

Gravitační sledování Země pomocí družic

Josef Sebera

Oddělení Galaxií (skupina astrodynamiky a kosmické geodézie)



**Astronomical
Institute**
of the Czech Academy
of Sciences



VESMÍR
PRO LIDSTVO

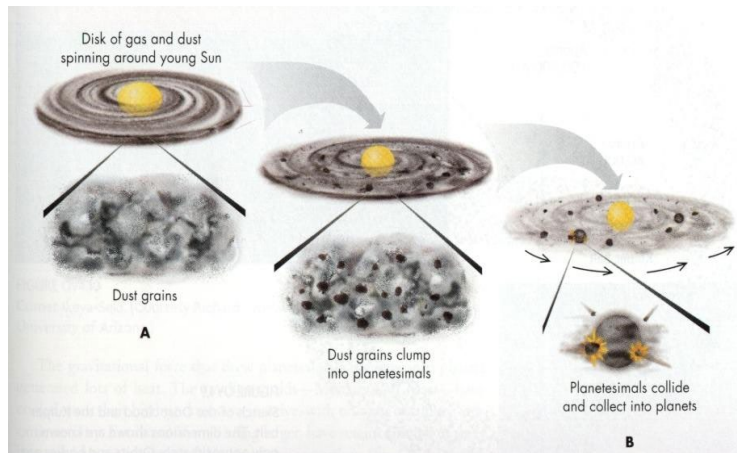
sebera@asu.cas.cz

Seminář Geoinformatika v životním prostředí, UJEP, 2025

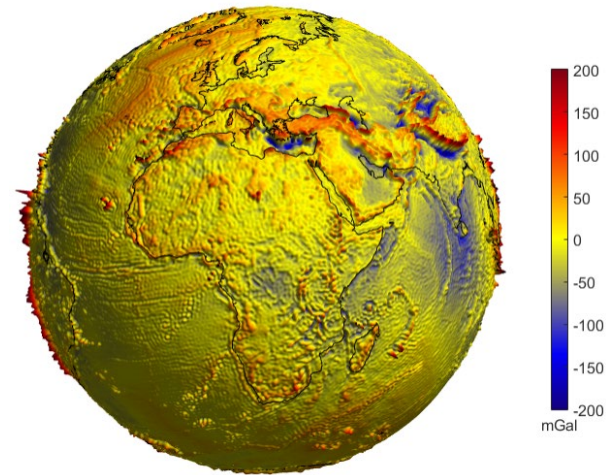
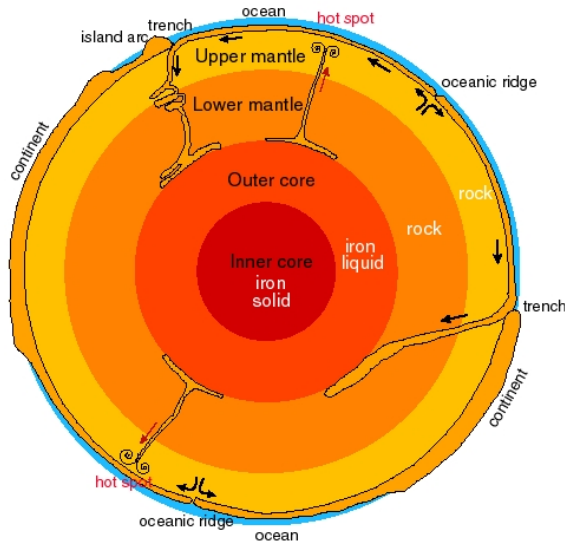
Jak to všechno začalo?

- Země - 4.5 mld. let
- Vznik shlukováním částic, plynů (gravitace, kolize)

Vznik planety



Diferenciace “vrstev”

