

POKROČILÉ METODY LOKALIZACE A NAVIGACE

05 PROSTOROVÉ REFERENČNÍ SYSTÉMY, ZMĚNY SOUŘADNIC V ČASE

doc. Ing. Michal Kačmařík, Ph.D.



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

- Prostorové referenční systémy v GNSS
- Inerciální x terestrický referenční systém
- ITRF, ETRF, WGS-84, PZ-90, GTRS
- Tektonické pohyby
- Slapové síly
- Časové řady souřadnic
- Využití GNSS pro dlouhodobý monitoring

Prostorové referenční systémy a rámce

- **Referenční systém = (soubor konstant, algoritmů, technologie,...) + (referenční rámec)**
- soubor konstant, algoritmů = množina dohodnutých parametrů (např. rychlost světla, velikost hlavní poloosy referenčního elipsoidu) a způsobů výpočtů dalších parametrů
- technologie = pozorovací techniky a jejich použití dle dohodnutého způsobu
- referenční rámec = soubor objektů (hvězd, v terénu stabilizovaných bodů, apod.), kterým jsou přiřazeny souřadnice a velikosti jejich změn v čase (velocity); jedná se o samotnou fyzickou realizaci referenčního systému

- **Inerciální referenční systém**

- inerciální = nebeský
- nerotuje se Zemí
- jsou v něm modelovány oběžné dráhy družic (efemeridy)

- **terestrický referenční systém**

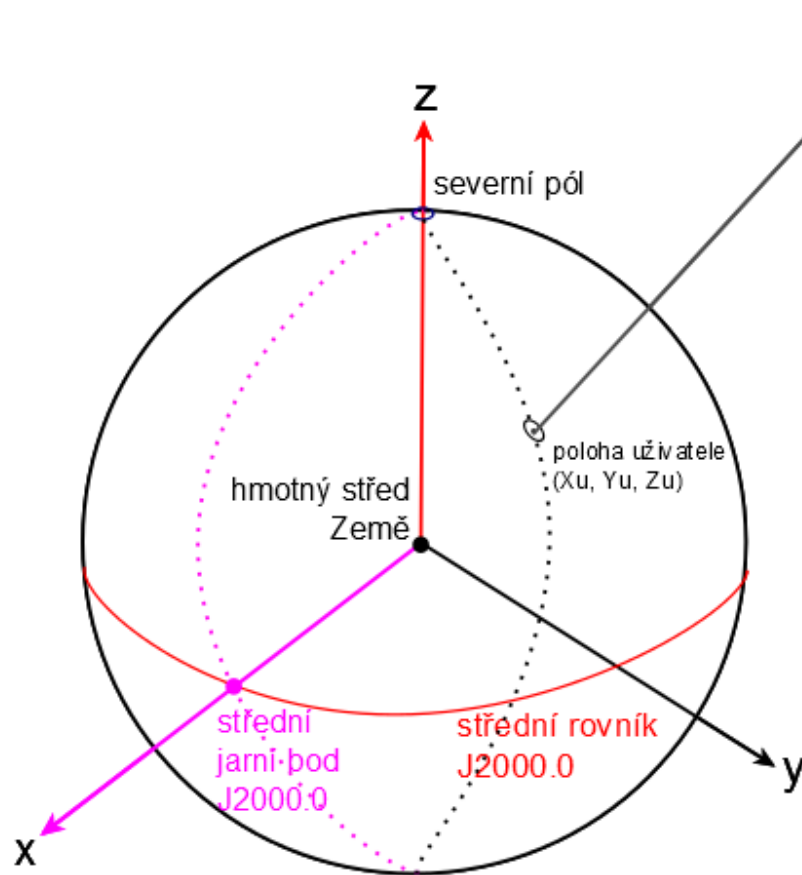
- terestrický = zemský, pozemský
- rotuje se Zemí = je s ní pevně svázán
- je v něm určována poloha přijímače

- **International Celestial Reference System (ICRS) = mezinárodní nebeský referenční systém**
- ICRS = (konstanty, algoritmy, technologie) + ICRF
- systém je definován:
 - počátek souřadnicového systému umístěn do těžiště Země
 - osa x orientována do středního bodu jarní rovnodennosti v epoše J2000.0 (1. 1. 2000)
 - osa z orientována kolmo k rovině středního rovníku v epoše J2000.0
 - osa y doplňuje systém na pravoúhlý pravotočivý
- ICRF určen prostřednictvím přijatých poloh (katalogem) 212 mimogalaktických objektů a realizován pomocí technologie VLBI

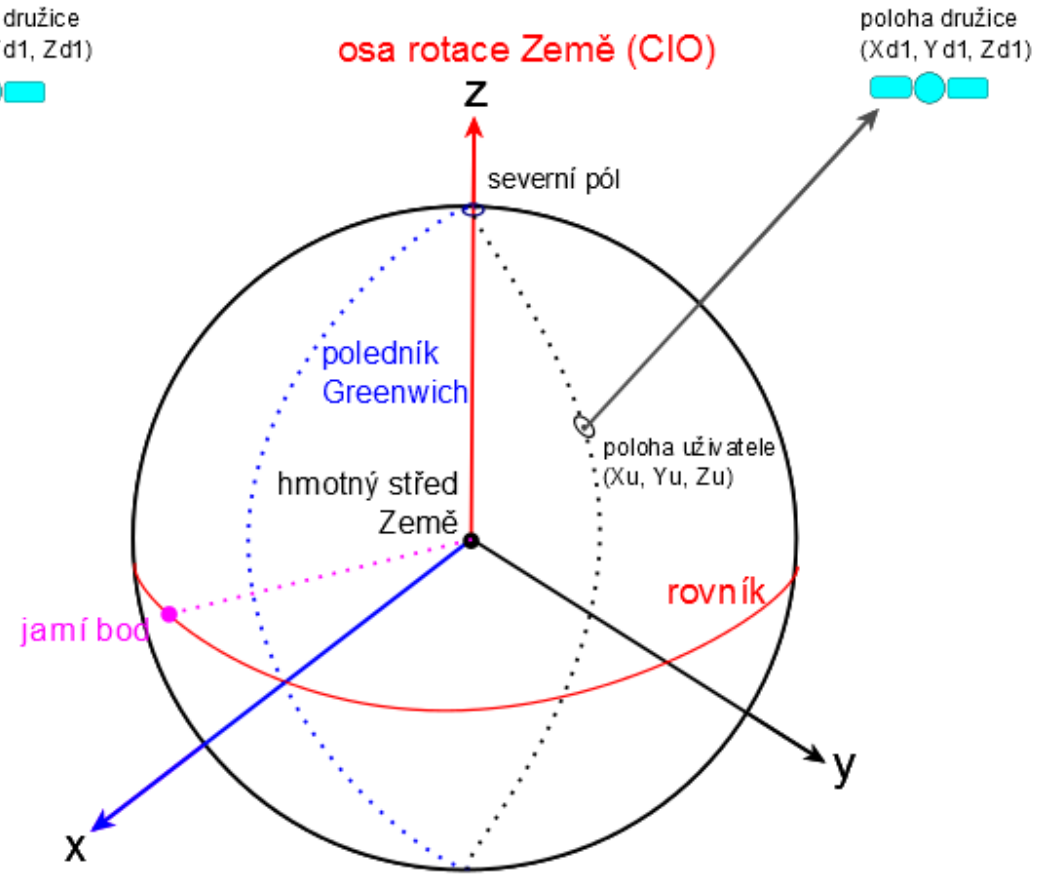
Konvenční terestrický referenční systém

- **International Terrestrial Reference System (ITRS) = mezinárodní terestrický referenční systém**
- označován také jako ECEF (Earth Centered Earth Fixed)
- ITRS_{xx} = (konstanty, algoritmy, technologie) + ITRF_{xx}
 - xx představuje dvojčíslí roku realizace
- systém je definován:
 - počátek souřadnicového systému umístěn do těžiště Země
 - osa x leží v rovině poledníku Greenwich
 - osa z identická se směrem osy rotace Země (CIO – Conventional International Origin, střední poloha vektoru rotace Země v letech 1900 – 1905)
 - osa y doplňuje systém na pravoúhlý pravotočivý

Inerciální a terestrický RS



Inerciální referenční systém



Terestrický referenční systém

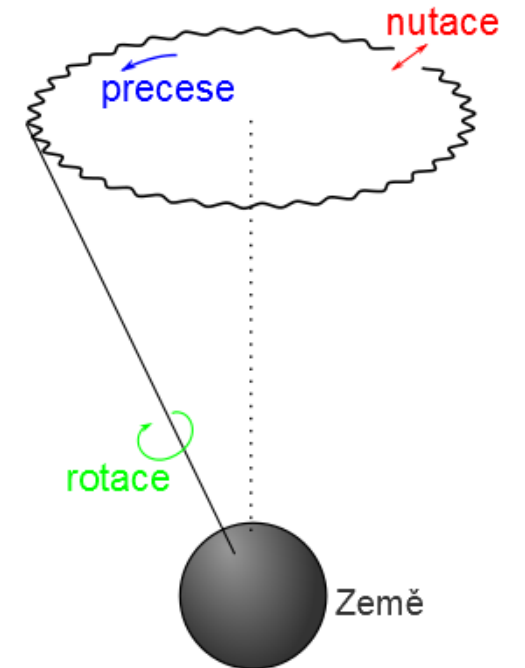
Transformace mezi IRS a TRS



- k transformaci využíváme nebeský střední pól **CIP** (Celestial Intermediate Pole), dříve využíván CEP (Celestial Ephemeris Pole) představující střední pól rotace zemské osy
- vycházíme z ICRS, kdy určíme přechodný referenční systém, jehož osa z směřuje k **CIP** a osa x k CIO. CIO představuje polohu nebeského středního počátku (Celestial Intermediate Origin), který od roku 2003 nahrazuje jarní bod a určuje směr osy x v ICRS
- s využitím korekcí aktuální rychlosti rotace Země a polohy pólu určíme přechodný referenční systém, jehož osa z směřuje k **CIP** a osa x k zemskému střednímu počátku TIO (Terrestrial Intermediate Origin) určující průsečík poledníku Greenwich s rovníkem odpovídajícím CIP
- transformace mezi ITRS a ICRS je tak dána polohou **CIP** v ITRS, polohou **CIP** v ICRS a úhlem rotace Země, tzv. stelárním úhlem, který je určen vzájemnou polohou CIO a TIO



