



FAKULTA
STAVEBNÍ



Využití GNSS-RTK a permanentních sítí GNSS pro železniční bodové pole

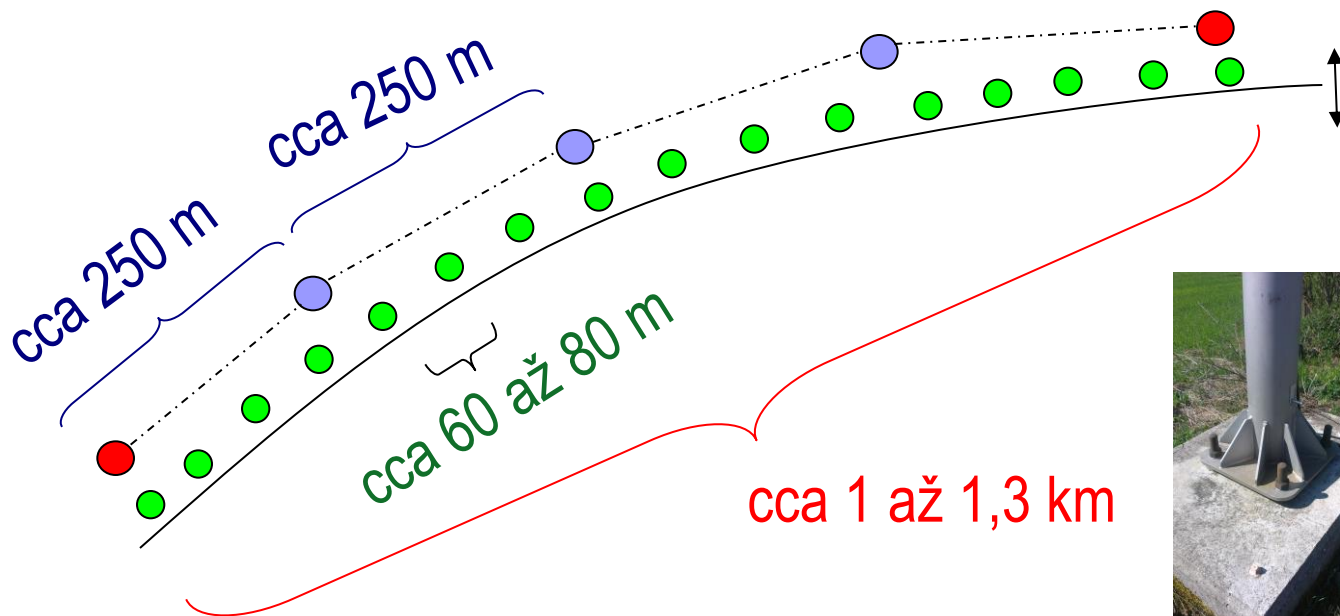
Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie
buress.j@fce.vutbr.cz

Železniční bodové pole (ŽBP)

ŽBP je geodetickým základem pro železnici a rozděluje se na

- a) primární síť,
- b) sekundární síť,
- c) zajišťovací značky.



absolutní příčná odchylka
dle ČSN 73 6360-2 (2013)
10 až 20 mm



Železniční kolej v terénu



Problémy a potřeby při stavbě a údržbě železniční koleje

1. Problém častého opakovaného zničení vytyčovací sítě nebo její částí v průběhu výstavby, její obnova je přenesena na zhotovitele, který to řeší nejednotně, často nedostatečně a z toho vznikají nehomogenity, které mohou projevit při kontrolním měření investora při převzetí koleje při jejím uvedení do provozu. Pokud kolej není převzata vyplývají z toho technické i ekonomické následky.
2. Problém až několikaletého časového odstupe fáze přípravy a projektování od fáze realizace stavby a z toho vyplývající nehomogenity způsobené zničením zpravidla celé původní geodetické sítě vybudované ve fázi přípravy a projektování.
3. Problém posunu stabilizací geodetických bodů provozem dráhy a její údržbou.
4. Problém omezené možnosti umístění geodetických bodů mimo pozemek SŽDC.
5. Potřeba jednotnosti, homogenní přesnosti, technické jednoduchosti a udržitelnosti.
6. Potřeba 100% kompatibility s katastrem nemovitostí, standardy INSPIRE, TMO, GeoinfoStrategie ČR aj.
7. Potřeba jednoznačné převoditelnosti souřadnic v S-JTSK do jiných mezinárodních souřadnicových systémů (ETRS, dopravní kompatibilita).
8. Potřeba automatizované údržby koleje ASP.

Návrh nové metodiky měření GNSS pro železnici

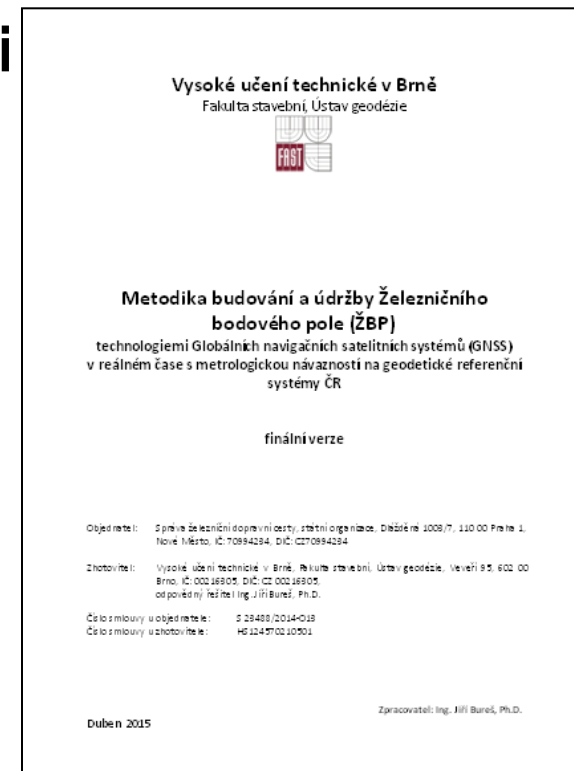
Metodika budování a údržby ŽBP (přesných vytyčovacích sítí) technologiemi GNSS s metrologickou návazností na geodetické základy ČR

Cílem řešení bylo ...

technologicky měřením relativně jednoduchým
postupem zajistit možnost přesného určení
souřadnic v místě potřeby v návaznosti

na stávající funkční vysoce přesnou a vědecky udržovanou síť
permanentních GNSS stanic CZEPOS nebo monitorované sítě
TRIMBLE VRSNow nebo TOPNET.

... zastoupit nutnost dlouhodobé stability, která se obtížně zajišťuje
v terénu, technologicky propracovaným měřením, které zajistí
přesnost v poloze v mezní odchylce do 10 mm.