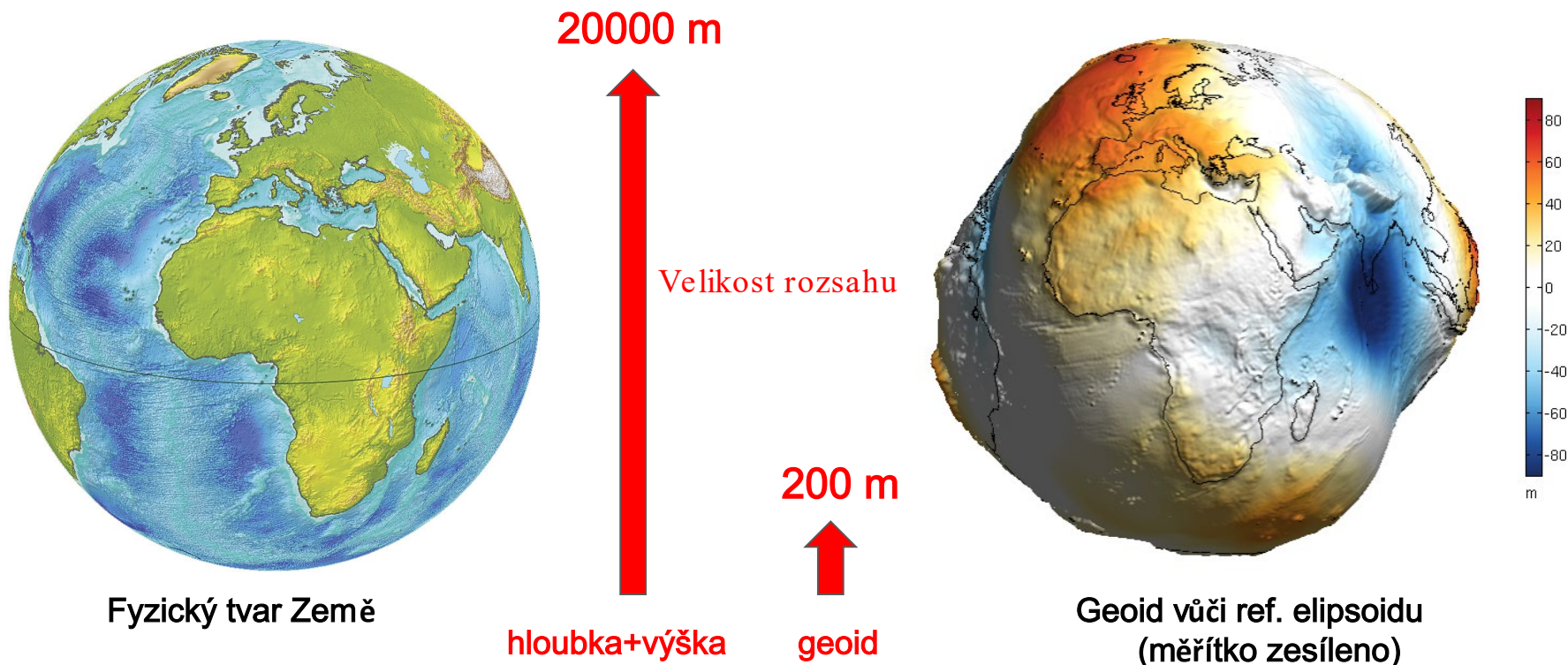


Tíhová anomálie

$$1 \text{ mGal} = 0.00001 \text{ m/s}^2$$
$$(g = 980000 \text{ mGal})$$

Tvar Země?

- Fyzický - dno oceánu (příp. hladina oceánu) po Himalájské vršky
- “Fyzikální” - (kvazi)geoid - tvar hladiny oceánů “vynucován” tíhovým polem



Gravitační pole Země dle účinku

Zajímá nás



- g je “souhrnným” účinkem hmot
- gravitační účinek rychle klesá se vzdáleností => družice musí být nízko
- citlivost družicové gravimetrie cca 3.-6. desetinné místo
- časové rozlišení 1 měsíc, pixel 300-400 km (od 2030 cca 200km)

Kde možná gravitační pole nečekáte



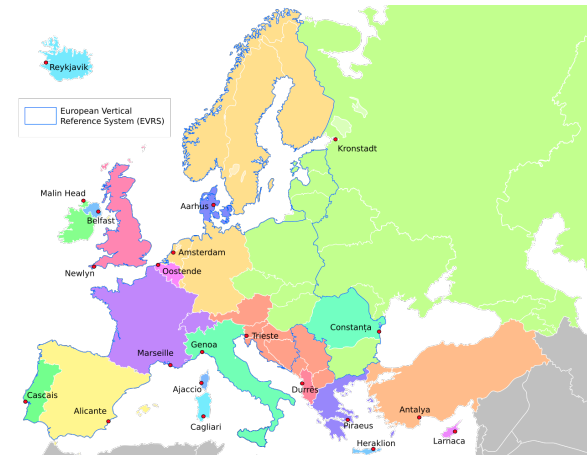
SBÍRKA ZÁKONŮ
ČESKÁ REPUBLIKA

Nařízení vlády č. 159/2023 Sb.

