

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební

Katedra geomatiky

Studijní program: Geodézie a kartografie

Specializace: Geomatika



Zhodnocení a inovativní vyrovnání
map prvního vojenského mapování

Evaluation and innovative
adjustment of the First Military
Survey maps

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracovala: Bc. Monika Křížová

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Janata, Ph.D.

Rok: 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Křížová** Jméno: **Monika** Osobní číslo: **477139**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra geomatiky**
Studijní program: **Geodézie a kartografie**
Specializace: **Geomatika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zhodnocení a inovativní vyrovnání map prvního vojenského mapování

Název diplomové práce anglicky:

Evaluation and innovative adjustment of the First Military Survey maps

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Janata, Ph.D. Katedra geomatiky FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.02.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Tomáš Janata, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Zhodnocení a inovativní vyrovnání map prvního vojenského mapování* zpracovala samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

V Praze dne

.....

Monika Křížová

Poděkování

Na tomto místě chtěla poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Tomáši Janatovi, Ph.D. za věcné připomínky a čas, který mi během konzultací věnoval. Dále bych chtěla poděkovat své rodině za podporu během psaní této práce a celého studia.

Abstrakt

Diplomová práce se skládá ze dvou částí. V první části se zabývá vyrovnáním map prvního vojenského mapování metodou thin plate spline. V práci je popsán postup, jímž byla vytvořena bežešvá mapová vrstva z naskenovaných mapových listů a teoretický základ, jenž byl pro její vytvoření aplikován. Druhá část práce zahrnuje statistické zhodnocení tří již vyrovnaných bežešvých mapových vrstev vytvořených z mapových listů prvního vojenského mapování, hodnoceny byly mapové vrstvy na serveru Mapire.eu, VÚGTK a mapová vrstva vytvořená na Katedře geomatiky ČVUT.

Klíčová slova

Thin plate spline, první vojenské mapování, staré mapy, georeferencování, matlab.

Abstract

This diploma thesis deals with adjusting First Military Survey maps using the thin plate spline method and describes the theoretical background and process used for adjustment the First Military Survey maps. Second part of the thesis deals with the statistical evaluation of the First Military Maps mosaic made by Mapire.eu, VÚGTK, and Department of geomatics CTU.

Key words

Thin plate spline, first millitary mapping, old maps, georeferencing, matlab.

Obsah

Úvod	9
1 Rešerše	11
1.1 Mapy prvního vojenského mapování	11
1.2 Metoda TPS	13
2 Mapy prvního vojenského mapování	15
3 Teorie	18
3.1 Vyrovnání map prvního vojenského mapování	18
3.1.1 Georeferencování	18
3.1.2 Projektivní transformace	19
3.1.3 Thin plate spline	21
3.2 Výpočet hodnocení přesnosti	24
4 Vstupní data	26
4.1 Naskenované mapové listy	26
4.2 Souřadnice rohů aktivní oblasti	26
4.3 Souřadnice identických bodů	27
5 Použité technologie	28
5.1 Software	28
5.1.1 Matlab	28
5.1.2 ArcGIS Pro	28
5.1.3 QGIS	29
5.1.4 IrfanView	30
5.2 Formáty souborů	30
5.2.1 Formát aux.xml	30

5.2.2	Formát GML	31
6	Pracovní postup	32
6.1	Vyrovnaní map	32
6.1.1	Příprava dat	32
6.1.2	Použité třídy	33
6.1.3	Projektivní transformace identických bodů	34
6.1.4	Parametry TPS	35
6.1.5	Generování sítě bodů	35
6.1.6	Projektivní transformace a TPS vyrovnaní sítě bodů	36
6.1.7	Transformace okrajových mapových listů	37
6.1.8	Uložení výsledků pro další zpracování	37
6.1.9	Zpracování rastrů v programu ArcGIS Pro	38
6.2	Deformační mřížka	40
6.3	Hodnocení přesnosti map	40
6.3.1	Sběr identických bodů	40
6.3.2	Statistické výpočty	43
7	Problémy při práci	44
7.1	Vstupní data	44
7.2	Výpočetní paměť	45
8	Výsledky zhodnocení	46
8.1	Mapire	46
8.2	VÚGTK	47
8.3	ČVUT	48
8.4	TPS	49
8.5	Porovnání	50
8.5.1	Boxplot	50
8.5.2	Rozptyl, minima, maxima	51
8.5.3	Směrodatná odchylka a mezní posun	51
8.5.4	Shrnutí	53
9	Výsledky práce	54
10	Závěrečná diskuze	58

Seznam použitých zkratk	61
Literatura	62
Seznam obrázků	66
Seznam tabulek	67
Přílohy	69
A Výpočetní skript	69
B Skripty použitých tříd	74
B.1 Points.m	74
B.2 Corners.m	77
B.3 GCPsAll.m	78
B.4 Footprints.m	79
C Skripty použitých funkcí (neintegrovaných)	85
C.1 proj_trans_key.m	85
C.2 gen_grid.m	85
C.3 generate_xml.m	87
C.4 point2pointdist.m	88
D Souřadnice kontrolních bodů	89
D.1 Souřadnice na vrstvách Mapire a VÚGTK	89
D.2 Souřadnice na vrstvách ČVUT a TPS	94

Úvod

Mapy byly již od pradávna významnou možností uložení informací a jsou neopomenutelnou součástí naší historie. V současnosti umožňují staré mapy nahlédnout na stav krajiny v minulosti a dotvořit tak představu o životě našich předků. Současnými moderními technologiemi je možné staré mapy vizualizovat v GIS softwarech a následně je analyzovat. Prvním krokem pro další zpracování starých map je jejich skenování, následně jsou mapy transformovány do současných referenčních souřadnicových systémů – tzv. georeferencovány. Georeferencování map lze provést v několika softwarech, často však pouze pro jednotlivé mapové listy. Jelikož však vznikala i mapová díla sestávající z několika mapových listů, je třeba při procesu georeferencování zvolit vhodnou metodu pro splnění podmínky návaznosti hran.

Cílem práce je vytvořit bezešvou mapovou vrstvu z map prvního vojenského mapování za použití metody thin plate spline. Mozaika by měla být následně publikována jako webová mapová služba. Výpočty budou provedeny v programovacím jazyce MATLAB, následná úprava obrazových dat v softwaru ArcGIS Pro. Použitý postup vyrovnání map byl navržený Ing. Janatou a zahrnuje projektivní transformaci mapových listů do souvislé mozaiky a následné vyrovnání metodou thin plate spline.

Druhým cílem práce je zhodnocení polohové přesnosti tří mapových vrstev – mozaiky na portálu Mapire.eu, vytvořenou VÚGTK a Katedrou geomatiky ČVUT. Pro porovnání bude přidáno i zhodnocení vytvořené mapové vrstvy metodou thin plate spline. Na mapových vrstvách bude proveden sběr identických bodů, jejichž polohové posuny budou následně hodnoceny.

Text je členěn do několika kapitol. První část práce je věnována rešerši prací věnujících se prvnímu vojenskému mapování a transformování map metodou thin

plate spline, následně budou popsány mapy prvního vojenského mapování. V následujících kapitolách budou shrnuty teoretické základy, použitá data a technologie. Další částí textu je popis použitého postupu a shrnutí výsledků práce.

1 Rešerše

V kapitole budou shrnuty a popsány dosavadní práce, v nichž se autoři věnovali prvnímu vojenskému mapování a zpracování map metodou thin plate spline.

1.1 Mapy prvního vojenského mapování

Mapy prvního vojenského mapování jsou významným historickým dokumentem a informačním zdrojem, proto byly několikrát zpracovávány, hodnoceny a analyzovány. V následující podkapitole budou některé práce popsány.

Polohovou přesnost objektů na mapách prvního vojenského mapování v porovnání s totožnými objekty na mapách druhého vyhodnocovali Pešťák a Zimová, shrnutí výsledků práce je popsáno v článku *Polohová přesnost objektů na mapách prvního a druhého vojenského mapování*. [19] Posouzení přesnosti bylo provedeno na dvou územích – na Sušicku a Jindřichohradecku. Georeferencování mapových listů bylo provedeno pro jednotlivé mapové listy v programu Kokeš, listy byly následně spojeny do souvislé mozaiky v grafickém programu Adobe Photoshop. Snímkové souřadnice kontrolních bodů byly odečteny v programu Kokeš, porovnávány byly se souřadnicemi získanými z ortofota, DMÚ25 a z GPS měření v terénu (po měření byla provedena transformace souřadnic ze souřadnicového systému WGS84 do souřadnicového systému S-JTSK). V provedeném posouzení přesnosti byl v mapách prvního vojenského mapování zjištěn průměrný posun bodu v oblasti Sušice 268 metrů, v oblasti Jindřichohradecka 160 metrů. Jelikož byl průměrný posun poloh kontrolních bodů na mapách prvního vojenského mapování v obou oblastech poměrně rozdílný, předpokládají autoři článku proměnlivou přesnost mapového obrazu s měnící se lokalitou. Mapy vykazují o řád horší přesnost než mapy druhého vojenského mapování, u nichž byl průměrný posun 33 a 26 metrů.

Problematiku georeferencování map prvního vojenského mapování řešil ve své diplomové na téma *Georeferencování prvního vojenského mapování Rakouska–Uherska*. [17] J. Novák. Cílem práce bylo georeferencování 16 mapových listů v severozápadní oblasti jižních Čech. Práce spočívala ve sběru identických bodů, hledání nejvhodnějšího typu transformace a vyřešení podmínek návaznosti hran. Výpočetní část práce byla provedena v programovacím jazyce C++, rastry byly následně zpracovány v programu ArcMap. Testovány byly 3 metody transformace – podobnostní, afinní a 5prvková afinní, nejlepším typem se jevila transformace afinní, pomocí níž byly vypočítány nové souřadnice identických bodů, jimiž byly georeferencovány mapové listy v již zmíněném softwaru ArcMap.

Tématem georeferencování vícelistých mapových děl se ve své diplomové práci zabývala i T. Fiedlerová. [10] Výsledkem práce je aplikace s grafickým uživatelským rozhraním, v níž je možné po vložení požadovaných vstupních souborů georeferencovat vícelistá mapová díla. Vytvořený software umožňuje volbu mezi afinní a polynomickou transformací 2. řádu a řeší podmínky návaznosti hran. Aplikace byla v rámci diplomové práce úspěšně testována na několika listech prvního vojenského mapování. Následně byla použita T. Janatou a J. Cajthamlem pro vyrovnání map prvního vojenského mapování, které popsali v článku *Georeferencing of First Military Mapping survey maps in the area of Bohemia using polynomial method*. [6] V textu porovnávají afinní a polynomickou transformaci 2. řádu a vyrovnání metodami MNČ (metoda nejmenších čtverců) a IRLS (*Iterative Reweighted Least Squares*), nejpresnějších výsledků vyrovnání bylo dosaženo použitím kombinace transformace polynomickou transformací 2. řádu a vyrovnáním metodou IRLS. Výsledkem práce je bezešvá mapová vrstva vizualizující vyrovnané mapy prvního vojenského mapování na území Čech.

Další bezešvá mozaika vytvořená z georeferencovaných map prvního vojenského mapování je dostupná na portálu *Arcanum maps (Mapire.eu)*. [33] Mapovou vrstvu, zpracovanou maďarským týmem, je možné volně prohlížet ve webovém prohlížeči nebo si ji zakoupit a následně připojit do GIS software buď pomocí WMTS služby, nebo jako jednotlivé georeferencované mapové listy. Zpracovány byly mapy korunních zemí Habsburské monarchie, poskytované jsou po historických geografických oblastech, současná oblast České republiky se nachází v datových sadách *Königreich Böhmen, Markgrafschaft Mähren a Herzogtum Ober-Schlesien* – tedy Království České, Markrabství Moravské a Vévodství Horní Slezsko. Metoda georeferencování map je popsána v článcích *Making a georeferenced mosaic of historical map se-*

ries using constrained polynomial fit [14] a *Can the First Military Survey maps of the Habsburg Empire (1763-1790) be georeferenced by an accuracy of 200 meters?* [15] Autoři předpokládají, že bylo pro vytvoření map prvního vojenského mapování využito Cassiniho válcové konformní zobrazení, jehož parametry se snažili pro každé území co nejpřesněji určit. Při práci byla pro každé mapované území odhadnuta nejvhodnější poloha základního poledníku, následně byly odvozeny transformační vztahy mezi tímto válcovým zobrazením a WGS84, v němž byly uloženy souřadnice identických bodů.

Vyrovnané mapy prvního vojenského mapování je taktéž možné prohlížet v souvislé mozaice vytvořené VÚGTK. Mozaika je poskytována bezúplatně na portálu *chartae-antiquae.cz*, [27] stránky umožňují vizualizaci i dalších mapových vrstev, a to jak historických – např. Müllerových map, či map druhého a třetího vojenského mapování, tak současných – Základních map ČR, ZABAGED a dalších. Mapy byly transformovány elastickou konformní transformací popsanou v článku *Elastic Conformal Transformation of Digital Images*. [20]

Mapy prvního vojenského mapování, společně s dalšími starými mapami, je možné využít ke sledování změn v krajině. Jednou z prací, v níž byly mapy prvního vojenského mapování použity, je článek *Změny využití zemědělské krajiny v povodí Trkmanky* [13], autoři v něm vytvořili mapu *land cover* ze současných leteckých snímků, kterou následně porovnávali s mapami historických vojenských mapování. Zkoumány byly podíly ploch lesů, trvalých travních porostů, vinic a zastavěných a vodních ploch. Zjištěn byl velký rozmach rybníkářství v době prvního vojenského mapování, vodní plochy v druhé polovině 18. století zabíraly větší plochu než zastavěné oblasti. V článku *Využití starých map středního a velkého měřítko pro sledování vývoje lesů* [3] byl vyhodnocen potenciál starých map (včetně map prvního vojenského mapování) pro monitorování změn ploch lesů.

1.2 Metoda TPS

V článku *Computation and visualisation of the accuracy of old maps using differential distortion analysis* [7] se autoři věnovali určení přesnosti starých map. V článku jsou popsány typy transformací při georeferencování a princip, jímž určovali přesnost, tedy diferenciální distorzí. Teoretické principy popisující určení přesnosti zakreslení objektů do starých map jsou aplikovány na mapu regionu Basilej a Frickthal z roku 1798. Mapa byla nejprve transformována metodou TPS a následně analy-

zována. Výpočet parametrů transformace metodou TPS byl proveden výpočetním skriptem v programu Matlab, vizualizace byla provedena pomocí TIN v softwaru QGIS.

Thin plate spline byla dle článku *Web Services and Historical Cadastral Maps: the first Step in the Implementation of the Web C.A.R.T.E. System* [2] jednou z testovaných metod georeferencování starých katastrálních map Itálie. Zpracovávány byly Tereziánské katastrální mapy (1718–1722), katastr Lombardo-Veneto (1854–1858) a jejich aktualizace, georeferencované mapy měly být následně použity na webu C.A.R.T.E. Georeferencování bylo provedeno softwarem ArcGIS a Geomatica, mapy byly transformovány polynomickými transformacemi 1.–5. řádu a metodou TPS. Po jeho dokončení byla vypočtena rezidua na kontrolních bodech, jež byla následně statisticky vyhodnocena Fisherovým testem. Na vyhodnocovaných datech se nejvhodněji pro další implementaci jevila afinní transformace.

Transformací map prvního vojenského mapování metodou TPS se ve své bakalářské práci zabýval J. Myslivec. [16] Autor využil pro výpočty transformace prostředí Matlab, navrženým skriptem byla nejprve provedena projektivní transformace mapových listů do souvislé mozaiky, následně byly vypočítány parametry TPS, pomocí nichž byl přetransformován rastr. Posledním krokem bylo generování *world file*, pomocí něhož mohl být rastr vizualizován v GIS. Navržený algoritmus byl aplikován pro 4 vybrané mapové listy, jež se povedlo úspěšně transformovat, při výpočtu se však ukázala vysoká náročnost na operační paměť počítače, proto skript nebyl aplikován na území celých Čech.

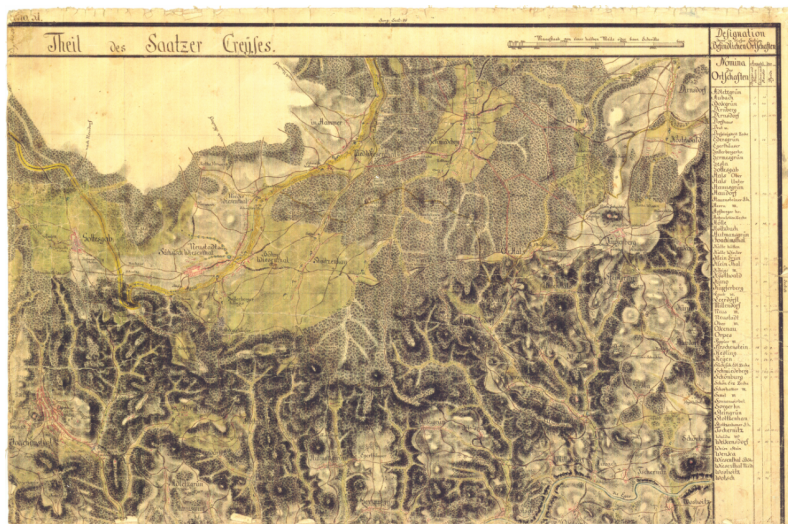
2 Mapy prvního vojenského mapování

V kapitole budou popsány mapy prvního vojenského mapování a stručný historický kontext doby jejich vzniku, při tvorbě kapitoly autorka čerpala z několika zdrojů, prvním byla skripta *Topografická a tematická kartografie* B. Veverky a R. Zimové [22], druhým zdrojem byl článek *Historická mapování českých zemí* R. Zimové a M. Mikšovského [24], použita byla také monografie J. Cajthamla *Analýza starých map v digitálním prostředí* [5].

Mezi lety 1756 a 1763 probíhal na území Evropy rozsáhlý vojenský konflikt později označovaný jako sedmiletá válka, jejím výsledkem byla prohra strany, za níž se účastnila Habsburská monarchie. Během války se ukázala pro pohyb vojsk a plánování operací potřeba vlastnění aktuálních mapových podkladů jako nezbytná, proto nařídila císařovna Marie Terezie vyhotovení nových mapových podkladů pro území celé Habsburské monarchie – map prvního vojenského mapování. Mapování probíhalo od roku 1763 do roku 1787, tvorba map byla dokončena až během vlády Josefa II., z tohoto důvodu se první vojenské mapování označuje též jako „josefské“ či „josefinské“.

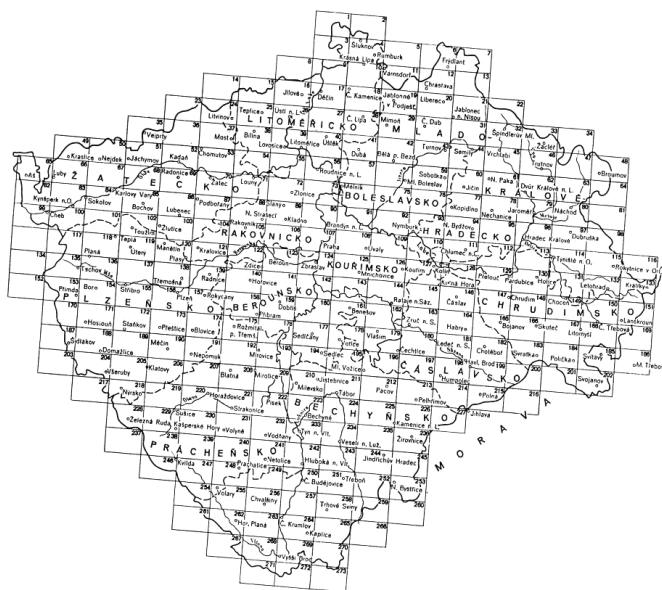
Na mapách byla vizualizována sídla, vodní toky, silnice, významné budovy, drobné objekty, prameny, louky, lesy, polní a lesní cesty, kamenné mosty, rybníky, pastviny a průchody přes močály. Výškopis je znázorněn šrafováním. Mapy jsou barevné – sídla jsou zakreslena červenou barvou, cesty hnědě, vodní prvky modře, louky zeleně a lesy černými stromečkovými značkami. Na okraji každého listu byl seznam všech obcí znázorněných na mapovém poli, kromě názvu obsahoval i počet měšťanů a sedláků a informaci o možnostech ustájení koní. Dalšími důležitými popisnými prvky byly údaje o průchodnosti lesů, možnosti ubytování vojska a počty dobytka. Náhled mapy je zobrazen na Obrázku 2.1.

Z důvodu požadavku na vysokou rychlost tvorby a nízkou finanční náročnost byly mapy vytvořeny bez geodetických základů metodou „à la vue“ („od oka“).



Obrázek 2.1: Mapový list prvního vojenského mapování

Mapování bylo částečně provedeno pomocí měřického stolku, vzdálenosti se odhadovaly nebo měřily krokováním. Existují úvahy, v nichž se odborníci domnívají, že by základem map pro české území mohla být Müllerova mapa.



Obrázek 2.2: Klad mapových listů map 1. vojenského mapování

Každý mapový list zobrazuje území o přibližné ploše 209 km², rozměry mapových listů jsou přibližně 62 × 41 cm, území celé Habsburské monarchie pokrývalo celkem 5400 mapových listů. Mapování Čech bylo provedeno v letech 1763–1767 a zahrnovalo 273 mapových listů, mapování Moravy v letech 1764–1768 a zahrnovalo 126 mapových listů, Slezsko bylo mapováno jako zkušební území již v roce 1763 a celkově bylo za-

kresleno na 40 mapových listech. Klad mapových listů na území Čech je vizualizován na Obrázku 2.2, číslování mapových listů bylo poslopně od západu k východu a od severu k jihu.

Mapy byly vyhotoveny v měřítku 1 : 28 800, měřítko bylo zvoleno kvůli požadavku, aby 1 palec odpovídal 400 vídeňským sáhům, které tvořily přibližně 1000 vojenských kroků. Menší území, v nichž bylo potřeba většího detailu, byla vytvořena v měřítku dvojnásobném, tedy 1 : 14 400.

