

**SYLABUS 6. PŘEDNÁŠKY Z
GEODÉZIE 2
(Geodetické základy v ČR)**

**1. ročník bakalářského studia
studijní program G
studijní obor G**

doc. Ing. Jaromír Procházka, CSc.

březen 2016

Geodézie 2 – přednáška č.6

GEODETICKÉ ZÁKLADY NA ÚZEMÍ ČR

(citace webovských stránek ČÚZK)

V minulosti bylo na území České republiky vybudováno plošné bodové pole polohové, výškové a tíhové. V období od dvacátých let minulého století tak byl na území České republiky vytvořen na svoji dobu velice kvalitní referenční rámec, určený ve všech třech složkách, který plně vyhovoval pro navazující podrobná měření, vytyčování hranic pozemků, liniových a jiných staveb apod. Bodová pole se stala základem pro definování postupně užívaných souřadnicových systémů.

Prudký nástup nových technologií určování polohy, zejména družicového systému GPS, možnost automatizovaného zpracování výsledků a vyrovnání rozsáhlých geodetických sítí, přechod od podpory národních systémů k rozvoji kontinentálních a globálních referenčních geodetických systémů a ke sledování geodynamických vlivů na jejich stabilitu, způsobují změny v přístupu k určování souřadnicových parametrů, operativnosti užití geodetických bodů a v konečném důsledku i ve způsobu jejich umísťování a stabilizaci v terénu. Tyto skutečnosti vyvolaly v průběhu 90. let minulého století v nejužívanější kategorii geodetických bodů, tj. polohového bodového pole, realizaci dvou základních projektů:

- a) Projekt připojení polohového bodového pole České republiky do evropského referenčního rámce EUREF, s následnou realizací geocentrického souřadnicového systému ETRS 89 a určením souřadnic dostatečného počtu trigonometrických bodů v tomto systému. Hustota těchto bodů byla stanovena na 4-5 trigonometrických bodů na jeden triangulační list. Projekt se postupně realizoval zaměřením 3 základních trigonometrických bodů v mezinárodní měřické kampani EUREF-CS/H/91, následným vybudováním a zaměřením geocentrických souřadnic sítě 0. řádu – NULRAD (10 bodů), jejím plošným doplněním a rozvinutím do sítě DOPNUL (176 bodů) a konečným zhuštěním do sítě vybraných trigonometrických bodů s geocentrickými souřadnicemi, určenými přímým měřením v počtu 3096 bodů na území celé České republiky. Realizace tohoto projektu byla zahájena v roce 1996 a projekt byl ukončen v roce 2006.
- b) Projekt revize stávajících, doplnění a polohové určení nových zhušťovacích bodů technologií GPS, s přesností srovnatelnou s přesností trigonometrických bodů, a to plošně na celém území České republiky vyjma lesních komplexů. Projekt, který realizují katastrální úřady, byl zahájen v roce 1994 a dokončen dle náročnosti v jednotlivých krajích v průběhu let 2004 – 2006, s výsledkem přibližně 35000 stabilizovaných zhušťovacích bodů, umístěných tak, aby umožňovaly přímé a snadno přístupné využití pro navazující podrobná měření.

Cílem činností v geodetických základech je definovat a udržovat prostorovou polohu geometrického základu státu v geodetických referenčních systémech: národním polohovém systému (S-JTSK), evropském geocentrickém systému (ETRS 89), mezinárodním výškovém systému Balt po vyrovnání a v mezinárodním tíhovém systému Gr-1995.

POLOHOVÉ GEODETICKÉ ZÁKLADY

V rámci souřadnicových výpočtů v předmětu Geodézie 1, byly definovány měřické a posléze geodetické body, které tvoří bodová pole a geodetické sítě na území České republiky, uvedeno rozdělení bodových polí podle účelu a podle významu, a to s důrazem na polohová bodová pole, včetně způsobů stabilizace a signalizace polohových bodů a způsobu jejich číslování (*Sylabus přednášky GDZ1 č.6*).

V úvodu přednášek předmětu Geodézie 2 bude věnována pozornost dalšímu rozšíření dosavadních znalostí o způsobech volby a určení polohových geodetických základů, včetně jejich historického vývoje.

