

Kartometrická analýza Vogtovy mapy

Tomáš Bayer | Markéta Potůčková | Miroslav Čábelka

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Albertov 6,
120 78, Praha 2, Česká republika

Abstrakt

Článek se zabývá problematikou hodnocení přesnosti Vogtovy mapy Čech spadající mezi významná kartografická díla českých zemí z let 1526-1720. Metodika hodnocení přesnosti je založena na kartometrických a geometrických analýzách množin identických bodů staré mapy a referenční mapy s využitím techniky multikvadratické interpolace. Jako referenční mapa je využívána databáze ZABAGED dostupná prostřednictvím WMS služeb z portálu CENIA. Výsledky analýz zahrnující izolinie měřítka, stočení, vektory odchylek na identických bodech byly vizualizovány za použití software MapAnalyst a extenze software ArcGIS, 3D Analyst.

Klíčová slova: kartometrická analýza, izolinie, deformace, MapAnalyst, staré mapy Čech.

1 Úvod

Kartometrická analýza starých či historických mapových děl umožňuje za použití moderních nástrojů ověřit a následně zhodnotit přesnost jejich vyhotovení. Výsledky poskytují cenný zdroj informací o způsobu konstrukce mapy, matematicko-kartografických základech, technice zpracování a ilustrují vývoj mapového zobrazení českých zemí. Lze je využít pro studium vývoje krajiny a procesu jejího osídlování v dlouhodobém časovém kontextu. Metodika kartometrické analýzy využitá v tomto článku je založena na porovnání staré mapy se současným stavem s následnou detekcí, analýzou a interpretací nalezených změn. Článek je věnován analýze Vogtovy mapy českých zemí, významného mapového díla, jehož originál je k dispozici v Mapové sbírce Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze.

opat plaského kláštera Johann Gregor Vogt. Rozměr mapy činí 853 x 656 cm, měřítko podél středního poledníku je 396 800.¹ Mapa znázorňuje území Čech mezi rovnoběžkami 48° – 51°30'. V mapě není přímo zobrazena geografická síť, kolem mapového rámu se nachází stupnice s dělením po 2' ve směru zeměpisné délky i šířky. Mapa není konstruována v konkrétním kartografickém zobrazení. Na Vogtově mapě je znázorněno celkem 3110 prvků, jsou zde rozlišena města hrazená, městečka, vesnice, kostely, hrady, zříceniny, obsahuje i perspektivní pohledy na některé hrady (Bezděz). Názvosloví mapy je dvoujazyčné, přizpůsobuje se však německému jazyku. Mapa je bohatě ilustrována, představuje tak nejen významné kartografické, ale i umělecké dílo. Vogtovu mapu lze označit za poslední samostatné dílo vytvořené jedním kartografem. Pro účely kartometrických analýz byl použit originál Vogtovy mapy nacházející se v Mapové sbírce Univerzity Karlovy v Praze.

2 Charakteristika Vogtovy mapy

Vogtova mapa představuje významné kartografické dílo datované do první čtvrtiny 18. století. Protože není v širší veřejnosti známa jako jiná mapová díla z této doby, uveďme nejprve její stručnou charakteristiku vycházející z [7]. Mapa byla součástí knihy "Das jetz-lebende Königreich Böhmen in seiner historisch und geographischen Beschreibung vorgestellt" vydané v roce 1712, jejímž autorem byl