Potřeba kvalitnějších mapových podkladů se projevila již během války s Pruskem o bavorské dědictví v letech 1778–1879, proto byla v severních Čechách provedena revize mapových podkladů následovaná novým mapováním 140 mapových listů, kromě této části území byly nově zmapovány i některé listy na jižní Moravě a v části Slezska. Ani rektifikované mapy však přesností nevyhovovaly, proto proběhlo mezi lety 1806 a 1869 druhé vojenské mapování, jež vznikalo na geodetických základech vytvořených při tvorbě Stablního katastru.

3 Teorie

V následující části práce budou vysvětleny teoretické principy, jež byly aplikovány při výpočtu vyrovnání map a statistickém vyhodnocení přesnosti.

3.1 Vyrovnání map prvního vojenského mapování

3.1.1 Georeferencování

V podkapitole bude stručně popsán princip georeferencování starých map, při jeho tvorbě autorka vycházela z monografie prof. Cajthamla *Analýza starých map v digitálním prostředí na příkladu Müllerových map Čech a Moravy* [5] a článku *Jak georeferencovat staré mapy?* [4]. Cajthaml definuje georeferencování následovně: „Jedná se o umístění rastrového obrazu mapy či jiných obrazových dat (např. letecké snímky) do definovaného souřadnicového referenčního systému. Tento systém je pak chápán jako definice geodetického datumu popisujícího vztah souřadnicového systému k Zemi (zpravidla definice náhradního elipsoidu či náhradní koule) a dále jako definice kartografického zobrazení, pomocí které je možné převádět zeměpisné souřadnice z náhradního tělesa do roviny.“ [4]

Georeferencování se provádí pomocí identických bodů, pro něž jsou známy dvojí souřadnice, z nichž se vypočítá transformační klíč, jímž se mapa následně transformuje. Proces lze rozdělit do 3 částí – vyhledání dostupných informací o mapě, sběr identických bodů a transformace. Z hledaných informací by měl být především zjištěn použitý souřadnicový referenční systém a původní rozměry mapy, aby mohla být určena míra srážky papíru. V praxi však nastávají situace, kdy tyto informace není možné zjistit, v následující části bude popsán obecný stav při neznámých parametrech.

Sběr identických bodů

Základem georeferencování je nalezení identických bodů – objektů zakreslených na mapách jimž je možné určit souřadnice v soudobém souřadnicovém referenčním systému. Identickými body se tedy volí takové objekty, u nichž lze předpokládat, že se v průběhu let nezměnila jejich poloha, obvykle jsou jimi voleny kostely, zámky, významné budovy. Nejsou-li na mapovém listu zmíněné objekty, lze ojedinele využít i křížení infrastruktury či výškové kóty. Snímkové souřadnice se obvykle získávají grafickým snímáním myši ve specializovaném softwaru.

Při sběru identických bodů je třeba brát v potaz jejich vzájemnou polohu na mapovém listu, body by měly být přibližně rovnoměrně rozmístěné po celém mapovém listu.

Transformace

Po získání dostatečného množství identických bodů se provádí transformace mapy do cílového souřadnicového systému. Dle typu transformačního klíče se transformace dají rozdělit do dvou skupin – globální a lokální. Globální transformace jsou definovány transformačním klíčem, jenž platí pro celou transformovanou oblast, řadí se mezi ně transformace shodnostní, podobnostní, 5prvková afinní, afinní, projektivní a polynomická.

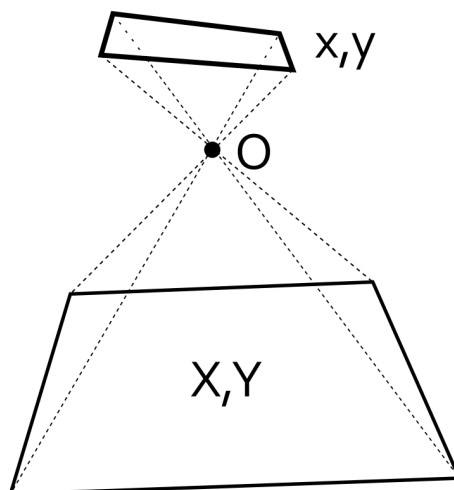
Při výpočtu lokální transformace je naopak jeden klíč pro každý identický bod, parametrem pro jeho výpočet je obvykle vzdálenost od ostatních identických bodů. Mezi lokální transformační metody se řadí metoda *Thin Plate Spline* a metoda inverzních vzdáleností *Inverse Distance Weighted*.

Při procesu georeferencování může být aplikována i kombinace globální a lokální transformace, tento princip byl použit v této práci. Mapové listy byly nejprve transformovány projektivní transformací do souvislé mozaiky a následně vyrovnány metodou *thin plate spline*.

3.1.2 Projektivní transformace

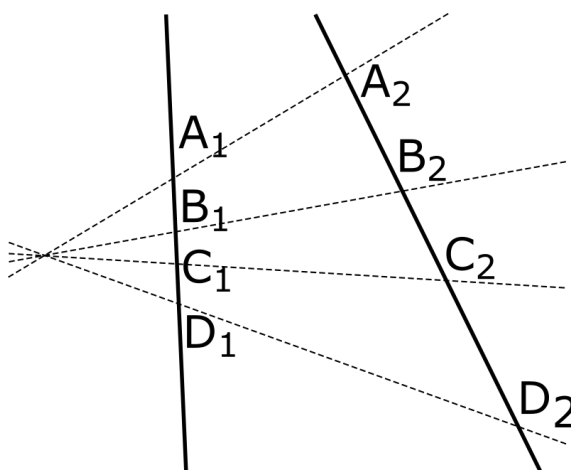
V následující části textu bude popsána projektivní transformace, zdrojem informací pro podkapitulu byla skripta *Fotogrammetrie 10* prof. Pavelky. [18] Projektivní transformaci v nich popisuje následovně: „Projektivní transformace popisuje

středové zobrazení (projekci) dvou rovinných souřadnicových systémů. Všechny projekční paprsky jsou přímé a procházejí jedním společným bodem, kterým je střed promítání (projekční centrum).“ [18] Princip projektivní transformace je vizualizován na Obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Projektivní transformace [18]

Projektivní transformace vychází z Pappovy věty (rovnice 3.1), podle níž se při středovém promítání zachovává dvojpoměr délkových úseků mezi body ležícími v jedné přímce (dle Obrázku 3.2).



Obrázek 3.2: Pappova věta [18]

$$\frac{\frac{A_1C_1}{B_1C_1}}{\frac{A_1D_1}{B_1D_1}} = \frac{\frac{A_2C_2}{B_2C_2}}{\frac{A_2D_2}{B_2D_2}} \quad (3.1)$$

Vyjádřením Pappovy věty definované v rovnici 3.1 se získají rovnice projektivní transformace (rovnice 3.2)

$$\begin{aligned} X &= \frac{\hat{b}_1 x' + \hat{b}_2 y' + \hat{b}_3}{\hat{c}_1 x' + \hat{c}_2 y' + \hat{c}_3} \\ Y &= \frac{\hat{a}_1 x' + \hat{a}_2 y' + \hat{a}_3}{\hat{c}_1 x' + \hat{c}_2 y' + \hat{c}_3} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Vytkneme-li se z rovnic 3.2 konstanta \hat{c}_3 , dostaneme finální podobu rovnic projektivní transformace (rovnice 3.3).

$$\begin{aligned} X &= \frac{a_0 + a_1 x + a_2 y}{1 + c_1 x + c_2 y} \\ Y &= \frac{b_0 + b_1 x + b_2 y}{1 + c_1 x + c_2 y} \end{aligned} \quad (3.3)$$

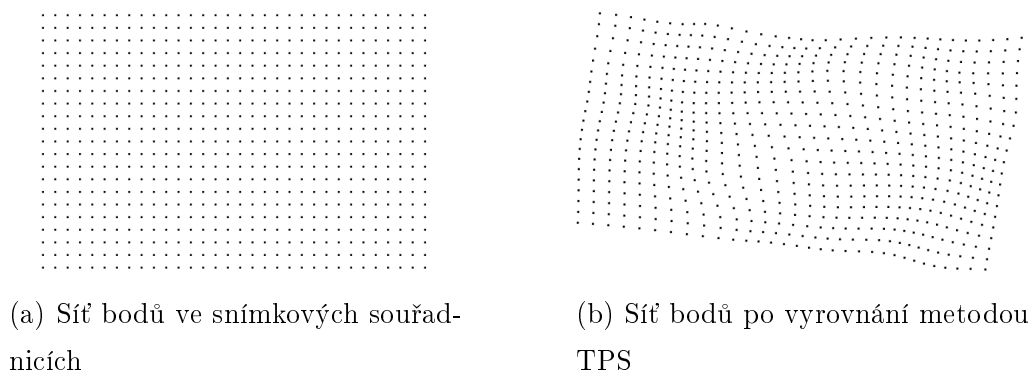
Projektivní transformaci tedy popisuje 8 parametrů (označených jako $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2$), pro jejichž získání je nutné znát souřadnice minimálně 4 identických bodů, z nichž žádné 3 nesmí ležet na jedné přímce. Transformace zachovává linearitu a průsečíky přímek, proto bývá též nazývána kolineární transformací, nezachovává naopak úhly. Schéma projektivní transformace je vizualizováno na Obrázku 3.1.

3.1.3 Thin plate spline

Thin plate spline (dále pouze TPS) je metodou pro interpolaci, vyhlazování či transformaci dat. Poprvé byla odvozena v roce 1976 J. Duchonem. [9]

Metoda nemá v českém jazyce kodifikovaný název, volně by se však dala přeložit například jako *metoda ohýbání tenkých plátů*, čímž je popsán základní princip metody. Obrazová data jsou při výpočtu podobná tenkým kovovým plátům, jež se ohýbají podle souřadnic identických bodů tak, aby byla výsledná energie potřebná pro ohnutí plátu minimální.

TPS má využití v mnoha oblastech, v geoinformatice je možné tuto metodu použít pro interpolaci výškových dat, transformaci souřadnic bodů a v jiných odvětvích dále například pro modelování a rozpoznávání otisků prstů, v lékařských výzkumech či v geofyzikálních aplikacích. [21]



Obrázek 3.3: Princip metody TPS

V následující části textu budou popsány základy metody TPS, autorka při jejich popisu vycházela z Booksteinova článku *Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations* [1], článku *Thin plate spline interpolation* Kellera a Borkowského [12] a příspěvku Donata a Beolongie *Approximation Methods for Thin Plate Spline Mappings and Principal Warps* [8].

Proměnnými (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$ budou v následujících vzorcích označeny souřadnice bodů v původním souřadnicovém systému, proměnnými v_i souřadnice bodů v S-JTSK.

Plát (resp. obrazová data) je reprezentován funkcí $f(x, y)$, dle TPS se ohýbá tak, aby minimalizoval energii potřebnou pro své ohnutí, tento princip je zřetelný z rovnice 3.4.

$$E_{int} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 \right] dx dy \quad (3.4)$$

Hodnota $f(x, y)$ v rovnici 3.4 je rovna:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i U(\|(x_i, y_i), (x, y)\|) + a_{00} + a_{10}x + a_{01}y,$$

kde $w_i, a_{00}, a_{10}, a_{01}$ jsou parametry TPS a $U(\|(x_i, y_i), (x, y)\|)$ je fundamentální řešení dané biharmonické rovnice, jež je pro $r \neq 0$ rovno $U(r) = r^2 \cdot \ln(r)$, r je euklidovskou vzdáleností mezi body (x_i, y_i) a (x, y) .

Základem výpočtu definovaného rovnicí 3.4 je podmínka minimalizování sumy parametru w_i .

$$\sum_{i=1}^n w_i = 0, \sum_{i=1}^n w_i x_i = \sum_{i=1}^n w_i y_i = 0 \quad (3.5)$$

Koeficienty TPS se tedy vypočítají ze soustavy rovnic 3.6.

$$\begin{bmatrix} K & P \\ P^T & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ o \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Matice P má rozměry $n \times 3$, první sloupec je tvořen jednotkami, druhý a třetí sloupec souřadnicemi x a y identických bodů v původním souřadnicovém systému. O je nulová matice s rozměry 3×3 .

Matice K je symetrická, změnou hodnoty parametru α na diagonále matice je možné určit míru aproximace v identickém bodě. Parametr může nabývat hodnot od 0 do 1, pro $\alpha = 0$ dochází k přesné aproximaci splinem. Prvky $K_{i,j}$ reprezentují hodnotu řešení biharmonické rovnice v zadaném bodě, jeho hodnota je rovna $K_{i,j} = U(\|(x_i, y_i), (x_j, y_j)\|)$.

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & K_{12} & K_{13} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & \alpha & K_{23} & \dots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{31} & \alpha & \dots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \dots & \alpha \end{bmatrix}$$

Matice w_i tvoří parametry TPS pro jednotlivé identické body, její rozměry jsou $n \times 1$. V matici a jsou parametry TPS a_{00}, a_{10}, a_{01} , jež jsou společné pro všechny identické body. V matici v jsou obsaženy souřadnice identických bodů v cílovém souřadnicovém referenčním systému, matice o je nulová s rozměry 3×1 .

Při řešení soustavy je nutné vypočítat inverzi matice s rozměry $n+3 \times n+3$, proto je metoda náročná na výpočetní výkon. Po rozepsání všech matic má soustava, jíž se získají parametry TPS, tvar dle rovnice 3.7.

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & K_{12} & K_{13} & \dots & K_{1n} & 1 & x_1 & y_1 \\ K_{21} & \alpha & K_{23} & \dots & K_{2n} & 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \dots & \alpha & 1 & x_n & y_n \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_n & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Finální souřadnice transformovaných bodů x', y' v novém souřadnicovém systému se vypočítají dle vztahu 3.8. Do výpočtu vstupují souřadnice identických (x_i, y_i) a transformovaných (x, y) bodů v původním souřadnicovém referenčním systému a již vypočtené parametry TPS.

$$\begin{aligned} x' &= \sum_{i=1}^n w_i U(\|(x_i, y_i), (x, y)\|) + a_{00} + a_{10}x + a_{01}y \\ y' &= \sum_{i=1}^n w_i U(\|(x_i, y_i), (x, y)\|) + a_{00} + a_{10}x + a_{01}y. \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.2 Výpočet hodnocení přesnosti

Přesnost dostupných bezešvých mapových vrstev byla určována parametry, jež budou popsány v další části textu, zdrojem informací byl článek J. Pešťáka a R. Zimové *Polohová přesnost objektů na mapách prvního a druhého vojenského mapování* [19], skriptu *Pravděpodobnost a matematická statistika* D. Jaruškové a základy teorie chyb popsané na portálu IngGeo Katedry speciální geodézie FSv ČVUT. [28]

Prvním krokem je zjištění polohového posunu bodů a směru posunu. Posun definuje vzdálenost mezi bodem na mapě a ve skutečnosti. Velikost posunu lze vypočítat dle vztahu 3.9 a směrník dle vztahu 3.10. Parametry dX , dY označují souřadnicové rozdíly. Obě hodnoty je však možné získat i v programu ArcGIS po použití funkce *Near*, jež nalezne nejbližší bod ve zvolené třídě prvků a vypočte k němu vzdálenost a směrník.

$$dP = \sqrt{(dX^2 + dY^2)} \quad (3.9)$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{dY}{dX} \right) \quad (3.10)$$

Ze získaných posunů bodů byly následně dle vztahu 3.11 vypočteny střední polohové chyby, hodnota n vyjadřuje počet prvků v souboru dat.

$$m_p^2 = \frac{dP^2}{n} \quad (3.11)$$

Důležitým popisným parametrem je směrodatná odchylka, která je definována jako odmocnina z rozptylu náhodné veličiny, výpočet se provádí dle vztahu 3.12.

$$\sigma = \sqrt{E((X - E(X))^2)}, \quad (3.12)$$

kde X je náhodná veličina a $E(X)$ je její střední hodnota. Se směrodatnou odchylkou souvisí výpočet rozptylu, jenž lze získat dosazením do vztahu 3.13.

$$V(x) = Ex - E(x)^2 = \sigma^2 \quad (3.13)$$

Z vypočtené směrodatné odchylky a průměrného posunu bodu lze získat dle vztahu 3.14 hodnotu mezního posunu. Při jeho výpočtu je potřebné zvážit hladinu spolehlivosti, na níž bude výpočet proveden, ve zpracování byla uvažována hladina pětiprocentní.

$$dP_{max} = \overline{dP} + \sigma K_{1,\alpha}, \quad (3.14)$$

kde \overline{dP} je průměrný posun a $K_{1,\alpha}$ koeficient významnosti.

4 Vstupní data

V této kapitole budou popsána použitá vstupní data, která byla uložena v několika typech souborů. Pro práci byly použity naskenované mapové listy, souřadnice rohů aktivních oblastí mapových rámců a souřadnice identických bodů.

4.1 Naskenované mapové listy

Skenované mapových listů byly uloženy ve formátu **.tif*, název souboru koresponduje s číslem mapového listu, oproti přehledové mapě na Obrázku 2.2 však mají mapové listy hodnotu o 1000 větší. Obrazová kvalita map je 400 DPI, každý mapový list má mírně odlišnou velikost, přibližně mají však všechny listy rozměry 12400×9700 pixelů. Soubory obsahují kromě samotného mapového pole i bílé okraje a mimorámové údaje, jež bylo nutné v průběhu práce odstranit, tento proces je popsán v kapitole 6.1.9. Ukázka souboru s naskenovaným listem je na Obrázku 4.1, obrázku byl pro lepší vizualizaci rozsahu rastru přidán tenký rámeček. Zpracovávány byly mapové listy pokrývající území Čech, jejich celkový počet byl 273.

Ke každému rastru je přidružen pomocný soubor (auxiliary file) ve formátu **.aux.xml*, v němž jsou uloženy parametry georeferencování mapového listu. Tento soubor generuje například software ArcGIS Pro.

4.2 Souřadnice rohů aktivní oblasti

Dalšími vstupními daty jsou souřadnice rohů aktivní oblasti uloženy v textových souborech pro každý mapový list. Jak je zřetelné z Obrázku 4.1, mapové pole nepokrývá



Obrázek 4.1: Ukázka TIFF souboru s naskenovanou mapou 1.VM

celou plochu souboru, proto jsou pro další výpočty uloženy snímkové souřadnice jeho rohů. Aktivní oblast zahrnuje pouze mapové pole, nikoliv popisné informace, název mapy či měřítko.

4.3 Souřadnice identických bodů

Posledními vstupními daty byly textové soubory se souřadnicemi identických bodů na jednotlivých mapových listech. Identické body jsou uloženy jak ve snímkových souřadnicích, tak v souřadnicích S-JTSK (upravených do tvaru EPSG 5514 – SJTSK Krovak East North).

Identických bodů je na každém mapovém listu průměrně 26,2, jejich celkový počet na celém zpracovávaném území je přes 7000. Obvykle byly jako IB použity kostely, kaple či kláštery, zámky, velké statky a jiné významné budovy, pro doplnění byla dále použita některá boží muka nebo křížovatky v jejich blízkosti. Data byla sbírána v rámci předchozích závěrečných prací zabývajících se tématem prvního vojenského mapování a v předmětu Kartografie 3.

5 Použité technologie

V této části práce budou popsány použité technologie, v první části budou popsány využití programy, ve druhé následně formáty dat, jež byly generovány.

5.1 Software

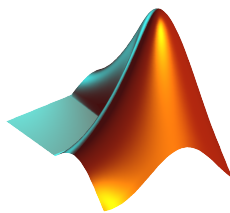
5.1.1 Matlab

Výpočetní část práce byla zpracována v softwaru MATLAB a ve stejnojmenném skriptovacím programovacím jazyce. Matlab je vývojové prostředí vytvářené společností MathWorks, první verze jazyka byla vytvořena na konci 70. let profesorem Clevem Molerem z New Mexico University, základem pro jazyk byl programovací jazyk Fortran.

Název MATLAB je zkratkou slov MATrix LABoratory a jak vyplývá z názvu, základní jednotkou výpočtů jsou matice. V současnosti však umožňuje kromě běžných maticových výpočtů, po instalaci doplňkových knihoven (tzv. Add-Ons), provádět i specializovanější operace, příkladem mohou být simulace, aplikace strojového učení, či zpracování obrazových dat. Skripty a funkce napsané v jazyce MATLAB mají zpravidla koncovku *.m*, funkce navíc musí mít totožný název se jménem souboru, v němž je uložena. [36] Pro práci byla použita verze MATLAB R2022a v akademické licenci poskytované ČVUT a několik doinstalovaných balíčků, jež budou specifikovány v další části textu.

5.1.2 ArcGIS Pro

Po dokončení výpočetní části byla transformace a vizualizace rastrových dat provedena v softwaru ArcGIS Pro, vyvinutém americkou společností ESRI (Environmen-



Obrázek 5.1: Logo softwaru Matlab [36]

tal Systems Research Institute). ArcGIS Pro je 64bitový GIS software distribuovaný od roku 2015, kdy začal nahrazovat dosavadní software ArcMap. Umožňuje práci s vektorovými i rastrovými daty, jejich prostorovou analýzu, či editaci, v programu je dále možné vytvářet kartografické výstupy a sdílet data do prostředí *ArcGIS Online*. Základním prvkem programu ArcGIS Pro je tzv. projekt, v němž je možné pracovat s 2D i 3D daty, 2D data jsou uložena v mapách, 3D data v lokálních nebo globálních scénách. Základním formátem uložení dat je souborová geodatabáze. [32]

Práce byla provedena softwarem ArcGIS Pro ve verzi 2.9 licencované univerzitní licenci.



