

Monitorování synergických vlivů zatápění uzavřených dolů kladenského revíru pomocí GNSS a gravimetrie

Pavel Václavovic, Jan Douša, Vojtěch Pálinkáš, Matyáš Pokorný

Geodetická observatoř Pecný

Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický



DRUŽICOVÉ METODY V TEORII A PRAXI

Brno, 5. 2. 2026

Představení projektu

- **Název:** Digitální automatizovaný monitoring synergických vlivů zatápění uzavřených dolů kladenského revíru k řízení rizik následků hornické činnosti a dalšímu rozvoji území
- Projekt podpořen Technologickou agenturou ČR (2024-2026)
- **Záměr:** sledování povrchových změn v důsledku samovolného zatápění vydobytého prostoru po ukončení hlubinné těžby v roce 2002
 - Ochrana životního prostředí (přetoky důlních vod, ...)
 - Rozvoj regionu a územního plánování (vliv povrchových deformací na stavby)
- **Testovací lokalita:** Lány, Tuchlovice, Kamenné Žehrovice

Představení projektu

- **Cíle:** návrh, implementace a ověření monitorovacího systému s využitím synergie moderních observačních technik
 - Globálních navigačních družicových systémů (GNSS)
 - Gravimetrie
 - Pozemní radarová interferometrie (GB-RAR)
 - InSAR
- **Řešitelé**
 - Státní podnik DIAMO (hlavní řešitel)
 - Ústav geoniky AV ČR (InSAR, modelování)
 - Ústav teorie informace a automatizace AV ČR (GB-RAR, napěťová analýza)
 - Český hydrometeorologický ústav (hydrologie, hydrogeologie)
 - Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický (GNSS, gravimetrie)

Sběr GNSS observací

- Navržena síť 14 permanentních GNSS stanic
 - 4 přesné geodetické GNSS přijímače Septentrio PolaRx5 (anténa SEPVC6100L SCIS)
 - 10 nízkorozpočtové (low-cost) přijímače Septentrio Mozaic-X5 (anténa SFESPK6618H)
 - Požadavky na stanice
 - Vhodné observační podmínky
 - Umístění vůči poddolovaným oblastem a navazujícím technikám
 - Bezpečnost
 - Dostupnost elektrické energie
 - Připojení na internet

- Přenos dat

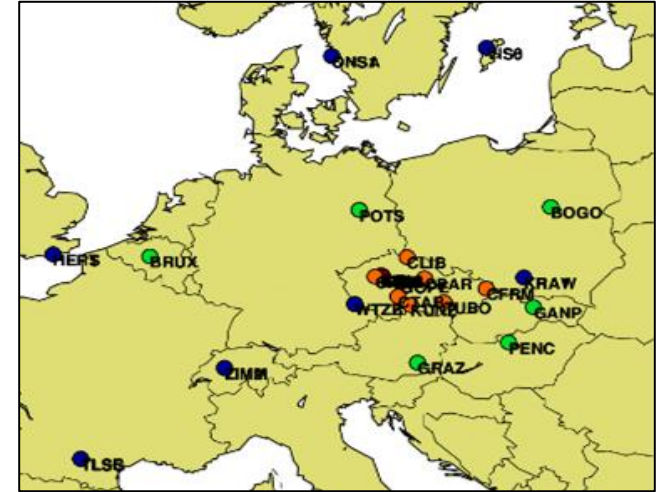


- Záloha na SD kartách přijímačů



Varianty strategie zpracování

- Dvojitě diferencované síťové řešení
 - Bernese software
 - Referenční rámec je dán jednou či více referenčními stanicemi
=> Začlenění evropských a národních permanentních stanic
- Nediferencované autonomní řešení PPP
 - Bernese software / G-Nut software
 - Referenční rámec definován dráhami družic
 - Ověření vliv přesných drah družic a korekcí hodin – CODE, IGS
 - CODE produkty jsou více konzistentní a umožňují celočíselné řešení ambiguit
 - Ambiguity fix (Bernese), float (G-Nut)
 - Evropské a národní permanentní stanice začleněny pro ověření řešení



[Obrázek 4.](#) Mapa zpracovaných stanic Evropských (modře/zeleně), národních (oranžově) a DiAMo. (červeně).

