

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra matematiky

Diplomová práce

Přesné řešení transformace souřadnicových referenčních systémů pomocí PostGIS

Prohlášení

Předkládám tuto diplomovou práci jako součást procesu dokončení studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že tato diplomová práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně. Všechny zdroje, které jsem při vypracování používal nebo z nich čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury, která je součástí této práce.

V Plzni dne 29. 5. 2013

.....

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu mojí diplomové práce Ing. Janu Ježkovi PhD. za poskytnuté rady, věcné připomínky a trpělivou pomoc při zpracování.

Dále bych rád poděkoval všem svým kolegům z řad vyučujících i studentů, především Bc. Ondřeji Havlíčkovi za možnost konzultace postupů během celého studia.

Český abstrakt

Diplomová práce je zaměřena realizaci výpočtu přesné transformace mezi souřadnicovými referenčními systémy S-JTSK a ETRS89 a využití získaných transformačních koeficientů pro přesné transformace v prostředí GIS. Přesná transformace je vypočtena na základě metody gridu, kdy je využito gridu pro metodu NTv2.

V práci je dále celkově shrnuta problematika souřadnicových systémů a transformací. Realizace výpočtu přesné transformace je uskutečněna pomocí databázového software PostgreSQL s nadstavbou pro prostorová data PostGIS. Pro maticové výpočty je využito propojení databáze se statistickou knihovnou R. Získané výsledky vypočtené transformace jsou testovány na sedmi lokálních územích v ČR, kdy výsledky testů potvrdily tzv. „geodetickou přesnost“ transformace. Vypočtený transformační grid je možné využít buď pro GIS software, který využívá prostředí knihovny PROJ.4, nebo v prostředí ArcGIS.

Klíčová slova

Transformace, NTv2, grid, Systém jednotné sítě trigonometrické a katastrální (S-JTSK), Evropský terestrický referenční systém 1989 (ETRS89), PostGIS, ArcGIS, GDAL, geografický informační systém (GIS), thin plate spline (TPS).

English Abstract

The main goal of the Master thesis is to realize a precise transformation between the S-JTSK coordinate system and the ETRS89 coordinate system. Then there is possible to use the calculated key of transformation for a precise transformation in a GIS software. The calculation of precise transformation is realized on grid-based method NTv2.

There is a summary of coordinate reference systems and transformation in the Master thesis. The calculation of transformation is realized using relational database management system PostgreSQL and its spatial extender PostGIS. There is used a statistical library R which was used as an extender for PostgreSQL for solving matrices. Achieved results of transformation are tested at seven local areas in the Czech Republic and they proved the position accuracy of transformation in an order of centimetres. The calculated transformation grid is possible to use either in a GIS software using PROJ.4 library or in an ArcGIS environment.

Key words

Transformation, NTv2, grid, Datum of Uniform Trigonometric Cadastral Network (S-JTSK), European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89), PostGIS, ArcGIS, GDAL, geographical information system (GIS), thin plate spline (TPS).

Obsah

Český abstrakt	4
English Abstract	5
Seznam grafických příloh	8
Seznam tabulek	9
Seznam zkratk	11
Úvod	12
1 Transformace v GIS	14
1.1 Vysvětlení pojmů	14
1.1.1 Pojmy vztahené k souřadnicovým systémům	14
1.1.2 Pojmy vztahené ke GIS software	15
1.2 Podobnostní transformace ve 3D	16
1.2.1 Tříprvková transformace	16
1.2.2 Sedmiprvková transformace	16
1.2.3 Moloděnského transformace	17
1.3 Transformace pomocí gridu	18
1.3.1 NADCON	19
1.3.2 NTV2	20
1.4 Způsoby výpočtu transformačního gridu	22
1.4.1 Metoda Thin Plate Spline	22
1.4.2 Metoda Inverse Distance Weighted	24