Obrázek 5.2: Logo softwaru ArcGIS Pro [29]

5.1.3 QGIS

Část práce byla z důvodu podpory GML formátu provedena v softwaru QGIS, jenž je *open source* GIS aplikací vyvíjenou od roku 2002. První verze byla vydána roku 2009, program je pravidelně upravován, nové verze jsou vydávány třikrát ročně. QGIS umožňuje práci s rastrovými i vektorovými daty, většinu operací s daty je možné provádět díky tzv. *plug-inům* (zásuvným modulům). Software je založen na programovacím jazyce C++, zásuvné moduly je možné psát v programovacím jazyce C++ nebo skriptovacím jazyce Python. [35]



Obrázek 5.3: Logo softwaru QGIS [35]

5.1.4 IrfanView

IrfanView je software umožňující editování, tvorbu a export obrazových dat, je určen pro systémy založené na 64bitové i 32bitové architektuře. V programu je možné vytvářet a editovat vícestránkové soubory TIFF. Byl vytvořen Irfanem Skiljanem a je volně dostupný pro nekomerční užití. [30]



Obrázek 5.4: Logo softwaru IrfanView [30]

5.2 Formáty souborů

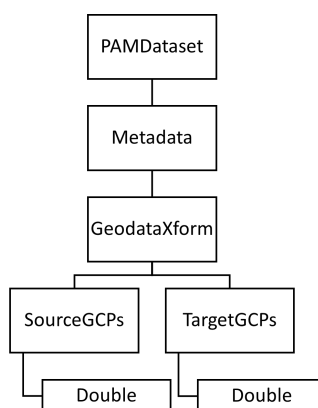
5.2.1 Formát aux.xml

Formát **.aux.xml* je tzv. *auxiliary file* (pomocný soubor), v němž jsou uloženy souřadnice identických bodů ve snímkových a cílových souřadnicích, program ArcGIS Pro tímto formátem ukládá parametry georeferencování rastrů. Formát je založen na jazyce XML.

XML – Extensible Markup Language je značkovací jazyk používaný pro spolehlivé ukládání a přenos dat. Soubor se pomocí XML vytváří tzv. tagy, jež oddělují části dokumentu, formát je textový, specifikace jeho struktury je otevřená.

Základem souboru je vytvoření tzv. uzlu DOM (Document Object Model), v němž jsou uloženy všechny prvky budoucího souboru. DOM je tvořen několika druhy prvků (elementů), hlavním prvkem tvořícím model je kořenový element, jenž zahrnuje všechny ostatní elementy, které mohou být dvou druhů – základní nebo textové a jsou hierarchicky uspořádány. Všechny elementy jsou ve výsledném dokumentu uloženy v tagách ohraničených lomenými závorkami, každému elementu je možné přidat atribut a jeho hodnotu. [34]

Kořenovým elementem je u vytvářeného souboru *PAMDataset*, hierarchicky druhým prvkem, potomkem *PAMDataset*, je element *Metadata* s atributy *domain* a *format*, jež definují formát souboru. Potomkem elementu *Metadata* je *GeodataXform*, v jehož atributech je definován typ transformace a parametry xml. Dalšími elementy jsou *SourceGCPs* a *TargetGCPs*, které obsahují textové elementy *Double* se souřadnicemi identických bodů, pomocí nichž bude probíhat georeferencování rastru. V prvním zmíněném elementu jsou uloženy souřadnice snímkové, ve druhém v S-JTSK.



Obrázek 5.5: Princip hierarchie auxiliary souboru

5.2.2 Formát GML

Název GML je zkratkou slov *Geography Markup Language*. Jedná se o otevřený formát, definovaný normou ISO 19136:2007 [25], je založený na značkovacím jazyku XML upraveném pro ukládání geografických dat, díky jasně definované otevřené struktuře umožňuje spolehlivý přenos dat. Formátem GML jsou poskytována data WFS služeb. Kromě samotných geometrií prvků umožňuje mimo jiné také ukládání topologie, času, referenčních systémů. K samotnému GML je nutné vytvořit schéma, v němž jsou uloženy informace o souboru, schéma může být uloženo v různých formátech, při práci byl zvolen formát **.xsd*. Zahrnuje především informace o geometrickém typu prvků, jež jsou v souboru obsaženy, jména a datové typy atributů.

Soubor ve formátu GML není možné vytvořit pomocí DOM, proto byl ve výpočetním skriptu vygenerován funkcemi *fprintf*. Jednotlivé prvky jsou uloženy v elementech `<gml:featureMember>`, v jehož dědičných elementech jsou uloženy geometrické i popisné informace.

6 Pracovní postup

6.1 Vyrovnání map

6.1.1 Příprava dat

Prvním krokem před dalším postupem bylo vytvoření textového souboru, v němž byl do matice 24×18 uložen klad mapových listů; pro jeho vytvoření autorka práce využila myšlenku T. Fiedlerové. [10] Matice byla při dalších výpočtech načtena do programu Matlab, dvěma iteračními cykly procházena prvek po prvku a pomocí čísla mapového listu byly následně otevírány vstupní soubory popsané v kapitole 4.

```
0 0 0 0 0 0 0 0 1001 1002 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1003 1004 1005 1006 1007 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1008 1009 1010 1011 1012 1013 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 0 0 0
0 0 0 0 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 0
0 0 0 1035 1036 1037 1038 1039 1040 1041 1042 1043 1044 1045 1046 1047 1048 0
0 1049 1050 1051 1052 1053 1054 1055 1056 1057 1058 1059 1060 1061 1062 1063 1064 0
1065 1066 1067 1068 1069 1070 1071 1072 1073 1074 1075 1076 1077 1078 1079 1080 1081 0
1082 1083 1084 1085 1086 1087 1088 1089 1090 1091 1092 1093 1094 1095 1096 1097 1098 0
1099 1100 1101 1102 1103 1104 1105 1106 1107 1108 1109 1110 1111 1112 1113 1114 1115 1116
0 1117 1118 1119 1120 1121 1122 1123 1124 1125 1126 1127 1128 1129 1130 1131 1132 1133
1134 1135 1136 1137 1138 1139 1140 1141 1142 1143 1144 1145 1146 1147 1148 1149 1150 1151
1152 1153 1154 1155 1156 1157 1158 1159 1160 1161 1162 1163 1164 1165 1166 1167 1168 1169
0 1170 1171 1172 1173 1174 1175 1176 1177 1178 1179 1180 1181 1182 1183 1184 1185 0
0 1187 1188 1189 1190 1191 1192 1193 1194 1195 1196 1197 1198 1199 1200 1201 0 0
0 1203 1204 1205 1206 1207 1208 1209 1210 1211 1212 1213 1214 1215 0 0 0
0 0 1217 1218 1219 1220 1221 1222 1223 1224 1225 1226 0 0 0 0 0
0 0 0 1228 1229 1230 1231 1232 1233 1234 1235 1236 0 0 0 0 0
0 0 0 1237 1238 1239 1240 1241 1242 1243 1244 1245 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1246 1247 1248 1249 1250 1251 1252 1253 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1254 1255 1256 1257 1258 1259 1260 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1261 1262 1263 1264 1265 1266 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1267 1268 1269 1270 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1271 1272 1273 0 0 0 0 0 0 0
```

Obrázek 6.1: Textový soubor s kladem mapových listů

Naskenované mapy byly z důvodu značné výpočetní náročnosti zmenšeny na poloviční rozměry, hodnota DPI byla snížena z hodnoty 400 na 200. Další nutnou změnou byla konverze rastrů z indexované barevné palety na *true color* – 24bitovou

barevnou hloubku. V případě, že by tak učiněno nebylo, byly by naskenované mapy načteny do mozaiky v ArcGIS Pro v odstínech šedé barvy. Změny byly provedeny dávkovou změnou v programu IrfanView.

6.1.2 Použité třídy

Před dalším popisem postupu budou popsány třídy, jež byly naprogramovány. Skripty vytvořených tříd jsou přílohou této práce.

Points

První vytvořenou třídou byla *Points*, jejímiž atributy byly souřadnice bodů ve snímkových souřadnicích, mozaice a v S-JTSK, dále transformační klíč projektivní transformace a parametry TPS transformace. Třída má také jeden privátní atribut – číslo mapového listu. Ve třídě bylo vytvořeno několik metod – konstruktor pro vytvoření instance třídy, *settery* umožňující uložení parametrů do instance třídy a výpočetní funkce, jež budou specifikovány v další části textu.

Corners

Další třídou byla *Corners*, jež je dědičnou třídou *Points*, dědí tedy všechny metody a parametry již popsané třídy. Třída byla vytvořena pro práci se souřadnicemi rohů mapových listů. Oproti navíc oproti třídě *Points* má definované parametry r a c , které specifikují polohu mapového listu v rámci kladu mapových listů.

GCPsAll

Druhou dědičnou třídou *Points* je *GCPsAll*, která bude použita pro uložení všech identických bodů a následný výpočet parametrů TPS.

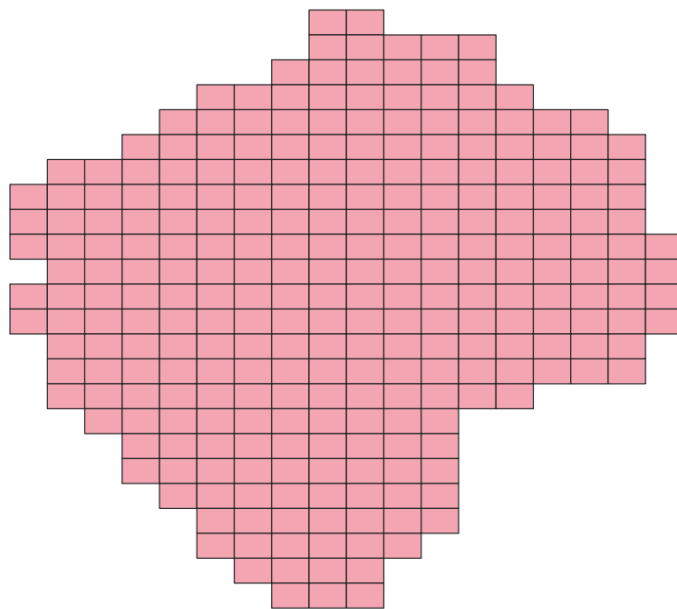
Footprints

Poslední vytvořenou třídou byla *Footprints*. Třída byla vytvořena pro generování bodů na okrajích mapového pole a jejich následné generování do souboru. Jejimi parametry jsou souřadnice bodů na okraji mapového listu ve všech třech již zmí-

něných souřadnicových systémech, transformační klíč projektivní transformace, parametry TPS, měřítko a cesta k výstupnímu souboru. Mezi metodami je opět konstruktor pro vytvoření instance třídy, *settery* a později popsané výpočetní funkce.

6.1.3 Projektivní transformace identických bodů

Dalším krokem byla projektivní transformace aktivní oblasti mapových listů do souvislé mozaiky. Aktivní oblast má ve většině listů tvar obecného lichoběžníku, projektivní transformací z ní byl vytvořen obdélník se zadanými rozměry, jež byly totožné pro všechny mapové listy. Rozměr byl volen tak, aby poměr délek stran v původních souřadnicích přibližně korespondoval s poměrem délek v mozaice. Mozaika byla umístěna do vlastního souřadnicového systému s matematicky orientovanými osami, každému rohu v ní byly určeny souřadnice. Následně tedy mohly být rohy uvažovány jako identické body, pomocí nichž byl vypočítán klíč projektivní transformace. Souřadnice rohů byly uloženy do instance třídy *Corners*, v níž byla definována metoda *gen_moz_corners* pro výpočet souřadnic rohů mapových listů v mozaice. Souřadnice byly vypočítány na základě parametru *r* a *c*, které definovaly umístění transformovaného mapového listu v souboru s kladem listů.



Obrázek 6.2: Okraje aktivních oblastí mapových listů v souvislé mozaice

Transformační klíč byl získán vyřešením soustav rovnic sestavených dle vztahů 3.3. Pro každý roh byla sestavena jedna rovnice pro každou souřadnici *x* a jedna

pro y , celkem tedy 8 rovnic, vzhledem k nelineárnosti soustavy rovnic, byla pro její řešení použita funkce *vpasolve*, která měla na vstupu symbolické proměnné $a_0, a_1, a_2, c_1, c_2, b_0, b_1, b_2$, pro práci se symbolickými proměnnými byla nezbytná instalace balíčku *Symbolic Math Toolbox*. Po vyřešení soustavy rovnic byl transformační klíč přetypován na datový typ *double* a uložen do nové proměnné, čímž se násobně zrychlily další výpočty.

Výpočet byl implementován do funkce *proj_trans_key.m*, jež má 4 vstupní argumenty – souřadnice x a y ve snímkových a cílových souřadnicích a 7 výstupních argumentů – $a_0, a_1, a_2, c_1, c_2, b_0, b_1, b_2$. Jelikož Matlab neumožňuje výpočty se symbolickými proměnnými v rámci třídy, musela být funkce uložena v samostatném souboru, její skript je přílohou této práce.

Výpočet klíčů byl proveden iteračním cyklem pro každý list, získanými parametry byla vzápětí provedena transformace identických bodů, jejichž souřadnice byly uloženy instance třídy *GCPsAll*, jež byla dědičnou třídou třídy *Points*. Poloha identických bodů v mozaice byla vypočítána dosazením transformačního klíče do vztahu 3.3. Transformace byla též provedena metodou *proj_trans_process* implementovanou ve třídě *Points*, funkce je volána automaticky po uložení parametrů projekční transformace do instance třídy.

6.1.4 Parametry TPS

Po získání transformovaných souřadnic všech identických bodů následoval výpočet parametrů TPS, jež byl proveden metodou *TPS_key* třídy *GCPsAll* dle vztahu 3.7. Funkce ukládá vypočtené souřadnice do instance již zmíněné třídy. Vzhledem k velikosti matic bylo nutné výpočet optimalizovat pro maximální zkrácení doby jeho trvání. Proto bylo využito symetričnosti matice K a parametry byly vypočítány pouze pro první polovinu matice, druhá polovina byla převzata.

6.1.5 Generování sítě bodů

Z důvodu vysoké výpočetní náročnosti obrazové transformace, jejíž čas výpočtu by trval v řádu mnoha hodin, byla transformace samotných mapových listů provedena v programu ArcGIS Pro. Aby tak mohlo být učiněno, bylo nejprve nutné vygenerovat na každém mapovém listu síť bodů, jež byla v následujících krocích dále transfor-

mována projektivní transformací do již zmíněné mozaiky a následně metodou TPS dotransformována do S-JTSK. Body sítě poté sloužily jako identické body pro georeferencování naskenovaných mapových listů.

Souřadnice rohů mapových listů a identických bodů byly načítány dvěma iteračními cykly, síť byla následně vytvořena tak, aby zahrnovala body na okrajích a uvnitř aktivní oblasti, přičemž vzdálenost bodů ve finálním souřadnicovém systému by měla být 500 metrů. Pro splnění podmínky vzdálenosti bodů bylo vypočteno měřítko, jímž se určila hodnota intervalu mezi body sítě ve snímkových souřadnicích. Měřítko bylo získáno poměrem vzdáleností mezi identickými body ve snímkových souřadnicích a souřadnicích v S-JTSK.

Vygenerování sítě bodů bylo provedeno funkcí *gen_grid*. Bodům na okraji byly určeny souřadnice x , resp. y pro kratší strany mapového rámu, druhá souřadnice byla následně dopočítána parametrickým řešením přímky. Zmíněná funkce má na vstupu již vypočítané měřítko a snímkové souřadnice rohů aktivních oblastí mapových listů, výstupními argumenty jsou souřadnice sítě bodů ve snímkových souřadnicích. Funkce zahrnuje výpočet se symbolickými proměnnými, proto nemohla být implementována jako metoda třídy.

Ve vytvořené mozaice byly dále vygenerovány budoucí *footprints* mapových rámců, tedy body na okraji aktivní oblasti mapového listu. Souřadnice byly vypočteny metodou *gen_edges* třídy *Footprints*, v jejíž instanci byly uloženy vypočítané souřadnice.

6.1.6 Projektivní transformace a TPS vyrovnání sítě bodů

Již vypočteným klíčem byly vypočítány projektivní transformací nové souřadnice bodů sítě, které byly poté transformovány a vyrovnány do S-JTSK. Projektivní transformace proběhla již popsanou metodou *proj_trans_process.m*, TPS byla vypočítána funkcí *TPS_process* definovanou ve třídě *Points*, jejíž vstupními argumenty jsou již vypočítané parametry TPS (pro souřadnice x i y) a souřadnice bodů sítě v mozaice. Po dokončení výpočtu jsou transformované souřadnice uloženy do parametrů instance třídy. Kromě bodů sítě byly transformovány i body na okrajích mapového listu (*footprints*).

Nové souřadnice bodů se pomocí TPS vypočítají dle vztahů 3.8. Základem výpočtu je výpočet sumy násobku $U(\|(x_i, y_i), (x, y)\|)$ s příslušným již vypočteným

parametrem TPS w_i . Pomocí iteračních cyklů se ve funkci počítá vzdálenost od transformovaného bodu ke všem identickým bodům, která se následně přepočítá na hodnotu řešení biharmonické rovnice v transformovaném bodu. Po získání tohoto parametru jsou následně do vztahu 3.8 dosazeny parametry TPS, souřadnice transformovaného bodu a vypočtená suma vzdáleností.

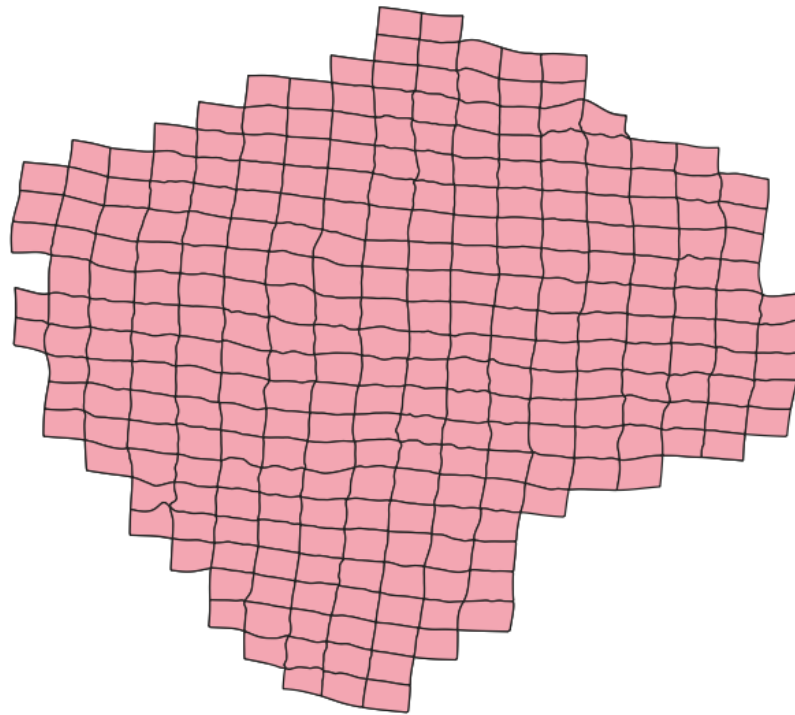
6.1.7 Transformace okrajových mapových listů

Součástí vstupních dat byly tři mapové listy, na nichž nebylo možné určit žádné identické body, proto byly zpracovány odděleně. V aktivních oblastech mapových listů byla vygenerována síť bodů a stejně jako u ostatních mapových listů, byl vypočten klíč projektivní transformace, jímž byl mapový list transformován do souvislé mozaiky. Dalším krokem byla transformace bodů gridu metodou TPS, použit byl transformační klíč vypočtený v předchozí části. Nakonec byly vygenerovány *aux* soubory, v nichž byla uložena transformovaná síť bodů.

6.1.8 Uložení výsledků pro další zpracování

Nově vypočítané souřadnice bodů sítě bylo nutné uložit pro další zpracování. Vhodnou možností se jeví uložení souřadnic do **.aux.xml* souborů, v nichž jsou uloženy snímkové i geodetické souřadnice. V rámci řešené práce bylo generování implementováno do funkce *generate_xml.m*. Prostředí Matlab umožňuje přímé generování xml souborů, jelikož však probíhá prostřednictvím rozhraní *Java API for XML Processing (JAXP)*, bylo třeba tuto část skriptu napsat v programovacím jazyce Java.

Pro následné vymaskování mimorámových údajů mapových listů byly dále uloženy polygony ohraničující aktivní oblasti mapových listů. Pro uložení byl použit formát GML uložený do souboru *footprints.GML*. Formát je definován v kapitole 5.2.2. Výsledný soubor obsahující kraje aktivních oblastí mapových listů je vizualizován na Obrázku 6.3. Generování souboru bylo provedeno metodou *generate_edges_gml2* třídy *Footprints*. Soubor GML byl po vytvoření nahrán do projektu v programu QGIS, v němž byl vyexportován do formátu *shapefile*, jenž je podporovaný softwarem ArcGIS Pro.

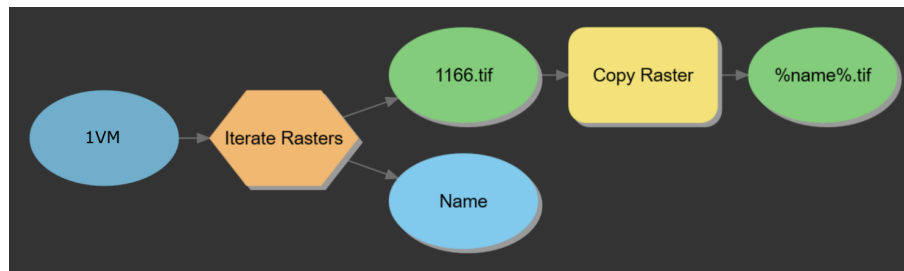


Obrázek 6.3: Transformované rámy aktivních oblastí mapových listů

6.1.9 Zpracování rastrů v programu ArcGIS Pro

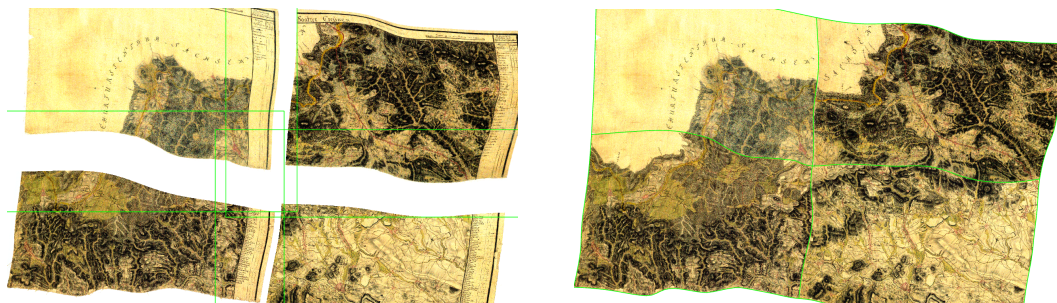
Vytvořené *aux.xml* soubory byly uloženy do jedné složky společně se zmenšenými rastry s mapami, zásadní pro další práci bylo, aby jejich název korespondoval s názvem rastru. Mapové listy byly přidány do nového projektu, dle vytvořených pomocných souborů byly automaticky georeferencovány. Tímto způsobem načtené rastry jsou v ArcGIS Pro vykreslovány poměrně dlouho, proto bylo dalším krokem převzorkování rastrů do nových souborů uložených taktéž ve formátu TIFF. ArcGIS Pro umožňuje dávkové spouštění *geoprocessingových* funkcí, export rastrů však nikoliv, proto bylo převzorkování provedeno modelem vytvořeným v *Model builderu*. Schéma modelu je vizualizováno na Obrázku 6.4.