Principy nové metodiky přesného měření GNSS

- souřadnicový systém JTSK s návazností na ETRS
- příprava a plánování observace
- použití geodetických dvoufrekvenčních aparatur GNSS
- metoda GNSS v reálném čase (síťové řešení)
- signál GPS+Glonass
- délka observace 5 min.
- opakování observací nejméně 3x s optimálním časovým rozestupem
- převod do národního systému JTSK jednotným globálním transformačním klíčem (100% homogenita se stavem KN)

Vlastnosti metodiky

- metodika nastavuje vzájemnou přesnost bodů primární sítě (body po 1 km) a jejich přesnost k CZEPOS na směrodatnou odchylku 5 mm, resp. mezní odchylku 10 mm.
- zavádí požadavek na zpracování projektu ŽBP pro každou stavbu a nastavuje klíčové fáze budování nebo ověřování ŽBP.
- formuluje zásady měření bodů primární sítě technologií GNSS v reálném čase, včetně filtrace odlehlých měření stanovením mezních odchylek.
- nastavuje jednotný převod do národního geodetického referenčního systému prostřednictvím GTK
- nastavuje kritéria přesnosti pro posuzování výsledků
- nastavuje základní náležitosti dokumentace měření
- nastavuje řešení deformovaného ŽBP ve stávajících tratích
- nastavuje použití bodů primární sítě při výpočtu sekundární sítě
- nastavuje určení zajišťovacích značek
- nastavuje možnosti dosažení přesnosti technologií GNSS v obtížných podmínkách
- nastavuje způsob údržby liniové sítě podél železniční trati



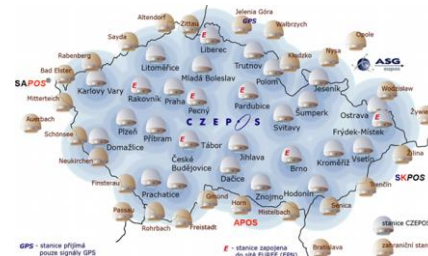
Výsledky pilotního ověření metodiky

Principy pilotního ověření

1. Měření v podmínkách neelektrifikované a elektrifikované železniční trati.
2. Zaměření ve trojici nezávislých měření.
3. Nezávislé zaměření třemi různými typy GNSS aparatur a třemi různými subjekty.
4. Měření i v přítomnosti blízkých překážek a problematických horizontů.
5. Statistické vyhodnocení charakteristik přesnosti
6. Analýza globálního transformačního klíče na území ČR

Použitá měřidla

Leica System 1200 + anténa Leica AT504 (GG) + CZEPOS (MAX)



