

*Seminář s mezinárodní účastí  
Družicové metody v geodézii a katastru  
VUT v Brně – Ústav geodézie, 2. února 2017*

# **HLAVNÍ MEZNÍKY VÝVOJE GEODETICKÝCH APLIKACÍ GNSS V UPLYNULÝCH 20 LETECH**

*Jaroslav Šimek*

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



*Geodetická observatoř Pecný*

*CZ-251 65 Ondřejov 244*

# „Mezníky“ vývoje: hlediska

- Uživatelé v zeměměřictví a katastru: přístroje, SW, služby
- Kosmický segment (systémy GNSS, signály)
- Referenční systémy a jejich realizace
- Metodologie
- Legislativa (národní, evropská, světová)
- Aplikační oblasti (zeměměřictví, geoinformatika, geovědy)
- Interdisciplinarita
- Vzájemné vazby mezi jednotlivými hledisky
- Zpětné vazby mezi uživateli, výrobcí, poskytovateli služeb
- Národní a nadnárodní hlediska
- GNSS jsou integračním faktorem v zeměměřictví, vědách o Zemi, geoinformace ... z hlediska metodologického i geografického

# Kosmický segment – současný stav

## GPS

- Blok IIA – 5 UDZ (1990-97)
- Blok IIR (1997-2004) – 12 UDZ (14.7/19 let)
- Blok IIR-M 7 (2005-2009) 7 UDZ (9.1/10.9 let)
- Blok IIF (2010-2016) – 12 UDZ (2.6/6.3 let)
- Celkem 31 UDZ (8.7/19.1 let)

## Galileo

- 2011-2012 - 4 UDZ
- 2014 – 2 UDZ (korigované dráhy)
- 2015 (27.3) – 2 UDZ
- 2015 (11.9) – 2 UDZ
- 2015 (19. 12) – 2 UDZ
- 2016 (24.5) – 2 UDZ
- 2016 (17.11) – 4 UDZ

# Kosmický segment – současný stav

## GLONASS

- Rozvoj a udržování systému zajištěno dekretem presidenta RF č. 638 z 17/05/2007
- 21 FOC UDZ
- 2 náhradní UDZ
- 1 testovací
- 3 v údržbě
- Celkem 27 UDZ

## BeiDou

- 2012 – 27.12. zahájena regionální služba
- 5 UDZ GEO
- 5 UDZ IGSO
- 3 UDZ MEO
- 1 UDZ BD-3 – 3. generace
- 2017 – 18 – 5 UDZ BD-3
- 2020 – 30 UDZ – systém kompletní

# Mezinárodní služby GNSS: IGS

- Pravidelná činnost od roku 1993
- Jedna z vědeckých služeb IAG: **IGS**, ILRS, IVS, IDS → IERS
- 200 organizací z 80 států
- 400 observačních stanic, datová a analytická centra
- Cíl: uspokojování potřeb širokého spektra multidisciplinárních vědeckých a praktických aplikací
- Produkty: dráhy družic GPS a GLONASS (< 5 cm), souřadnice a rychlosti stanic (1 cm, resp. 1 mm/rok), korekce palubních a staničních hodin (< 1ns), ZTD, globální ionosférické mapy, parametry rotace a orientace Země (1 cm)
- Produkty v režimu PP, NRT a RT (IGS RT síť >150 stanic)
- Archivace všech observací od r. 1991

# IGS: Projekt MGEX

- Vývoj nových GNSS – kromě GPS a GLONASS jsou zde BeiDou, Galileo, IRNSS, QZSS + regionální podpůrné (augmentační) systémy (SBAS) – WAAS, EGNOS, SCDM, GAGAN
- MGEX od r. 2012: posouzení možnosti využití pozorování všech 6 GNSS pro tvorbu standardních produktů IGS
- Pozorování několika GNSS v síti >100 stanic
- Hlavní pozornost věnována určování přesných drah a korekcí palubních hodin
- První fáze experimentu sloužila k seznámení uživatelů s novými systémy a signály

# Projekt MGEX – hlavní cíle

- Zvětšování počtu multi-GNSS observačních stanic
- Zahrnutí systémů BeiDou, IRNSS a SBAS do procesu výpočtu přesných drah
- Určování systematik z diferencí z kódových měření s použitím multi-GNSS signálů a jejich zahrnutí do určování parametrů ionosféry
- Určování charakteristik družic nových systémů: offsety antén, orientace na dráze, modely tlaku slunečního záření, manévry
- Vývoj jednotných standardů pro určování přesných drah a korekcí hodin
- Vývoj nástrojů pro kontrolu kvality multi-GNSS signálů a jejich aplikace při monitorování sítě (šum, multipath, skoky aj.)

# Mezinárodní služby GNSS: EPN

- Pravidelná činnost od roku 1996
- Koordinace prací na budování a udržování ETRS89, tvorba a poskytování souvisejících produktů (souřadnice stanic, rychlosti, ZTD...)
- Struktura analogická IGS
- 270 permanentních stanic na evropském kontinentu
- 12 stanic na území ČR (ZÚ 5, ÚSMH 4, VÚGTK 2, VUT Brno 1)
- 3 datová centra
- 16 analytických center
- 2 dedikovaná centra
- Tvorba metodik, standardů
- 2008 – nová koncepce realizace ETRS89 (ETRFyy z ITRFyy)
- 2009 – metodika zhuštění EPN

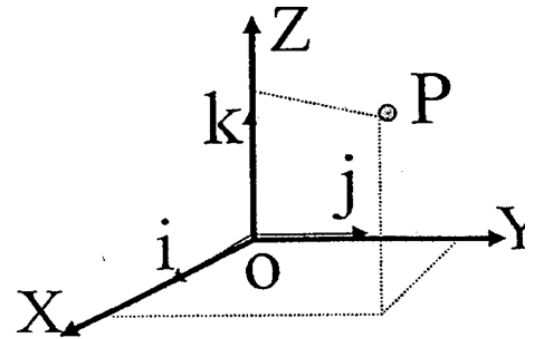


# Referenční systémy a rámce: ITRS, ITRFyy, ETRS89, ETRFyy

- Referenční systém – definuje modely, konvence, konstanty a parametry pro matematické vyjádření veličin
- Referenční rámec – fyzická a matematická realizace referenčního systému
- Geodetické datum – stanoví jednoznačný vztah mezi referenčním rámcem a systémem přiřazením daných parametrů (souřadnice počátku, směr os, délkový rozměr)