Po dokončení exportu byl vytvořen prázdný *Mosaic Dataset*, do nějž byly následně přidány nově vytvořené rastry. Jelikož rastry obsahovaly mimorámové údaje, a tudíž se vzájemně překrývaly, byly v dalším kroku definovány tzv. *footprints*, jimiž jsou polygony, pomocí nichž jsou rastry vymaskovány, aby bylo omezeno překrývání. *Footprints* byly vytvořeny z nahrané polygonové vrstvy krajů



Obrázek 6.4: Model pro automatické převzorkování rastrů

aktivních oblastí mapových listů (vygenerované ve skriptu v Matlabu). Pro správné spárování rastru a polygonu byl v polygonové vrstvě uložen atribut *jmeno*, jenž obsahoval název korespondujícího mapového listu.

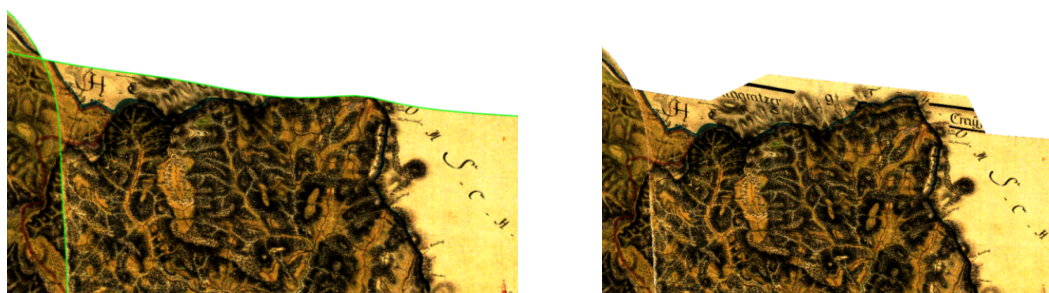


(a) Mozaika mapových listů před úpravou footprints

(b) Mozaika mapových listů po úpravě footprints

Obrázek 6.5: Maskování mimorámových údajů

Mapové pole na několika okrajových mapových listů přesahovalo definovaný obdélník, pro lepší vizualizaci byly proto *footprints* těchto listů manuálně zeditovány funkcí *Edit vertices*. Proces je zřetelný z Obrázků 6.6.



(a) Mozaika před úpravou footprints

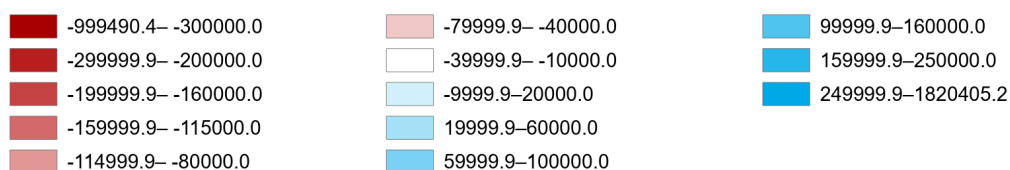
(b) Mozaika po úpravě footprints

Obrázek 6.6: Ruční doeditování footprints

Posledním krokem bylo vytvoření mapové služby. Vytvořená mozaika byla publikována jako webová vrstva na portál ArcGIS Online.

6.2 Deformační mřížka

Po dokončení bezešvé mapové vrstvy byla vytvořena deformační mřížka. Prvním krokem pro její vygenerování byla tvorba sítě bodů s rozměry 1×1 kilometr, síť byla vytvořena v souřadnicích souvislé mozaiky vytvořené projektivní transformací. Poté byla provedena transformace mřížky metodou TPS (s parametry vypočtenými a použitými při tvorbě mapové vrstvy). Z bodů sítě byly následně vygenerovány polygony čtyřúhelníků, které byly uloženy do GML souboru. Polygonová vrstva byla nahrána do softwaru ArcGIS Pro, kde byla vizualizována, změna plochy polygonů byla znázorněna divergetní barevnou stupnicí, jejíž hodnoty jsou znázorněny na Obrázku 6.7. Stupnice byla rozdělena dle kvantilů, meze byly následně upraveny na okrouhlé hodnoty.



Obrázek 6.7: Barevná stupnice deformační mřížky

6.3 Hodnocení přesnosti map

V následující podkapitole bude popsán postup použitý na druhé části práce, tedy statistickém zhodnocení dat.

6.3.1 Sběr identických bodů

Pro hodnocení přesnosti analyzovaných mapových vrstev bylo zapotřebí najít nové identické body, jež nebyly použity při transformaci map, proto byl prvním krokem této části práce sběr dat, který představoval časově poměrně náročnou část. Identické

body byly sbírány v celé ploše zpracovávaného území, byly jimi voleny především kostely, kaple, významné budovy a několik významných křižovatek v blízkosti kříže či božích muk.

Celkem bylo uloženo 188 bodů, na nichž bylo provedeno statistické zhodnocení, rozmístění bodů je znázorněno na Obrázku 6.8. Souřadnice identických bodů byly sbírány ve všech čtyřech zpracovaných bezešvých mapových vrstvách a na Základních mapách ČR, v nichž byly určeny referenční souřadnice.



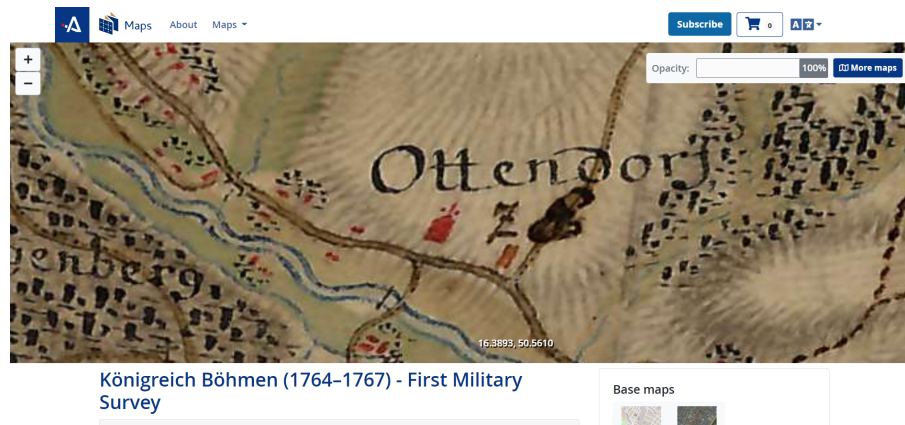
Obrázek 6.8: Mapa vizualizující rozložení identických bodů

Sběr identických bodů na portálu Mapire.eu

Jedna z vytvořených bezešvých mapových vrstev vytvořených z map prvního vojenského mapování je dostupná na webu <http://mapire.eu>. [33] Web umožňuje prohlížení starých map ve vlastním prostředí a umožňuje odečítání souřadnic dle polohy myši. Souřadnice jsou uloženy v souřadnicovém referenčním systému WGS84, jsou však zaokrouhleny na 4 desetinná místa, čímž byla ovlivněna přesnost sběru dat. V poledníkovém směru bylo ze zmíněného důvodu odečítání souřadnic ovlivněno chybou 11 metrů, v rovnoběžkovém směru 5 metrů. V porovnání s přesností map prvního vojenského mapování jsou však chyby z odečtení souřadnic řádově menší.

Sběr identických bodů na mozaice zpracované VÚGTK

VÚGTK umožňuje prohlížení map prvního vojenského mapování ve virtuální mapové sbírce na webu <http://chartae-antiquae.cz/> [27], mapové listy je však možné připojit



Obrázek 6.9: Sběr identických bodů na mapové vrstvě na portálu Mapire.eu

funkcí *Add Cloud Storage Connection* do programu ArcGIS Pro, v němž byly body sbírány a ukládány do bodové třídy prvků. Mozaika je distribuována v souřadnicovém referenčním systému WGS84.

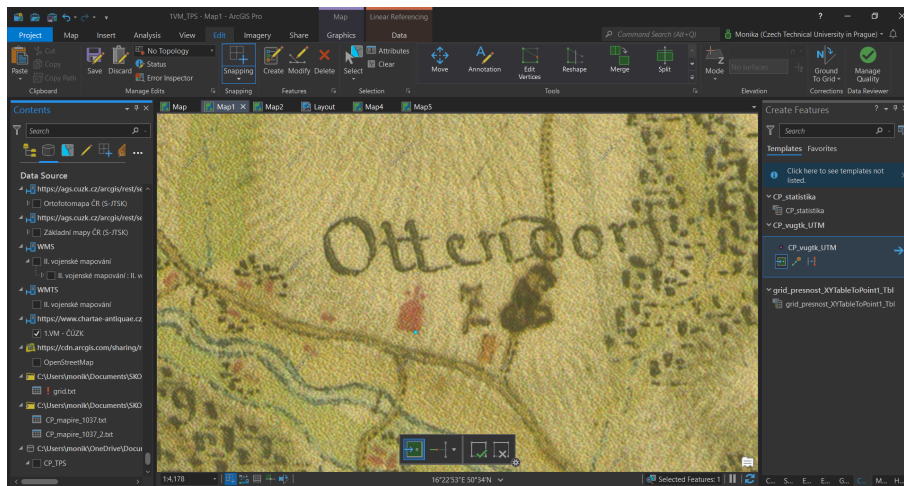
Sběr identických bodů na mozaice zpracované ČVUT

Výrovnané mapy prvního vojenského mapování, uložené jako jednotlivé georeferencované mapové listy, byly připojeny do programu ArcGIS Pro, v němž byly body, stejně jako v předchozím případě, ukládány do bodové třídy prvků. Mapové listy jsou uloženy v souřadnicovém referenčním systému S-JTSK, identické body byly ukládány ve stejném souřadnicovém systému a následně byly transformovány do WGS84.

Sběr identických bodů na mozaice TPS

Pro zhodnocení přesnosti byly totožné kontrolní body sbírány i na mozaice vytvořené v rámci této diplomové práce. Sběr souřadnic kontrolních bodů byl proveden stejným způsobem jako u mozaiky vytvořené VÚGTK a ČVUT, tedy vytvořením bodové třídy prvků. Mapová vrstva byla vytvořena v souřadnicovém referenčním systému S-JTSK, souřadnice tedy byly následně transformovány funkcí *Project* do souřadnic Světového geodetického systému 1984.

Souřadnice kontrolních bodů jsou přílohou diplomové práce. (Příloha D)



Obrázek 6.10: Sběr identických bodů na mapových vrstvách vytvořených VÚGTK, Katedrou geomatiky ČVUT a na mozaice vytvořené metodou TPS

6.3.2 Statistické výpočty

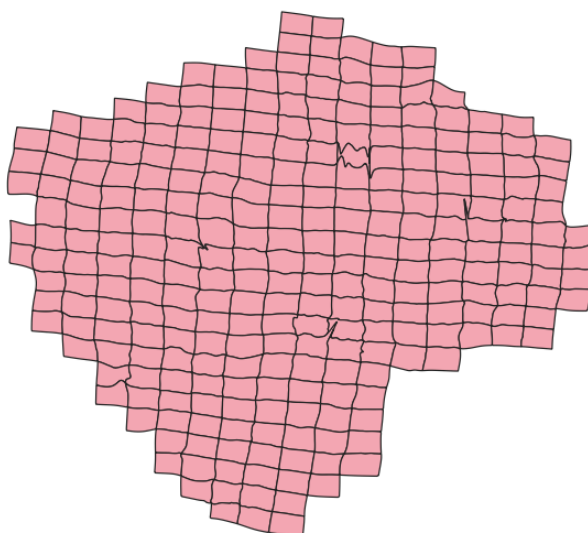
Výpočetní část statistického zhodnocení přesnosti byla provedena v programu Matlab dle postupu uvedeného v kapitole 3.2.

7 Problémy při práci

Při práci se vyskytla řada objektivních problémů, jež bylo nutné vyřešit. Jejich popis a aplikovaný způsob řešení bude nastíněn v následující kapitole.

7.1 Vstupní data

Prvním z řešených problémů byly duplicitní záznamy identických bodů ve vstupních datech. Jejich vznik byl způsoben dvojitým sběrem identických bodů na některých listech, dalším problémem byly chyby v souřadnicích identických bodů. Oba problémy bylo nutné manuálně vyřešit, celkem bylo ze vstupních dat smazáno 172 bodů. Místa s problematickými vstupními daty byla vizuálně snadno rozeznatelná, proto bylo snadné vytipovat mapové listy, na nichž bylo třeba opravu provést.



Obrázek 7.1: Okraje mapových listů po vyrovnaní metodou TPS se surovými daty

Na Obrázku 7.1 jsou vizualizovány okraje aktivních oblastí mapových listů po vyrovnání metodou TPS se surovými daty, oblasti, v nichž byla následně validována vstupní data, jsou zřetelné z nepravidelných tvarů okrajů. V porovnání s Obrázkem 6.3 je zřetelná změna geometrie validovaných mapových listů.

7.2 Výpočetní paměť

Původním záměrem bylo transformování mapových listů v programu Matlab, během práce se však tato operace ukázala jako příliš výpočetně náročná, proto byly mapové listy transformovány v software ArcGIS Pro za pomoci bodů v gridu uložených v *auxiliary files*.

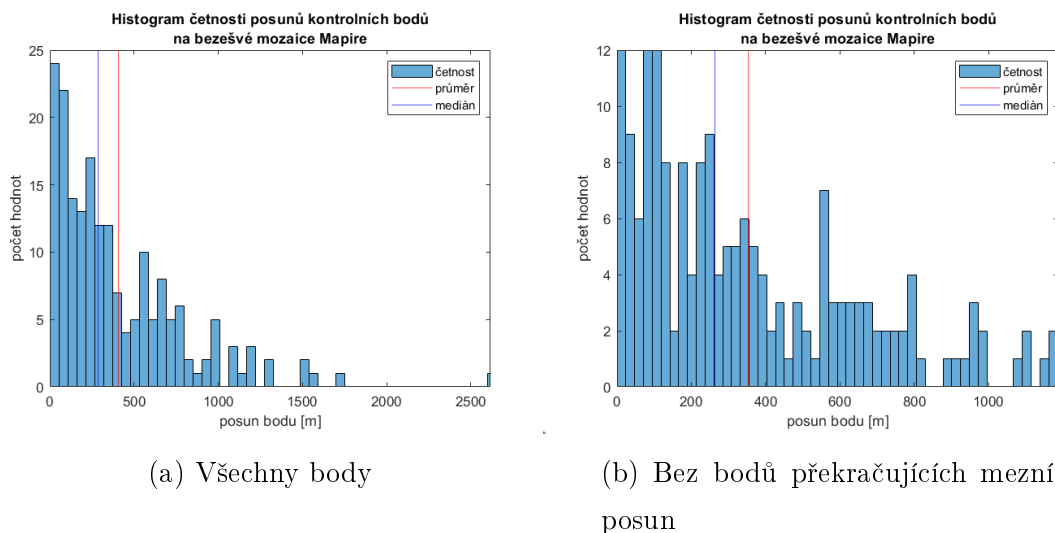
8 Výsledky zhodnocení

V této kapitole budou sumarizovány výsledky statistického hodnocení porovnávaných mapových vrstev. Nejprve budou popsány jednotlivě, následně bude provedeno jejich porovnání. Pro přehlednější orientaci v textu budou mapové vrstvy v následující části textu označeny jako mozaika Mapire, VÚGTK, ČVUT a mozaika TPS.

8.1 Mapire

První hodnocená bežešvá mapová vrstva byla na serveru *mapire.eu*. Jak již bylo zmíněno v předchozí části textu, sběr souřadnic v této aplikaci je ovlivněn zaokrouhlením vizualizovaných souřadnic na desetitisícinu stupně. Tato hodnota odpovídá přibližně 11 metrům v poledníkovém směru a 5 metrům ve směru rovnoběžkovém. Minimální chyba, jež mohla být sběrem dat způsobena, byla tedy 11 metrů v souřadnici y a 5 metrů v souřadnici x.

Souřadnice bodů byly následně porovnány s referenčními souřadnicemi, rozdíl jejich poloh vyjadřoval posun bodu. Hodnoty posunů polohy bodů dosahovaly hodnot od 5 do 2611 metrů, průměrný posun byl 406 metrů a střední polohová chyba byla 564 metrů. Na Obrázku 8.1a je vizualizován histogram četnosti hodnot posunů bodů.



Obrázek 8.1: Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice Mapiře

Dalším krokem byl výpočet mezního posunu, jehož hodnota byla na 5% hladině statistické významnosti 1190 metrů. Hodnoty, které mezní posun překračovaly, byly vyřazeny z dalších výpočtů, celkem překračovalo mezní posun 8 bodů. Na Obrázku 8.1b je zobrazen histogram již upravených dat.

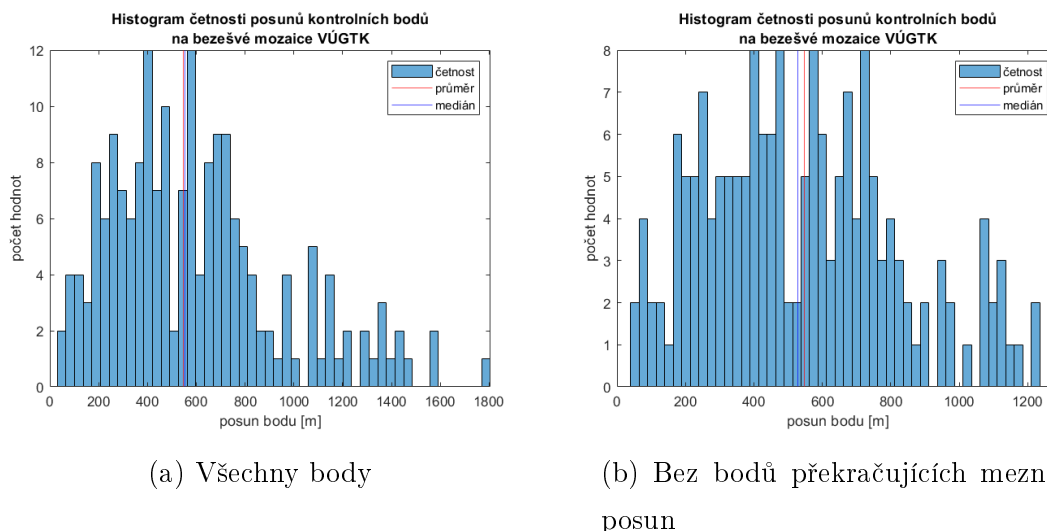
Po vyřazení odlehlých hodnot byl znovu vypočítán průměrný posun, jeho hodnota byla 354 metrů, střední polohová chyba upravených bodů byla 461 metrů, hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 8.1.

Tabulka 8.1: Veličiny přesnosti polohy kontrolních bodů na mozaice Mapiře

	původní data	data bez odlehlých hodnot
průměrný posun bodu [m]	406	354
medián posunu bodu [m]	286	264
střední polohová chyba [m]	564	461

8.2 VÚGTK

Kontrolní body na mozaice VÚGTK byly sbírány v programu ArcGIS Pro, narozdíl od předešlé mapové vrstvy tedy byly zatíženy řádově menší chybou z určení souřadnic. Průměrná hodnota posunu dosahovala hodnoty 600 metrů. Nejmenší posun byl 40 metrů, největší 1801 metrů. Rozložení četnosti hodnot posunů je vizualizováno na Obrázku 8.2



Obrázek 8.2: Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice VÚGTK

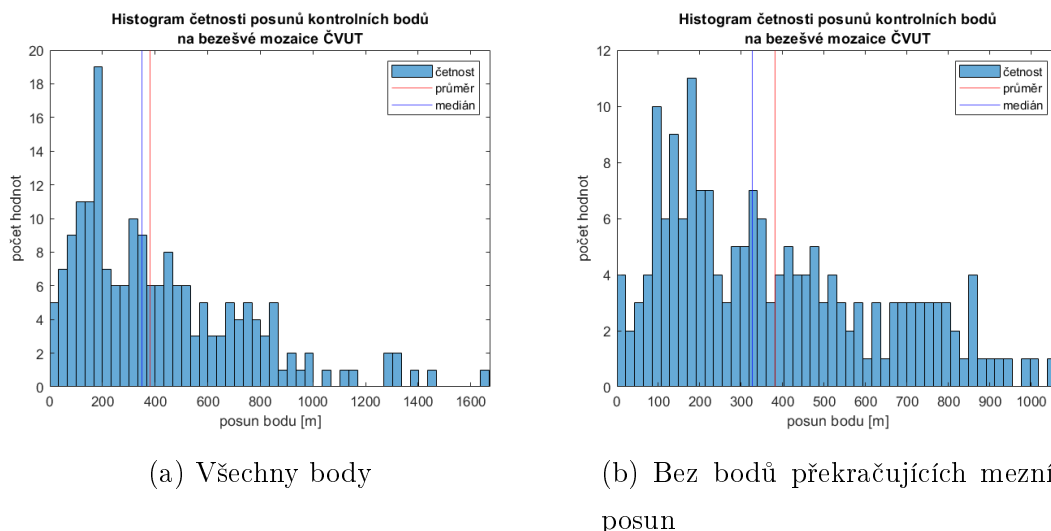
Dalším krokem byl výpočet mezního posunu, s nímž byly porovnávány zjištěné hodnoty. Mezní posun byl 1312 metrů, 11 bodů tuto hodnotu přesahovalo. Na Obrázku 8.2b je histogram upraveného souboru dat. Průměrný posun měl poté hodnotu 547 metrů, medián posunu byl 529 metrů, hodnoty byly sepsány do Tabulky 8.2.

