

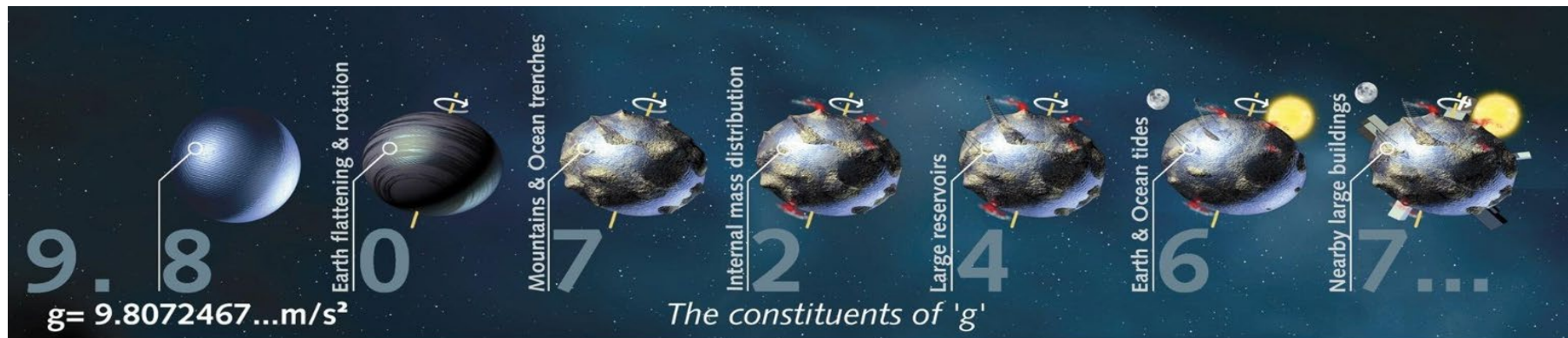
Družicová a terestrická tíhová měření pro sledování environmentálních procesů

Josef Sebera & Vojtech Pálinkáš
sebera@asu.cas.cz vojtech.palinkas@pecny.cz

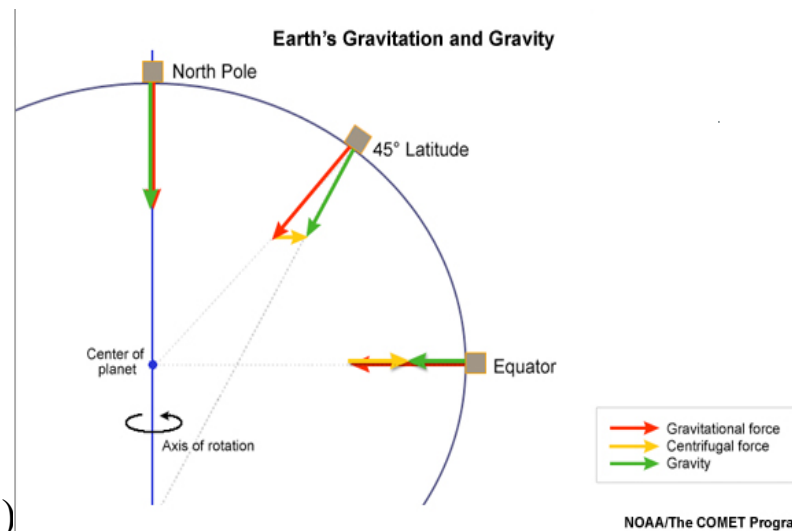


Geodetic Observatory Pecný

Tíhové a gravitační pole Země



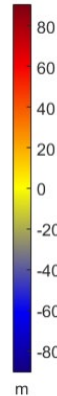
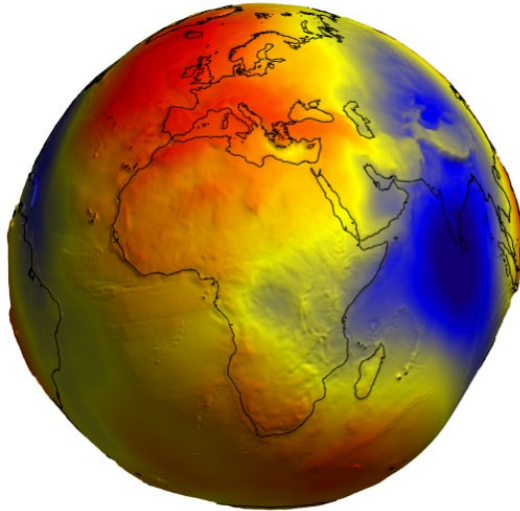
- Tíhové a gravitační pole:
 - Pozemní gravimetrie - **tíhové** zrychlení
 - Družicová gravimetrie - **gravitační** zrychlení
 - Různá citlivost na přírodní fenomény!
- Měření a/ nebo poloha bodu na Zemi se mění:
 - vlivem třetích těles (Měsíc, Slunce, planety)
 - Slap. přesuny hmot vč. deformací Země
 - Změny v rotaci Země vč. deformací
 - Změny v rozložení hmot vč. deformací (atmo, hydro/ kryo, lito/ asteno ...biosféra ...jádro Země)



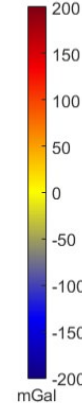
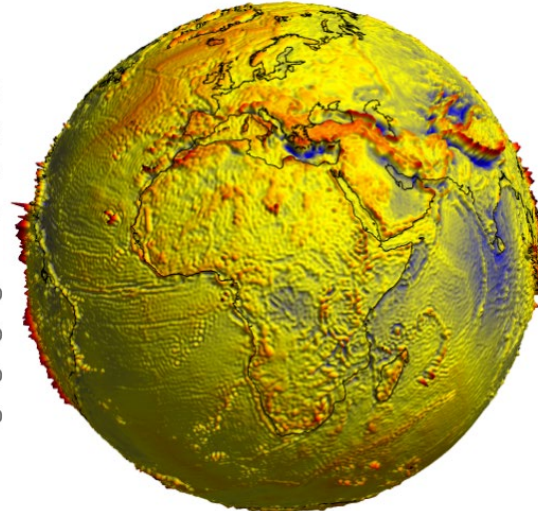
Porovnání “měřených” veličin (0., 1. a 2. derivace potenciálu)