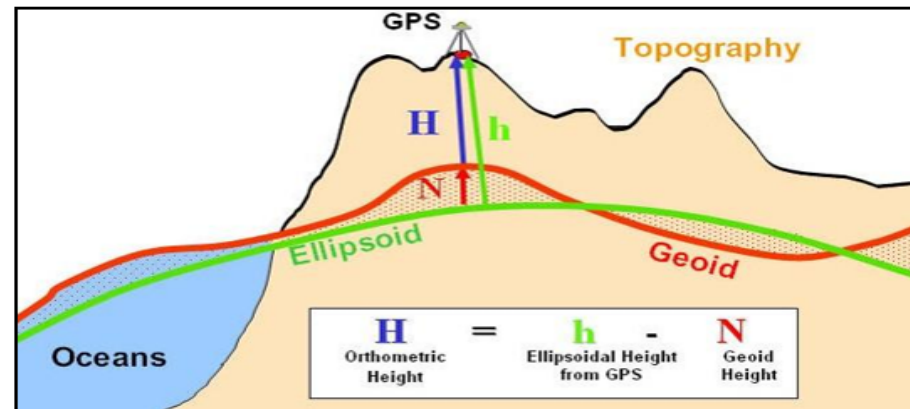
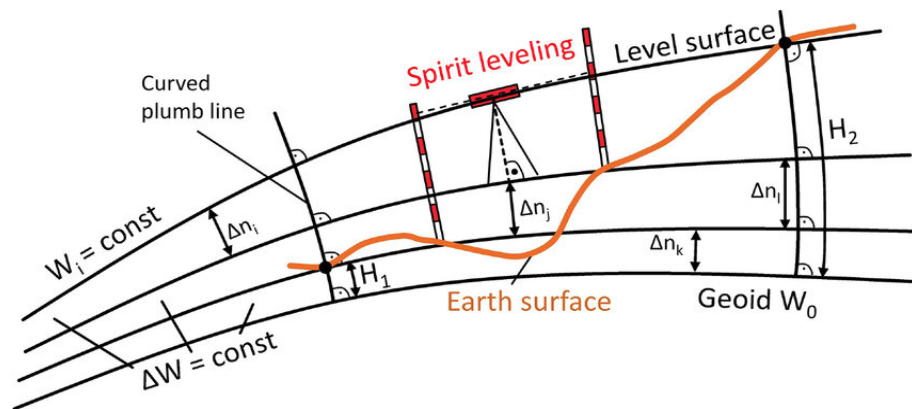
c) výškové systémy:

- 1. Evropský výškový referenční systém
- 2. Výškový systém baltský - po vyrovnání Bpv
- 3. Světový výškový referenční systém WGS84-EGM96
- 4. Světový výškový referenční systém WGS84-EGM2008

d) Tíhový systém 2010, zkratka názvu je S-Gr10.



Výšku obvykle chápeme/používáme geometricky, ale její povaha je fyzikální (bez GP to nejde)

