

# ANALÝZA PŘESNOSTI PROSTOROVÉ POLOHY KOLEJE A METOD JEJÍ REALIZACE

## ACCURACY ANALYSIS OF THE RAILWAY SPATIAL POSITION AND APPROPRIATE METHODS OF REALIZATION

*Jiří BUREŠ*<sup>1</sup>

### **Abstract:**

The article analyses the requirements for the accuracy of the space position of the track in the context of principles of building the control network or the railway point field. With regard to the need for continuous restoration of parts of the control network damaged by the operation of the structure, the basic principles of mutual continuity and also the accuracy of the partial measured quantities must be met in order to maintain the homogeneity. The precision parameters derived from the simplified model are, from the point of view of their practical feasibility, high but still feasible in the field and guaranteeing sufficient homogeneity of the control network and railway point field for automated technologies used for measuring the spatial position of the track.

### **Abstrakt:**

Článek analyzuje požadavky na přesnost prostorové polohy koleje v kontextu principu budování vytyčovací sítě nebo železničního bodového pole. S ohledem na nutnost průběžné obnovy, provozem stavby zničené části vytyčovací sítě, je třeba pro zachování homogenity dodržovat základní principy vzájemné návaznosti a rovněž i přesnosti dílčích měřených veličin. Přesnostní parametry odvozené na zjednodušeném modelu jsou z hlediska jejich praktické realizovatelnosti vysoké, ale zároveň ještě v terénu realizovatelné a zaručující dostatečnou homogenitu vytyčovací sítě nebo železničního bodového pole pro automatizované technologie měření prostorové polohy koleje.

## **1 ÚVOD**

Požadavek na přesnost prostorové polohy koleje vychází z požadavku ČSN 73 6360-2 (2013) [1], čl. 6.4.1, který specifikuje mimo jiné, že „Absolutní příčná polohová odchylka osy koleje od její projektované polohy nesmí být při přejímce prací v koleji s vložением nového materiálu větší než  $\pm 10$  mm, s vložением užitého materiálu  $\pm 15$  mm a při přejímce ostatních prací nesmí být větší než  $\pm 20$  mm, přičemž vzájemná odchylka příčné vzdálenosti osy koleje a hrany nástupiště musí být dodržena v hodnotách  $+20$  mm od projektované polohy,  $-0$  mm od jmenovité hodnoty“.

A dále „Absolutní výšková odchylka nivelety temene nepřevýšeného kolejnicového pásu od její projektované nadmořské výšky nesmí být při přejímce prací v koleji větší než  $+10$  mm,  $-20$  mm, přitom vzájemná výšková vzdálenost spojnice temen kolejnicových pásů a horní plochy nástupiště v projektované výšce  $550$  mm musí být dodržena v hodnotách  $-20$  mm,  $+0$  mm“.

---

<sup>1</sup> Bureš Jiří, Ing. Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika, tel. +420 606 473 602, e-mail: bures.j@fce.vutbr.cz

Některé hodnoty mezních vytyčovacích odchylek prostorové polohy, dle ČSN 73 0420-2 [2] uvedené v její Tabulce 16, neodpovídají požadavku na prostorovou polohu ČSN 73 6360-2 (2013) [1] neboť kritériem specifikace přesnosti prostorové polohy v ČSN 73 0420-2 je návrhová rychlost a kritériem specifikace v ČSN 73 6360-2 je rozlišení podle vkládaného materiálu.