Při zaměřování větších územních celků a použití klasických metod měření se postupovalo zásadně z „velkého do malého“, s ohledem na omezení vlivu hromadění nevyhnutelných měřických chyb. Polohový základ geodetických sítí je tvořen trojúhelníky, jejichž vrcholy se nazývají trigonometrické body a takto vytvořená geodetická síť se označuje jako **síť trigonometrická** (trojúhelníková). Trojúhelník byl volen jako základní prvek geodetických sítí pro svou jednoduchost, tuhost i pro snadnost výpočtů (*skripta Geodézie 1, str.178 a Geodézie 2, str.4*).

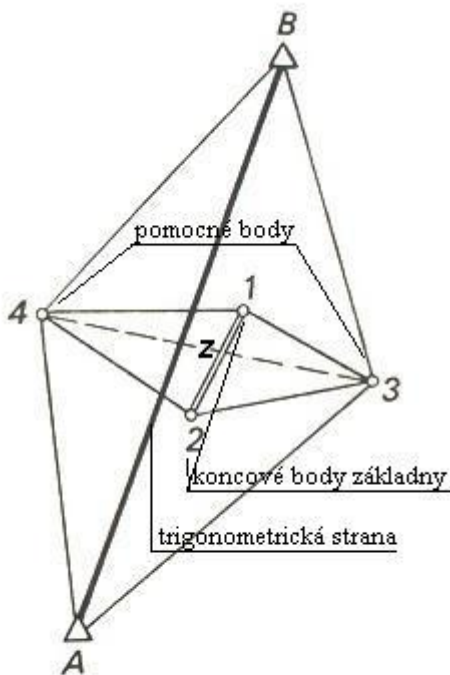
Princip triangulace

Vzhledem ke skutečnosti, že založení, zaměření a výpočty v trigonometrických sítích jsou náplní výuky v předmětech vyšší geodézie, geodetická astronomie, vyrovnávací počet a matematická kartografie, bude v předmětu GD2 zmíněn pouze princip výše uvedené problematiky (*Vykutíl, J.: Vyšší geodézie, Kartografie Praha, 1981, skripta Geodézie 2*).

Triangulací se nazývá soubor měřických prací v trigonometrických sítích, jejichž účelem je určení tvaru a rozměrů zemského tělesa (použití triangulace pro stupňová měření - *Sylabus přednášky GDZ1 č.1*), ale především vytvoření geodetického základu pro všechny navazující zeměměřické činnosti od mapování, přes geodetické práce v katastru nemovitostí až po speciální měřické práce ve stavebnictví, průmyslu atd.

Jak již bylo uvedeno výše, byla trigonometrická síť budována zásadně z „velkého do malého“, tj. nejprve byly zvoleny, stabilizovány a polohově určeny vrcholy trojúhelníků o stranách od cca 20 do 60 km (výjimečně i více), s ohledem na vzájemnou viditelnost a rovnoměrné rozložení po zájmovém území, tedy především na dominantních místech krajiny (vrcholy kopců). Velikost vrcholových úhlů přitom nesměla klesnout pod 30° a přesáhnout 120° (snaha, aby trojúhelníky byly pokud možno rovnostranné). V každém trojúhelníku byly změřeny všechny vodorovné úhly (nadbytečné prvky pro kontrolu a vyrovnání) a převedeny na rotační elipsoid (vyšší geodézie), popř. do roviny zvoleného zobrazení (matematická kartografie). Součet úhlů v trojúhelníku (sférickém) je větší než 200 gon o tzv. sférický exces (sférická trigonometrie).

Rozměr trigonometrické sítě byl určen z délky tzv. geodetických základů (5 km až 10 km), které byly voleny ve vhodném rovinatém území, s ohledem na použitou metodu měření délky základny. Ty byly měřeny přímo, různými základnovými soupravami, jejichž podstatnou součástí byla tyčová měřidla (kratší délky základů prvních triangulačních měření) a později invarové dráty délky 24 m (delší základny), vzhledem ke své nepatrné délkové roztažnosti a rychlejšímu postupu. Relativní chyba v délce základny byla stanovena hodnotou cca 1:1000000, tedy 1mm na 1km. Geodetická základna navazovala na trigonometrickou stranu postupně rozvíjenou



Obr.1 Příklad základnové rozvinovací sítě

tzv. základnovou rozvinovací sítí (obr.1), kterou se prostřednictvím přesného úhlového měření přenášela délka základny na délku přilehlé trigonometrické strany (zde bylo nutno zásadu „z velkého do malého“ vědomě porušit).