Výsledky zpracování

- Deformace povrchu je pomalá a dlouhodobá
=> denní / měsíční rozlišení určených souřadnic
- Denní řešení
 - Bernese software určuje jedny denní souřadnice
 - G-Nut určuje souřadnice každou epochu pomocí Kalmanova filtru => denní souřadnice reprezentuje medián
- Měsíční řešení
 - Spojené denní souřadnice pomocí střední hodnoty
 - Později bude implementováno spojení na základě normálních rovnic
- Testovací období: duben – prosinec 2025
- Porovnány dvě stanice TU02 (geodetický přijímač) a TU03 (low-cost přijímač)

Výsledky zpracování

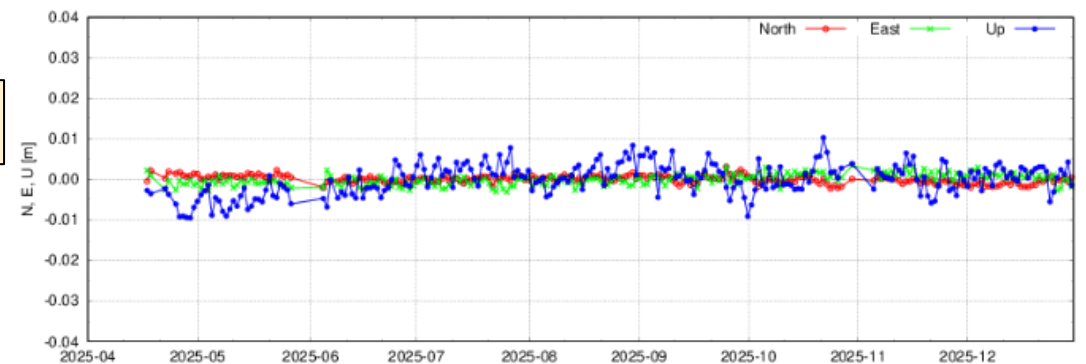
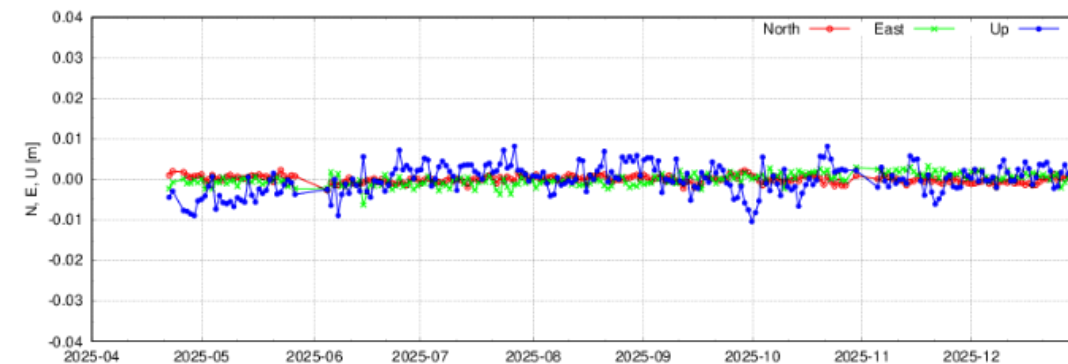
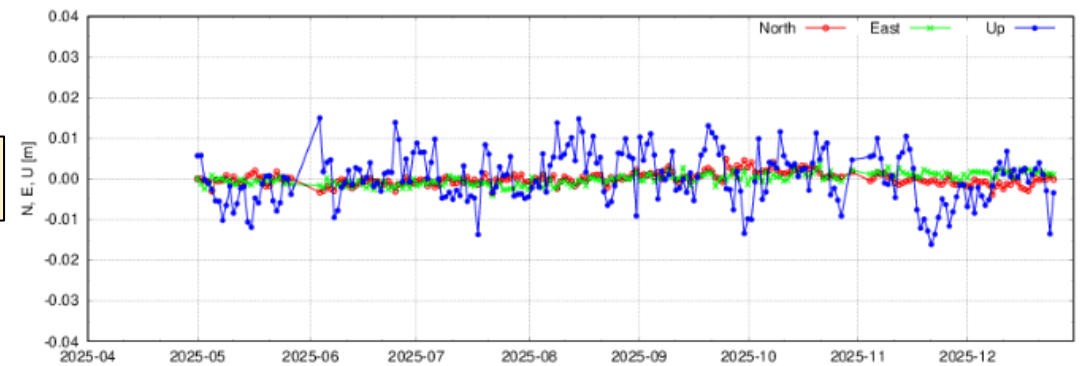
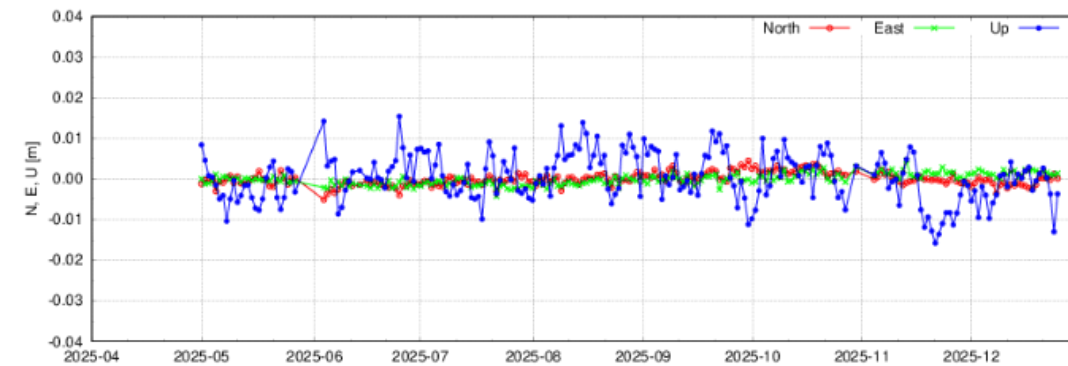
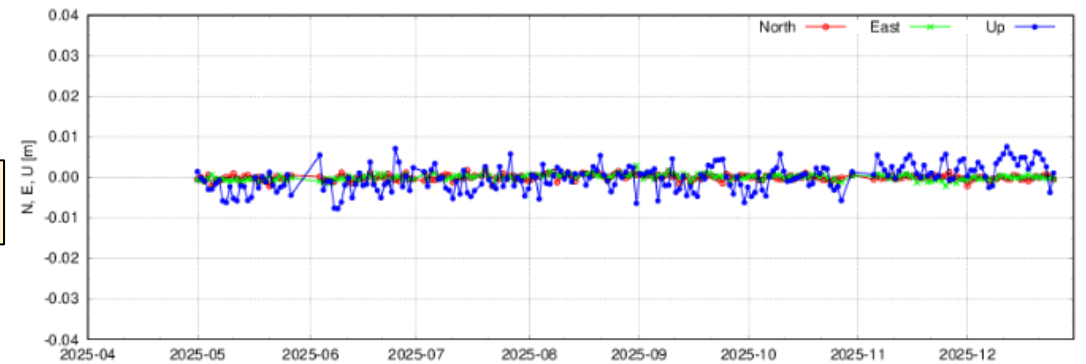
TU02 (geodetický přijímač)

