

# VYUŽITÍ TECHNOLOGIE GNSS PRO ZPŘESNĚNÍ MODELU TERÉNU ZÁPLAVOVÝCH OBLASTÍ

## USING GNSS TECHNOLOGY TO REFINE FLOODPLAIN TERRAIN MODELS

Ondřej Vystavěl\*<sup>1</sup>, Ladislav Bárta<sup>1</sup>, Jiří Bureš<sup>1</sup>

\*ondrej.vystavel@vutbr.cz

<sup>1</sup> Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie, Veveří 331/95, 602 00 Brno, ČR

### Abstrakt

Článek se zabývá využitím technologie GNSS při mapování koryta vodního toku za účelem zpřesnění 3D digitálního modelu terénu záplavové oblasti. Prezentovaná analýza dat byla provedena z profilového zaměření vodního toku Loučenského potoka v okolí města Duchcov. Předmětem analýzy bylo dvojí nezávislé určení výšek podrobných bodů určených metodou GNSS-RTK (s využitím sítí permanentních stanic CZEPOS a TRIMBLE VRS Now) za účelem posouzení proměnlivosti přesnosti použité metody v zákrytu ztížených observačních podmínkách, které vyplývají z typických vegetačních podmínek v okolí koryt vodních toků. Také byl posouzen soulad geodetického zaměření terénu s „open“ výškopisnými daty poskytovanými ČÚZK, který byl využit pro lokální kontrolu výškové přesnosti tohoto produktu.

### Abstract

The paper deals with the use of GNSS technology in watercourse mapping for the refinement of the 3D digital floodplain terrain model. The presented data analysis was performed from the profile survey of the Loučenský potok near the town of Duchcov. The subject of the analysis was the double independent determination of heights of detailed survey points determined by the GNSS-RTK method (using permanent GNSS networks CZEPOS and TRIMBLE VRS Now) in order to assess the variability of the accuracy of the method used in the obscuring difficult observation conditions resulting from the typical vegetation conditions in the vicinity of watercourse beds. The consistency of the geodetic survey with the 'open' elevation data provided by the ČÚZK was also assessed and used to locally verify the elevation accuracy of this product.

### Klíčová slova

GNSS RTK, zastínění observačního obzoru, digitální model terénu, DMR 5G, přesnost

### Keywords

GNSS RTK, observation horizon shading, digital terrain model, DMR 5G, accuracy

## 1 Úvod

Určení souřadnic a výšek podrobných bodů metodou real-time kinematic (RTK) založené na technologii globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) je v dnešní době běžné. Dosahovaná přesnost určení souřadnic a výšek je obvykle v hodnotách jednotek centimetrů. Neustále se zvyšuje spolehlivost určení souřadnic a výšek, díky současnému použití více družicových systémů (Navstar GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou atd.) a pokročilých výpočetních algoritmů umožňujících prostřednictvím integrovaných inerciálních měřících jednotek (IMU) rekonstruovat přerušované a neúplné GNSS signály. Výsledkem je robustní a rychle fixované řešení i v nepříznivých observačních podmínkách.

Náplní tohoto příspěvku je testování přesnosti určení souřadnic a výšek metodou GNSS-RTK při zhoršených observačních podmínkách v prostoru koryta vodního toku Loučenského potoka zaměřovaného pro účel zpřesnění 3D digitálního modelu terénu využívaného pro simulaci rozlivu

v záplavové oblasti u obce Duchcov. Existující dostupná data Digitálního modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G), v nadmořské výšce ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání (Bpv), jsou specifikována úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,30 m v zalesněném terénu [1]. Pro Slovenskou republiku existují obdobná data označovaná jako DMR 5.0, ve výškové složce s přesností danou střední chybou  $m_h \leq 0,11$  m [2].

Z hlediska měřitelnosti terénu metodou GNSS-RTK jsou zásadní observační podmínky. Dvě třetiny lokality vodního toku se vyznačovaly ideálními observačními oblohami s přechody do jednostranných a oboustranných zákrytů reliéfem, porosty, popř. i zástavbou vzhledem k ose vodního toku. Metoda GNSS-RTK byla v těchto podmínkách použitelná pro zaměření i s ohledem na efektivitu. V místech zákrytu souvislou vegetací (listnatý les) nebylo použití metody GNSS-RTK buď vůbec možné nebo efektivní. Metoda GNSS-RTK proto musela být nahrazena klasickou terestrickou tachymetrií.

Cílem příspěvku je prezentace analýzy proměnlivosti přesnosti GNSS měření v závislosti na observačních podmínkách daných skutečně observovaným počtem satelitů, hodnotou PDOP a mírou zastínění observační oblohy analyzovanou s využitím dat Digitálního modelu povrchu 1. generace (DMP 1G) [3] a DMR 5G. Současně byl vyhodnocený soulad výšek geodetického zaměření terénu s daty DMR 5G.

## 2 Zájmové území

Řešený vodní tok se nachází jihozápadně od města Duchcov v severních Čechách (Obr. 1). Jedná se o uměle zbudované koryto sloužící pro záchyt vody z povodí Loučenského potoka jako ochrana města Duchcov před případnými záplavami. Geodetická data byla pořízena měřením podél celkové délky 3,2 km řešeného úseku vodního toku. Průměrná šířka koryta vodního toku byla 7,5 m (vzdálenost hrana-hrana upraveného koryta) a hloubka koryta vodního toku byla od 0,5 m po 2,5 m. Řešený úsek lze s ohledem na výšku vegetace a s tím související observační podmínky rozdělit na tři oblasti.



Obr. 1 Řešený vodní tok rozdělený na tři části s různými observačními podmínkami.

V prvním úseku (zelený úsek na Obr. 1) jsou dokonalé observační podmínky (Obr. 2). V druhém úseku (oranžový úsek na Obr. 1) jsou pak observační podmínky zhoršené, na jedné straně koryta se nachází vzrostlé stromy s různě velikými odstupy. Nejedná se svou hustotou o běžný les, ale k ideálním observačním podmínkám je také daleko (Obr. 3). Třetí úsek (červený úsek na Obr. 1) prochází vzrostlým listnatým lesem (Obr. 4). Zde jsou observační podmínky z hlediska použití technologie GNSS jasně nejhorší. Proto sběr dat probíhal v průběhu února, tedy mimo vegetační období, jak je patrné z Obr. 3 a Obr. 4.



Obr. 2 Zelený úsek. Dokonalé observační podmínky (zelená louka).



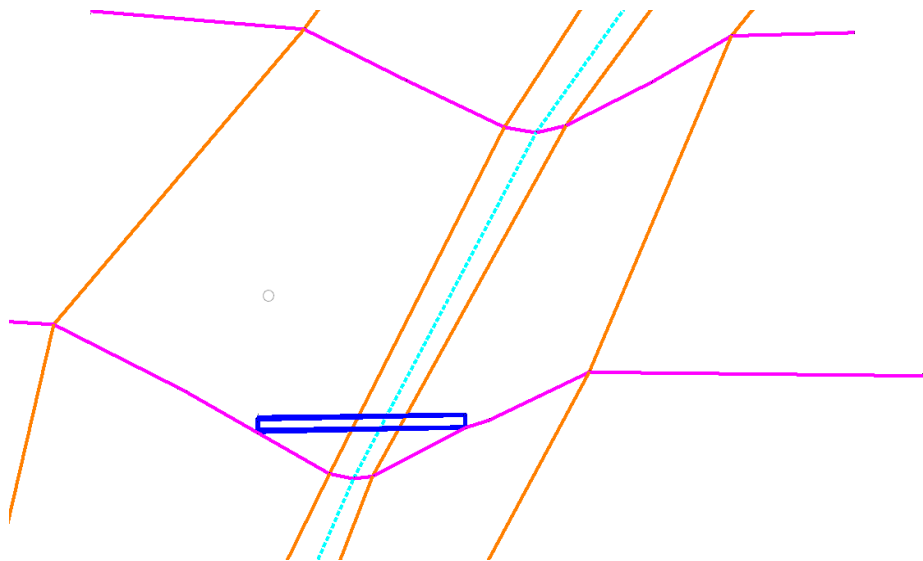
Obr. 3 Oranžový úsek. Zhoršené observační podmínky (vzrostlé stromy pouze na jedné nebo obou stranách koryta).



Obr. 4 Červený úsek. Kritické observační podmínky (koryto prochází lužním lesem).

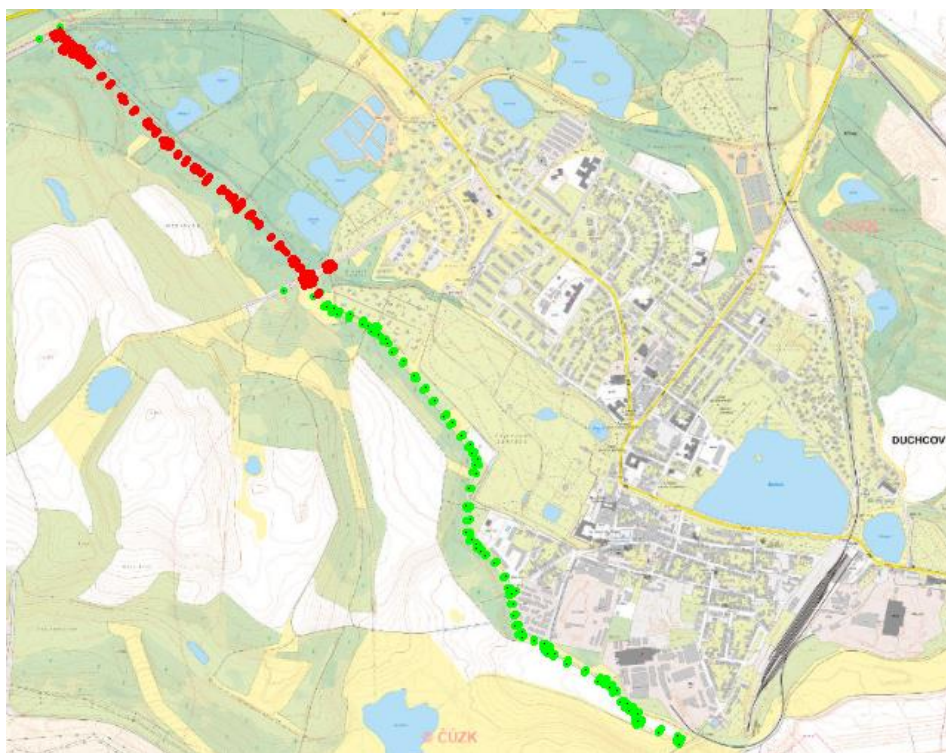
### 3 Použité metody měření

Profilové zaměření koryta vodního toku bylo provedeno, v přímých úsecích po 50 metrech, v místě potřeby podrobněji. Předmětem zaměření byly také překážky na vodním toku (propustky, lávky). Schéma typického příčného řezu viz Obr. 5.



Obr. 5 Typický příčný profil vodního toku měřený v posloupnosti bod terénu, hrana, pata, osa, pata, hrana bod terénu (profil fialově, osa vodního toku světle modře, terénní hrany hnědě, překážka v korytě tmavě modře).

Zelený a oranžový úsek (Obr. 1), byl zaměřen technologií GNSS. Červený úsek (Obr. 1) byl zaměřen klasicky terestricky prostorovou polární metodou z bodů pomocné měřické sítě (základem byl oboustranně připojený a orientovaný polygonový pořad, metodou GNSS-RTK byly určeny opěrné body). Celkem bylo určeno 713 bodů metodou GNSS-RTK a 569 bodů terestricky. Jednotlivé zaměřené podrobné body s rozlišením použité technologie měření jsou vizualizovány na Obr. 6.



Obr. 6 Barevné rozlišení způsobu určení souřadnic a výšek podrobných bodů (zeleně GNSS-RTK, červeně terestricky).

Návaznost geodetického měření do závazných referenčních systémů S-JTSK a Bpv byla provedena prostřednictvím bodů Základního polohového a výškového bodového pole (ZBPB, ZVBP) v nejbližším okolí lokality i s ohledem na možný vliv těžební činnosti způsobený lomem Bílina v bezprostřední blízkosti a pro případnou eliminaci systematické chyby modelu kvazigeoidu v dané oblasti.

Určení souřadnic a výšek podrobných bodů technologií GNSS bylo provedeno zdvojeně aparaturami:

- Trimble R12i, s připojením na síť permanentních stanic CZEPOS, služba VRS3-iMAX-MSM (Obr. 7)
- Trimble R780, s připojením na síť permanentních stanic Trimble VRS NOW Czech (Obr. 8)



Obr. 7 Aparatura Trimble R12i.



Obr. 8 Aparatura Trimble R780.

Podle údajů výrobce mají obě aparatury v ideálních observačních podmínkách stejnou deklarovanou přesnost určení výšky, specifikovanou směrodatnou odchylkou určení výšky  $\sigma_H = 15 \text{ mm}$  [4], [5]. Obě GNSS aparatury jsou vybaveny inerciálními měřicími jednotkami (IMU) pro kompenzaci náklonu výtyčky. Mohou přijímat a zpracovávat signály ze čtyřech GNSS systémů (Navstar GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou). Při měření byla nastavena elevační maska  $10^\circ$ . Doba měření jednotlivých podrobných bodů se pohybovala v intervalu 5 až 20 sekund. Jediným rozdílem v nastavení přístrojů byla tedy volba sítě permanentních stanic (CZEPOS nebo Trimble VRS Now).

Měření každého bodu bylo provedeno ihned po sobě dvěma výše uvedenými GNSS aparaturami s využitím odlišných sítí permanentních stanic. Měření bylo registrováno pouze při stabilním fixovaném řešení ambiguit, s vizuální kontrolou ukazatele okamžité přesnosti měření na displeji. Podrobné body byly měřeny do okamžité výškové přesnosti nepřekračující hodnoty střední výškové chyby 0,05 m.

## 4 Využití produkty digitálního modelu terénu ČÚZK

Pro analýzu bylo využito následujících „open data“ produktů ČÚZK:

- ZABAGED® - Výškopis – **DMR 5G**. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace [1]
- ZABAGED® - Výškopis – **DMP 1G**. Digitální model povrchu České republiky 1. generace [3]

DMR 5G „představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskretních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu.“ [1]

DMP 1G „představuje zobrazení území včetně staveb a rostlinného krytu ve formě nepravidelné sítě výškových bodů (TIN) s úplnou střední chybou výšky 0,4 m pro přesně vymezené objekty (budovy) a 0,7 m pro objekty přesně neohraničené (lesy a další prvky rostlinného krytu).“ [3]

Z těchto dat byl vytvořen rozdílový digitální model (DMP 1G „minus“ DMR 5G), který v našem případě posloužil pro přibližnou modelaci vegetačních podmínek. Rozdílový model lze tedy interpretovat jako výšku vegetace v daném místě, při uvážení nejistot uváděných ČÚZK.

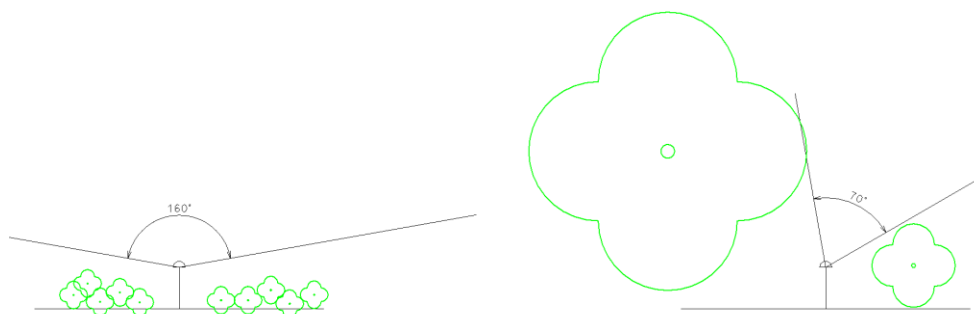
## 5 Proměnlivost přesnosti družicového měření v závislosti na observačních podmínkách

Analýzy jsou zaměřeny na přesnost určení výšek definující výškový průběh terénu. Správnost a spolehlivost následně vytvářeného digitálního modelu pro řešení záplavových oblastí je zásadní pro návrhy protipovodňových úprav.

### 5.1 Kvantifikace míry zákrytu observačního obzoru

Koryto vodního toku včetně břehů bylo v našem případě upravené bez vegetace. Lesní porost, křoviny a zástavba zpravidla začínala od 1 až 2 metrů od horních hran koryta vodního toku. V těchto místech byly současně měřeny krajní body příčných profilů. Observační obloha ve směru vodního toku byla následkem výše uvedeného vždy plně volná. Proměnlivost observačních podmínek proto lze orientačně vyjádřit ve směru příčném. Prakticky byla observační obloha vyhodnocována v příčných profilech k ose vodního toku po 20 m. Jednotlivé příčné profily obsahovaly zakres terénu z DMR 5G a zakres vegetačního krytu a případně i zástavby z DMP 1G. Limitace observační oblohy v měřeném profilu toku byla zakreslena pro body 2 m nad terénem odpovídající umístění GNSS přijímače viz Obr. 9. Konkrétní observační podmínky jednotlivých podrobných bodů byly následně určeny interpolací vzhledem k ose vodního toku.

Dále je tedy pracováno s kvantifikací míry zákrytu oblohy každého podrobného bodu. Tuto veličinu budeme označovat jako elevační oblast. Na základě tohoto parametru byly dvojice měřených bodů seřazeny od největší (160°) po nejmenší (70°). Menší oblast obzoru se v místech měření nevyskytovala. Příklady interpretace elevační oblasti jsou na Obr. 9. V levé části je ideální stav, tedy volný obzor, pouze nízká vegetace. Elevační oblast je zde omezena pouze elevační maskou nastavenou v přijímači (10°). V pravé části je příklad nejméně příznivého zastínění, tedy v blízkém okolí – vlevo od přijímače vzrostlý strom bránící příjmu GNSS signálů téměř z celé poloviny, v pravé části pouze křoví (není tak vzrostlé).



Obr. 9 Příklady interpretace elevační oblasti.

## 5.2 Analýza výsledků

Pro parametrizaci míry zákrytu oblohy byly všechny body seřazeny dle elevační oblasti sestupně a rozděleny do deseti kategorií po deseti stupních. Pro každou kategorii byly vypočteny parametry viz

Tab. 1, kde je pro úplnost uveden počet bodů, které do příslušné kategorie spadají. Dále byl pro body jednotlivých kategorií vypočten průměrný PDOP a průměrný počet satelitů a maximální rozdíl výšek ve dvojici měření GNSS  $\Delta H_{GNSS}$ . Z rozdílů dvojic měření  $\Delta H_{GNSS}$  byla vypočtena také výběrová směrodatná odchylka  $\sigma_{H_{GNSS(i)}}$  (1)

$$\Delta H_{GNSS} = H_{GNSS(1)} - H_{GNSS(2)} \quad (1)$$

kde

$H_{GNSS(1)}$  ... je výška určená aparaturou Trimble R12i

$H_{GNSS(2)}$  ... je výška určená aparaturou Trimble R780

Výsledná výška GNSS byla určena jako střední hodnota (2)

$$H_{GNSS(i)} = \frac{H_{GNSS(1)} + H_{GNSS(2)}}{2} \quad (2)$$

Střední hodnota výšky určené GNSS-RTK byla použita pro následné porovnání s výškami DMR 5G.

Výběrová směrodatná odchylka jednoho měření byla vypočtena z měřických dvojic ze vztahu (3)

$$\sigma_{H_{GNSS(i)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_{GNSS}}{2n}} \quad (3)$$

$\Delta H_{GNSS}$  ... je rozdíl dvojího zaměření téhož bodu (měřická dvojice)

$n$  ... počet dvojic měření

Tab. 1 Jednotlivé kategorie elevačních oblastí a jejich charakteristiky.

elevační oblast	počet bodů v kategorii	průměrný PDOP	průměrný počet sat.	$ \Delta H_{GNSS} $ max. [mm]	$\sigma_{H_{GNSS(i)}}$ [mm]	procento odlehlých
160° a větší	88	1,02	29	99	27	11 %
150° - 159°	59	1,03	28	98	23	5 %
140° - 149°	52	1,04	28	148	34	12 %
130° - 139°	69	1,08	27	98	30	16 %
120° - 129°	118	1,09	27	129	30	12 %
110° - 119°	115	1,12	27	171	31	8 %
100° - 109°	44	1,13	27	110	37	9 %
90° - 99°	37	1,12	26	196	38	11 %
80° - 89°	54	1,11	27	151	29	2 %
70° - 79°	38	1,11	28	177	32	8 %

Vývoj směrodatných odchylek výšky z Tab. 1 v závislosti na elevační oblasti volné oblohy je pro větší názornost zobrazen také v Obr. 10. Pokud hodnotami výškových směrodatných odchylek proložíme regresní přímku, vidíme, že dochází k mírnému trendu zhoršení přesnosti z hodnoty 25 mm na 35 mm. Vhodným ukazatelem je také procento odlehlých hodnot (měření, s rozdílem dvojího určení přes

dvojnásobek příslušné výběrové směrodatné odchylky v každé kategorii), které je v celém souboru průměrně na úrovni 10 %, nikoliv 5 %, což by odpovídalo rozšířené nejistotě  $K = 2$ .



Obr. 10 Závislost přesnosti určení výšky na elevační oblasti.

### 5.3 Experimentální zaměření třech profilů v lesním úseku

Stále častěji se setkáváme s nasazováním technologie GNSS i ve velmi ztížených observačních podmínkách. Za účelem vyhodnocení přesnosti bylo experimentálně provedeno zaměření třech úseků za ztížených observačních podmínek vodního toku zahrnující i lesní úsek (červeně vyznačený v Obr. 1). Jednalo se o měření v souvislém lesní porostu ve vegetačním klidu prakticky s nulovou observační oblohou viz Obr. 4. Celkem bylo zaměřeno 16 bodů, nejedná se tedy o statisticky rozsáhlý vzorek dat. Výsledek zaměření byl zaregistrován aparaturou vždy ve fixovaném stavu řešení, přičemž doba pro dosažení fixace se pohybovala kolem 90 sekund a byla výrazně delší než fixace za příznivých observačních podmínek.

Tab. 2 Rozdíly dvojího určení GNSS v lesním úseku.

profil 1	$\Delta H_{GNSS}$ [mm]	profil 2	$\Delta H_{GNSS}$ [mm]	profil 3	$\Delta H_{GNSS}$ [mm]
1	2046	7	-32	11	74
2	6	8	17	12	32
3	-26	9	2	13	-6
4	24	10	-1	14	151
5	-53			15	-20
6	2936			16	2407

Z Tab. 2 je patrné, že rozdíly dvojic jsou v některých případech až překvapivě optimistické. Na třech bodech z šestnácti ale dochází k výraznému (až třímetrovému) rozdílu, a to při na displeji indikované fixaci řešení aparatury. Porovnány byly pouze rozdíly dvojího určení GNSS, jednotlivá určení nebyla porovnávána s terestrickým zaměřením či DMR 5G.

## 6 Vyhodnocení souladu geodeticky zaměřených výšek terénu a výšek z dat DMR 5G

Pro účely vyhodnocení byly ze souboru geodeticky zaměřených podrobných bodů odstraněny body, které nejsou na reliéfu (mostky, lávky, mostní zábradlí apod.).

DMR 5G není natolik podrobný, aby v něm koryto Loučenského potoka, v našem případě průměrné šířky 7,5 m, bylo dostatečně podrobně zachyceno. Na začátku řešeného úseku bylo navíc koryto vodního toku vedeno v nové trase, která vznikla později oproti pořízení dat DMR 5G, a tudíž tato nová trasa není zachycena v datech DMR 5G. Tato část úseku proto nebyla pro daný účel souladu dále číselně vyhodnocována.

Zaměřená data vodního toku byla rozdělena do dvou kategorií, které souvisí s deklarovanou přesností DMR 5G, tedy pro odkrytý terén a pro zalesněný terén. Tyto dvě kategorie korespondují také s použitými metodami sběru dat. V odkrytém terénu byla použita pro určení výšek technologie GNSS a v zalesněném terénu pak klasické terestrické tachymetrické měření s GNSS návazností.

### 6.1 Soulad výšek v odkrytém terénu

Pro každý měřený bod terénu byl vypočten rozdíl výšky určené metodou GNSS-RTK nebo terestricky a výšky odpovídající souřadnicově měřenému místu v DMR 5G a tyto rozdíly byly vizualizovány graficky (Obr. 11).

Odchylka výšky DMR 5G od výšky určené GNSS (4):

$$\Delta H_i = H_{DMR} - H_{GNSS} \quad (4)$$

Pro účely posouzení přesnosti DMR 5G byly z rozdílů výšek vypočteny:

- systematická odchylka (5) byla vypočtena jako střední hodnota rozdílů výšek DMR 5G a výšek zaměřených GNSS-RTK nebo terestricky v Bpv,
- výběrová směrodatná odchylka (6) reprezentující vnitřní přesnost DMR 5G, vypočtena z rozptylu odchylek od střední odchylky, tedy nezahrnující systematickou odchylku a
- úplná směrodatná odchylka (7) reprezentující vnější přesnost DMR 5G, která byla vypočtena z rozdílů výšek dle (4).

Systematická odchylka

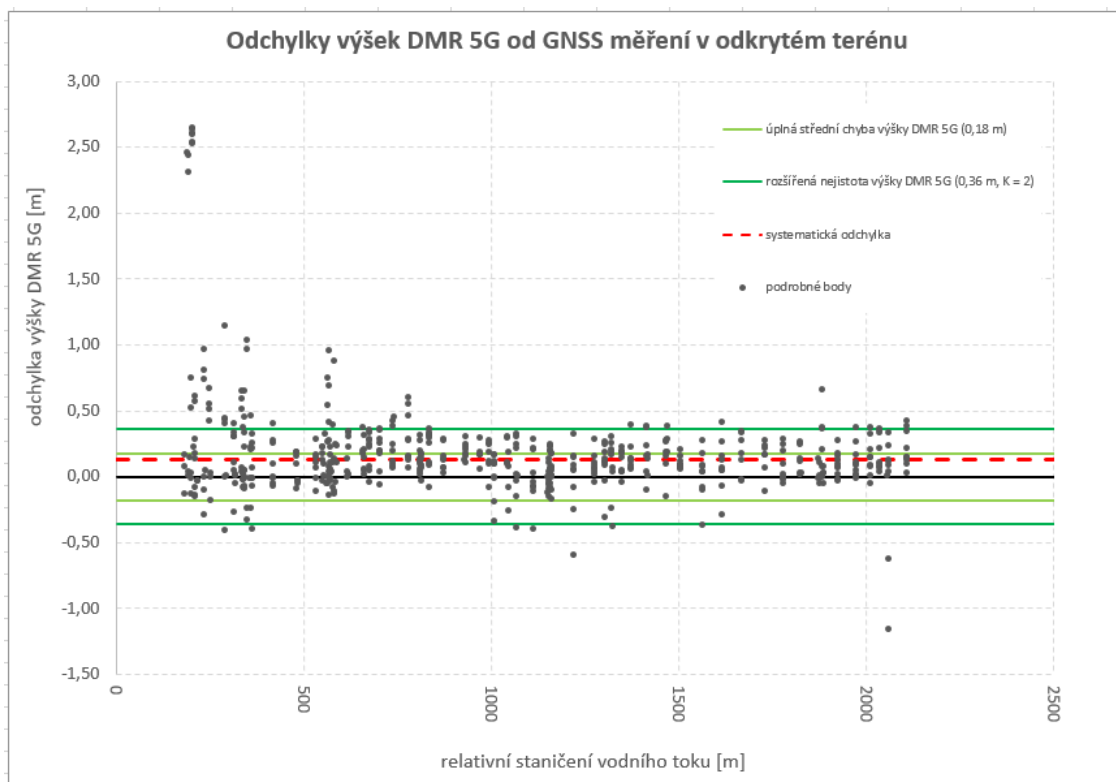
$$\overline{\Delta H} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i}{n} \quad (5)$$

Výběrová směrodatná odchylka (vnitřní přesnost)

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{\Delta H} - \Delta H_i)^2}{n-1}} \quad (6)$$

Úplná směrodatná odchylka

$$\varepsilon_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}{n}} \quad (7)$$



Obr. 11 Grafická vizualizace odchylek výšek DMR 5G v odkrytém terénu v závislosti na relativním staničení vodního toku.

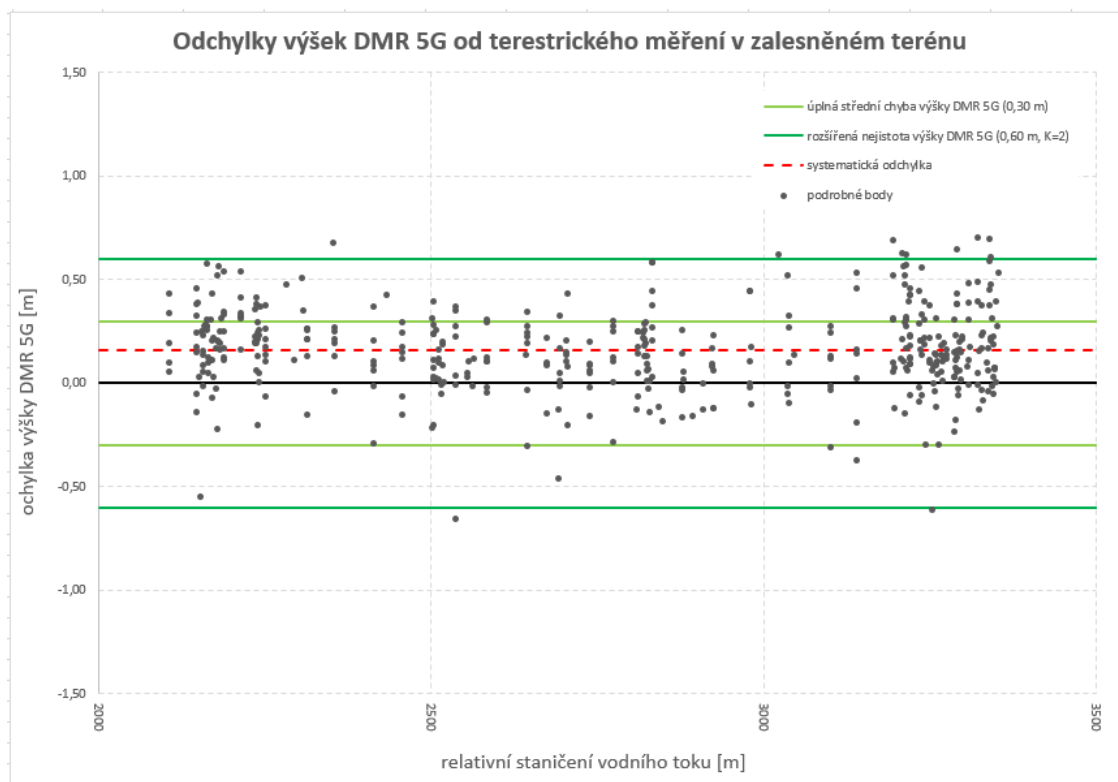
Z Obr. 11 na začátku řešeného úseku vidíme, že pro několik bodů je odchylka výšky DMR 5G až 2,5 m. Toto je způsobeno neaktuálností DMR 5G v souvislosti se vznikem nového úseku koryta potoka stavební činností po vzniku dat DMR 5G a tyto body byly ponechány v analyzovaném souboru dat pro ilustraci odchylek nového stavu nezachyceného v DMR 5G. Z grafu je patrná také systematická odchylka DMR 5G (červená čerchovaná čára). Většina výškových odchylek je v rozmezí  $\pm 0,36$  m, což odpovídá rozšířené výškové nejistotě výšky DMR 5G v odkrytém terénu (pravděpodobnost  $P = 0,95$ ; riziko nesprávného závěru  $\alpha = 5 \%$ ). Hodnoty výškových odchylek, překračujících rozšířenou nejistotu, pravděpodobně souvisí s nedostatečnou podrobností DMR 5G a s nedokonalým odfiltrováním vegetace z dat pro jeho tvorbu.

## 6.2 Soulad výšek v zalesněném terénu

Pro úplnost byl analyzován i rozdíl výšek určených terestricky metodou tachymetrie s návazností do závazných geodetických referenčních systémů s využitím GNSS a výšek odpovídajících v DMR 5G v zalesněném úseku. Výsledky jsou opět graficky vizualizovány (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Data byla analyzována analogicky stejně jako pro odkrytý terén s tím rozdílem, že hodnota  $\Delta H_i$  byla v rovnicích (5), (6) a (7) vypočtena s využitím tachymetricky zaměřené výšky  $\Delta H_i$  dle rovnice (8).

$$\Delta H_i = H_{DMR} - H_{TS} \quad (8)$$

Z Obr. 12 je opět patrná systematická odchylka DMR 5G, většina výškových odchylek v rozmezí  $\pm 0,60$  m, což odpovídá rozšířené výškové nejistotě výšky DMR 5G (pravděpodobnost  $P = 0,95$ ; riziko nesprávného závěru  $\alpha = 5 \%$ ).



Obr. 12 Grafická vizualizace odchylek výšek DMR 5G v zalesněném terénu v závislosti na relativním staničení vodního toku.

### 6.3 Výsledky analýz přesnosti DMR 5G v odkrytém a zalesněném terénu

Vybrané parametry přesnosti byly vypočteny zvlášť pro odkrytý a zalesněný terén. Jejich srovnání je uvedeno v Tab. 3. Vzhledem k nižší podrobnosti dat DMR 5G jsou také vybrané parametry vypočteny pro body filtrované do kategorií pouze terén-břeh a terén-dno, proto aby mohly správně zachytit vodní tok. Systematická odchylka DMR 5G je menší, cca poloviční, oproti náhodné složce přesnosti. Z výsledku vyhodnocení je patrné že přesnost DMR 5G v řešené lokalitě je prakticky stejná, jak v oblasti bez porostu, tak v oblasti s porostem v podobě řídkého lužního lesa.

Tab. 3 Charakteristiky přesnosti DMR 5G.

parametry přesnosti	v odkrytém terénu [m]			v zalesněném terénu [m]		
	všechny body	pouze body břeh	pouze body dno	všechny body	pouze body břeh	pouze body dno
maximální odchylka [m]	1,15	1,15	0,98	0,71	0,68	0,71
minimální odchylka [m]	-1,22	-1,22	-0,05	-0,65	-0,65	-0,09
systematická odchylka DMR 5G [m]	0,13	0,08	0,28	0,16	0,09	0,26
náhodná složka přesnosti [m]	0,24	0,23	0,18	0,20	0,21	0,17
úplná směrodatná odchylka [m]	0,27	0,25	0,33	0,26	0,22	0,30
procento překračující rozšířenou nejistotu (K = 2)	10 %	6 %	21 %	2 %	1 %	4 %
procento překračující rozšířenou nejistotu při použití kritérií pro odkrytý terén v zalesněném terénu	-	-	-	15 %	17 %	24 %

## 7 Závěr

Experimentálně bylo doloženo (

Tab. 1), že se zhoršujícími observačními podmínkami v trendu dochází k zhoršení všech sledovaných parametrů metody GNSS-RTK (roste PDOP, snižuje se počet satelitů, zvětšuje se maximální výškový rozdíl dvojic měření a zhoršuje se výšková směrodatná odchylka). Míra zhoršení výškové přesnosti však není výrazná, což je jistě zásluha vyspělých algoritmů používaných v družicových aparaturách.

Přesnost GNSS-RTK určení výšek vyjádřená ve formě směrodatné výškové odchylky vypadá velmi optimisticky. Přesnost zaměření neznepevněného povrchu lze realizovat na úrovni 20 až 40 mm při volné či částečně zastíněné obloze, ale ukázalo se, že množství odlehlých hodnot je 10 %. Maximálně odlehlé hodnoty se pohybují ve čtyřnásobku úplné směrodatné odchylky.

Při experimentálním použití metody GNSS-RTK v lesním úseku se na první pohled (Tab. 2) může jevit, že výsledky jsou z hlediska přesnosti uspokojivé. Výrazným varováním jsou však na první pohled neojedinělé odlehlé hodnoty velikosti až několika metrů, což ukazuje na problém fixace řešení, ve kterém se pravděpodobně projevuje vliv multipath. Signálním aspektem toho byla skutečnost, že doba fixace při měření těchto podrobných bodů byla v řádu minut a při zaměřování docházelo k opakované ztrátě a nutnosti opětovné fixace. Efektivnost a spolehlivost měření metodou GNSS-RTK v zalesněném úseku je tedy oproti klasickému terestrickému tachymetrickému měření značně nižší i při zohlednění časové režie nutnosti zřízení pomocné měřické sítě pro terestrické měření.

V místě vodního toku, v celém jeho měřeném úseku, byla zjištěna systematická odchylka DMR 5G +10 až +20 cm vůči GNSS-RTK a terestrickému tachymetrickému zaměření považovaného za skutečnou hodnotu (konvenčně pravou). Tedy DMR 5G je v této lokalitě výše, než odpovídá skutečnosti. Odchylka decimetrová až několika decimetrová není nezanedbatelná při modelování záplavových oblastí. Příčina kladné systematické výškové odchylky je očekávaná s ohledem k možné nedostatečné filtraci nízké vegetace (trávy) v datech, z nichž je generován DMR 5G.

V parametru úplné směrodatné odchylky DMR 5G se ukázala srovnatelná přesnost v odkrytém i zalesněném terénu. Zjištěné hodnoty přesnosti jsou v souladu s přesností deklarovanou metadaty DMR 5G. Jedním z významných nedostatků DMR 5G je jeho nedostatečná podrobnost pro účel modelování koryt menších vodních toků, což souvisí se spolehlivostí modelování záplavových oblastí. Proto je nutné objekty koryt menších vodních toků geodeticky doměřovat a tím aktualizovat DMR 5G.

## Literatura

- [1] ČÚZK: Geoportál. ZABAGED® - výškopis – DMR 5G. Digitální model reliéfu České republiky 5. generace v S-JTSK, Bpv. Online. 2010.  
Dostupné online z: [https://geoportál.cuzk.cz/\(S\(nm2owpbjicz454ptg1egbqkh\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&metadataXSL=full&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V](https://geoportál.cuzk.cz/(S(nm2owpbjicz454ptg1egbqkh))/Default.aspx?mode=TextMeta&metadataXSL=full&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V) [cit. 2025-01-11].
- [2] DOMBIOVÁ, K.: Aktualizácia siete vodných tokov na podklade Digitálneho Modelu Reliéfu 5.0. Geodetický a kartografický obzor, ročník 70/112, 2024, číslo 5, str. 81-95
- [3] ČÚZK: Geoportál. ZABAGED® - výškopis – DMP 1G. Digitální model povrchu České republiky 1. generace v S-JTSK, Bpv. Online. 2010.  
Dostupné online z: [https://geoportál.cuzk.cz/\(S\(nm2owpbjicz454ptg1egbqkh\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&metadataXSL=full&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V](https://geoportál.cuzk.cz/(S(nm2owpbjicz454ptg1egbqkh))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&metadataXSL=full&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V) [cit. 2025-01-11]
- [4] Trimble R12i GNSS systém: Technický popis. In: GEOTRONICS Praha, s. r. o., 2020, s. 4.  
Dostupné online z: [https://geotronics.cz/wp-content/uploads/2021/07/022516-511B-cs-CZ\\_Trimble-R12i-GNSS-Receiver\\_DS\\_A4\\_1020\\_LR.pdf](https://geotronics.cz/wp-content/uploads/2021/07/022516-511B-cs-CZ_Trimble-R12i-GNSS-Receiver_DS_A4_1020_LR.pdf) [cit. 2025-01-12]
- [5] Trimble R780 GNSS systém: Technický popis. In: GEOTRONICS Praha, s. r. o., 2022, s. 4.  
Dostupné online z: [https://geotronics.cz/wp-content/uploads/2023/04/022516-642A-cs-CZ\\_TrimbleR780\\_Datasheet\\_A4\\_0822\\_LR\\_update.pdf](https://geotronics.cz/wp-content/uploads/2023/04/022516-642A-cs-CZ_TrimbleR780_Datasheet_A4_0822_LR_update.pdf) [cit. 2025-01-12]

Recenzováno: 18. 1. 2025