- Vyšší derivace ~ vyšší citlivost na bližší hmoty
- 0. derivace - **geoid** (~ vliv celého tělesa Země)
- 1. derivace - **zrychlení** (~ vliv pláště a kůry)
- 2. derivace - **gradient zrychlení** (~ vliv svrchní litosféry)

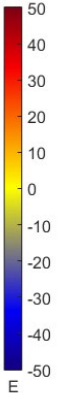
geoid



1. derivace (radiální, V_r)



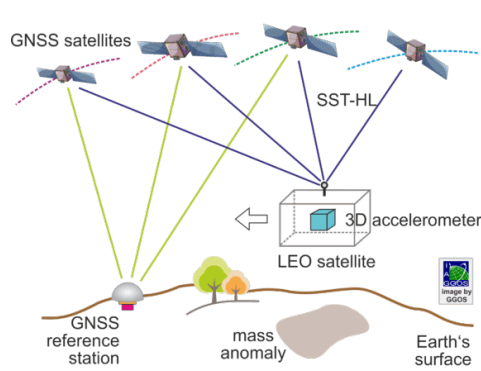
2. derivace (radiální, V_{rr})



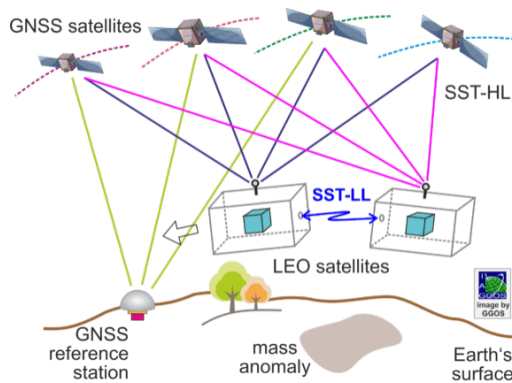
Anomální gravitační pole z pohledu různých veličin

Družicová pozorování

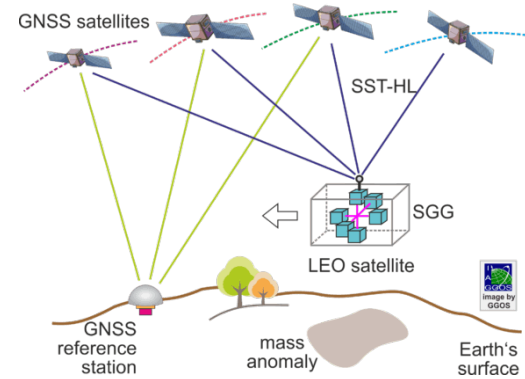
- Gravimetrické měření - neměříme g, ale veličiny spojené s gravitačním polem



Transport hmot z GPS/GNSS



Transport hmot, geofyzika



Geoid, geofyzika, svrchní oceánské proudění

CHAMP (cca 500 km)



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



GOCE (220-250 km)



Swarm



Proč sledovat vodní hmoty také pomocí gravitace?

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.

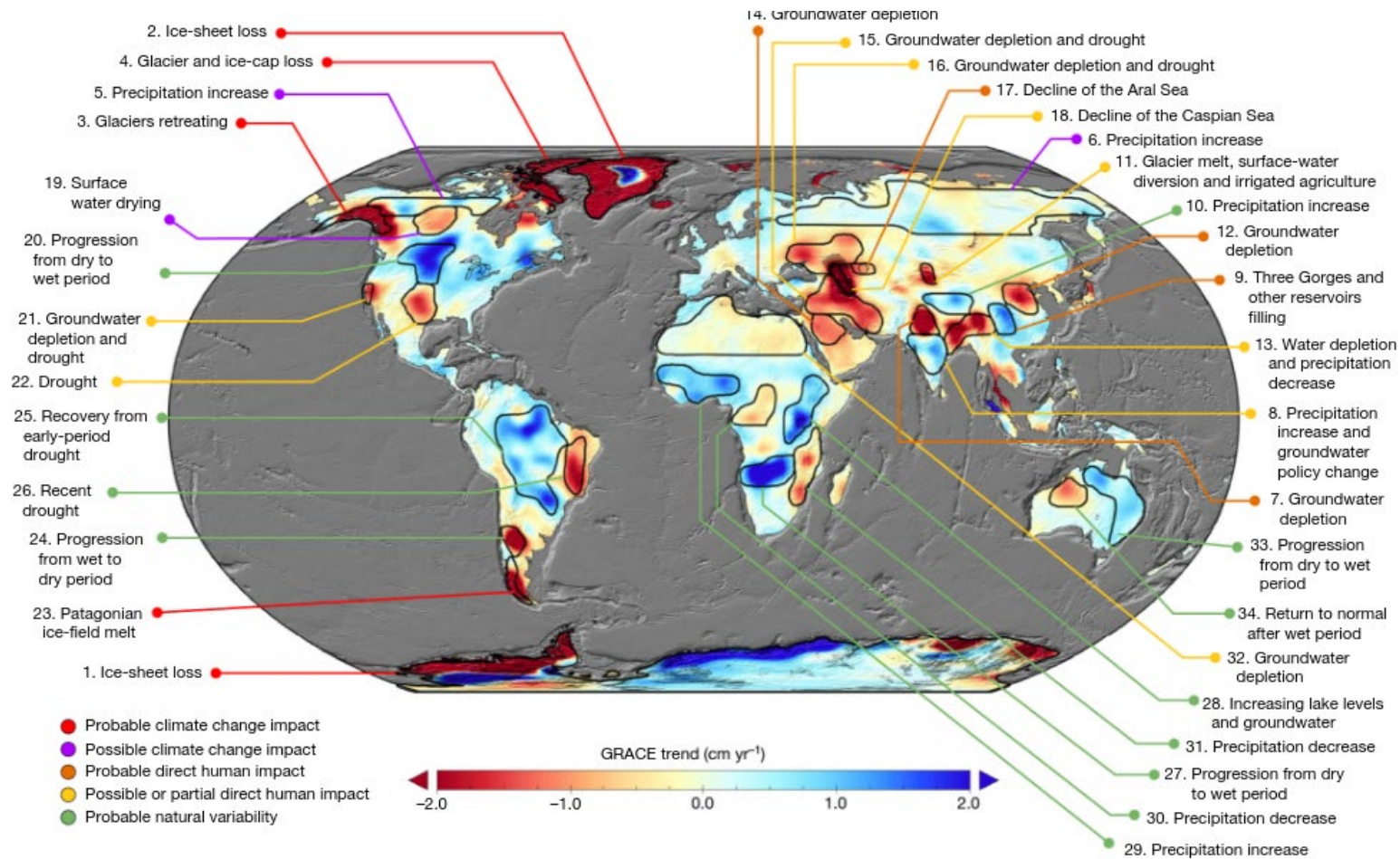
<https://hess.copernicus.org/articles/21/3879/2017/>