Technické normy dále vychází z klíčového předpokladu stability a neměnnosti vytyčovací sítě nebo bodů železničního bodového pole (ŽBP). Požadavky na přesnost vytyčovací sítě byl řešen např. v [3]. Vytyčovací síť v době výstavby nebo železniční bodové pole v době provozování a údržby koleje podléhá více, či méně geometrickým deformacím, kterým nelze zabránit a to v důsledku vlivu stavebních prací nebo provozování (tj. statického a dynamického namáhání) železniční dopravní cesty. Umístění bodů vytyčovací sítě nebo ŽBP v blízkosti prostoru deformační zóny dopravní cesty je vyvoláno praktickou potřebou. Dalšími příčinami nestability mohou být nevhodné geologické poměry a druh stabilizace geodetických bodů. Dalším nepříznivým stavem při výstavbě může být částečné nebo úplné zničení původních bodů vytyčovací sítě v důsledku postupu výstavby a nutnost jejich přeurčení. Proměnlivost polohy vytyčovací sítě vyvolaná výše zmíněnými souvislostmi zakládá problém její nehomogenity. Nehomogenita vytyčovací sítě pak působí problémy při využití automatizovaných technologií měření prostorové polohy koleje, které se při orientaci měřicího systému navazují na vytyčovací síť. Při přeurčení souřadnic zničených bodů vytyčovací sítě se v optimálním případě pohybujeme v rámci nevyhnutelných nejistot měření (náhodných i systematických), ale nikdy nelze obnovit zničené body do původní polohy. Proto je třeba pracovat i v souvislostech návazností etap výstavby a zabezpečit, aby ke zničení bodů vytyčovací sítě nebo jejich přeurčování nedocházelo ve fázích výstavby, kdy jsou požadavky na přesnost a homogenitu vytyčovací sítě nejvyšší. Obecně je obvyklé, že ve fázi zemních prací jsou potřeby přesnosti vytyčovací sítě benevolentnější, než při výstavbě na přesnost nejnáročnějších typů stavebních konstrukcí. Přesnost vytyčovací sítě nebo ŽBP musí vyhovovat nejpřísnějšímu požadavku na přesnost prostorové polohy objektu, který z něj má být vytyčením realizován a to ve fázích přípravy a projektování stavby, ve fázi realizace stavby a jejího uvedení do provozu a ve fázi po uvedení do provozu, přičemž zpřesnění vytyčovací sítě je třeba realizovat v pravou chvíli v kontextu postupu výstavby. Typickým příkladem vzniku nehomogenit ve vytyčovací síti je nezávislá, často z mnoha příčin nedostatečná, údržba vytyčovací sítě zhotovitelem stavby a to bez kontroly a součinnosti s investorem. Při převímce pak může docházet k rozporuplným výsledkům ověřovacích měření vykonaných investorem.

## **2 ANALÝZA PŘESNOSTI PROSTOROVĚ POLOHY KOLEJE**

Udržení homogenity a přesnosti vytyčovací sítě nebo ŽBP je možné pouze při respektování zásad hierarchické návaznosti a limitních přesnostních možností současných měřicích technologií. Primární síť na železnici je tvořena geodetickými body ve vzájemné vzdálenosti cca 1 km určených technologií GNSS a tato primární síť je podél trati zahušřována geodetickými body sekundární sítě ve vzájemné vzdálenosti cca 200 m určené zpravidla polygonovými pořady. Primární a sekundární síť tvoří vztažný základ, ke kterému se vztahuje prostorová poloha koleje a poloha zajišťovacích značek. Prostorová poloha je určována v závazném geodetickém referenčním systému S-JTSK, výška v závazném výškovém systému Bpv. Vyskytuje-li se na trase objekt se zvýšenými nároky na skladebnou přesnost (mosty, tunely), je nutné řešit tuto skutečnost formou lokální (objektové) vytyčovací

sítě v lokálním souřadnicovém systému vhodně navázané na nejbližší body primární a sekundární sítě.

Podrobné metodické návody [4], [5] řeší detailně budování a správu železniční bodové pole. Následná analýza v tomto textu je technickou úvahou o základních souvislostech metod měření a přesnosti.