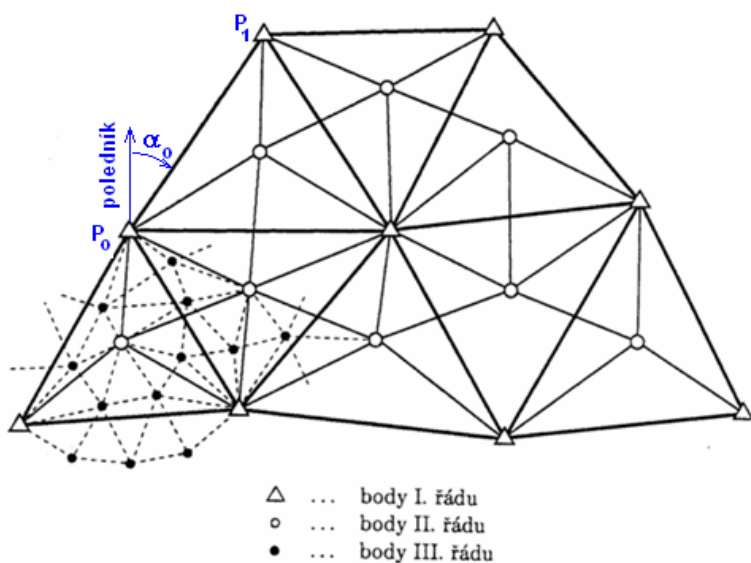
Postupným řešením sférických trojúhelníků s vyrovnanými úhly byly vypočteny délky všech stran v síti. Koncem 20. století byly délky základen či výchozí trigonometrické strany měřeny elektronickými dálkoměry. V současnosti se využívá metod kosmické geodézie.

K určení polohy a orientace sítě na elipsoidu stačilo změřit astronomicky souřadnice φ_0, λ_0 výchozího bodu P_0 a azimut α_0 na bod P_1 (obr.2). Prostřednictvím vyrovnaných úhlů byly vypočteny azimuty ostatních stran v síti. Pro lepší umístění sítě na elipsoidu a její přesnější orientaci byly měřeny astronomické souřadnice a azimuty na

dalších vybraných bodech sítě, tzv. Laplaceových bodech.

Poloha bodů základní trigonometrické sítě byla určena s relativně vysokou přesností ve vhodně zvoleném souřadnicovém systému. Takto vybudovaný základ trojúhelníkové sítě tvoří **trigonometrickou síť I. řádu**. Trigonometrická síť I. řádu byla postupně zhušťována vkládáním dalších bodů, jejichž vzájemným spojením vznikla trigonometrická síť II. řádu o kratších stranách a obdobně dalším zhušťováním byly budovány trigonometrické sítě nižších řádů (III. a IV.) až po tzv. podrobnou trigonometrickou síť (V. řád) o průměrné délce stran kolem 2 km (obr.2).

Vhodnou volbou postupů pro zaměření vodorovných úhlů v různých řádech trigonometrických sítí



- △ ... body I. řádu
- ... body II. řádu
- ... body III. řádu

(Schreiberova metoda pro I. řád a od II. řádu metoda v řadách a skupinách – 12 skupin pro II. řád a dále snížení vždy o 3 skupiny pro každý nižší řád) bylo dosaženo odpovídající přesnosti trigonometrických bodů všech řádů, takže souřadnicová směrodatná odchylka charakterizující relativní přesnost mezi sousedními trigonometrickými body V. řádu je cca 15 mm.

Obr.2 Příklad postupného budování plošné trigonometrické sítě od I. do III. řádu

Základní trigonometrické sítě na území České republiky a jejich uplatnění v rovinných souřadnicových systémech (Vykuřil, J.: *Vyšší geodézie, skripta Geodézie 2*)

- **Katastrální triangulace (1821-1864)**

Pro vyhotovení map tzv. stabilního katastru v měřítku 1:2 880 byla na našem území poprvé vybudována souvislá trigonometrická síť. Měřické a výpočetní práce byly pro celou rakousko-uherskou monarchii svěřeny „Triangulační a početní kanceláři“ ve Vídni. Trigonometrická síť I. řádu (délky stran 15 až 30 km), byla dále zhuštěna trigonometrickou sítí II. (délky stran 9 až 15 km) a III. řádu (délky stran 4 až 9 km). Rozměr sítě v sáhové míře byl pro celé území Rakouska - Uherska určen ze 4 délkově zaměřených základů, jejichž koncovým bodům byla astronomicky určena poloha a azimut. V trojúhelnících byly zaměřeny všechny vrcholové úhly, a jejich vyrovnané hodnoty byly použity k určení polohy dalších bodů trigonometrické sítě.