TU03 (low-cost přijímač)

Bernese DD

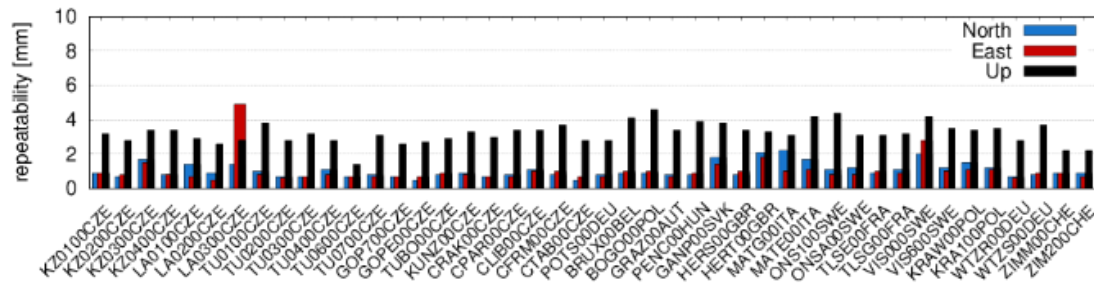
Bernese PPP

G-Nut PPP

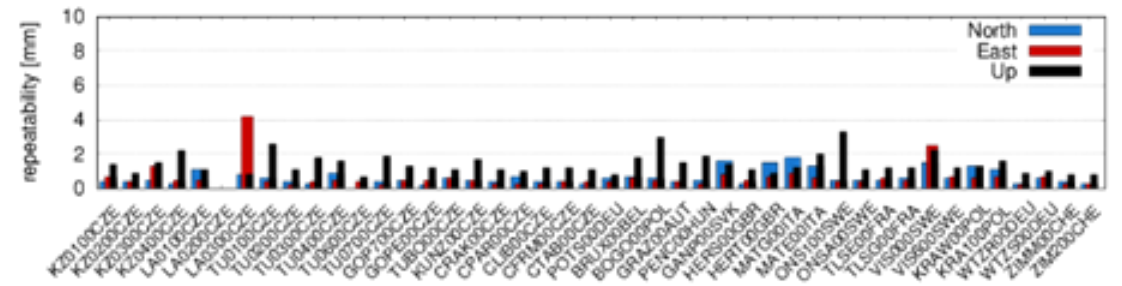


Výsledky zpracování

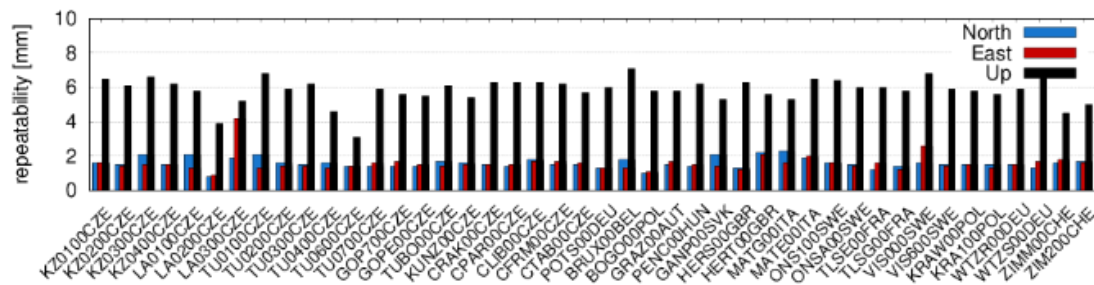
Bernese NET / IF / fixed / CODR3 - position statistics



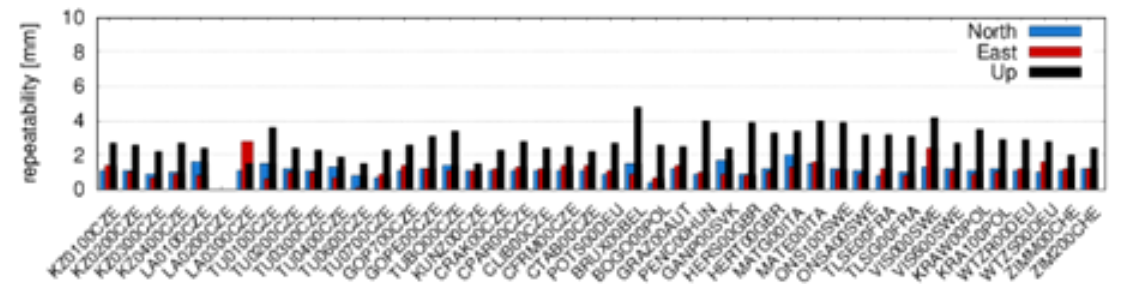
Bernese NET / IF / fixed / CODR3 - position statistics



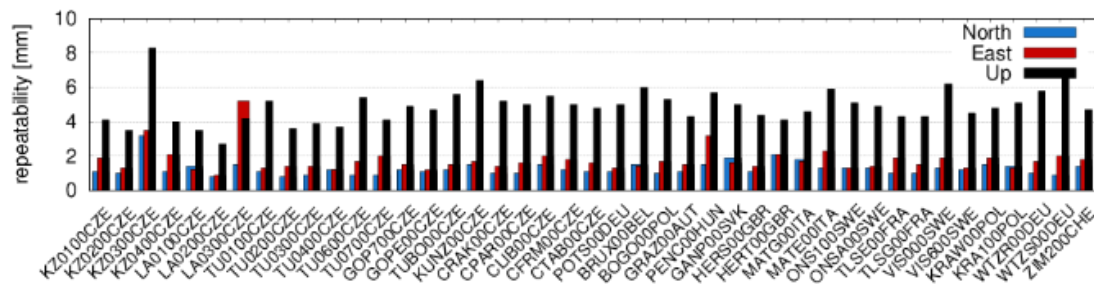
Bernese PPP / IF / fixed / CODR3 - position statistics



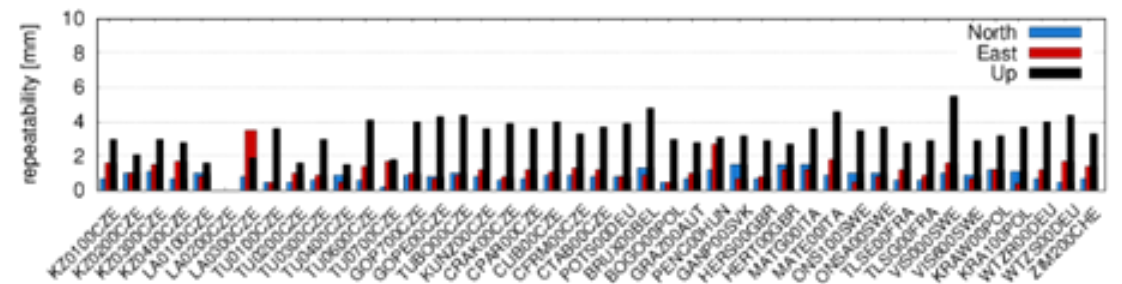
Bernese PPP / IF / fixed / CODR3 - position statistics