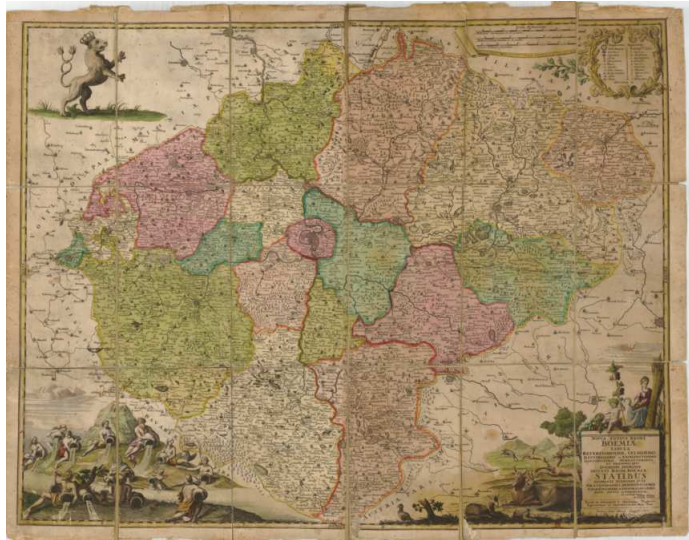
3 Digitalizace Vogtovy mapy

První krok představoval digitalizaci originálu Vogtovy mapy skenováním. Další postup prací ovlivnila mechanická charakteristika originálu. Materiál použitý pro výrobu Vogtovy mapy tvoří papír podlepený z dolní strany plátnem. Mapa byla několikrát přeložena, v místech ohybu došlo k mechanickému porušení papíru a k nerovnoměrnému protažení plátna, mapa je tvořena celkem 18 mapo-

¹Kartometrickou analýzou Vogtovy mapy byla autory zjištěna hodnota o cca 6% větší.

vými poli, viz obr. 1. Digitalizace mapy s následným vytvořením souvislého rastrového obrazu budou z výše uvedených důvodů představovat poměrně obtížný problém.

Originál Vogtovy mapy byl naskenován na kamerovém Contex CRYSTAL XL 42 s rozlišením 200 dpi ve formátu TIFF. Velikost pixelu činila 0.127 mm. Následně byla provedena retuš rastru spočívající v softwarovém odstranění nečistot. Tento krok proběhl s využitím nástroje Remove Speckles v programu MicroStation Descartes XM.



Obrázek 1: Ukázka originálu Vogtovy mapy z mapové sbírky Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze.

3.1 Tvorba souvislého obrazu mapy

Vzhledem k faktu, že opakovaným přeložením originálu Vogtovy mapy a jeho dlouhým skladováním v této poloze došlo k mírnému posunu a natočení jednotlivých mapových polí, proběhlo vlastní vytvoření souvislého rastrového obrazu Vogtovy mapy ve třech fázích. Operace byly realizovány s využitím software MicroStation Descartes XM.

Rozřezání naskenovaného rastru podle jednotlivých polí. Naskenovaný rastr byl softwarově rozřezán podle hranic jednotlivých polí na celkem 18 rastrů (3 řady, 6 sloupců). Tyto rastry vždy neměly tvar obdélníku, v některých případech představovaly "nevýrazné" lichoběžníky (např. rastr 1-6). Na několika místech došlo v důsledku mechanického opotřebování předlohy k samovolnému odstranění malých částí mapové kresby, zejména podél míst přeložení. Výsledkem rekonstrukce proto není zcela souvislý obraz Vogtovy mapy.

Projektivní transformace mapových polí. Mapová pole jsou vůči sobě posunuta, částečně natočena, v důsledku použití průchodového skeneru na materiál s vyšší

plošnou hmotností došlo k lichoběžníkovému zkreslení některých mapových polí. Tato místa jsou na rastru jednoznačně identifikovatelná. Pro odstranění lichoběžníkového zkreslení byla použita projektivní transformace představující vztah mezi dvěma rovinami ve středovém promítání. Identické body představovaly rohy zrekonstruovaných mapových polí. Rozměry zrekonstruovaného pole byly odvozeny ze čtyř sousedících polí.

Napojení styků hranic sousedících polí. Na styku hran mapových polí docházelo i po provedení projektivní transformace k vzájemným posunům kresby. Pro napojení styků hranic mezi sousedícími poli byla použita nereziduální Jungova transformace s cílem dosáhnout co nejmenších deformací kresby uvnitř mapového pole. Identické body v místním souřadnicovém systému byly voleny na styku sousedících rastrů v místech navazujících liniových prvků (vodstvo silnice). Korespondující identický bod v globálním souřadnicovém systému představoval střední polohu z obou identických bodů, jeho souřadnice lze určit jako aritmetický průměr souřadnic těchto bodů.