# Mezinárodní terestrický referenční systém ITRS

- Trojstěn v euklidovském afinním prostoru rotující se Zemí
- Počátek v těžišti Země
- Rozměr: metr (SI)
- Orientace: BIH 1984.0
- Časový vývoj ITRS orientace zohledněn podmínkou NNR s ohledem na horizontální tektonické pohyby přes celý povrch Země



$$\lambda = \|\vec{E}_i\|_{i=1,2,3}$$

$$\vec{E}_i \cdot \vec{E}_j = \lambda^2 \delta_{ij}$$

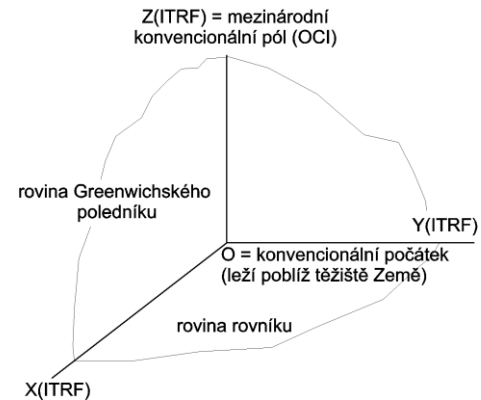
$$(\delta_{ij} = 1, \quad i = j)$$

# Mezinárodní terestrický referenční rámec – ITRF

- Soubor materializovaných bodů s jejich kartézskými souřadnicemi, které realizují ITRS
- Jednoznačně definován 7 (14) parametry: 3 (6) souřadnice počátku, 1 (2) rozměr, 3 (6) orientace
- Tyto parametry jsou relativní hodnoty
- Dosavadní realizace: ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF93, ITRF94, ITRF95, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014
- ITRF2014: kombinace časových řad měření metodami SLR, VLBI, GPS a DORIS

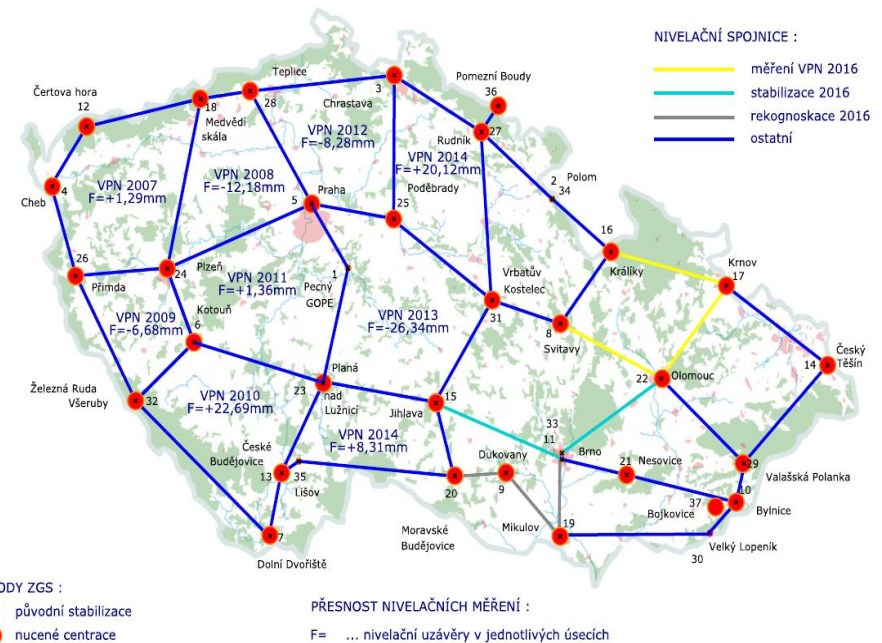
# Terestrický referenční rámec ITRF2014

- Produkt IERS
- Vstup: časové řady souřadnic a EOP ze čtyř služeb IAG – **IGS**, ILRS, IVS, IDS do konce r. 2014 z reprocessingu!
- **2 inovace**: pro stanice s dostatečně dlouhou dobou pozorování určen roční a půlroční člen (pro všechny techniky); na základě dat z GNSS vytvořen model post-seismických deformací
- **Počátek**: nulové translace mezi ITRF2014 a řešením ILRS
- **Měřítko**: nulový rozdíl mezi ITRF2014 a průměrem z IVS/ILRS
- **Orientace**: nulové rotace mezi ITRF2014 a ITRF2008 pro epochu 2010.0; aplikováno na stanice „opěrné sítě“, použité pro výpočet transformačních parametrů