Tíže/gravitace dodá celkový signál, ale:

- u družicové gravimetrie
 - Vyhlazený
- u pozemní gravimetrie
 - může být silně ovlivněný lokálně (hydrologie)

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			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			2013 2023	
	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
	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	–	–	–	–	–

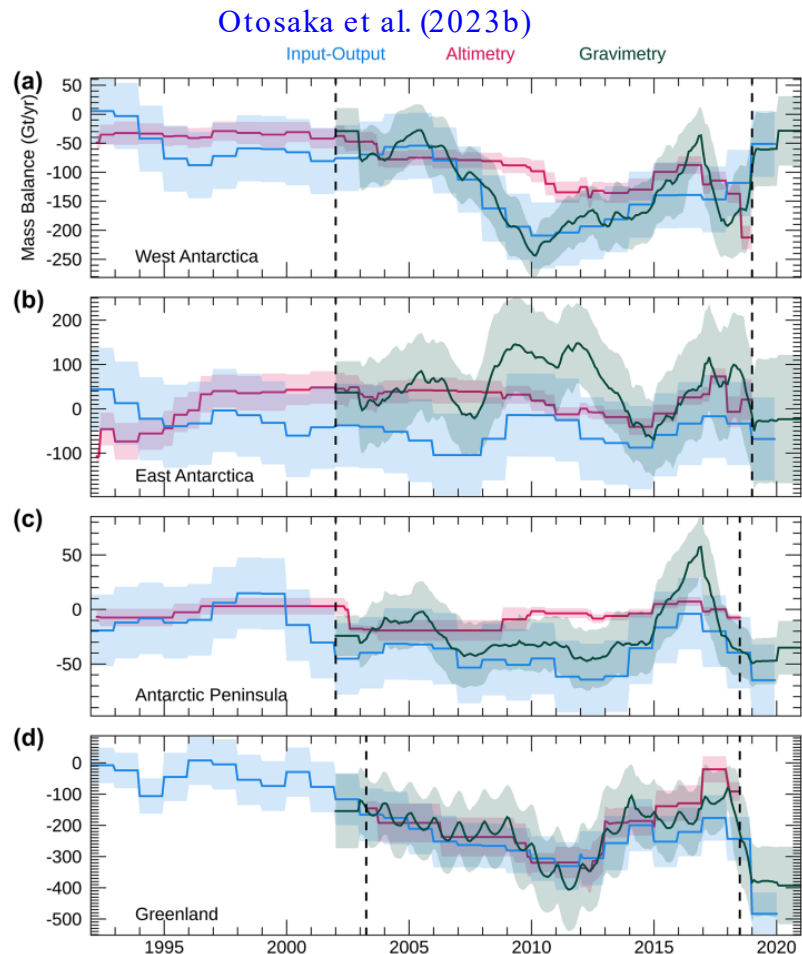
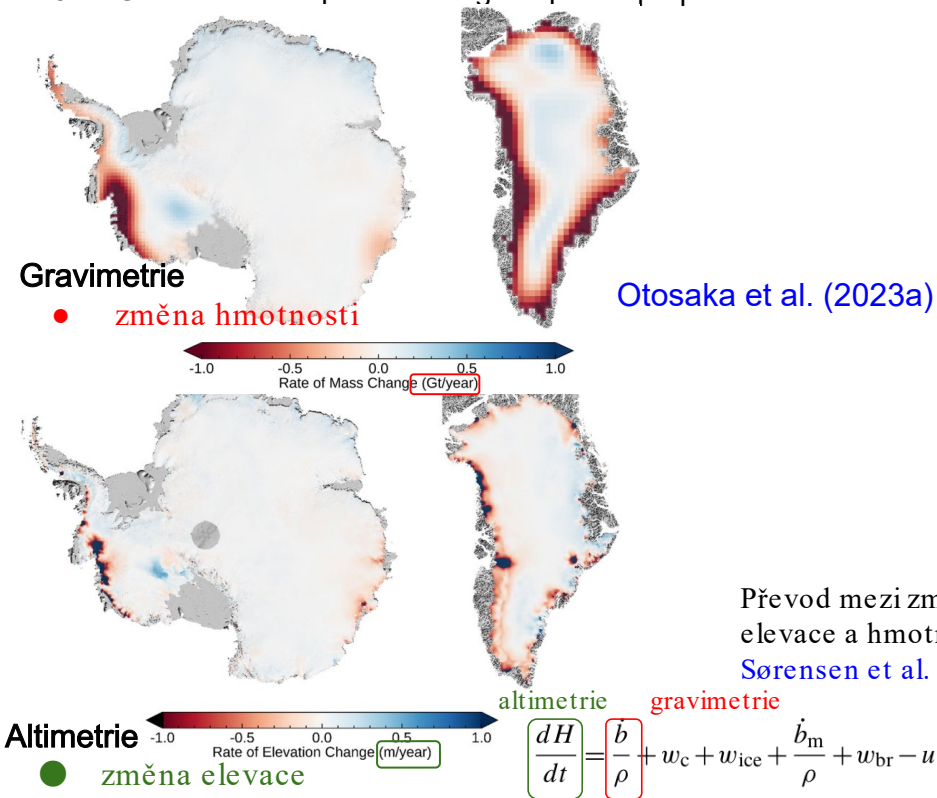
Časově proměnné grav. pole - přehled pozorovaných fenoménů