2	Historie a vývoj S-JTSK, Bpv a ETRS89	25
2.1	Historie S-JTSK	25
2.1.1	Historie budování trigonometrické sítě	25
2.1.2	Historie Křovákova zobrazení	26
2.2	Současný vývoj S-JTSK (vznik S-JTSK/05)	27
2.3	Výškový systém baltský - po vyrovnání	29
2.3.1	Řešení výškových systémů pro práci v GIS	29
2.4	Stručná historie ETRS89	30
2.5	Nová realizace ETRS89 v ČR	31
3	Odvození transformačních koeficientů pro transformaci metodou NTv2 mezi ETRS89 a S-JTSK	33
3.1	Software použitý pro výpočet a správu dat	34
3.1.1	Popis databázového systému PostgreSQL	34
3.1.2	Popis nadstavby pro prostorová data PostGIS	34
3.1.3	Popis statistického jazyka R	35
3.1.4	Popis knihovny GDAL	36
3.2	Popis výpočtu transformačních koeficientů	36
3.2.1	Vstupní data a jejich import do databáze	36
3.2.2	Interpolace vypočtených odchylek a export gridu	39
3.3	Testování přesnosti	40
3.3.1	Testování míry ztotožnění identických bodů	41
3.3.2	Test vynecháním bodu pro výpočet gridu	44
3.3.3	Porovnání transformace metodou gridu s transformací realizovanou ČÚZK	46
4	Implementace vytvořeného řešení do stávajících GIS	51
4.1	Implementace řešení pro prostředí ArcGIS	51
4.2	Implementace řešení pro prostředí knihovny PROJ.4	52
	Závěr	54
	Literatura	61

Seznam grafických příloh

1.1	Transformace pomocí gridu, viz [Jež09]	18
3.1	Rozložení bodů výběrové údržby	38
3.2	Odchytky po 7-prvkové transformaci	42
3.3	Přehledka oblastí zvolených pro testování	43
3.4	Rozložení četnosti odchylek míry ztotožnění identických bodů pro oblast č.1	45
3.5	Rozložení četnosti odchylek pro test vynecháním bodu z výpočtu pro oblast č.1	47
3.6	Rozložení četnosti odchylek pro test transformace gridem a postupem ČÚZK pro oblast č.1	49
4.1	Vytvoření uživatelem definované transformace v prostředí ArcGIS . . .	52
4.2	Ukázka tabulky spatial_ref_sys	53

Seznam tabulek

2.1	Parametry Besselova elipsoidu	27
2.2	Parametry elipsoidu GRS80	31
3.1	Míra ztotožnění identických bodů podle metody interpolace	39
3.2	Parametry testovaných oblastí	41
3.3	Míra ztotožnění identických bodů testovaných oblastí	44
3.4	Četnost bodů pro intervaly odchylek míry ztotožnění identických bodů v oblasti č.1	45
3.5	Míra ztotožnění na základě vynechání bodu pro testované oblasti . . .	46
3.6	Četnost bodů pro intervaly odchylek pro test vynecháním bodu z výpočtu v oblasti č.1	47
3.7	Míra ztotožnění na základě porovnání transformace pomocí gridu a trans- formace realizovanou ČÚZK pro zvolené oblasti	48
3.8	Četnost bodů pro intervaly odchylek pro test transformace gridem a po- stupem ČÚZK v oblasti č.1	49

Seznam zkratek

BPV.....	Výškový systém baltský - po vyrovnání
ČÚZK.....	Český úřad zeměměřický a katastrální
CZEPOS.....	Síť permanentních stanic GNSS České republiky
DATAZ.....	Databáze trigonometrických azhušťovacích bodů
EPSG.....	European Petroleum Survey Group
ETRF2000...	European Terrestrial Reference Frame 2000
ETRS89.....	European Terrestrial Reference System 1989
GDAL.....	Geospatial Data Abstraction Library
GIS.....	Geografický informační systém
GNSS.....	Global Navigation Satellite System
GRS80.....	Geodetic Reference System 1980
IDW.....	Inverse distance weighted - Interpolační algoritmus
NADCON.....	North American Datum Convension
NTv2.....	National Transformation version 2
PL/pgSQL...	SQL Procedural Language - Procedurální jazyk pro databázi PostgreSQL
PL/R.....	R Procedural Language - Procedurální jazyk pro databázi PostgreSQL