- vyjadřuje pohyb zemského pólu v nebeské soustavě v rovině ekliptiky (rovina ekliptiky je rovina ve které obíhá Země kolem Slunce, je v čase téměř neměnná)
- zdrojem pohybu je gravitační přitažlivost vesmírných těles (primárně Slunce a Měsíce)
- složky pohybu rozdělujeme na:
 - precese = perioda 25 800 let
 - nutace = perioda 18.6 let



Pohyb pólu, změna rychlosti rotace Země



- k pohybu pólu dochází také vlivem nepravidelné struktury rozložení zemské masy a jejich změn v čase -> osa rotace Země není fixována vůči zemské kůře
- skutečná poloha pólu se díky tomu mění přibližně ve čtverci o délce strany cca 20 m vůči poloze bodu s fixními souřadnicemi na Zemi
- perioda tohoto pohybu je 430 siderických dní (1 siderický den = 23.93 hodin)
- ze stejných důvodů dochází také k mírným změnám rychlosti rotace zemské osy

ITRF a jeho realizace

- Jednotlivé verze ITRF jsou realizovány pomocí neměnných konstant (prakticky je využíván elipsoid GRS-80) a souřadnic sítě vybraných stanic na zemském povrchu vztažených k určité epoše (několik stovek stanic) a vyjádřením jejich změn v čase
- tyto stanice provádějí dlouhodobá měření (jednou) či více technikami kosmické geodézie (VLBI, SLR, GNSS, DORIS), váženou kombinací výsledků jejich měření je realizován ITRF
- aktuálně platná je realizace ITRF2020 (od roku 2022)
- IGSxx/IGbxx = realizace ITRF vytvořená IGS nad globální sítí referenčních stanic GNSS používaná pro produkty publikované IGS a jednotlivými analytickými centry (přesné produkty, souřadnice stanic, ...)

Historie referenčních rámců využívaných pro přesné produkty IGS

Referenční rámec	GPS týdny	Datum změny od
ITRF92	0730 – 0781	2. 1. 1994
ITRF93	0782 – 0859	1. 1. 1995
ITRF94	0860 – 0947	30. 6. 1996
ITRF96	0948 – 1020	8. 3. 1998
ITRF97	1021 – 1064	1. 8. 1999
IGS97	1065 – 1142	4. 6. 2000
IGS00	1143 – 1252	2. 12. 2001
IGS00b	1253 – 1399	11. 1. 2004
IGS05	1400 – 1631	5. 11. 2006
IGS08	1632 - 1708	17. 4. 2011
IGb08	1709 - 1933	7. 10. 2012
IGS14	1934 – 2105	29. 1. 2017
IGb14	2106 – 2229	17. 5. 2020
IGS20	2230 -	2. 10. 2022

- European Terrestrial Reference System 89
- terestrický referenční systém používaný v Evropě = odvozen z ITRF, ale pevně svázán s euroasijskou kontinentální deskou, díky čemuž jsou roční posuny souřadnic stanic nejméně o řád nižší (mm oproti cm)
- realizace na základě sítě pozemních měřících stanic na území Evropy s využitím metod SLR, VLBI a GNSS
- jednotlivé verze vždy navazují na realizaci ITRF -> ETRF90 až ETRF14 (aktuální) a jsou vždy pouze zpřesněnou realizací ETRF89
- transformaci mezi ETRFxx a ITRFxx nabízí například on-line nástroj https://www.epncb.oma.be/productservices/coord_trans/

- Využita posloupnost několika GPS měřičských kampaní v 90. letech 20. století, při nichž byly postupně určeny souřadnice vybrané sítě trvale stabilizovaných bodů v ETRF89 a tím došlo k připojení těchto bodů k evropskému referenčnímu rámci
- v současnosti je ETRS89 na území České republiky realizován primárně pomocí GNSS referenčních stanic sítě CZEPOS – aktuálně 23 stanic ve správě ČÚZK umístěných na sídlech katastrálních úřadů či provozních budovách schopných přijímat signály GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
- nezávislý monitoring této sítě a pravidelné určování platných souřadnic stanic provádí VÚGTK

- World Geodetic System 1984
- terestrický referenční systém používaný systémem GPS
- palubní efemeridy jsou vysílány v tomto systému => poloha přijímače určená s jejich využitím je ve WGS-84
- velikost hlavní poloosy elipsoidu $a = 6\,378.137$ km, velikost vedlejší poloosy elipsoidu $b = 6\,356.752$ km, zploštění $f = 1/298.257\,224$ ($f = (a - b)/a$)
- realizace na základě sítě pozemních GPS stanic (prvotně realizován pomocí cca 1 500 stanic s využitím navigačního systému Transit)
- aktuální verze WGS-84 (G2139) uvedená v roce 2021 je virtuálně identická s ITRF14 (IGb14) – existují jen minimální systematické rozdíly mezi těmito systémy (< 1 cm)
- stejným způsobem i starší realizace WGS-84 byly spojeny s konkrétními realizacemi ITRF (WGS-84 G1762 s ITRF08 apod.)

- Parametry Zemli 1990
- terestrický referenční systém používaný systémem GLONASS
- aktuálně verze PZ-90.11 (v souladu s ITRF08)
- elipsoid PE-90 -> velikost hlavní poloosy $a = 6\,378.136$ km, zploštění $f = 1/298.257\,839$
- parametry transformace do ITRF či WGS-84 jsou známé a dostupné
- původní realizace na základě 26 pozemních stanic na území Ruska s využitím několika technik kosmické geodézie

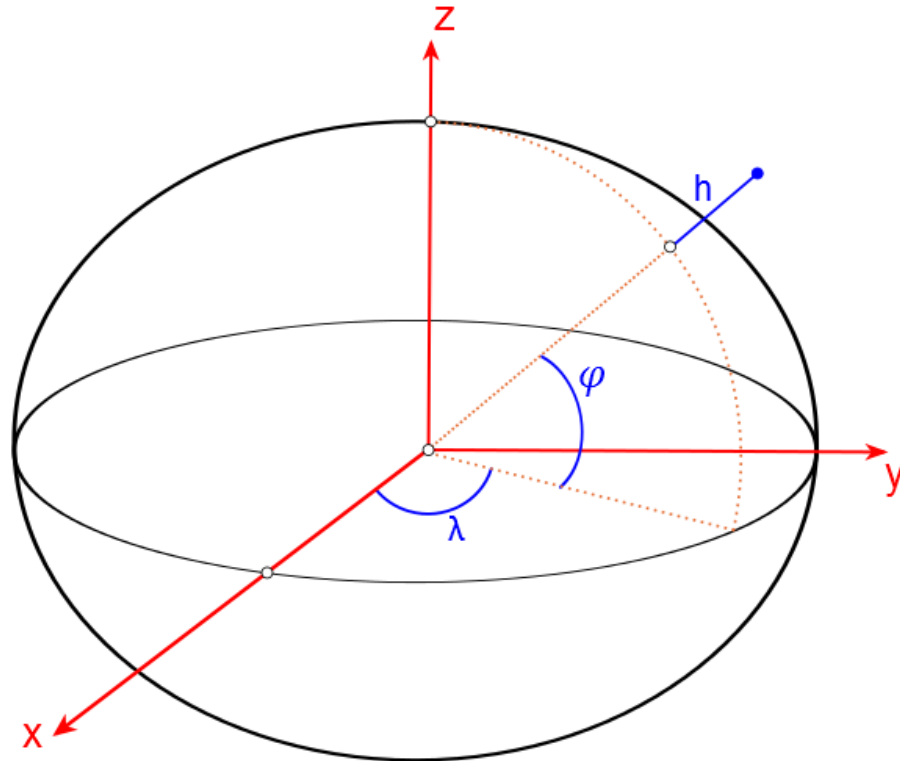
- Galileo Terrestrial Reference Frame
- terestrický referenční systém používaný systémem Galileo
- stejně jako u WGS-84 se jedná o nezávislou realizaci ITRS
- aktuální verze GTRF19v01 je spjatá s ITRF14, systematické rozdíly mezi rámci jsou na úrovni < 1 cm
- realizace na základě experimentálních monitorovacích stanic systému Galileo a vybrané sady IGS stanic

Transformace souřadnic mezi terestrickými referenčními systémy

- Transformace mezi dvěma různými referenčními systémy je obecně prováděna s využitím **podobnostní konformní** transformace založené na **sedmi parametrech** a identických bodech se souřadnicemi určenými v obou systémech (Helmertova transformace)
- jedná se o parametry:
 - tři parametry slouží k definování posunu počátku systému (jeden pro posun v každé z os) = parametry translace T
 - jeden parametr pro změnu měřítka = měřítkový koeficient D
 - tři parametry pro rotaci systému v rámci každé z os = parametry rotace R
- pokud provádíme transformaci mezi dvěma různými časovými realizacemi stejného referenčního systému, používáme stejný princip, ale musíme počítat s časovými derivacemi sedmi parametrů transformace
- to je dáno tím, že každá časová realizace referenčního systému je vztažena parametry transformace k počáteční realizaci tohoto referenčního systému

Souřadnice v terestrickém referenčním systému můžeme vyjádřit v podobě

- kartézských pravoúhlých souřadnic = x, y, z v metrech
- geografických (elipsoidických) souřadnic = zem. šířka ϕ a zem. délka λ ve stupních, výška nad elipsoidem h v metrech



Transformace z geografických na kartézské souřadnice

$$x = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda$$

$$y = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda$$

$$z = ((1 - e^2) N + h) \sin \varphi$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} = 2f - f^2$$

a = velikost hlavní poloosy elipsoidu (m)

b = velikost vedlejší poloosy elipsoidu (m)

e = excentricita elipsoidu

f = zploštění elipsoidu

Transformace z kartézských na geografické souřadnice

- výpočet zem. délky λ : $\lambda = \arctan \frac{y}{x}$
- výpočet zem. šířky φ a výšky nad elipsoidem h je dán iterativním procesem:

$$1. \quad \varphi_{(0)} = \arctan \left[\frac{z}{(1-e^2)p} \right]$$

$$p = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$2. \quad N_{(i)} = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi_{(i-1)}}}$$

$$h_{(i)} = \frac{p}{\cos \varphi_{(i-1)}} - N_{(i)}$$

$$\varphi_{(i)} = \arctan \left[\frac{z}{\left(1 - e^2 \frac{N_{(i)}}{N_{(i)} + h_{(i)}} \right) p} \right]$$

!krok 2. opakujeme tolikrát,
dokud rozdíl 2 po sobě
následujících hodnot $\varphi_{(i)}$ není
menší než požadovaná
přesnost transformace