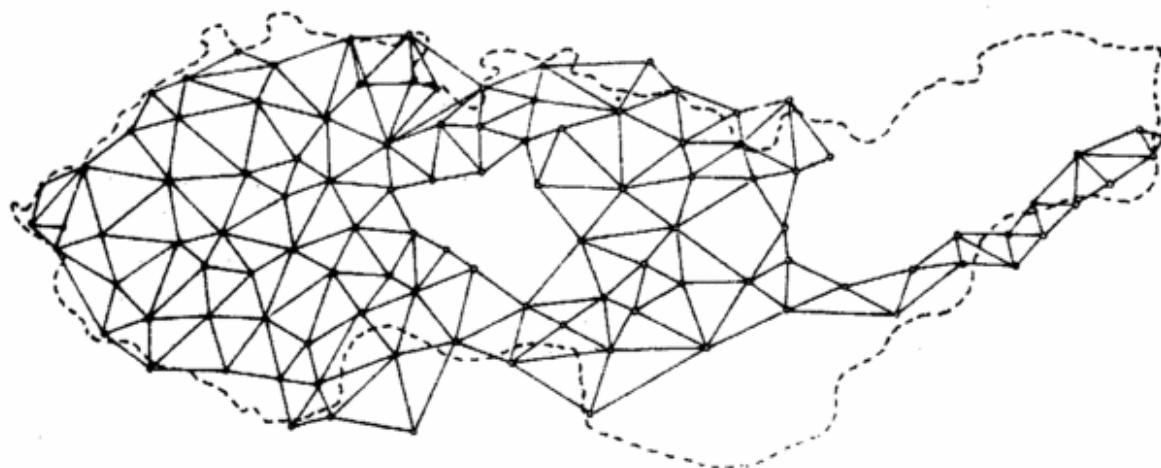
Pro potřeby podrobného měření, byla trigonometrická síť dále zhuštěna body IV. řádu, které ale byly určeny pouze tzv. grafickou triangulací s použitím měřického stolu (grafickým protínáním). Přesnost jejich polohy je tak podstatně horší, než přesnost početně určených bodů prvních tří řádů.

Trigonometrické body byly původně stabilizovány dřevěnými kůly a teprve po zhruba 20 letech byla provedena jejich trvalá stabilizace kamennými mezníky, takže docházelo k nejistotě, zda nová stabilizace odpovídá dříve určeným souřadnicím bodu.

Trigonometrická síť byla převedena z elipsoidu ($a = 6\,376\,045$ m, $i = 1/310$) do roviny transverzálním bezprojekčním válcovým zobrazením Cassini-Soldnerovým (*Sylabus přednášky GDZ1 č.6, a později matematická kartografie*). Pro určité území (jednotlivé země mocnářství) se válcová plocha dotýkala zvoleného poledníku a jeho průmět do roviny tvořil osu X (kladná poloosa směřovala k jihu), kolmice v počátku tvořila osu Y (kladná poloosa směřovala na západ). Pro Čechy má rovinná pravoúhlá souřadnicová soustava počátek v trigonometrickém bodě Gusterberg v Horních Rakousích, pro Moravu v bodě daném věží kostela sv.Štěpána ve Vídni a pro Slovensko v trigonometrickém bodě Gellérthegy v Budapešti. V místech vzdálenějších od osy X , dochází ke značnému délkovému zkreslení (až 50 cm/km) a velké změně směrů (až 50''/5 km). Důležitost vědomostí o tomto souřadnicovém systému vyplývá ze skutečnosti, že cca 70% území České republiky je dosud pokryto katastrálními mapami v tomto souřadnicovém systému.