Změny ledové pokrývky - DPZ a družicová gravimetrie

V zásadě jsou tři postupy pro určování změn ledové pokrývky:

1. Water balance (input–output, radar+optická družicová data)
2. Družicová altimetrie a přepočtení na změnu elevace
3. Gravimetrická - pozorování grav. pole a přepočtení na hmotnost



Družicová gravimetrie na ASU - modelování geopotenciálu

- Modelování hmot/ objemových změn TVG (měsíční řešení)
- Při převodu tíže na sloupec vody lze uvážit jeho hustotu (tekutá, led, firn):
 - Zohlednění sezónních podmínek při odhadu výšky sloupce vody
 - Standardní postup: hustota=konstantní
Variaci ρ "lze" později zohlednit při převodu objem $\leftrightarrow$ hmotnost
 - Toto není úplně korektní - hmotnost generuje gravitační signál s nelineární váhou (reciproká vzdálenost)

Anomální gravitační potenciál

$$T = G \int_V \frac{\rho}{\ell} dS \cdot h$$

altimetrie gravimetrie

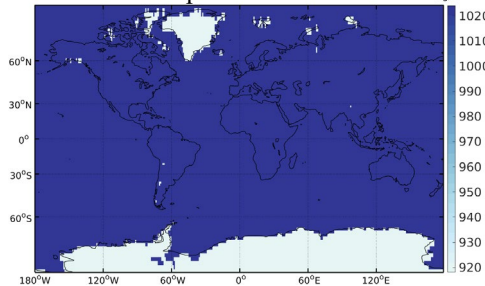
$$\frac{dH}{dt} = \frac{\dot{b}}{\rho}$$

linearita

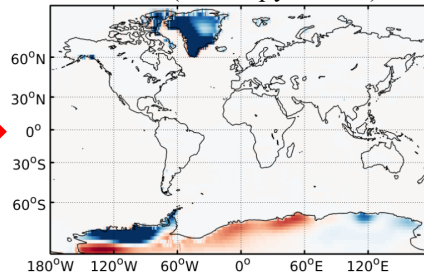
Nelinearita v integrálu

Vstup: ax, ay, az (IfG, Jan/ Feb, 2018, h=100km)

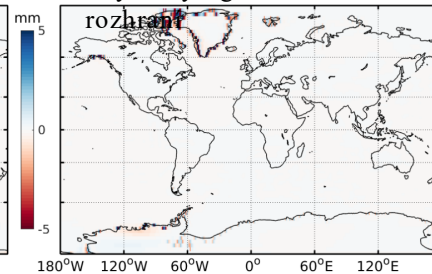
Mapa hustot



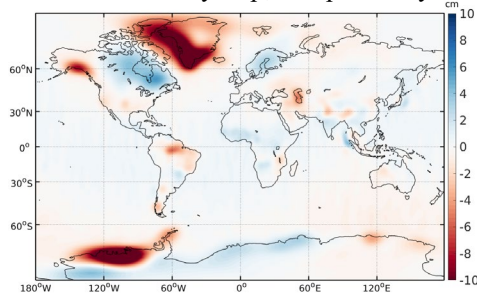
Rozdíl (vliv mapy hustot)



Zbytkový signál na rozhraní



Standardní výstup, sloupec vody



Rozdíl trendu elevace:

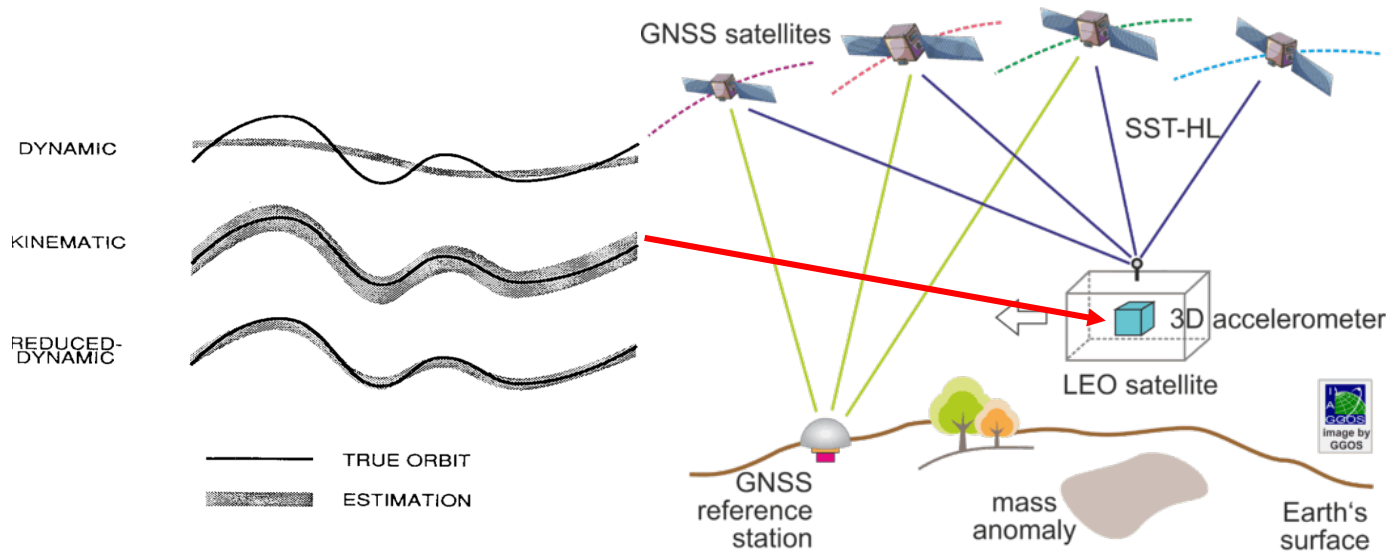
$\rho = \text{konst}$

vs.