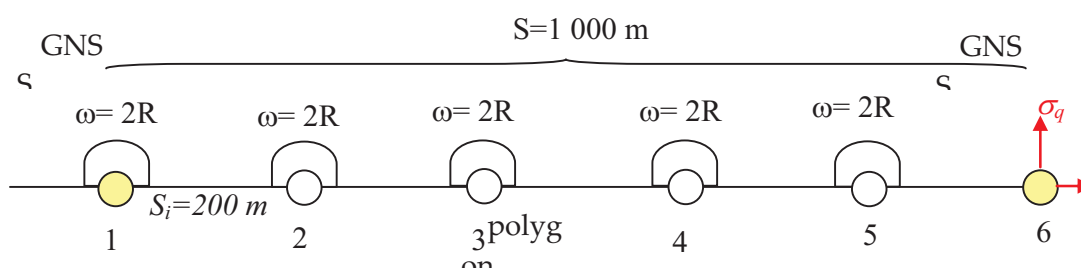
## 2.1 URČOVÁNÍ BODŮ PRIMÁRNÍ SÍTĚ

Určování bodů primární sítě ve vzájemné vzdálenosti cca 1 km podél železniční trati se děje technologií GNSS. Zpracování metodiky [5] a její pilotní ověření podložilo vhodnost této technologie pro daný účel. Body primární sítě lze mezi sebou reálně určit s přesností danou standardní odchylkou 5 mm, tzn. s praktickou jistotou v mezní odchylkou 10 mm ( $P=0,90$ ,  $\sigma=10\%$ ). Tato přesnost, díky použité technologii GNSS-RTK, se vztahuje zároveň vzhledem i k nejbližším bodům permanentní sítě CZEPOS.

Svou roli hraje i převod souřadnic ETRS do národního systému S-JTSK a jeho homogenita. Na SŽDC se tento převod realizuje prostřednictvím lokálních transformačních klíčů. Návrhem metodiky [6] bylo doporučeno použít jednotného transformačního klíče pro ČR. Analýzou deformací jednotného transformačního klíče ČR bylo prokázáno, že jeho lokální geometrické deformace se pohybují až v hodnotách 20 mm na 1 km, což je hodnota, která může systematicky nepříznivě ovlivňovat určení bodů primární sítě ve vazbě na klasické polygonálně určené sekundární sítě. Přesto je použití jednotného transformačního klíče možné neboť jednotnou transformací je zaručena opakovatelnost určení polohy, takže výsledky by byly vždy stejně deformované. Bylo by ovšem prakticky užitečnější definovat nový jednotný transformační klíč, jehož geometrické deformace by byly na prakticky a technicky přijatelnější úrovni, tzn. menší než 5 mm na 1 km.

## 2.2 BODŮ SEKUNDÁRNÍ SÍTĚ K PRIMÁRNÍM BODŮM

Předpokládejme pro jednoduchost model řešení, kdy body sekundární sítě budujeme polygonovým pořadem mezi body primární sítě. Předpokládejme dále, že vzájemná vzdálenost bodů primární sítě  $S=1\ 000\ m$ , počet vrcholů polygonového pořadu  $n=6$ , délka stran v polygonovém pořadu  $S_i=200\ m$ .



Obr. 1 Modelový příklad konfigurace primárních bodů GNSS a sítě sekundární bodů

Zjednodušeně pro přímý rovnostranný polygonový pořad lze vypočítat podélnou standardní odchylku ze vztahu např. dle [7], [8]

$$\sigma_L^2 = (n - 1) \sigma_S^2 \quad (1)$$

a příčnou standardní odchylku ze vztahu dle

$$\sigma_q^2 = \frac{n(n-1)(2n-1)}{6} S_i^2 \sigma_\omega^2 \quad (2)$$

kde  $\sigma_s$  je standardní délková odchylka,  $\sigma_\omega$  je standardní úhlová odchylka.

Např. pro celkovou délku jednostranně připojeného a jednostranně orientovaného polygonového pořadu  $S=1\,000$  m, počet vrcholů  $n=6$ , standardní odchylku měření délek  $\sigma_s = 3\text{ mm}$  a standardní úhlovou odchylku  $\sigma_\omega = 0,3\text{ mgon}$ , bude v koncovém bodě polygonového pořadu

standardní odchylka v podélném směru

$$\sigma_L^2 = (6-1) \sigma_s^2 \quad (3)$$

$$\sigma_L = 6,7\text{ mm} \quad (4)$$

a standardní odchylka v příčném směru

$$\sigma_q^2 = \frac{6(6-1)(12-1)}{6} 200^2 \sigma_\omega^2 \quad (5)$$

$$\sigma_q = 7,0\text{ mm} \quad (6)$$

Velikost standardní příčné odchylky  $\sigma_q = 7,0\text{ mm}$ , resp. mezní odchylky 14 mm koncového bodu polygonového pořadu je cca prakticky o 1/3 vyšší ve srovnání s přesností určení bodu primární sítě GNSS ve formě standardní příčné odchylky  $\sigma_{x,y} = 5,0\text{ mm}$ , resp. mezní odchylky 10 mm. Proto je oprávněné vyšší přesnosti určení bodů primární sítě GNSS využít k fixaci (neměnnosti při výpočtu) prostorové polohy polygonového pořadu.