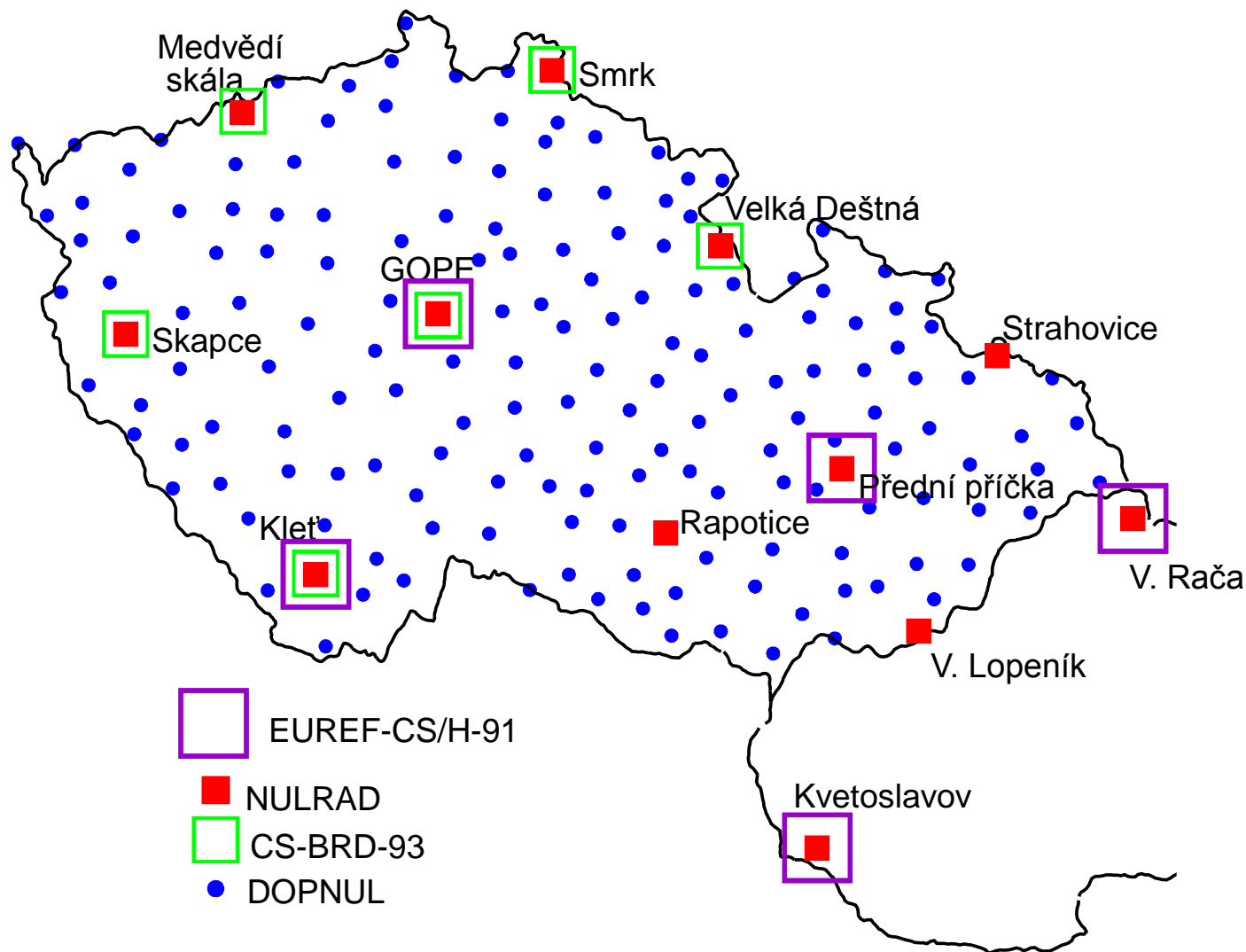


# Implementace ETRS89 v ČR

- Geodetické základy nové generace: 1991 - 1996
- EUREF-CS/H-91 – 3 body, 1991
- NULRAD – 10 bodů, 1992
- DOPNUL – 176 bodů, 1993 – 1994; zpřesňování po roce 2006
- Základní geodynamická síť – 32 bodů – 1995 – 1996 (GPS); od 2004 revize, nové stabilizace, EUVN\_DA, měření stále probíhají

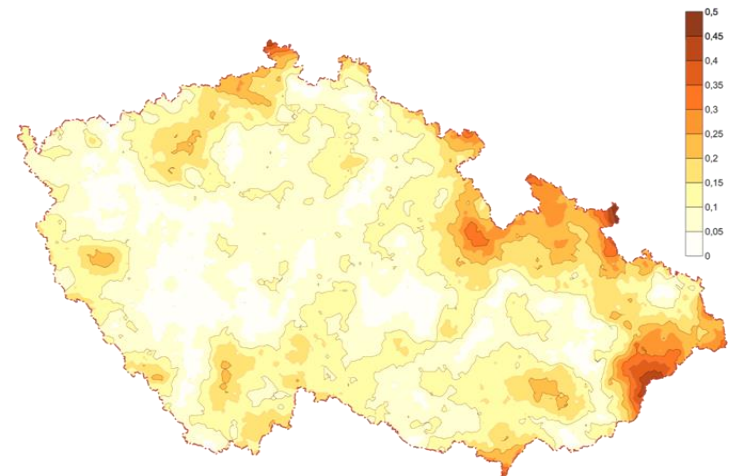
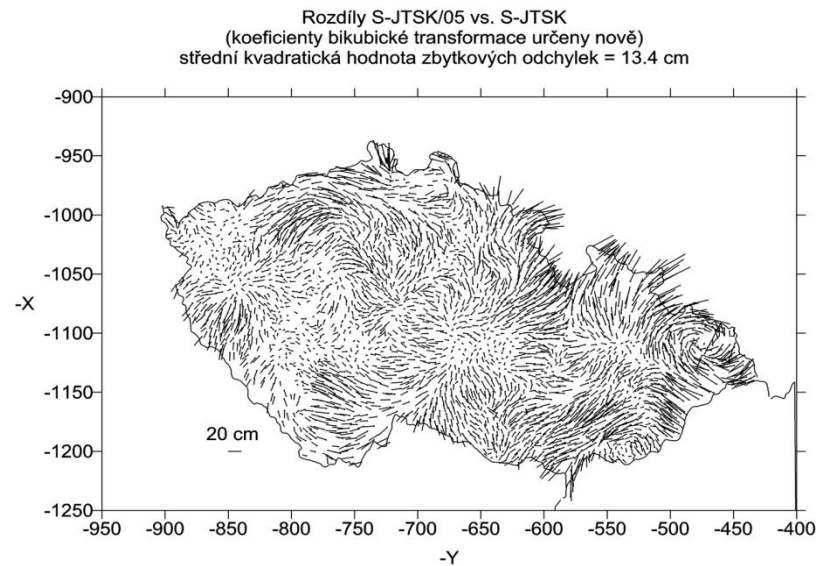