$\rho = \text{mapa} + \text{zohlednění} (= \text{přeškálování})$

Družicová gravimetrie na ASU - inverze GNSSdrah družic

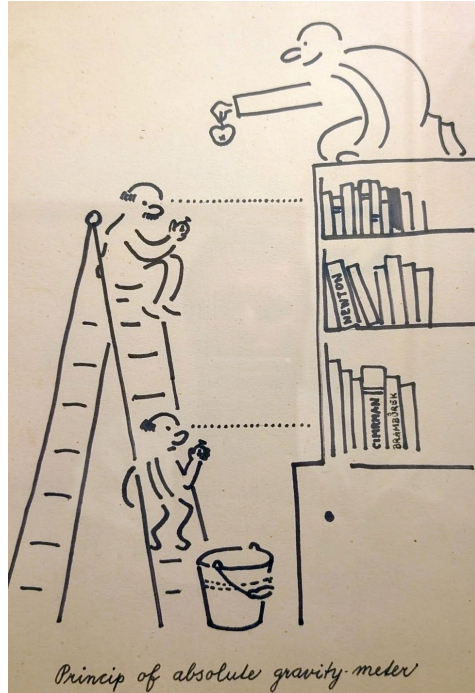
- ESA DISC projekt ve spolupráci DUT, AIUB, IfG, OSU
- Analýza (inverze) drah tří družic Swarm (ESA), metoda SST-hl
- Maximální stupeň sférických harmonických koeficientů 40, u TVG 15 (Bezděk et al., 2016)
- <https://earth.esa.int/eogateway/activities/swarm> -disc



ESA DISC

Terestrická gravimetrie - Absolutní měření

- Volný pád objektu ve vakuu



Princip of absolute gravity meter

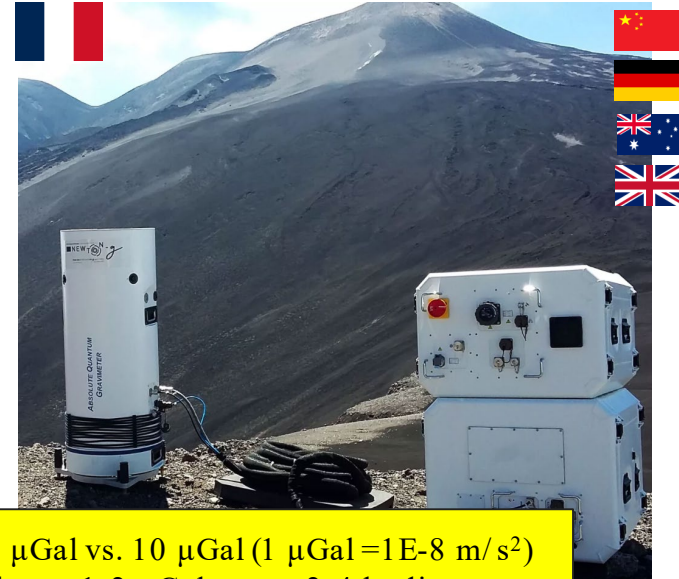
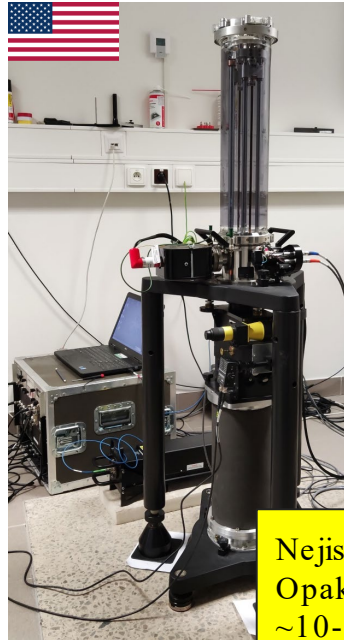
... D_i, T_i

... D_i, T_i

- Jednoznačná reference - integrální účinek všech hmot
- Jednoznačná metrologická návaznost [m/s^2]

Dvě technologie - interferometrie

Laserová	vs.	Atomová
----------	-----	---------



Nejistota: 2 μGal vs. 10 μGal (1 μGal = $1\text{E-}8 \text{ m/s}^2$)
Opakovatelnost: 1-2 μGal za cca 2-4 hodiny
~10-15 mil. Kč, 100 -150 kg

$$D_i = D_0 + v_0 \tilde{T}_i + \frac{1}{2} g_0 \tilde{T}_i^2 + \frac{1}{6} \gamma v_0 \tilde{T}_i^3 + \frac{1}{24} \gamma g_0 \tilde{T}_i^4$$

Terestrická gravimetrie - Relativní měření

- Určují se “pouze” rozdíly “g” v prostoru a/ nebo v čase

Supravodivý gravimetr - pouze pro kontinuální měření změn v čase

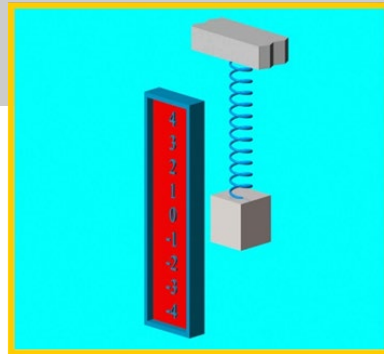


Velmi vysoká přesnost ($0.1 \mu\text{Gal}$)
Globální geodynamika (např. Zemské slapy), sledování vulkánů, podzemních zásob vod...