Tabulka 8.2: Veličiny přesnosti polohy kontrolních bodů na mozaice VÚGTK

	původní data	data bez odlehlých hodnot
průměrný posun bodu [m]	600	547
medián posunu bodu [m]	555	529
střední polohová chyba [m]	697	619

8.3 ČVUT

Další hodnocená mapová vrstva byla vytvořena na Katedře geomatiky ČVUT. Hodnocení bylo provedeno stejným způsobem jako v případě předchozích dvou vrstev. Průměrný posun na mozaice ČVUT byl 406 metrů, střední polohová chyba měla hodnotu 536 metrů. Posun dosahoval hodnot 5–1670 metrů, histogram rozložení hodnot posunů identických bodů je na Obrázku 8.3.



Obrázek 8.3: Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice ČVUT

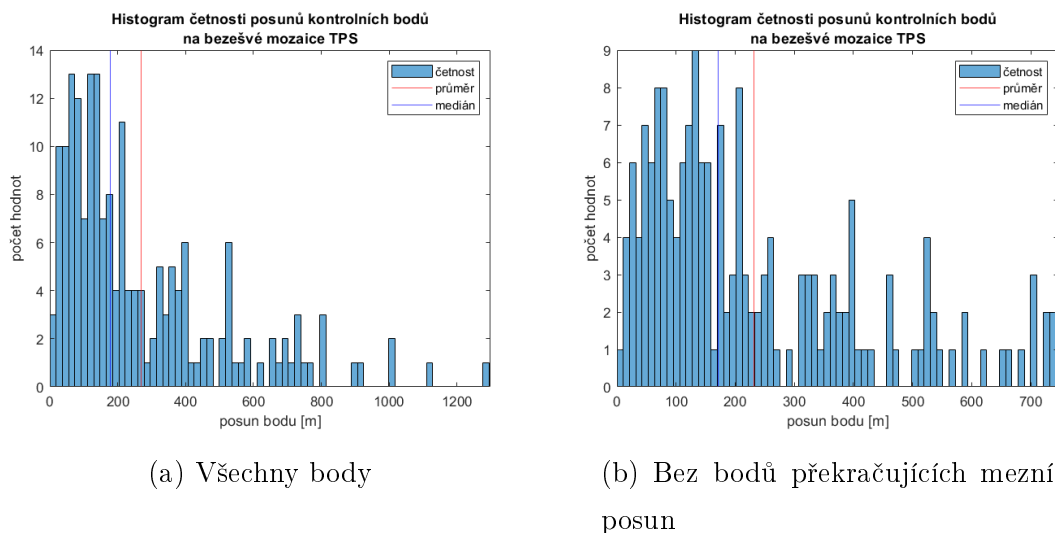
Z vypočtených posunů byl následně zjišťován posun mezní, který měl hodnotu 1078 metrů, stejně jako u předchozích hodnocených mapových vrstev byly větší hodnoty vyřazeny z dalších výpočtů. Odlehlých bodů bylo na 5% hladině významnosti 9. Průměr nového souboru dat dosahoval hodnoty 381 metrů, střední polohová chyba hodnoty 460 metrů.

Tabulka 8.3: Veličiny přesnosti polohy kontrolních bodů na mozaice ČVUT

	původní data	data bez odlehlých hodnot
průměrný posun bodu [m]	426	381
medián posunu bodu [m]	349	327
střední polohová chyba [m]	536	460

8.4 TPS

K hodnoceným mapovým vrstvám byla přidána i mozaika vytvořená metodou TPS. Průměrný posun byl 270 metrů, střední polohová chyba měla hodnotu 536 metrů. Minimální hodnota posunu byla 3 metry, maximální 1294 metrů, histogram rozložení hodnot posunů identických bodů je vizualizován na Obrázku 8.4.



Obrázek 8.4: Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice TPS

Následoval výpočet mezního posunu na 5% hladině významnosti, jeho hodnota činila 760 metrů, po porovnání bylo vyřazeno 10 bodů. Z nových dat byl opět vypočten průměrný posun, jehož hodnota byla 260 metrů, a střední polohová chyba, jejíž hodnota byla 344 metrů. Hodnoty jsou shrnuty v tabulce 8.4.

Tabulka 8.4: Veličiny přesnosti polohy kontrolních bodů na mozaice TPS

	původní data	data bez odlehlých hodnot
průměrný posun bodu [m]	267	260
medián posunu bodu [m]	179	172
střední polohová chyba [m]	364	298

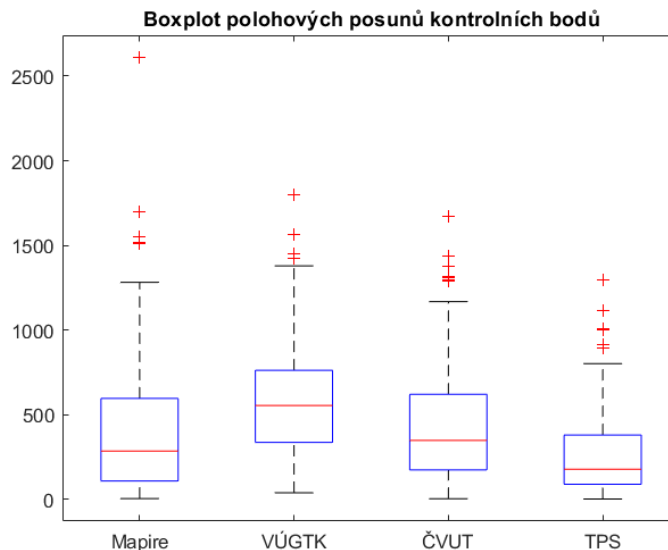
8.5 Porovnání

V následující části textu budou shrnuty a porovnány výsledky hodnocení jednotlivých mapových vrstev.

8.5.1 Boxplot

První porovnání bylo provedeno pomocí boxplotu posunů poloh kontrolních bodů. Graf je zobrazen na Obrázku 8.5, vizualizuje původní data před jejich porovnáním

s mezním posunem. Jak je z grafu zřetelné, největší maximální hodnota posunu byla na mozaice Mapire, jeho hodnota byla 2610 metrů, medián je však po mozaice TPS druhý nejmenší, největší medián posunu má dle krabicového grafu mozaika VÚGTK.



Obrázek 8.5: Boxplot posunů kontrolních bodů

8.5.2 Rozptyl, minima, maxima

V této části budou posuny bodů hodnoceny z pohledu rozptylu dat. Rozptyl byl vypočítán dle vztahu 3.13. Jak je zřetelné z Tabulky 8.5, nejmenší rozptyl byl na mozaice TPS a ČVUT, největší naopak na mozaice Mapire.

Tabulka 8.5: Rozptyl hodnot posunů bodů

	Mapire	VÚGTK	ČVUT	TPS
minimální posun [m]	5	40	5	3
maximální posun [m]	2611	1800	1670	1294
rozptyl hodnot [m]	153878	126754	105999	60171

8.5.3 Směrodatná odchylka a mezní posun

Dalším porovnávaným kritériem budou hodnoty směrodatných odchylek a z nich vypočtených mezních posunů. Mezní posuny byly vypočteny na 1% a 5% hladi-

ně spolehlivosti dle vztahu 3.14 uvedeného v kapitole 3.2, hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 8.6. Největší mezní posuny byly vypočteny na mozaice VÚGTK, nejmenší mezní posun byl na obou uvažovaných hladinách významnosti na mozaice TPS.

V dalších výpočtech bude uvažována hladina významnosti 5 %.

Tabulka 8.6: Mezní posun kontrolních bodů

	Mapire	VÚGTK	ČVUT	TPS
směrodatná odchylka [m]	392	356	326	245
mezní posun [m] ($\alpha = 0.05$)	1190	1311	1077	760
počet vyřazených bodů	8	11	9	10
mezní posun [m] ($\alpha = 0.01$)	1386	1490	1241	883
počet vyřazených bodů	5	3	7	6

Body s překračujícím posunem byly po výpočtu manuálně kontrolovány. Z bodů vyřazených na 5% hladině významnosti byl bod 110 vyřazen na všech čtyřech mapových vrstvách, body 87, 92 a 155 byly vyřazeny na 3 vrstvách. U bodů s velkými polohovými posuny lze předpokládat různé možné příčiny chyb, a to buď nepřesný sběr souřadnic, lokální deformaci mapového listu nebo nepřesné zakreslení objektu do mapy. V Tabulce 8.7 jsou uvedeny posuny na zmíněných bodech, vzhledem k typům objektů – všechny objekty jsou kostely, nelze předpokládat jejich změnu polohy v čase.

Tabulka 8.7: Posuny na vybraných bodech

číslo bodu	Mapire	VÚGTK	ČVUT	TPS
110	1698	1451	1439	1114
87	1553	1801	1293	312
92	24	1348	1318	914
155	1192	1133	1133	1001

8.5.4 Shrnutí

V Tabulce 8.8 jsou shrnuty zjištěné parametry přesnosti. Z tabulky i předchozích zmíněných parametrech vyplývá, že nejméně přesnou mapovou vrstvou byla na hodnocených objektech mozaika VÚGTK, která vykazovala největší průměrné posuny bodů a její střední polohová chyba měla taktéž největší hodnotu. Mozaiky Mapire a ČVUT vykazovaly na hodnocených bodech podobnou přesnost. Průměrný posun a medián posunu byl menší na mapové vrstvě Mapire, směrodatná odchylka a střední polohová chyba však měly nižší hodnotu pro vrstvu ČVUT. Rozdíly by mohly být pravděpodobně způsobeny odlišným rozdělením dat. Mapová vrstva vytvořená metodou TPS vykazovala ve všech hodnocených parametrech nejlepší výsledky.

Tabulka 8.8: Přesnost polohy analyzovaných mapových vrstev

	Mapire	VÚGTK	ČVUT	TPS
průměrný posun [m]	354	547	382	260
medián posunu [m]	264	529	327	172
střední polohová chyba [m]	461	619	460	298
směrodatná odchylka [m]	392	356	326	245

9 Výsledky práce

V následující kapitole budou shrnuty výsledky tvorby souvislé mapové vrstvy.

Jedním výsledkem práce je vytvořený skript v napsaný ve skriptovacím jazyce Matlab. Skript umožňuje transformaci mapových listů metodou *thin plate spline*. Na základě popsaného postupu generuje *auxiliary* soubory, pomocí nichž je možné přidat rastrové soubory do GIS softwaru, kde z nich může být následně vytvořen *Mosaic Dataset*. Druhým výstupem skriptu je soubor obsahující polygony ohraničující transformované oblasti mapových polí, který je možné použít jako *footprints* pro vymaskování mimorámových údajů mapových listů.



Obrázek 9.1: Výsledná mapová vrstva

Po spuštění skriptu byla následně vytvořena v programu ArcGIS Pro z jednotlivých mapových listů byla následně vytvořena výsledná mozaika, která je znázorněna na Obrázku 9.1. Mozaika byla publikovaná jako webová mapová vrstva, která je uložena na následující adrese: bit.ly/388vqkZ.

Mapové listy na sebe bezešvě navazují, na některých místech jsou mezi mapovými listy malé mezery. Důvodem jejich vzniku je však srážka papíru a stav, v němž se mapové listy dochovaly. Styk mapových listů je znázorněn na Obrázcích 9.2 a 9.3.

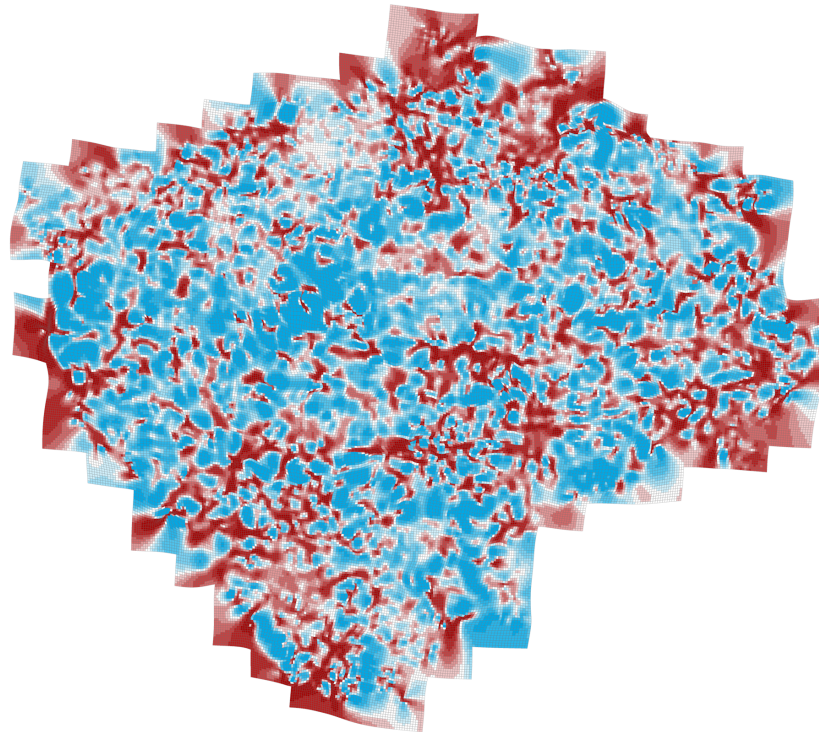


Obrázek 9.2: Styk mapových listů na výsledné mapové vrstvě



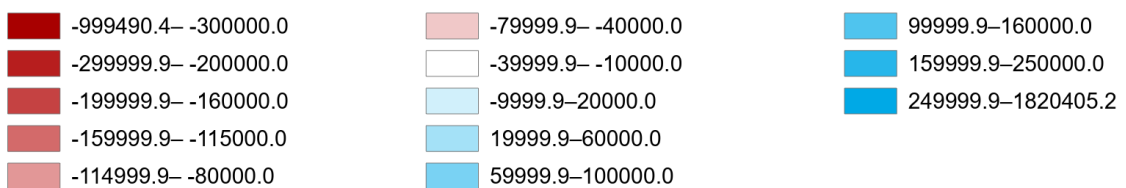
Obrázek 9.3: Styk mapových listů na výsledné mapové vrstvě

Dalším výstupem práce je transformovaná kilometrová čtvercová síť, jež umožňuje další způsob vizualizace deformací map. Síť je zobrazena na Obrázku 9.4.



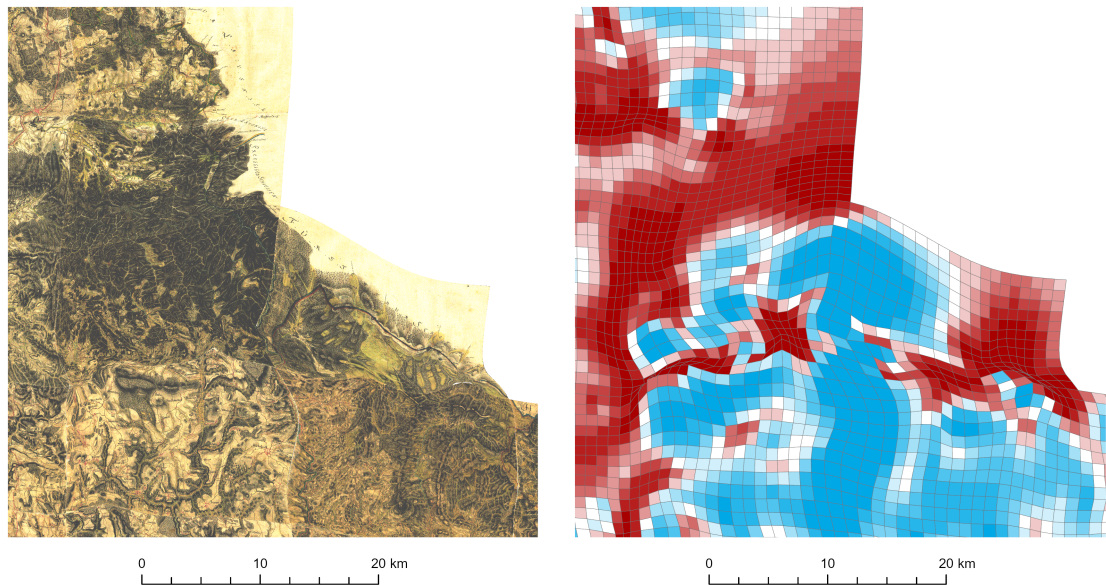
Obrázek 9.4: Výsledná deformační mřížka

Barevná stupnice mřížky vizualizuje rozdíl v ploše oproti původním rozměrům. Stupnice je znázorněna na Obrázku 9.5, hodnoty jsou uvedeny v m^2 . Jak je ze stupnice zřetelné, polygony, kterým se zmenšila plocha, jsou znázorněny v odstínech červené barvy, polygony s větší rozlohou naopak v odstínech modré.



Obrázek 9.5: Vizualizace vybrané oblasti na výsledné mozaice

Pro lepší vizualizaci byla vybrána oblast se značnou polohovou deformací, oblast se nachází na pomezí Krkonoš a Jizerských hor. Na Obrázku 9.6 je vizualizována na výsledných mapách prvního vojenského mapování a pomocí gridu. Velká deformace oblasti může být způsobena buď nepřesností v určení identických bodů, nebo špatným zakreslením map, vzhledem k povaze lokality – velké zalesněnosti je pravděpodobnější druhá zmíněná možnost.



(a) Výsledná mozaika

(b) Deformační mřížka

Obrázek 9.6: Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice ČVUT

10 Závěrečná diskuze

Cíl práce, tedy vytvoření souvislé bezešvé mapové vrstvy, se dle mého úsudku povedl splnit. Mozaika byla vytvořena dle popsaného postupu a následně publikována jako webová mapová vrstva.

Na několika místech je výsledná mapová vrstva značně zdeformovaná, příčinou těchto deformací mohou být buď nepřesné souřadnice identických bodů, nebo lokální deformace map. Deformace jsou zřetelné z přidané deformační mřížky, kterou tvoří transformované čtverce s původními rozměry 1×1 kilometr. Ač jsem se snažila zkontrolovat souřadnice velkého množství identických bodů, nebylo v mých silách je zkontrolovat všechny. Pokračováním práce by tedy mohla být pečlivá validace vstupních dat a následné opakování výpočtu v připraveném skriptu. Výpočetní skript byl upraven tak, aby bylo pro jeho spuštění nutné pouze definovat cesty ke složkám se vstupními a výstupními daty.

V případě, že bych měla více času na zpracování, bylo by dalším krokem vytvoření samostatné desktopové aplikace umožňující vyrovnání map metodou TPS. Myslím, že by aplikace našla uplatnění a umožnila novou možnost zpracování starých map. Za zvážení také stojí, zda bych znovu zvolila pro výpočetní část stejný programovací jazyk. Matlab byl zvolen díky vhodné implementaci výpočtů s maticemi velkých rozměrů, které byly základem celé práce. Definování tříd a objektů v tomto jazyce však není příliš praktické, z tohoto hlediska by bylo nejspíše vhodnější zvolit některý objektově orientovaný jazyk, například C++.

Hodnocení přesnosti bylo provedeno pomocí 188 bodů, vzhledem k množství mapových listů, je třeba brát dosažené výsledky s patřičnou rezervou. V ideálním případě by bylo potřeba pracovat s 2–3 body na jeden mapový list. Vzhledem ke značné časové náročnosti sběru dat však nebylo možné sběru takového množství bodů v rámci práce dosáhnout.

Závěr

V úvodu práce byly vytyčeny hlavní cíle práce – vytvoření bezešvé mapové vrstvy map prvního vojenského mapování a zhodnocení již vytvořených mapových vrstev těchto map.

Bezešvá mapová vrstva map prvního vojenského mapování byla vytvořena popsaným postupem, výsledná mapová vrstva byla publikována jako webová mapová vrstva, která je dostupná na adrese:

bit.ly/388vqkZ

Navržený postup se tedy ukázal jako aplikovatelný, mapové listy byly transformovány projektivní transformací do souvislé mozaiky a následně vyrovnány metodou thin plate spline. Výsledná mapová vrstva byla doplněna o kilometrovou čtvercovou síť transformovanou použitými parametry thin plate spline, díky vrstvě jsou zřetelné lokální deformace sítě. Síť vizualizuje barevnou divergentní stupnicí změny ploch jednotlivých prvků sítě.

Statistické zhodnocení mapových vrstev bylo provedeno v softwaru Matlab a zahrnovalo zhodnocení vrstev publikovaných následujícími organizacemi: Mapire.eu, VÚGTK, ČVUT, pro doplnění bylo přidáno i zhodnocení nově vytvořené mozaiky. Sesbíráno bylo 188 bodů, u nichž byl následně hodnocen posun oproti referenčním souřadnicím. Je nutné vzít v potaz, že u mozaiky Mapire a VÚGTK nejsou známé identické body použité pro transformaci mapových listů. Je tedy možné, že mohly některé kontrolní body použity v minulosti právě jako identické body pro transformaci, čímž by byl ovlivněn výsledek hodnocení.

Ze tří hodnocených vrstev měla na 95% intervalu spolehlivosti mozaika publikovaná na serveru Mapire.eu průměrný posun bodu 354 metrů a střední polohovou chybu 416 metrů. Mozaika vytvořená VÚGTK měla průměrný posun 547 metrů a střední polohovou chybu 619 metrů, výsledný průměrný posun bodů na mozaice

publikované na Katedře geomatiky byl 382 metrů, střední polohová chyba byla 460 metrů. Poslední hodnocenou vrstvou byla bezešvá mapová vrstva vytvořená metodou TPS, kontrolní body měly průměrný posun 260 metrů a střední polohovou chybu 298 metrů. Z dalších hodnocených parametrů uvedených v kapitole 8 vyplývaly výsledky porovnání obdobně.