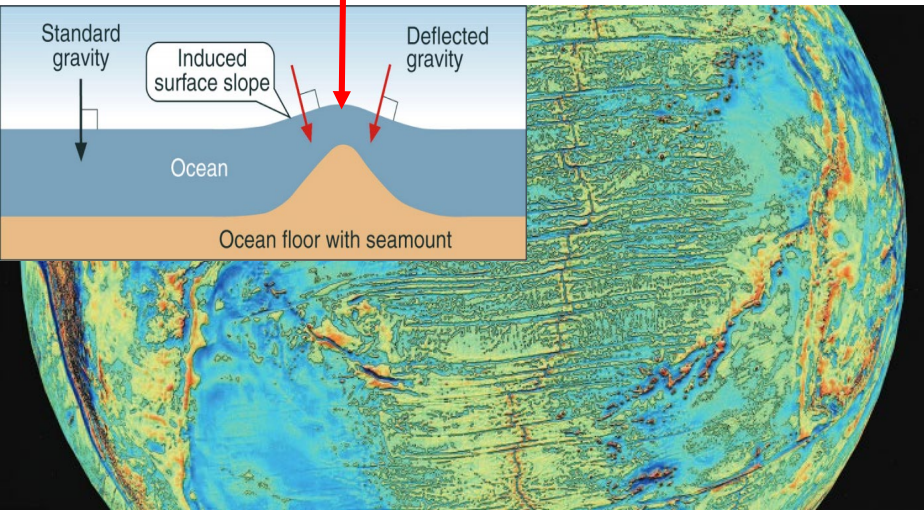


Určování GP pomocí družic 1957 ~ 2000

- Inverze dráhy - prvenství prof. Buchar (Sputnik 2, Nature, 1958), od 60. let
 - Optická pozorování
 - Dopplerovská pozorování
 - SLR- těžiště Země, dnes i další parametry GP
- Družicová altimetrie - od 70. let - grav. signál z tvaru mořské hladiny

družice

Družicová altimetrie



Vývoj přesnosti drah družic

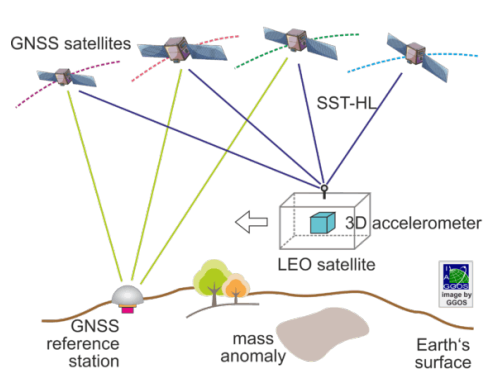
- 50.–60. ... 100-200 m
- 70.–80. ... 1020 m (rozvoj družicové altimetrie)
- 80.–90. ... 10 cm 1 m, LANDSAT 4 (první s GPS)
- 90. léta ... <10 cm (TOPEX/Poseidon)
- dnes ... <5 cm (GNSS, SLR, Doppler)

Laserová lokace družic (SLR)

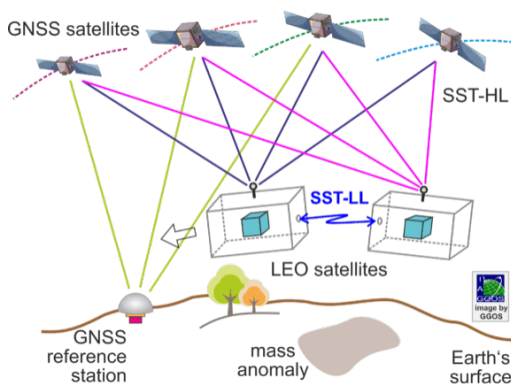


Advent družicové gravimetrie: 2000 - současnost

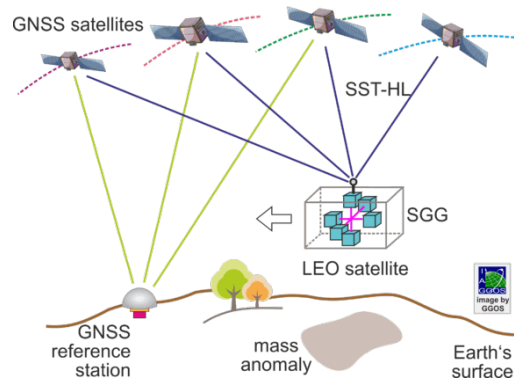
- Významný vliv mělo zpřesnění drah (zejména GPS/GNSS)



TVG z GPS/GNSS



Zejména TVG, geofyzika



Geoid, geofyzika, svrchní proudění

CHAMP (cca 500 km)



GRACE, GRACE-FO (cca 400-500 km)



GOCE (220-250 km)