- **Vojenská triangulace (1862 – 1898)**

Jedná se o trigonometrickou síť I. řádu (obr.3), která byla vybudována Vojenským zeměpisným ústavem ve Vídni, podle přesných pravidel, stanovených Mezinárodním sdružením pro měření Země, ve kterém bylo zapojeno kolem 20 evropských států. Za výpočetní plochu byl zvolen Besselův elipsoid z r. 1841, rozměr sítě byl určen z 22 přímo měřených geodetických základů (z toho 2 na našem území – u Chebu a u Josefova) a vodorovné směry byly změřeny se směrodatnou odchylkou $\sigma_{\varphi} = 0,93''$, vypočtenou z uzávěrů trojúhelníků Ferrerovým vzorcem. Základním bodem vojenské triangulace byl trigonometrický bod Hermannskogel u Vídně, na němž byly určeny zeměpisné souřadnice φ'_0 , λ'_0 a azimut α'_0 na bod Hundsheimer. Takto určené zeměpisné souřadnice a azimut byly považovány za geodetické, čímž byla v základním bodě ztotožněna normála k elipsoidu s tížnicí. Pozdější astronomická měření v síti prokázala chybu v poloze a orientaci, způsobenou právě značnou tížnicovou odchylkou v základním bodě. Síť měla mezery na Moravě a zejména na Slovensku (obr.3).



Obr. 3 Vojenská trigonometrická síť - I. řád

Vojenská trigonometrická síť I. řádu byla zhuštěna sítěmi II. a III. řádu, do roviny převedena nebyla. Přímým měřením v terénu byla vyhotovena mapa 1:25 000, z ní byla odvozena tzv. „speciální“ mapa 1:75 000 a další mapy menších měřítek. Listy map byly ohraničeny poledníky a rovnoběžkami, body se zakreslovaly svými zeměpisnými souřadnicemi.

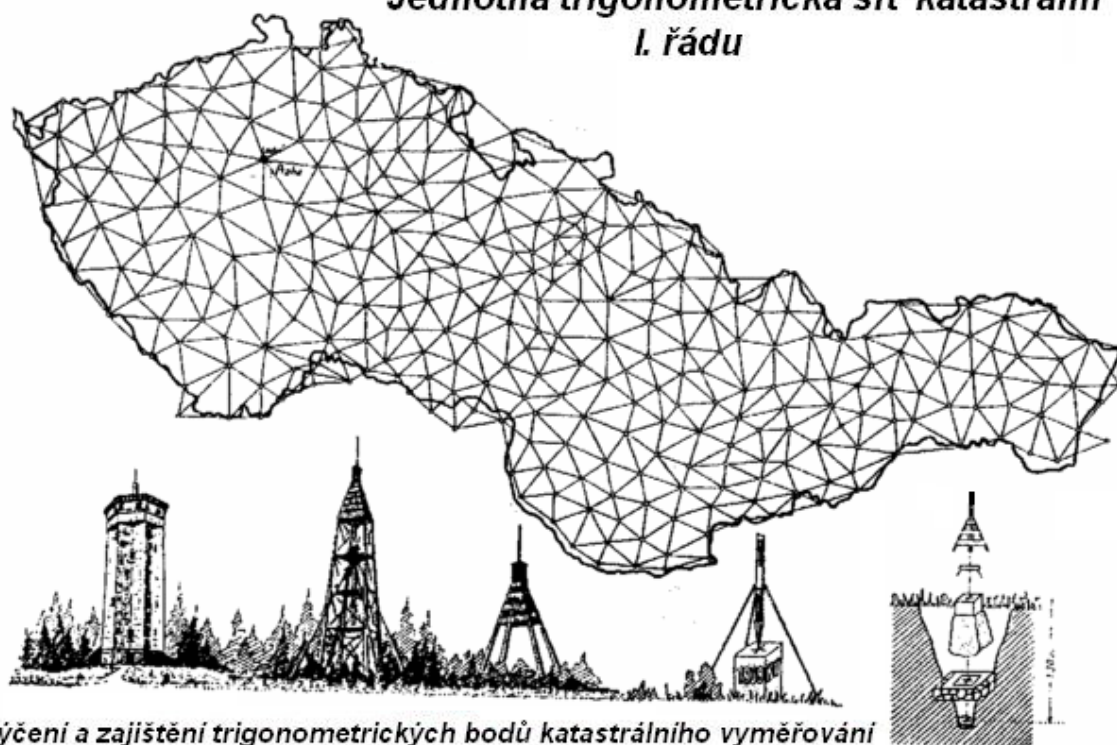
- *Jednotná trigonometrická síť katastrální (1920 – 1957)*

Po vzniku Československé republiky v roce 1918 bylo rozhodnuto vybudovat pro potřeby nového státu jednotné a spolehlivé geodetické základy, označené jako **Jednotná trigonometrická síť katastrální (JTSK)** pro celé území republiky. Úkolem byla pověřena Triangulační kancelář zřízená tehdejší ministerstvem financí, pod vedením Ing. Josefa Křováka.