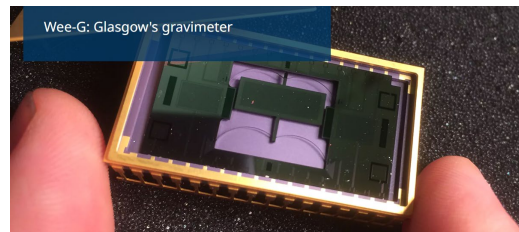
Pružinové gravimetry - rychlá měření (2-5 minut) v husté síti



mapování, geofyzikální prospekce (ner. suroviny),
přesnost $2-10 \mu\text{Gal}$



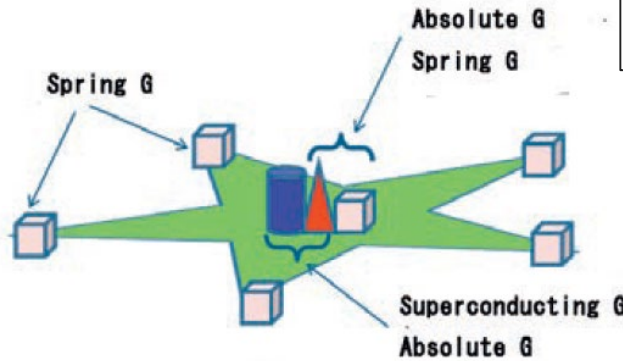
MEMS - mikroelektronika



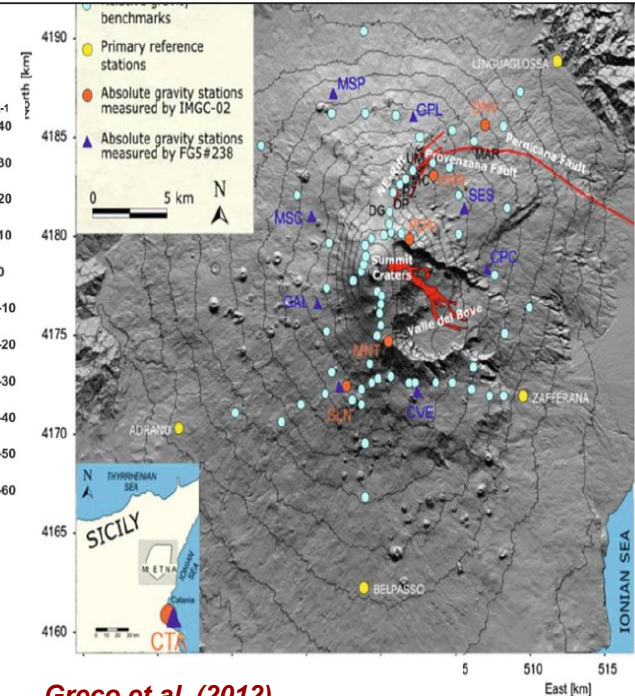
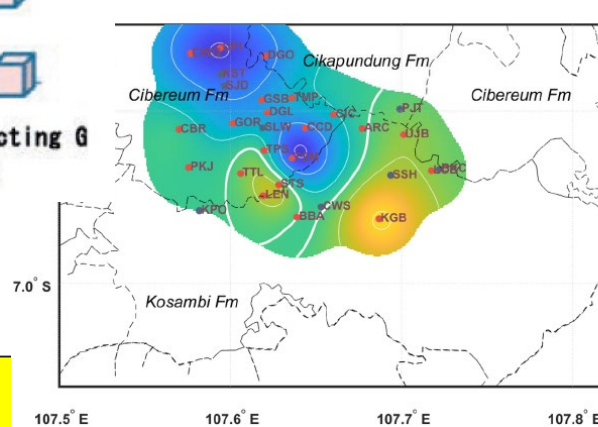
Blízká budoucnost - nižší cena, hmotnost

Terestrická gravimetrie - kombinace - “Hybrid gravimetry”

- Kombinace technik pro prostorové rozšíření časových změn “g”



Hydrologie, glaciologie, vulkanologie, geotermika, úložiště CO₂



Sugihara et al. (2013)
doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.333

Výhody:

- Neinvazivní metoda
- Nejde o bodové měření, integrální efekt z území (cca +100 m)

Bramanto et al. (2023)
doi: org/10.1016/j.jog.2023.101987

Greco et al. (2012)
doi: 10.1007/s00445-012-0630-0

Gravimetry na Geodetické observatoři Pecný (Ondřejov)

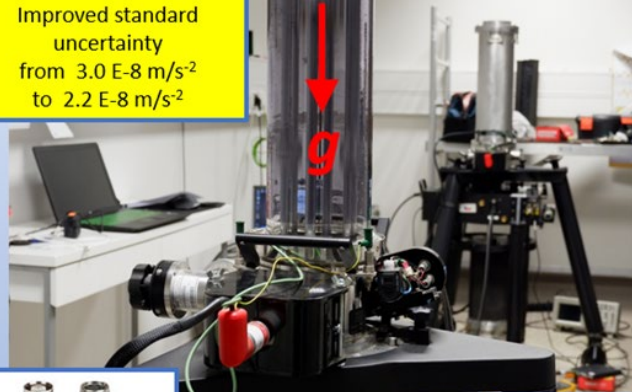


FG5 and FG5X gravimeters equipped by additional detectors and software allow to determine corrections due to:

- fringe signal distortion
- electronic dispersion
- verticality misalignment
 - Coriolis force



Improved standard uncertainty from $3.0 \text{ E-}8 \text{ m/s}^2$ to $2.2 \text{ E-}8 \text{ m/s}^2$



Křen, Pálinkáš et al. in:

Metrologia 53 (2016) 27-40

Metrologia 54 (2017) 161-170

Metrologia 55 (2018) 451-459

Journal of Geodesy 93 (2019) 219-227

Metrologia 56 (2019) 055006

Measurement 171 (2021) 108739

Applied Optics 61 (2022) 1811-1817

Journal of Geodesy 97 (2023) 26



Vývoj: Zlepšení nejistoty měření

$2.8 \mu\text{Gal} \Rightarrow 1.8 \mu\text{Gal}$



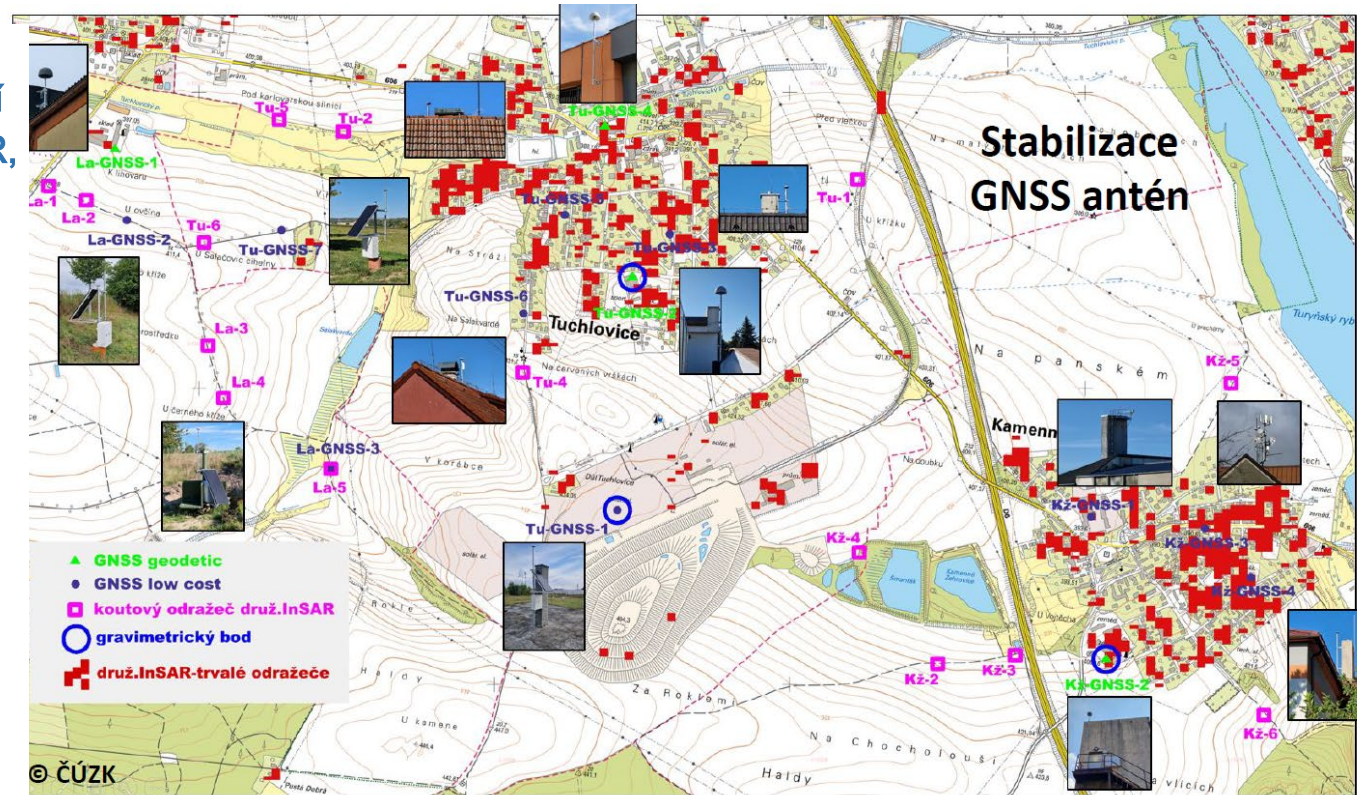
← to BIPM.org

KCDB

All data listed in the KCDB have been reviewed and approved within the CIPM Mutual Recognition Arrangement

Digitální automatizovaný monitoring synergických vlivů zatápění uzavřených dolů kladenského revíru k řízení rizik následků hornické činnosti a dalšímu rozvoji území (DiAMo)

- Horizontální a vertikální posuny (družicový InSAR, GNSS pozemní GB-RAR)



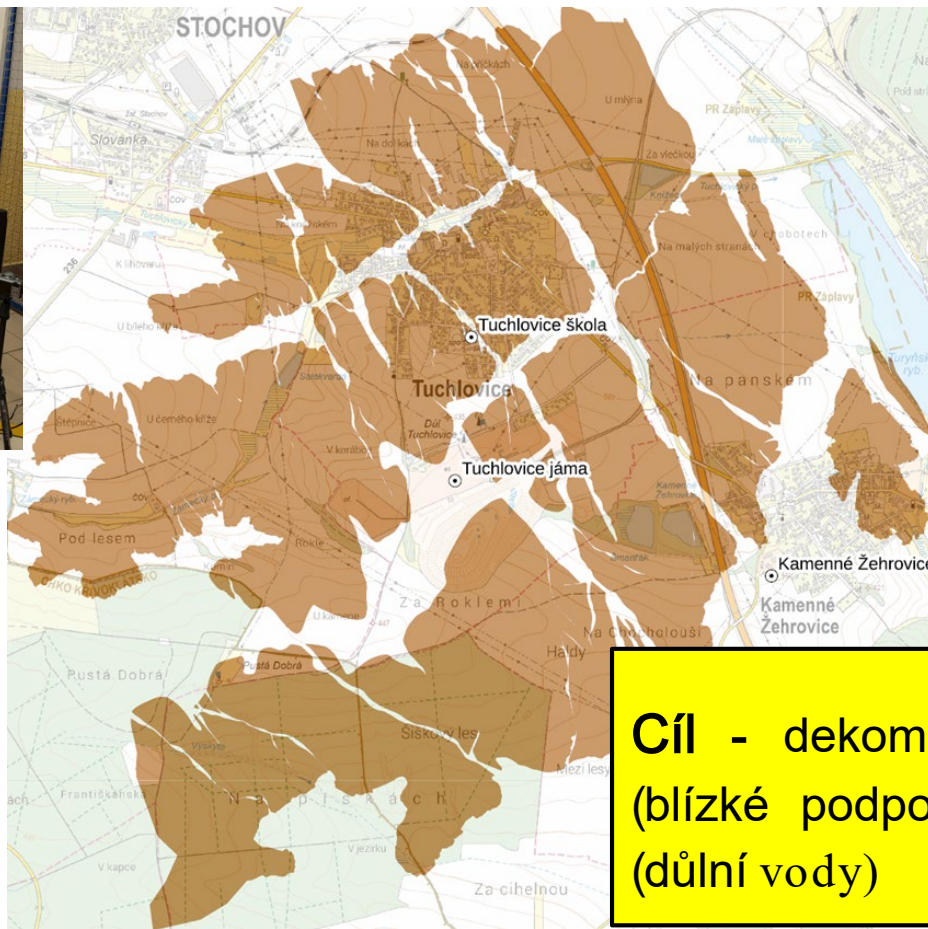
- Důlní vody (gravimetrie, vrty)
- Povrchové a podzemní vody