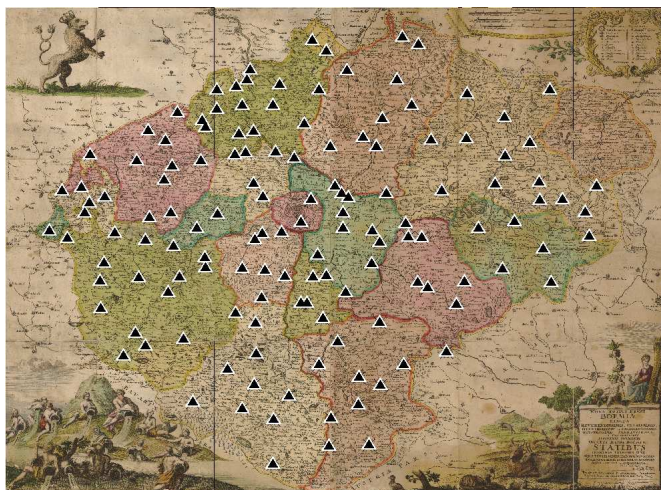
Pro každý z rastrů bylo použito cca 20 identických bodů volených dle výše uvedených zásad. Přehled koeficientů Jungovy transformace vzhledem k rozsahu článku neuvádíme.

Spojení rastrových souborů. Jednotlivé rastry byly následně ořezány podle zvektorizovaných hranic sousedících mapových polí. V programu Descartes došlo za použití funkce Merge ke spojení všech 18 rastrů ve výsledný rastr, který představoval souvislou rastrovou variantu Vogtovy mapy. Existující drobné spáry na styčných mapových listů byly z estetických důvodů vyplněny maskou v barvě pozadí mapy.

3.2 Transformace Vogtovy mapy

Další krok představovala transformace rastrové Vogtovy mapy do souřadnicového systému JTSK. Důležitou roli hrála volba množiny identických bodů použitých pro výpočet transformačního klíče. Tomuto kroku se budeme podrobně věnovat, výrazně ovlivňuje výsledky analýz. Vzhledem k faktu, že Vogtova mapa znázorňuje území celých Čech, byla jako referenční mapa použita databáze ZABAGED dostupná prostřednictvím WMS služby z portálu CENIA (<http://geoportal.cenia.cz>). Mapa však zachycuje i oblast Kladzka, která v době vzniku mapy příslušela k zemím koruny české. Pro toto území však nejsou v databázi ZABAGED k dispozici mapové podklady, území nebylo zahrnuto do kartometrických analýz. Polohová přesnost polohových objektů databáze ZABAGED charakterizovaná střední polohovou chybou cca 10m zaručuje dostatečně přesný podklad pro georeferenci rastru vzhledem k měřítku Vogtovy mapy.

Volba identických bodů. Volba identických bodů použitých pro výpočet transformačního klíče představuje poměrně složitý problém. Pokud mapa obsahuje zeměpisnou síť, jako nevhodnější se jeví použití uzlových bodů poledníků a rovnoběžek doplněných významnými a dobře identifikovatelnými body v mapě. U takových bodů předpokládáme, že se jejich poloha v čase významně nemění. Identické body by měly být po celém území rozloženy pokud možno rovnoměrně, aby měl výsledný transformační klíč globální charakter, tj. bral v potaz geometricko-kartografické charakteristiky celého kartografického díla.



Obrázek 2: Rozložení 137 identických bodů pro výpočet transformačního klíče.

Vzhledem k faktu, že Vogtova mapa nezobrazuje zeměpisnou síť, nelze v tomto případě uzlové body použít. Autoři pro výpočet transformačního klíče zvolili celkem 137 identických bodů z celkového počtu 3110 prvků zobrazených na mapě ($\approx 4.5\%$). Tato hodnota se na první pohled může zdát jako poměrně malá, body však byly vybírány pečlivě s přihlédnutím k výše uvedeným zásadám a představují zřejmě poměrně reprezentativní vzorek, viz obr. 2. Podobného výsledku dosáhla ze souboru 447 identických bodů Vejrová (2008). Komplexní kartometrickou analýzu Vogtovy mapy by bylo možné provést až po její úplné vektorizaci, která však z časových důvodů nebyla provedena. Množina identických bodů je s výjimkou jihovýchodní a severovýchodní části “téměř” konvexní.

Typ identických bodů. Identické body představovaly města, hrady a zámky rovnoměrně rozložené po území českých zemí. Řada menších měst zakreslených v oblasti Sudet dnes již neexistuje, většina měst se v důsledku společenských či průmyslových vlivů výrazně rozrostla. Při vyhledávání odpovídajících bodů v databázi ZABAGED autoři respektovali historický vývoj konkrétního města a snažil se polohu identického bodu volit v oblasti původního

centra obce: náměstí, kostel, tvrz, hrad, zámek, zřícenina. V některých případech se tyto body nenacházejí ve středu současné zástavby, ale jsou výrazněji orientovány k okrajům. Tento případ nastává u měst, jejichž rozrůstání je ovlivněno tvarem okolního reliéfu, typicky horské či podhorské oblasti. Mezi další identické body by bylo možno zařadit např. soutoky řek, rybníky či další dobře identifikovatelné prvky. Z časového hlediska tyto práce však již nebylo možno realizovat.