G-Nut PPP / IF / float / CODR3 - position statistics



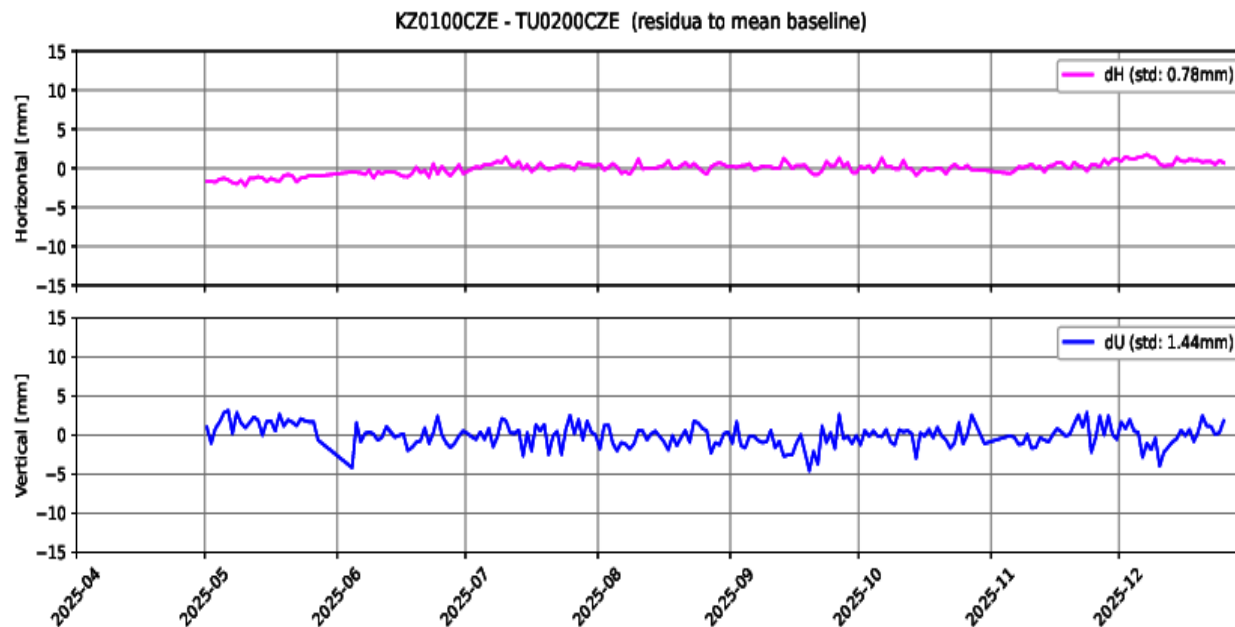
G-Nut PPP / IF / float / CODR3 - position statistics