Trimble GeoXR 6000 + anténa Trimble Tornado + Trimble VRSNow

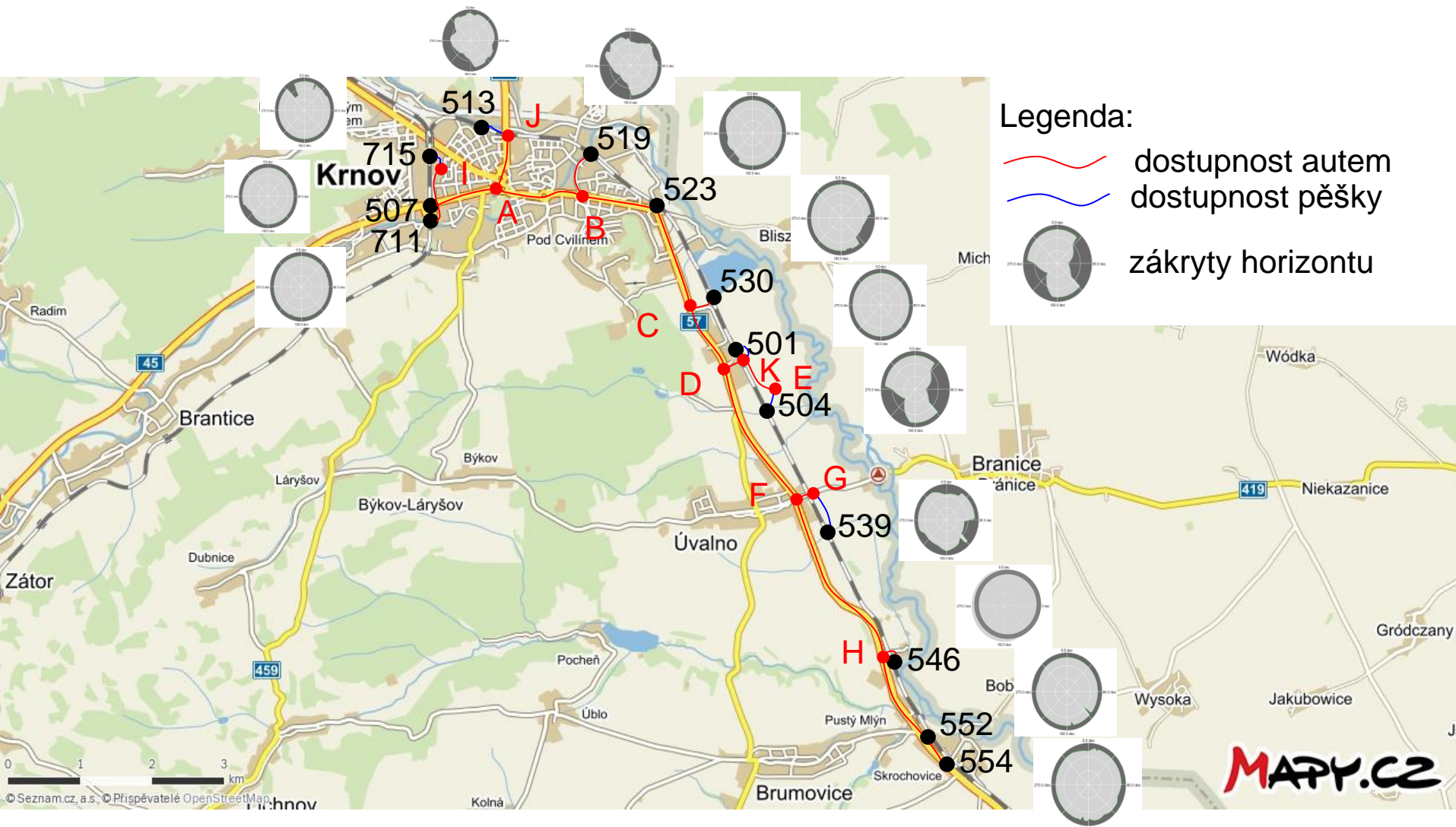


Trimble R8-2 + anténa TRIMBLE R8GNSS + Trimble VRSNow

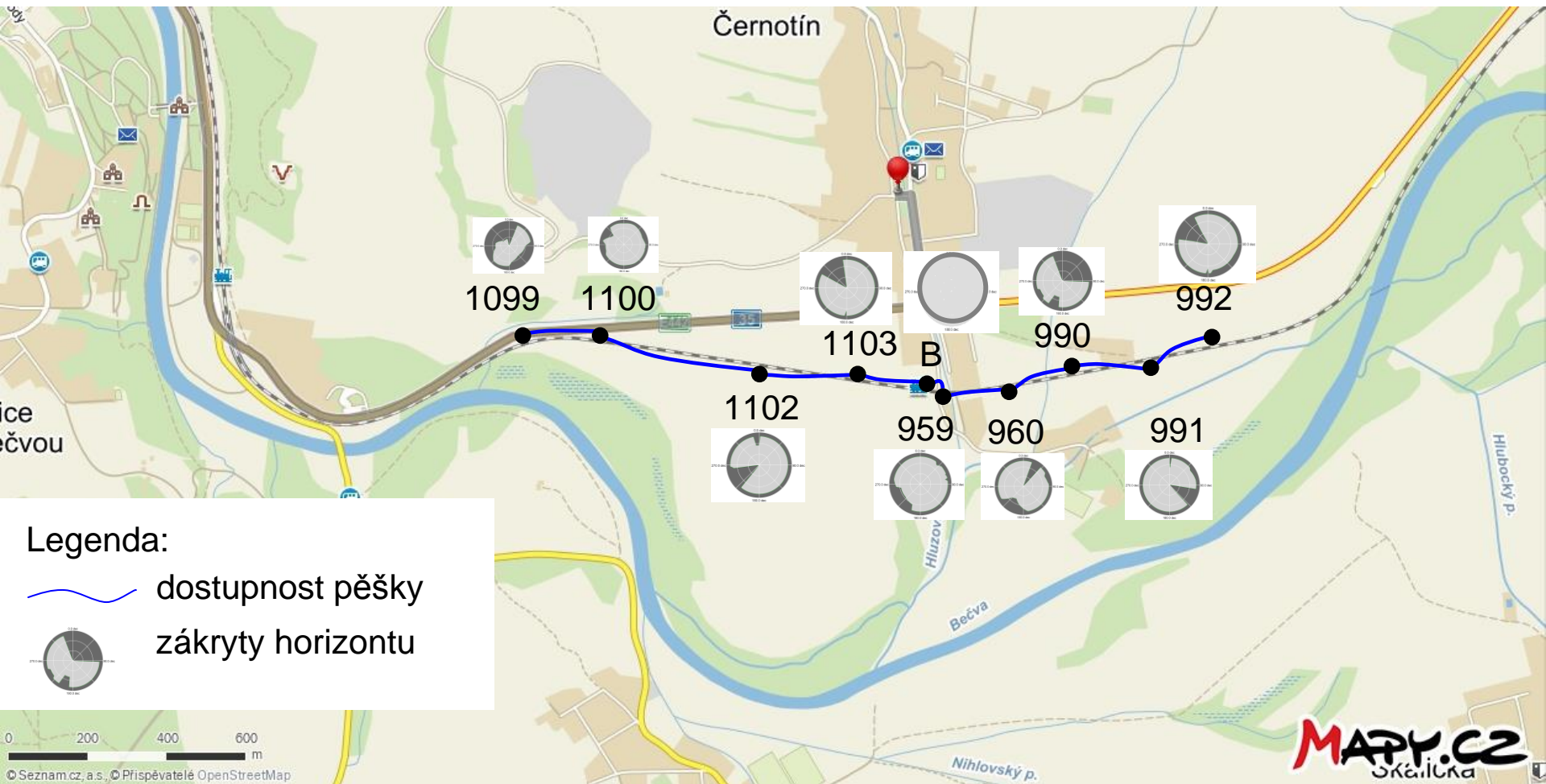


Železniční trať KRNOV – OPAVA

úsek KRNOV – SKROCHOVICE (13,659 km) - neelektrifikovaná



Železniční trať HRANICE NA MORAVĚ – VAL. MEZIŘÍČÍ úsek ČERNOTÍN (1,563 km) - elektrifikovaná



Rekognoskace, příprava, plánování měření

Bod	Třída	Bod zřídila org. , rok prac. Ostrava	Y	510935.194	SMO - 5
711	2	SŽG OLOMOUC, 2013	X	1069996.265	Místopisný náčrt
Orientační jižník na bod			Nadm. výška (Bpv)	nív. 330.637	Bruntál Krnov
Popis, způsob stabilizace a určení bodu			Nárys nebo detail		
měřický hřeb v základu nadjezdu vpravo tati Určen metodou GNSS.					
Poznámky :			km 86.743 bod přeurčen (původní stabilizace z r.1998)		

ETRS B[°,',"']=

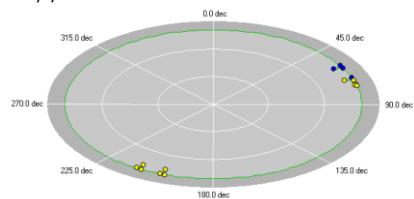
L[°,',"']=

Hel [m]=

Foto bodu



Zákryty horizontu:



Popis zákrytů horizontu:

@%Pointid: 711
 @%Unit: 360
 @%OrientationHz: 0.000
 @%OrientationV: elevation
 59.0 10.0
 60.0 15.0
 61.0 10.0
 69.0 10.0
 70.0 15.0
 71.0 10.0
 74.0 10.0
 75.0 11.0
 76.0 10.0
 199.0 10.0
 200.0 15.0
 201.0 10.0
 209.0 10.0
 210.0 15.0
 211.0 10.0

Foto horizontu:



Dostupnost:



