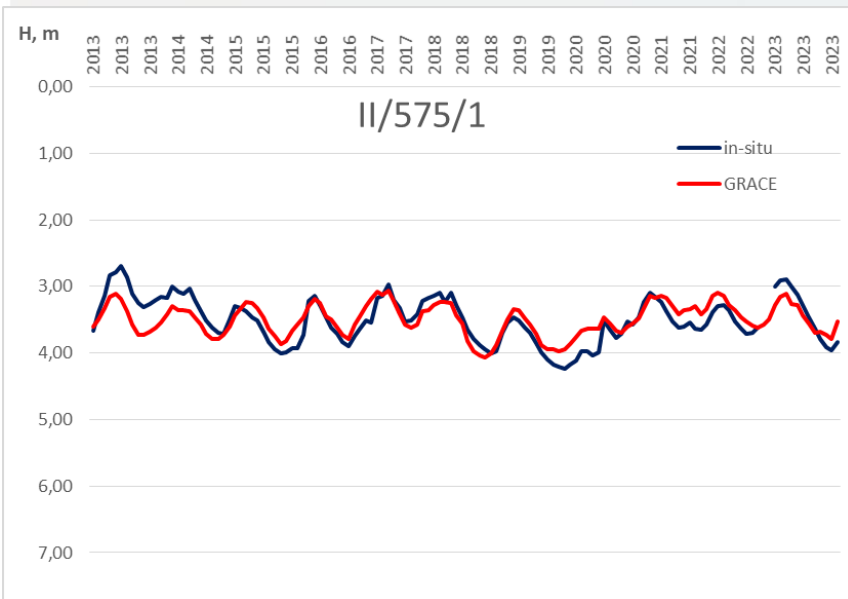


GWS



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna

Porównanie dynamiki zwierciadła wód podziemnych szacowanej z GRACE i pomiarami in-situ



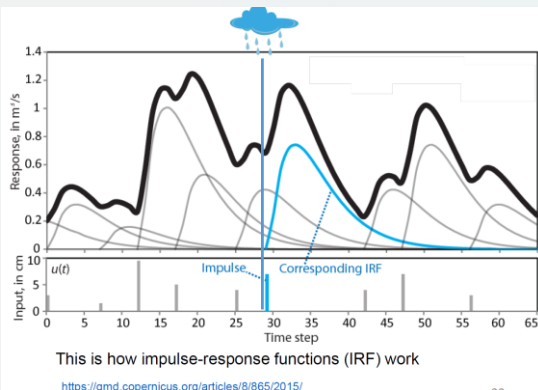
Współczynnik korelacji

Grid 27: II/1722/1	0.82	
Grid 30: II/1726/1	0.79	
Grid 51: II/1724/1	0.81	
Grid 90: II/1819/1	0.78	
Grid 100: II/1811/1	0.75	
Grid 128: II/1481/1	0.82	
Grid 129: II/1503/1	0.74	
Grid 132: II/1812/1	0.80	
Grid 196: II/571/1	0.70	
Grid 217: II/964/2	0.68	
Grid 256: II/575/1	0.82	
Grid 258: II/1482/1	0.66	
Grid 286: II/1846/1	0.78	
Grid 313: II/576/1	0.79	
Grid 346: II/578/1	0.81	

Prognozowanie zwierciadła wód podziemnych

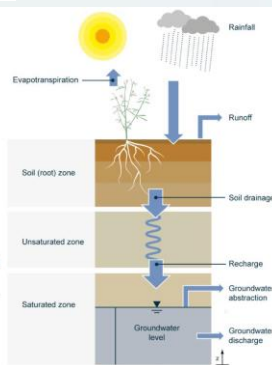
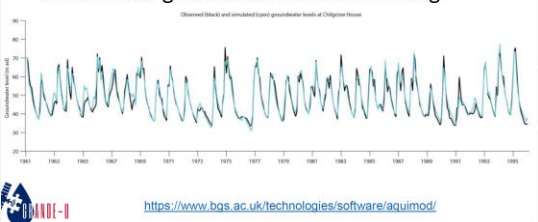
Doświadczenia Służb Geologicznych: Brytyjskiej, Francuskiej i USA