# Geodetické základy nové generace v ČR



# Zhuštění ETRS89 a zpřesnění S-JTSK

- 1995 – 2006: projekt „Zhuštění“ (KÚ) – určení souřadnic ETRS89 pro cca 43000 zhušťovacích bodů
- 1997 – 2007: projekt „Výběrová údržba“ (ZÚ) – rámec tvořený cca 3500 body TS se souřadnicemi ETRS89
- Rektifikace systému JTSK s využitím výsledků obou projektů → S-JTSK/05
- S-JTSK/05 → S-JTSK: převodní tabulky



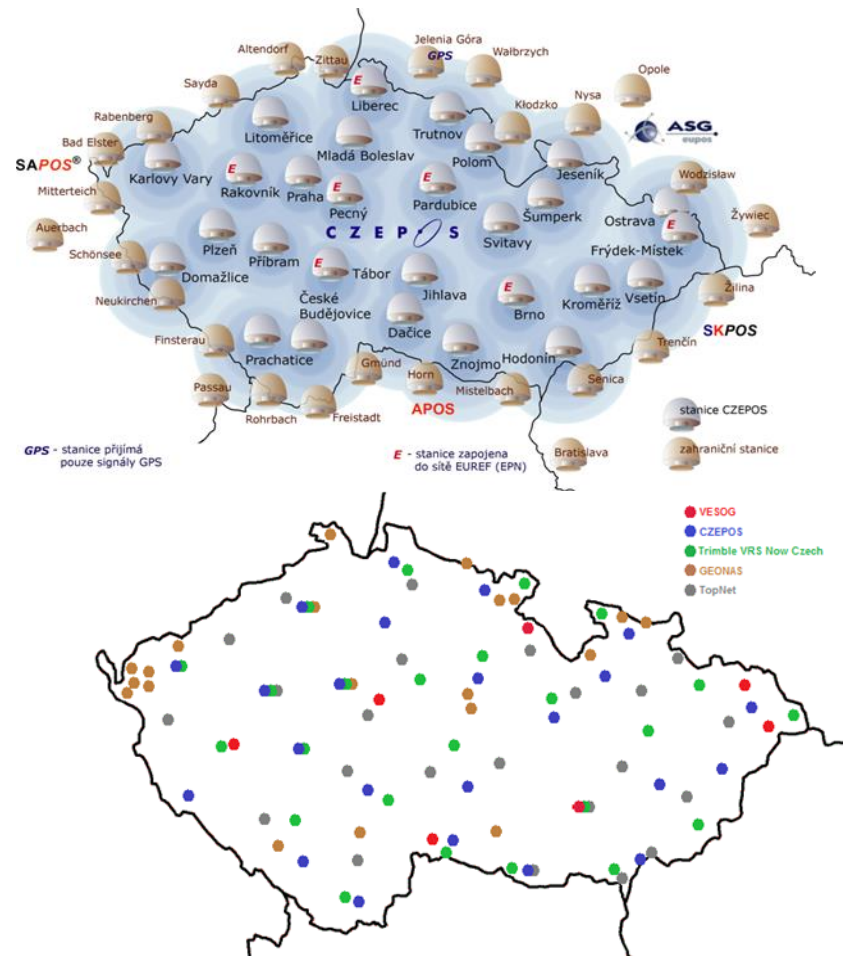
# ETRS89, ITRF: legislativa

- Nařízení vlády ČR č. 116/1995 o stanovení závazných geodetických ref. systémů – **WGS84, ETRS**
- Vyhláška ČÚZK č. 31/1995 – **síť 0. řádu a geodynamická síť, náležitosti dokumentace výsledků získaných technologií GNSS**
- Nařízení vlády ČR . 430/2006 – **ETRS, WGS84**
- Vyhláška ČÚZK č. 383/2015
- ČÚZK – Návod pro správu geodetických základů ČR z 21. 09. 2015
- Nařízení Evropské komise z r. 2003 o ETRS89
- Nařízení Evropské komise z r. 2010 o EVRS
- Rezoluce 69. zasedání Valného shromáždění OSN z 26.2. 2015 o Globálním Geodetickém Referenčním rámci pro udržitelný rozvoj
- Pracovní skupina pro GGIM OSN



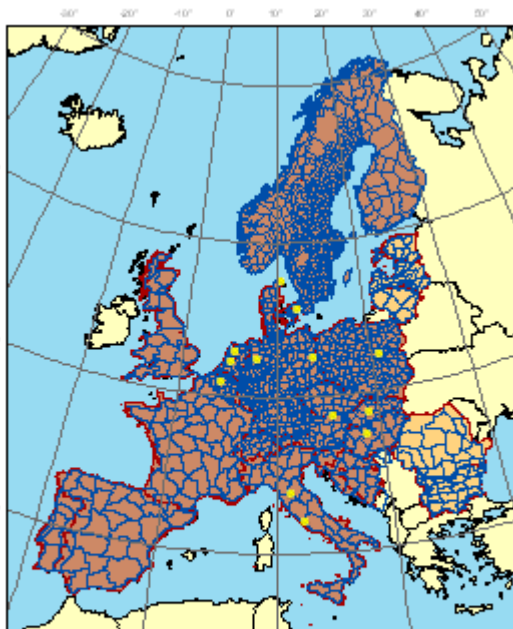
# Služby založené na GNSS

- EUPOS – 2002
- CZEPOS – 2004/2005
- Reálný čas: RTK, RTK-FKP, RTK-PRS, RTK3, VRS3, DGPS
- Služba VRS s formáty CMR/CMR+
- Post-processing
- TopNet 27 PS
- Trimble VRS NOW Czech – 29 PS
- GEONAS – 19 PS
- byS@T – 4 PS (2000)