Fixací souřadnic obou koncových bodů polygonu vetknutého mezi body primární sítě se projeví maximální odchylky v polovině polygonového pořadu.

standardní odchylka v podélném směru pro  $n=4$ ,  $\sigma_s = 3\text{ mm}$  (pro 3 polygonové strany,  $S=600$  m)

$$\sigma_L^2 = (4-1) \sigma_s^2 \quad (7)$$

$$\sigma_L = 5,2\text{ mm} \quad (8)$$

a standardní odchylka v příčném směru

$$\sigma_q^2 = \frac{4(4-1)(8-1)}{6} 200^2 \sigma_\omega^2 \quad (9)$$

$$\sigma_q = 3,5\text{ mm} \quad (10)$$

Fixací koncových bodů primární sítě v principu dochází uprostřed polygonu k dvojitému určení a přesnost lze vyjádřit jako přesnost aritmetického průměru z dvojího určení

$$\sigma_q^- = \frac{\sigma_q}{\sqrt{2}} = 2,5\text{ mm} \quad (11)$$

a mezní příčná odchylka v polovině polygonu bude  $\delta_q^- = t \sigma_q^- = 5\text{ mm}$ .

Praktické dosažení přesnosti měření délek specifikované standardní odchylkou  $\sigma_s = 3 \text{ mm}$  je při použití dnes běžných elektronických univerzálních měřicích stanic reálné. Větším problémem může být praktické dosažení potřebné úhlové přesnosti specifikované standardní odchylkou  $\sigma_\omega = 0,3 \text{ mgon}$  zejména s ohledem na nepříznivé působení refrakce. Ale celkově lze předpokládat, že dosažení přesností měření je prakticky s využitím současné nejmodernější měřicí techniky běžně realizovatelné.

Pro určení polohy bodů sekundární sítě lze tedy použít měřidla úhlové přesnosti třídy přístrojů dle (DIN 18723, ČSN ISO 17123-3) specifikované  $\sigma_{\omega 0} = 1''$  (0,3 mgon) výjimečně  $2''$  (0,6 mgon) a měřit v minimálním počtu opakování specifikovaných v Tab. č. 1.

Obecný vzorec pro výpočet počtu opakování měření úhlu v polygonovém pořadu

$$n = \frac{\sigma_{\omega 0}^2}{\sigma_\omega^2} \quad (12)$$

kde  $\sigma_{\omega 0}$  je úhlová přesnost přístroje specifikovaná výrobcem

$\sigma_\omega$  je požadovaná úhlová přesnost

n je počet opakování (počet skupin)

Tab. č. 1: Přehled počtu n opakování v kontextu požadované úhlové přesnosti

Požadovaná úhlová přesnost	Úhlová specifikace přístroje $\sigma_{\omega 0}$	
$\sigma_\omega$	1'' (0,3 mgon)	2'' (0,6 mgon)
0,3 mgon	min. n=1	min. n=4

Při měření v polygonovém pořadu

mezní odchylka rozdílu dvojice měření úhlu s přesností  $\sigma_\omega = 0,3 \text{ mgon}$ , pro koeficient spolehlivosti  $t=2$  ( $P=0,95$ ,  $\alpha=5\%$ )

$$\delta_{\Delta\omega} = t \sigma_\omega \sqrt{2} = 0,8 \text{ mgon} \quad (13)$$

Mezní odchylka od střední hodnoty měření úhlu měřeného v počtu tří a více opakování s přesností  $\sigma_\omega = 0,3 \text{ mgon}$ , pro  $t=2$  ( $P=0,95$ ,  $\alpha=5\%$ )

$$\delta_v = t \sigma_\omega = 0,6 \text{ mgon} \quad (14)$$

## 2.3 URČOVÁNÍ ZAJIŠŤOVACÍ ZNAČKY K SEKUNDÁRNÍ SÍTI

Zajišťovací značky jsou určovány měřeními v návaznosti k sekundární síti navázané předtím na primární síť. Předpokládejme vzájemnou vzdálenost mezi sousedními zajišťovacími značkami max.  $S=100 \text{ m}$  (pro poloměry oblouku  $R > 2000 \text{ m}$ ).