Zajímavě by se mohla jevit i myšlenka kartometrické analýzy v kontextu jednotlivých témat mapy, např. analýzy přesnosti zákresu obcí, řek, či rybníků. Mapa by nebyla posuzována jako celek, ale dle jednotlivých obsahových složek. Toto téma by se mohlo námětem samostatného článku.

Vlastní transformace. Aby nedocházelo k deformaci geometrických a polohových vztahů mezi body, autoři použili afinní transformaci prvního stupně. Transformace vyšších stupňů nebyly při analýzách využity, způsobují nepřírozené zprohýbání mapové kresby. Vzhledem k nadbytečnému počtu identických bodů došlo k vyrovnání transformačních koeficientů za splnění podmínky metody nejmenších čtverců $v^T v = \min$. Rovnice afinní transformace lze zapsat v obecném tvaru

$$\begin{aligned} X &= m_x \cos(\alpha) \cdot x - m_y \sin(\alpha) \cdot y + \Delta x, \\ Y &= m_x \sin(\alpha) \cdot x + m_y \cos(\alpha) \cdot y + \Delta y, \end{aligned}$$

kde x, y představují souřadnice v místním souřadnicovém systému, X, Y souřadnice v globálním souřadnicovém systému, m_x, m_y měřítkové koeficienty ve směru os x, y , α úhel rotace. Parametry určené ze souboru 137 identických bodů za použití programu MapAnalyst doplněné charakteristikou přesností určení představovanou směrodatnou odchylkou σ jsou uvedeny v tab. 1.

Koeficient	Hodnota	σ
m_x	53.162318	0.37
m_y	54.841211	0.50
Δx	-65191.91	9.2
Δy	-19082.63	9.2
α	10.4152	0.31

Tabulka 1: Hodnoty koeficientů afinní transformace odvozené ze 137 identických bodů doplněné přesnostmi jejich určení.

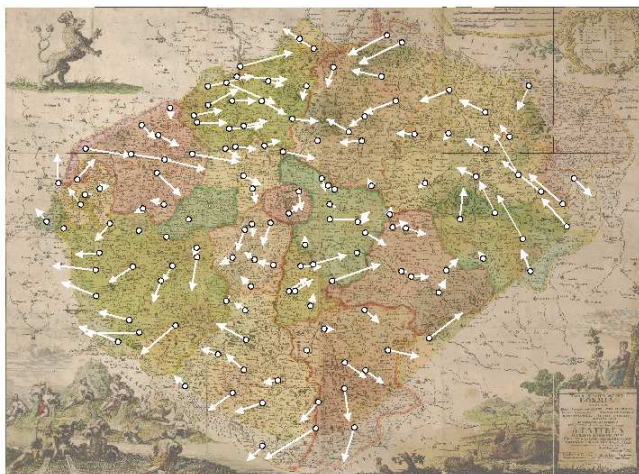
Všimněme si podobnosti obou měřítkových koeficientů, které se od sebe liší cca o 3%. Vogtova mapa jako celek je stočena vůči datům systému ZABAGED cca. o hodnotu 10° .

3.3 Kartometrické analýzy

Cílem kartometrických analýz je ověření kartografických parametrů mapového díla. Vzhledem k faktu, že kartografické dílo představuje poměrně obsáhlý soubor bodových, liniových a plošných kartografických znaků, není většinou možné z časového hlediska provést jeho analýzu jakožto celku. Proto je nutné zvolit pouze podmnožinu takových prvků představujících výběrový soubor, u kterých lze předpokládat vyšší míru polohové přesnosti.

Základní sadu bodů, nad kterou byly provedeny kartometrické analýzy, představovala množina 137 identických bodů. Po realizaci afinní transformace bylo možno přistoupit k vlastním kartometrickým analýzám Vogtovy mapy. Výsledky jednotlivých analýz slouží jako přibližné hodnotící kritérium ilustrující přesnost konstrukce mapy. Přehled výsledků nalezneme ve formě tabulek či grafických výstupů.

Je nutné zdůraznit fakt, že níže prezentované výsledky kartometrických analýz jsou *závislé* na volbě množiny identických bodů sloužících pro výpočet transformačního klíče. Při změně počtu či rozložení identických bodů můžeme dosáhnout mírně odlišných výsledků.



Obrázek 3: Polohové odchylky na 137 identických bodech znázorněné v měřítku 2:1.

Opravy na identických bodech. Afinní transformace patří do skupiny reziduálních transformací, identické body v obou souřadnicových systémech nejsou plně ztotožněny. Hodnoty oprav v_{xy} na identických bodech lze použít k vyhodnocení přesnosti zákresu prvků na mapě, viz obr. 3. V tab. 2 je uveden seznam 5 nejpřesněji a 5 nejméně přesně zakreslených měst. Zajímavostí je fakt, že z uvedeného transformačního klíče byl jako nejpřesnější hodnocen zákres města Plasy (Západní Čechy), které je rodištěm autora mapy. Velmi nepřesně byla zakreslena zřícenina hradu Žampach ve východních Čechách (identický

bod 133), kde hodnota opravy přesahuje trojnásobek směrodatné odchylky.

Celková přesnost Vogtovy mapy. Celkově lze přesnost Vogtovy mapy charakterizovat střední polohovou chybou $m_p = 8256\text{m}$. Tato hodnota jako celek je poměrně pozoruhodná, pokud přihlídneme k faktu, že Vogtova mapa vznikala bez širších geometrických a konstrukčních základů. Navíc se na ní výrazně podepsaly chyby při zákresu některých prvků mapy. Po odstranění identického bodu 133 z transformačního klíče klesne polohová chyba na $m_p = 8068\text{m}$.

Sídlo	$v_{xy} [m]$	Sídlo	$v_{xy} [m]$
Plasy	72	Žampach	18 630
Čelákovice	310	Hejnice	16 019
Čistá	329	Vlašim	15 977
Nečtiny	806	Domažlice	15 134
Rakovník	951	Frýdlant	14 975

Tabulka 2: Vlevo pět nejpřesněji zakreslených sídel, vpravo pět nejméně přesně zakreslených sídel.

Výpočet měřítka mapy. Při znalosti rozlišení skenovaného rastru definovaného velikostí pixelu d a měřítkových koeficientů m_x, m_y afinní transformace můžeme určit měřítková čísla mapy M_x, M_y ve směru os x, y ze vztahů

$$M_x = \frac{1000 \cdot m_x}{d},$$

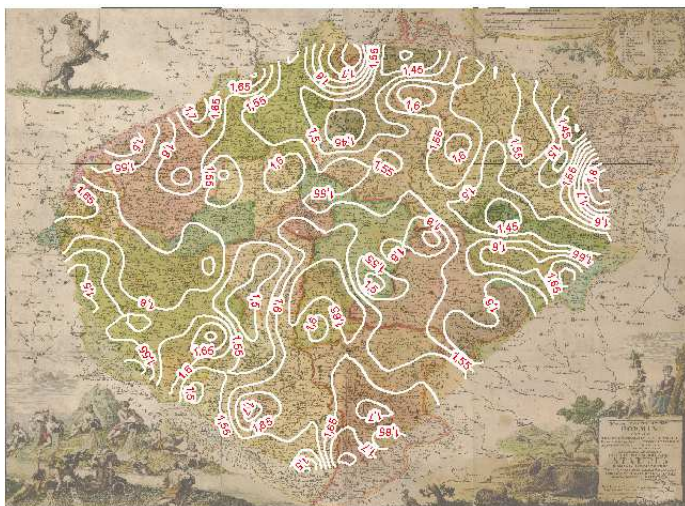
$$M_y = \frac{1000 \cdot m_y}{d}.$$

Po dosažení dospějeme k následujícím výsledkům: $M_x = 418865$, $M_y = 431865$. Dosažené údaje se odchyľují cca o 6% od měřítkového čísla 396 800 uváděného v dostupné literatuře a jsou v souladu s výsledky prezentovanými ve Vejrová, 2008.

3.4 Výpočet měřítka a stočení

Důležitým faktorem ilustrujícím přesnost konstrukce kartografického díla představují analýzy měřítka a stočení. Autoři využili program MapAnalyst, který je specializován na kartometrické analýzy starých i historických map. Pro tyto účely program disponuje složitým geometricko-analytickým aparátem využívajícím multikvadratickou interpolaci nad množinou identických bodů. Detailní informace o metodice analýz s využitím multikvadratické interpolace lze najít v [1], [4]. Proces kartometrické analýzy je, s výjimkou sběru identických bodů, plně automatizován. Tento fakt přispívá ke zvýšení rychlosti a celkové spolehlivosti analytického procesu.

S využitím množiny 137 identických bodů a parametrů afinní transformace byly v programu MapAnalyst vygenerovány izočáry měřítka a rotace. Vzhledem k faktu, že izočáry generované tímto programem nebyly hladké (tvořeny lomenou čarou), a dále není možné provést jejich popis, vizualizace výsledků byla provedena v programu ArcGIS. Pro tyto účely byly využity nadstavby SpatialAnalyst a 3D Analyst. Data staré mapy byla postupně exportována do formátů DXF a SHP, v atributové tabulce byla doplněna informace o souřadnici z nezbytné pro vytvoření 3D modelu. Funkcí TopoToRaster byl z těchto dat vygenerován rastrový model s velikostí pixelu 5m. Tímto postupem vznikly dva 3D modely zachycující závislost měřítka a stočení na geografické poloze bodu. S využitím nadstavby 3D Analyst byly nad oběma modely generovány izočáry měřítka a stočení, jejich popisy byly realizovány v nadstavbě Maplex.



Obrázek 4: Izočáry měřítka délky Vogtovy mapy generované s krokem 0.05.

Izočáry měřítka, viz obr. 4, ukazují, že se polohová přesnost Vogtovy mapy poměrně výrazně mění v závislosti na geografické poloze. Nejlepších výsledků vzhledem k tomuto kritériu mapa dosahuje v oblasti středních a západních Čech, nejhorších výsledků v oblasti severních a východních Čech. Jedná se o důsledek nepřesných zákresů některých objektů (Žampach, Frýdlant) v rádech cca 15 km. Hodnoty zkraslení se pohybují v intervalech $\langle 1.4, 1.8 \rangle$. Izocháry stočení, viz obr. 5, naznačují, že k největšímu stočení mapy dochází v oblastech východních, jižních a západních Čech. Střed Čech naopak vykazuje poměrně malé hodnoty stočení. Hodnoty stočení pro Vogtovu mapu se pohybují v intervalu $\langle -5^\circ, 50^\circ \rangle$. Pokud budeme Vogtovu mapu posuzovat současně z obou hledisek, dospějeme k následujícím závěrům. Nejmenší přesnosti dosahuje Vogtova mapa ve východních Čechách, kde dochází k výrazným polohovým i úhlovým deformacím mapy. Nejlepší přesnosti

dosahuje v oblasti středních a části západních Čech, kde jsou minimální polohové i úhlové deformace.

3.5 Zhodnocení výsledků

Dosažené výsledky kartometrických analýz jsou ovlivněny řadou různých faktorů. Uvedme tři významné činitele, které v našem případě považujeme za klíčové:

- *Kvalita předlohy:*

Důležitou roli v procesu kartometrické analýzy hraje kvalita skenované předlohy. V tomto případě byl k dispozici pouze originál, který bylo nutno transformovat do souvislé rastrové mapy s využitím několika nestejnorodých geometrických postupů. Došlo při něm zřejmě k nelineárním změnám ve vzájemné poloze některých identických bodů obou množin ovlivňujícím dosažené výsledky.