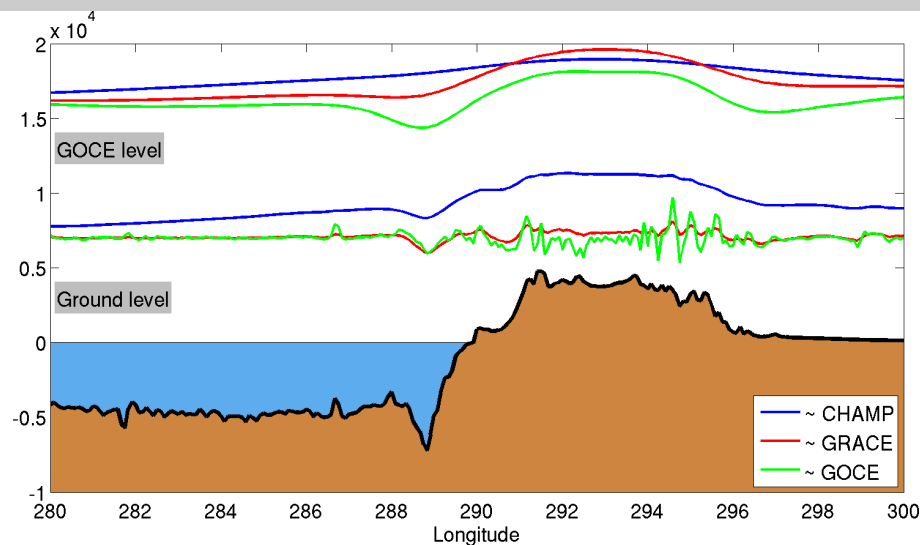


Swarm

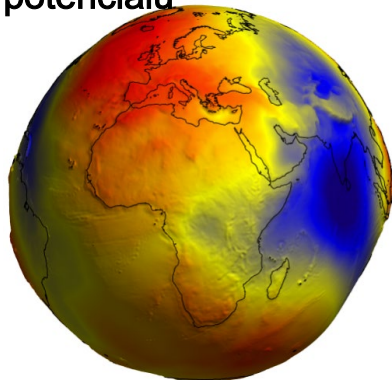


Porovnání “měřených” veličin (0., 1. a 2. derivace potenciálu)

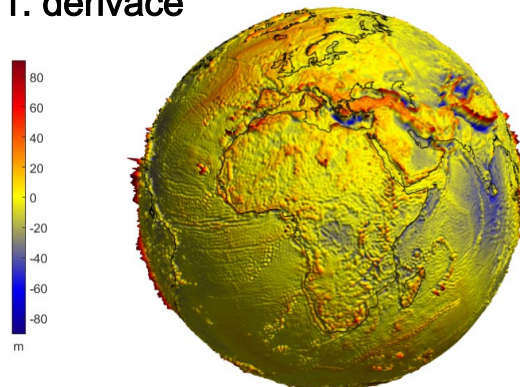
- Vyšší derivace = vyšší citlivost na bližší hmoty
- Geoid - vliv zem. pláště
- Zrychlení - plášť-kůra
- 2. derivace - zejména svrchní litosféra