Seznam použitých zkratek

S-JTSK	Systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální
WGS84	Světový geodetický systém 1984 (<i>World Geodetic System 1984</i>)
IB	Identický bod
TPS	Thin plate spline
WMS	Webová mapová služba (<i>Web Map Service</i>)
WMTS	Webová dlaždicová mapová služba (<i>Web Map Tiled Service</i>)
GIS	Geografický informační systém
OGC	Open Geospatial Consortium
TIFF	Tagged Image File Format
WKT	Well known text
XML	Extensible Markup Language
GML	Geography Markup Language
VÚGTK	Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický
DPI	Dots per inch

Literatura

- [1] BOOKSTEIN, F.L. Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1989, **11**(6), 567-585. ISSN 01628828. Dostupné z: doi:10.1109/34.24792
- [2] MINGHINI, M. a L. VALENTINI, BROVELLI, M. A., ed. Web Services and Historical Cadastral Maps: the first Step in the Implementation of the Web C.A.R.T.E. System. RUAS, Anne. *Advances in Cartography and GIScience*. 2. Paris: Springer, 2011, s. 147—161. ISBN 978-3-642-19213-5.
- [3] BRŮNA, Vladimír a Kateřina KŘOVÁKOVÁ. Využití starých map středního a velkého měřítka pro sledování vývoje lesů. In: *Projekty GA ČR č. 205/05/0888 - Georeferencování a kartografická analýza historických vojenských mapování Čech a Moravy* [online]. Olomouc: UPOL [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://bruna.geolab.cz/files/oldmaps/srni.pdf>
- [4] CAJTHAML, Jiří. Jak georeferencovat staré mapy?. *Kartografické listy*. 2013, **21**, 3-10. ISSN 1336-5274.
- [5] CAJTHAML, Jiří. *Analýza starých map v digitálním prostředí na příkladu Müllerových map Čech a Moravy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2012. ISBN 978-800-1050-101.
- [6] CAJTHAML, Jiří a Tomáš JANATA. Georeferencing of First Military Mapping survey maps in the area of Bohemia using polynomial method. *E-Perimtron*. 2017, **12**(4), 181-188. ISSN 1790-3769.
- [7] CLAEYS BOÛAERT, Manuel, Bernard DE BAETS, Soetkin VERVUST, Tijs NEUTENS, Philippe DE MAEYER a Nico VAN DE WEGHE. Computation and visualisation of the accuracy of old maps using differential distortion analysis. *International Journal of Geographical Information Science*. 2016, **30**(7), 1255-1280. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/13658816.2015.1127377

- [8] DONATO, Gianluca a Serge BELONGIE. *Approximation Methods for Thin Plate Spline Mappings and Principal Warps*. San Diego, 2002. Dept of Computer Science and Engineering University of California.
- [9] DUCHON, Jean. Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis - Modélisation Mathématique et Analyse Numérique*. 1976, **3**(10), 5-12.
- [10] FIEDLEROVÁ, Tereza. *Aplikace pro georeferencování vícelistých mapových děl*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [11] JARUŠKOVÁ, Daniela. *Pravděpodobnost a matematická statistika*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04829-0.
- [12] KELLER, Wolfgang a Andrzej BORKOWSKI. Thin plate spline interpolation. *Journal of Geodesy*. 2019, **93**(9), 1251-1269. ISSN 0949-7714. Dostupné z: doi:10.1007/s00190-019-01240-2
- [13] KILIANOVÁ, Helena, Zuzana ZAPLETALOVÁ a Vilém PECHANEC. Změny využití zemědělské krajiny v povodí Trkmanky. In: *Projekty GA ČR č. 205/07/0821 - Analýzy a modelování dynamiky prostorových vazeb ekotonů v prostředí GIS* [online]. Olomouc: UPOL [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://geoinformatics.upol.cz/app/ekotony/data/c07.pdf>
- [14] MOLNÁR, G. Making a georeferenced mosaic of historical map series using constrained polynomial fit. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*. 2010, **45**(1), 24-30. ISSN 1217-8977. Dostupné z: doi:10.1556/AGeod.45.2010.1.5
- [15] MOLNÁR, Gábor, Gábor TIMÁR a Előd BISZAK. Can the First Military Survey maps of the Habsburg Empire (1763-1790) be georeferenced by an accuracy of 200 meters?. *9th International Workshop on Digital Approaches to Cartographic Heritage* [online]. 2014, 4.9.2014 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: doi:10.13140/2.1.1447.8724
- [16] MYSLIVEC, Jan. *TRANSFORMACE MAP I. VOJENSKÉHO MAPOVÁNÍ METODOU THIN PLATE SPLINE*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Cajthaml, Ph.D.

- [17] NOVÁK, Jan. *Georeferencování prvního vojenského mapování Rakouska—Uherska*. Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Jiří Cajthaml, Ph.D.
- [18] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 20*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2762-7.
- [19] PEŠŤÁK, Jaroslav a Růžena ZIMOVÁ. Polohová přesnost objektů na mapách prvního a druhého vojenského mapování. *Kartografické listy*. 2015, (13), 92-100. ISSN 1336-5274.
- [20] SOUKUP, Lubomír, Jan HAVRLANT, Ondřej BÖHM a Milan TALICH. Elastic Conformal Transformation of Digital Images. In: *FIG Working Week 2012* [online]. Rome, Italy, 2012, 6-10 May 2012 [cit. 2022-05-04].
- [21] TAGHVAKISH, Sina a Jalal AMINI. Optimum Weight in Thin Plate Spline for Digital Surface Model Generation. In: *Positioning and Measurement Technologies and Practices II* [online]. Athens: FIG, 2004, 1 — 15 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/athens/papers/ts26/TS26_6
- [22] VEVERKA, Bohuslav a Růžena ZIMOVÁ. *Topografická a tematická kartografie*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-800-1041-574.
- [23] ZIMOVÁ, Růžena a Miroslav MIKŠOVSKÝ. *Historické mapy. Zborník z vedeckej konferencie. [Bratislava, 17.3.2005.]: MÜLLEROVA MAPA ČECH JAKO PODKLAD PRO 1. VOJENSKÉ MAPOVÁNÍ ?*. Bratislava: Kartografická spoločnosť SR - Geografický ústav SAV, 2005. ISBN 80-968365-7-9. ISSN 1336-6262.
- [24] ZIMOVÁ, Růžena a Miroslav MIKŠOVSKÝ. HISTORICKÁ MAPOVÁNÍ ČESKÝCH ZEMÍ. *Projekty Grantové agentury České republiky: Georeferencování a kartografická analýza historických mapování Čech, Moravy a Slezska (2004 - 2006)* [online]. Praha, 2006, 1(1), 4-5 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: http://www.geolab.cz/projekty/gacr/a/files/miks_zim_GEOS06.pdf
- [25] ISO 19136:2007. *Geographic information - Geography Markup Language (GML)*. 1. ISO/TC 211 Geographic information/Geomatics, 2007.

- [26] *Advances in Cartography and GIScience. Volume 2.* 2. Berlin, Germany: Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011. ISBN 978-3-642-19213-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-19214-2
- [27] *Virtuální mapová sbírka* [online]. Praha: VÚGTK, v.v.i. & HÚ AV ČR, 2016 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://chartae-antiquae.cz/>
- [28] Teorie chyb a vyrovnávací počet. *IngGeo - portál inženýrské geodézie* [online]. Praha, 2012 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://inggeo.fsv.cvut.cz/wiki/doku.php?id=04_teorie_chyb
- [29] ArcGIS Pro. *ESRI Australia* [online]. Brisbane, Australia, 2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://esriaustralia.com.au/arcgis-pro>
- [30] What is IrfanView?. *IrfanView* [online]. Vienna, Austria: Irfan Skiljan, 2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://www.irfanview.com/main_what_is_engl.htm
- [31] Geographic information - Well-known text representation of coordinate reference systems. *Open Geospatial Consortium* [online]. Arlington, VA, Spojené státy americké: Open Geospatial Consortium, 2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://docs.opengeospatial.org/is/18-010r7/18-010r7.html>
- [32] ArcGIS Pro — základ systému ArcGIS. *ARCDATA PRAHA* [online]. Praha: ARCDATA PRAHA, 2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.arcddata.cz/produkty/arcgis/desktopovy-gis/arcgis-pro>
- [33] Habsburg Empire (1763-1787) - First Military Survey. *Arcanum Maps* [online]. Budapest, Hungary: Arcanum Adatbázis Kft., 2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://maps.arcanum.com/en/browse/country/firstsurvey/>
- [34] Xmlwrite. *MathWorks Help Center* [online]. Natick, MA, Spojené státy americké: The MathWorks, 2022 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/xmlwrite.html>
- [35] QGIS. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/QGIS>
- [36] Matlab. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/MATLAB>

Seznam obrázků

2.1	Mapový list prvního vojenského mapování	16
2.2	Klad mapových listů map 1. vojenského mapování	16
3.1	Projektivní transformace [18]	20
3.2	Pappova věta [18]	20
3.3	Princip metody TPS	22
4.1	Ukázka TIFF souboru s naskenovanou mapou 1.VM	27
5.1	Logo softwaru Matlab [36]	29
5.2	Logo softwaru ArcGIS Pro [29]	29
5.3	Logo softwaru QGIS [35]	30
5.4	Logo softwaru IrfanView [30]	30
5.5	Princip hierarchie auxiliární souboru	31
6.1	Textový soubor s kladem mapových listů	32
6.2	Okraje aktivních oblastí mapových listů v souvislé mozaice	34
6.3	Transformované rámy aktivních oblastí mapových listů	38
6.4	Model pro automatické převzorkování rastrů	39
6.5	Maskování mimorámových údajů	39
6.6	Ruční doeditování footprints	39
6.7	Barevná stupnice deformační mřížky	40

6.8	Mapa vizualizující rozložení identických bodů	41
6.9	Sběr identických bodů na mapové vrstvě na portálu Mapire.eu	42
6.10	Sběr identických bodů na mapových vrstvách vytvořených VÚGTK, Katedrou geomatiky ČVUT a na mozaice vytvořenou metodou TPS .	43
7.1	Okraje mapových listů po vyrovnání metodou TPS se surovými daty	44
8.1	Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice Mapire	47
8.2	Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice VÚGTK	48
8.3	Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice ČVUT	49
8.4	Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice TPS	50
8.5	Boxplot posunů kontrolních bodů	51
9.1	Výsledná mapová vrstva	54
9.2	Styk mapových listů na výsledné mapové vrstvě	55
9.3	Styk mapových listů na výsledné mapové vrstvě	55
9.4	Výsledná deformační mřížka	56
9.5	Vizualizace vybrané oblasti na výsledné mozaice	56
9.6	Histogram posunů poloh identických bodů na mozaice ČVUT	57

Seznam tabulek

8.1	Veličiny přesnosti polohy kontrolních bodů na mozaice Mapire	47
8.2	Veličiny přesnosti polohy kontrolních bodů na mozaice VÚGTK	48
8.3	Veličiny přesnosti polohy kontrolních bodů na mozaice ČVUT	49
8.4	Veličiny přesnosti polohy kontrolních bodů na mozaice TPS	50
8.5	Rozptyl hodnot posunů bodů	51
8.6	Mezní posun kontrolních bodů	52
8.7	Posuny na vybraných bodech	52
8.8	Přesnost polohy analyzovaných mapových vrstev	53

A Výpočetní skript

```
%% -- Vypocet vyrovnani map prvnioho vojenskeho mapovani
    metodou TPS -- %%
% --- diplomova prace FSv CVUT -- %
% --- Monika Krizova --- %
% ---- kveten 2022 --- %

%% Priprava pracovniho prostredi
clc, clear variables;
format long g

% Zahajeni mereni casu vypoctu
tic

%% Nacteni dat

% Cesta ke vstupnim souborum
f_path_IB = "..\IB\_";
f_path_corners = "..\ROHY\_";
f_path_map_layout = "..\klad_listu.txt";

% Rozliseni vstupnich souboru
dpi = 200;

% Cesta k vystupnim datum
f_path_outputs = "..\vystupni\_";

% nacteni matice s kladem mapovych listu
map_layout = load( f_path_map_layout );

%% Projektivni transformace mapovych listu do souvisle
    mozaiky

[rows, cols] = size(map_layout);
```

```

disp
    ("-----")

disp("Probiha vypocet projektivni transformace")
disp
    ("-----")

GCPs_all = GCPsAll(1);

% Prochazeni souboru s kladem mapovych listu
for r = 1 : rows
    for c = 1 : cols

        % Oznaceni mapoveho listu, ktery bude
        transformovan
        id(:,1) = map_layout(r,c);

        if id ~= 0

            % Nacteni dat mapoveho listu z textovych
            souboru
            crnrs = load( strcat(f_path_corners, num2str(
                id), "_rohky.txt")) ;
            IB = load( strcat(f_path_IB, num2str(id), "
                _ib.txt")) ;

            % Rohy mapovych listu
            corners = Corners( id, r, c );
            corners = setImCoords(corners, crnrs(:,1).*
                dpi, crnrs(:,2).*dpi);

            % Identické body
            GCPs = Points(id);
            GCPs = setImCoords(GCPs, IB(:,1).*dpi, IB
                (:,2).*dpi) ;
            GCPs = setJtskCoords(GCPs, IB(:,3), IB(:,4))
                ;

            % Transformacni klic projektivni transformace
            tr_key = proj_trans_key(corners.x_im, corners
                .y_im, corners.x_mos, corners.y_mos);

            % Projektivni transformace IB
            GCPs = setProjKlic(GCPs, tr_key);

            % Ulozeni parametru

```

```

        GCPs_all = addresult(GCPs_all, GCPs.x_im,
            GCPs.y_im, GCPs.x_mos, GCPs.y_mos, GCPs.
            x_jtsk, GCPs.y_jtsk);

        end
        clear corners; clear GCPs;
    end
end

disp("Projektivni transformace probehla v poradku,
    nasleduje vypocet parametru TPS")
disp
    ("-----")

% Vypocet parametru TPS
GCPs_all = TPS_key(GCPs_all);

disp("Parametry TPS byly vypocteny")
disp
    ("-----")

%% TPS transformace

disp("Nasleduje transformace jednotlivych mapovych listu
    ")
disp
    ("-----")

% Generovani gml souboru, v nemz budou ulozene polygony
    aktivnich oblasti
fID = fopen( strcat(f_path_outputs, "footprints.gml"), "w
    ");
generate_edges_gml1(fID);

% Pomocna promenna
j = 1;

% Prochazeni layoutu s kladem mapovych listu
for r = 1 : rows
    for c = 1 : cols
        % Oznaceni mapoveho listu, který bude
            transformovan
            id(:,1) = map_layout(r,c);
    end
end

```

```

if id ~= 0

    disp(strcat("Probiha zpracovani listu: ",
        num2str(id)))

    % Nacteni dat z textovych souboru
    IB = load (strcat(f_path_IB, num2str(id), "
        _ib.txt" ) );
    crnrs = load( strcat(f_path_corners, num2str(
        id), "_rohy.txt" ) );

    % Rohy
    corners = Corners(id, r, c);
    corners = setImCoords(corners, crnrs(:,1) .*
        dpi, crnrs(:,2) .* dpi);

    % Identicke body
    GCPs = Points(id);
    GCPs = setImCoords(GCPs, IB(:,1).*dpi, IB
        (:,2).*dpi);
    GCPs = setJtskCoords(GCPs, IB(:,3), IB(:,4));

    % Grid
    grid = Points(id);

    % Vygenerovani gridu
    [grid.x_im, grid.y_im] = gen_grid(200,
        corners.x_im, corners.y_im);

    % Vypocet klice projektivni transformace
    tr_key = proj_trans_key(corners.x_im, corners
        .y_im, corners.x_mos, corners.y_mos);

    % Projektivni transformace gridu - do
    souvisle mozaiky
    grid = setProjKlic(grid, tr_key);

    % TPS transformace
    corners = TPS_process(corners, GCPs_all.x_mos
        , GCPs_all.y_mos, GCPs_all.key_tps);
    grid = TPS_process(grid, GCPs_all.x_mos,
        GCPs_all.y_mos, GCPs_all.key_tps);

    % Footprints
    footprints = Footprints(corners.x_mos,
        corners.y_mos, 200);

```



```

    footprints = TPS_process(footprints, GCPs_all
        .x_mos, GCPs_all.y_mos, GCPs_all.key_tps);
    footprints = generateGML(footprints, j, fID,
        id);

    % Generovani auxialiary file
    generate_aux(id, f_path_outputs, [crnrs(:,1);
        GCPs.x_im./dpi ; grid.x_im./dpi ], [crnrs
        (:,2); GCPs.y_im./dpi ; grid.y_im./dpi ],
        ...
        [corners.x_jtsk; GCPs.x_jtsk ; grid.
            x_jtsk ], [ corners.y_jtsk; GCPs.
            y_jtsk ; grid.y_jtsk ] );

    % Pomocna promenna
    j = j+1;

    % Maze instance tridy
    clear corners; clear kraje; clear grid; clear
        footprints; clear GCPs;
    end
end
end

fprintf(fID, "</ogr:FeatureCollection>\n");
fclose(fID);

disp
    ("-----")

disp("Vypocet byl dokoncen")
disp
    ("-----")

toc

```

B Skripty použitých tříd

B.1 Points.m

```
classdef Points
    % ve tride jsou ulozeny souradnice rohu mapovych
    % listu

    % Verejne promenne
    properties
        x_im
        y_im
        x_mos
        y_mos
        x_jtsk
        y_jtsk
        key_proj
        key_tps
    end

    % Privatni promenne
    properties (Access = private)
        id
    end

    methods
        function obj = Points(set_id)
            if nargin>0
                obj.id=set_id;
            else
                obj.id=0;
            end
        end

        function obj = setImCoords(obj, set_x_sn,
            set_y_sn)
            % Uklada snimkove souradnicee
    end
end
```

```

    obj.x_im = [ obj.x_im; set_x_sn ];
    obj.y_im = [ obj.y_im; set_y_sn ];
end

function obj = setMozCoords(obj, set_x_moz,
    set_y_moz)
    % Uklada souradnice bodu mozaiky
    obj.x_mos = [ obj.x_mos; set_x_moz ];
    obj.y_mos = [ obj.y_mos; set_y_moz ];
end

function obj = setJtskCoords(obj, set_x_jtsk,
    set_y_jtsk)
    % Uklada souradnice bodu v S-JTSK
    obj.x_jtsk = [ obj.x_jtsk; set_x_jtsk ];
    obj.y_jtsk = [ obj.y_jtsk; set_y_jtsk ];
end

function obj = setProjKlic(obj, set_klic)
    % Ulozi hodnotu transformacniho klice
    % projekтивni transformace
    obj.key_proj = set_klic;
    if isempty(obj.x_im) ~= 1
        % Vola metodu pro vypocet projektivni
        % transformace
        obj = proj_trans_process(obj);
    end
end

function obj = setTPSKey(obj, set_klic)
    % Ulozeni parametru TPS
    obj.key_tps = set_klic;
end

function obj = TPS_process(obj, x_IB_moz,
    y_IB_moz, set_klic_tps)
    % Vypocet TPS transformace
    obj.key_tps = set_klic_tps;
    n = size(obj.x_mos,1);
    n_IB = size(x_IB_moz,1);

    % Ulozeni klice do jednotlivych promennych
    % pro lepsi orientaci
    w_x = obj.key_tps(1:(end-3),1);
    d_x = obj.key_tps((end-2):end,1);
    w_y = obj.key_tps(1:(end-3),2);
    d_y = obj.key_tps((end-2):end,2);

```

```

% Prochazi vsechny transformovane body
for r = 1 : n

    sum_X = double(0);
    sum_Y = double(0);

    % Prochazi vsechny IB z nichz byly
    % vypocteny parametry TPS
    for c = 1:n_IB

        % Vypocet vzdalenosti mezi
        % transformovanim bodem a
        % vsemi identickymi body
        d = point2pointdist(obj.x_mos(r),
            x_IB_moz(c),obj.y_mos(r),y_IB_moz(
            c)) ;

        if d ~= 0

            % Vypocet sumy vzdalenosti
            r2_x = w_x(c)*(d^2*log(d));
            sum_X = sum_X + r2_x;

            r2_y = w_y(c)*(d^2*log(d));
            sum_Y = sum_Y + r2_y;
        end
    end

    % Vypocet finalnich souradnic
    % transformovanych bodu
    obj.x_jtsk(r,1) = d_x(1) + d_x(2) * obj.
        x_mos(r) + d_x(3) * obj.y_mos(r) +
        sum_X;
    obj.y_jtsk(r,1) = d_y(1) + d_y(2) * obj.
        x_mos(r) + d_y(3) * obj.y_mos(r) +
        sum_Y;
end

end

end

methods (Access = private)
    function obj = proj_trans_process(obj)

```

```

% Vypocet projektivni transformace

% Ulozeni transformacniho klice do
  samostatnych promennych
a0 = obj.key_proj(1); a1 = obj.key_proj(2);
a2=obj.key_proj(3); c1=obj.key_proj(4); c2
=obj.key_proj(5); b0=obj.key_proj(6); b1=
obj.key_proj(7); b2 = obj.key_proj(8);

% Prochazi vsechny transformovane body
for i = 1 : length(obj.x_im)

    % Vlastni vypocet transformace dle
      transformacnich rad
obj.x_mos(i,1) = (a0+a1*obj.x_im(i)+a2*
obj.y_im(i))/(1+c1*obj.x_im(i)+c2*obj.
y_im(i));
obj.y_mos(i,1) = (b0+b1*obj.x_im(i)+b2*
obj.y_im(i))/(1+c1*obj.x_im(i)+c2*obj.
y_im(i));

    end
end

end
end
end

```

B.2 Corners.m

```

classdef Corners < Points
    % Rohy mapovych poli

    % Privatni promenne
    properties (Access = private)
        id
        r
        c
    end

    % Metody
    methods
        function obj = Corners(set_id, r, c)
            % Konstruktor instance tridy
            if nargin>0
                obj.id=set_id;
                obj.r = r;
            end
        end
    end
end

```

```

        obj.c = c;
        obj = generuj_moz_rohy(obj);
    else
        obj.id=0;
    end
end

function obj = generuj_moz_rohy(obj)
    % Pocita souradnice rohu mapovych listu v
    % mozaice
    obj.x_mos = [10000+(obj.c-1)*30000; 10000+(
        obj.c)*30000; 10000+(obj.c)*30000; 10000+(
        obj.c-1)*30000];
    obj.y_mos = [550000-(obj.r-1)*20000; 550000-(
        obj.r-1)*20000; 550000-(obj.r)*20000;
        550000-(obj.r)*20000];
end
end
end
end

```

B.3 GCPsAll.m

```

classdef GCPsAll < Points
    % Uklada vsechny body
    % Potomek tridy Body

    methods
        function obj = addresult(obj, set_x_sn, set_y_sn,
            set_x_moz, set_y_moz, set_x_jtsk, set_y_jtsk)
            % Ulozeni vsech souradnic
            obj.x_im = [ obj.x_im; set_x_sn ];
            obj.y_im = [ obj.y_im; set_y_sn ];
            obj.x_mos = [ obj.x_mos; set_x_moz ];
            obj.y_mos = [ obj.y_mos; set_y_moz ];
            obj.x_jtsk = [ obj.x_jtsk; set_x_jtsk ];
            obj.y_jtsk = [ obj.y_jtsk; set_y_jtsk ];
        end

        function obj = TPS_key(obj)
            % Vypocet parametru transformace TPS

            % Ulozeni poctu identickych
            n_IB = length(obj.x_jtsk);

            % Prelokace pameti
            K = zeros(n_IB,n_IB);
        end
    end
end