S-JTSK..... Systém jednotné sítě trigonometrické a katastrální
SQL Structured Query Language - Standardizovaný dotazovací jazyk
TPS Thin Plate Spline - Interpolační algoritmus
VÚGTK..... Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický
WGS84..... World Geodetic System 1984

Úvod

Pro určení polohy objektu na Zemi je třeba znát jeho souřadnice. Jelikož jsou však samotné souřadnice pouhá čísla vyjadřující hodnotu, musí být definován souřadnicový systém, ke kterému jsou souřadnice vztaženy. Na světě však existuje značné množství souřadnicových systémů, proto je nutné provádět transformace, aby bylo možné převést souřadnice z jednoho systému do druhého. Existují také různé transformační metody, které poskytují různou přesnost transformace. Z tohoto důvodu je důležité znát oba souřadnicové systémy, mezi kterými se transformace provádí a na základě této znalosti je poté možné zvolit transformační metodu, pomocí které dostaneme transformované souřadnice s dostatečnou přesností.

Cílem práce je navrhnout vhodné technické řešení, které umožní provádět přesnou transformaci souřadnicových referenčních systémů tak, aby řešení bylo možné jednoduše nasadit v současných GIS. Správa vstupních dat a metoda výpočtu transformace je realizována pomocí databázového software PostgreSQL a její prostorové nadstavby PostGIS.

Z důvodu přechodu na novou realizaci systému ETRS89 na území ČR došlo ke změně geocentrických souřadnic bodů, které měly tyto souřadnice určeny, viz 2.5. Motivací pro tuto práci bylo využití nově určených souřadnic k výpočtu nového transformačního gridu. Jako inspirace sloužila disertační práce Ing. Jana Ježka, PhD., kde byla tato problematika již řešena. Na rozdíl od jeho práce je pro výpočet transformačního gridu využito větší množství identických bodů (téměř 41 tis.) a celá realizace výpočtu je provedena pomocí databázového software PostgreSQL a její prostorové nadstavby PostGIS. Výhody tohoto přístupu budou popsány dále.

První kapitola práce nejprve vysvětluje základní pojmy, které jsou používány v průběhu celé práce, následně pak popisuje obecně transformační metody, které se používají pro převod mezi souřadnicovými systémy a to jak podobnostní transformace ve 3D, tak

transformace na bázi gridu. Jsou zde také popsány metody pro interpolaci hodnot gridu.

Druhá kapitola je zaměřena na popis souřadnicových referenčních systémů S-JTSK a ETRS89 a výškového systému Bpv, pro které je počítán transformační grid. Je zde zmíněn jejich vznik a vývoj a také účely, pro které jsou dnes tyto systémy využívány. Důraz je hlavně kladen na popis změn, ke kterým docházelo v posledních letech.

Třetí kapitola se zabývá odvozením transformačních koeficientů mezi S-JTSK a ETRS89. Nejprve jde zde uveden software, který byl pro realizaci výpočtu použit. Jedná se o databázový software PostgreSQL s nadstavbou pro práci s prostorovými daty PostGIS. Pro maticové operace v databázi bylo využito statistického jazyka R a pro export gridu z databáze bylo využito utility GDAL. Uvedeny jsou také výhody, které tento software poskytuje pro naše řešení. Kapitola dále obsahuje popis celého výpočetního postupu od práce se vstupními daty, přes interpolaci hodnot gridu, až po export gridu z databáze. Na závěr kapitola také obsahuje testování a hodnocení přesnosti vypočtené transformace, kdy je cílem ověřit, že dosahuje přesnosti v řádu cm („geodetická přesnost“). Testování se provádí na základě porovnání transformační metody s již existujícím řešením, kdy je transformace mezi S-JTSK a ETRS89 prováděna podle oficiálního předpisu ČÚZK, který je k dispozici pro výpočty prováděné hlavně pro geodetické účely. Závěrem jsou zde shrnuty výhody a nevýhody obou přístupů, jak od ČÚZK, tak přístupu popisovaného touto prací.