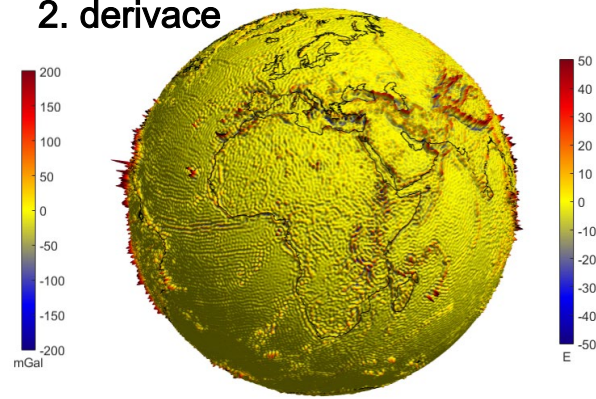
0. derivace grav. potenciálu



1. derivace



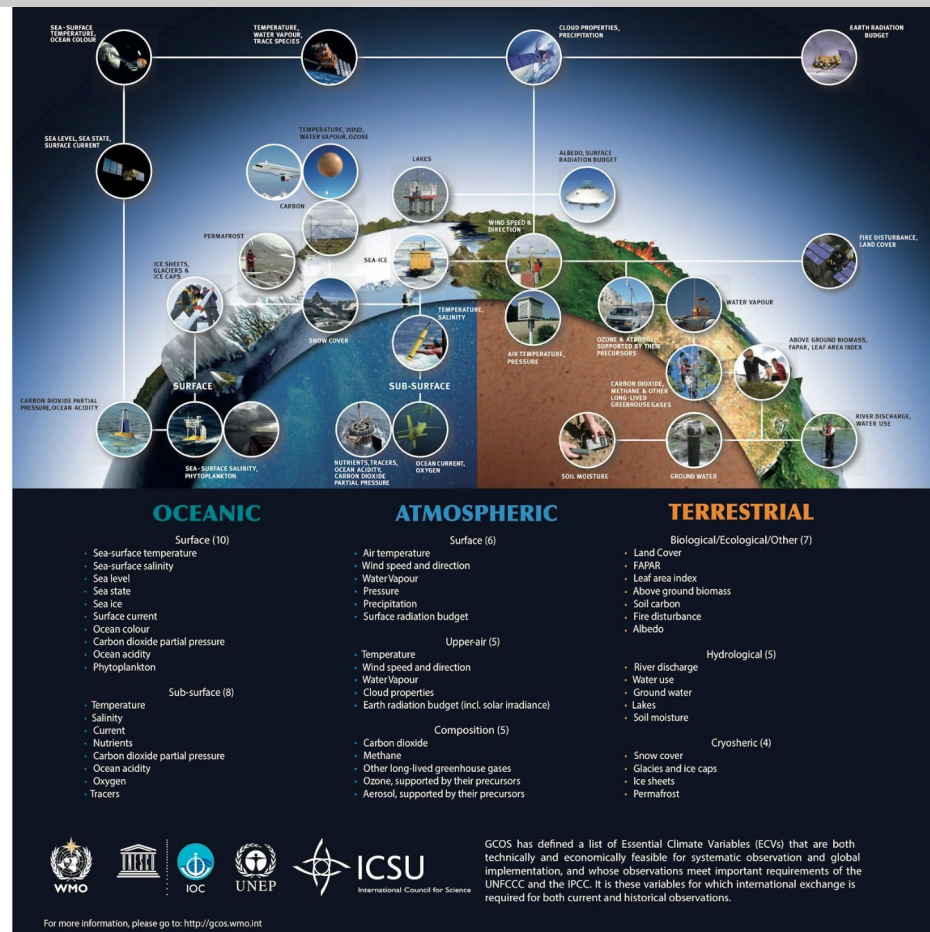
2. derivace



Essential climate variables

- Po cca 20 letech sledování časových změn GP byla družicová gravimetrie integrována do ECV
- 55 hlavních proměnných klimatického systému
 - Oceánské
 - Atmosférické
 - “Zemské”
 - Terrestrial Water Storage (TWS) change

<https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables>



Voda a družice

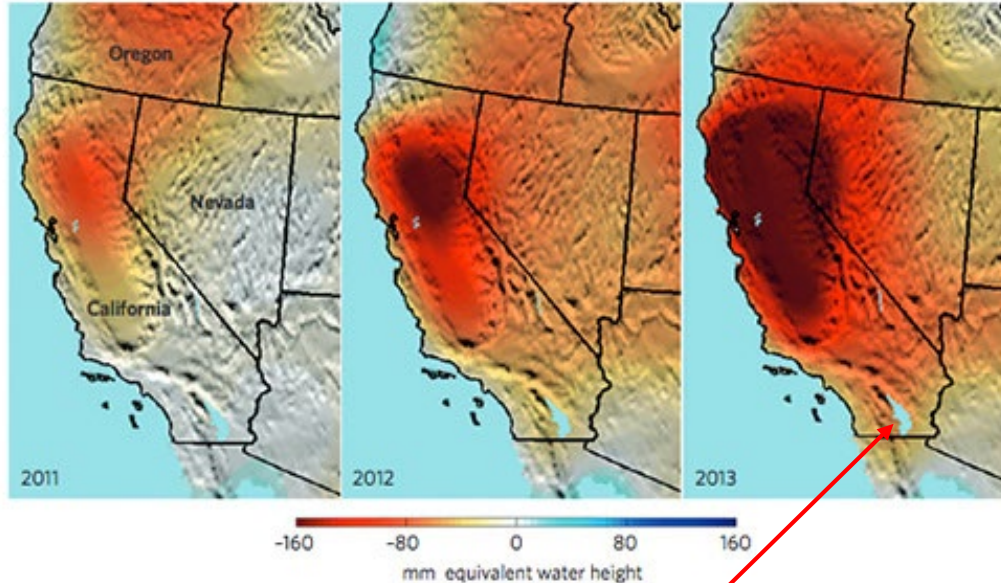
McCabe, M. F., Rodell, M., Alsdorf, D. E., Miralles, D. G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., ... & Shi, J. (2017). **The future of Earth observation in hydrology.** *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3879.