```

```

% Vypocet matice K
for i = 1:n_IB
    for j = 1:n_IB
        if j == i
            % Prvky na diagonale rovny 0
            K(i,j) = 0;
        elseif K(i,j) == 0
            % Vypocet vzdalenosti mezi
            % identickymi body
            r = point2pointdist(obj.x_mos(i),
                obj.x_mos(j),obj.y_mos(i), obj.
                y_mos(j));
            K(i,j) = r^2*log(r);
        end
        K(j,i) = K(i,j);
    end
end

% Definovani matic P a Z
P = [ones(n_IB,1), obj.x_mos, obj.y_mos];
Z = zeros(3,3);

% Definovani matice L
L = [ K, P
      transpose(P), Z ];

% Matice vo - souradnice identickych bodu v
% jtsk + nulove vektory
vox = [obj.x_jtsk; zeros(3,1)];
voy = [obj.y_jtsk; zeros(3,1)];

% Reseni soustav pro zjisteni parametru TPS
param_x = L \ vox;
param_y = L \ voy;

obj.key_tps = [param_x, param_y];
end
end
end

```

B.4 Footprints.m

```
classdef Footprints
```

```

% Polygonova vrstva pro vymaskovani mimoramovych
  udaju

% Promenne
properties
    x_corners_mos
    y_corners_mos
    x_ftpr_mos
    y_ftpr_mos
    x_ftpr_jtsk
    y_ftpr_jtsk
    key_tps
    fpath
    m
end

% Metody
methods
    function obj = Footprints(set_x_corners ,
        set_y_corners , set_m)
        % Vytvari instanci tridy
        obj.x_corners_mos = set_x_corners;
        obj.y_corners_mos = set_y_corners;
        obj.m = set_m;
        obj = gen_edges(obj);
    end

    function obj = setPath(obj, set_path)
        % Ulozeni promenne fpath do instance tridy
        obj.fpath = set_path;
    end

    function obj = gen_edges(obj)
        % Generovani bodu na kraji mapoveho pole

        % Na 2. a 4. hrane budou prohozeny souradnice
        x a y
        for i = 1 : 4
            if i == 1 || i == 3
                x1 = obj.x_corners_mos(i); x2 = obj.
                    x_corners_mos(i+1);
                y1 = obj.y_corners_mos(i);
            elseif i == 2
                x1 = obj.y_corners_mos(i); x2 = obj.
                    y_corners_mos(i+1);
                y1 = obj.x_corners_mos(i);
            elseif i == 4

```



```

        x1 = obj.y_corners_mos(i); x2 = obj.
            y_corners_mos(1);
        y1 = obj.x_corners_mos(i);
    end

    % Souradnicovy rozdil dvou rohu
    dx = x2-x1;

    % Pocet bodu mezi rohy
    nd = floor(abs(dx)/obj.m);

    % Zbytkova vzdalenost mezi poslednimi
    body a rohem
    deldx = abs(nd*obj.m-abs(dx));

    % Generovani x-souradnic
    if dx > 0
        x_edg_mos(:,1) = (x1 + deldx/2) : obj
            .m : (x2-deldx/2);
    elseif dx < 0
        x_edg_mos(:,1) = (x1 - deldx/2) : (-
            obj.m) : (x2 + deldx/2);
    end

    % Souradnice y je konstantni
    y_edg_mos = ones(length(x_edg_mos), 1) .*
        y1;

    % Ulozeni souradnic do instance tridy
    if i == 1 || i == 3
        obj.x_ftpr_mos = [obj.x_ftpr_mos;
            x_edg_mos]; obj.y_ftpr_mos = [obj.
            y_ftpr_mos; y_edg_mos];
    elseif i == 2 || i == 4
        obj.y_ftpr_mos = [obj.y_ftpr_mos;
            x_edg_mos]; obj.x_ftpr_mos = [obj.
            x_ftpr_mos; y_edg_mos];
    end

    clear x_edg_mos; clear y_edg_mos;
end
end

function obj = TPS_process(obj, x_IB_moz,
    y_IB_moz, set_klic_tps)
    % Vypocet TPS transformace

```

```

% Uloženi klíče do instance třídy
obj.key_tps = set_klic_tps;

% Velikost vstupních dat
n = size(obj.x_ftpr_mos,1);
n_IB = size(x_IB_moz,1);

% Uloženi klíče do jednotlivých proměnných
  pro lepší orientaci
w_x = obj.key_tps(1:(end-3),1);
d_x = obj.key_tps((end-2):end,1);
w_y = obj.key_tps(1:(end-3),2);
d_y = obj.key_tps((end-2):end,2);

% Prochází všechny transformované body
for r = 1 : n

    sum_X = double(0);
    sum_Y = double(0);

    % Prochází všechny IB z nichž byly
      vypočteny parametry TPS
    for c = 1:n_IB

        % Vypočet vzdálenosti mezi
          transformovaným bodem a
        % všemi identickými body
        vzd = point2pointdist(obj.x_ftpr_mos(
            r),x_IB_moz(c),obj.y_ftpr_mos(r),
            y_IB_moz(c)) ;

        if vzd ~= 0

            % Vypočet sumy vzdálenosti
            r2_x = w_x(c)*(vzd^2*log(vzd));
            sum_X = sum_X + r2_x;

            r2_y = w_y(c)*(vzd^2*log(vzd));
            sum_Y = sum_Y + r2_y;
        end
    end
end

% Vypočet finálních souřadnic
  transformovaných bodů
obj.x_ftpr_jtsk(r,1) = d_x(1) + d_x(2) *
    obj.x_ftpr_mos(r) + d_x(3) * obj.
    y_ftpr_mos(r) + sum_X;

```

```

        obj.y_ftpr_jtsk(r,1) = d_y(1) + d_y(2) *
            obj.x_ftpr_mos(r) + d_y(3) * obj.
                y_ftpr_mos(r) + sum_Y;
    end
end

function obj = generateGML(obj, j, fid, sheetID)

% Ulozeni cisla mapoveho listu do instance
  tridy
obj.fpath = fid;

% Preambule
fprintf(obj.fpath, "\t<gml:featureMember>\n");
fprintf(obj.fpath, "\t\t<ogr:footprints fid="
    footprints.");
fprintf(obj.fpath, num2str(j));
fprintf(obj.fpath, ">\n");
fprintf(obj.fpath, "\t\t\t<ogr:
    geometryProperty><gml:MultiPolygon srsName
    =\"EPSG:5514\"><gml:polygonMember><gml:
    Polygon><gml:outerBoundaryIs><gml:
    LinearRing><gml:coordinates>");

n = length(obj.x_ftpr_jtsk);

% Ulozeni souradnic
for i = 1 : n
    pol = strcat(num2str(obj.x_ftpr_jtsk(i))
        , ",", num2str(obj.y_ftpr_jtsk(i)), " ");
    ;
    fprintf(obj.fpath, pol);
end

pol = strcat(num2str(obj.x_ftpr_jtsk(1)), ",",
    num2str(obj.y_ftpr_jtsk(1)));
fprintf(obj.fpath, pol);
fprintf(obj.fpath, "</gml:coordinates></gml:
    LinearRing></gml:outerBoundaryIs></gml:
    Polygon></gml:polygonMember></gml:
    MultiPolygon></ogr:geometryProperty>\n");

% Atribut name obsahujici cislo mapoveho
  listu
fprintf(obj.fpath, "\t\t\t<ogr:name>");
sID = num2str(sheetID);
fprintf(obj.fpath, sID);

```

```
fprintf(obj.fpath, "</ogr:name>\n");  
  
fprintf(obj.fpath, "\t\t</ogr:footprints>\n");  
fprintf(obj.fpath, "\t</gml:featureMember>\n")  
    ;  
    end  
end  
end
```

C Skripty použitých funkcí (neintegrovaných)

C.1 proj_trans_key.m

```
function [tr_key] = proj_trans_key(x, y, X, Y)
    % transformacni klic projektivni transformace

    syms a0 a1 a2 c1 c2 b0 b1 b2
    [a0, a1, a2, c1, c2, b0, b1, b2] = vpasolve([(a0+a1*x
        (1)+a2*y(1))/(1+c1*x(1)+c2*y(1)) == X(1),...
        (a0+a1*x(2)+a2*y(2))/(1+c1*x(2)+c2*y(2)) == X(2),...
        (a0+a1*x(3)+a2*y(3))/(1+c1*x(3)+c2*y(3)) == X(3),...
        (a0+a1*x(4)+a2*y(4))/(1+c1*x(4)+c2*y(4)) == X(4),...
        (b0+b1*x(1)+b2*y(1))/(1+c1*x(1)+c2*y(1)) == Y(1),...
        (b0+b1*x(2)+b2*y(2))/(1+c1*x(2)+c2*y(2)) == Y(2),...
        (b0+b1*x(3)+b2*y(3))/(1+c1*x(3)+c2*y(3)) == Y(3),...
        (b0+b1*x(4)+b2*y(4))/(1+c1*x(4)+c2*y(4)) == Y(4)], [a0
        , a1, a2, c1, c2, b0, b1, b2]);

    % Pretypovani symbolickych promennych na double pro
    zrychleni vypocetu
    a00 = double(a0); a11 = double(a1); a22 = double(a2);
    c11 = double(c1);
    c22 = double(c2); b00 = double(b0); b11 = double(b1);
    b22 = double(b2);

    tr_key = [a00, a11, a22, c11, c22, b00, b11, b22];
end
```

C.2 gen_grid.m

```
function [x_grid, y_grid] = gen_grid(m1, x_rohy_snim,
    y_rohy_snim)
    x_kraje = []; y_kraje = []; x_grid = []; y_grid = [];
```

```

% Vypocet pro jednotlivé strany
for i = 1 : 4

    % Vymena x a y souradnice na 2. a 4. strane
    if i == 1 || i == 3
        x1 = x_rohy_snim(i); x2 = x_rohy_snim(i+1);
        y1 = y_rohy_snim(i); y2 = y_rohy_snim(i+1);
    elseif i == 2
        x1 = y_rohy_snim(i); x2 = y_rohy_snim(i+1);
        y1 = x_rohy_snim(i); y2 = x_rohy_snim(i+1);
    elseif i == 4
        x1 = y_rohy_snim(i); x2 = y_rohy_snim(1);
        y1 = x_rohy_snim(i); y2 = x_rohy_snim(1);
    end

    % Rozdil x souradnic
    dx = x2-x1;
    nd(i,1) = floor(abs(dx)/m1);
    deldx = abs(nd(i)*m1-abs(dx));

    % Generovani bodu na okraji mapoveho listu
    if dx > 0
        x_kraje_snim(:,1) = (x1 + deldx/2) : m1 : (x2
            -deldx/2);
    elseif dx < 0
        x_kraje_snim(:,1) = (x1 - deldx/2) : (-m1) :
            (x2 + deldx/2);
    end

    % pridani prvnioho bodu
    x_kraje_snim = [x1; x_kraje_snim];

    % Vypocet parametru primky
    syms k q
    [k, q] = vpasolve([k*x1+q == y1,...
        k*x2+q == y2],[k, q]);

    % Y- souradnice kraje mapoveho listu
    y_kraje_snim = double(k*x_kraje_snim+q);

    % Ulozeni souradnic
    if i == 1 || i == 3
        x_kraje = [x_kraje; x_kraje_snim]; y_kraje =
            [y_kraje; y_kraje_snim];
    elseif i == 2 || i == 4

```

```

        y_kraje = [y_kraje; x_kraje_snim]; x_kraje =
            [x_kraje; y_kraje_snim];
    end

    n_p(i,1) = length(x_kraje_snim);

    clear y_kraje_snim; clear x_kraje_snim; clear x;
    clear y;
end

j = 1;
% Generovani site bodu z vypoctenych okraju
for r = 2 : (n_p(1))
    for s = (n_p(1)+1) : (n_p(1)+n_p(2))
        x_grid(end+1,1) = x_kraje(r);
        y_grid(end+1,1) = y_kraje(s);
    end
end
end
end

```

C.3 generate_xml.m

```

function generate_aux(id, f_path, x_source, y_source,
    x_target, y_target)

    n_b = length(x_source);

    xml_path = strcat(f_path, "aux_", num2str(id), ".tif.
        aux.xml");

    fileID = fopen(xml_path, "w");

    fprintf(fileID, "<PAMDataset>\n");
    fprintf(fileID, "\t<Metadata domain=\"xml:ESRI\" format
        =\"xml\">\n");
    fprintf(fileID, "\t\t<GeodataXform xsi:type=\"typens:
        SplineXform\" xmlns:xsi=\"http://www.w3.org/2001/
        XMLSchema-instance\" xmlns:xs=\"http://www.w3.org
        /2001/XMLSchema\" xmlns:typens=\"http://www.esri.com
        /schemas/ArcGIS/10.1\">\n");
    fprintf(fileID, "\t\t\t<SourceGCPs xsi:type=\"typens:
        ArrayOfDouble\">\n");

    for i = 1 : n_b

        fprintf(fileID, "\t\t\t\t<Double>");
    end
end

```

```

        fprintf(fileID, "%9.6f", x_source(i));
        fprintf(fileID, "</Double>\n");
        fprintf(fileID, "\t\t\t\t<Double>");
        fprintf(fileID, "%9.6f", y_source(i));
        fprintf(fileID, "</Double>\n");
    end

    fprintf(fileID, "\t\t\t\t</SourceGCPs>\n");
    fprintf(fileID, "\t\t\t\t<TargetGCPs xsi:type='typens:
        ArrayOfDouble">\n");

    for i = 1 : n_b
        fprintf(fileID, "\t\t\t\t\t<Double>");
        fprintf(fileID, "%13.6f", x_target(i));
        fprintf(fileID, "</Double>\n");
        fprintf(fileID, "\t\t\t\t\t<Double>");
        fprintf(fileID, "%13.6f", y_target(i));
        fprintf(fileID, "</Double>\n");
    end

    fprintf(fileID, "\t\t\t\t</TargetGCPs>\n");
    fprintf(fileID, "\t\t\t</GeodataXform>\n");
    fprintf(fileID, "\t</Metadata>\n");
    fprintf(fileID, "</PAMDataset>\n");
end

```

C.4 point2pointdist.m

```

function [d] = point2pointdist(xA,xB,yA,yB)
% Pocita vzdalenost mezi dvema body v rovine
    d = sqrt((xA-xB)^2+(yA-yB)^2) ;
end

```


D Souřadnice kontrolních bodů

V této příloze jsou vypsány souřadnice kontrolních bodů použitých pro zhodnocení přesnosti mapových vrstev. Souřadnice jsou uvedeny v souřadnicovém systému WGS84 (EPSG: 4326).

D.1 Souřadnice na vrstvách Mapire a VÚGTK

id	x_ref	y_ref	x_mapire	y_mapire	x_vugtk	y_vugtk
1	14.570155	50.994070	14.570500	50.995900	14.572740	50.992875
2	15.078541	50.921944	15.075700	50.924400	15.072159	50.921949
3	14.452893	50.864184	14.449600	50.864600	14.446382	50.863509
4	15.083225	50.914568	15.082900	50.914600	15.079503	50.911842
5	13.923279	50.771475	13.922700	50.770800	13.915455	50.772494
6	14.493998	50.790710	14.483200	50.792500	14.491402	50.791239
7	15.052827	50.771027	15.047500	50.771500	15.051622	50.771593
8	13.862108	50.670919	13.862700	50.670200	13.859016	50.669999
9	14.529722	50.625172	14.546100	50.623600	14.551733	50.627371
10	14.998029	50.663191	14.997900	50.663200	14.993242	50.665377
11	15.156246	50.623762	15.154700	50.625600	15.154696	50.623954
12	15.213959	50.694387	15.207100	50.692400	15.218083	50.686698
13	15.257368	50.638460	15.262400	50.636400	15.262862	50.634514
14	15.655782	50.652496	15.655600	50.652600	15.653585	50.655952
15	15.902923	50.673031	15.902300	50.672200	15.898349	50.670054
16	13.113060	50.472878	13.112100	50.479700	13.112232	50.478285
17	13.768877	50.543162	13.769400	50.543300	13.773965	50.544840
18	13.975223	50.546413	13.975700	50.545700	13.982775	50.545079
19	14.243740	50.570090	14.245500	50.566900	14.230556	50.566677
20	14.652182	50.564829	14.653400	50.566900	14.654657	50.569405

21	14.800624	50.503131	14.800100	50.503300	14.799461	50.498776
22	15.111450	50.581853	15.113200	50.579100	15.106321	50.577039
23	15.334056	50.604387	15.335100	50.603000	15.325675	50.602813
24	15.376410	50.531637	15.379200	50.531000	15.372075	50.535090
25	15.605531	50.628676	15.601700	50.628400	15.597482	50.633204
26	15.906218	50.623689	15.907700	50.623300	15.906757	50.620693
27	16.107604	50.558462	16.096600	50.560900	16.107976	50.560096
28	16.385793	50.557528	16.389100	50.561300	16.387760	50.563959
29	13.146795	50.372755	13.147700	50.375100	13.147349	50.373063
30	13.107611	50.386315	13.101200	50.382300	13.103424	50.384037
31	13.267622	50.446259	13.265600	50.447800	13.266621	50.446365
32	13.561401	50.461365	13.561700	50.461500	13.563864	50.457884
33	13.837693	50.452238	13.837500	50.452200	13.840650	50.452450
34	14.095684	50.394601	14.094100	50.394500	14.102687	50.388899
35	14.526587	50.467745	14.541700	50.467600	14.537702	50.470693
36	14.438039	48.881840	14.438400	48.881500	14.438168	48.880584
37	14.400911	48.835407	14.398700	48.836100	14.398059	48.835294
38	14.889259	50.435885	14.885900	50.436700	14.881166	50.436401
39	15.062390	50.459877	15.067900	50.452000	15.072861	50.455659
40	15.283687	50.448684	15.280300	50.448000	15.282797	50.452101
41	15.709079	50.516826	15.710800	50.518000	15.727125	50.515937
42	16.235524	50.538990	16.235900	50.539200	16.241262	50.540681
43	12.606608	50.282985	12.607100	50.283600	12.607973	50.285514
44	13.547672	50.325236	13.548500	50.325600	13.545699	50.328074
45	13.887430	50.315739	13.884000	50.315400	13.877641	50.318516
46	14.094913	50.306840	14.096200	50.310800	14.097422	50.309341
47	14.394837	50.314720	14.396500	50.312500	14.401412	50.315861
48	14.614046	50.312955	14.613800	50.316400	14.609778	50.322384
49	14.824922	50.292825	14.833000	50.294000	14.830333	50.295473
50	15.155246	50.306306	15.155000	50.306400	15.161348	50.306391
51	15.310106	50.356502	15.306700	50.349700	15.314375	50.353196
52	15.973606	50.414564	15.972700	50.414900	15.971374	50.415859
53	12.283167	50.131861	12.283700	50.131600	12.287036	50.137670
54	13.087329	50.132892	13.089300	50.131400	13.098051	50.135775
55	13.113403	50.057453	13.113000	50.056700	13.113793	50.053299
56	12.920259	50.071759	12.921300	50.072100	12.938997	50.076300

57	13.211841	50.099477	13.202800	50.103000	13.204947	50.102442
58	13.396967	50.040419	13.408100	50.028800	13.403438	50.035330
59	13.634000	50.066388	13.634400	50.066000	13.644316	50.067984
60	13.594682	50.063167	13.595700	50.063100	13.602594	50.064629
61	13.696647	50.130215	13.697500	50.129500	13.710484	50.125232
62	14.034633	50.084701	14.024100	50.092000	14.031857	50.085659
63	14.321915	50.076075	14.322000	50.077600	14.323828	50.074526
64	14.548080	50.097754	14.544600	50.100100	14.550088	50.096982
65	14.681560	50.059357	14.681500	50.061000	14.685694	50.057664
66	14.855455	50.108815	14.851700	50.111600	14.853070	50.106778
67	14.773192	50.118701	14.777500	50.119300	14.777538	50.112606
68	15.688425	50.114357	15.694000	50.117100	15.690883	50.113942
69	15.753687	50.184804	15.758400	50.184500	15.756368	50.183181
70	15.832532	50.178361	15.825900	50.181300	15.829234	50.180516
71	16.169814	50.178019	16.164800	50.174300	16.170335	50.176220
72	16.240250	50.201219	16.242800	50.201200	16.250478	50.202266
73	12.440969	49.978996	12.440200	49.979500	12.427254	49.975058
74	12.764486	49.922280	12.763300	49.924800	12.756120	49.927507
75	12.852671	49.882095	12.858100	49.881200	12.862089	49.882307
76	13.059958	49.974596	13.060000	49.974500	13.055366	49.967850
77	13.243212	49.991876	13.248300	49.989000	13.256636	49.987585
78	13.661341	49.915372	13.656400	49.909300	13.659735	49.912470
79	13.462303	49.985619	13.457300	49.986200	13.456847	49.983786
80	14.463278	49.936403	14.463500	49.937500	14.454946	49.939174
81	14.074953	49.965589	14.076500	49.965400	14.078812	49.970614
82	14.313352	50.006489	14.316400	50.005300	14.316858	50.003530
83	14.463278	49.936403	14.463500	49.937500	14.454946	49.939174
84	14.647092	49.964921	14.648600	49.966200	14.644011	49.969658
85	14.977617	50.005863	14.976500	50.006800	14.981175	50.010949
86	15.216517	50.023715	15.216800	50.023700	15.213908	50.028331
87	15.395845	50.014743	15.411500	50.024400	15.413390	50.026434
88	15.348822	49.987294	15.355400	49.984800	15.358429	49.987419
89	15.650143	50.060898	15.658100	50.057600	15.659102	50.060898
90	15.771372	50.035756	15.768900	50.037400	15.767545	50.041760
91	16.053117	50.071495	16.051000	50.069600	16.054312	50.070897
92	16.351688	50.085488	16.351400	50.085600	16.364898	50.094203