Poslední čtvrtá kapitola se zabývá implementací navrženého transformačního řešení v dostupných GIS produktech, kdy je popsáno jak vypočtený grid implementovat do prostředí ArcGIS a do produktů, které využívají prostředí knihovny pro transformace souřadnic PROJ.4.

Kapitola 1

Transformace v GIS

Tato kapitola popisuje obecně problematiku transformací. Nejprve vysvětluje jednotlivé pojmy. V této části jsou také stručně zmíněny GIS produkty, pro které bude možné využít transformaci realizovanou v této práci. Dále pak kapitola obsahuje transformační metody, které se nejčastěji vyskytují v GIS. Tyto metody jsou rozděleny na podobnostní transformace ve 3D a transformace na bázi gridu. Na závěr jsou uvedeny postupy, kterými lze provést výpočet hodnot transformačního gridu z identických bodů.

1.1 Vysvětlení pojmů

Pro lepší přehlednost jsou v této části uvedeny pojmy, které budou používány v průběhu celé práce. Výběr pojmů v 1.1.1 byl proveden na základě inspirace v [Jež09]. Pro definici pojmů bylo převážně využito [ČS11], jelikož jsou některé pojmy většinu původně přebrány z angličtiny, je u nich uveden také anglický ekvivalent. Pro tuto práci bylo snahou vypočítat transformační grid pro použití pro produkt firmy ESRI ArcGIS a pro GIS produkty, které využívají pro operace se souřadnicovými systémy prostředí knihovny System Projection (PROJ.4). Oba produkty jsou stručně popsány v 1.1.2.

1.1.1 Pojmy vztahené k souřadnicovým systémům

- *Souřadnicový systém (coordinate system)* je chápán jako množina matematických pravidel pro specifikování způsobu, jakým jsou souřadnice přiřazovány k bodům.
- *Souřadnicový referenční systém (coordinate reference system)* je chápán jako souřadnicový systém vztahený k reálnému světu datumem.

- *Geodetické datum (geodetic datum)* je chápáno jako datum popisující vztah souřadnicového systému k Zemi (většinou zahrnuje definici elipsoidu).
- *Souřadnicový systém zobrazení (projected coordinate reference system)* je chápán jako dvourozměrný souřadnicový systém, vzešlý z kartografického zobrazení.
- *Souřadnicová operace (coordinate operation)* je chápána jako změna souřadnic, založená na jednoznačném vztahu jednoho souřadnicového referenčního systému ke druhému. Dva typy souřadnicových operací jsou následující.
 - *Konverze (převod) souřadnic (coordinate conversion)* je chápána jako souřadnicová operace, v níž jsou oba souřadnicové referenční systémy založeny na stejném datumu. Například převod zeměpisných souřadnic na pravoúhlé.
 - *Transformace souřadnic (coordinate transformation)* je chápána jako změna souřadnic z jednoho souřadnicového referenčního systému do jiného, založeného na odlišném datumu, a to prostřednictvím jednoznačného vztahu. Například z ETRS89 do S-JTSK.

1.1.2 Pojmy vztažené ke GIS software

Databáze EPSG je podle [Eps] databáze geodetických parametrů využitelných pro:

- Jednoznačnou identifikaci souřadnicového systému.
- Definování transformací a konverzí souřadnic.

K distribuci je poskytnuta buď celá databáze, nebo je možné si stáhnout SQL skripty pro databáze MySQL, Oracle a PostgreSQL. Databáze je v současné době ve verzi 8.2 z 29. dubna 2013. Více informací lze najít v [Eps].