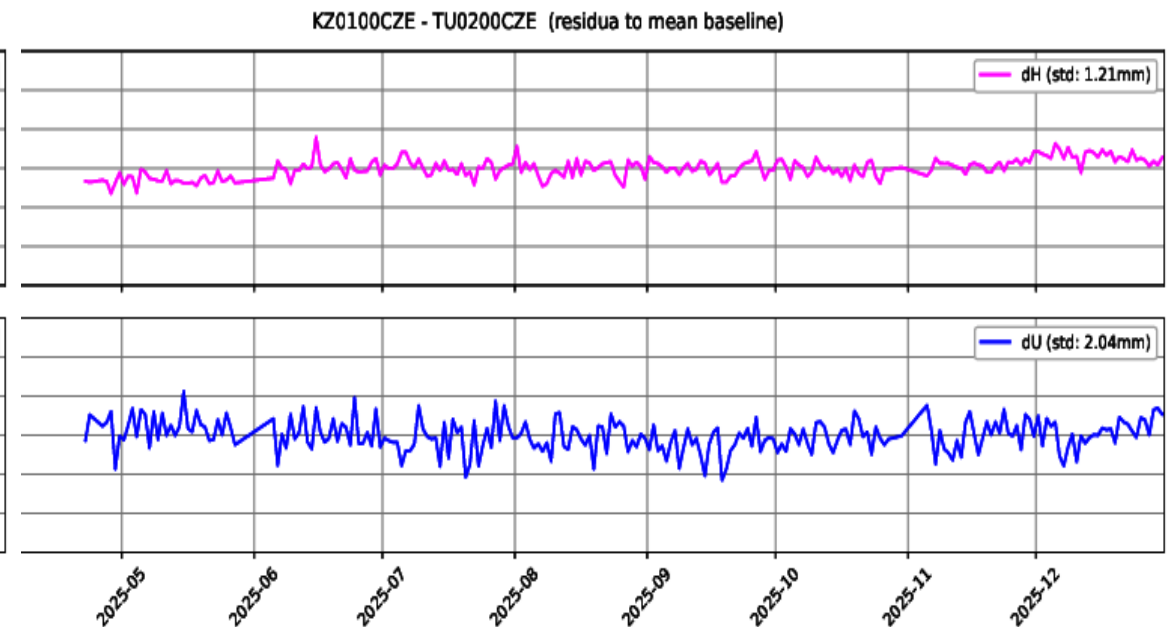
Výsledky zpracování

- Pro PPP je patrná korelace reziduí mezi blízkými stanicemi
 - Vliv globálních produktů
- Základna KZ01-TU02:

Bernese DD

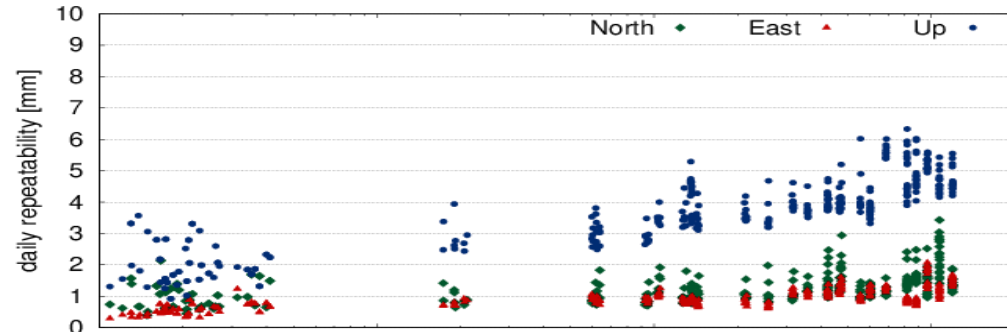


G-Nut PPP

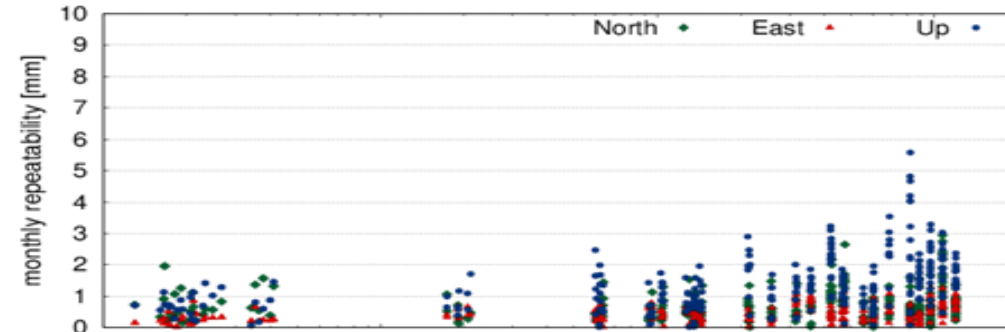


Výsledky zpracování

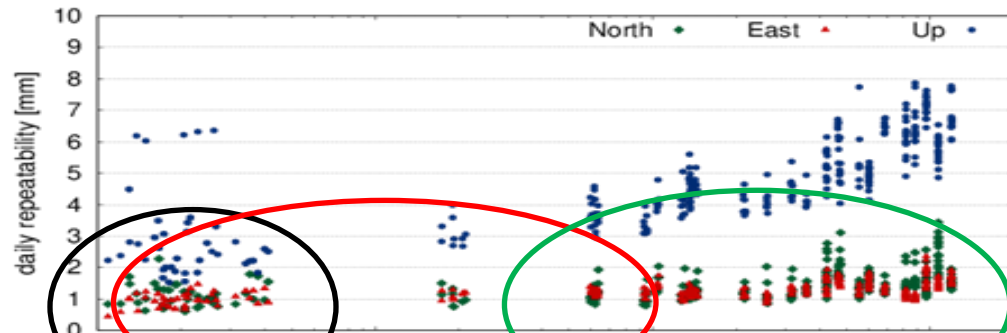
Baseline statistics (Bernese NET / IF / fixed / CODR3)