# GNSS a výškové referenční rámce

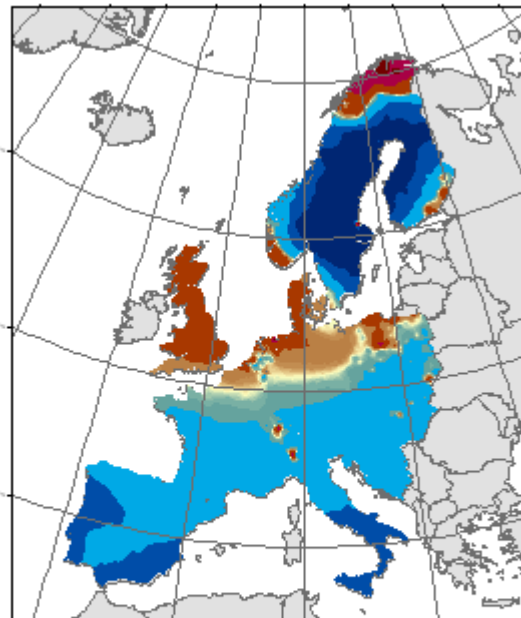
- EUVN – 21. – 29.5. 1997: 196 stanic – 66 EUREF, 13 národních PS, 54 UELN, 63 mořských vodočtů
- EVRF2000 (UELN95/97)
- EVRF2007 – 13 referenčních bodů
- Kinematické charakteristiky (GNSS + ON)



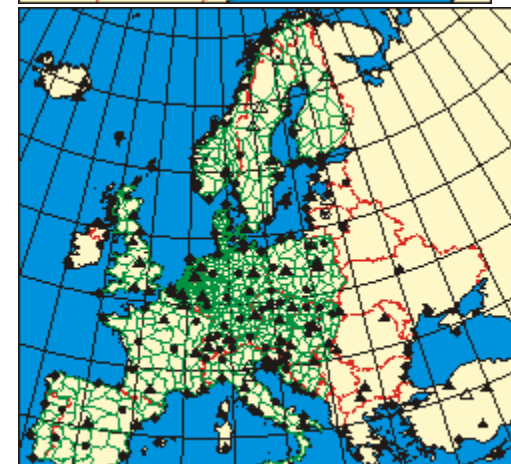
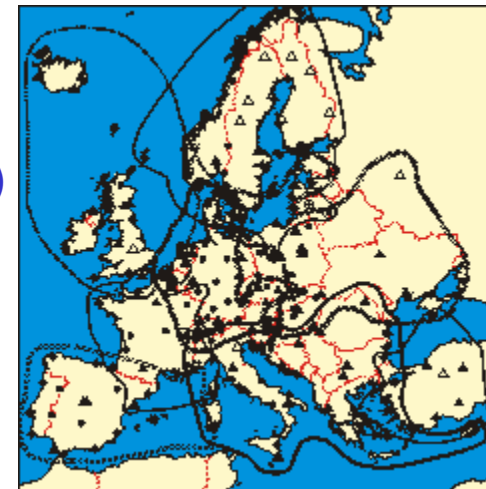
Extension of UELN

up to 1998

• Datum points of EVRF2000



kgal - mm



# Zdroje pro studium geokinetiky

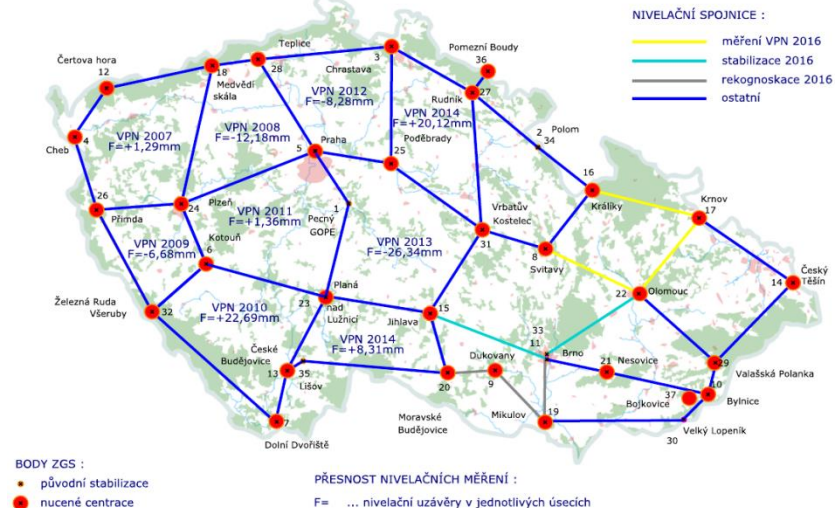
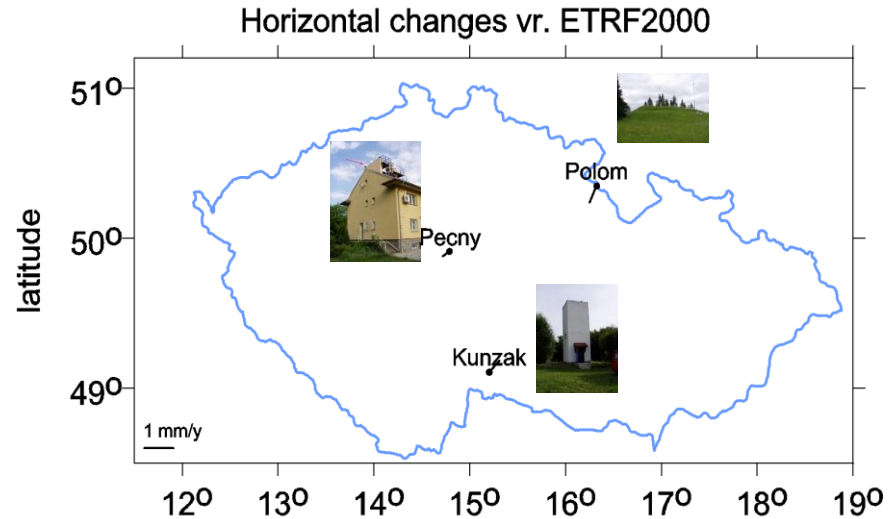
- Kinematika zemského povrchu je prostorový problém, při jehož řešení se však rychlosti dosud separují na horizontální a vertikální složku
- Pro střední Evropu jsou dosud k dispozici data:
  1. CERGOP, CERGOP 2 1993 - 2006; Konsorcium CEGRN od 2001 → Caporali et al., JoGD 2008, Tectonophysics 2009
  2. EUREF/EPN (od 1995)
  3. EUPOS ECC – od 2011 → Kenyeres 2015, 2016
  4. UELN95/98; EVRF2000, EVRF2007
  5. ECGN (2002 – dosud)
  6. UNIGRACE (1997 – 2001)