Absolutní tíhová měření v Kladenském revíru s FG5X-251/HS5

Škola



Jáma



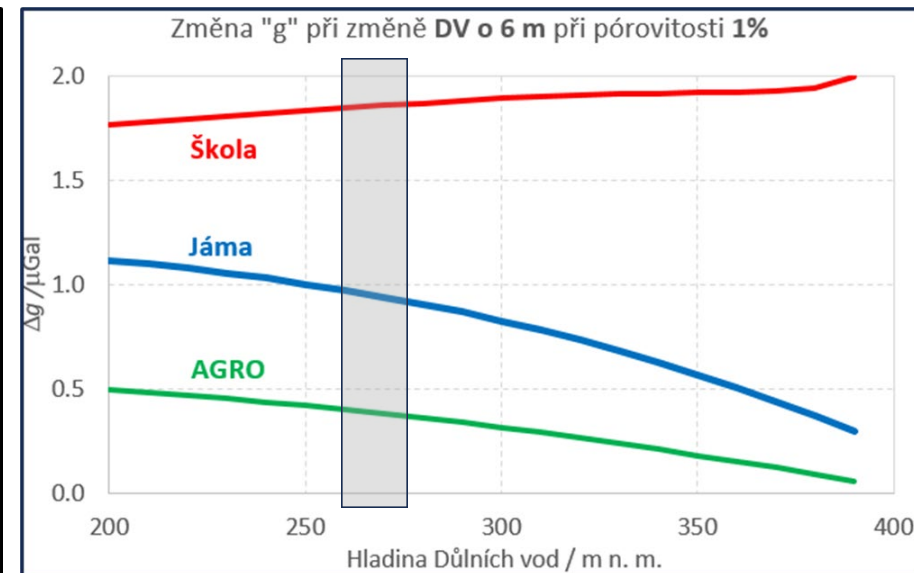
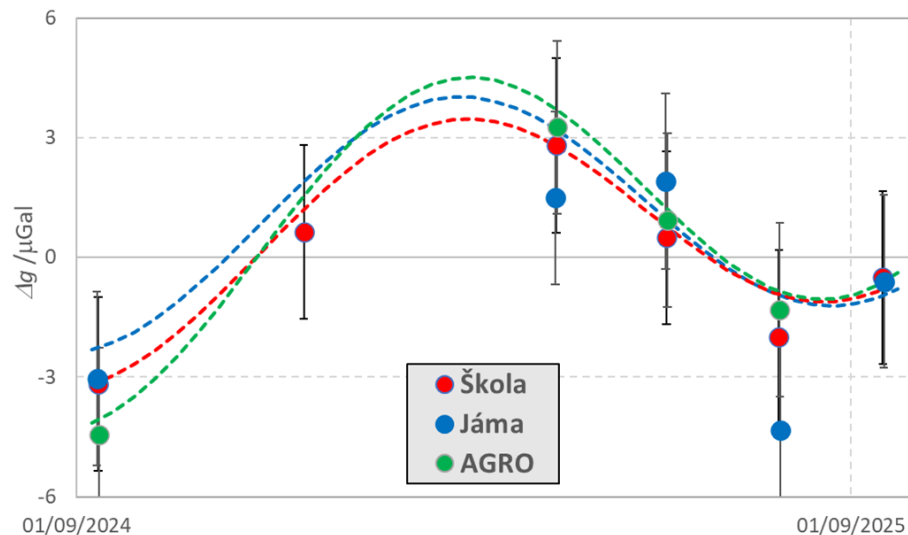
AGRO



Cíl - dekompozice sezónního signálu (blízké podzemní vody) a trendu (důlní vody)

Dosavadní série měření vs. simulace

+1 μGal $\approx$ -3 mm



Maximum "g"

konec února

Amplitudy změn

Jáma (2.9 ± 1.0) μGal

Škola (2.8 ± 0.9) μGal

AGRO (3.6 ± 1.2) μGal

Změřeno: Trend

Jáma (1.2 ± 1.9) $\mu\text{Gal/rok}$

Škola (2.2 ± 1.7) $\mu\text{Gal/rok}$

AGRO (3.3 ± 2.3) $\mu\text{Gal/rok}$

Při 1% pórovitosti bychom měli vidět Trend

Jáma ≈ 1.0 $\mu\text{Gal/rok}$

Škola ≈ 1.9 $\mu\text{Gal/rok}$

AGRO ≈ 0.4 $\mu\text{Gal/rok}$

Závěrečné poznámky

Gravimetrie pozemní (absolutní, relativní) a družicová pozorují totožné fenomény, ovšem s jinou citlivostí:

- **Pozemní:**
 - Citlivá i na blízké/ lokální změny hmot příp. nehomogenity
 - Pozorování vč. deformací (neznámá navíc, měřidlo mění svou výšku - vliv na “g”)
- **Družicová:**
 - Neposkytuje detaily, ovšem podchycuje velké oblasti - trendy, sezónní změny, silná/ rozsáhlá zemětřesení apod.

Kombinace pozemní a družicové gravimetrie:

- **Statické pole:** v praxi do cca 5 arc-min rozlišení (globální geoid, např. EGM2008), tíhová měření s prost. rozlišením do 1 km (regionální geoid)
- **Časově proměnné “g”:**
 - vědecký i aplikační potenciál, nové techniky měření a vyhodnocení
 - chybí “přesná technika” pro rozlišení 10-100 km k napojení pozemní a družicové gr.
 - nedostatek lokálních modelů (např. hydrologické) pro konzistentní přechod od pozemních pozorování ke globálním z družic

Děkujeme za pozornost!