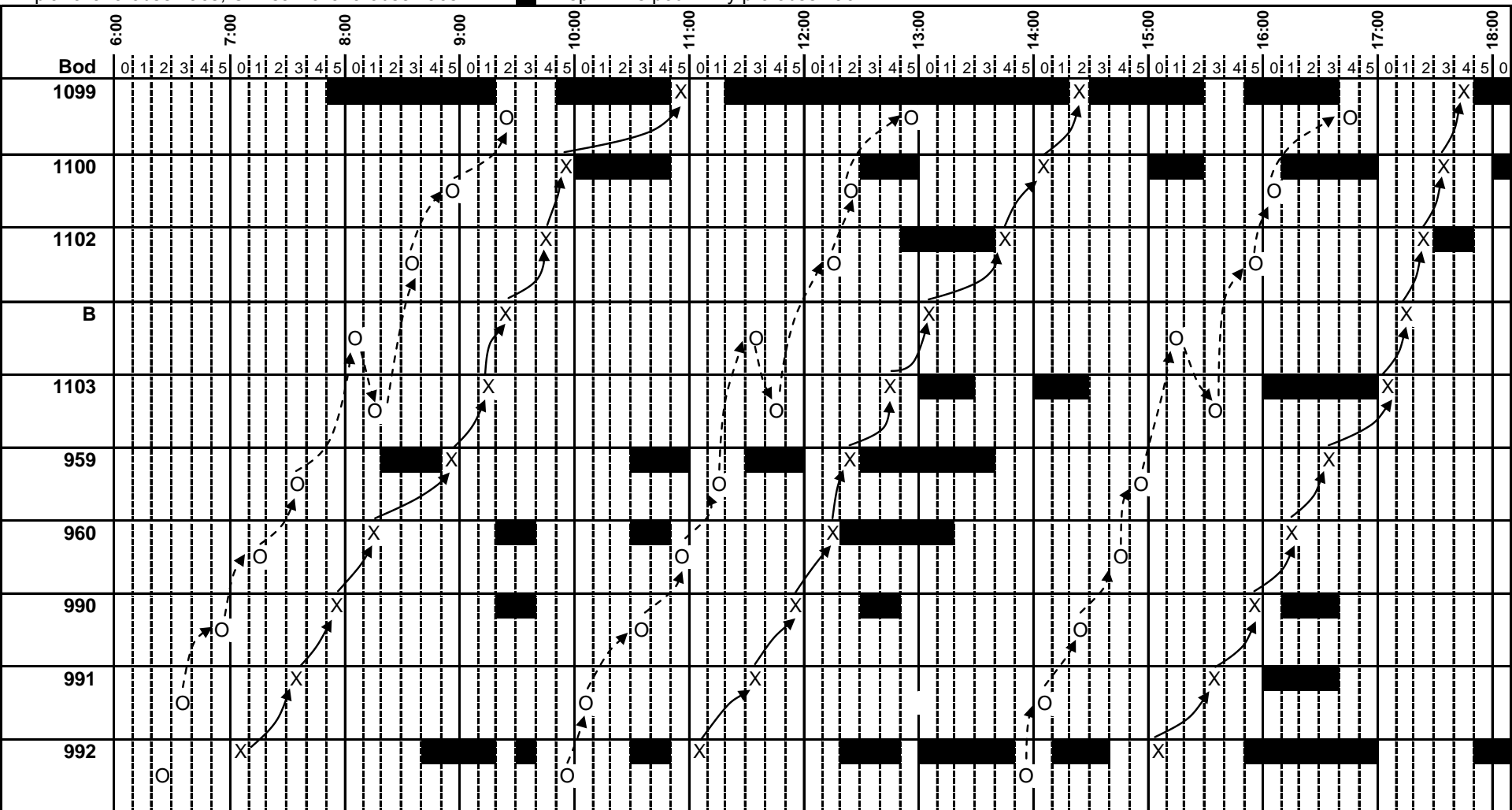
Popis dostupnosti, parkování vozidla:



Itinerář měření

ITINERÁŘ GNSS-RTK MĚŘENÍ, železniční trať HRANICE NA MOR. - VAL. MEZIRŮČÍ, úsek ČERNOTÍN GMT čas, datum: 1.5.2015

X - plánovaná observace, O - realizovaná observace ■ - nepříznivé podmínky pro observaci



Měření v terénu KRNOV - SKROCHOVICE

bod 711



bod 507



bod 715



bod 513



bod 519



bod 523



bod 530



bod 501



Měření v terénu KRNOV - SKROCHOVICE

bod 504



bod 539



bod 546



bod 552



bod 554



Měření v terénu v úseku Černotín

bod 992



bod 991



bod 990



bod 960



bod 959



bod B



bod 1103



bod 1102



Měření v terénu v úseku Černotín



Měření v terénu v úseku Nižbor – Rožtoky u Křivoklátku

bod 3080



bod 3081



bod 3152



bod 3151



bod 3260



Bod 3470



bod 3091



bod 3090



Vyhodnocení měření KRNOV - SKROCHOVICE

Sestavení výsledků Opava - Krnov

Bod	Střední hodnoty trojic			(1) Leica 1200+AT504 CZEPOS (29.3.-30.3.2015)			(2) Trimble GeoXR 6000+Tornado Trimble VRSNow (10.3.-12.3.2015)			(3) Trimble R8-2 Trimble VRSNow (18.4.-19.4.2015)			(1)	(2)	(3)	Obzor
	Y [m]	X [m]	H [m]	Odchyly od střední hodnoty			Odchyly od střední hodnoty			Odchyly od střední hodnoty			Op	Op	Op	
	dY	dX	dH	dY	dX	dH	dY	dX	dH	dY	dX	dH				
711	510935,200	1069996,274	330,610	0,006	0,001	0,001	-0,005	-0,001	-0,005	-0,002	0,001	0,003	0,006	0,005	0,002	*
507	510923,610	1069882,843	323,893	-0,002	-0,001	-0,015	0,004	0,004	0,003	-0,002	-0,003	0,012	0,002	0,005	0,004	*
715	510887,154	1069348,080	322,766	-0,003	0,004	-0,031	0,000	-0,001	0,014	0,003	-0,003	0,017	0,005	0,001	0,004	*x
513	509868,990	1068957,792	316,992	0,004	0,000	0,024	-0,004	0,005	-0,020	-0,001	-0,005	-0,004	0,004	0,006	0,005	*xx
519	508635,225	1069413,601	314,413	0,002	0,000	-0,033	-0,002	0,004	0,011	0,000	-0,004	0,022	0,002	0,004	0,004	*xx
523	507867,501	1070201,379	308,479	0,004	-0,004	0,026	-0,004	0,001	-0,025	0,000	0,003	-0,001	0,006	0,004	0,003	*x
530	507176,756	1071669,217	301,302	0,000	-0,004	-0,008	0,001	0,004	-0,008	-0,001	0,000	0,016	0,004	0,004	0,001	*
501	506920,793	1072438,160	300,065	0,002	-0,006	0,021	0,000	0,002	-0,023	-0,002	0,004	0,001	0,006	0,002	0,005	*
504	506612,647	1073323,212	300,518	-0,005	-0,005	-0,006	0,003	0,004	-0,005	0,002	0,002	0,011	0,007	0,005	0,002	*xx
539	506018,893	1075060,568	292,117	-0,004	-0,007	0,002	0,011	0,009	-0,015	-0,006	-0,001	0,013	0,009	0,014	0,006	*xx
546	505365,894	1077021,087	283,935	0,001	-0,001	0,004	-0,003	-0,001	-0,017	0,002	0,002	0,013	0,002	0,004	0,003	*
552	504917,886	1078211,496	286,475	0,004	0,000	0,002	-0,005	0,000	-0,008	0,001	0,000	0,006	0,004	0,005	0,001	*x
554	504725,201	1078508,963	292,029	-0,008	-0,001	0,002	0,008	-0,005	-0,005	0,000	0,006	0,004	0,008	0,009	0,006	*x

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y} - Y_i)^2}{n-k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=39} (\bar{Y} - Y_i)^2}{39-13}} = 5 \text{ mm}$$