ArcGIS je komerčním produktem firmy ESRI, který lze využít jako desktopovou, serverovou, či mobilní aplikaci. Jedná se o GIS aplikaci umožňující vizualizaci dat, geoprocessing, či práci s rastrovými daty. Aktuální verzí je ArcGIS 10.1. Více podrobností lze získat v [Arcb] a [Arca].

PROJ.4 je knihovna určená pro převody a transformace souřadnicemi a základní úlohy matematické kartografie. Skládá se z modulů *proj*, *cs2cs*, *nad2nad* a *geod*. Je distribuována pod MIT licenci a je možné s ní pracovat pod Windows i UNIX. Tuto

knihovnu využívají další aplikace jako např. GRASS, PostGIS, MapServer a další. Detailnější informace lze najít v [Proa]

1.2 Podobnostní transformace ve 3D

Podobnostní transformace ve 3D se dají podle rozdělít na následující čtyři metody. Popis všech metod vychází z [Arcd].

1.2.1 Tříprvková transformace

Tříprvková transformace je nejjednodušší typ transformační metody, kdy dochází pouze k posunu mezi počátky souřadnicových systémů. Výslednou transformaci lze popsat následujícím matematickým vztahem, kdy x' , y' , z' vyjadřují souřadnice nového a x , y , z vyjadřují souřadnice původního systému:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}$$

1.2.2 Sedmiprvková transformace

Pro tuto metodu se používají také názvy Helmertova transformace, či metoda Burša-Wolf [Jež09]. Jedná se o jednu z nejčastěji používaných metod. Před samotnou transformací je třeba převést pomocí kartografického zobrazení rovinné souřadnice X , Y na zeměpisné φ , λ a ty poté převést pomocí sférické trigonometrie na geocentrické souřadnice X , Y , Z .

Pro transformaci je pak využito sedm parametrů. Jedná se o posun počátku souřadnicových systémů (tři parametry ΔX , ΔY , ΔZ), o rotaci kolem tří souřadnicových os (parametry ε_X , ε_Y , ε_Z) a změnu měřítka (m). Celkový postup při transformaci je znázorněn těmito kroky:

$$\begin{aligned} (X, Y)_A &\xrightarrow{\text{kart.zobr.}} (\varphi, \lambda)_A \xrightarrow{\text{sf.trig.}} (X, Y, Z)_A \xrightarrow{\text{trans.}} \\ &\xrightarrow{\text{trans.}} (X, Y, Z)_B \xrightarrow{\text{sf.trig.}} (\varphi, \lambda)_B \xrightarrow{\text{kart.zobr.}} (X, Y)_B \end{aligned}$$

Samotná transformace lze popsat následujícím matematickým vztahem, kdy x' , y' , z' vy-

jadřují souřadnice nového a x, y, z vyjadřují souřadnice původního systému:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = (1 + m) \mathbf{R} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix},$$

kde matice \mathbf{R} představuje součin tří rotačních matic. Matice a detailnější popis lze najít například v [CM02].

1.2.3 Moloděnského transformace

Moloděnského metoda převádí přímo zeměpisné souřadnice bez potřeby převodu na geocentrické X, Y, Z . Pro výpočet je potřeba znát posun počátku souřadnicových systémů (tři parametry $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$), dále rozdíl mezi hlavními poloosami (Δa) a rozdíl zploštění (Δf) pro oba elipsoidy. Celkově lze transformaci vyjádřit matematickým vztahem:

$$\begin{aligned} (M + h)\Delta\varphi &= -\sin\varphi \cdot \cos\lambda \cdot \Delta X - \sin\varphi \cdot \sin\lambda \cdot \Delta Y + \\ &+ \cos\varphi \cdot \Delta Z + \frac{e^2 \sin\varphi \cdot \cos\varphi}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2\varphi}} \cdot \Delta a + \\ &+ \sin\varphi \cdot \cos\varphi \left(M \frac{a}{b} + N \frac{b}{a} \right) \cdot \Delta f \end{aligned}$$

