

# ***Měření tíhového zrychlení pomocí absolutních gravimetrů***

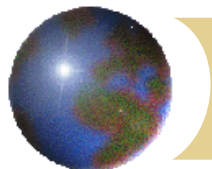
***Vojtech Pálinkáš***



***Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v. v. i.***

Ústecká 98, Zdiby

Pracoviště: Geodetická observatoř Pecný, Ondřejov

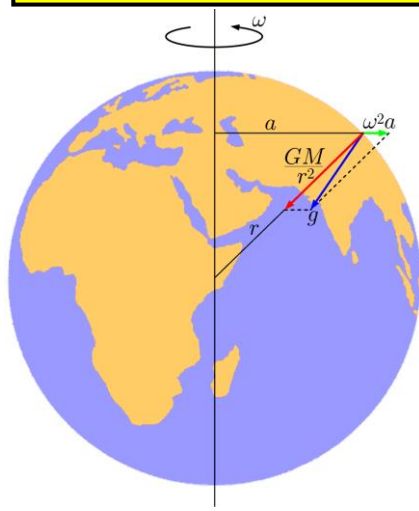


# Geodetická observatoř Pecný

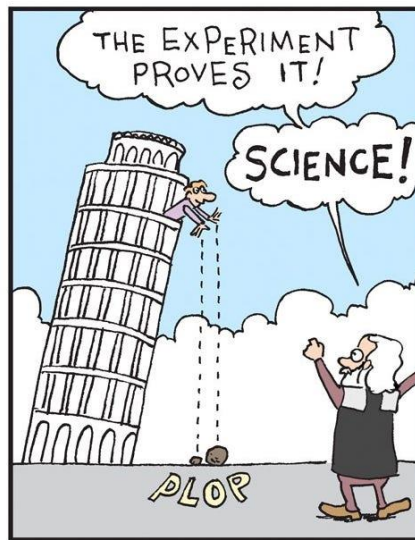
v Ondřejově (Praha-východ), založena v roce 1957 jako infrastruktura pro experimentální výzkum v geodézii v ČR

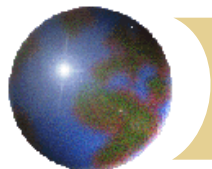
## AKTIVITY:

- Tíhové pole Země: teorie, geoid (tvar Země)
- GNSS – měření, analýzy, aplikace (meteorologie, doprava)
- DORIS analytické centrum (příspěvek k mezinárodnímu souřadnicovému systému)
- METROLOGIE, státní etalon tíhového zrychlení, kalibrační základna GNSS,



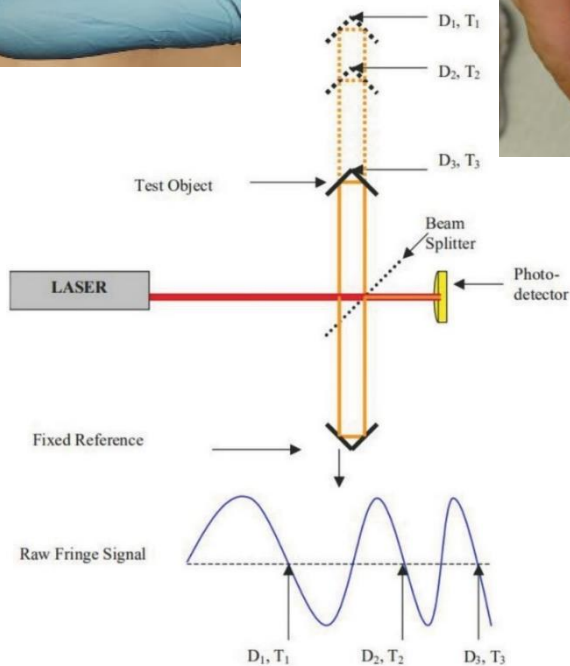
- GRAVIMETRIE - absolutní „g“, změny v důsledku slapů, pohybu pólu, redistribuce hmot





# Absolutní gravimetr

Princip: volný pád testovacího tělesa ve vakuu sledovaný laserovým interferometrem



$$D_i = D_0 + v_0 \tilde{T}_i + \frac{1}{2} g_0 \tilde{T}_i^2 + \frac{1}{6} \gamma v_0 T_i^3 + \frac{1}{24} \gamma g_0 \tilde{T}_i^4 + \sum_j a_j f_j(T, D)$$

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

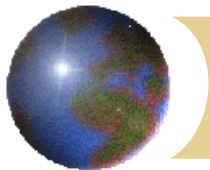
Improved standard uncertainty

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



Standardní nejistota

$2.2 \mu\text{Gal} = 2.2 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$



# Korekce a nejistoty

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

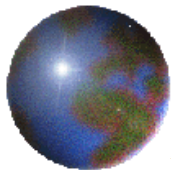
| / $\mu\text{Gal}$   | Instrumental corrections |
|---------------------|--------------------------|
| Self-attraction     | from -1.2 to -1.8        |
| Diffraction         | from +1.2 to +2.8        |
| Cable length        | from -0.2 to -1.2        |
| Impedance mismatch  | $\pm 1.4$                |
| Signal distortion   | from 0.0 to -4.0         |
| Rotation of pulleys | $\pm 0.6$                |
| Verticality         | from +0.0 to +1.5        |
| Eötvös/Coriolis     | $\pm 1.5$                |
| Air gap modulation  | $\pm 0.5$                |

The instrumental uncertainty of FG5X:

2.8  $\mu\text{Gal}$  for the original system

1.8  $\mu\text{Gal}$  for the improved system

VÚGTK has reached the best measurement capability in the world



# *Státní etalon tíhového zrychlení*

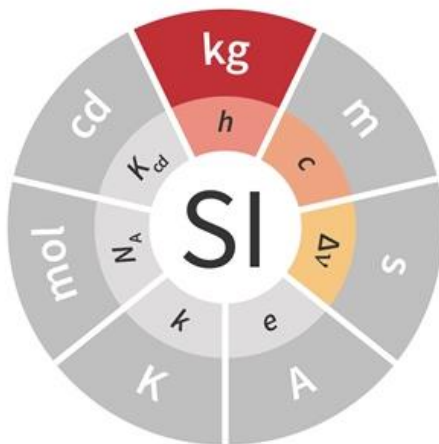
SI base unit: kilogram (kg)

Nová definice kilogramu

<https://www.bipm.org/en/si-base-units/kilogram>

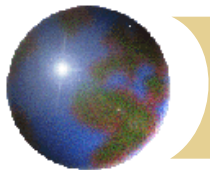
The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant  $h$  to be  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$  when expressed in the unit J s, which is equal to  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ , where the metre and the second are defined in terms of  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .

Bureau  
International des  
Poids et  
Mesures



$$h = \frac{m g v}{C_{\text{el}} f_1 f_2}$$





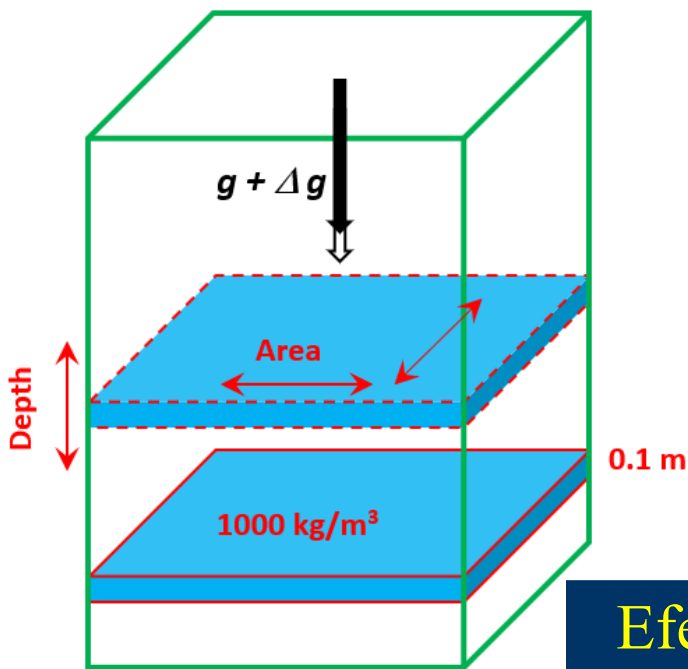
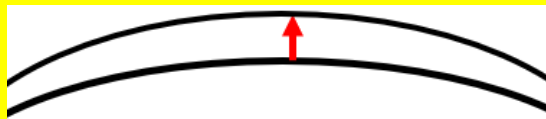
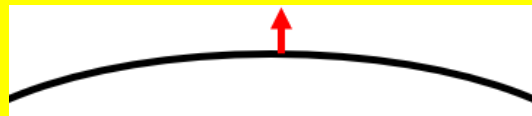
# *a few $\mu\text{Gal}$ ...*

$$1 \mu\text{Gal} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

**1.18  $\mu\text{Gal}$**  self-attraction effect – vertical component of gravitational attraction of the FG5X masses to the freely falling object