<https://hess.copernicus.org/articles/21/3879/2017/>

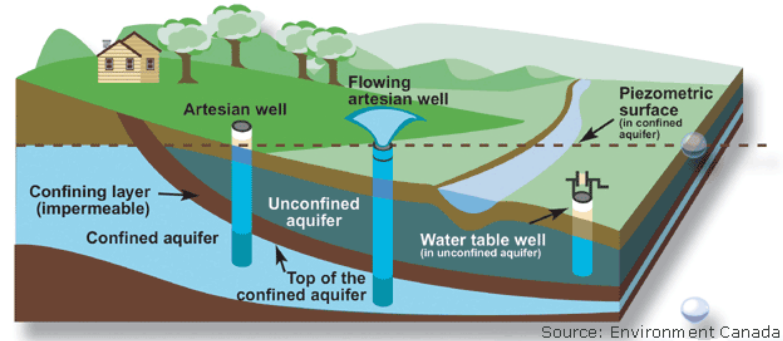
Hydrological variable	Missions/ instruments	Standard spatial resolution (km)	Standard temporal resolution (days)	Launch year	Dedicated measurement
Rainfall	GPM	5	0.125	2014	Y
Snowfall	GPM	5	0.125	2014	N
Evaporation	Terra/MODIS Aqua/MODIS Suomi/VIIRS	0.5	1	1999 2002 2013	N
	Landsat 8 Landsat 9			2013 2023	
Runoff	SWOT	0.1	11	2021	Y
Snow cover	Terra/MODIS Aqua/MODIS Suomi/VIIRS	0.5	1	1999 2002 2013	Y
Snow density, depth, or water equivalent	GCOM-W/AMSR2	30	1	2012	N
Surface soil moisture	SMOS	36	3	2009	Y
	SMAP (radiometer)	36	3	2015	Y
	ASCAT	25	1	2006	N
	GCOM-W/AMSR2	50	1	2012	N
	Sentinel-1A Sentinel-1B	0.1–0.005	12	2014 2016	N N
Deep soil moisture	Biomass	0.2	18 days yr ⁻¹	2021	N
Surface water elevation	Jason-3	10	10	2016	N
	SARAL	10	35	2013	N
	SWOT	0.1	11	2021	Y
	ICESat-2	1.5	90	2018	N
Depth to groundwater	–	–	–	–	–
Total groundwater storage	–	–	–	–	–
Terrestrial water storage change	GRACE	220	30	2002	Y
	GRACE-FO	180	30	2017	Y
Water consumption	–	–	–	–	–
Water quality	–	–	–	–	–
Vegetation/land cover/ irrigated area	Terra/MODIS Aqua/MODIS Suomi/VIIRS	0.5	1	1999 2002 2013	Y
	Landsat 8 Landsat 9	0.03	16	2013 2023	Y
	Sentinel-2A	0.02	10	2015	Y
	Sentinel-2B	0.02	10	2017	Y
	Sentinel-3A	0.3	2	2016	Y
	Proba-V	0.35	2	2013	Y
Vegetation stress	ISS/ECOSTRESS	0.07	4	2018	Y
Photosynthesis	FLEX	0.3	0.5	2022	Y
Water vapour	Aqua/AIRS	13.5	1	2002	N
Integrated water budget	–	–	–	–	–