- dostupné souřadnice mohou být v několika rozdílných souřadnicových systémech (ITRF x ETRF x WGS84 x S-JTSK atd.) -> může vznikat potřeba jejich transformace
- při post-processingu GNSS měření máme v případě souřadnic na vstupu několik možností:
 - přesné souřadnice referenčních stanic vztažené k aktuální či v čase blízké epoše
 - dlouhodobé přesné souřadnice referenčních stanic vztažené k epoše v minulosti
 - přibližné souřadnice určené samotným měřením, které chceme zpřesnit

- lze je získat pro referenční stanice zahrnuté do mezinárodních sítí (IGS, EUREF)
- stažitelné v souboru formátu CRD/SNX v řešení založeném na denním/týdenním zpracování analytických center

- např. EUREF EPN nabízí týdenní kombinovaná řešení, viz

<https://epncb.oma.be/productsservices/analysiscentres/combinedeurefsolution.php>

```

1 EPN combined solution for week 2236 19-JAN-23 17:22
2 -----
3 LOCAL GEODETIC DATUM: IGb14 EPOCH: 2022-11-16 12:00:00
4
5 NUM STATION NAME X (M) Y (M) Z (M) FLAG
6
7 1 ACOR 13434M001 4594489.52342 -678367.37196 4357066.32060 A
8 2 ADAR 19161M001 3852249.21325 -319510.43509 5056510.70034 A
9 3 AGRN 19584M002 4937499.32767 1194191.54837 3844371.18341 A
10 4 AJAC 10077M005 4696989.17396 723994.80803 4239678.74474 W
11 5 ALAC 13433M001 5009050.99656 -42071.83946 3935057.96263 A
12 6 ALBA 13452M001 4962847.74720 -160853.75130 3990884.60757 A
13 7 ALME 13437M001 5105219.92393 -219278.18296 3804387.35830 A
14 8 ANK2 20818M001 4124040.68316 2655252.21328 4065430.43006 A
15 9 AQUI 12757M001 4592507.24149 1089876.68156 4276393.11636 A
16 10 ARA2 14503M002 4239308.13977 1176364.41033 4604205.59018 A
17 11 ARG1 10117M002 2981489.57548 -354651.40530 5608475.09461 A
18 12 ARIS 19190M001 3472288.25009 -355730.26167 5320461.41200 A
19 13 ARJ6 10428M002 2441772.25968 799272.57717 5818730.68041

```

Dlouhodobé přesné souřadnice referenčních stanic vztažené k epoše v minulosti

- lze je získat pro stanice zařazené do mezinárodních i národních (komerčních) sítí
- souřadnice jsou vztažené k referenční epoše referenčního rámce, ve kterém jsou vyjádřeny (obvykle několik měsíců či let zpět v čase)
- pokud je chceme transformovat do epochy platné v čase našich měření, je třeba na ně aplikovat posun souřadnic vlivem pohybu tektonických desek apod. (*viz dále v prezentaci*)
- například přesné souřadnice referenčních stanic sítě CZEPOS jsou vyjádřeny v ETRS89, v realizaci ETRF00 vztažené k epoše 1. 1. 1989 (= 1989.0)

- **poloha (souřadnice) stabilizovaného bodu není v čase neměnná**
- působí na ně řada vlivů periodického i neperiodického charakteru různých velikostí
- zásadní systematické vlivy, které je potřeba zahrnout pro velmi přesná zpracování:
 - pohyby tektonických desek
 - slapové jevy (gravitační síly Měsíce a Slunce působící a) na zemskou kůru planety Země; b) na moře a oceány = příliv x odliv; c) na atmosféru Země)
- změnu souřadnic mohou dále způsobit například:
 - výměna hardware stanice (zejména antény), projeví se skokovou změnou
 - seismické jevy (zemětřesení)
 - (ne)periodické pohyby objektu, na kterém je anténa stanice instalována

Pohyb tektonických desek

- pohyb tektonických desek v čase způsobuje změnu souřadnic vázaných ke globálnímu terestrickému referenčnímu systému
- zemskou kůru je možné rozdělit na několik bloků, které se vůči sobě vzájemně pohybují
- rychlost a směr tohoto pohybu je možné pro konkrétní místo
 - vypočítat na základě dlouhodobé časové řady souřadnic (alespoň 1 rok)
 - modelovat, např. globální model NUVEL1
- velikost změny souřadnic se pohybuje v řádu mm až cm za rok (na euroasijské desce cca 2.5 cm/rok)
- souřadnice referenčních stanic proto vyjadřujeme jako souřadnice vztažené k určité časové epoše + lineární vyjádření jejich změn v čase (tzv. velocity)
- pokud máme souřadnice referenční stanice platné pro epochu v minulosti, získáme či vypočteme její velocity a s jejich použitím můžeme určit aktuálně platné souřadnice

Referenční stanice GOPE nedaleko Prahy, zařazená v EUREF EPN a IGS síti

EPN_ETRF2014_C2235.SNX.Z

ETRF2014	epoch t_0	Position (m)			Velocity (m/y)		
		X	Y	Z	V_x	V_y	V_z
354/2009 - 316/2022	001/2010	3979316.394 ± 0.000	1050312.204 ± 0.000	4857066.951 ± 0.000	0.0001 ± 0.0000	-0.0001 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000
197/2006 - 346/2009	001/2010	3979316.393 ± 0.000	1050312.206 ± 0.000	4857066.949 ± 0.000	0.0001 ± 0.0000	-0.0001 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000
279/2000 - 189/2006	001/2010	3979316.397 ± 0.000	1050312.211 ± 0.000	4857066.945 ± 0.000	0.0001 ± 0.0000	-0.0001 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000
207/2000 - 277/2000	001/2010	3979316.384 ± 0.000	1050312.204 ± 0.000	4857066.936 ± 0.001	0.0001 ± 0.0000	-0.0001 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000
309/1999 - 205/2000	001/2010	3979316.378 ± 0.000	1050312.208 ± 0.000	4857066.926 ± 0.000	0.0001 ± 0.0000	-0.0001 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000
015/1996 - 307/1999	001/2010	3979316.381 ± 0.000	1050312.201 ± 0.000	4857066.932 ± 0.000	0.0001 ± 0.0000	-0.0001 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000

EPN_IGb14_C2235.SNX.Z

IGb14	epoch t_0	Position (m)			Velocity (m/y)		
		X	Y	Z	V_x	V_y	V_z
354/2009 - 316/2022	001/2010	3979316.049 ± 0.000	1050312.558 ± 0.000	4857067.157 ± 0.000	-0.0164 ± 0.0000	0.0168 ± 0.0000	0.0098 ± 0.0000
197/2006 - 346/2009	001/2010	3979316.047 ± 0.000	1050312.560 ± 0.000	4857067.155 ± 0.000	-0.0164 ± 0.0000	0.0168 ± 0.0000	0.0098 ± 0.0000
279/2000 - 189/2006	001/2010	3979316.052 ± 0.000	1050312.565 ± 0.000	4857067.151 ± 0.000	-0.0164 ± 0.0000	0.0168 ± 0.0000	0.0098 ± 0.0000
207/2000 - 277/2000	001/2010	3979316.039 ± 0.000	1050312.558 ± 0.000	4857067.142 ± 0.001	-0.0164 ± 0.0000	0.0168 ± 0.0000	0.0098 ± 0.0000
309/1999 - 205/2000	001/2010	3979316.033 ± 0.000	1050312.562 ± 0.000	4857067.132 ± 0.000	-0.0164 ± 0.0000	0.0168 ± 0.0000	0.0098 ± 0.0000
015/1996 - 307/1999	001/2010	3979316.036 ± 0.000	1050312.555 ± 0.000	4857067.138 ± 0.000	-0.0164 ± 0.0000	0.0168 ± 0.0000	0.0098 ± 0.0000

Zdroj: <https://www.epncb.oma.be/products-services/coordinates/crd4station.php?station=GOPE00CZE>

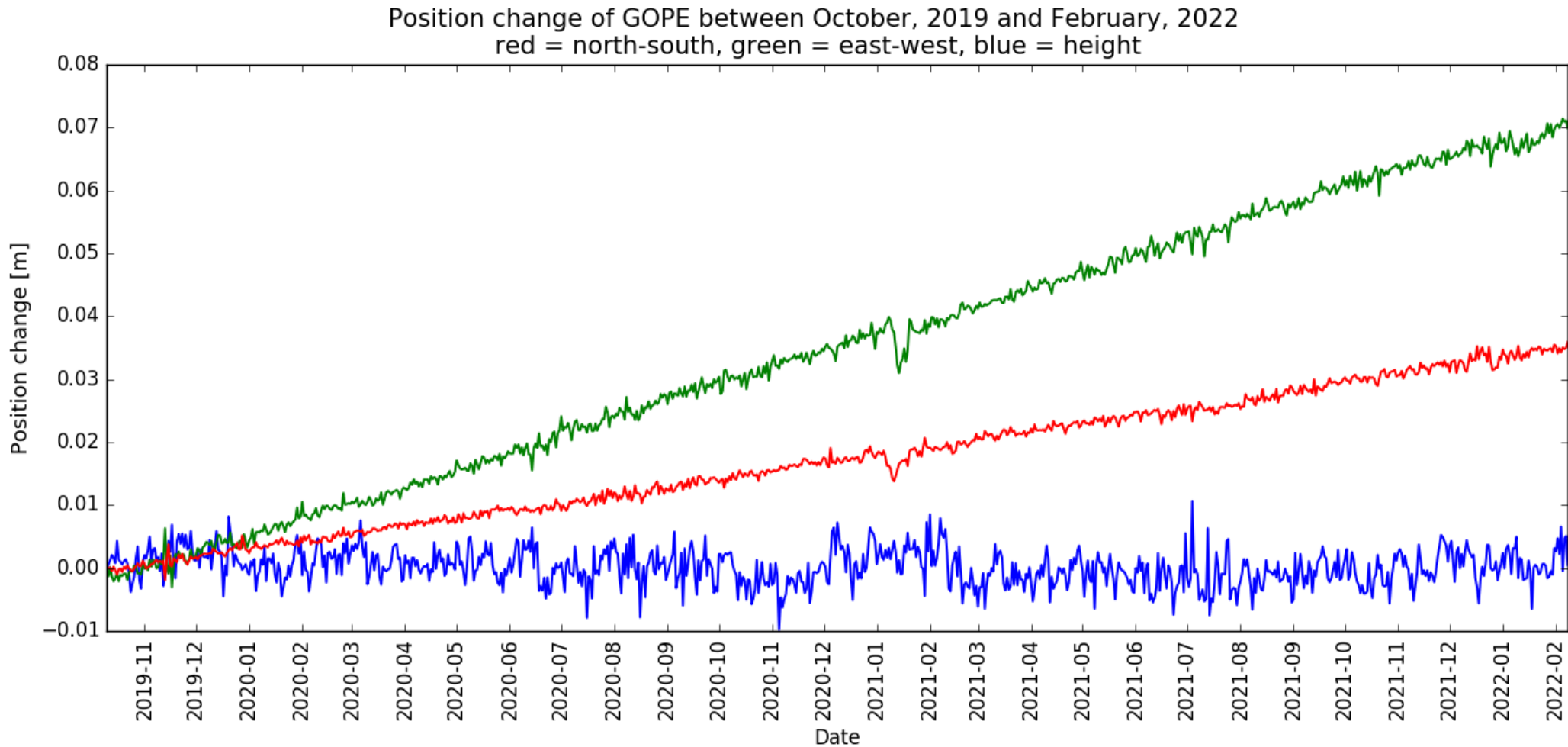
- Denní změny souřadnic stanice GOPE (Ondřejov u Prahy), 10. 10. 2019 – 8. 2. 2022, síťové řešení z Bernese GNSS SW

BEZ ZAHRNUTÍ VELOCITY!