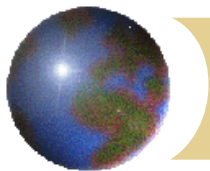
Free air gradient  $\delta g_F = -308,6 \mu\text{Gal}/\text{m}$  .... **1  $\mu\text{Gal} \approx 3.2 \text{ mm}$**

Bouguer gradient  $\delta g_B = -196,7 \mu\text{Gal}/\text{m}$  .... **1  $\mu\text{Gal} \approx 5.1 \text{ mm}$**



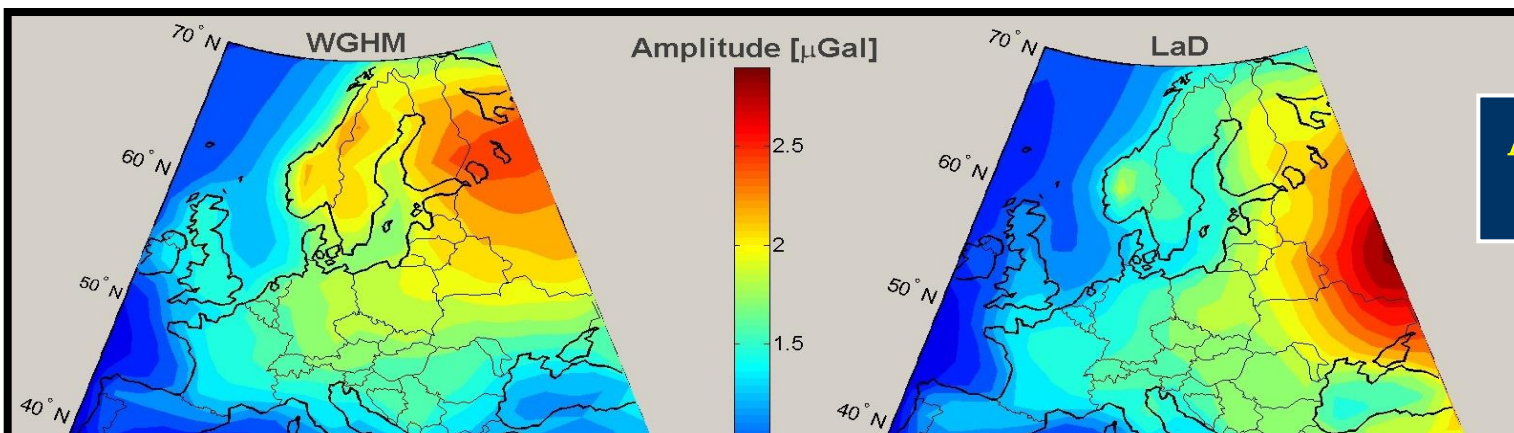
| $\Delta g / \mu\text{gal}$ | 100 x 100<br>m <sup>2</sup><br>1 kiloton | 500 x 500<br>m <sup>2</sup><br>25 kiloton | 1000 x 1000<br>m <sup>2</sup><br>100 kiloton |
|----------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>10 m</b>                | 3.45                                     | 4.04                                      | 4.12                                         |
| <b>100 m</b>               | 0.54                                     | 2.77                                      | 3.45                                         |
| <b>1000 m</b>              | 0.007                                    | 0.16                                      | 0.54                                         |

Efekty blízkých proměnlivých vodních hmot by měly být měřitelné, potřebná citlivost  **$\approx 1 \mu\text{Gal}$**



# *Vliv redistribuce kontinentálních vodních zásob*

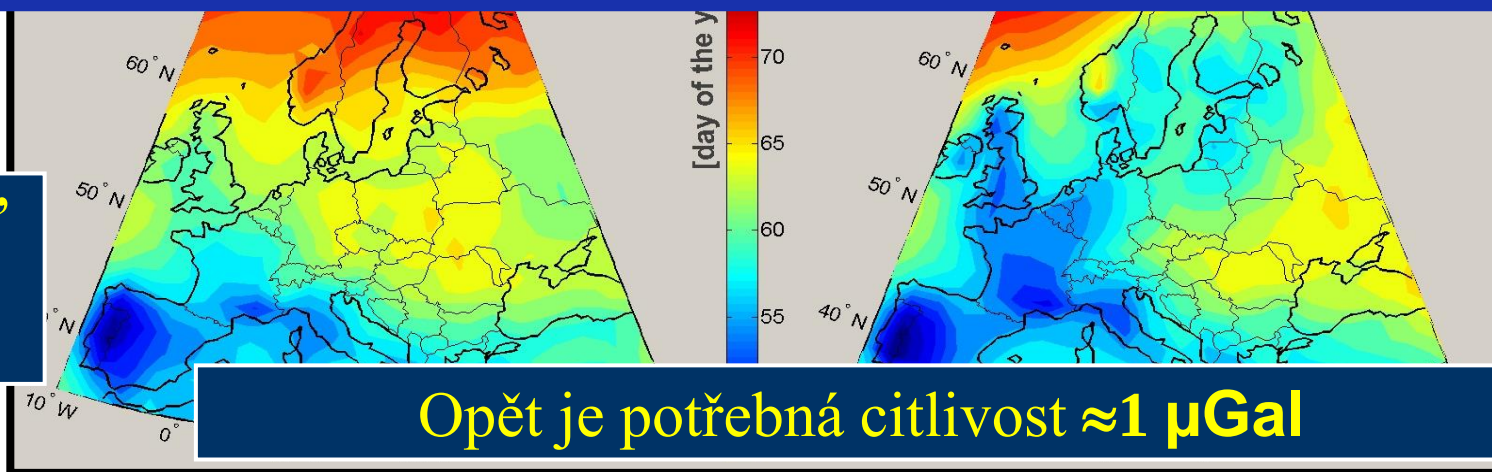
Vyjádřena harmonickou funkcí s ROČNÍ periodou



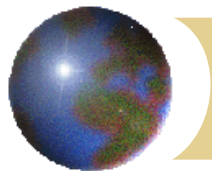
**Amplitudes up to 3  $\mu$ Gal**

Pokud bude gravimetr schopen měřit s přesností 1-2  $\mu$ Gal mělo by být možné sledovat „neinvazivně“ zajímavé geodynamické jevy (lokální/globální) – doplňující informace ke GNSS, InSAR...

**Maximum "g"  
in February,  
March**



**Opět je potřebná citlivost  $\approx 1 \mu$ Gal**



# *Komerční absolutní gravimetry*

**A-10 (USA),** <https://microglacoste.com/>

- $-18^{\circ}\text{C}$  to  $+38^{\circ}\text{C}$
- $10\ \mu\text{Gal}$  /  $2\text{--}5\ \mu\text{Gal}$
- 500 tis. USD

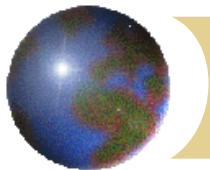
**FG5X (USA),** <https://microglacoste.com>

- $14^{\circ}\text{C}$  to  $+34^{\circ}\text{C}$
- $2\text{--}4\ \mu\text{Gal}$  /  $1\text{--}2\ \mu\text{Gal}$
- 500 tis. USD

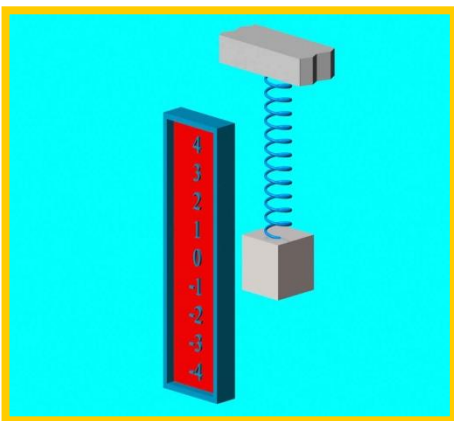
**$\mu$ Quans (France),** <https://www.muquans.com/>

- $10^{\circ}\text{C}$  to  $+30^{\circ}\text{C}$
- $10\ \mu\text{Gal}$  /  $2\text{--}5\ \mu\text{Gal}$
- 600 tis. EUR





# Relativní gravimetry



## Proč absolutně a ne relativně?

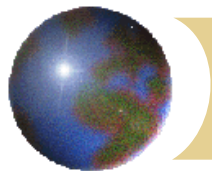
### Levnější, rychlejší, obdobně přesné (do cca 10 km)

- Pouze rozdíly  $g$
- Jde nám ale primárně o změny, nebo ne?
- Bez jednoznačně stanovené reference (absolutními gravimetry) jsou změny irelevantní/nepřesné
- Ideální pro zhuštění na malém území



Velkou výhodou absolutních gravimetrů je prostý fakt, že jsou vlastně realizací jednotky zrychlení (v rozsahu  $g$ ) a to přes kalibrované standardy času a délky.

Absolutní gravimetry VÚGTK byly proto vyhlášeny státními etalony tíhového zrychlení.

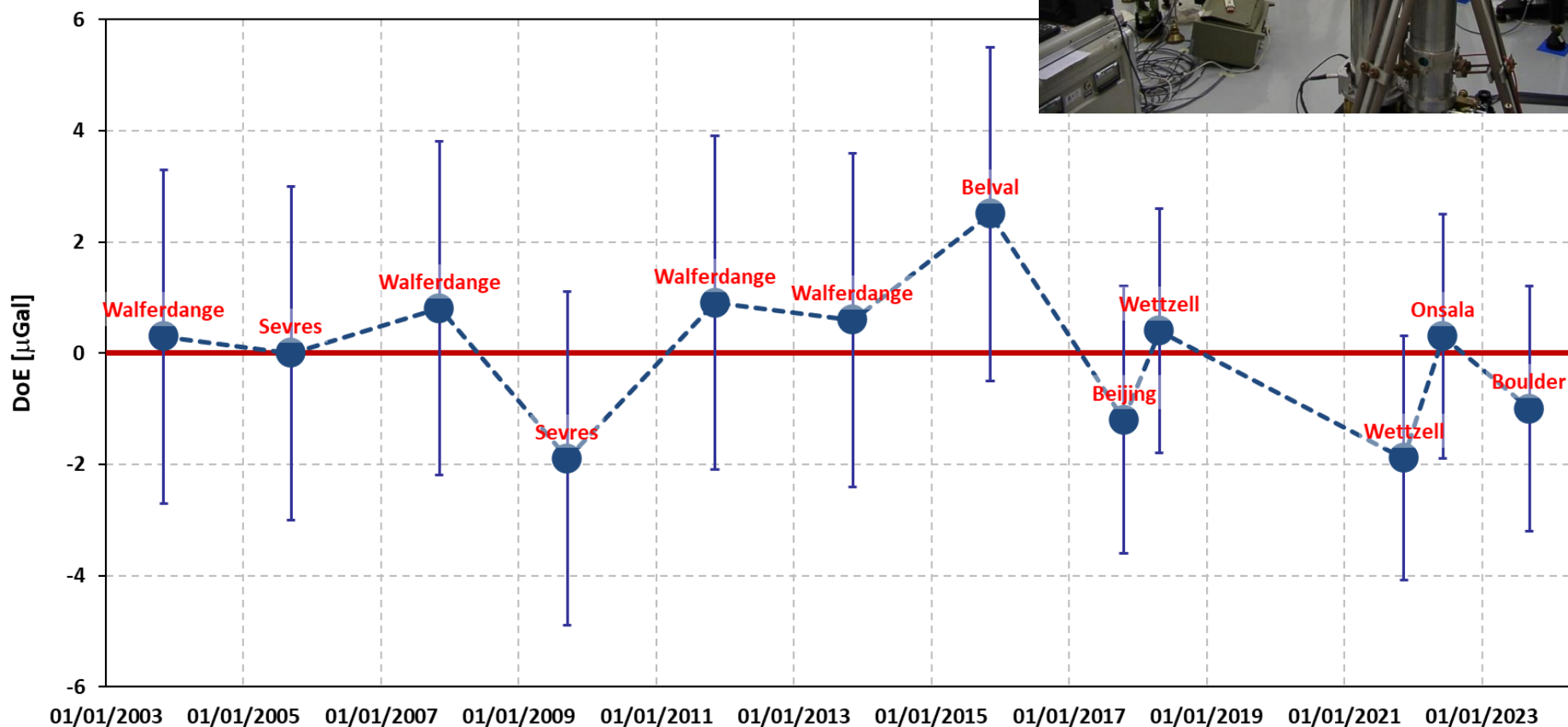


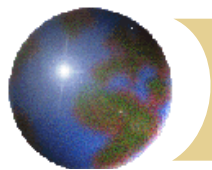
# Porovnávací měření

Potvrzení deklarované schopnosti měření

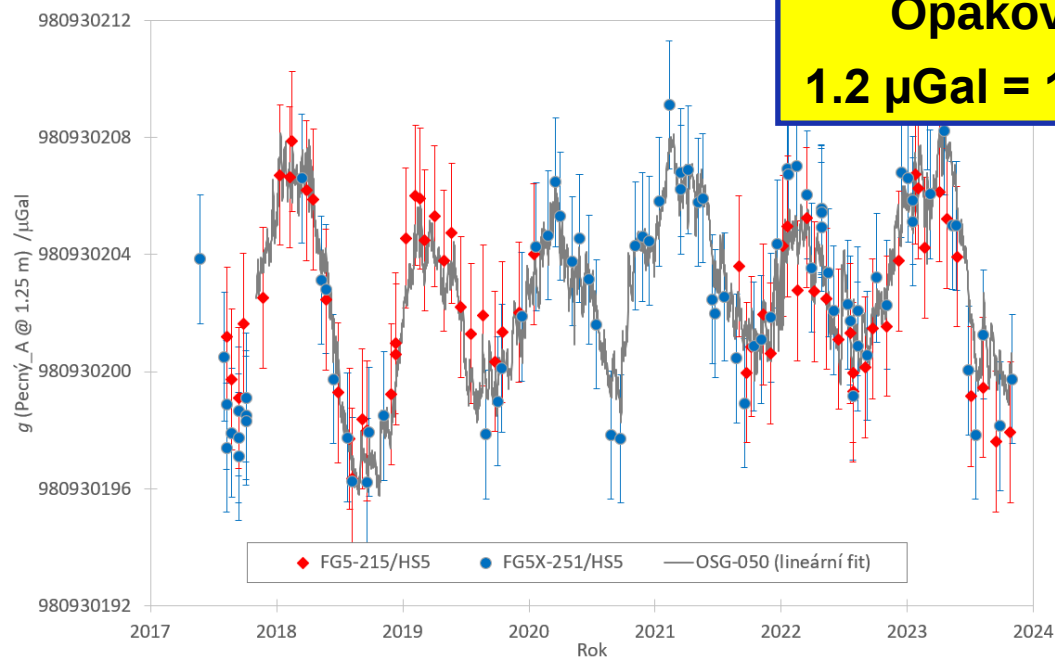
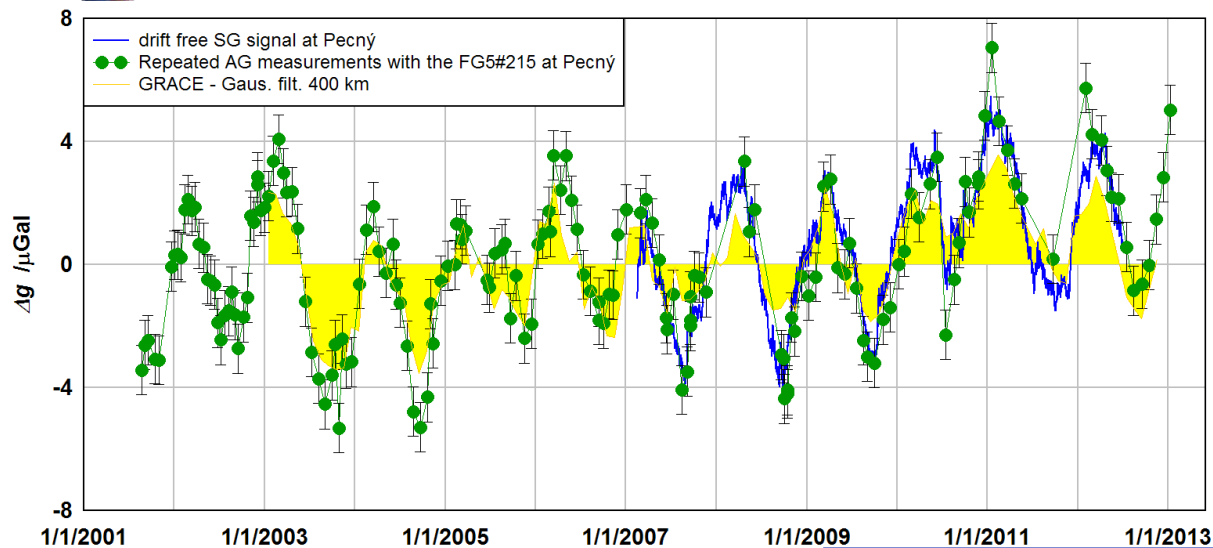
Gravimetry VÚGTK se zúčastnily 12 porovnání

Comparisons

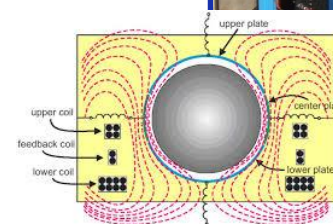


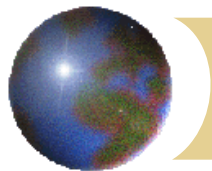


# Referenční bod Pecný

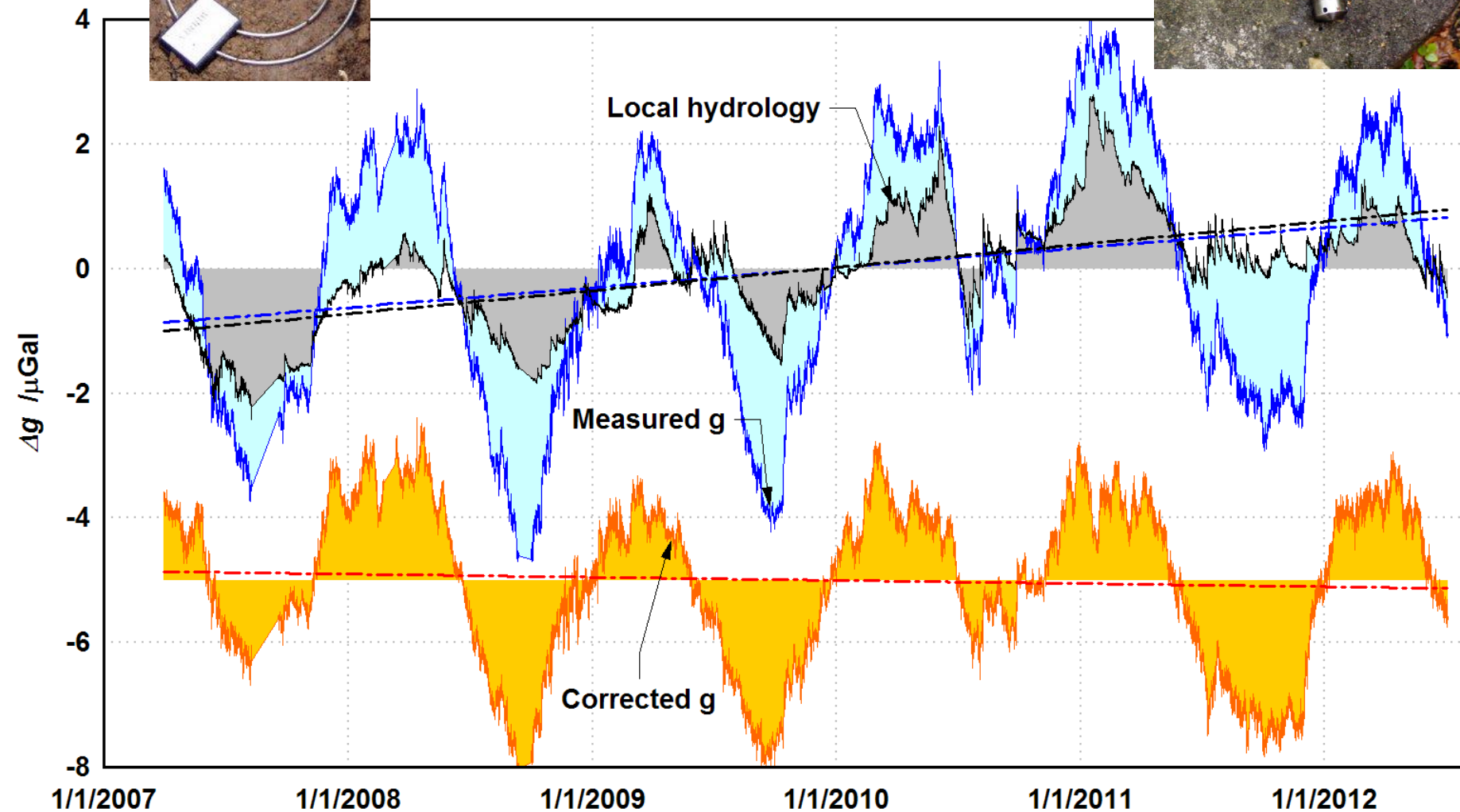


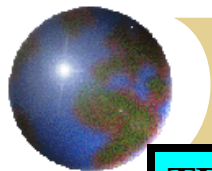
**Opakovatelnost**  
 **$1.2 \mu\text{Gal} = 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$**





# *Lokální vs. globální hydr. signál*





# Porovnání s WGHM a GRACE

## TREND:

GRACE:  $0.43 \pm 0.09 \mu\text{Gal/year}$

PE :  $0.39 \pm 0.17 \mu\text{Gal/year}$

WGHM :  $0.12 \pm 0.11 \mu\text{Gal/year}$

PE\_cor :  $-0.04 \pm 0.12 \mu\text{Gal/year}$

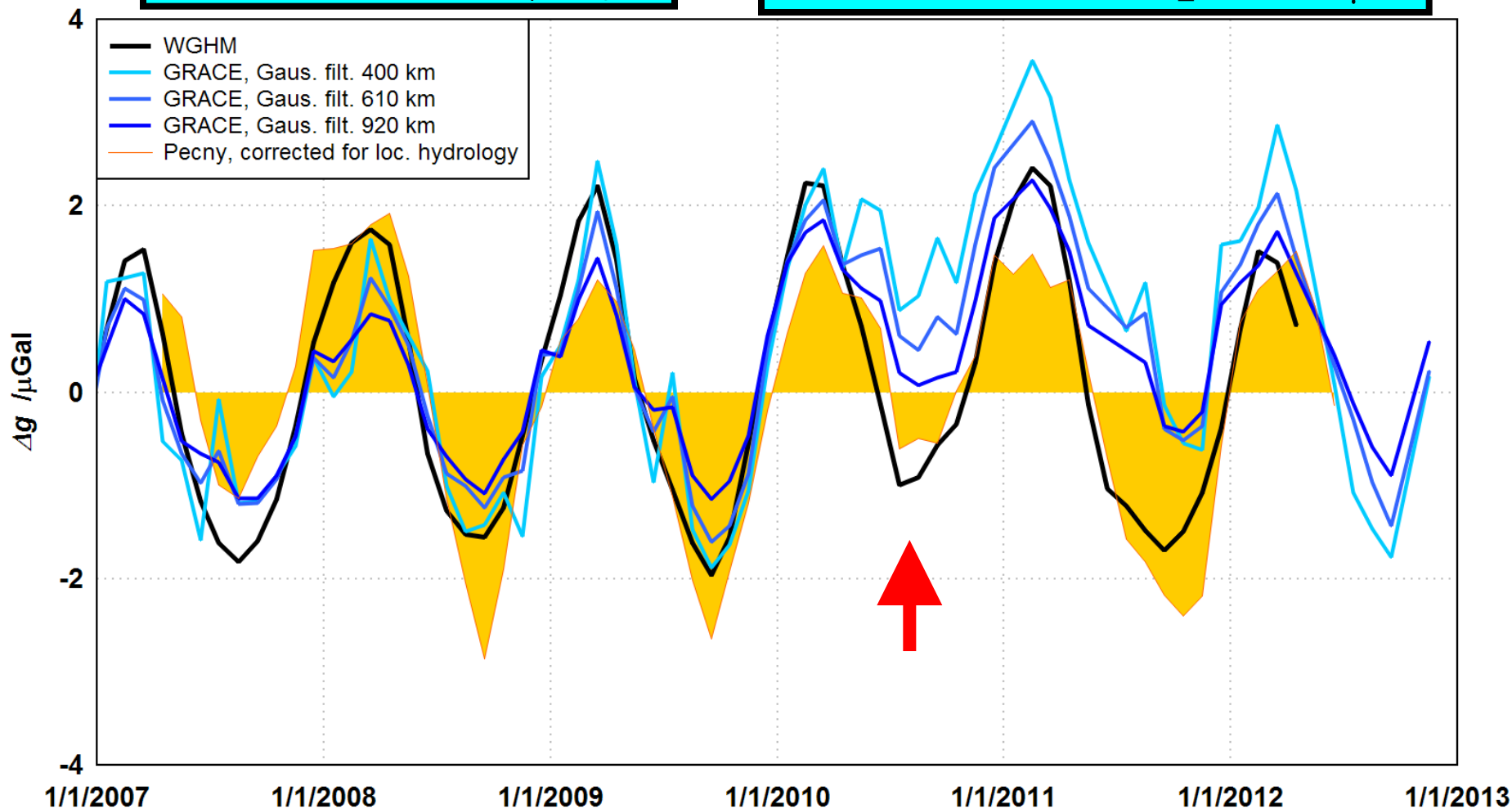
## AGREEMENT (std of differences):

PE\_cor vs. WGHM:  $\pm 0.63 \mu\text{Gal}$

PE\_cor vs. GRACE\_920 :  $\pm 0.87 \mu\text{Gal}$

PE\_cor vs. GRACE\_400 :  $\pm 1.11 \mu\text{Gal}$

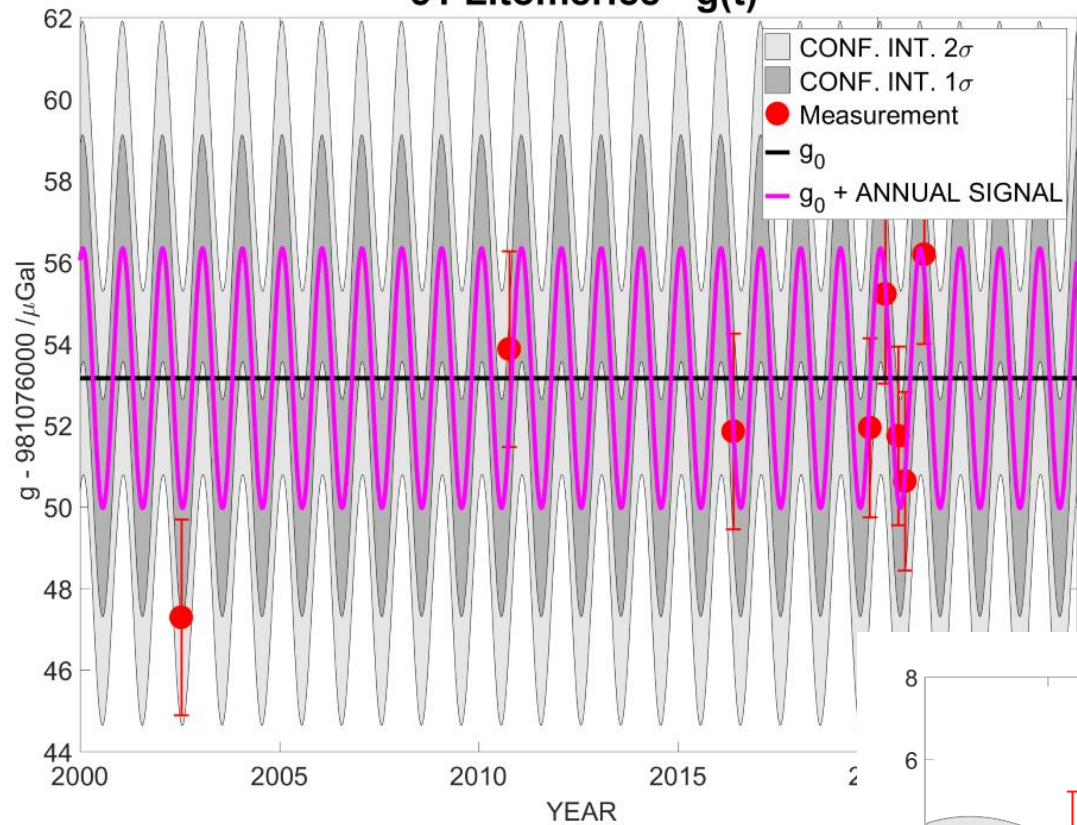
WGHM vs. GRACE\_400 :  $\pm 1.32 \mu\text{Gal}$



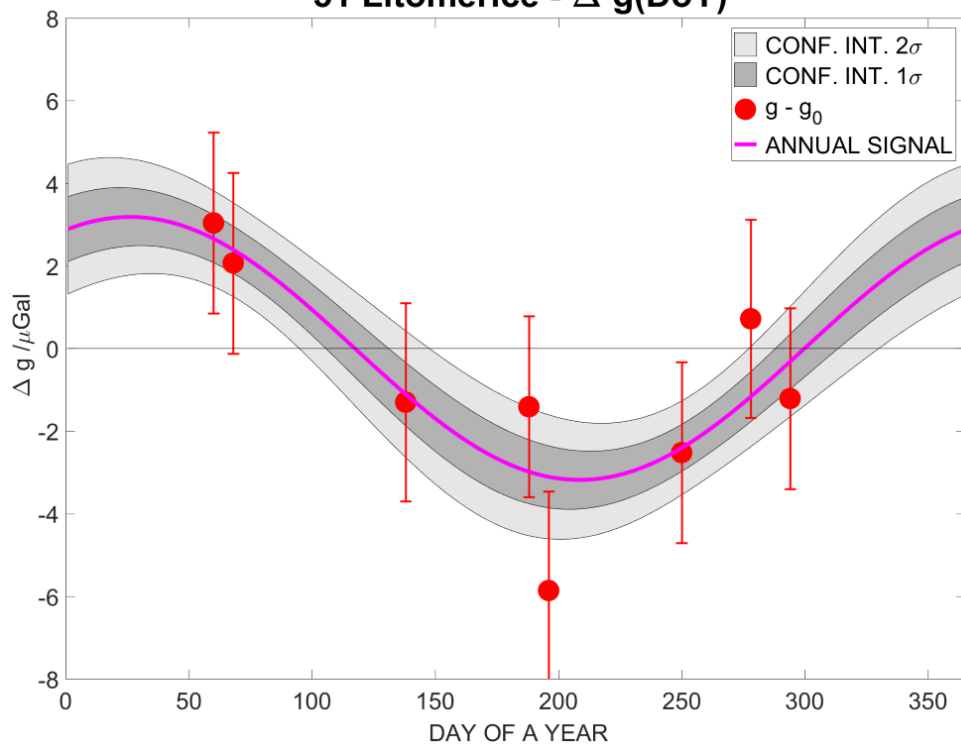
# *20 základních absolutních bodů v ČR*



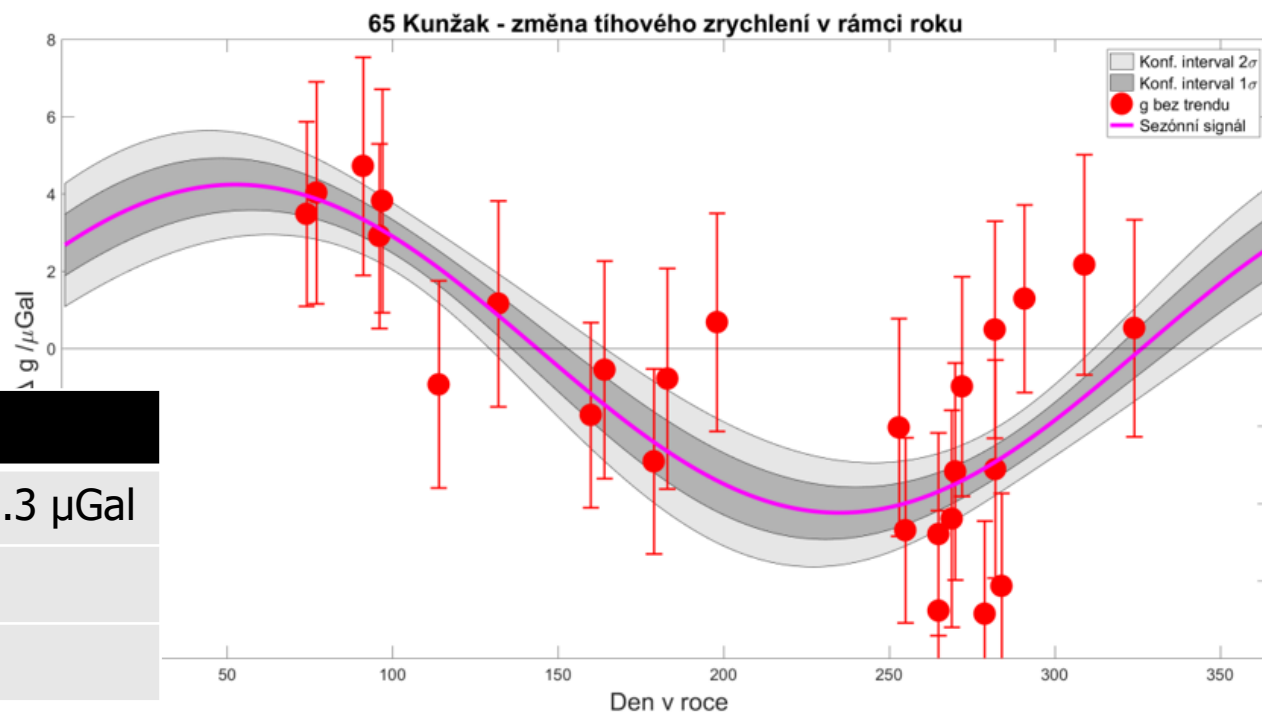
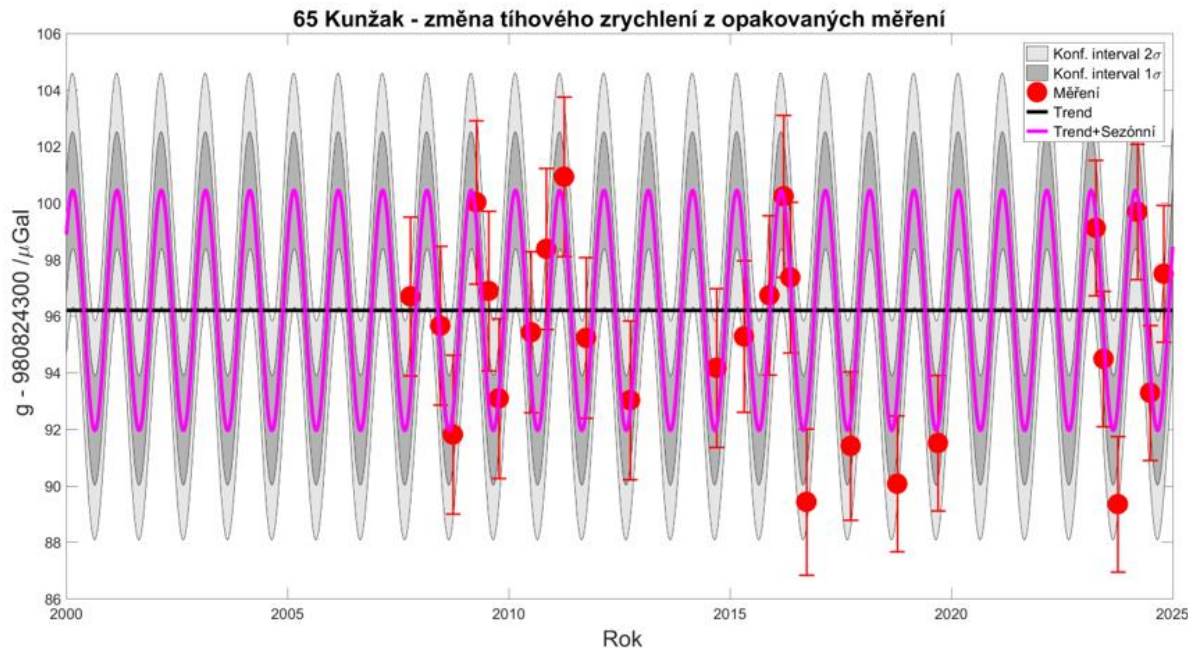
# 51 Litoměřice - g(t)



## 51 Litoměřice - $\Delta g(\text{DoY})$

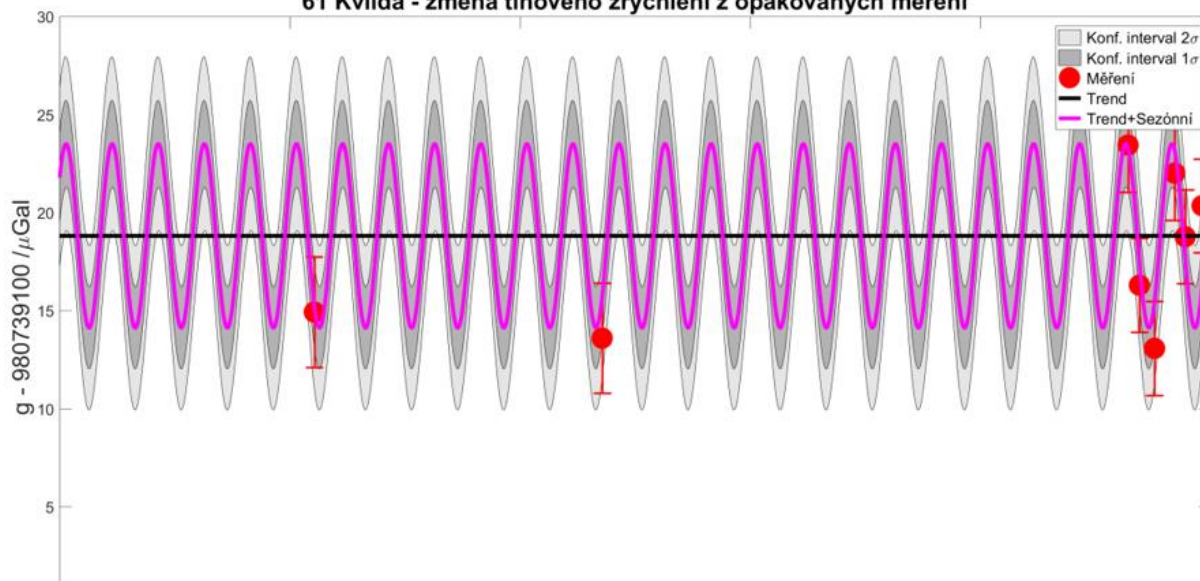


| Station   | 51 Litoměřice                                |
|-----------|----------------------------------------------|
| $g_0$     | $981076053.2 \pm 2.3 \text{ } \mu\text{Gal}$ |
| Amplitude | $3.2 \pm 0.8 \text{ } \mu\text{Gal}$         |
| Max $g$   | $26 \pm 9 \text{ DoY}$                       |

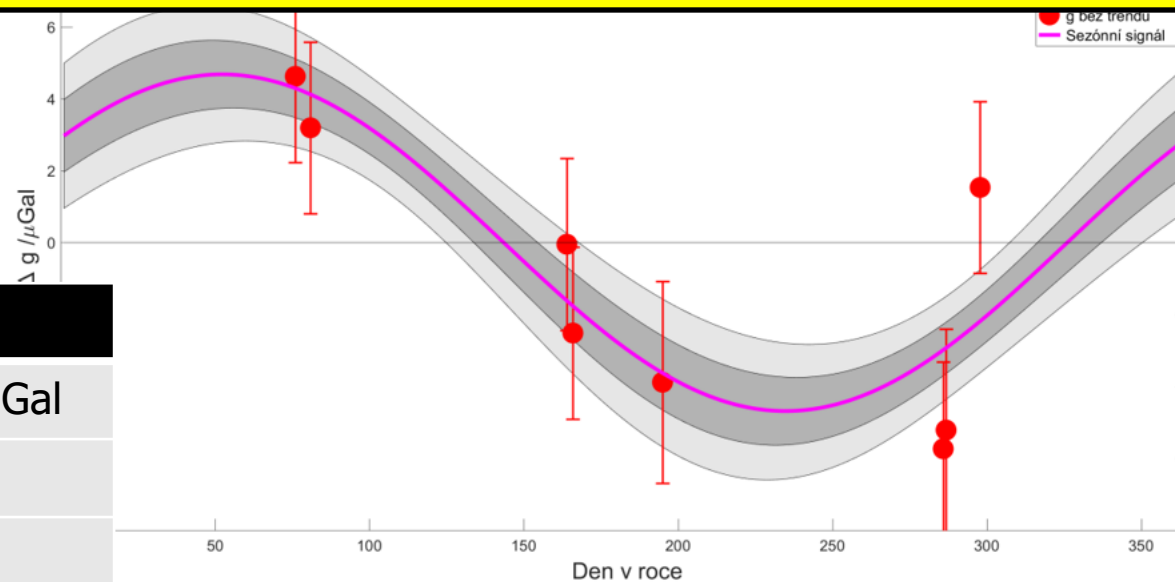


| Station   | 65 Kunžak                                    |
|-----------|----------------------------------------------|
| $g_0$     | $980824396.2 \pm 2.3 \text{ } \mu\text{Gal}$ |
| Amplitude | $4.2 \pm 0.7 \text{ } \mu\text{Gal}$         |
| Max $g$   | $53 \pm 8 \text{ DoY}$                       |

61 Kvilda - změna tíhového zrychlení z opakovaných měření



**Gravimetry FG5/X jsou schopny zachytit sezónní signály s velmi vysokou přesností**



**Station**

**61 Kvilda**

$g_0$  980739118.8  $\pm$  2.3  $\mu$ Gal

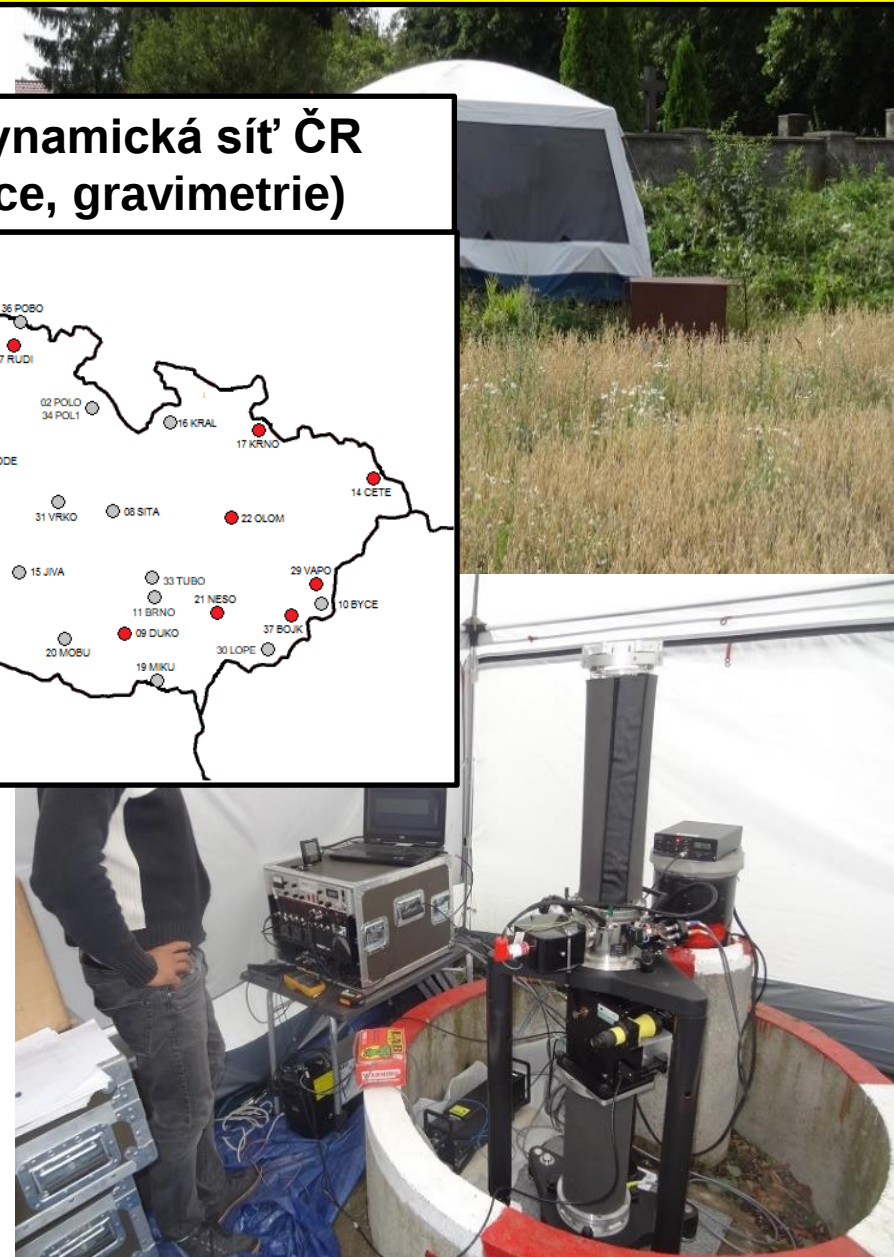
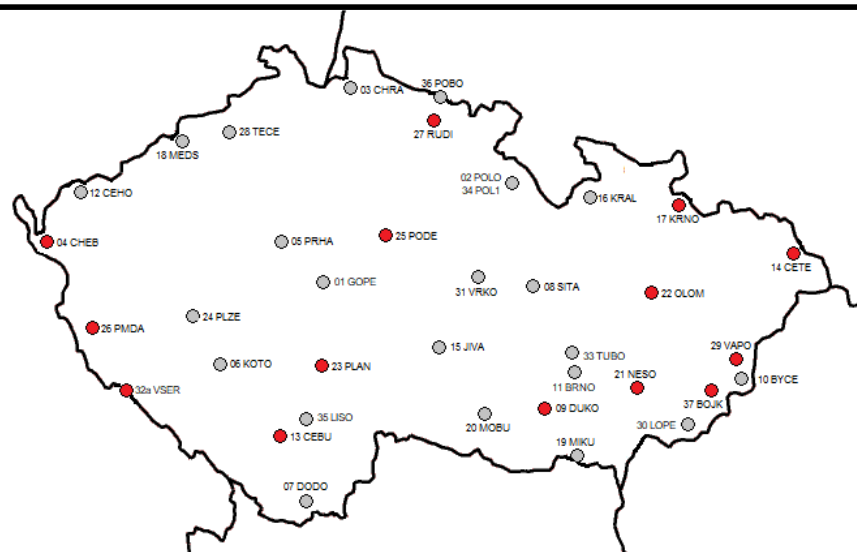
Amplitude 3.2  $\pm$  0.8  $\mu$ Gal