Vzhledem k požadavku co nejrychlejšího vybudování trigonometrické sítě I. řádu, byly převzaty z vojenské triangulace měřené osnovy směrů na 42 bodech v Čechách a na 22 bodech na Podkarpatské Rusi. Osnovy směrů na dalších bodech sítě byly měřeny Schreiberovou metodou s vysokou přesností. Naměřené osnovy směrů byly převedeny do roviny obecného konformního kuželového zobrazení, navrženého Ing. Křovákem. Řešení normálních rovnic (vyrovnání sítě) proběhlo postupnou aproximací, s výslednou směrodatnou odchylkou měřeného směru v celé síti $\pm 0,82''$. Vyrovnáním sítě I. řádu JTSK byl určen jen její definitivní tvar, protože z časových důvodů nebyly měřeny ani délkové základny, ani nebyla provedena astronomická měření. Rozměr, poloha a orientace sítě na Besselově elipsoidu byly tedy určeny nepřímou z vojenské triangulace, s níž bylo 107 bodů totožných. Po opakovaných výpočtech a vyhodnocení jejich výsledků bylo nakonec použito k transformaci 42 identických bodů v Čechách a z nich vypočteny definitivní pravoúhlé souřadnice všech trigonometrických bodů I. řádu v Křovákově zobrazení (*Sylabus přednášky GDZ1 č.6, skripta Geodézie 2, str. 6 - 9 a později matematická kartografie*). Tak byl vytvořen souřadnicový systém S-JTSK. Trigonometrická síť I. řádu obsahovala celkem 268 bodů a nebyla napojena na síť sousedních států.

Trojúhelníky v původní trigonometrické síti I. řádu byly v Čechách podstatně větší (průměrná délka stran 40 km) než na ostatním území (25 km). Proto byla síť I. řádu v Čechách doplněna o dalších 93 bodů a po 2. světové válce ještě o 20 bodů podél československo-maďarské hranice. Tím vznikla homogenní síť, znázorněná na obrázku č.4, který zachycuje i způsob stabilizace a signalizace bodů sítě.

Jednotná trigonometrická síť katastrální I. řádu



Vytýčení a zajištění trigonometrických bodů katastrálního vyměřování

Obr. 4 Rozložení trigonometrických bodů I. řádu JTSK na území Československa

Od roku 1928 až do roku 1957 byla trigonometrická síť I. řádu postupně zhušťována body II., III. a IV. řádu a dále body podrobné trigonometrické sítě (V. řádu). Celé území tehdejší Československé republiky pokrývalo značně husté polohové bodové pole (průměrná délka stran v síti V. řádu je 2 km), které zahrnovalo přes 47 000 trigonometrických bodů (na území dnešní ČR je jich necelých 29 000).

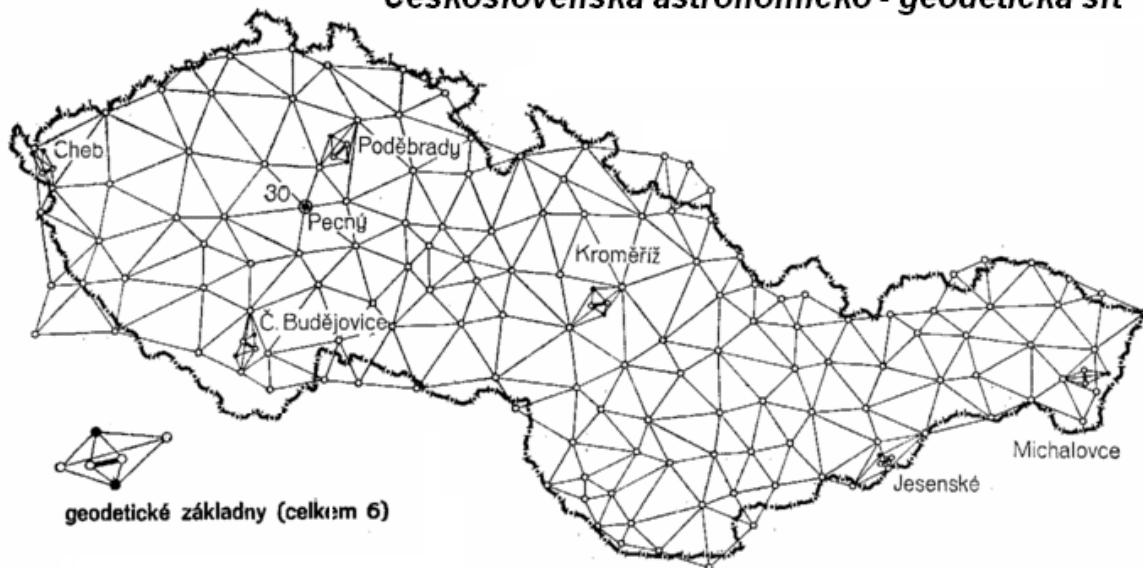
Relativní přesnost JTSK je velmi vysoká, se směrodatnou odchylkou v poloze sousedních bodů V. řádu ± 1 cm. Celkově je však JTSK zatížena v poloze a v orientaci chybami rakouské vojenské triangulace, jak již bylo uvedeno.