Roční posuny
souřadnic:

Latitude = 15 mm

Longitude = 30 mm



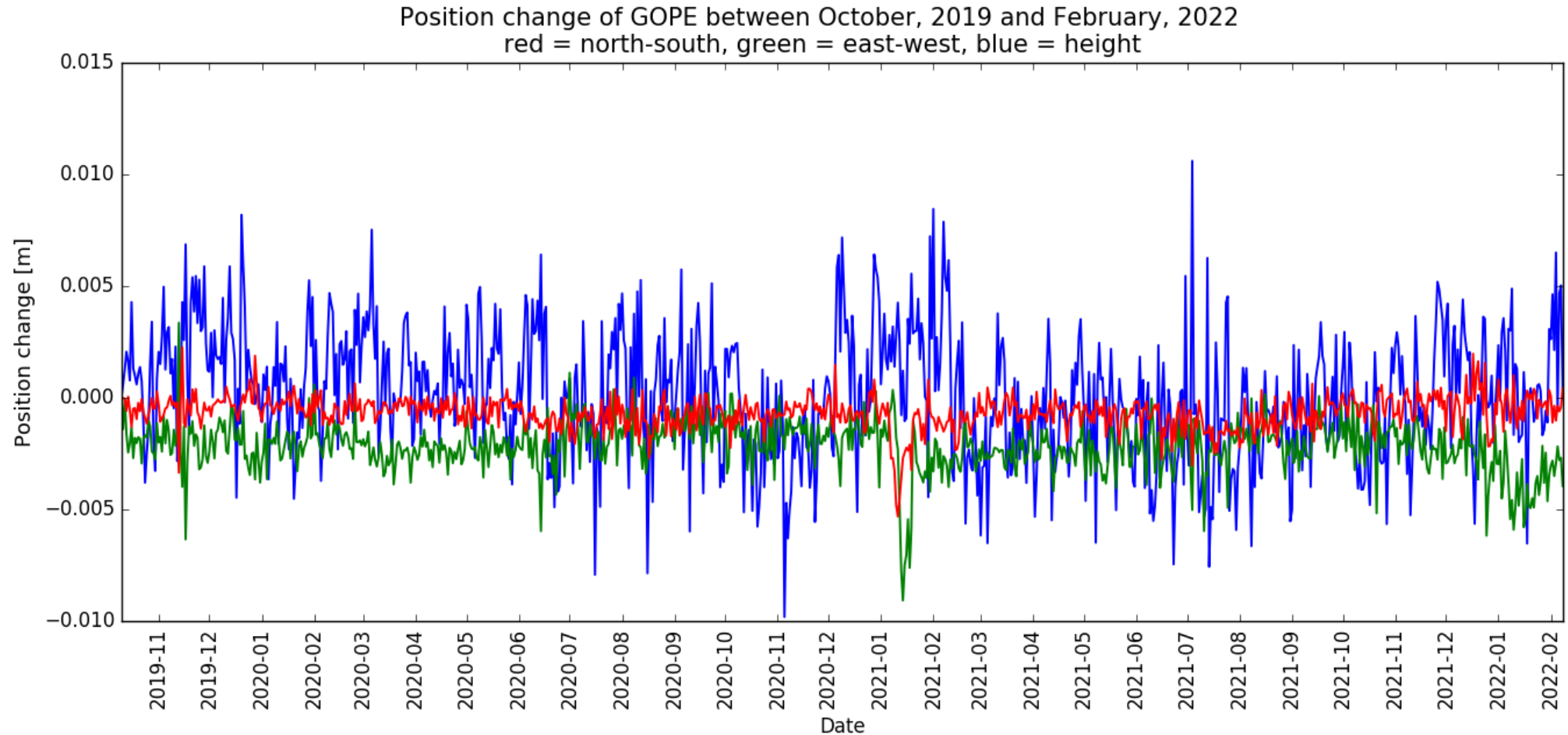
- Denní změny souřadnic stanice GOPE (Ondřejov u Prahy), 10. 10. 2019 – 8. 2. 2022, síťové řešení z Bernese GNSS SW

SE ZAHRNUTÍM VELOCITY!

Roční posuny
souřadnic:

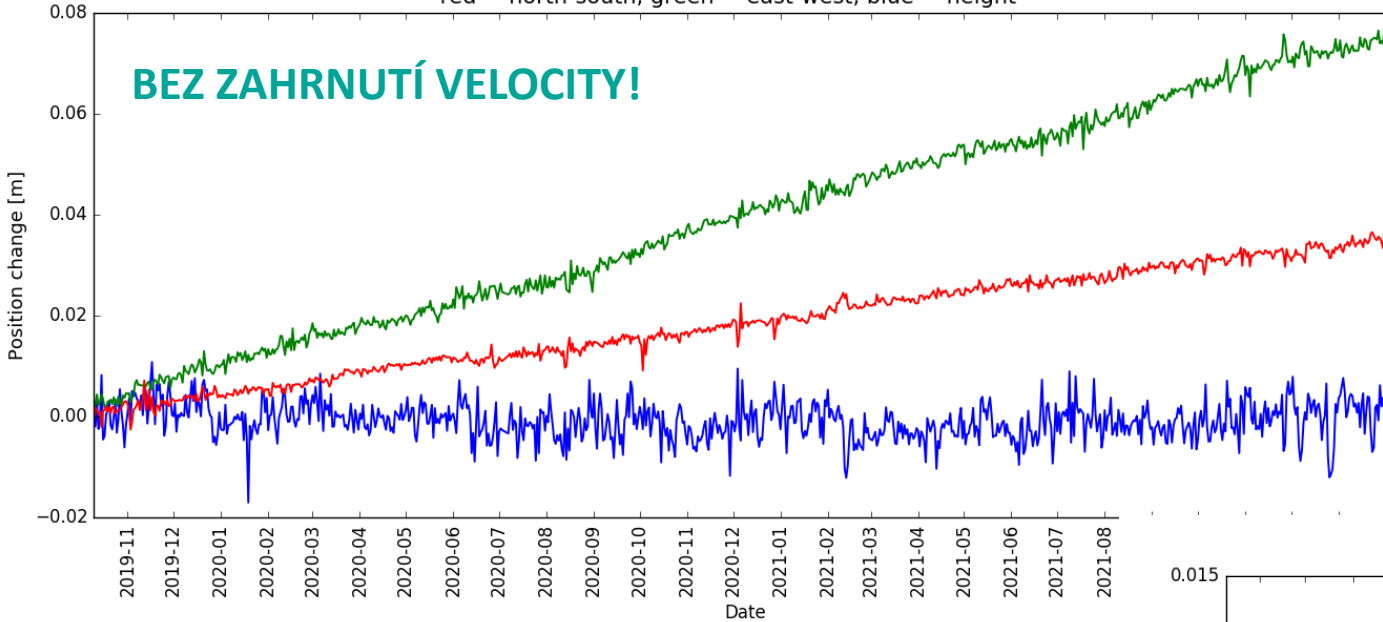
Latitude = 0 mm

Longitude = 0 mm



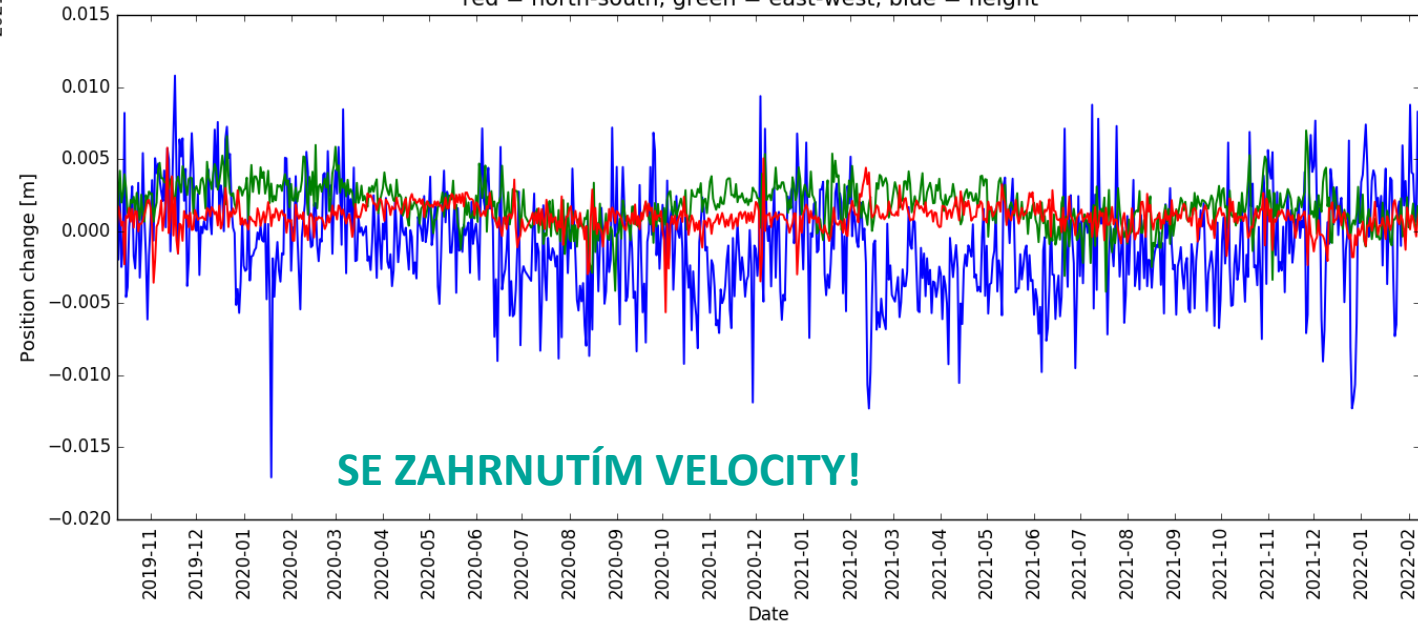
Časové řady souřadnic

Position change of CFRM between October, 2019 and February, 2022
red = north-south, green = east-west, blue = height