Časově proměnné pole - podzemní voda, sucho

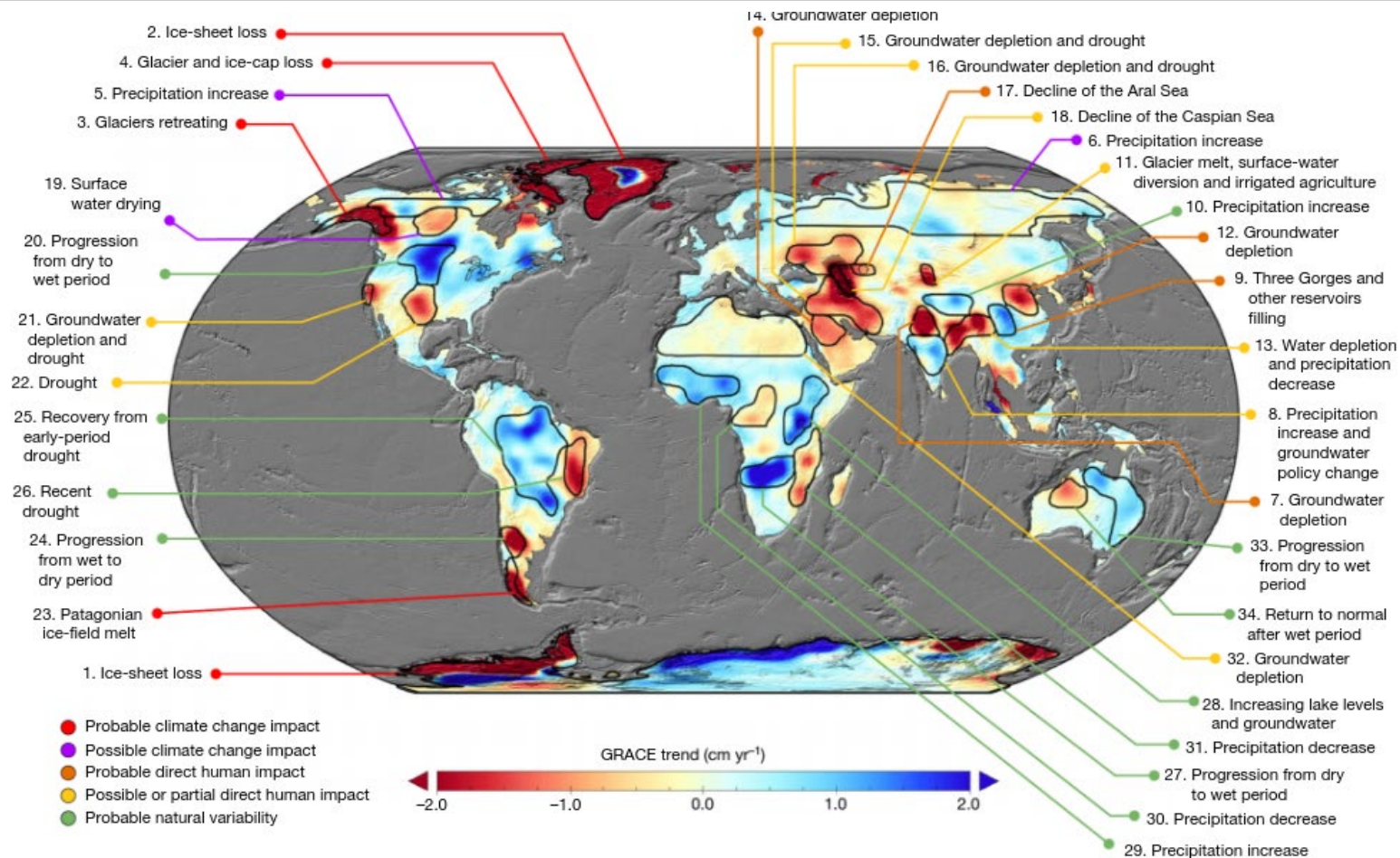
- Z družic viditelný efekt zavlažování (čerpání hlubinné vody)
- Čerpáním dodáváme do systému vodu, která by jinak ještě dlouho zůstala pod povrchem
- Např. $400,000 \text{ km}^2 \times 0.0001 \text{ km} (10 \text{ cm}) = 40 \text{ km}^3$ (Balaton 2 km^3)
- Ovšem: výsledek 1-2x měsíčně, pixel cca 300-400km



Salton sea > Balaton



Časově proměnné grav. pole - přehled pozorovaných fenoménů



Děkuji za pozornost!



<https://www.vesmirprolidstvo.cz/cs>

/