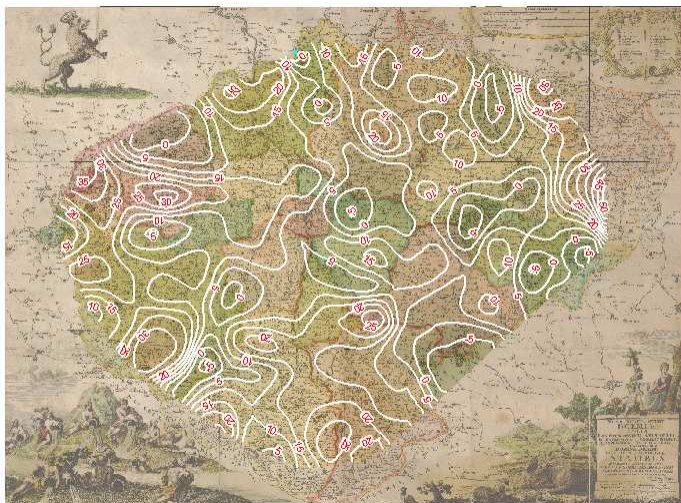
- *Volba identických bodů:*

Kartometrickou analýzu je nevhodnější provádět nad kompletně digitalizovaným kartografickým dílem. Pokud tuto operaci není možné realizovat z časového či finančního hlediska, je možné analýzu provádět pouze nad podmnožinou obsahu mapy. Testovací body je nutné v takovém případě zvolit tak, aby byly rovnoměrně rozloženy po celé ploše mapy a jejich poloha se v průběhu času významně nezměnila. Interpoláčnické techniky založené na multikvadratické interpolaci jsou vhodné pro zpracování množiny s přibližně stejnou hustotou bodů. Nepravidelně rozmístěné shluky bodů či místa bez bodů negativně ovlivňují dosažené výsledky. Použitou množinu 137 identických bodů lze považovat za dostatečnou, ne vždy se však podařilo dodržet stejnou hustotu bodů. V horských oblastech, zejména v Krkonoších, Krušných horách či na Šumavě, nebylo k dispozici potřebné množství identických bodů. Jedná se často o body nacházející se na okraji území, lze proto u nich předpokládat větší váhu při výpočtu některých parametrů transformačního klíče (stočení).

- *Interpoláčnická technika:*

Důležitou roli také hrála vlastní technika multikvadratické interpolace použitá programem MapAnalyst pro rekonstrukci spojitého povrchu z diskretních dat. Je nutné zohlednit, že výsledky představují pouze jeden z možných matematických modelů (IDW, krigování) konstruovaných nad vstupními daty.

I přes výše uvedené skutečnosti lze dosažené výsledky považovat za validní. Žádný z faktorů zřejmě nehrál natolik zásadní roli, aby významným způsobem ovlivnil výsledky kartometrických analýz. K ověření této domněnky by však bylo nutné realizovat další testy statistického charakteru.



Obrázek 5: Izočáry stočení Vogtovy mapy generované s krokem 10° .

4 Závěr

Tento příspěvek se zabýval procesem digitalizace a kartometrické analýzy starých mapových podkladů, konkrétně analýzou originálu Vogtovy mapy, technikou porovnání

množin identických bodů na staré a současné mapě. Metodika využitá v této práci umožňuje analyzovat nepřesnosti starých map s využitím pokročilých matematicko-geometrických postupů, přispívá tak ke zvýšení celkové rychlosti a spolehlivosti analýzy. Vypočtené parametry byly následně vizualizovány s využitím software MapAnalyst a ArcGIS a poskytly zajímavé informace o přesnosti konstrukce Vogtovy mapy v závislosti na poloze bodu. Výsledky analýz byly ovlivněny zejména volbou množiny identických bodů, na jejichž podkladu byl určen transformační klíč, a použitou metodou multikvadratické interpolace.

V mapové sbírce Univerzity Karlovy je v současné době k dispozici několik dalších kartografických děl spadajících do období 1518-1720, jejichž kartometrické analýzy budou následovat.

5 Poděkování

Článek vznikl za podpory projektu grantu GAČR č. 205/04/088 s názvem “Kartometrická a semiotická analýza a vizualizace starých map českých zemí z období 1518-1720”. Autoři děkují Ing. Petru Janskému, CSc, z Mapové sbírky Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy za poskytnutí rastrových dat originálu Vogtovy mapy.

Reference

- [1] Beineke D.: *Verfahren zur analysis Genauigkeitsanalyse fur AltKarten*, Munchen, 2000.
- [2] Jenny B.: *MapAnalyst - a digital tool for the analysis of the planimetric accuracy of historical maps*, 2006.
- [3] Jenny B., Weber A., Hurni L.: *Visualizing The Planimetric Accuracy of Historical Maps with Map Analyst*, 2007, Zurich.
- [4] Beineke D.: *Zur Bestimmung lokaler Abbildungsverzerrungen in Altkarten mit Hilfe der multiquadratischen Interpolationsmethode*, 2007, Neubiberg.
- [5] Kuchař, K.: *Early Maps of Bohemia, Moravia and Silesia*, 1961, Praha.
- [6] Kuchař, K.: *Naše mapy odedávna do dneška*, 1958, Praha.
- [7] Kuchař K.: *Vývoj mapového zobrazení českých zemí*, Praha.
- [8] Vejrová L.: *Vizualizace kartometrických charakteristik našich nejstarších map v software MapAnalyst*, 2008, ČVUT Praha.