# Určování výšek pomocí GNSS

- Denní opakovatelnost N/E/U → 2 mm/2 mm/6 mm, určení rychlostí  $\sigma < 1$  mm/y
- Přesnost určení výšek z GNSS:  $\sigma \sim 7$  mm
- Vertikální rychlost 1.0 mm/rok je detekovatelná na základě 3-leté časové řady pozorování GNSS
- Obecná dostupnost
- Sítě permanentně pozorujících stanic
- Variace prostorové polohy
- Vertikální složka se určuje s nižší přesností než složky vodorovné
- Mnoho zdrojů chyb: korelace mezi parametry a konfigurací družic, troposférická refrakce, referenční rámec, pohyby geocentra, chyby v dráhách, změny polohy stanic v důsledku zbytkových deformačních vlivů oceánů a atmosféry a rovněž exogenních deformací, PCV antény, multipath)
- Náročné zpracování pro eliminaci nebo potlačení systematických vlivů

# Evropská kombinovaná geodetická síť - ECGN

- Koncepce z r. 2002
- Dlouhodobá stabilita TRS na úrovni  $10^{-9}$ , zejména pro vertikální složku viz např. Ihde et al., 2005, Poutanen et al., 2015
- Příspěvek terestrické geodetické infrastruktury
- Kombinace geometrického (GNSS) a tíhového prostoru (výšky, tíže, mořská hladina)
- Realizace: stálá/opakovaná pozorování tří typů – GNSS, nivelace, AG

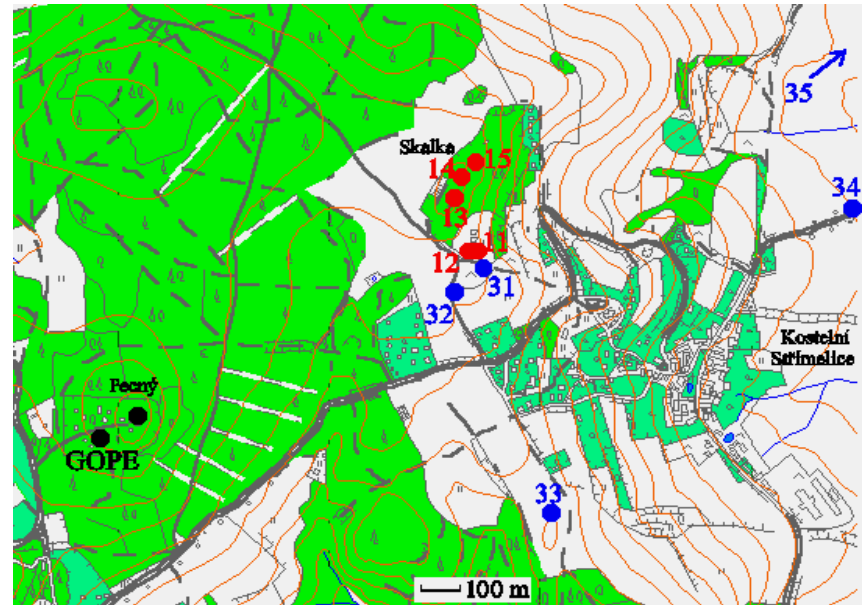


# Metodologie

- Statická metoda
- Rychlá statická metoda
- Kinematická metoda
- DGPS – diferenční GPS
- RTK – kinematická metoda v reálném čase; několik variant; příjem korekcí ze sítě permanentních referenčních stanic; rozvoj v souvislosti s CORS
- **PPP – Precise Point Positioning**; rozvoj okolo roku 2005; autonomní metoda určování polohy z jedné stanice založená na využití velmi přesných drah, korekcí palubních hodin a modelování systematických a dalších vlivů; **velmi perspektivní metoda zejména v souvislosti s orientací na multi-GNSS konstelace**

# GNSS a metrologie

- Metrologický řád ČÚZK z 2.7. 2009, odst. 7.4 – kalibrace GNSS aparatur; periodičita 2 roky
- Referenční etalon prostorové polohy ČR ECR 110-14 vyhlášen ČMÚ 21. 05. 2009
- Testovací a kalibrační základna GNSS Skalka
- Měřicí rozsah 2m – 10 km
- Opakovatelnost: 1,25 mm pro horizont. složku, 4,10 mm pro výškovou složku