$$(N + h) \cos\varphi \cdot \Delta\lambda = -\sin\lambda \cdot \Delta X + \cos\lambda \cdot \Delta Y$$

$$\begin{aligned} \Delta h &= \cos\varphi \cdot \cos\lambda \cdot \Delta X + \cos\varphi \cdot \sin\lambda \cdot \Delta Y + \\ &+ \sin\varphi \cdot \Delta Z - \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2\varphi} \cdot \Delta a + \\ &+ \frac{a(1 - f)}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2\varphi}} \sin^2\varphi \cdot \Delta f, \end{aligned}$$

kde M je meridiánový a N je příčný poloměr křivosti:

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt[3]{1 - e^2 \cdot \sin^2\varphi}}$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2\varphi}}$$

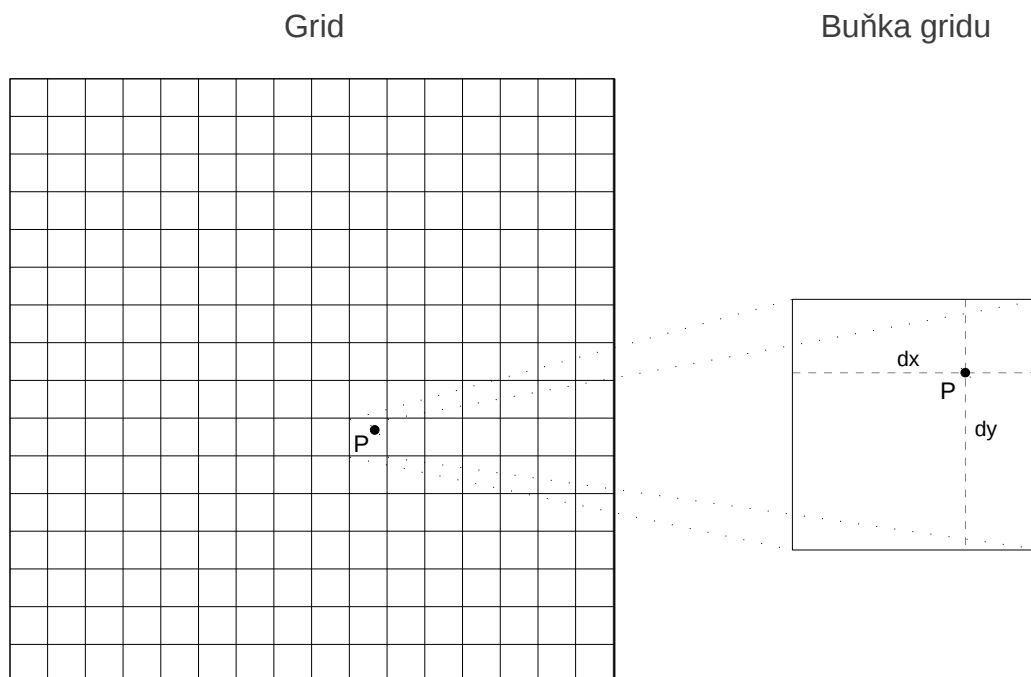
Řešením transformačních rovnic získáme neznámé $\Delta\varphi$ a $\Delta\lambda$.

Metoda existuje také ve zjednodušené formě pod názvem Abridged Molodensky a transformační rovnice lze najít například v [Arcd].

1.3 Transformace pomocí gridu

Transformace pomocí gridu lze podle [Jež09] použít zejména v případě, kdy nelze zcela přesně definovat matematický vztah mezi výchozím a cílovým systémem. Využívá se pravidelné mřížky (gridu), ve které jsou vypočtené hodnoty posunů. Výhodou je, že tyto metody jsou implementovány ve většině GIS software. Problémem je, že je potřeba doplnit transformační grid, aby mohla metoda správně fungovat. Transformační však gridy jsou k dispozici pouze pro některé souřadnicové systémy.