Mezní odchylka v příčném směru mezi sousedními zajišťovacími značkami

$$\delta_{\Delta q} = 5 \text{ mm} \quad (15)$$

Aktualizací dřívějšího předpisu S3 [10], kde byla specifikována relativní přesnost mezi sousedními zajišťovacími značkami, v novější verzi předpisu S3 [9] je specifikována mezní odchylka rozdílu dvojího určení zajišťovací značky. Pro analýzu přesnosti je použito přísnějšího kritéria dle [10].

Mezní odchylka v příčném směru jedné dílčí zajišťovací značky z dvojice

$$\delta_q = \frac{\delta_{\Delta q}}{\sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{2}} = 3,5 \text{ mm} \quad (16)$$

a z toho standardní odchylka v příčném směru získaná pomocí koeficientu spolehlivosti  $t=2$

$$\sigma_q = \frac{\delta_q}{t} = \frac{3,5}{2} = 1,75 \text{ mm} \quad (17)$$

při uvážení standardní odchylky centrace přístroje a cíle do 0,5 mm bude standardní odchylka vodorovného směru měřeného na zajišťovací značku, při délce záměry  $S=100$  m

$$\sigma_\psi = \frac{\sigma_q}{S} = \frac{0,00175}{100} = 1,1 \text{ mgon} \quad (18)$$

a při uvážení přesnosti centrace přístroje a cíle  $\sigma_\psi = 1,0 \text{ mgon}$ .

Standardní odchylka měření vodorovného úhlu mezi zajišťovacími značkami, při délce záměry  $S=100$  m

$$\sigma_\omega = \sigma_\psi \sqrt{2} = 1,4 \text{ mgon} \quad (19)$$

Mezní odchylka rozdílu dvojice měření úhlu s přesností  $\sigma_\omega = 1,4 \text{ mgon}$ , pro  $t=2$

$$\delta_{\Delta\omega} = t \sigma_\omega \sqrt{2} = 4,0 \text{ mgon} \quad (20)$$

kde  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$  je rozdíl dvojice měřených úhlů na zajišťovací značku.

Mezní odchylka od střední hodnoty měření úhlu měřeného v počtu tří a více opakování s přesností  $\sigma_\omega = 1,4 \text{ mgon}$ , pro  $t=2$

$$\delta_v = t \sigma_\omega = 2,8 \text{ mgon} \quad (21)$$

kde  $v = E(\omega) - \omega_i$  a kde  $E(\omega)$  je střední hodnota.

## 2.4 KONTEXT KLÍČOVÝCH FÁZÍ VÝSTAVBY

Projektem ŽBP je zpravidla řešen návrh umístění geodetických bodů primární a sekundární sítě a zajišťovacích značek, způsob jejich stabilizace, návaznost do geodetických referenčních systémů, technologie měření a určení souřadnic včetně způsobu převodu do S-JTSK, přesnost měření vycházející z předepsaných mezních odchylek stavby, včetně prokázání dosažitelnosti přesností v konkrétních podmínkách. ŽBP se následně vybuduje na podkladě projektu ŽBP, přičemž primární ŽBP předává ÚOZI investora (SŽG) zhotoviteli při předání staveniště, sekundární ŽBP vybuduje geodet zhotovitele na podkladě projektu ŽBP na počátku realizace výstavby, následně se ŽBP ověřuje před zřízením bezстыkové koleje (před svařením) a pak před tzv. následným (dříve třetím) podbitím, které se realizuje obvykle cca po půl roce od uvedení tratě do zkušebního provozu. Další ověření ŽBP provede SŽG před ukončením záruční doby a dále pak dle potřeby.

## 2.5 SOUHRNNÁ NEJISTOTA

Souhrnná mezní nejistota  $\delta$  při uvážení nejistoty primární sítě  $\delta_{PS} = 10 \text{ mm}$  (kap. 2.1), nejistoty sekundární sítě  $\delta_{SS} = 5 \text{ mm}$  (kap. 2.2) a nejistoty určení zajišťovací značky  $\delta_{ZZ} = 3,5 \text{ mm}$  (kap. 2.3) je dána vztahem (22)

$$\delta^2 = \delta_{PS}^2 + \delta_{SS}^2 + \delta_{ZZ}^2 \quad (22)$$

a po dosazení konkrétních hodnot dílčích nejistot je souhrnná nejistota dána hodnotou (23)