- Denní změny souřadnic stanice CFRM (Frýdek-Místek),
- 10. 10. 2019 – 8. 2. 2022,
- síťové řešení z Bernese GNSS SW

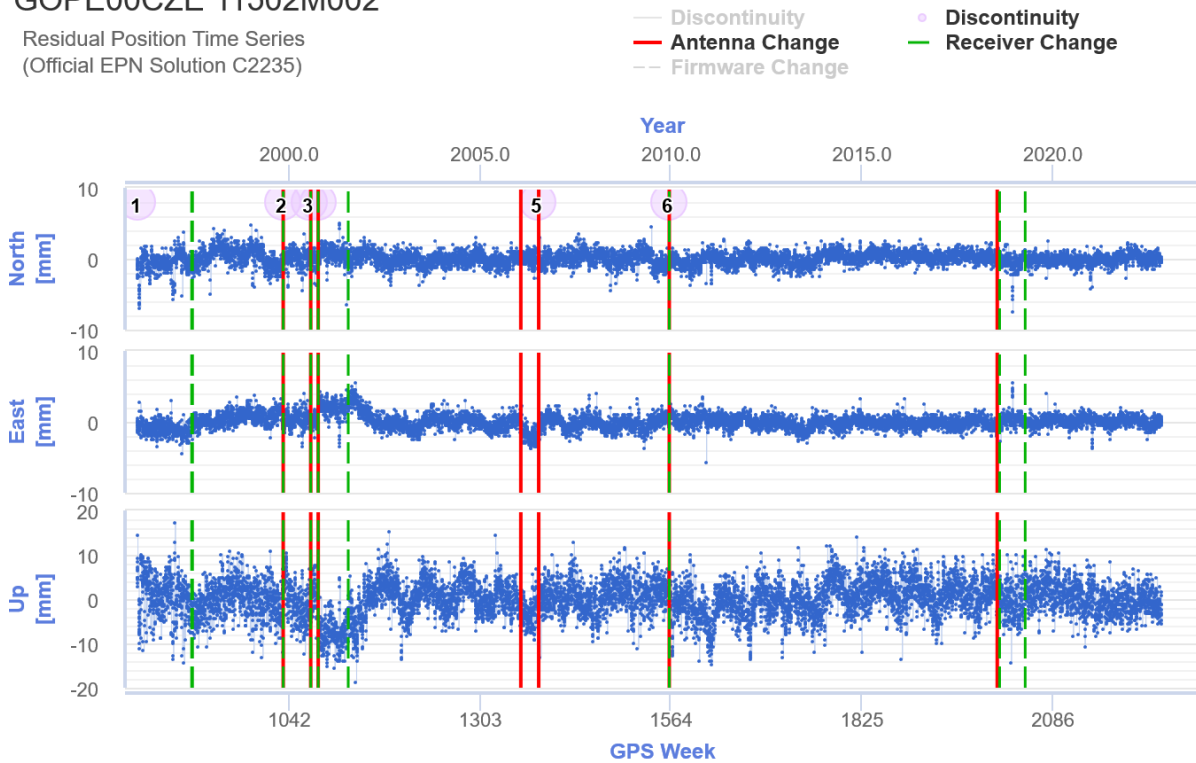
Position change of CFRM between October, 2019 and February, 2022
red = north-south, green = east-west, blue = height



- Denní změny souřadnic stanice GOPE (Ondřejov u Prahy)
- 1/1996 – 12/2022
- Oficiální řešení EUREF EPN

GOPE00CZE 11502M002

Residual Position Time Series
(Official EPN Solution C2235)



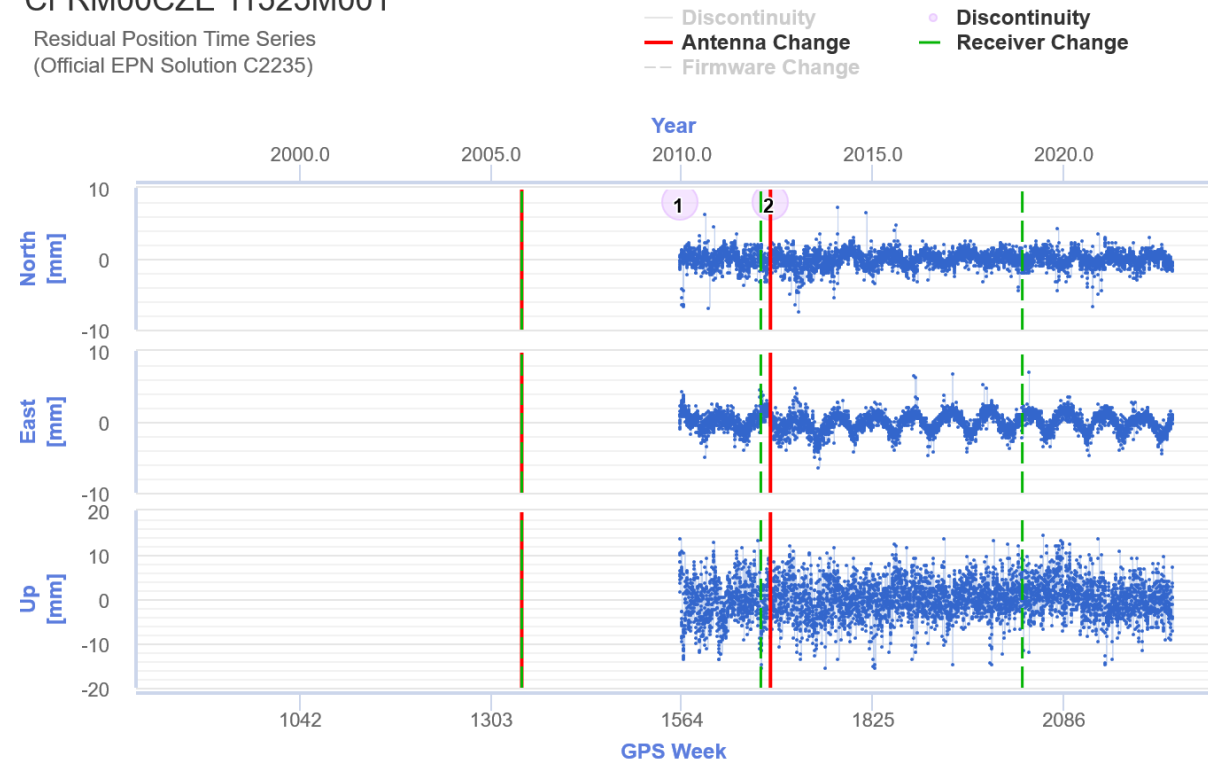
© EPN Central Bureau

Časové řady souřadnic

- Denní změny souřadnic stanice CFRM (Frýdek-Místek)
- 12/2009 – 12/2022
- Oficiální řešení EUREF EPN

CFRM00CZE 11525M001

Residual Position Time Series
(Official EPN Solution C2235)



© EPN Central Bureau

Slapové jevy

- Měsíc i Slunce přitahují silněji tělesa na přivrácené straně Země, a naopak slaběji na odvrácené straně
- dochází tím k deformaci povrchu Země, přesunu vodních mas (příliv a odliv) a přesunu atmosférických mas
- typ a velikost působení je odvislé od aktuální polohy Země, Měsíce a Slunce
- vliv Slunce je menší než vliv Měsíce (vliv Slunce tvoří přibližně 44 % vlivu Měsíce)

- **periodické deformace zemské kůry** vlivem slapových sil dosahují velikosti do 5 cm v horizontálním směru a 30 cm ve výšce
- tvoří je setrvalá složka daná zeměpisnou šířkou a periodická složka s převažující periodou 12 a 24 hodin, další významné periody jsou čtrnáctidenní a sezónní (během 24h statického měření je periodická složka do značné míry vyrušena)
- tyto vlivy jsou při zpracování velmi přesných GNSS měření standardně modelovány pomocí sférických harmonických funkcí a eliminovány

Přesuny vodních mas

- přesuny vodních mas (příliv, odliv) vyvolávají periodické sekundární posuny zemské kůry způsobené tlakem vodní masy na dno moře/oceánu
- vyvolávají posuny cca o řád nižší než samotné deformace zemské kůry popsané na předchozím snímku
- deformace nemají permanentní složku, jsou lokálního charakteru, během 24h statického měření jsou do značné míry vyrušeny
- pro velmi přesné aplikace mohou být modelovány při zpracování měření, standardně s využitím některého z globálních modelů (FES2004, EOT11a, FES2012, ...)
 - Informace o fázích a amplitudách pohybu potřebné pro modelování těchto slapových jevů je možno pro libovolnou polohu získat z on-line nástroje dostupného na <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>, obvykle jsou následně uloženy do souboru formátu BLQ

Pohyb zemských pólů

- jak bylo uvedeno v úvodní části prezentace, poloha zemských pólů se neustále mění, což se taktéž projevuje periodickými deformacemi zemské kůry
- změny souřadnic způsobené tímto vlivem dosahují až 7 mm v horizontálním směru a 25 mm ve výšce
- pro jejich úspěšnou redukci je potřeba mít k dispozici aktuální parametry rotace a orientace Země, které jsou součástí přesných produktů (soubory formátu ERP)
 - tyto parametry obsahují korekci UT1 vůči UTC, korekci délky dne, polohu CIP vzhledem k referenčnímu pólu IERS, offsety nebeského pólu, ...)

- slapové síly Slunce a Měsíce způsobují periodické oscilace barometrického tlaku způsobující drobné deformace zemské kůry
- výrazně větší vliv však má periodické nerovnoměrné ohřívání zemského povrchu slunečním zářením vedoucí k přesunům vzdušných mas, jejichž tlak způsobuje deformace zemské kůry o velikosti až 3 mm v horizontálním směru a 20 mm ve výšce (angl. atmospheric pressure loading)
 - vliv lze při velmi přesných měřeních eliminovat použitím modelu založeného na klimatických či meteorologických datech

Využití GNSS pro dlouhodobý přesný monitoring

- Pohyby tektonických desek
- Přírodní procesy: zemětřesení, tsunami, svahové pohyby (sesuvy), vulkanická aktivita, ...
- Antropogenní procesy: změny terénu vlivem těžby (poddolování)
- Monitorování technické infrastruktury (budovy, mosty, ...)
- (Měření výšky sněhové pokrývky, hladiny vodních ploch)

Monitorování infrastruktury

CR1, CR2 = statický

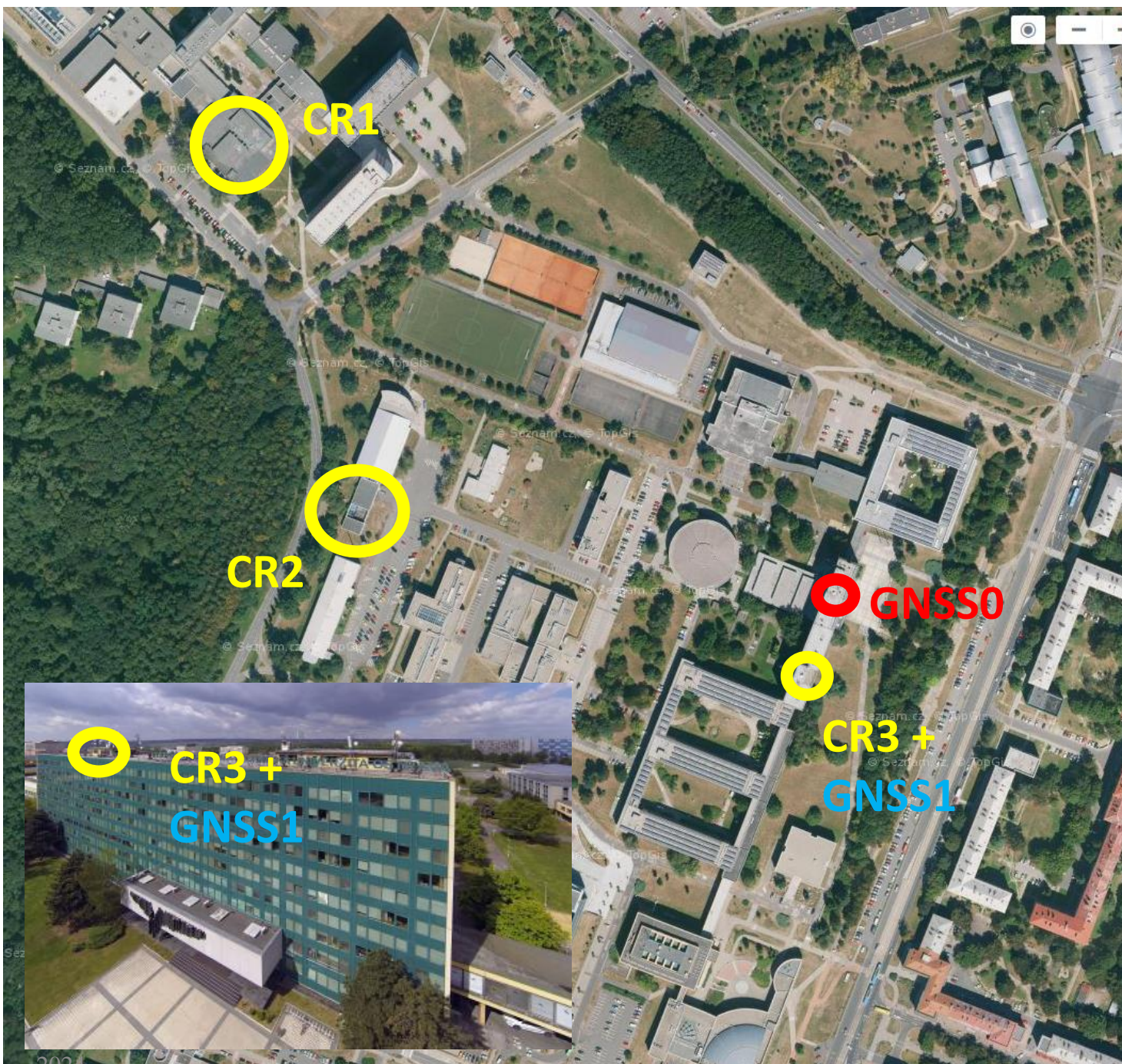
CR3 = pohybující se

(CR = corner reflector, koutový odražeč pro InSAR)

GNSS1 = VSB1 = pohybující se přijímač

GNSS0 = VSBO = statický přijímač

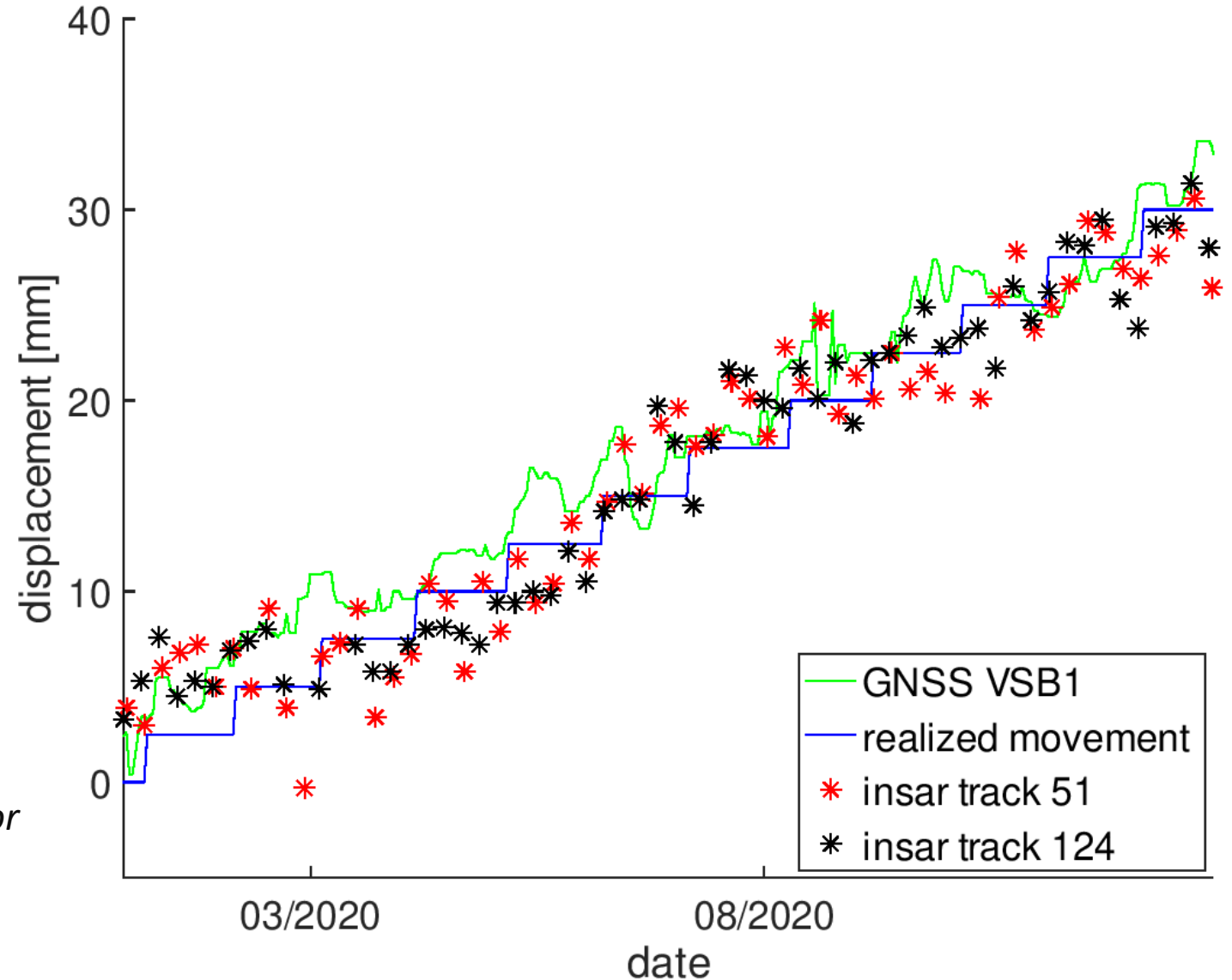
Projekt *Earth Observation Automated Monitoring Open Platform*, ESA Incubed, 2019-2021