Podejście bazuje się na **bilansie wodnym/ekstrapolacji szeregu czasowego**

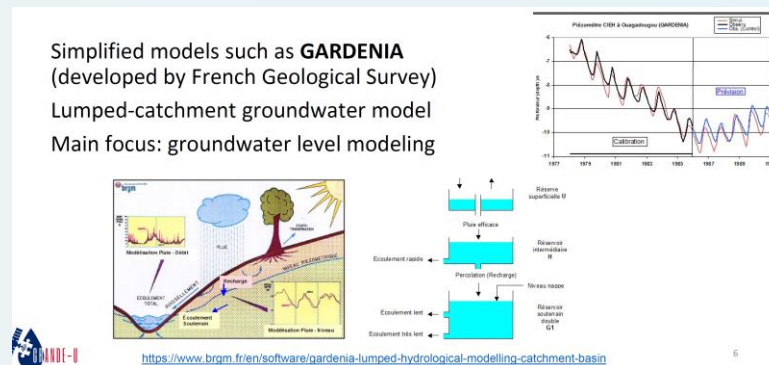


- Między opadem deszczu a reakcją poziomu wód podziemnych występuje opóźnienie spowodowane rodzajem gleby, klimatem, głębokością wód podziemnych, roślinnością itp.
- Aby przewidzieć poziom wód podziemnych w przyszłości, musimy znać co najmniej opady i ewapotranspirację w przeszłości

Simplified models such as **AquiMod** (developed by British Geological Survey)
 Lumped-catchment groundwater model
 Main focus: groundwater level modeling



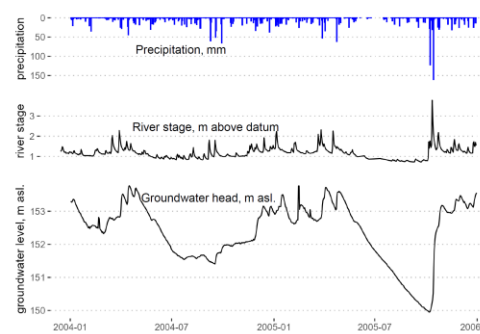
Simplified models such as **GARDENIA** (developed by French Geological Survey)
 Lumped-catchment groundwater model
 Main focus: groundwater level modeling



ML example: modeling groundwater heads (USA well)

- Input data:
- PRCP-daily precipitation
 - TMAX/TMIN-max/min daily air temperature
 - ET-daily potential evaporation (PET)
 - Stage_m- nearby river stage

Date	PRCP	TMAX	TMIN	Stage_m	ET	head
2005-01-02	0.000	3.333333	-3.888889	1.270940	0.56107540	152.9137
2005-01-03	1.524	10.555556	3.333333	1.2740018	0.80147466	152.9107
2005-01-04	21.052	8.333333	2.777778	1.4934471	0.66889700	152.9381
2005-01-05	0.000	2.777778	-2.777778	1.4446815	0.50715044	152.8747
2005-01-06	19.500	0.000000	-4.444444	1.387245	0.39693981	153.0204
2005-01-07	10.668	1.111111	-6.111111	1.3623895	0.50191731	153.0326
2005-01-08	1.016	0.000000	-4.666667	1.4172508	0.45842558	153.0205
2005-01-09	21.844	-6.959596	-3.222222	1.4423137	0.44344791	153.0814
2005-01-10	0.000	2.222222	-3.222222	1.4233465	0.46814097	153.1515
2005-01-11	0.000	0.000000	-3.888889	1.3896302	0.39206716	153.1423



Państwowy Instytut Geologiczny
 Państwowy Instytut Badawczy
 państwowa służba geologiczna



UN
 22
 ŚW
 DZ



Wnioski

1. Implementacja danych grawimetrycznych otworzyła możliwości śledzenia zmian retencji i naturalnej dynamiki zwierciadła wód podziemnych o charakterze swobodnym w ciągłości przestrzennej.
2. Zmiana stanu retencji rzutuje na dostępne do wykorzystania zasoby wód podziemnych, co może być kluczem do aktualizacji zasobów.
3. Asymilacja danych obserwacyjnych z satelitów i naziemnych, przy użyciu zaawansowanych technik modelowania cyklu wodnego przyczyni się do dokładniejszego prognozowania stanu ilościowego wód podziemnych.





Dziękuję za uwagę
Tatiana.solovey@pgi.gov.pl



Model dilofozaura w Muzeum Geologicznym w Warszawie; Wikimedia Commons, by Hiuppo, CC BY 3.0



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna