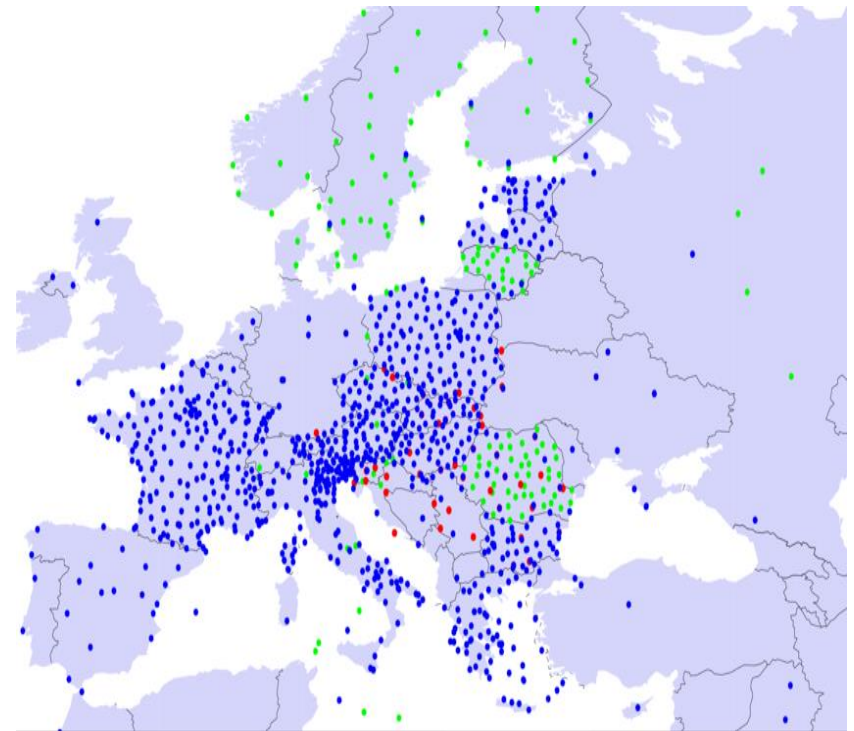
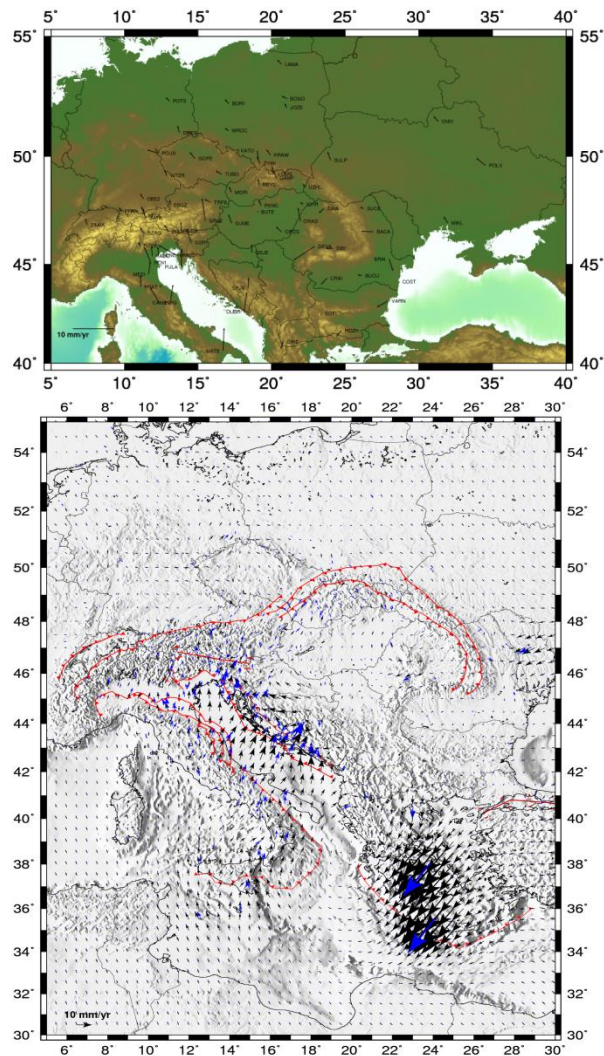


# Interdisciplinarita: GNSS a studium geodynamiky Evropy: EPOS (implementace 2016 – 2020)

- European Plate Observing System – dlouhodobý projekt pro integraci výzkumných infrastruktur, jeden ze tří prioritních projektů EC v ESFRI
- 25 států, 4 mezinárodní organizace, 256 národních výzkumných infrastruktur
- 4939 seismických stanic
- 2272 GNSS přijímačů
- 118 laboratoří
- 828 přístrojů
- 464 TB seismických dat
- CzechGeo – 8 geovědných institucí z ČR: GFÚ, ÚSMH, VÚGTK, MFF UK, PřF UK, ÚG, MU Brno, ČGS

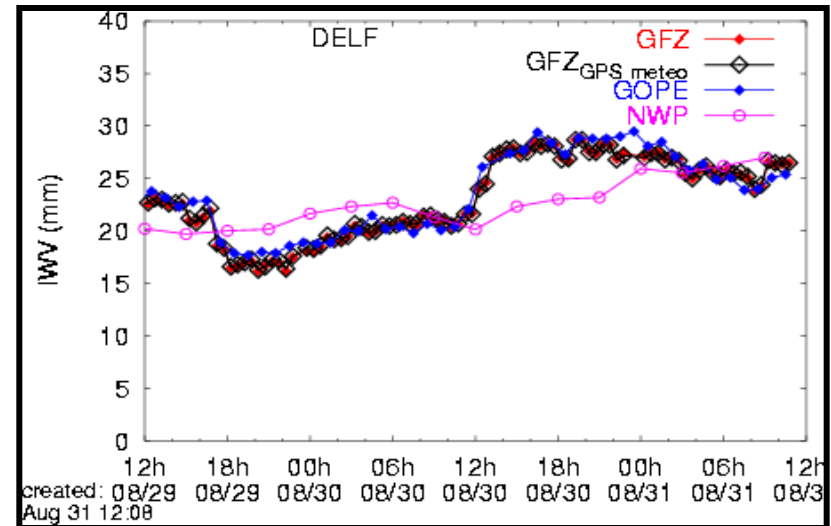
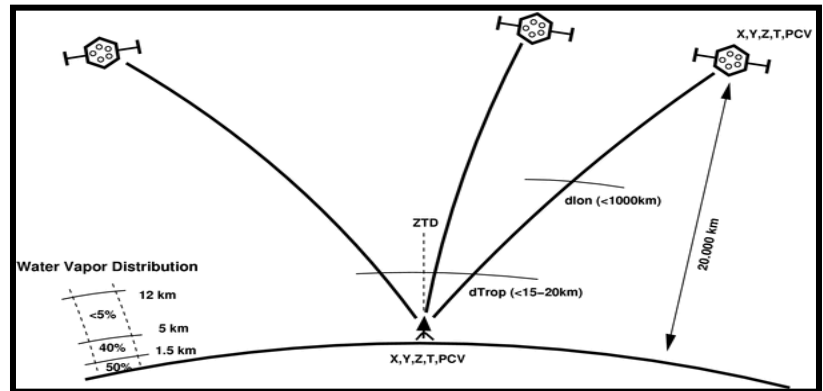


# Příspěvek GNSS ke studiu geodynamiky Evropy: CEGRN a ECC – epochová a permanentní měření



# Interdisciplinarita: GNSS a studium atmosféry

- Známa přesná poloha přijímače a dráha
- Eliminace ionosféry a korekce hodin UDZ a přijímače
- Aplikace modelů (APC, oceánické zatížení atd.)
- Odhadovaným parametrem je ZTD

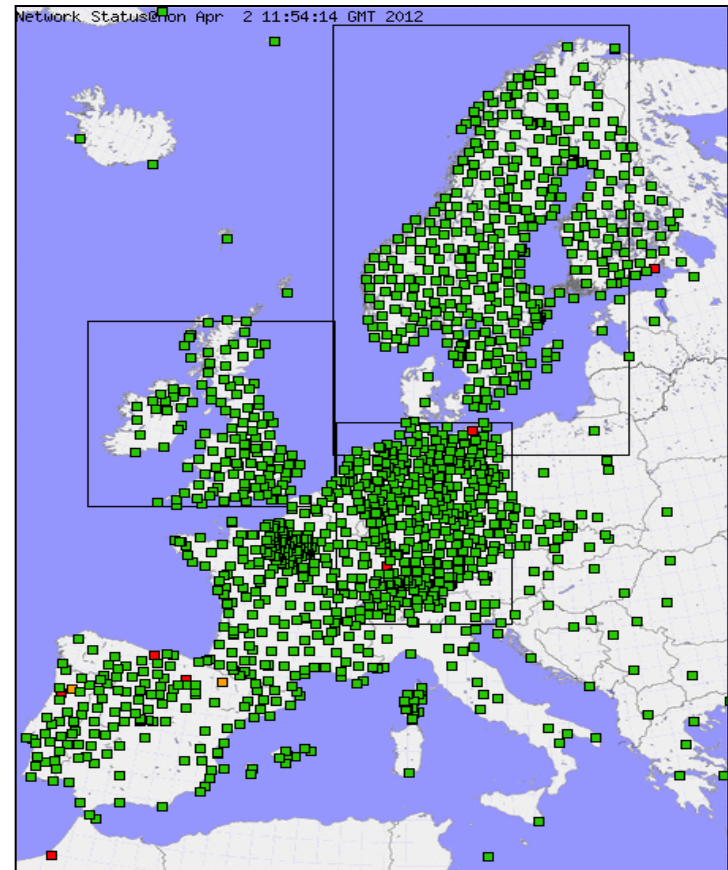


# GNSS v meteorologii

- COST 716, TOUGH, E-GVAP I, II, III, GNSS4SWEC (COST 1206)
- Koordinovaný vývoj nových metod a produktů na bázi multi-GNSS
- Lepší pochopení krátkodobých procesů v atmosféře
- Nové zpracování dlouhých časových řad GNSS ZTD pro klimatologii
- Kooperace s IGS a EUREF ve prospěch E-GVAP
- **Koordinované využití GNSS a meteorologických dat k oboustrannému prospěchu**

# GNSS4SWEC – cíle WG1

- WG1: RT Demonstration Campaign
- Vývoj sofistikovaných troposférických produktů pro numerické předpovědi
- Konzistentní troposférické produkty pro klimatologii
- Využití dat numerických modelů pro přesné určování polohy z GNSS (mapovací funkce, gradienty, troposférické modely pro RT)



# Závěry a výhled (1)

- Rozvoj kosmického segmentu vede ke zvýšení potenciálu geodézie při řešení fundamentálních úloh a četných aplikací
- Geodézie vytváří základ pro kosmický výzkum, navigaci, technické obory, katastr, globální infrastrukturu prostorových dat, územní plánování a rozvoj atd.
- Multi-GNSS konstalace vede k větší flexibilitě, robustnosti, přesnosti a aplikabilitě geodetických nástrojů

## Závěry a výhled (2)

- Plně funkční multi-GNSS prostředí přispěje k řešení interdisciplinárních vědeckých problémů (geodynamika, seismika, troposféra, ionosféra)
- Větší počet družic přinese zlepšení konvergence při PPP, obohatí výzkum atmosféry, přispěje k dekorelaci parametrů troposféry, hodin a výšek
- Zdokonalené signály povedou ke snížení multipathu a k větší robustnosti v případě slabého signálu
- Stabilní hodiny zkvalitní PPP metodu v reálném čase a přispějí k přesnější predikci drah

# Závěry a výhled (3)

- Multi-GNSS konstalace povede ke zvýšení přesnosti určování výškové složky
- Ke zpřesnění výškové složky významně přispějí rovněž modely troposféry, vytvářené na základě synergie mezi meteorologií a geodetickými nástroji založenými na GNSS
- Metody GNSS v kombinaci s velmi přesným modelem kvazigeoidu v budoucnosti mohou nahradit klasickou nivelaci na úrovni přesnosti 4. – 3. řádu
- Metody GNSS budou využívány pro monitorování stability výškových referenčních rámců, určování rozdílů mezi výškovými systémy (kombinace hodnoty geopotenciálu, geometrických a nadmořských výšek) a pro vytváření referenčních rámců pro aplikace metod SAR a InSAR

**Děkuji Vám za pozornost!**