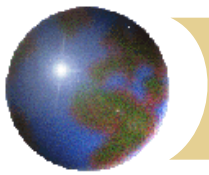
Max  $g$  52  $\pm$  9 DoY

# Měření v polních podmínkách, pilíř 0.6 x 0.6 x 0.8 m<sup>3</sup>

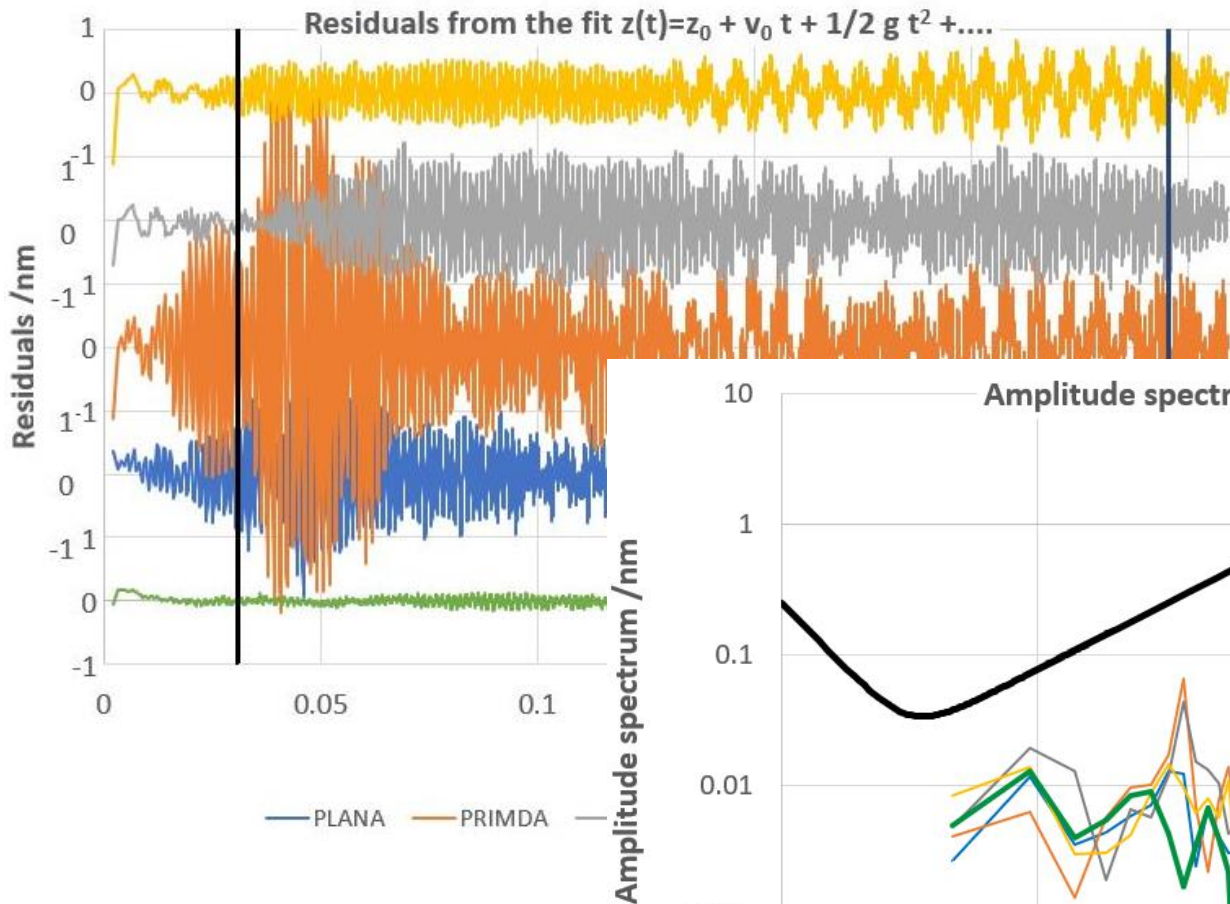
Šum, otřesy - vítr, doprava

## Základní geodynamická síť ČR (GNSS, nivelace, gravimetrie)

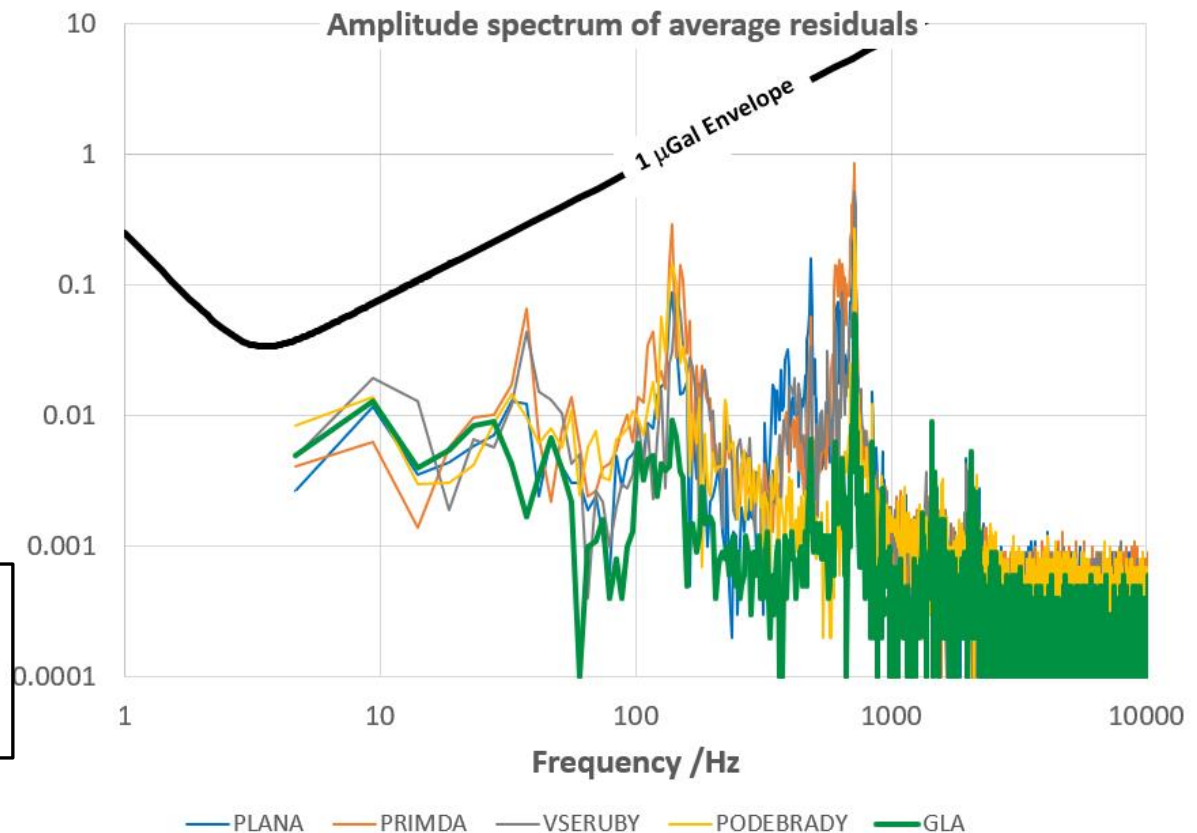




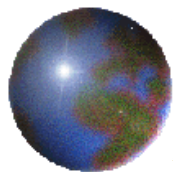
# Šum na vnějších bodech



Significantly higher noise could be seen in residuals



However, mainly on higher frequencies – not affecting „g“ uncertainties significantly

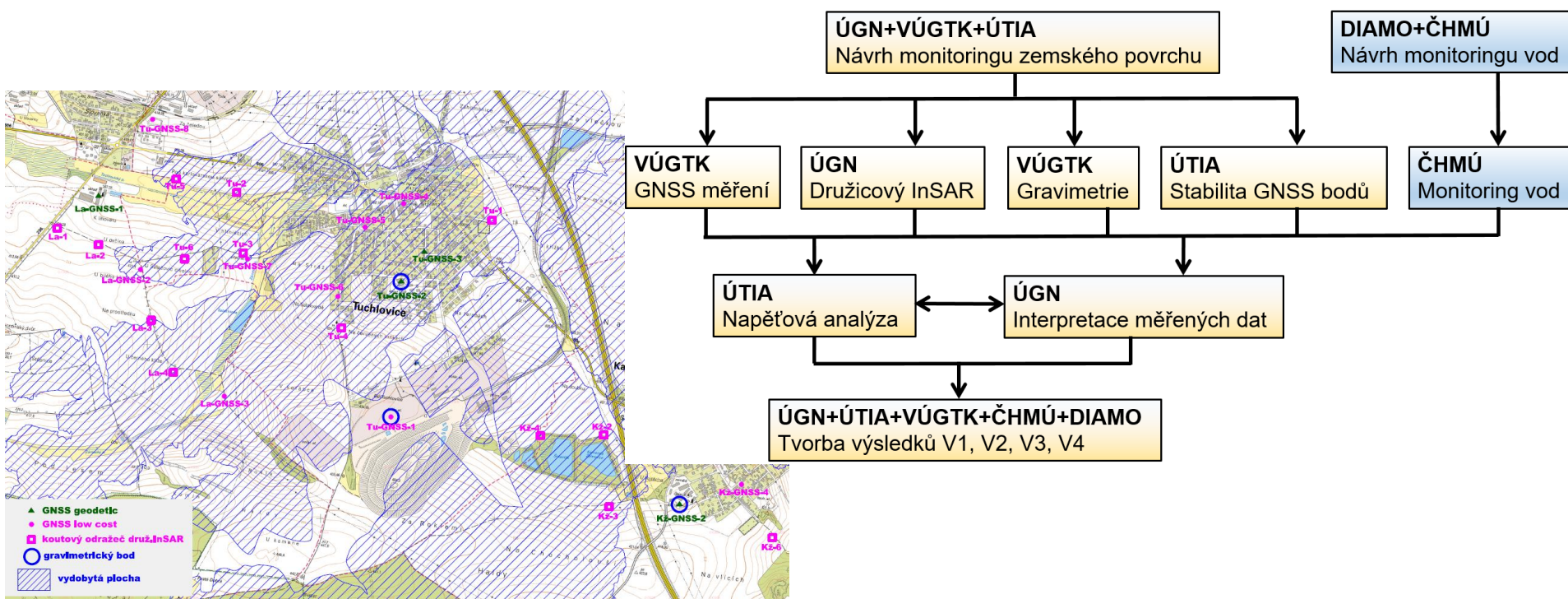


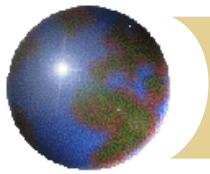
TAČR

# Digitalizace Automatizace Monitoring

Kód projektu: SS07020036

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



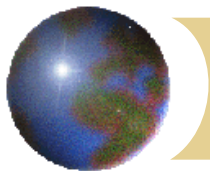


# Závěr

Pozemní gravimetrie je neinvazivní metoda, která má schopnosti zachytit jemné signály související s geodynamickými jevy a redistribucí vodních zásob.

K poskytnutí neodchýlených odhadů musí být měření navázána na absolutní měření zapojená do systému mezinárodních porovnávacích měření a referenčních stanic.





# *Děkuji za pozornost!*

## *Více informací „na Pecném“...*



*"Curse Con Edison! Another brownout!"*

**One effect of gravity** (© The New Yorker Collection 1973  
Lee Lorenz from cartoonbank.com. All Rights Reserved.



**Rozvoj gravimetrie ve VÚGTK by nebyl možný bez řady projektů MŠMT,  
GAČR, TAČR a podpory ČÚZK a ÚNMZ**