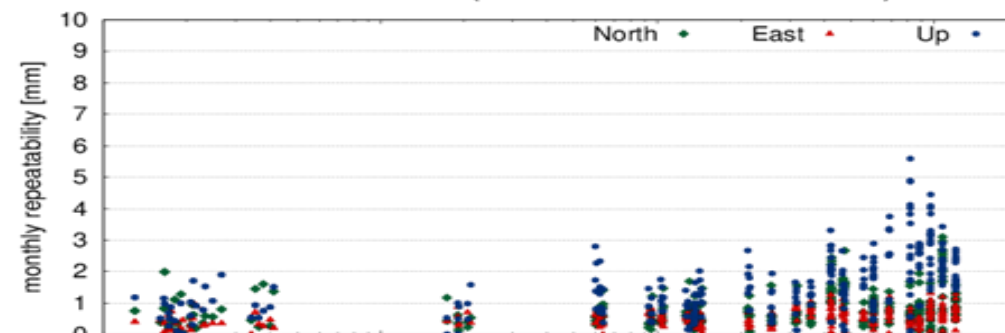
Baseline statistics (Bernese NET / IF / fixed / CODR3)



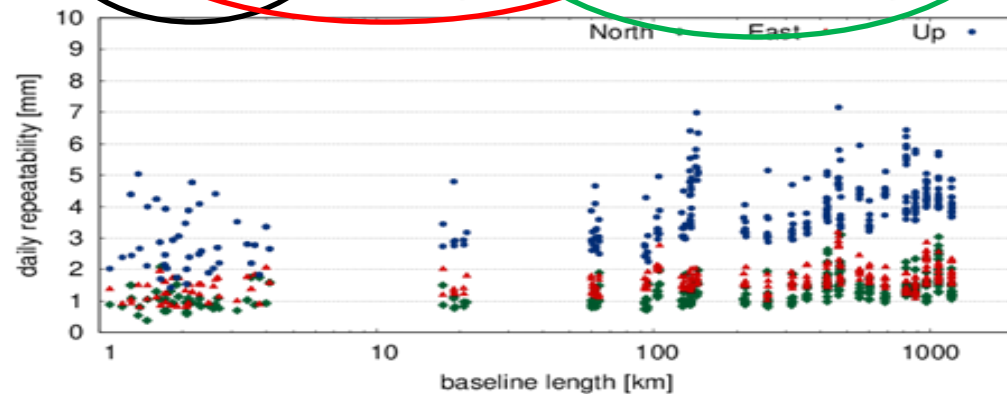
Baseline statistics (Bernese PPP / IF / fixed / CODR3)



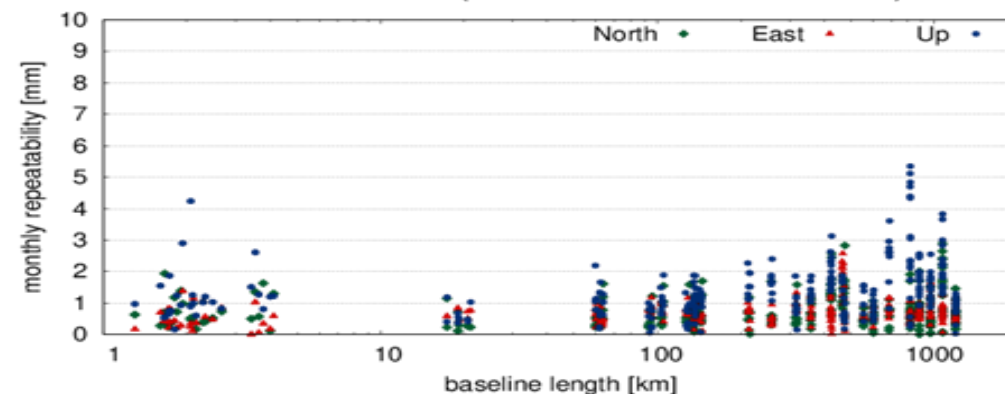
Baseline statistics (Bernese PPP / IF / fixed / CODR3)



Baseline statistics (G-Nut/Geb PPP / IF / float / CODR3)



