

Český státní etalon velkých délek Koštice - Současný stav

Kratochvíl Jiří¹, Lechner Jiří², Červinka Ladislav² a Umnov Ilya²

The Czech national long distances measuring standard Koštice - State of play

This article gives information about new Czech national long distances measuring standard, which has been prepared at the distance base near the Koštice village. Submitter of the project is the Czech Office for Standards, Metrology and Testing. Research and document preparation for creation of the measuring standard were ensured by the Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography. Interlaboratory comparisons were made by staff of the Bundeswehr University in Munich. The paper reports about works, which will be carried out on national standard in the second half of this year. Purpose of this works is to improve characteristics of accuracy of national etalon.

Key words: national standard, VUGTK, distance base Koštice, COSMT, interlaboratory comparisons

Úvod

Povinností zeměměřického inženýra při výkonu zeměměřických činností v České republice je dodržovat předpisy, zejména zákon o zeměměřictví, jeho prováděcí vyhlášku, zákon o metrologii, jeho prováděcí vyhlášky a další obecně závazné předpisy.

U vybraných zeměměřických činností úředně oprávněný inženýr ještě potvrzuje, že výsledky zeměměřických činností „Náležitostmi a přesností odpovídají právním předpisům“ a dále podmínkám písemně dohodnutým s objednatelem.

Fyzická osoba s úředním oprávněním je povinna při ověřování výsledků zeměměřických činností jednat odborně a dodržovat podmínky stanovené právními předpisy a podmínky písemně dohodnuté s objednatelem, pokud nejsou v rozporu s právními předpisy.

Jedním z požadavků obecně závazných předpisů je používání metrologicky navázaných měřidel, tj. zpravidla kalibrovaných měřidel (zákon o zeměměřictví a zákon o metrologii). Návaznost měřidel je definovaná jako zařazení daných měřidel do nepřerušené posloupnosti přenosu hodnoty veličiny počínající etalonem nejvyšší metrologické kvality.

Zákon o metrologii definuje měřidla jako:

- etalony,
- pracovní měřidla stanovená,
- pracovní měřidla nestanovená,
- referenční materiály.

Tento zákon upravuje práva a povinnosti fyzických osob, které jsou podnikateli, a právnických osob (dále jen subjekty) a orgánů státní správy, a to v rozsahu potřebném k zajištění jednotnosti a správnosti měřidel a měření.

V § 11 odst. 5 zákona o metrologii je stanoveno, že jednotnost a správnost pracovních měřidel zajišťuje v potřebném rozsahu jejich uživatel kalibrací, není-li pro dané měřidlo vhodnější jiný způsob či metoda.

V České republice je vlastní kalibrace měřidel řešena nezávisle dvěma způsoby:

- z hlediska státní legislativy zákonem o metrologii č. 505/1990 Sb., ve znění zákona č. 119/2000 Sb., zákona č. 137/2002 Sb., a zákona č. 13/2002 Sb. a dále prováděcími vyhláškami č. 262/2000 Sb., kterou se zajišťuje jednotnost a správnost měřidel a měření ve znění vyhlášky č. 344/2002 Sb., vyhláškou č. 345/2002 Sb., kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu a vyhláškou o základních měřících jednotkách a o jejich označování,
- z hlediska systému kvality normami ČSN EN ISO 9000 a 9001 a souvisejícími předpisy.

Oba tyto směry mají za cíl zajistit jednotnost a správnost měřidel a měření. Tato podmínka se zpravidla zabezpečuje kalibrací, resp. navázáním měřidel na etalony vyšší metrologické kvality.

¹ Ing. Jiří Kratochvíl, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 – Dejvice, Český úřad zeměměřický a katastrální, Pod sídlištěm 9, 182 11 Praha 8 – Kobylisy, Česká Republika

² Ing. Jiří Lechner, CSc., Ing. Ladislav Červinka, Ing. Ilya Umnov, Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i., Ústecká 98, 250 66 Zdíby, Česká Republika

(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 3. 11. 2009)

Problematika zajištění návaznosti měřidel není zcela jednoduchá, zejména z hlediska technologického a ekonomického.

Organizace musí před realizací návazností měřidel zvážit technické možnosti a na základě ekonomického rozboru rozhodnout, zda se jim vyplatí vlastní řešení, nebo zda využijí služeb autorizovaných, popř. akreditovaných subjektů, kde jsou náklady na realizaci rozvrstveny a kde je zaručena v rámci autorizace a akreditace profesionalita prací.

V osmdesátých letech dvacátého století se začalo v České republice uplatňovat v širším měřítku měření elektronickými dálkoměry (EDM) a později integrovanými v totálních stanicích (TS). Nutnou podmínkou kvalitního měření je možnost ověřit jeho správnost. To lze provést dvěma základními způsoby:

- laboratorním určením parametrů měřidel (v případě EDM se jedná o určení elektromagnetických charakteristik jako je například nosná frekvence EDM, která se měří pomocí přesného čítače),
- porovnáním s vhodným etalonem veličiny.

Dlouhodobá praxe ukazuje, že uživatelé geodetické techniky upřednostňují zjišťování charakteristik měření porovnáním s etalonem, který svým charakterem odpovídá běžnému využití měřidla. Proto bylo v minulosti rozhodnuto o vybudování československé kalibrační základny.

Důležité je upozornit na fakt, že rozlišovací schopnost EDM, charakterizovaná dříve hodnotou několika milimetrů, se změnila na desetiny milimetru.

Tyto okolnosti a požadavek vlády, formulovaný v Usnesení vlády ke koncepci rozvoje metrologického systému České republiky se zajištěním ekvivalence se systémem v zemích Evropské unie a dále zajištění jednotnosti a správnosti měření uvedenými typy měřidel, zejména při výstavbě dálniční sítě a železničních koridorů na území České republiky, jsou nyní řešeny plánovaným vyhlášením státního etalonu velkých délek, jako kompletu:

- 12 fyzicky stabilizovaných bodů délkové geodetické základny Košnice
- sada 12 čepů odpovídající číslováním bodům základny
- TS Leica TCA 2003 s integrovaným elektronickým dálkoměrem
- měřidla ovlivňujících veličin (atmosférický tlak a teplota vzduchu).

Popis etalonu

Principem etalonu je realizace návaznosti velkých délek, tj. délek v rozsahu od 25 metrů až do největší 1450 metrů. Etalon je dán souborem pevně stabilizovaných geodetických bodů, jejichž vzájemná poloha je za ideálních podmínek v čase neměnná.

Geodetická základna Košnice se nachází asi 60 km severovýchodně od Prahy, v okrese Louny, severně od obce Košnice. Jedná se o soubor 12 pilířů nucené centrace postavených v jedné linii po levé straně silnice číslo 249 Košnice – Libčeves (obr. 1).



Obr. 1. Český státní etalon velkých délek - rozmístění pilířů.

Fig. 1. Czech national long distances measuring standard - position of observation pillars.

Pilíře nucené centrace (obr. 2) jsou svislé ocelové nosníky založené ve stabilním podloží v hloubce 3 až 10 m. Pilíře vystupují asi metr nad terén, na vrcholu jsou opatřeny kruhovou ocelovou deskou, která je rozměrově dimenzována pro uložení běžných geodetických přístrojů jako jsou TS. Vzájemná poloha pilířů je konstantní až na změny způsobené přirozeným pohybem zeminy.



Obr. 2. Český státní etalon velkých délek - pilíř nucené centrace.

Fig. 2. Czech national long distances measuring standard – pillar of forced centering

V ocelové desce je vysoustružen shora přístupný válcový otvor pro vložení čepu. Čepy jsou uzpůsobeny pro připevnění standardních geodetických přístrojů, mají závit pro přišroubování třinožky nesoucí pevně uložený teodolit nebo příslušný odrazný hranol. Čep s třinožkou nebo jiným přístrojem má tedy při správném uložení v pilíři nucené centrace pouze jeden stupeň volnosti, kterým je pohyb ve svislém směru.

Z analýzy měření na etalonu velkých délek vyplývá, že v důsledku teplotních změn (roční období) a zejména úrovně spodní vody dochází i v kratších časových obdobích (měsíce) ke změnám, které se projevují v jednotlivých délkách mezi pilíři.

Délkové odchylky parametrů etalonu jsou pravidelně sledovány a analyzovány. Při zjištění odchylky rovné nebo větší hodnotě standardní nejistoty jednotlivých délek etalonu bude okamžitě provedeno nové určení parametrů etalonu - navázání.

Délkové parametry etalonu byly určeny na základě dokumentované návaznosti laserinterferometru Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického, v.v.i. (VÚGTK) navázaného na laserinterferometr Českého metrologického institutu (ČMI) a dále dálkoměru TS Leica TCA 2003, navázaného na laserinterferometr VÚGTK. Parametry geodetické základny byly určeny i jinými technologiemi a v listopadu 2006 byly též nezávisle určeny geodetickou laboratoří Universität der Bundeswehr München.

Používání etalonu

Používání etalonu je širším způsobem popsáno v Příručce kvality Akreditované kalibrační laboratoře (AKL) VÚGTK - garanta etalonu, která je součástí řízené dokumentace AKL.

Hlavním využitím etalonu je získávání metrologických charakteristik navazovaných měřidel velkých délek, zejména EDM. Těmito charakteristikami jsou adiční konstanta celého kompletu měřidla, obvykle jde tedy o konstantu používaného kompletu EDM a odrazného hranolu a multiplikační konstantu vyjadřující závislost velikosti opravy na velikosti měřené délky - ppm.

Etalon realizuje celkem 66 délek, které jsou vymezeny všemi dvojicemi ze skupiny 12 geodetických bodů. Jedná se o přímé, šikmé délky. z praktických důvodů je vhodné používat vodorovné délky převedené do jednotného horizontu.

Vodorovná délka mezi geodetickými body je obecně definována jako délka průmětu šikmé spojnice bodů na zvolenou referenční plochu. Referenční plocha se volí tak, aby vhodným způsobem nahrazovala tvar Země. v daném případě byla použita kulová plocha o poloměru R velikosti 6 370 201,887 m procházející bodem číslo 1. Daný poloměr odpovídá poloměru referenční koule používané jako vhodná náhrada tvaru Země v podmínkách České republiky.

Parametry etalonu tvoří jedenáct hodnot délek a příslušných nejistot charakterizujících vodorovné délky vztažené k výškové hladině bodu 1. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Etalon je navázán jednak na etalon délky AKL VÚGTK, kterým je EDM TS Leica TCA 2003, dále je navázán na etalon geodetické laboratoře Universität der Bundeswehr München.

Tab. 1. Podrobné srovnání vodorovných délek vztažených k výškovému horizontu bodu 1 určených měřením EDM Leica TCA 2003 a Universität der Bundeswehr München.

Tab. 1. Detailed comparison between lengths related to horizon of point n.1 determined with EDM Leica TCA 2003 and Bundeswehr University in Munich.

Délka mezi body	Měření EDM s vyrovnáním		Měření Uni.Bw.		Rozdíl měření [mm]	Koeficient E_n^1 MPZ []
	Délka [m]	Standardní nejistota [mm]	Délka [m]	Standardní nejistota [mm]		
1 - 2	25,0881	0,6	25,0881	0,4	0,0	0,006
1 - 3	58,0519	0,6	58,0500	0,4	1,9	1,340
1 - 4	133,8820	0,7	133,8810	0,4	1,0	0,641
1 - 5	228,9821	0,9	228,9811	0,4	1,0	0,507
1 - 6	332,9590	1,2	332,9586	0,4	0,4	0,163
1 - 7	459,8596	1,5	459,8584	0,4	1,2	0,362
1 - 8	608,8426	2,0	608,8415	0,4	1,1	0,261
1 - 9	787,0672	2,5	787,0651	0,4	2,1	0,411
1 - 10	977,8832	3,1	977,8827	0,5	0,5	0,072
1 - 11	1199,9903	3,8	1199,9907	0,5	-0,4	-0,049
1 - 12	1450,0108	4,5	1450,0112	0,5	-0,4	-0,043

Technologie určování parametrů etalonu

Účelem určení parametrů geodetické základny je získání vodorovných délek mezi sousedními body nucené centrace včetně nejistot v určení těchto délek. Dále je nutné prozkoumat všechny fenomény ovlivňující jednoznačnost parametrů základny a způsoby využití etalonu.

Geodetická základna Košnice byla v souladu se současnou praxí při obdobných úkolech délkově určena čtyřmi nezávislými způsoby:

- EDM integrovaným v TS navázaným na laboratorní etalon délky realizovaný laserinterferometrem,
- EDM integrovaným v TS navázaným na etalon velkých délek Universität der Bundeswehr München s početním vyrovnáním (obr. 3),
- invarovými pásmy,
- měřením paralaktických úhlů na lať konstantní délky.



Obr. 3. Český státní etalon velkých délek - měření TS.

Fig. 3. Czech national long distances measuring standard - measuring with TS.

¹ Koeficient vyhodnocení výsledku porovnání z mezilaboratorních porovnávacích zkoušek

Navázání délkové geodetické základny Košnice na laboratorní etalon délky realizovaný prostřednictvím laserového interferometru

Délková základna Košnice byla metrologicky navázána na laboratorní délkový etalon, kterým je laserový interferometr Hewlett Packard 5519A. Navázání bylo provedeno prostřednictvím přenosného etalonu velkých délek, kterým je EDM Leica TCA 2003.

Měřicí rozsah laserového interferometru je omezen délkou optické lavice kalibrační laboratoře, pohybuje se v intervalu 0 až 30 m. Délkové navázání vychází z přenesení délek laboratorního etalonu na základnu Košnice. Kromě délkového úseku mezi pilíři nucené centrace 1 a 2 jsou všechny délky realizované základnou Košnice větší než 30 m, proto bylo nutné provést pro účely navázání rozdělení základny na dílčí úseky, jejichž délka nepřesahuje 30 m a zároveň je vždy počet dílčích úseků mezi sousedními pilíři co nejnižší.



Obr. 4. Český státní etalon velkých délek - práce v kalibrační laboratoři.

Fig. 4. Czech national long distances measuring standard - operations in calibration lab.

Vlastní přenos jednotky délky byl realizován tím způsobem, že vodorovné délky měřené na základně Košnice byly bezprostředně měřeny stejným přenosným etalonem, tedy EDM Leica TCA 2003, v kalibrační laboratoři (obr. 4), kde byla příslušná délka stabilizována pomocí třínožek na stativě, které byly postaveny tak, aby kromě měření EDM umožňovaly též měření laserovým interferometrem. Pro měření laserovým interferometrem bylo použito vyznačení bodů rytými křížovými značkami na válcových čepech zasunutých v centračně horizontálním trnu. Záznam měření je uveden v tabulce 2.

Pro nejistoty délek etalonu Košnice byl stanoven zjednodušený vztah ve tvaru

$$u_{[mm]} = Q(0,5;3,0 \cdot L_{[km]}),$$

kde L je měřená délka v km a u je standardní nejistota.

Tab. 2. Opravy z kalibrace EDM Leica TCA 2003.

Tab. 2. Residuals from calibration EDM Leica TCA 2003.

Vodorovná délka měřená laserovým interferometrem	Vodorovná délka měřená EDM Leica TCA 2003	Rozdíl hodnot	Standardní nejistota
[m]	[m]	[mm]	[mm]
16,480615	16,480769	-0,155	0,076
16,481398	16,481519	-0,121	0,076
16,482625	16,482786	-0,161	0,076
23,776787	23,776901	-0,114	0,077
25,090096	25,090307	-0,212	0,077
25,283419	25,283677	-0,258	0,077
25,380524	25,380896	-0,372	0,077
25,993916	25,994273	-0,357	0,077
27,260257	27,260355	-0,098	0,077
27,769414	27,769706	-0,292	0,078
29,796254	29,796523	-0,269	0,078

Určení délek měřením invarovými pásmy

Invarovými pásmy byly určeny sousední vodorovné délky mezi pilíři 1 až 7. Měření invarovými pásmy lze s uspokojivými výsledky a odpovídající rychlostí provádět pouze za úplného bezvětří, jinak dochází při běžné délce k chvění pásma, které prakticky znemožňuje odečítání.

Pro měření byla použita invarová pásma vyrobená ve VÚGTK (obr. 5). Jedná se o přenosný etalon délky s rozsahem stupnice 28 m a přenosný etalon délky s rozsahem stupnice 31 m.



Obr. 5. Český státní etalon velkých délek - měření invarovými pásmy.

Fig. 5. Czech national long distances measuring standard - measuring with invar tapes.

Kromě délky mezi geodetickými body 1 - 2 bylo třeba použít více než jeden klad pásma. v takových případech byl měřený úsek vhodně rozdělen mezilehlými geodetickými body, které byly dočasně stabilizovány Zeissovými třínožkami na stativěch. Stejný typ třínožek byl použit na nucených centracích. Jeden klad pásma odpovídal podle potřeby délce 16 až 25 m.

Zjednodušený vztah pro výpočet nejistoty délky základny Koštice určené prostřednictvím invarových pásem ve tvaru

$$u_{[mm]} = Q(0,06;6,61 \cdot L_{[km]}).$$

Mezilaboratorní porovnání

V tabulce 1 je provedeno vyhodnocení mezilaboratorních porovnávacích zkoušek (MPZ) včetně výpočtu koeficientů E_n . Všechny koeficienty E_n kromě délky 1 - 3 vyhovují obecně stanoveným podmínkám pro MPZ. VÚGTK při realizaci MPZ významným způsobem pomohla kalibrační laboratoř Universität der Bundeswehr München. Tato laboratoř je v oblasti měření délek a úhlů v SRN uznávanou autoritou, čemuž odpovídá i přístrojové vybavení, kterým byly MPZ provedeny, tak i dokonalost technologií měření. z důvodu neprokázání návaznosti etalonů je však tato technologie použita pouze jako další porovnávací technologie. Porovnáním výsledků od Universität der Bundeswehr München, výsledků určení parametrů měřením EDM Leica TCA 2003 s následným vyrovnáním a výsledků získaných měřením EDM Leica TCA 2003 metodou návaznosti na laserinterferometr VÚGTK lze konstatovat patřičnou shodu v určených délkách úseků jakož i ve stanovení hodnot nejistot měření při uvážení aktuálních změn u dvou bodů etalonu.

Závěr

Měření základny EDM Leica TCA 2003 po úsecích menších než 30 m, pro které lze provést návaznost na laboratorní etalon délky VÚGTK, kterým je laserinterferometr Hewlett Packard 5519A, bylo dosaženo návaznosti na systém primárních etalonů délky České republiky. Kalibrací EDM Leica TCA 2003 v laboratoři je možné vyšetřit s dostatečnou přesností opakovatelnost měření. Zároveň je měření krátkých délek výhodné pro snížení nejistoty variace teploty vzduchu podél dráhy měřicího paprsku. Oba tyto fenomény mají podstatný vliv na nejistoty v určení základny.

Navázání délkové základny prostřednictvím EDM umožňuje vyšší produktivitu měřických prací než navázání prostřednictvím invarových pásem.

Řešitelům projektu není znám způsob, kterým by bylo bez přispění ČMI dosažitelné akceptovatelné provedení MPZ. Z možných adeptů na provedení MPZ totiž Finsko provádí měření pouze do 100 m a Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) - Rakousko na požadavek VÚGTK nereagoval, resp. je potřeba projednat technický i ekonomický projekt měření, zajistit finanční prostředky na toto měření a zahrnout měření do plánu budoucích aktivit.

Parametry českého státního etalonu velkých délek budou v nejbližší době zpřesňovány. Bude se jednat jak o zpřesnění nejistot určení jednotlivých délek etalonu tak i o navazující kalibrace vlastních EDM. v této souvislosti je třeba uvést, že zpřesnění parametrů etalonu bude provedeno v maximální možné míře na dané časové období (pak nelze očekávat prakticky žádný rozdíl mezi CMC² a BMC³). u navazujících kalibrací jednotlivých měřidel pak bude velikost rozdílu mezi CMC² a BMC³ určena zejména povětrnostními podmínkami a nejistotou měření daným měřidlem (opakovatelnost měření), které jsou však již předmětem příslušných kalibračních postupů.

Určené parametry základny různými metodikami vykazují dobrou shodu výsledných parametrů etalonu i nejistot jejich určení. o tom svědčí dobrá shoda mezi technologiemi určení parametrů na základě měření EDM s následným vyrovnáním a měřením EDM navázaným na laserinterferometr VÚGTK, jakož i nezávislé měření kalibrační laboratoře Universität der Bundeswehr München. Metodiky měření invarovými pásmy a paralaktickou metodou mají poněkud vyšší nejistotu měření a jsou podstatně náročnější na vlastní realizaci. u všech metod je třeba brát v úvahu okolnost, že na aktuální stav základny mají vliv klimatické podmínky a hlavně geologické podmínky (úroveň spodní vody).

Literatura – References

- [1] Böhms, J.: Teorie chyb a vyrovnávací počet. *Geodetický a kartografický podnik, Praha 1990.*
- [2] Červinka L., Kratochvíl J., Lechner, J., Umnov I.: Nový český státní etalon velkých délek. *Sborník mezinárodní konference GEOS 2007, Praha 2007.*
- [3] Dokument EA 4/02 - Vyjadřování nejistot měření při kalibracích.
- [4] Heister, H.: Bericht über die Meßkampagne Prag 2001: Übertragung eines Strecken - und Winkelnormals auf die Referenzlinien Židovské Pece (Winkel), *Hvězda und Košnice (strecken) der VÚGTK Prag. 2001.*
- [5] Herda, M.: Měření délek pásmy ve stavebnictví a průmyslu. *Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, Praha 1972.*
- [6] Interní směrnice č. 4/2000 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví č. j. 1258/00/01-20.
- [7] Lechner, J.: Zpráva o vybudování geodetické kalibrační základny Košnice - dílčí zpráva o stanovení délkového rozměru základny Košnice v roce 1991 a porovnání její stability s výsledky předchozích měření. *Zdiby 1992.*
- [8] Zákon o zeměměřičství 200/1994 Sb., v platném znění.
- [9] Zákon o metrologii 505/1990 Sb., v platném znění.

² CMC - Calibration and Measurement Capability je schopnost měření, která je běžně, za normálních podmínek, k dispozici zákazníkům (uživatelům služby).

³ BMC - Best Measurement Capability je nejmenší nejistota měření, které může laboratoř dosahovat při provádění rutinních kalibrací téměř ideálních etalonů s cílem definovat, realizovat, uchovat či reprodukovat jednu či více jednotek dané veličiny, nebo které může dosahovat při rutinně prováděných kalibracích téměř ideálních měřících zařízení určených pro měření dané veličiny.