$$\delta = \sqrt{10^2 + 5^2 + 3,5^2} = 12 \text{ mm} \quad (23)$$

Tzn., že bude-li docházet v průběhu výstavby k obnově primární a sekundární sítě v rámci výše uvedených přesnostních parametrů, lze očekávat, že souhrnná nejistota bude max. o 20% překračovat nejpřísnější kritérium prostorové polohy dle ČSN 73 6360-2 (2013), tj. mezní odchylku 10 mm. Největší podíl na tomto překročení souvisí s realizací nejistoty primární sítě. Eliminaci tohoto faktoru lze dosáhnout tak, že případná obnova primární sítě a souvislostně i sekundární sítě bude řešena před klíčovými fázemi výstavby (kap. 2.3), tj. před předáním staveniště, před zřízením bezстыkové koleje (před svařením), před tzv. následným (dříve třetím) podbitím (cca po půl roce od uvedení tratě do zkušebního provozu), před ukončením záruční doby a dále pak dle potřeby.

## 3 ZÁVĚR

Cílem tohoto příspěvku byla analýza požadavků na přesnost prostorové polohy koleje specifikované v ČSN 73 6360-2 (2013) v kontextu principu budování vytyčovací sítě nebo železničního bodového pole. S ohledem na nutnost průběžné obnovy, provozem stavby zničené části vytyčovací sítě, je třeba pro zachování homogenity dodržovat základní principy vzájemné návaznosti a rovněž i přesnosti dílčích měřených veličin. Přesnostní parametry jsou sice odvozené na zjednodušeném modelu, ale signalizují potřebu vysoké měřické přesnosti, což klade vysoké nároky na její realizovatelnost v terénu. Tato přesnost však zaručuje obnovitelnost vytyčovací sítě nebo železničního bodového pole v dostatečné homogenitě pro automatizované technologie měření prostorové polohy koleje. Zvláště důležité je načasování případné obnovy vytyčovací sítě nebo ŽBP před příslušnou klíčovou fází výstavby. Analýzou odvozené dílčí přesnostní parametry a jejich realizace v příslušných fázích výstavby zaručuje dodržení předepsané geometrické přesnosti železniční dráhy.

**Poděkování:** Příspěvek byl zpracován s podporou projektu specifického výzkumu FAST-S-16-3507 a s podporou projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

## LITERATURA

- [1] ČSN 73 6360-2 (2013) Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba, přejímka, provoz a údržba
- [2] ČSN 73 0420-2 (2002) Přesnost vytyčování staveb - Část 2: Vytyčovací odchylky
- [3] BUREŠ, J., Přesné pozicování technologií GNSS-RTK na liniových stavbách, příspěvek na konferenci XII. mezinárodní konference GEODÉZIE A KARTOGRAFIE V DOPRAVĚ, ISBN 978-80-02-02553-5, Český svaz geodetů a kartografů, Olomouc, 2014
- [4] OŘ 37 SŽGOL (2016) Metodický návod pro budování a správu železniční bodové pole. Dostupné on-line: <http://www.szdc.cz/o-nas/organizacni-jednotky-szdc/szg-olomouc/soubory/or37-z3.pdf>
- [5] Prozatímní metodický pokyn ředitele SŽG Praha č. 05/2016 – Budování a správa ŽBP (2016). Dostupné on-line: <http://www.szdc.cz/o-nas/organizacni-jednotky-szdc/szg-praha/dokumenty/2016-05.pdf>
- [6] BUREŠ, J.: Metodika budování a údržby Železničního bodového pole (ŽBP) technologiemi Globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) v reálném čase s metrologickou návazností na geodetické referenční systémy ČR. Projekt SŽDC ÚTR S 23488/2014-O13, 4/2015
- [7] ŠVÁBENSKÝ, O., VITULA, A., BUREŠ, J.: Inženýrská geodézie I, elektronická studijní opora pro kombinovanou formu studia, VUT v Brně, Fakulta stavební, 2016
- [8] MICHALČÁK, O., VOSIKA, O., VESELÝ, M., NOVÁK, Z.: Inžinierska geodézia I, Vydavateľství Alfa, 1985
- [9] Předpis SŽDC S3 díl III (2014): Železniční svršek, Zajištění prostorové polohy koleje.
- [10] Předpis ČD S3 díl III (2003): Železniční svršek, Zajištění prostorové polohy koleje.

*Lektoroval: Ing. Libor Vavrečka*

*(Správa železniční dopravní cesty, s.o.)*