93	16.427942	50.040810	16.423800	50.036000	16.427168	50.044630
94	16.759343	50.085048	16.756600	50.082300	16.758873	50.082774
95	12.852745	49.771577	12.848800	49.771500	12.851660	49.773237
96	12.966842	49.797767	12.956500	49.792000	12.964962	49.792690
97	13.107642	49.838435	13.109800	49.837100	13.099854	49.841375
98	13.288779	49.890427	13.288500	49.890500	13.286031	49.892173
99	13.864179	49.832578	13.843200	49.832100	13.847972	49.835745
100	14.034537	49.851745	14.035900	49.854600	14.035173	49.856847
101	14.389027	49.879019	14.387500	49.880900	14.388595	49.873693
102	14.632223	49.862483	14.634100	49.862100	14.627006	49.859110
103	14.730336	49.882871	14.739700	49.883400	14.734765	49.879946
104	14.897116	49.877047	14.897000	49.876900	14.908020	49.864903
105	14.798894	49.868321	14.798700	49.868500	14.794114	49.862333
106	15.224098	49.910956	15.224500	49.910900	15.216184	49.911277
107	15.110935	49.904233	15.106700	49.915400	15.106077	49.906769
108	15.324505	49.906722	15.323000	49.906100	15.316984	49.905467
109	15.430519	49.854474	15.427800	49.859700	15.428943	49.857674
110	15.614642	49.956133	15.621900	49.941600	15.620891	49.943758
111	16.034922	49.972337	16.042200	49.970200	16.034631	49.969640
112	15.912507	49.924170	15.905400	49.924800	15.899785	49.929049
113	16.311047	49.997777	16.301100	49.999400	16.292626	49.995773
114	16.385707	49.969950	16.382100	49.968500	16.366558	49.970668
115	16.612729	49.912067	16.612400	49.912800	16.610108	49.909282
116	12.599682	49.666297	12.608700	49.663500	12.612715	49.664768
117	12.676905	49.674408	12.688000	49.670600	12.683689	49.672254
118	13.087879	49.704533	13.090900	49.707200	13.087205	49.706206
119	13.648499	49.704362	13.684700	49.704400	13.659111	49.703877
120	14.169176	49.751014	14.169700	49.751900	14.165419	49.745114
121	14.122044	49.721342	14.121900	49.721300	14.110628	49.713846
122	14.688455	49.781956	14.688300	49.781400	14.689549	49.781899
123	14.764228	49.743865	14.768300	49.739500	14.767965	49.739781
124	15.471739	49.809974	15.456800	49.814400	15.455863	49.813918
125	16.039424	49.831910	16.041400	49.834800	16.040170	49.841532
126	16.499801	49.850957	16.501500	49.851000	16.498923	49.851111
127	12.909048	49.589659	12.915500	49.586200	12.914819	49.585402
128	13.098560	49.605633	13.089400	49.603300	13.089732	49.603910

129	13.109542	49.639578	13.105700	49.638600	13.111069	49.637359
130	13.528748	49.630038	13.521700	49.626300	13.535896	49.627504
131	14.169379	49.656607	14.167300	49.651700	14.169138	49.650360
132	14.808267	49.637554	14.801200	49.639800	14.799524	49.644383
133	15.074953	49.683533	15.087900	49.684600	15.082498	49.687536
134	15.782603	49.719153	15.784200	49.719300	15.774220	49.712660
135	15.875726	49.680516	15.866800	49.674100	15.872054	49.670668
136	13.197800	49.503245	13.194400	49.501900	13.189116	49.505164
137	13.683779	49.540513	13.673700	49.548600	13.680157	49.548882
138	13.604060	49.519354	13.586600	49.521300	13.588080	49.519179
139	14.062931	49.544356	14.065500	49.543300	14.064585	49.547760
140	14.226826	49.492759	14.220500	49.494200	14.233619	49.503956
141	14.799644	49.537087	14.795400	49.540300	14.808522	49.540108
142	15.248711	49.559518	15.242800	49.560200	15.243634	49.559704
143	15.317659	49.553093	15.311600	49.548900	15.313077	49.547434
144	15.674698	49.576223	15.675300	49.569000	15.670773	49.568528
145	15.936516	49.583697	15.937200	49.583800	15.944482	49.580716
146	16.517169	49.646511	16.523000	49.654600	16.521113	49.656139
147	13.110324	49.366518	13.109600	49.366100	13.112762	49.366090
148	13.480600	49.404769	13.478300	49.408000	13.466313	49.413952
149	14.127283	49.440289	14.130600	49.434300	14.136327	49.444542
150	14.908698	49.464593	14.908100	49.465900	14.908168	49.468409
151	15.478646	49.475732	15.479000	49.476300	15.475332	49.478685
152	13.438857	49.300664	13.439900	49.295100	13.437235	49.298560
153	13.912668	49.288335	13.908000	49.296400	13.906879	49.295102
154	14.450824	49.374434	14.443000	49.371700	14.433200	49.369966
155	14.868868	49.395922	14.884000	49.400100	14.884514	49.396201
156	13.442087	49.189933	13.437800	49.189400	13.447932	49.191930
157	13.860556	49.189323	13.857200	49.184900	13.851849	49.184993
158	14.446109	49.193219	14.444600	49.201100	14.447380	49.199131
159	14.855881	49.185366	14.855200	49.184600	14.854504	49.178901
160	13.634379	49.073286	13.634100	49.066900	13.632760	49.072336
161	14.178283	49.051243	14.180600	49.052100	14.181734	49.050833
162	15.192299	49.151592	15.193600	49.151400	15.197688	49.152664
163	15.123187	49.130650	15.126500	49.131100	15.125715	49.132410
164	13.920211	49.025473	13.918100	49.024600	13.914881	49.025292

165	14.475056	48.973816	14.474600	48.973000	14.470646	48.970648
166	13.709380	48.920815	13.715900	48.923500	13.713503	48.919194
167	14.272132	48.918799	14.276500	48.913400	14.274547	48.912036
168	14.600228	48.880380	14.600700	48.881800	14.599408	48.880652
169	14.642311	48.898602	14.644100	48.900000	14.641396	48.898237
170	14.764033	48.880726	14.763900	48.879500	14.760289	48.878179
171	14.029414	48.793431	14.038300	48.792400	14.033481	48.792807
172	14.292962	48.721871	14.288500	48.721200	14.293103	48.723989
173	14.518990	48.739328	14.514800	48.740300	14.515958	48.740338
174	14.681077	48.794968	14.680200	48.794200	14.678563	48.792647
175	14.797586	48.789123	14.795200	48.787400	14.797691	48.786934
176	14.504438	48.615406	14.510300	48.614800	14.498580	48.620437
177	13.462206	50.198223	13.461300	50.197700	13.462309	50.201010
178	13.884832	50.224574	13.882600	50.226000	13.884008	50.222087
179	14.041771	50.206694	14.031000	50.208500	14.028260	50.206986
180	14.222434	50.196567	14.225200	50.194400	14.217374	50.201356
181	14.557596	50.192776	14.552800	50.193100	14.560503	50.190503
182	14.834248	50.202419	14.834100	50.202200	14.832708	50.202783
183	15.492657	50.283790	15.494100	50.283600	15.490735	50.286781
184	15.747345	50.275851	15.745600	50.275500	15.741231	50.272454
185	15.864977	50.307625	15.867100	50.310000	15.857185	50.303335
186	16.163090	50.293149	16.163100	50.293100	16.174401	50.293062
187	14.358634	49.668355	14.358700	49.668200	14.375980	49.665703
188	14.577411	49.632843	14.564200	49.627800	14.578712	49.628943

D.2 Souřadnice na vrstvách ČVUT a TPS

id	x_ref	y_ref	x_cvut	y_cvut	x_tps	y_tps
1	14.570155	50.994070	14.570139	50.993149	14.570525	50.994464
2	15.078541	50.921944	15.076087	50.922260	15.076134	50.921316
3	14.452893	50.864184	14.453385	50.863864	14.452679	50.863095
4	15.083225	50.914568	15.082044	50.914147	15.081032	50.913615
5	13.923279	50.771475	13.923214	50.773154	13.921538	50.772190
6	14.493998	50.790710	14.492125	50.789143	14.484971	50.788518
7	15.052827	50.771027	15.049021	50.771689	15.051932	50.770907

8	13.862108	50.670919	13.862520	50.669705	13.860984	50.670740
9	14.529722	50.625172	14.544619	50.624147	14.533376	50.625870
10	14.998029	50.663191	14.997969	50.663320	14.998057	50.663356
11	15.156246	50.623762	15.155705	50.624246	15.158038	50.622272
12	15.213959	50.694387	15.218433	50.687197	15.211808	50.700547
13	15.257368	50.638460	15.264276	50.633181	15.255591	50.638157
14	15.655782	50.652496	15.656520	50.653962	15.654940	50.651927
15	15.902923	50.673031	15.900657	50.671062	15.900725	50.671917
16	13.113060	50.472878	13.113485	50.475245	13.115705	50.472064
17	13.768877	50.543162	13.771136	50.545537	13.769649	50.542829
18	13.975223	50.546413	13.976468	50.546184	13.975087	50.545744
19	14.243740	50.570090	14.240141	50.568603	14.244843	50.567138
20	14.652182	50.564829	14.642564	50.568492	14.648984	50.567733
21	14.800624	50.503131	14.800510	50.501741	14.802766	50.503314
22	15.111450	50.581853	15.109239	50.578619	15.111428	50.581875
23	15.334056	50.604387	15.329701	50.600592	15.334853	50.603305
24	15.376410	50.531637	15.370205	50.530958	15.377632	50.531501
25	15.605531	50.628676	15.601798	50.630958	15.604294	50.628368
26	15.906218	50.623689	15.908421	50.624744	15.906420	50.624222
27	16.107604	50.558462	16.100339	50.563108	16.104043	50.564549
28	16.385793	50.557528	16.384444	50.563415	16.382647	50.563532
29	13.146795	50.372755	13.146963	50.374335	13.147966	50.376448
30	13.107611	50.386315	13.103619	50.384058	13.108748	50.386830
31	13.267622	50.446259	13.262732	50.446762	13.271497	50.449557
32	13.561401	50.461365	13.560351	50.459940	13.558095	50.460652
33	13.837693	50.452238	13.836449	50.452076	13.837071	50.451740
34	14.095684	50.394601	14.094506	50.390739	14.094618	50.394672
35	14.526587	50.467745	14.549812	50.470143	14.526476	50.468050
36	14.438039	48.881840	14.440083	48.883286	14.441781	48.883281
37	14.400911	48.835407	14.398677	48.836062	14.399497	48.837050
38	14.889259	50.435885	14.881025	50.437756	14.888628	50.435875
39	15.062390	50.459877	15.069892	50.454829	15.059298	50.455006
40	15.283687	50.448684	15.276883	50.450028	15.285185	50.448700
41	15.709079	50.516826	15.707788	50.516164	15.709068	50.514864
42	16.235524	50.538990	16.233373	50.541590	16.236753	50.542737
43	12.606608	50.282985	12.606558	50.284380	12.607088	50.283214

44	13.547672	50.325236	13.549411	50.326483	13.549185	50.325772
45	13.887430	50.315739	13.887287	50.315862	13.886753	50.315286
46	14.094913	50.306840	14.099279	50.304946	14.093184	50.307039
47	14.394837	50.314720	14.396288	50.313836	14.394429	50.313606
48	14.614046	50.312955	14.609629	50.320056	14.613649	50.314209
49	14.824922	50.292825	14.831718	50.292899	14.825220	50.293448
50	15.155246	50.306306	15.156545	50.304314	15.155787	50.307378
51	15.310106	50.356502	15.306923	50.351698	15.308913	50.352954
52	15.973606	50.414564	15.974994	50.413821	15.973535	50.414690
53	12.283167	50.131861	12.282715	50.130582	12.283310	50.131945
54	13.087329	50.132892	13.092724	50.132033	13.092668	50.129586
55	13.113403	50.057453	13.109271	50.058157	13.113415	50.056761
56	12.920259	50.071759	12.928968	50.072828	12.920855	50.071795
57	13.211841	50.099477	13.199947	50.101600	13.204451	50.099818
58	13.396967	50.040419	13.404963	50.037284	13.402537	50.037367
59	13.634000	50.066388	13.634165	50.068111	13.634392	50.066517
60	13.594682	50.063167	13.595415	50.065276	13.595851	50.063081
61	13.696647	50.130215	13.699642	50.126672	13.696479	50.130860
62	14.034633	50.084701	14.026481	50.088200	14.030845	50.086572
63	14.321915	50.076075	14.321387	50.077346	14.323790	50.075995
64	14.548080	50.097754	14.546765	50.099144	14.547439	50.098322
65	14.681560	50.059357	14.680388	50.060372	14.680998	50.059729
66	14.855455	50.108815	14.853893	50.109215	14.855033	50.109304
67	14.773192	50.118701	14.773192	50.117837	14.770947	50.119371
68	15.688425	50.114357	15.685974	50.111807	15.680149	50.118686
69	15.753687	50.184804	15.753755	50.185364	15.753656	50.181841
70	15.832532	50.178361	15.824927	50.182116	15.832305	50.178268
71	16.169814	50.178019	16.162282	50.173818	16.167112	50.175267
72	16.240250	50.201219	16.240133	50.200637	16.239104	50.200745
73	12.440969	49.978996	12.435426	49.979809	12.441225	49.979363
74	12.764486	49.922280	12.756413	49.927155	12.760430	49.924416
75	12.852671	49.882095	12.868347	49.879303	12.870647	49.882697
76	13.059958	49.974596	13.056174	49.971579	13.062512	49.970295
77	13.243212	49.991876	13.252817	49.992781	13.248527	49.991411
78	13.661341	49.915372	13.665297	49.915202	13.664689	49.911418
79	13.462303	49.985619	13.459955	49.985621	13.462988	49.985326

80	14.463278	49.936403	14.461088	49.937470	14.461761	49.936087
81	14.074953	49.965589	14.077409	49.966271	14.075798	49.966599
82	14.313352	50.006489	14.313608	50.002410	14.314837	50.006335
83	14.463278	49.936403	14.461088	49.937470	14.461761	49.936087
84	14.647092	49.964921	14.647163	49.964928	14.647381	49.964508
85	14.977617	50.005863	14.978533	50.007114	14.976791	50.007157
86	15.216517	50.023715	15.214968	50.022299	15.216952	50.022202
87	15.395845	50.014743	15.404005	50.025119	15.394459	50.017410
88	15.348822	49.987294	15.355479	49.988247	15.347667	49.985165
89	15.650143	50.060898	15.653410	50.057549	15.660267	50.057815
90	15.771372	50.035756	15.766144	50.040218	15.772062	50.038063
91	16.053117	50.071495	16.054225	50.069664	16.054483	50.068820
92	16.351688	50.085488	16.367761	50.091292	16.358965	50.092252
93	16.427942	50.040810	16.431392	50.041187	16.428476	50.036725
94	16.759343	50.085048	16.753229	50.085208	16.758077	50.086169
95	12.852745	49.771577	12.851825	49.773205	12.850726	49.772399
96	12.966842	49.797767	12.961066	49.793894	12.959713	49.793000
97	13.107642	49.838435	13.107097	49.839179	13.108471	49.837457
98	13.288779	49.890427	13.288137	49.889539	13.286841	49.892051
99	13.864179	49.832578	13.854625	49.833313	13.852412	49.835258
100	14.034537	49.851745	14.037212	49.853839	14.035171	49.850579
101	14.389027	49.879019	14.392470	49.874272	14.387682	49.879095
102	14.632223	49.862483	14.634797	49.858211	14.634179	49.859821
103	14.730336	49.882871	14.738427	49.879111	14.739519	49.880723
104	14.897116	49.877047	14.902774	49.870333	14.901516	49.873990
105	14.798894	49.868321	14.794638	49.866130	14.800355	49.868647
106	15.224098	49.910956	15.225373	49.909860	15.224486	49.910916
107	15.110935	49.904233	15.107274	49.907220	15.105840	49.904207
108	15.324505	49.906722	15.323670	49.905909	15.325259	49.906061
109	15.430519	49.854474	15.431227	49.857489	15.432070	49.854604
110	15.614642	49.956133	15.624509	49.944862	15.617110	49.946240
111	16.034922	49.972337	16.036823	49.972509	16.040301	49.975642
112	15.912507	49.924170	15.901513	49.926968	15.905096	49.925323
113	16.311047	49.997777	16.307923	50.000202	16.305848	49.998288
114	16.385707	49.969950	16.377685	49.972423	16.384889	49.967747
115	16.612729	49.912067	16.615659	49.911385	16.612498	49.912271

116	12.599682	49.666297	12.604765	49.663299	12.600484	49.664237
117	12.676905	49.674408	12.686089	49.671475	12.674916	49.673928
118	13.087879	49.704533	13.085313	49.707641	13.082291	49.708074
119	13.648499	49.704362	13.651557	49.701893	13.646238	49.700338
120	14.169176	49.751014	14.165944	49.747305	14.165511	49.751149
121	14.122044	49.721342	14.114896	49.717662	14.123874	49.721192
122	14.688455	49.781956	14.687858	49.785622	14.689758	49.780947
123	14.764228	49.743865	14.767726	49.742474	14.763559	49.745179
124	15.471739	49.809974	15.458349	49.812277	15.467287	49.809117
125	16.039424	49.831910	16.046099	49.833853	16.040231	49.831428
126	16.499801	49.850957	16.495437	49.851516	16.499712	49.850611
127	12.909048	49.589659	12.912800	49.586039	12.907704	49.586855
128	13.098560	49.605633	13.087032	49.605067	13.093555	49.605641
129	13.109542	49.639578	13.108312	49.639214	13.110657	49.638542
130	13.528748	49.630038	13.528012	49.627514	13.528412	49.628578
131	14.169379	49.656607	14.165458	49.648822	14.168549	49.653415
132	14.808267	49.637554	14.797890	49.636864	14.804752	49.640269
133	15.074953	49.683533	15.088438	49.685035	15.079165	49.688426
134	15.782603	49.719153	15.777899	49.718309	15.781525	49.718114
135	15.875726	49.680516	15.871849	49.678824	15.873322	49.680106
136	13.197800	49.503245	13.190462	49.503564	13.195812	49.506573
137	13.683779	49.540513	13.680995	49.547330	13.686058	49.542319
138	13.604060	49.519354	13.586270	49.518279	13.598588	49.518773
139	14.062931	49.544356	14.057268	49.544762	14.061900	49.545321
140	14.226826	49.492759	14.231620	49.496430	14.224582	49.492272
141	14.799644	49.537087	14.800880	49.537831	14.798643	49.540571
142	15.248711	49.559518	15.245331	49.561449	15.245975	49.559389
143	15.317659	49.553093	15.313761	49.552369	15.304099	49.555153
144	15.674698	49.576223	15.670206	49.564188	15.671940	49.575310
145	15.936516	49.583697	15.925533	49.582644	15.944045	49.580321
146	16.517169	49.646511	16.516572	49.646992	16.515363	49.645413
147	13.110324	49.366518	13.111037	49.365830	13.112112	49.368005
148	13.480600	49.404769	13.470940	49.414691	13.475100	49.407847
149	14.127283	49.440289	14.139363	49.442893	14.127532	49.438426
150	14.908698	49.464593	14.905452	49.469275	14.908392	49.464723
151	15.478646	49.475732	15.471598	49.478113	15.468004	49.473728

152	13.438857	49.300664	13.432313	49.298432	13.435502	49.295845
153	13.912668	49.288335	13.906822	49.295951	13.911945	49.291776
154	14.450824	49.374434	14.442196	49.377804	14.444943	49.377297
155	14.868868	49.395922	14.884472	49.396391	14.881504	49.399527
156	13.442087	49.189933	13.439631	49.191462	13.450521	49.193384
157	13.860556	49.189323	13.853467	49.184495	13.859899	49.190558
158	14.446109	49.193219	14.442700	49.196169	14.442180	49.199921
159	14.855881	49.185366	14.861055	49.183178	14.855236	49.184869
160	13.634379	49.073286	13.634411	49.073560	13.637087	49.074016
161	14.178283	49.051243	14.182121	49.049831	14.177731	49.049430
162	15.192299	49.151592	15.192375	49.151935	15.192419	49.151255
163	15.123187	49.130650	15.127385	49.130755	15.124082	49.129769
164	13.920211	49.025473	13.919042	49.026179	13.919881	49.025657
165	14.475056	48.973816	14.472384	48.972297	14.475532	48.973730
166	13.709380	48.920815	13.709389	48.920668	13.710362	48.919402
167	14.272132	48.918799	14.267484	48.918193	14.275602	48.918555
168	14.600228	48.880380	14.601649	48.879659	14.600637	48.880702
169	14.642311	48.898602	14.643624	48.897813	14.643946	48.898662
170	14.764033	48.880726	14.765410	48.879627	14.763534	48.878120
171	14.029414	48.793431	14.032561	48.793363	14.028694	48.793198
172	14.292962	48.721871	14.286460	48.723923	14.290427	48.724200
173	14.518990	48.739328	14.516899	48.740743	14.517899	48.739697
174	14.681077	48.794968	14.678699	48.794995	14.680566	48.793818
175	14.797586	48.789123	14.798124	48.788708	14.794961	48.789852
176	14.504438	48.615406	14.503752	48.616986	14.504155	48.614672
177	13.462206	50.198223	13.463420	50.198503	13.462525	50.198334
178	13.884832	50.224574	13.891064	50.223300	13.887696	50.224929
179	14.041771	50.206694	14.031157	50.206428	14.036907	50.206107
180	14.222434	50.196567	14.221571	50.196394	14.221386	50.197791
181	14.557596	50.192776	14.555211	50.192738	14.554700	50.192262
182	14.834248	50.202419	14.834226	50.205643	14.833357	50.202500
183	15.492657	50.283790	15.495966	50.287579	15.492035	50.282047
184	15.747345	50.275851	15.745986	50.276096	15.747206	50.274988
185	15.864977	50.307625	15.864414	50.305568	15.865581	50.307326
186	16.163090	50.293149	16.170853	50.292312	16.163796	50.291090
187	14.358634	49.668355	14.364275	49.661981	14.363002	49.662318

188 14.577411 49.632843 14.570220 49.627116 14.581233 49.627488