Pro konkrétní bod se vypočte hodnota posunu z příslušné mřížky na základě známých vektorů posunu ve vrcholech buňky gridu. Po určení buňky gridu, ve které se bod určený k transformaci nachází, se získá hodnota posunu ve směru osy X a Y díky metodě zvané lineární interpolace. Jelikož tato interpolace probíhá ve dvou směrech, nazývá se bilineární interpolace. Viz obrázek 1.1.



Obrázek 1.1: Transformace pomocí gridu, viz [Jež09]

V případě volby pravoúhlého gridu je nalezení buňky, ve které se bod nachází velice

jednoduché. Samotná interpolace uvnitř buňky také není náročná. Hodnoty posunů v samotném gridu jsou určeny na základě posunů mezi identickými body. K tomuto určení lze využít některý z algoritmů interpolace, přičemž vybrané algoritmy a jejich vlastnosti jsou popsány v dalších částech, viz [Jež09].

Je potřeba mít k dispozici vhodná data pro výpočet interpolačního gridu. Proto je také nutné nejprve analyzovat množinu identických bodů pro výpočet gridu. Pokud jsou odchylky na bodech rozloženy plynule, lze metodu považovat za nereziduální. Pokud rozložení odchylek na bodech obsahuje příliš mnoho lokálních extrémů, je vhodnější zvolit jinou transformační metodu.

V GIS produktech jsou nejčastěji využity následující metody NADCON a NTV2.

1.3.1 NADCON

Podle [Arce] je NADCON (North American Datum Convension) využívána především v USA, kde je je pomocí ní realizován převod mezi North American Datum 1927 (značeno NAD 27), Old Hawaiian Datum a Puerto Rico Datum na North American Datum 1983 (značeno NAD 83 (1986)). Dále je využita pro převod mezi NAD 83 a High Precision Geodetic Network (HPGN).

Metoda využívá dvou transformačních gridů. Jedná se o dva soubory, kdy jeden má příponu *.laa* (náhled souboru je znázorněn v ukázce 1.1) a druhý *.loa*. První soubor obsahuje posuny v zeměpisné šířce a druhý v zeměpisné délce. Každý ze souborů obsahuje hlavičku, kde jsou uvedeny parametry gridu (popořadě počet sloupců, počet řádků, počet hodnot osy Z (pokaždé nulový), minimální zeměpisná šířka, velikost buňky ve směru zeměpisné šířky, minimální zeměpisná délka, velikost buňky ve směru zeměpisné délky a nepoužitý parametr). Pro převod souborů do binární podoby slouží program NADGRD.

Zdrojový kód 1.1: Ukázka části transformačního souboru *.laa*

```

1 ncols          20
2 nrows         20
3 xllcorner     13.100000
4 yllcorner     49.500000
5 cellsize      0.020000
6 -2.846884 -2.862219 -2.869569 -2.868825 -2.852098 -2.845909

```

7	-2.854544	-2.866221	-2.865706	-2.858425	-2.859259	-2.854358
8	-2.847433	-2.856318	-2.847362	-2.849963	-2.846408	-2.844744
9	-2.843422	-2.848901	-2.842476	-2.842720	-2.840832	-2.837061
10	-2.838803	-2.836541	-2.837811	-2.834493	-2.834698	-2.829647
11	-2.823927	-2.825929	-2.826049	-2.825807	-2.823932	-2.820512

1.3.2 NTv2

Metoda The National Transformation version 2 (NTv2) je velice podobná metodě NADCON, viz [Arce]. Využívá také binárních souborů, které obsahují posuny posuny v zeměpisné šířce a v zeměpisné délce. Na rozdíl od předchozí metody, umí NTv2 použít i více gridů najednou, protože soubor s gridem může obsahovat další tzv. sub-gridy. Například sub-grid s větším rozměrem mřížky (nižší přesnost) existuje pro celé území a navíc v místech, kde je potřeba přesnost vyšší, existuje sub-grid s menším rozměrem mřížky. Podle polohy bodu se vypočtou jeho souřadnice buď z více, či méně přesného sub-gridu. Metoda využívá jeden transformační soubor (náhled znázorněn v ukázce 1.2), který musí být převeden do binární podoby. Detailní popis transformačního souboru lze nalézt například v [MC00].