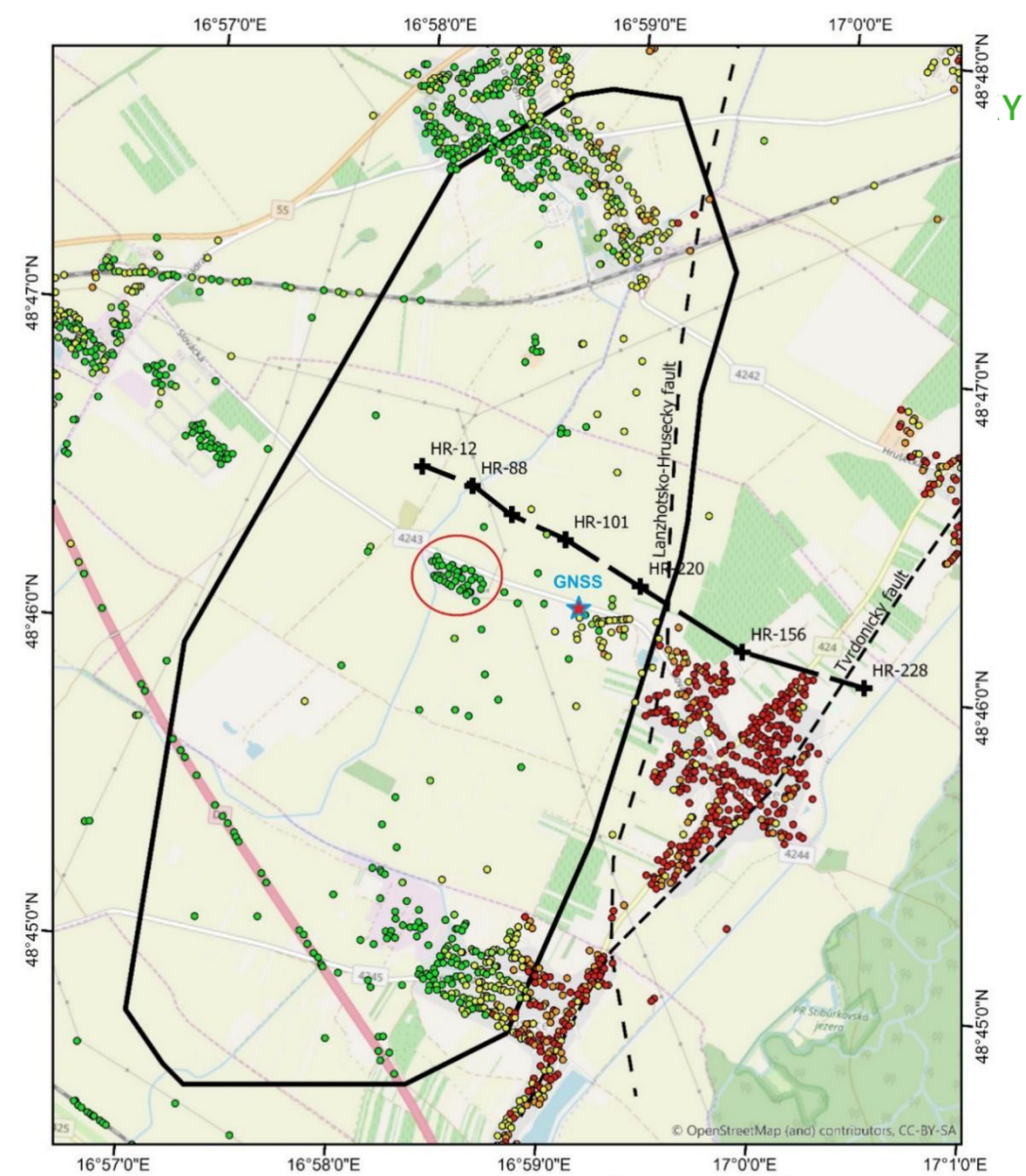


Simulovaný vertikální pohyb

- Realizovaný vertikální pohyb = 30 mm/rok
- Pohyb určený z InSAR (Sentinel-1):
 - Track D124: 27.6 mm/rok
 - Track D51: 29.9 mm/rok
- Pohyb určený z GNSS:
 - 27.7 mm/rok

Více informací v *Struhár et al.: Testing Polygon for Simulated Vertical Displacement Measurements based on Co-located InSAR Corner Reflector and GNSS station. GeoScience Engineering, 67, 2021.*





Persistent Scatterer

Correlation coef.

- ≤ -0.50
- $-0.50 - -0.30$
- $-0.30 - 0.30$
- $0.30 - 0.50$
- $0.50 \geq$

- ⊕ Tvrdonice - well
- - - Lanzhotsko-Hrusecky fault
- - - Tvrdonický fault
- - - Tvrdonice - rust
- UGS Tvrdonice

0 1 2
Kilometers



Juraj STRUHÁR
Department of Geoinformatics
S-JTSK
2019

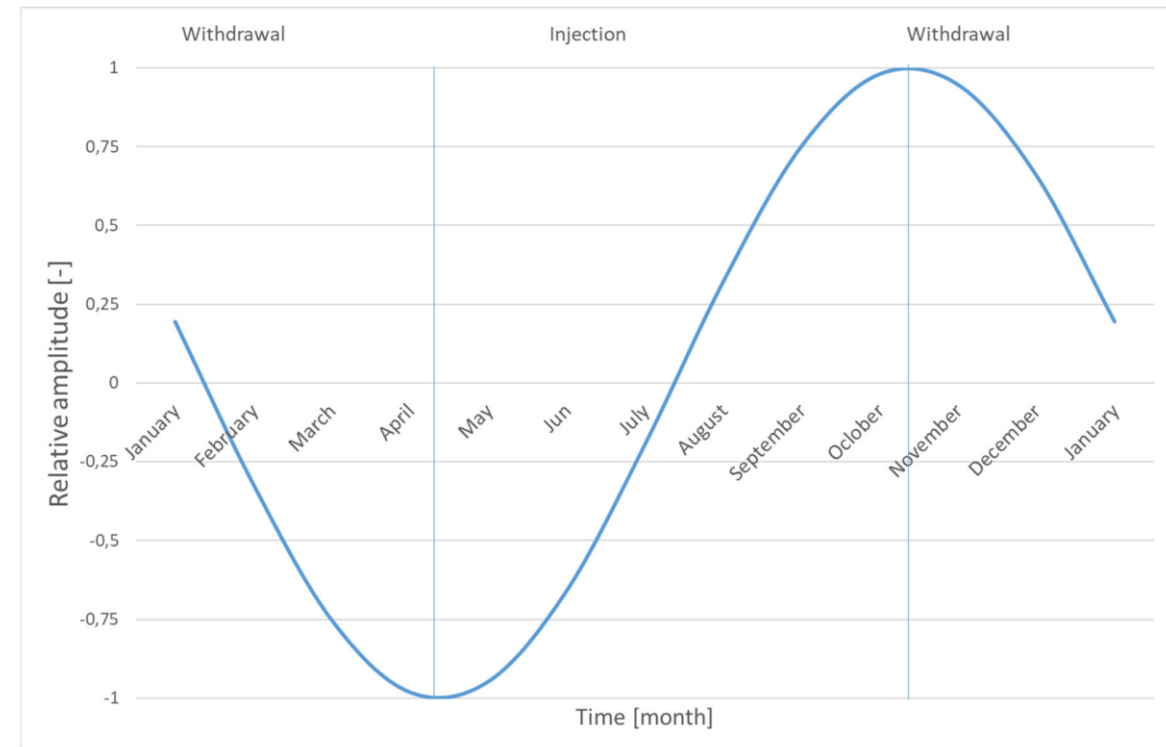
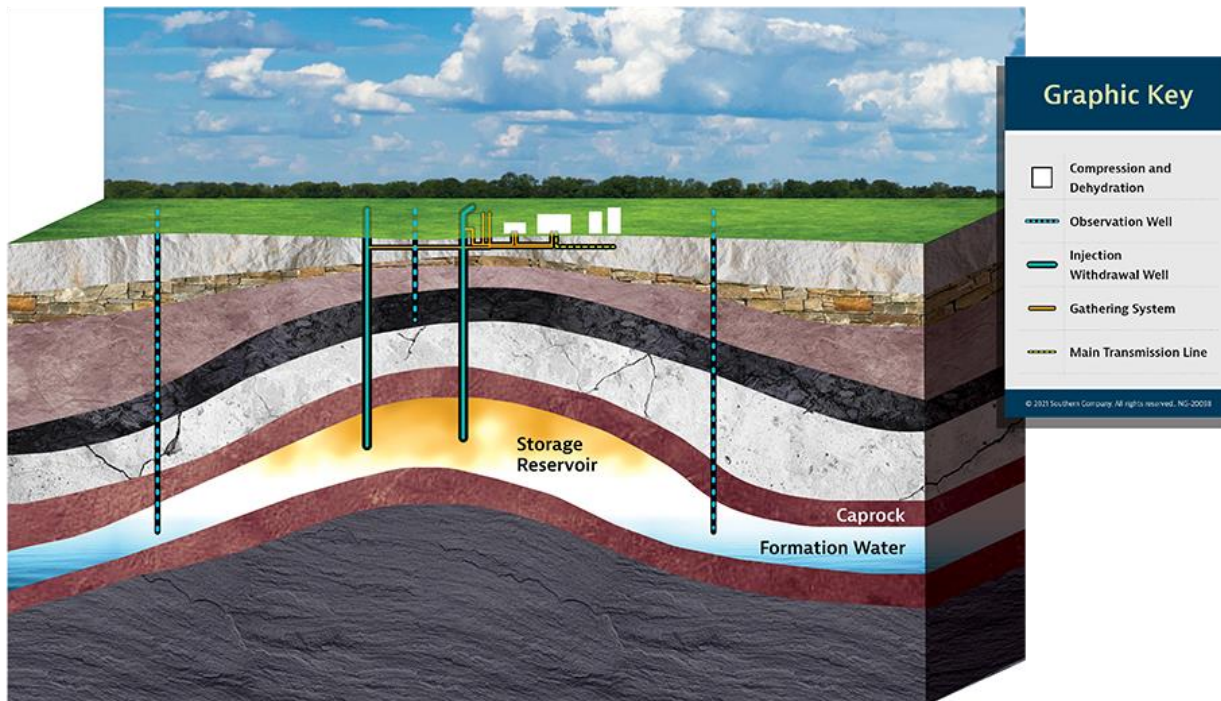
VSB TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA | FACULTY OF MINING AND GEOLOGY | DEPARTMENT OF GEONFORMATICS

- Monitorování nelineárních (vertikálních) pohybů nad podzemním zásobníkem plynu (PZP) v Tvrdonicích (Břeclavsko, ČR)
- GNSS referenční stanice provozována v období 10/2019 – 4/2022

Zdroj: Rapant et al.: Radar Interferometry as a Comprehensive Tool for Monitoring the Fault Activity in the Vicinity of Underground Gas Storage Facilities. Remote Sensing, 2020.

Podzemní zásobník plynu

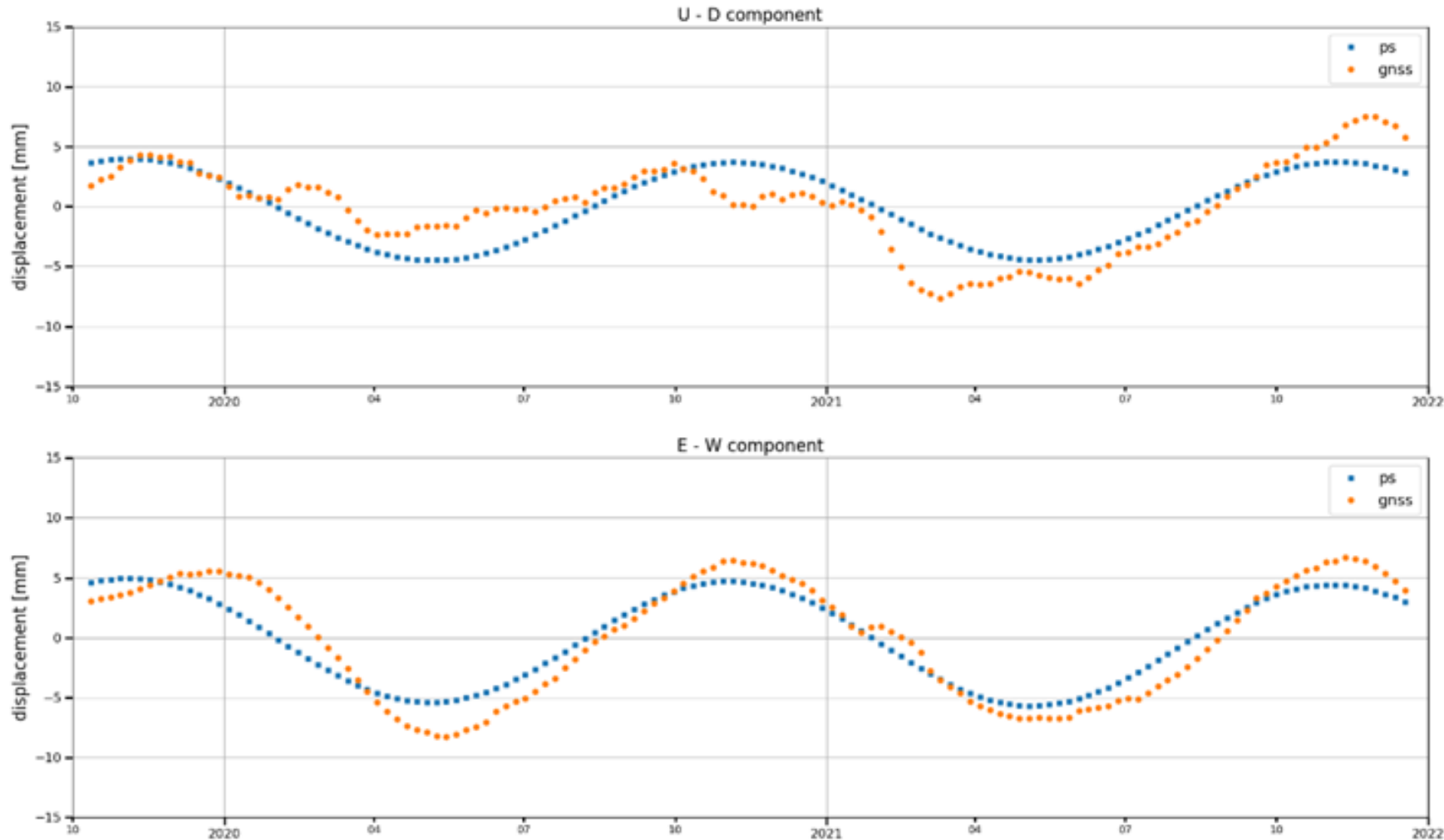
- Deformace terénu vlivem plnění zásobníku plynem mimo topnou sezónu a odběru plynu v topné sezóně



Zdroj: Rapant et al. (2019): Radar Interferometry as a Comprehensive Tool for Monitoring the Fault Activity in the Vicinity of Underground Gas Storage Facilities, Remote Sensing

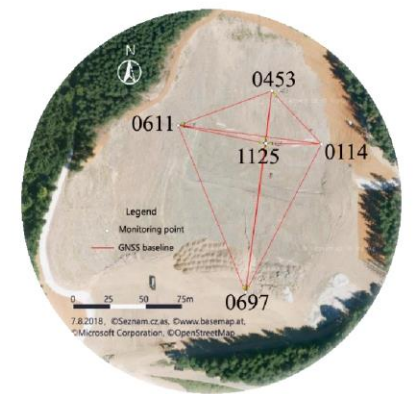
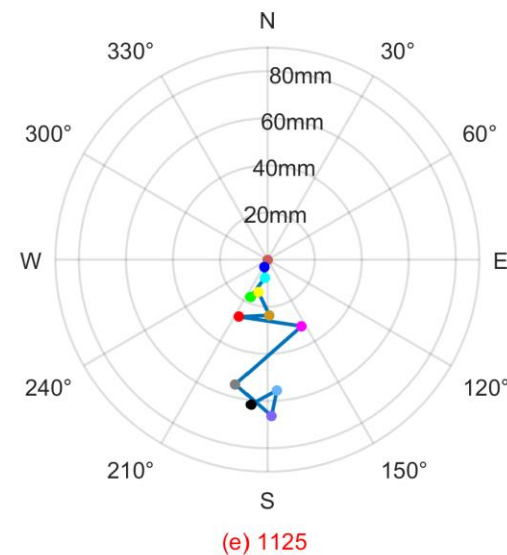
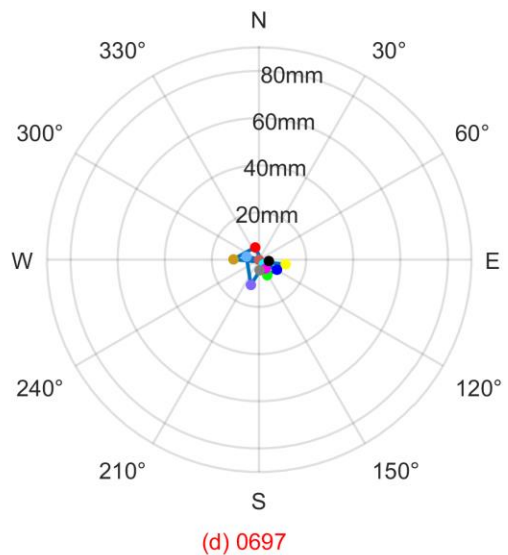
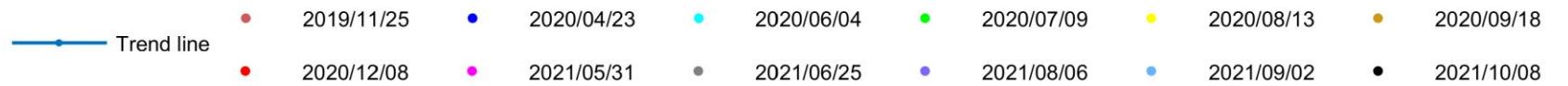
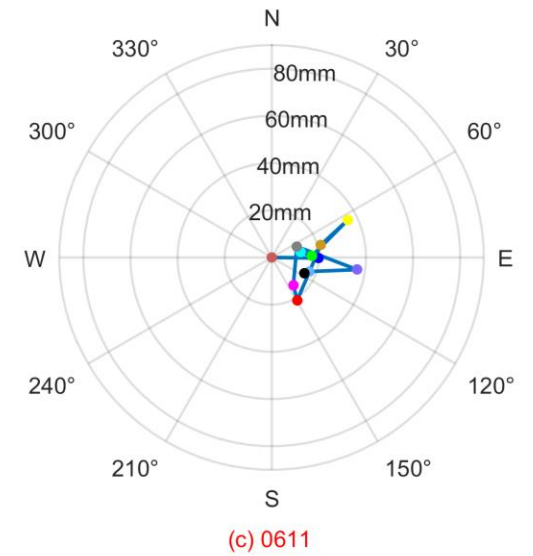
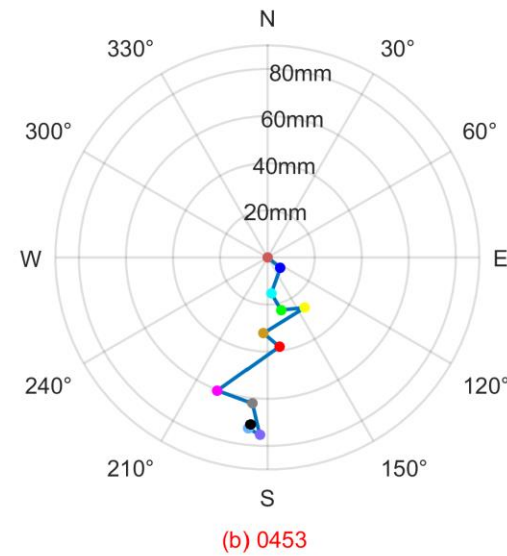
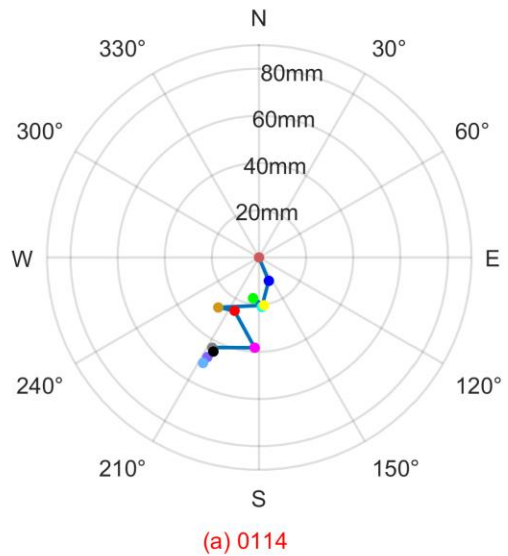
Podzemní zásobník plynu

Deformace terénu nad PZP Tvrdonice určené z PSInSAR (modrá barva) a GNSS (oranžová barva) ve vertikálním směru (horní obrázek, U-D) a východo-západním směru (dolní obrázek, E-W)



- Sesuv Řečica
- 5 monitorovacích bodů GNSS
- 12 observačních kampaní v období 11/2019 až 10/2021
- Délka 1 kampaně = 10 hodin
- Statické diferenční zpracování v RTKLIB

Více informací v Li et al.: *Multi-GNSS Positioning for Landslide Monitoring: A Case Study at the Recica Landslide*. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2022.



- Dach, R. et al. *Bernese GNSS Software, Version 5.2*. AIUB, Switzerland, 2015.
- Hofmann-Wellenhof, B. et al. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*, Springer, 2008.
- Kostelecký, J. et al. *Kosmická geodézie*. Skripta ČVUT Praha, 2008.
- Malys, S. et al. *Compatibility of Terrestrial Reference Frames used in GNSS broadcast messages during an 8 week period of 2019*. Advances in Space Research, 67, 2021. doi:10.1016/j.asr.2020.11.029
- National Geospatial-Intelligence Agency, Office of Geomatics. *Recent Update to WGS 84 Reference Frame And NGA Transition to IGS ANTEX*, 2021. Dostupné z: [https://earth-info.nga.mil/php/download.php?file=\(U\)WGS%2084\(G2139\).pdf](https://earth-info.nga.mil/php/download.php?file=(U)WGS%2084(G2139).pdf)
- Nosek, J. *Testování metody Precise Point Positioning*. Diplomová práce VUT Brno, 2020.
- Subinara, J.S. et al. *GNSS Data Processing, Volume 1: Fundamentals and Algorithms*. European Space Agency, ESA TM-23/1, 2013.
- Teunissen, P. J.G., Montenbruck, O. (ed.). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer, 2017.
- <https://igs.org/>
- <http://etrs89.ensg.ign.fr/>
- IGSMail-7921, IGSMail-8238

Děkuji za pozornost

Michal Kačmařík,
e-mail: michal.kacmarik@vsb.cz
<https://www.hgf.vsb.cz/548/cs/>



Financováno
Evropskou unií
NextGenerationEU



Národní
plán
obnovy

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY