

NOVÝ POSTUP GEOREFERENCOVÁNÍ MAP III. VOJENSKÉHO MAPOVÁNÍ

Milan TALICH, Lubomír SOUKUP, Jan HAVRLANT,
Klára AMBROŽOVÁ, Ondřej BÖHM, Filip ANTOŠ

New approach to georeferencing of the Third Military Survey of Austro-Hungarian Empire

Abstract: A novel procedure for georeferencing raster images of the Third Military Survey maps from 19th century (1876-1880) is proposed in the contribution. There were several attempts to design a proper transformation model for georeferencing of these maps, but none of them have satisfactorily resolved crucial problems of positional discrepancy between the old maps and contemporary maps. In the contribution, these problems are resolved with the aid of three approaches: huge number of control points, complex four-step nonlinear transformation procedure with easily tunable simple set of comprehensible transformation parameters, controlled accuracy propagation of an arbitrary transformed point. Due to these three unique features the positional accuracy was dramatically reduced.

Keywords: georeferencing, accuracy analysis, elastic transformation, digital image processing, historical cartography, Third Military Survey

Úvod

Motivací pro georeferencování rastrových obrazů map III. vojenského mapování Rakousko-uherské monarchie (1876 – 1880) byla snaha zpřístupnit je na Internetu odborné veřejnosti formou webových mapových služeb (Web Map Services, WMS) tak, aby tyto digitalizované mapy mohly být využity k vědeckým studiím, zejména historickým, či k studiím vývoje krajiny a urbanismu. Pro tato studia je výhodná možnost porovnávat obsah starých map se současnými mapami nebo jinými georeferencovanými starými mapami, např. pomocí vhodně zvoleného překryvání jednotlivých vrstev s volitelným zprůhledněním. Porovnávání je nejvíce žádané především u map III. vojenského mapování v měřítku 1 : 25 000 (tzv. topografických sekcí), vzhledem k jejich dostatečné podrobnosti. Při správně provedené georeferenci vhodným typem transformace bude navíc v zásadě možné tuto transformaci uplatnit i na speciální mapy III. vojenského mapování, které jsou v měřítku 1 : 75 000. Speciální mapy byly v naší kartografické praxi používány přes 70 let a bylo vydáno velké množství jejich emisí. Jsou proto spolu s topografickými sekcemi v měřítku 1 : 25 000 jedním z nejcennějších kartografických pramenů znázorňující vývoj české krajiny a urbanistických sídel.

Georeferencování map III. vojenského mapování Rakousko-uherské monarchie do současného souřadnicového systému je dlouhodobým problémem, který doposud nebyl uspokojivě vyřešen. Tento problém se týká zejména mapových listů v měřítku 1 : 25 000 (topografických sekcí), kde se díky většímu měřítku výrazněji projevuje jejich polohový nesouhlas se současnými mapami prakticky znemožňující jejich využití službami WMS. Běžným způsobem georeferencování, tj. například při použití pouze rohů mapových listů, se docílí v ČR polohových chyb na identických bodech o velikostech v rozmezí 12 až 206 m. To jsou dokonce podstatně větší chyby, než jakých bylo dosaženo u map staršího II. vojenského mapování. Lze předpokládat, že tyto chyby jsou způsobeny jednak nedokonalostí tehdejších geodetických základů a také způsobem jakým mapy III. vojenského mapování vznikly, tj. v podstatě překreslováním spojeném s generalizací z tehdejších ostrovních map stabilního katastru.

Ing. Milan TALICH, Ph.D., Dr. Ing. Lubomír SOUKUP, Ing. Jan HAVRLANT, Ph.D., Ing. Klára AMBROŽOVÁ, Ing. Ondřej BÖHM, Ing. Filip ANTOŠ, Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i., Ústecká 98, 250 66 Zdiby, e-mail: Milan.Talich@vugtk.cz

Analýzami uvedených chyb se zabývá více prací (např. Čechurová a Veverka, 2009, Čada, 2005, 2006, Krňoul, 2010, 2012, Molnár a Timár, 2009, 2011, Seemann, 2008). Množství prací svědčí o důležitosti a naléhavosti řešení problému.

1. Polohový nesouhlas map III. vojenského mapování se skutečností

Polohový nesouhlas map III. vojenského mapování se skutečností je uveden na obr. 1. Na něm jsou šipkami znázorněny posuny na vybraných 4 246 trigonometrických bodech, které vznikly transformací při použití pouze rohů mapových listů jako identických bodů. Jak je názorně vidět, posuny vykazují jistý globální trend, který je jiný v Čechách s přibližně západní polovinou Moravy a jiný ve východní polovině Moravy. Přitom průměrná velikost posunů je 108 m se směrodatnou odchylkou 28 m. Nejvyšší počet posunů, celkem 2 370 tj. 56%, leží v intervalu 90 až 130 m. Maximální velikost posunu je 206 m.

Ukázka důsledku lokálního polohového nesouhlasu původního zákresu se skutečností při transformaci pouze na rohy mapových listů je pak na obr. 2, kde je překryv staré mapy III. vojenského mapování (barevná a šedivá kresba s textovými popisy a výškovými šrafováními) a nové mapy, kterou je vrstva budov ze Státní mapy 1 : 5 000 – vektor (sytě černé obrisy budov). Na něm se projevuje výrazný posun, který působí natolik rušivě, že v důsledku znemožňuje vizuální porovnávání staré mapy se současným stavem. Pro uvedené problémy nebylo zatím při dosavadních sofistikovanějších pokusech transformovat topografické sekce do současného souřadnicového systému dosaženo lepší přesnosti než několik desítek metrů (cca 40 m) ve skutečnosti (Čechurová a Veverka, 2009, Čada, 2006, Krňoul, 2010, 2012, Molnár a Timár, 2009, 2011, Seemann, 2008). Není přitom ani tak důležité jak a proč tyto chyby vznikly, důležité je pouze najít způsob, jak je v co nejvyšší možné míře při georeferencování eliminovat.

2. Popis postupu georeferencování

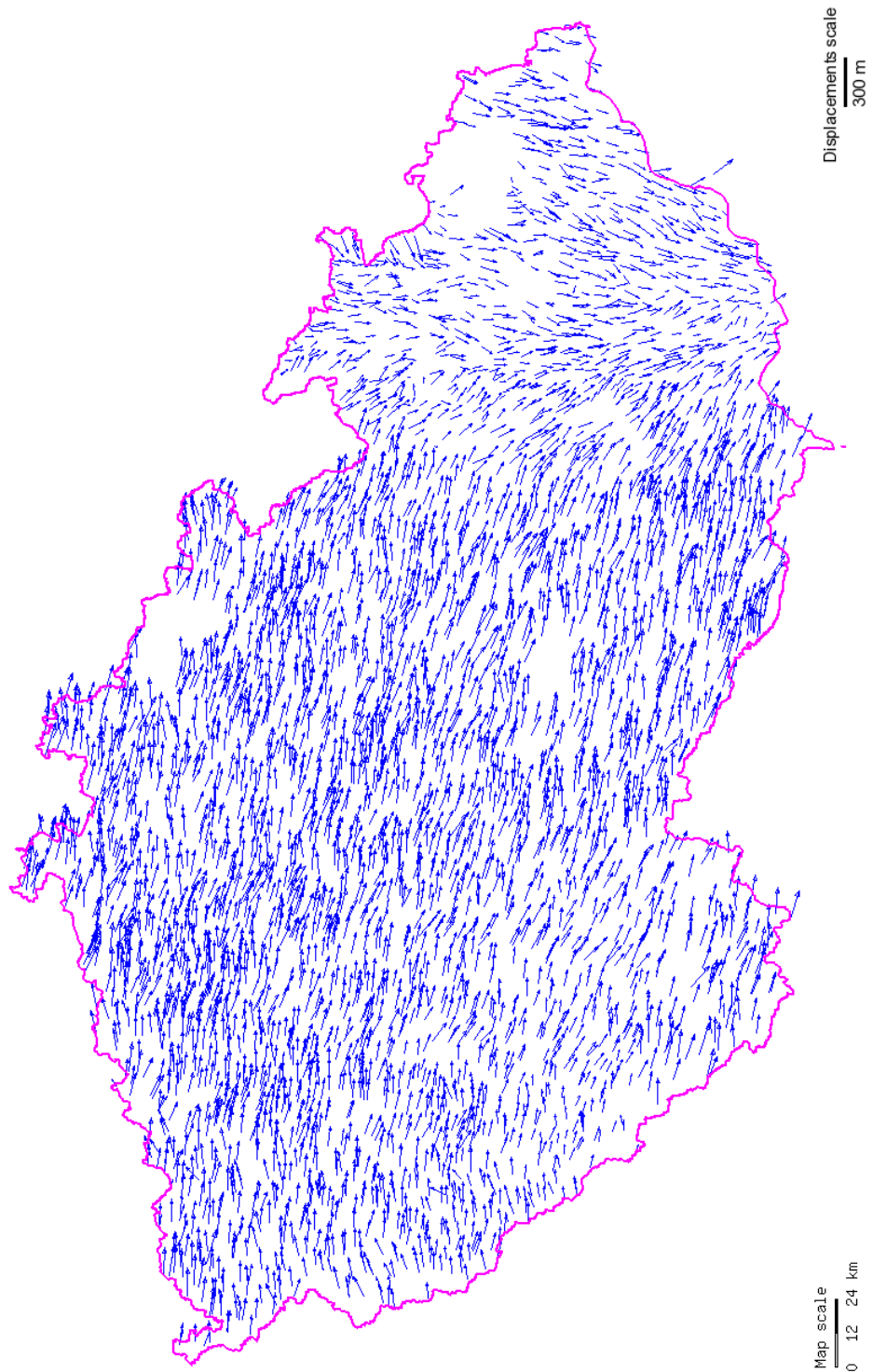
K odstranění problémů s polohovým nesouhlasem byl navržen nový postup georeferencování topografických sekcí III. vojenského mapování s uplatněním netradičních přístupů na báze moderních statistických metodách zpracování experimentálních dat, které vycházejí z tří zásad:

1. Ke správnému georeferencování (vlícování) digitalizovaných rastrových obrazů starých map do současného souřadnicového systému je třeba použít co největší počet identických (vlícovacích) bodů. Jejich validita musí být prověřena statistickými testy.
2. Musí být eliminována srážka papíru, respektováno původní kartografické zobrazení map a použita speciální elastická transformace, která by dokázala v dostatečné míře korigovat nehomogenní rozložení nepřesnosti (polohového nesouhlasu se skutečností) starých map a přitom nezpůsobila nepřiměřeně drastické deformace jejich původního obsahu.
3. Parametry transformačního modelu musí mít názorný smysl, aby bylo možno transformační model citlivě vyladit.

Navržený postup se pak skládá ze čtyř kroků:

1. Eliminace srážky mapového listu (napravení rozměrů mapových listů na původní nesražený rozměr).
2. Zobrazení mapového listu na Besselův elipsoid (zpětné (inverzní) zobrazení k původnímu kartografickému zobrazení).
3. Kartografické zobrazení Besselova elipsoidu do roviny (zobrazení do zvoleného současného kartografického zobrazení – např. Křovákova zobrazení). V případě, že zvolené současné kartografické zobrazení používá jiný než Besselův elipsoid použitý při III. vojenském mapování, je třeba provést ještě další mezikrok, tj. transformaci zeměpisných souřadnic z Besselova elipsoidu na jiný elipsoid používaný současným zobrazením.
4. Elastická transformace v rovině (dodatečné korigování nehomogenního rozložení nepřesnosti starých map).

Každý z těchto kroků představuje určitou dílčí transformaci, jejich složením vznikne výsledná transformace. Její aplikací na zdrojový rastrový obraz mapového listu vznikne digitální obraz v požadovaném souřadnicovém systému současného kartografického zobrazení. Z takto přetransformovaných mapových listů pak lze sestavit bezešvou mozaiku pokrývající celé území České republiky.



Obr. 1 Chyby v polohovém nesouhlasu map III. vojenského mapování na trigonometrických bodech



Obr. 2 Překryv staré mapy III. vojenského mapování a nové mapy (georeferencování provedeno jednoduchou transformací využívající jen rohů mapových listů)

3. Eliminace srážky mapového listu

K eliminaci srážky mapových listů topografických sekcí se použije afinní transformace souřadnic, neboť papír mapového listu se deformuje v různých směrech různě. Přitom právě postup jeho výroby ve válcovacích papírenských strojích je určující a způsobuje, že charakter sesychání papíru má extrémní velikosti ve dvou na sebe přibližně kolmých směrech.

$$\mathbf{x} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{r},$$

kde \mathbf{x} – vstupní souřadnice,
 \mathbf{X} – výstupní souřadnice,
 \mathbf{Q} – matice afinní transformace,
 \mathbf{r} – posun počátků souřadnicových systémů.

Za vlíčovací body byly zvoleny rohy mapových listů, jejich souřadnice byly manuálně odměřeny ve zdrojových rastroch. Souřadnice vlíčovacích bodů ve výstupním systému byly vypočteny pomocí parametrů Besselova elipsoidu tak, aby byla zachována délka středního poledníku a krajních rovnoběžek sekčního mapového listu zahrnujícího čtveřici topografických sekcí (kap. 5).

Rovnice afinní transformace pro identické (vlíčovací) body jsou:

$$\mathbf{x}_i + \mathbf{v}_i = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{X}_i + \mathbf{r},$$

kde \mathbf{x}_i – vstupní souřadnice i -tého vlíčovacího bodu,
 \mathbf{X}_i – výstupní souřadnice i -tého vlíčovacího bodu,
 \mathbf{v}_i – oprava vstupních souřadnic i -tého vlíčovacího bodu.

Prvky matice afinní transformace i posun počátků souřadnicových systémů byly odhadnuty metodou nejmenších čtverců ($\hat{\mathbf{Q}}, \hat{\mathbf{r}}$). S jejich pomocí pak bylo možno sestavit maticovou transformační rovnici pro požadovanou transformaci naskenovaného mapového listu:

$$\mathbf{X} = \hat{\mathbf{Q}}^{-1} \cdot (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{r}}).$$

4. Zobrazení mapového listu na Besselův elipsoid

Při III. vojenském mapování bylo použito modifikované Sansonovo-Flamsteedovo zobrazení, dále jen „Sansonovo zobrazení“. Při něm se povrch Besselova elipsoidu zobrazuje do roviny po částech vymezených dvojrozměrnými intervaly o rozměrech 30' x 15' (zeměpisná délka x šířka). K transformaci zeměpisných souřadnic na Besselově elipsoidu do roviny sekčního mapového listu (v měřítku 1 : 75 000) zahrnujícího čtveřici oskenovaných mapových listů (tzv. topografických sekcí v měřítku 1 : 25 000) bylo použito po částech bilineární zobrazení zachovávající délku středního poledníku a krajních rovnoběžek v každém sekčním mapovém listu. Dvojrozměrné intervaly zeměpisných souřadnic o rozměrech 30' x 15' se při něm zobrazují na lichoběžníky odpovídajících rozměrů. Podrobnější informace o Sansonově zobrazení lze nalézt v řadě publikací (např. Boguszak a Císař, 1961, Čada, 2006, Seemann, 2008, Krňoul, 2012). Zpětná transformace lichoběžníkových sekčních mapových listů na Besselův elipsoid tedy představuje inverzní Sansonovo zobrazení. Při obou transformacích (Sansonově zobrazení i jeho inverzi) bylo bilineární zobrazení jednoho mapového listu formulováno pomocí tzv. plátu. Vstupní souřadnice byly předem normovány na interval $\langle 0, 1 \rangle$.

$$\mathbf{p}(T_0, T_1) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \alpha_{i,j}(T_{1-i}) F_j(T_i) - \mathbf{x}_{i,j} F_i(T_0) F_j(T_1),$$

$$\alpha_{i,j}(t) = \mathbf{x}_{j-ij,ij} + (\mathbf{x}_{j-ij+i,ij+1-i} - \mathbf{x}_{j-ij,ij}) \cdot t,$$

$$F_n(t) = 1 - n + (2n - 1)t.$$

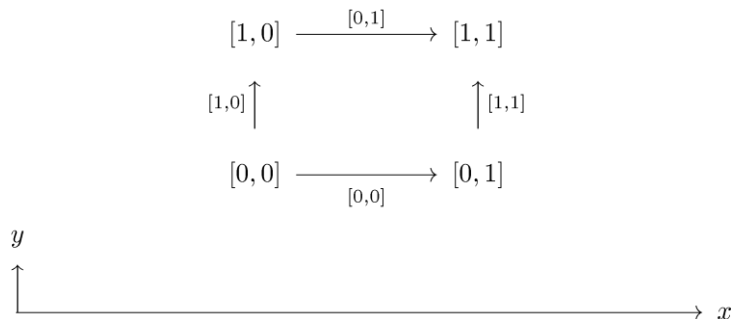
kde $\mathbf{p}(T_0, T_1)$ – souřadnice obecného bodu plátu, $T_0, T_1 \in \langle 0, 1 \rangle$,

$\mathbf{x}_{k,l}$ – souřadnice rohů plátu,

$\alpha_{i,j}(t)$ – okraje plátu – úsečky mezi rohovými body plátu,

$F_n(t)$ – pomocná funkce, $n \in \{0, 1\}$, $t \in \langle 0, 1 \rangle$.

Význam indexů i, j, k, l je patrný z následujícího schématu.



Obr. 3 Význam indexů rohů a stran mapového listu

Dvojice indexů v rozích obdélníka představují indexy k, l . Indexy u šipek identifikují okraje plátu, tj. indexy i, j .

K řešení inverzní transformace stačí zaměnit vstupní a výstupní souřadnicový systém. Přitom je vždy nutné normovat vstupní souřadnice na interval $\langle 0, 1 \rangle$.

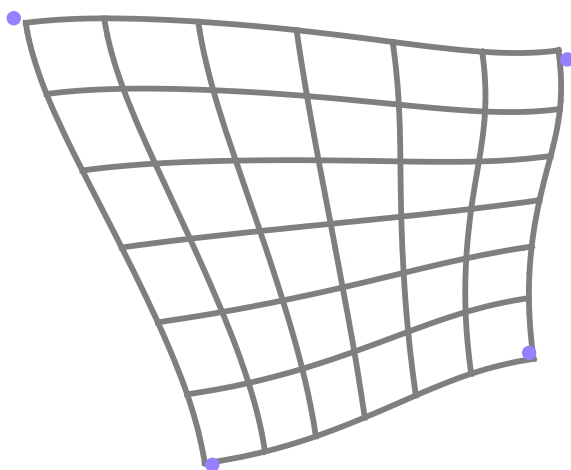
5. Kartografické zobrazení Besselova elipsoidu do roviny

Za toto kartografické zobrazení bylo zvoleno Křovákovo zobrazení, neboť požadovaným výsledným souřadnicovým systémem je S-JTSK. Znamé zobrazovací rovnice jsou uvedeny v celé řadě publikací a učebnic, např. Kostecký et al. (2010). K jejich implementaci byl použit vlastní transformační program.

6. Elastická transformace v rovině

Elastická transformace v rovině souřadnicového systému S-JTSK byla provedena metodou kolokace. Tato metoda umožňuje nalézt transformační vztah mezi dvěma souřadnicovými systémy, který zohledňuje polohovou přesnost určení vlíčovacích bodů v obou systémech i vliv nehomogenního zkreslení těchto systémů. Nehomogenita zkreslení souřadnicových systémů se projevuje zbytkovými polohovými odchylkami na vlíčovacích bodech, které vzniknou po provedení Helmer-tovy transformace. Tyto odchylky nemohou být zdůvodněny nepřesným určením polohy vlíčovacích bodů a jsou proto považovány za náhodné veličiny, které představují rozdíly elastické a podobnostní transformace. Tyto rozdíly se projevují nelineárním zkreslením ekvidistantní souřadnicové sítě, které vyvolává dojem elasticity (obr. 4).

Zmíněné náhodné rozdíly jsou statisticky závislé. Jejich statistická závislost je charakterizována kovarianční maticí libovolné množiny bodů. Velikost nediagonálních prvků této matice (tzv. kovariance) klesá se vzdáleností příslušných bodů. Oba zmíněné faktory (přesnost vlíčovacích bodů i nehomogenní zkreslení souřadnicových systémů) lze charakterizovat názornými statistickými a geometrickými parametry: směrodatnými odchylkami polohových chyb určení vlíčovacích bodů, směrodatnou odchylkou rozdílu elastické a podobnostní transformace v libovolném bodě zájmového území a charakteristickou vzdáleností dvou obecných bodů, v jejímž dosahu se projevuje jejich závislost. Na základě těchto parametrů je odhadnuta přesnost výsledné elastické transformace. Vlícovacími body jsou trigonometrické body o známých souřadnicích v S-JTSK, které jsou zobrazeny na oskenovaných mapových listech.



Obr. 4 Názorná ukázka zkreslení ekvidistantní souřadnicové sítě při elastické transformaci (vlíčovací body jsou v rozích mapového listu)

Elastická transformace je založena na metodě kolokace, která vychází z následující soustavy rovnic:

$$w' = p + q \cdot w + \varphi$$

$$w'_i + \varepsilon'_i = p + q \cdot (w_i + \varepsilon_i) + \varphi_i$$

kde w – vstupní souřadnice obecného bodu,
 w' – výstupní souřadnice obecného bodu,
 p, q – koeficienty podobnostní transformace,
 φ, φ_i – náhodné rozdíly elastické a podobnostní transformace,
 w'_i – výstupní souřadnice i -tého vlícovacího bodu,
 w_i – vstupní souřadnice i -tého vlícovacího bodu,
 $\varepsilon_i, \varepsilon'_i$ – polohové chyby souřadnic i -tého vlícovacího bodu,
 w', p, q – neznámé veličiny.

Všechny uvedené veličiny mají hodnoty v komplexním číselném oboru. Komplexní aritmetika byla použita i pro výpočet hodnot neznámých veličin. Počítačová implementace řešení uvedené soustavy rovnic se s pomocí komplexní aritmetiky výrazně zjednodušila. K řešení inverzní transformace stačí zaměnit vstupní a výstupní souřadnicový systém.

7. Výsledná složená transformace

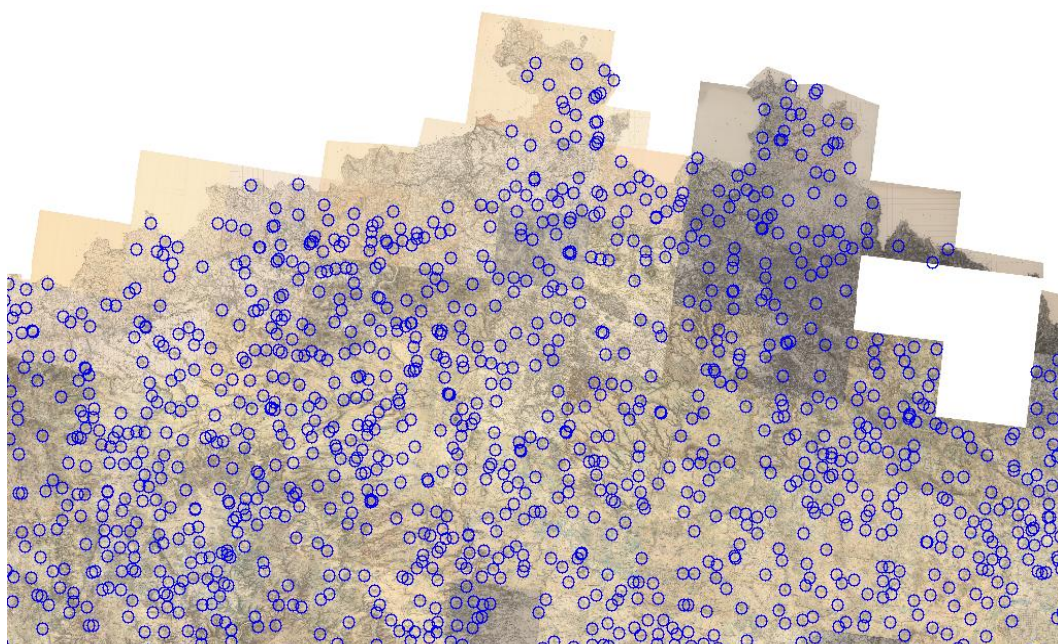
Požadovaná výsledná transformace je složeným zobrazením vytvořeným postupnou aplikací právě uvedených čtyř dílčích transformací. Výsledná složená transformace je poměrně komplikovaná a představuje tedy velmi náročný výpočet. Ten proto není prováděn pro každý jednotlivý pixel, ale pouze pro uzlové body vhodně zvolené čtvercové sítě. Mezi uzlovými body se pak bilineárně interpoluje. Tím se významně zkrátí doba výpočtu při zachování požadované pixelové přesnosti.

Aplikací výsledné složené transformace na zdrojový rastrový obraz mapového listu vznikne digitální obraz v požadovaném souřadnicovém systému současného kartografického zobrazení (S-JTSK). Z takto přetransformovaných mapových listů pak lze sestavit bezešvou mozaiku pokrývající celé území České republiky. Ukázka této mozaiky v severní části České republiky je na obr. 5.

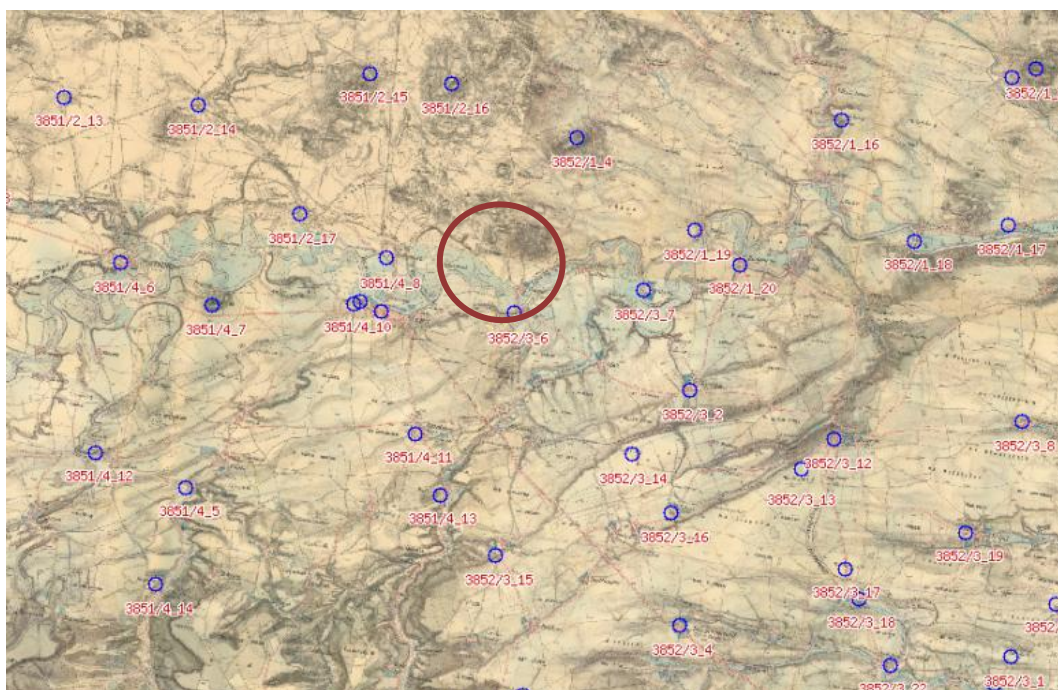
Zdrojové rastrové obrazy naskenovaných mapových listů byly nejprve transformovány metodou nejbližšího souseda. Podstatou této metody je přiřazení barvy pixelu ve výsledném rastru podle nejbližšího pixelu ve zdrojovém rastru. K tomu je však třeba mít k dispozici zpětnou transformaci, tzn. posloupnost inverzních dílčích transformací složených v opačném pořadí. Proto byla požadovaná transformace implementována ve dvou variantách: dopředné a zpětné. Dopředná transformace byla použita pro odhad přesnosti výsledného rastru, zpětná transformace k určení barvy pixelu ve výstupním rastru pomocí zmíněné metody nejbližšího souseda. Alternativní metodou k metodě nejbližšího souseda je bilineární či bikubická transformace. Její použití způsobí vyhlazení kresby a tím i lepší grafický a estetický dojem, polohovou přesnost kresby to však nijak nevylepší, neboť tento efekt se projeví na subpixelové úrovni (0,06 mm). Z důvodu dodatečného vyhlazení kresby bude ještě pro výsledné transformované rastry použita jedna z těchto dvou metod na základě podrobných porovnávacích testů.

Výsledek celkové transformace mapových listů ukazují následující dva obrázky. Na obr. č. 6 je vidět styk čtyř sousedních mapových listů (3851/2, 3852/1, 3851/4, 3852/4). Styk rohů je uprostřed červené elipsy. Vlícovací body jsou znázorněny modrými kroužky, jejich čísla červenými číslicemi. Prvních 5 číslic udává signaturu mapového listu.

Obr. 7 představuje překryv staré vojenské mapy Jičina se současnou vektorovou vrstvou budov převzatou ze Státní mapy 1 : 5 000 prostřednictvím geoprohlížeče ČUZK. Mapa III. vojenského mapování je na něm zobrazena barevně s šedými textovými popisy a výškovými šrafováními. Přes ni je překryta nová mapa, na níž jsou sytě černě zobrazeny obrysy současných jičínských budov. Je zde patrná dobrá shoda obou vrstev na rozdíl od obr. 2, kde se posun obou vrstev projevuje velmi výrazně.



Obr. 5 Pokrytí severní části České republiky topografickými sekcemi (vlícovací body jsou znázorněny modrými kroužky)



Obr. 6 Ukázka styku čtyř mapových listů (styk rohů je označen červenou elipsou)



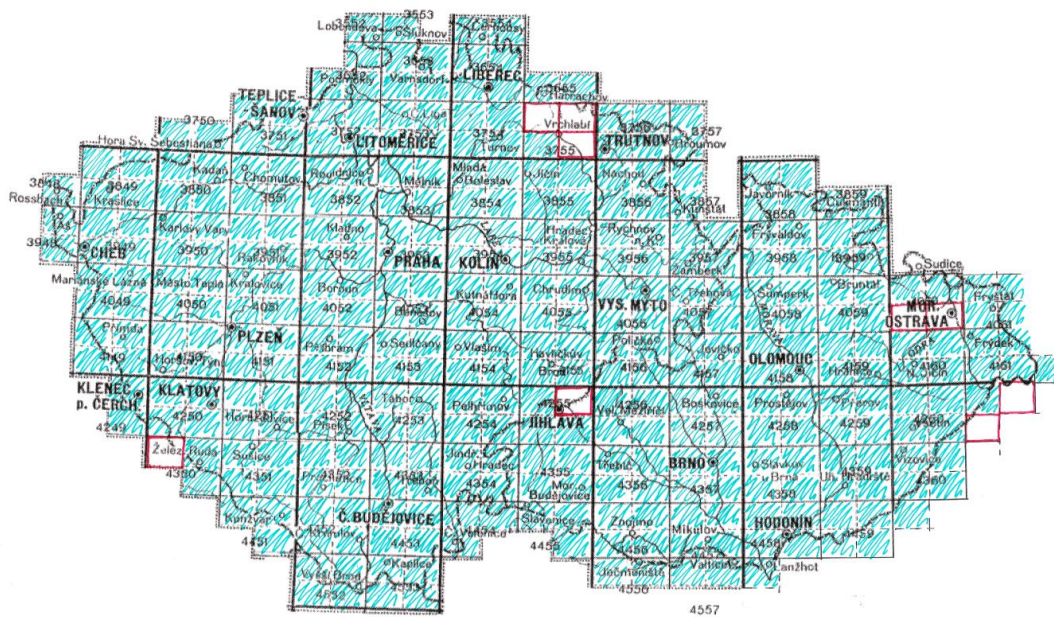
Obr. 7 Překryv staré mapy III. vojenského mapování a nové mapy (georeferencování bylo provedeno navrhanou metodou)

8. Technické řešení sběru dat

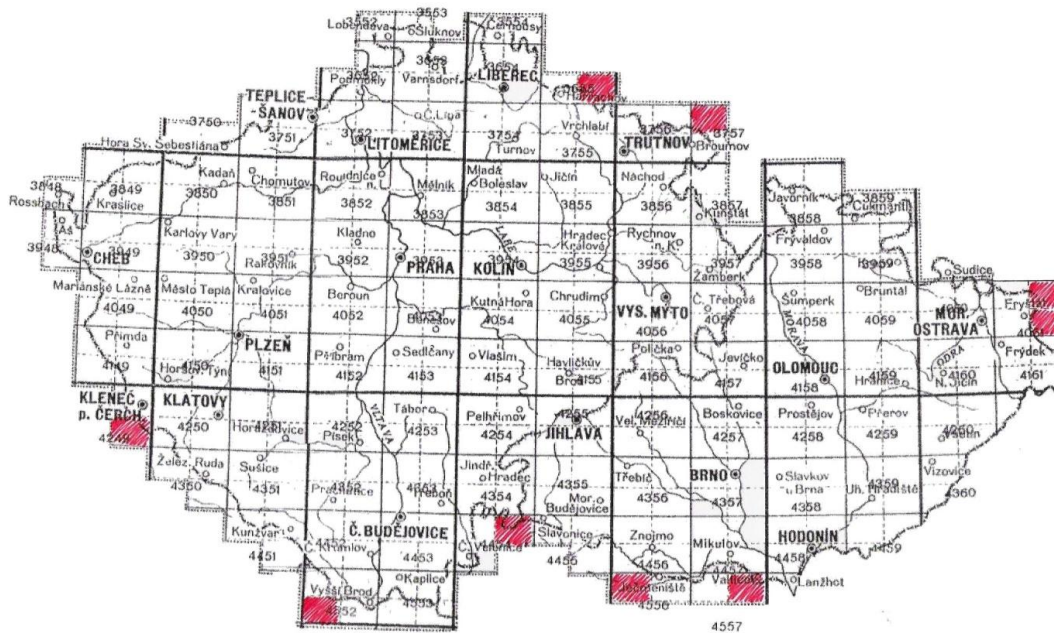
Byly shromážděny rastrové obrazy topografických sekcí map III. vojenského mapování v měřítku 1 : 25 000 pokrývající území České republiky. Mapové listy byly postupně získávány z několika různých zdrojů, aby území České republiky bylo pokryto co nejvíce. Některé chybějící mapové listy byly vyhledány v mapové sbírce Historického ústavu AV ČR a naskenovány ve VÚGTK Zdíby. Některé z chybějících barevných originálů topografických sekcí přitom bylo nutno nahradit jejich fotografickými nebo fotolitografickými černobílými kopiemi. Proto se v celkovém počtu 367 topografických sekcí vyskytuje 234 sekcí barevných a 133 sekcí černobílých. Celkem tedy bylo získáno 367 rastrových obrazů topografických sekcí, přičemž 9 mapových listů stále ještě chybí. Ty jsou i nadále dohledávány v různých mapových sbírkách včetně sbírek soukromých sběratelů. Dosavadní pokrytí České republiky ukazuje obr. 8.

Pro potřeby georeferencování rastrových obrazů topografických sekcí bylo kromě získání grafických souřadnic rohů těchto sekcí nutné definovat identické body. Za identické body byly zvoleny trigonometrické body a kostely o známých souřadnicích. Podrobnější rozdělení identických bodů podle jejich typu je uvedeno v tab. 1.

Pro každou topografickou sekci bylo vyhledáno co největší množství identických bodů. U 9-ti sekcí (obr. 9) nebylo možné vyhledat žádný identický bod. Jsou to sekce na státních hranicích, na nichž je znázorněno jen velmi malé území České republiky. U ostatních sekcí se pak počet identických bodů pohyboval v rozmezí od jednoho až po 28 bodů v rámci jedné sekce. U vyhledaných identických bodů byly odečteny jejich grafické souřadnice v geodetickém softwaru Kokeš a v databázi trigonometrických a zhušťovacích bodů byly dohledány jejich geografické souřadnice. Jejich identifikace byla často velmi obtížná a to zejména v případě černobílých map, které byly mnohdy velmi nečitelné. V některých případech nebylo možné získat ani grafické souřadnice rohů topografických sekcí (tab. 2), většinou z důvodu jejich chybějícího zákresu. Ve třech případech pak byly nalezeny mapové listy s uříznutými rohy, nejspíše omylem při neoborné úpravě papírových podob


















Obr. 8 Přehled naskenovaných topografických sekcí



Obr. 9 Topografické sekce bez identických bodů – červené obdélníky

Tab. 1 Typy identických bodů

Typ bodu	Popis bodu	Schematická mapová značka	Podoba mapové značky v mapě	
			Barevná	Černobílá
TB	trigonometrický bod			
K1	kostel typ 1			
K2	kostel typ 2			
K3	kostel typ 3			
K4	kostel typ 4			

sekcí v minulosti. U 15 topografických sekcí bylo zjištěno zmenšení rozměru mapového listu na polovinu čtvrtinu nebo i osminu (tab. 2). Ve většině případů k tomu došlo zřejmě z důvodu úspory papíru při zákresu malých území na hranicích České republiky. U 6-ti dvojic topografických sekcí pak bylo zjištěno jejich spojení do jedné sekce o větším rozměru.

Spojené topografické sekce:

3654/2 + 3554/4
 3850/1 + 3750/3
 3857/1 + 3857/3
 4455/2 + 4455/4
 4456/4 + 4556/2
 4457/3 + 4557/1

Celý proces vyhledávání a odečítání souřadnic byl prováděn manuálně s výsledným počtem 4 526 určených identických bodů a cca 1 400 určených rohů topografických sekcí.

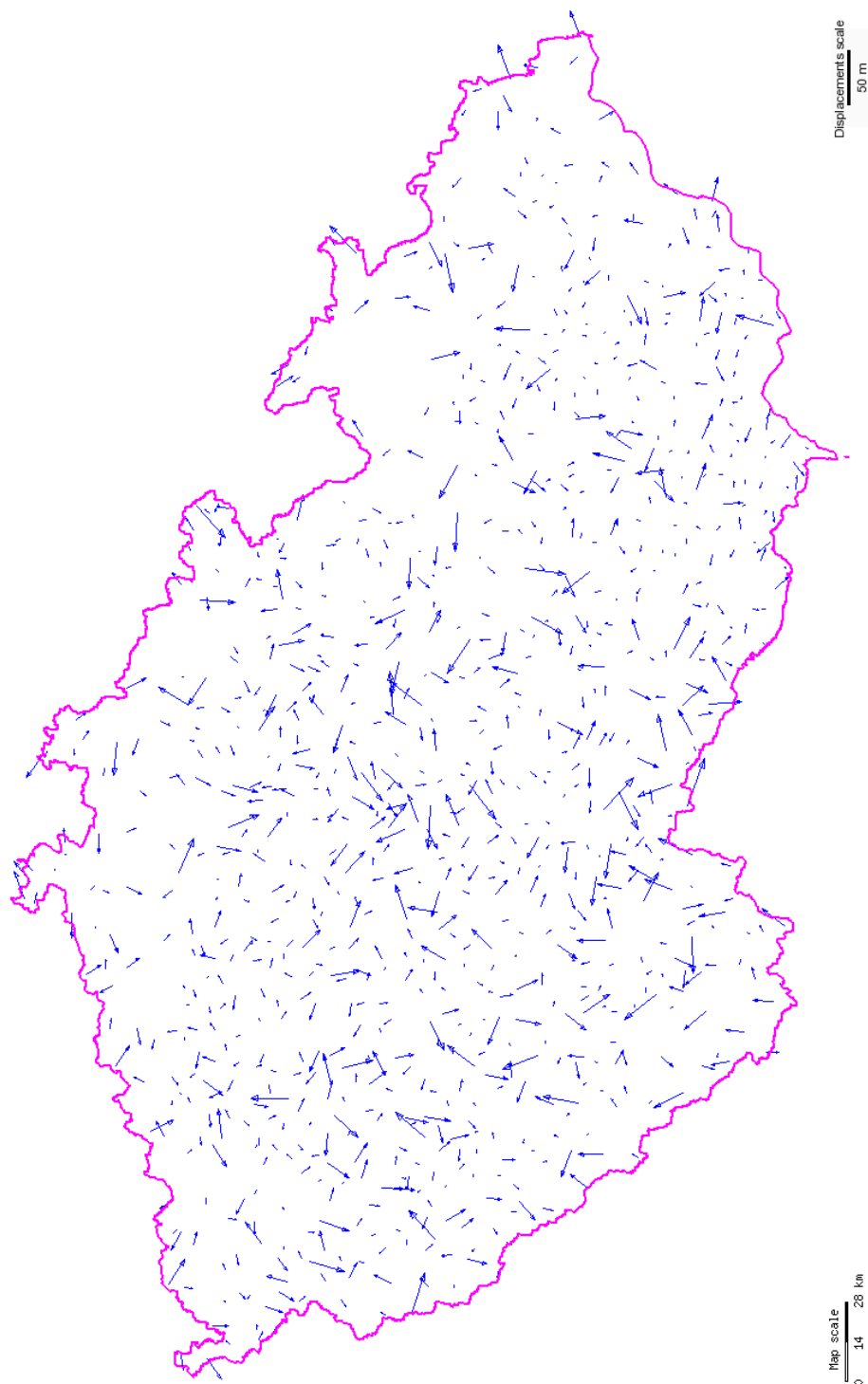
Závěr

Navržená metoda georeferencování starých map III. vojenského mapování představuje výrazný přínos vedoucí ke zvýšení jejich použitelnosti k praktickým účelům (např. srovnávací historie, vývoj krajiny, urbanismus, územní plánování, turistický ruch apod.) Tento přínos spočívá ve snížení chyb v umístění původní kresby na starých mapových listech do použitého souřadnicového systému, projevující se polohovým nesouhlasem s kresbou zachycující stav krajinných a sídelních prvků, které se od té doby nezměnily na současných mapách (stavby, cestní síť, vodní plochy, apod.).

Za výchozí identické prvky byly zvoleny zejména trigonometrické body a věže kostelů. Výsledné polohové chyby na těchto identických (vlíčovacích) bodech transformace se pohybují v řádu několika málo metrů ve skutečnosti (obvykle do 4 m). Pro nezávislé a objektivní zjištění výsledné přesnosti georeferencování však byly provedeny následné testy na nově zvolených 958 kontrolních (testovacích) identických bodech kresby, pokrývajících rovnoměrně celé území, které nebyly shodné s identickými (vlíčovacími) body vstupujícími do transformací. Polohové chyby na těchto kontrolních bodech kresby jsou znázorněny na obr. 10 a jejich výsledná střední polohová chyba činí 9,1 m, což odpovídá 0,36 mm v měřítku kresby mapy 1 : 25 000. To přináší velmi významné zlepšení oproti předchozím pokusům, při kterých na kontrolních identických bodech zůstávaly chyby v řádu desítek metrů. Nejvýznamnější přínos, který umožnil toto zvýšení přesnosti, představuje 4. krok transformace, tzn. elastická transformace. Tato transformace, spolu s velkým množstvím odměřených identických bodů (cca 4 500), dovoluje citlivě slicovat jednotlivé mapové

Tab. 2 Chybějící rohy a odlišné rozměry topografických sekcí

Číslo top. sekce	Roh topografické sekce				Rozměr
	Levý horní	Levý dolní	Pravý horní	Pravý dolní	
3552/4	✓	✓	✓	✓	1/4
3553/3	✓	✓	✓	✓	1/2
3554/3	x	x	x	✓	1/4
3652/2	✓	✓	✓	✓	1/2
3652/3	✓	✓	✓	✓	1/2
3652/4	x	✓	✓	✓	✓
3653/1	✓	✓	✓	✓	větší
3653/2	✓	✓	✓	✓	1/4
3655/4	x	✓	x	x	1/8
3756/1	x	✓	x	✓	✓
3756/2	x	✓	x	✓	1/2
3757/1	x	✓	x	x	1/4
3757/3	✓	✓	x	x	✓
3849/1	✓	✓	✓	✓	1/4
3858/1	x	x	x	✓	✓
3858/2	✓	✓	✓	✓	1/4
3858/3	x	x	✓	✓	✓
3858/4	✓	✓	x	✓	✓
3859/3	x	✓	x	✓	✓
3859/4	x	✓	x	x	✓
3957/1	✓	✓	x	✓	✓
3957/2	x	✓	x	✓	✓
3958/1	x	✓	✓	✓	✓
3959/2	✓	✓	x	x	✓
3959/4	✓	✓	x	x	✓
4060/1	x	✓	x	✓	✓
4060/2	x	✓	x	✓	1/2
4061/2	x	✓	x	✓	✓
4249/2	x	✓	✓	✓	✓
4455/1	✓	x	x	x	✓
4456/3	✓	✓	✓	x	✓
4459/4	✓	x	✓	✓	✓
4552/1	x	✓	✓	x	✓
4552/3	✓	✓	✓	✓	1/4
4553/4	✓	✓	✓	✓	1/2
4557/2	✓	✓	✓	x	✓



Obr. 10 Polohové chyby na kontrolních bodech kresby

listy, napravit lokální nepřesnosti kresby mapy (deformace, zkreslení) a přitom korektně odhadnout výslednou polohovou přesnost transformace. Korektnost tohoto odhadu zaručují výhodné statistické vlastnosti metody kolokace.