JTSK byla budována jako geodetická síť, vysloveně pro technické účely a s vědomím, že bude nutno vybudovat na území republiky novou základní „astronomicko-geodetickou“ síť podle nejnovějších vědeckých poznatků a navazující na síť sousedních států. Tím došlo k tomu, že na území bývalého Československa není trigonometrická síť I. řádu totožná se základní sítí astronomicko-geodetickou, jak je tomu v jiných státech.

- **Československá astronomicko-geodetická síť – AGS (1931-1955)**

Práce byly zahájeny návrhem trojúhelníkové sítě o průměrné délce stran 36 km a návrhem napojení na základní trigonometrické síť sousedních států. Řada bodů AGS je identická s body I. řádu JTSK a síť obsahuje celkem 144 bodů ve 227 trojúhelnících (obrázek 5). Body byly stabilizovány jednou povrchovou značkou (kamenný hranol 30x30x90 cm s křížkem, označený TP a trojúhelníkem) a třemi podzemními značkami. První je skleněná deska 16x16 cm s křížkem, v betonové desce, na které je usazena povrchová značka, druhou podzemní značkou je kamenná deska 60x60x10 cm s křížkem a třetí je kamenná krychle 20x20x20 cm s křížkem. Některé body byly stabilizovány železobetonovými či zděnými pilíři, na jiných byly postaveny zděné měřické věže nebo bylo použito věží hradů a rozhleden.

Československá astronomicko - geodetická síť



Obr. 5 Rozložení bodů astronomicko - geodetické sítě na území Československa

V AGS bylo změřeno 681 vodorovných úhlů vrcholovou metodou (laboratorní jednotky), popř. metodou Schreiberovou, zaměřeno 6 geodetických základen invarovými dráty, astronomicky určeno 53 Laplaceových bodů a gravimetricky určeny tížnicové odchylky v okolí 108 bodů I. řádu a 499 bodů II. řádu. Z uzávěrů trojúhelníků byla vypočtena směrodatná odchylka měřeného směru v síti $\sigma_\varphi = 0,27''$. Měřené veličiny byly převedeny na Krasovského elipsoid s orientací v Pulkovu a do zobrazovací roviny Gaussova transversálního válcového zobrazení v 6° pásech. Vyrovnání sítě se uskutečnilo společně s vyrovnáním trigonometrické sítě západní části Sovětského svazu a se sítěmi tehdejších socialistických států. Vyrovnané souřadnice 144 bodů AGS se staly základem souřadnicového systému S-42 ([Sylabus přednášky č.6, skripta Geodézie 2, str.11 a později matematická kartografie](#)), do kterého byly postupně převedeny i všechny další trigonometrické body JTSK, takže mají dvoje souřadnice.

Referenční síť nultého řádu (1996 – 2006)

Připojení polohového bodového pole České republiky do evropského referenčního rámce EUREF, s následnou realizací geocentrického souřadnicového systému ETRS 89 a určením geocentrických souřadnic bodů sítě 0. řádu – NULRAD (10 bodů), jejím plošným doplněním a rozvinutím do sítě DOPNUL (176 bodů) a konečným zhuštěním do sítě vybraných trigonometrických bodů s geocentrickými souřadnicemi, určenými přímým měřením v počtu 3096 bodů na území celé České republiky, a to prostřednictvím globálního družicového polohového systému, n. Global Navigation Satellite System – GNSS ([úvodní kapitola tohoto sylabu, skripta Geodézie 2, str.11, 12, později vyšší a kosmická geodézie](#)).