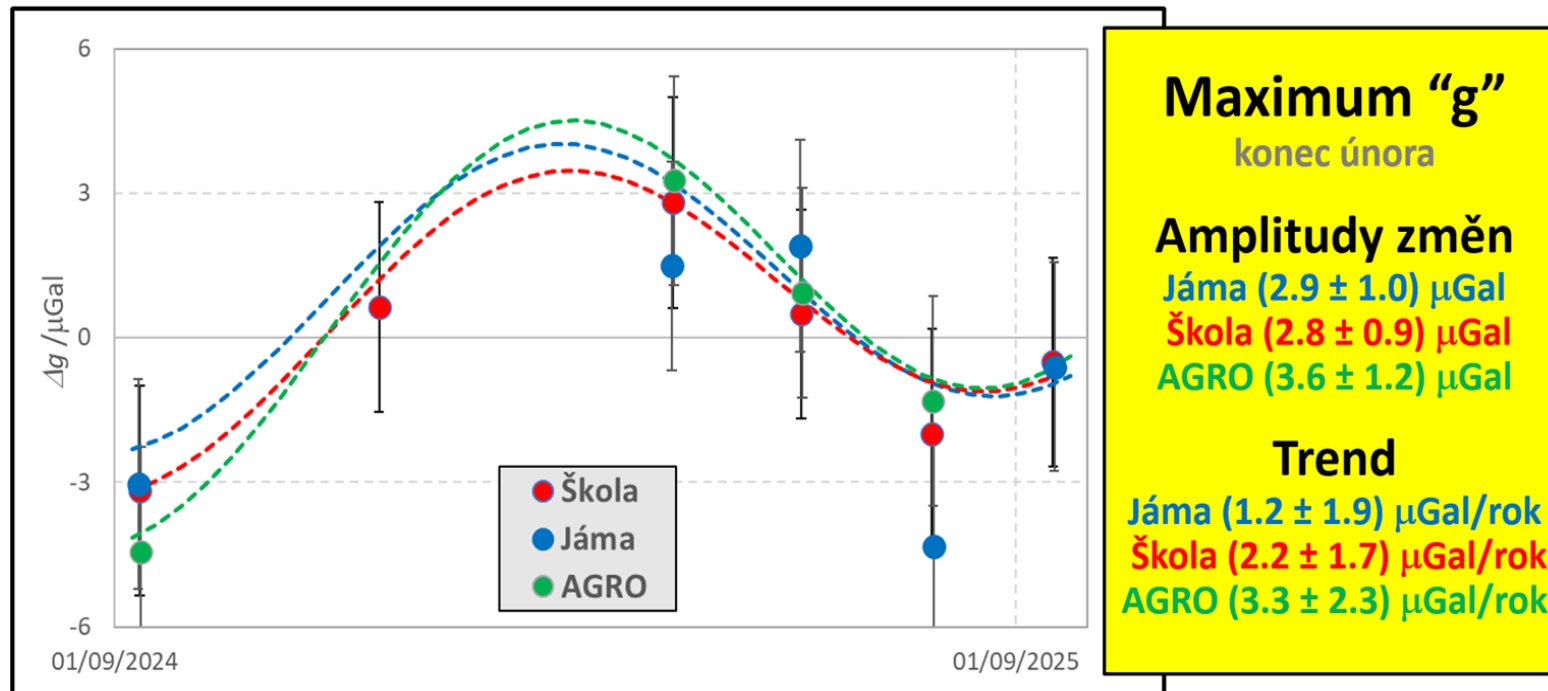
Baseline statistics (G-Nut/Geb PPP / IF / float / CODR3)



Gravimetrická měření

- Do konce roku 2025 provedeno měření na třech bodech
 - Celkem 15 měření
- Měřeno absolutním gravimetrem **FG5X-251/HS5**
- Z časových řad je třeba odstranit sezónní signály způsobené změnami vodních

zásob z mělkých
podpovrchových
vrstev



Závěr

- Cílem projektu je monitorovat povrchové změny způsobené zatápěním po ukončení důlní činnosti
- Předpokládaný pohyb na stanicích v řádu mm/rok zatím nepozorován. Pro statisticky významné je třeba zpracovat data z časové řady min 1.5-3 roky.
- Jak síťové DD tak PPP řešení lze použít k daným účelům
- Přesnost výšky lze zvýšit statistickým průměrováním v čase (měsíční řešení)
 - $1\sigma = 2 \text{ mm (DD)}, 3\text{-}4 \text{ mm (PPP)}$
- Přesnost PPP lze zvýšit odstraněním společných vlivů na blízkých stanicích a tím se přiblížit k přesnosti diferencovaného řešení
- Nízkonákladové přijímače osazené kvalitní anténou mohou být použity pro zahuštění sítí jako alternativa ke geodetickým aparaturám
- Gravimetrická měření dosáhla takové přesnosti, aby bylo možné sledovat očekávaný nárůst podzemních vod. Jsou však potřeba delší časové řady.