Účelu provedení georeference III. vojenského mapování bylo dosaženo a výsledné rastry mohou být zpřístupněny službou WMS na serveru mapy.vugtk.cz. Uživatelům Internetu se tak dostává možnosti vytvářet si překryvy zájmových oblastí různými vrstvami dalších map poskytovaných také službou WMS a porovnávat je s obsahem map III. vojenského mapování, např. formou regulovaného zprůhledňování jednotlivých vrstev. Získávají tím velmi silný nástroj ke studiu vývoje celé české krajiny od roku 1880 do počátku 50. let 20. století.

Článek vznikl v rámci řešení projektu programu aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity č. DF11P01OVV021 „Kartografické zdroje jako kulturní dědictví. Výzkum nových metodik a technologií digitalizace, zpřístupnění a využití starých map, plánů, atlasů a glóbulů“.

Literatura

- BOGUSZAK, F., CÍSAŘ, J. (1961). *Vývoj mapového zobrazení území Československé socialistické republiky. 3. díl, Mapování a měření českých zemí od poloviny 18. století do počátku 20. století*. 1. vyd. Praha (Ústřední správa geodézie a kartografie).
- ČADA, V. (2006). Analýza lokalizace rastrových ekvivalentů III. vojenského mapování do S-JTSK. *Geoinformatika ve veřejné správě*. Brno.
- ČADA, V. (2005). Geodetické základy státních mapových děl 1. poloviny 19. století a lokalizace do S-JTSK. In Pravda, J. ed. *Historické mapy*. Zborník referátov z vedeckej konferencie, Bratislava (Kartografická spoločnosť SR, Geografický ústav Slovenskej akadémie vied), s. 35-47.
- ČECHUROVÁ, M., VEVERKA, B. (2009). Cartometric Analysis of the Czechoslovak Version of 1:75 000 Scale Sheets of the Third Military Survey (1918–1956). *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 44(1), pp. 121-130.
- KOSTELECKÝ, J. et al. (2010). *Realizace S-JTSK/05 – varianta 2. Technická zpráva č. 1153/2010*. Zdíby (Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický).
- KRŇOUL, R. (2010). *Přesnost zobrazení trigonometrických bodů na mapách III. vojenského mapování*. Bakalářská práce, Plzeň (Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra matematiky).
- KRŇOUL, R. (2012). *Lokalizace speciálních map 1:75 000 pro publikování na mapovém portálu*. [online]. [cit. 2013-01-24]. Diplomová práce, Plzeň (Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd). Dostupné z: <<http://theses.cz/id/lfb75h/>>
- MOLNÁR, G., TIMÁR, G. (2009). Mosaicking of the 1:75 000 Sheets of the Third Military Survey of the Habsburg Empire. *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 44 (1), pp. 115-120.
- MOLNÁR, G., TIMÁR, G. (2011). Using of Grid Shift Binary (GSB) data to improve the geo-reference of the Third Military Survey of the Habsburg Empire. *Geophysical Research Abstracts*, 13, EGU2011-11861-1, 2011, EGU General Assembly.
- SEEMANN, P. (2008). *Kartometrická analýza polohového souladu mapové kresby a kilometrové sítě na speciálních mapách SM75*. Diplomová práce, Praha (České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie).

S u m m a r y

New approach to georeferencing of the Third Military Survey of Austro-Hungarian Empire

A novel procedure for georeferencing raster images of the Third Military Survey maps from 19th century (1876-1880) is proposed in the contribution. There were several attempts to design a proper transformation model for georeferencing of these maps, but none of them have satisfactory resolved crucial problems of positional discrepancy between the old maps and contemporary maps (almost 206 m in reality). In the contribution, these problems are approached with the aid of three unique principles.

1. Huge number of control points (4500) was utilized to properly match the old maps to the contemporary coordinate system. The set of the control points was validated by means of statistical tests.

2. A complex transformation procedure comprising of four partial sequential transformation steps (rectification of paper shrinkage, reverse projection of a map sheet onto ellipsoid, cartographic projection from the

ellipsoid to plane, special elastic 2D transformation). The most important step is the special elastic transformation which corrects inhomogeneous distortions of the old map sheets. Simultaneously, precision of an arbitrary point can be easily estimated.

3. The transformation model is tunable by a simple set of parameters with comprehensible meaning, namely standard deviation of the permissible positional discrepancy.

Due to these three principles the positional accuracy was reduced to a few 9.1 meters in reality, which corresponds to 0.36 mm on the map sheet. Such a high accuracy is sufficient to produce a seamless map of the Czech Republic composed from the separate transformed map sheets. Therefore, any part of this composition can be compared to some up-to-date map source, eventually to another properly georeferenced old map. Accordingly, the proposed procedure was implemented as a web application on web server of the Research Institute of Geodesy, Topography, and Cartography. Consequently, any Internet user can create overlays of a region of interest from several coverages and compare them to the content of the Third Military Survey maps, e.g. with the aid transparency.

Fig. 1 Positional errors on trigonometric points in the Third Military Survey

Fig. 2 Overlap of the III. Military Survey map and contemporary map (georeferencing was done via transformation with the help of map sheets corners)

Fig. 3 The meaning of indices of corners and edges of map sheets

Fig. 4 Illustrative example of equidistant coordinate grid distortion of a mapsheet caused by elastic transformation (the control points are at the corners)

Fig. 5 Topographic sections mosaic covering the northern part of the Czech Republic (blue circles represent control points)

Fig. 6 An example of seamless connection of 4 map sheets (the corners' connection is in the middle of the red ellipse)

Fig. 7 Overlap of the III. Military Survey map and contemporary map (georeferencing was done by the proposed method)

Fig. 8 Overview of scanned topographic sections

Fig. 9 Topographic sections without control points - red rectangles

Fig. 10 Positional errors on check points

Tab. 1 Control point types

Tab. 2 Missing corners and irregular size of topographic sections