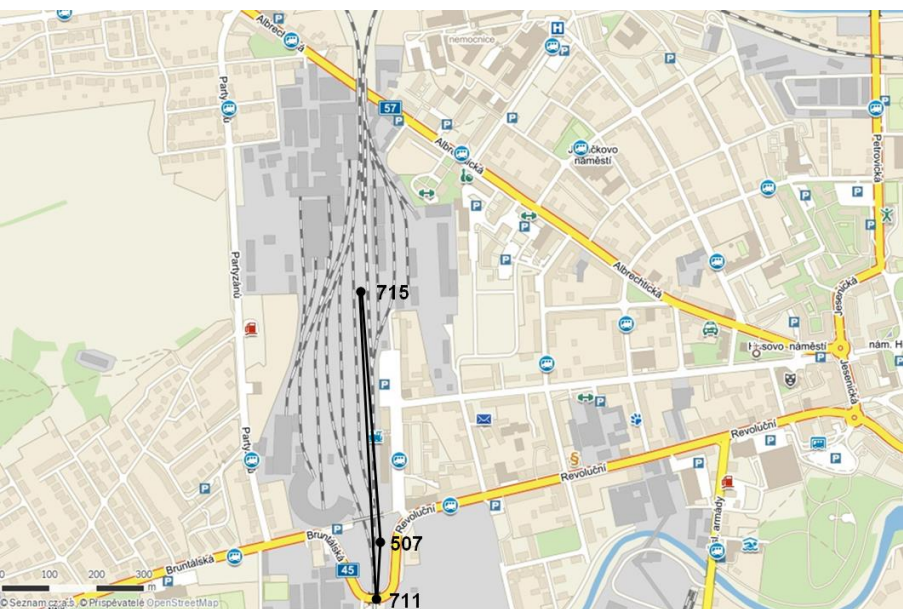
$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=39} (\bar{X} - X_i)^2}{39-13}} = 4 \text{ mm}$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{H} - H_i)^2}{n-k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=39} (\bar{H} - H_i)^2}{39-13}} = 18 \text{ mm}$$

Výběrové směrodatné odchylky nezávislých trojic měření

Pilotní úsek železniční tratě	σ_X [mm]	σ_Y [mm]	Rozsah souboru trojic <i>n</i>
Opava - Krnov	5	4	39
Hranice na Moravě – Valašské Meziříčí	4	5	30
Beroun – Rakovník	4	4	10

Ověření tvarové a rozměrové přesnosti klasickým měřením na vybraných částech tratě Krnov – Opava

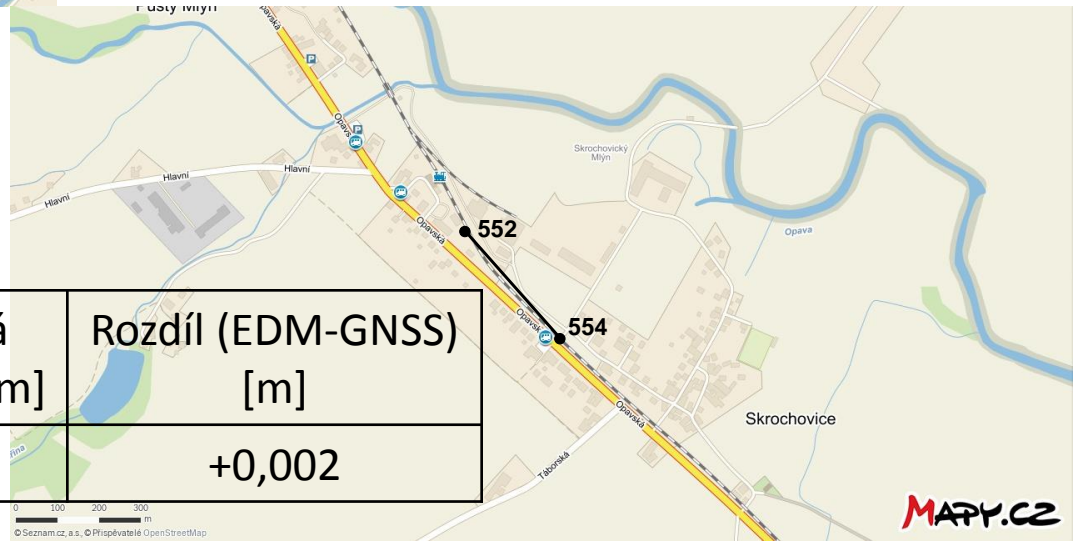


Zbytkové odchylky (opravy) po shodnostní transformaci

Bod	vY [m]	vX [m]
507	-0.003	0.000
711	+0.002	0.000
715	0.000	-0.001

Rozdíl vodorovných délek

Bod - Bod	Vodorovná délka GNSS [m]	Vodorovná délka EDM [m]	Rozdíl (EDM-GNSS) [m]
552 - 554	354,414	354,416	+0,002



Opakovatelnost měření (ČSN ISO 7078)

Těsnost shody mezi výsledky po sobě následujících měření téže **veličiny** prováděné **stejnou osobou** při dodržení všech následujících podmínek:

stejná metoda měření

stejný pozorovatel

stejný měřicí přístroj

stejně místo

stejně podmínky použití

opakování během krátkého časového období

Opakovatelnost výsledků měření z nezávislých trojic na bodě 530 tratě Krnov – Opava

zaměření bodu 530 ze dne 29.3.2015

Sestavení výsledků měření Opava - Krnov (29.3.-1.4.2015)

Bod	Datum, čas obs.	Délka obs.	Metoda	VA	Y [m]	X [m]	H [m]	Vnitřní přesnost obs.				Odchylky od průměru				
								střední kvadratická σ								
								σY	σX	σH	% out	GDOP	vY	vX	vH	Op
530_1	29.3.2015 9:48:53	0:09:58	MAX	1,257	507176,763	1071669,238	301,297	0,004	0,007	0,010	7,7	2,2	-0,008	-0,016	0,013	0,018
530_2	29.3.2015 13:57:53	0:09:58	MAX	1,289	507176,753	1071669,213	301,321	0,006	0,024	0,015	3,3	3,2	0,002	0,008	-0,011	0,009
530_3	29.3.2015 17:02:29	0:09:58	MAX	1,264	507176,750	1071669,214	301,312	0,005	0,006	0,010	2,0	2,1	0,005	0,008	-0,002	0,010
530 střední hodnota					507176,755	1071669,222	301,310	0,005	0,015	0,012	max. - min.		0,013	0,025	0,024	0,012
530 ŽBP					507176,764	1071669,214	301,309									
rozdíl od ŽBP					-0,009	0,008	0,001									


zaměření bodu 530 ze dne 1.4.2015

Sestavení výsledků měření Opava - Krnov (29.3.-1.4.2015)

Bod	Datum, čas obs.	Délka obs.	Metoda	VA	Y [m]	X [m]	H [m]	Vnitřní přesnost obs.				Odchylky od průměru				
								střední kvadratická σ								
								σY	σX	σH	% out	GDOP	vY	vX	vH	Op
530_4	1.4.2015 9:40:48	0:04:59	MAX	1,218	507176,751	1071669,220	301,272	0,007	0,005	0,014	1,7	2,0	0,001	-0,003	0,003	0,003
530_5	1.4.2015 13:14:23	0:04:59	MAX	1,215	507176,751	1071669,212	301,275	0,002	0,004	0,006	8,0	1,8	0,002	0,005	0,000	0,006
530_6	1.4.2015 16:30:57	0:04:59	MAX	1,155	507176,756	1071669,219	301,278	0,006	0,004	0,008	3,7	1,4	-0,003	-0,002	-0,003	0,004
530 střední hodnota					507176,753	1071669,217	301,275	0,005	0,005	0,010	max. - min.		0,005	0,008	0,007	0,004
530 ŽBP					507176,764	1071669,214	301,309									
rozdíl od ŽBP					-0,011	0,003	-0,034									

Porovnání výsledků nezávislých trojic měření

Bod	Y [m]	X [m]	H [m]
530 (29.3.2015)	507 176,755	1 071 669,222	301,310
530 (1.4.2015)	507 176,753	1 071 669,217	301,275
Rozdíly	+0,002	+0,005	+0,035

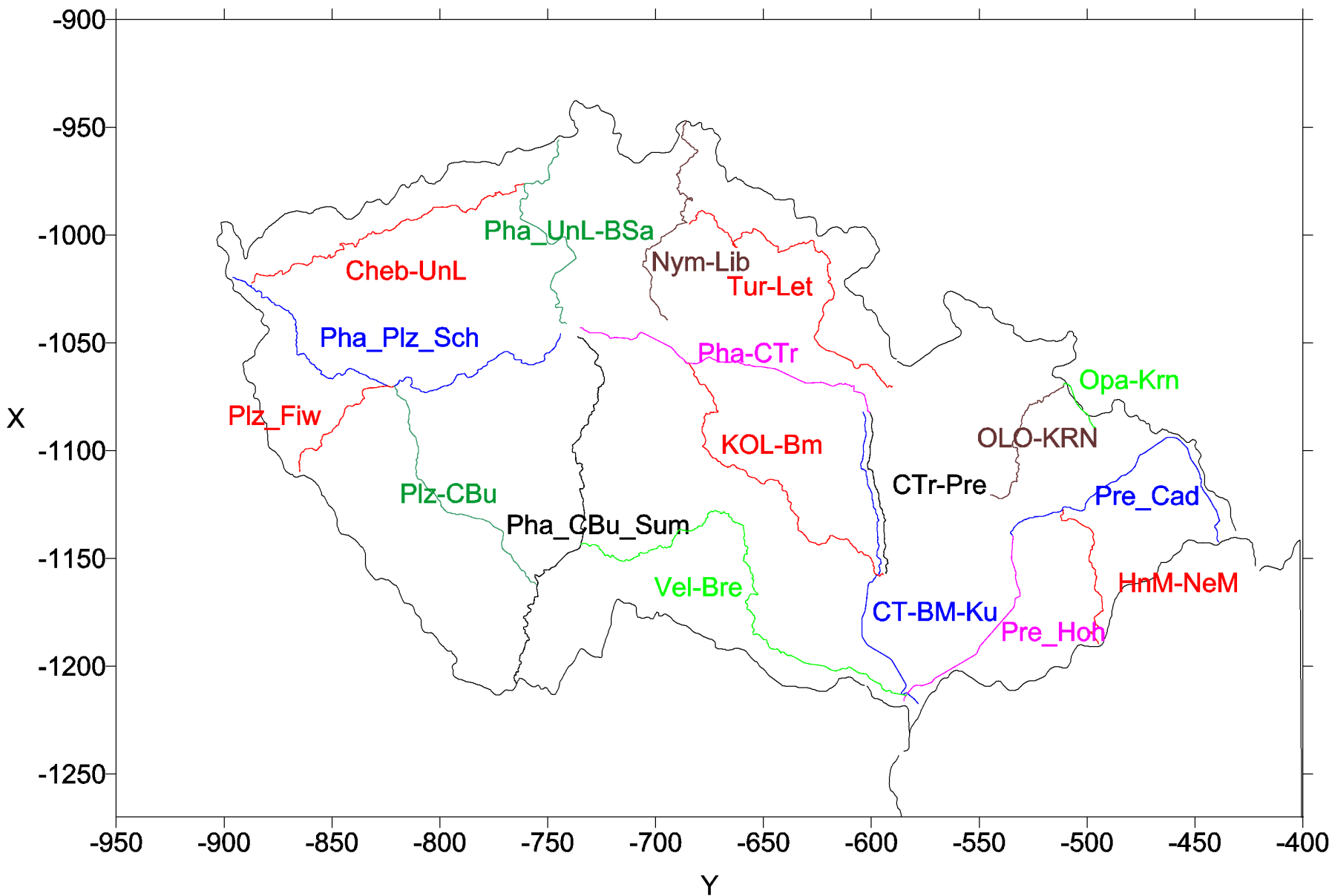


Analýza současného globálního transformačního klíče (GTK) ČR

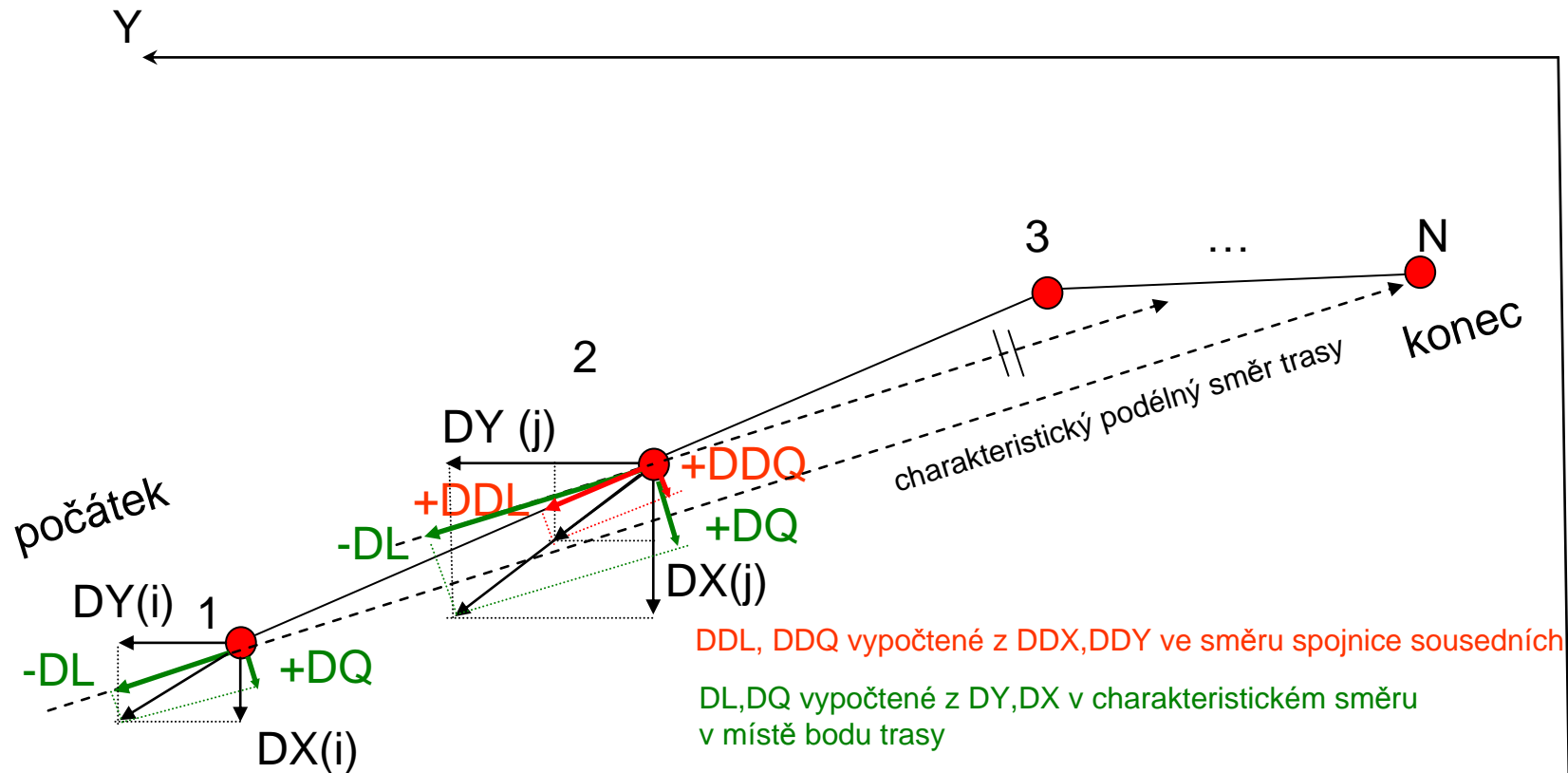
(v.1202)

zpracováno ve spolupráci s prof. Ing. Janem Kosteckým, DrSc. (VÚGTK Zdiby)

Přehled analyzovaných železničních tratí



Princip analýzy GTK



DY, DX ... absolutní odchylky v Y a X souřadnici

DDY, DDX ... rozdíly odchylek v Y a X souřadnici sousedních bodů (j - i)

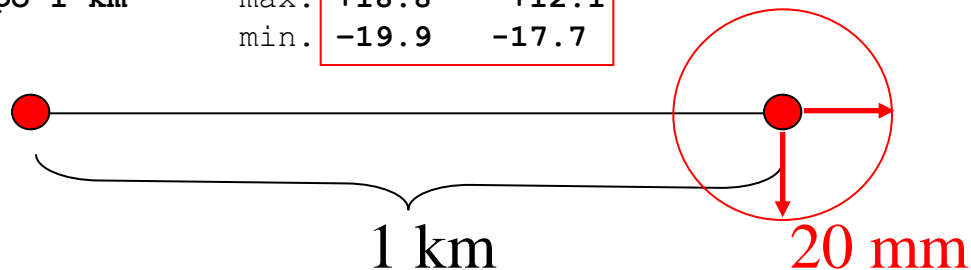
DL, DQ ... absolutní podélná a příčná odchylka

DDL, DDQ ... rozdíly odchylek v podélném a příčném směru sousedních bodů (j - i)

Současný stav a vlastnosti Globálního transformačního klíče (GTK)

hodnoty korekce jsou v mm

km	YX (Krovak)		DY	DX	DDY	DDX	DDL	DDQ	DL	DQ
0.000	600.903	1082.136	192.0	102.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.4	207.7
0.100	600.828	1082.201	193.0	100.0	1.0	-2.0	-2.1	-0.9	62.2	208.3
0.200	600.752	1082.266	193.0	99.0	0.0	-1.0	-0.6	-0.8	61.2	208.1
0.300	600.700	1082.351	193.0	97.0	0.0	-2.0	-1.7	-1.0	59.3	207.7
0.400	600.653	1082.439	194.0	95.0	1.0	-2.0	-2.2	-0.1	57.1	208.3
(1) 0.500	600.607	1082.527	193.0	93.0	-1.0	-2.0	-1.3	-1.8	55.4	207.0
0.600	600.569	1082.620	193.0	91.0	0.0	-2.0	-1.9	-0.8	53.4	206.6
0.700	600.530	1082.712	193.0	89.0	0.0	-2.0	-1.8	-0.8	51.4	206.2
0.800	600.492	1082.805	192.0	87.0	-1.0	-2.0	-1.5	-1.7	49.6	204.9
0.900	600.454	1082.897	192.0	85.0	0.0	-2.0	-1.8	-0.8	47.7	204.5
1.000	600.416	1082.990	191.0	84.0	-1.0	-1.0	-0.5	-1.3	46.9	203.3
1.100	600.377	1083.082	190.0	83.0	-1.0	-1.0	-0.5	-1.3	46.1	202.2
1.200	600.339	1083.174	189.0	81.0	-1.0	-2.0	-1.5	-1.7	44.3	200.8
1.300	600.301	1083.267	188.0	79.0	-1.0	-2.0	-1.5	-1.7	42.5	199.4
1.400	600.263	1083.359	186.0	78.0	-2.0	-1.0	-0.2	-2.2	41.9	197.3
(2) 1.500	600.225	1083.452	185.0	76.0	-1.0	-2.0	-1.5	-1.7	40.1	195.9
1.600	600.186	1083.544	184.0	75.0	-1.0	-1.0	-0.5	-1.3	39.3	194.8
1.700	600.148	1083.636	183.0	73.0	-1.0	-2.0	-1.5	-1.7	37.6	193.4
1.800	600.110	1083.729	181.0	72.0	-2.0	-1.0	-0.2	-2.2	37.0	191.3
1.900	600.072	1083.821	180.0	70.0	-1.0	-2.0	-1.5	-1.7	35.2	189.9
2.000	600.033	1083.914	178.0	69.0	-2.0	-1.0	-0.1	-2.2	34.6	187.7
součet (1) na 1 km							-15.4	-10.0		
součet (2) na 1 km							-9.0	-17.7		
pro trasu 160 km po 1 km						max.	+18.8	+12.1		
						min.	-19.9	-17.7		



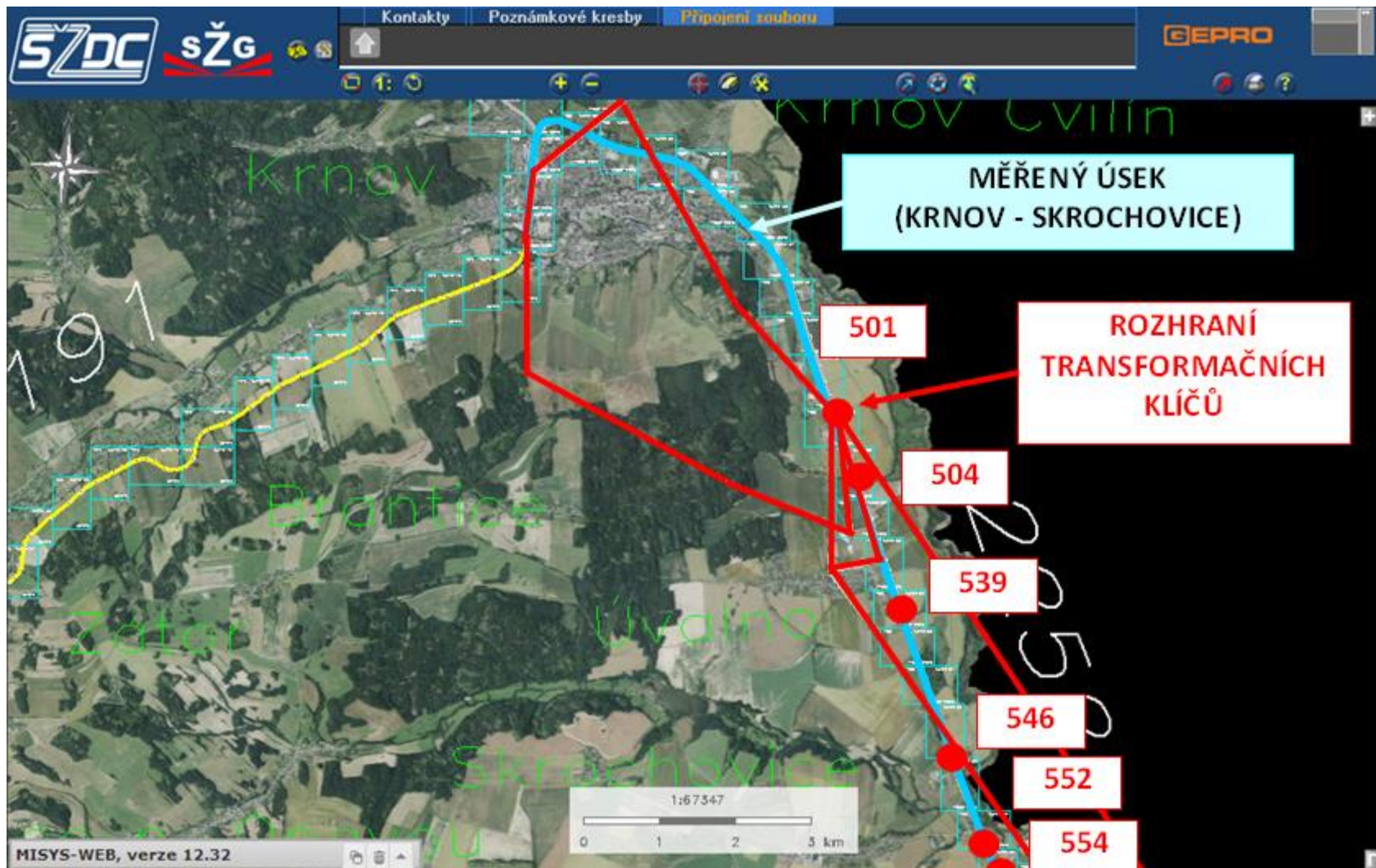
Odchytky S-JTSK vs. S-JTSK-05 na 1 km tratě – procentuální vyjádření pro podélnou složku DL

mm	standardní tabulka [%]	tabulka z výběrové údržby [%]
0-5	50.1	68.1
5-10	32.6	23.7
10-20	16.2	7.5
20-25	1.0	0.5
25-30	0.2	0.2

pro příčnou složku DQ

mm	standardní tabulka [%]	tabulka z výběrové údržby [%]
0-5	57.7	73.4
5-10	29.4	19.7
10-20	11.4	6.5
20-25	0.8	0.5
25-30	0.7	0.1

Rozhraní transformačních klíčů (bod 501)



Nehomogenity v ŽBP

Krnov – Skrochovice - nárůst odchylek v souřadnicích

Bod	OY [m]	OX [m]	DDY/1km [m]	DDX/1km [m]
501	-0,009	+0,016	-0,008	+0,002
504	+0,002	-0,020	-0,010	+0,004
539	-0,007	-0,001	-0,001	-0,002
546	-0,004	+0,025	-0,016	-0,018
552	-0,017	+0,056	-0,018	-0,020
554	+0,005	+0,050	-0,018	-0,020

Závěry

- 1) Prokázalo se, že navržená metodika měření je v podmínkách železnice realizovatelná a je efektivní pro určování polohové složky bodů primární sítě ŽBP.**
- 2) Metodika technologicky zaručuje opakovatelnost a reprodukovatelnost určení souřadnic Y, X v rovině národního systému S-JTSK s mezní odchylkou ± 10 mm ($P=0,90$, $\alpha=10\%$)**
- 3) Přesnost lze řídit dle potřeby, její případné zvýšení lze realizovat zvýšením počtu opakování měření za metodikou stanovených podmínek. Případné snížení přesnosti lze realizovat zaměřením pouze nejméně dvojice nezávislých měření.**
- 4) Prioritou pro umístění bodů primární sítě jsou dobré podmínky pro observaci technologií GNSS oproti možnosti využití kvalitní trvanlivé stabilizace takového geodetického bodu s horšími podmínkami pro observaci GNSS. Přitom se předpokládá, že vybudování sekundární sítě bude následovat bezprostředně po určení bodů primární sítě a tím případné použití běžné stabilizace bodů primární sítě nebude hrát roli.**

Závěry

- 5) Metodika zaručuje schopnost obnovení ŽBP s potřebnou přesností zejména v době výstavby, kdy ŽBP přebírá roli vytyčovací sítě a obvykle dochází k jejímu poškození nebo zničení provozem stavby.
- 6) Metodika zaručuje schopnost zajištění návazností projektové přípravy stavby a její realizace s odstupem i několika let a následně po celou dobu užívání stavby ve smyslu údržby prostorové polohy koleje.
- 7) Metodika svou přesností respektuje vytyčovací normy
- 8) Neprokázal se signifikantní rozdíl ve výsledcích měření při použití antény typu ChokeRing (AT504) a antén výrobcem deklarované podobné kvality (Trimble Tornádo, Trimble R8-2).

Závěry

- 9) **Výsledky měření na elektrifikovaných a neelektrifikovaných tratích jsou z hlediska přesnosti sobě odpovídající, tj. neprokázal se signifikantní rozdíl v přesnosti výsledků měření na elektrifikovaných a neelektrifikovaných tratích.**
- 10) **Efektivnost metodiky, při uvažované časové režijní náročnosti cca 30 min. pro určení jednoho bodu ŽBP, je určení 7 až 8 nezávisle 3x observovaných bodů s odstupem 4 hod. v průběhu časového intervalu 12 hod., tj. za 1 den jedním měřičem, s jednou družicovou aparaturou.**
- 11) **V roce 2017 se očekává finální řešení GTK. Doporučuje se definovat GTK jen ze ZBP včetně vyhlazení relativních změn geometrických deformací GTK na úroveň do 5 mm na 1 km.**



FAKULTA
STAVEBNÍ



Děkuji Vám za pozornost.

Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie

buress.j@fce.vutbr.cz

tel. 606 473 602