Na základě [Eye] bylo zjištěno, že metoda je v současné době používána pro transformace v Austrálii, Brazílii, Francii, Kanadě, Německu (mezi DHDN¹ a ETRS89), Novém Zélandu, Portugalsku (mezi DL², D73³ a ETRS89), Španělsku (mezi ED50⁴ a ETRS89), Švýcarsku, Velké Británii (mezi OSGB1936⁵ a ETRS89) a Venezuele. Pro země, které tuto metodu používají pro transformace mezi lokálním systémem a ETRS89, jsou v závorkách uvedeny názvy lokálních systémů. Podle odkazů na webu [Eye] byla zjištěna dosažená přesnost transformace v jednotlivých zemích. Pro transformaci prováděnou v Německu bylo podle [Dhd] zjištěno, že její přesnost je uvedena do jednoho metru. Pro transformaci prováděnou v Portugalsku byla v [D73] uvedena střední souřadnicová chyba 0.09 m pro systém DL a 0.06 m pro systém D73. Pro transformaci prováděnou ve Španělsku byla v [Ed5] uvedena střední souřadnicová chyba pro

¹Deutsches Hauptdreiecksnetz

²Datum Lisboa

³Datum 1973

⁴European Datum 1950

⁵Ordnance Survey Great Britain 1936

testované body 0.05 m. Pro transformaci prováděnou ve Velké Británii byla v [Osg] uvedena střední souřadnicová chyba 0.03 m. Na základě uvedených přesností transformací lze říci, že v případě Portugalska, Španělska a Velké Británie by bylo možné metodu Ntv2 využít i pro práce vyžadující přesnost v řádech jednotek cm. V případě Německa, kde se nepodařilo blíže specifikovat přesnost transformace, lze pouze říci, že metodu Ntv2 lze využít pouze pro potřeby GIS.

Zdrojový kód 1.2: Ukázka části transformačního souboru metody NTv2

```
1 NUM_OREC
2 NUM_SREC
3 NUM_FILE
4 GS_TYPE SECONDS
5 VERSION
6 SYSTEM_F
7 SYSTEM_T
8 MAJOR_F      0.000
9 MINOR_F      0.000
10 MAJOR_T      0.000
11 MINOR_T      0.000
12 SUB_NAME
13 PARENT NONE
14 CREATED
15 UPDATED
16 S_LAT      178236.000000
17 N_LAT      179604.000000
18 E_LONG     -48564.000000
19 W_LONG     -47196.000000
20 LAT_INC      72.000000
21 LONG_INC     72.000000
22 GS_COUNT    400
23 -2.846884  3.228987  0.000000  0.000000
24 -2.862219  3.223709  0.000000  0.000000
25 -2.869569  3.227572  0.000000  0.000000
```

```

26 -2.868825 3.239040 0.000000 0.000000
27 -2.852098 3.247700 0.000000 0.000000
28 -2.845909 3.256393 0.000000 0.000000
29 -2.841518 3.264154 0.000000 0.000000
30 -2.839687 3.272619 0.000000 0.000000
31 -2.840906 3.281033 0.000000 0.000000
32 -2.843459 3.289892 0.000000 0.000000
33 -2.847739 3.302096 0.000000 0.000000
34 -2.841838 3.307132 0.000000 0.000000
35      ⋮           ⋮           ⋮           ⋮
36 -2.699855 3.291884 0.000000 0.000000
37 END           3.33e+032

```

1.4 Způsoby výpočtu transformačního gridu

V této části budou popsány postupy, jakými se dosáhlo výpočtu hodnot transformačního gridu z identických bodů. Jedná se o postupy, které byly přímo použity v této práci.

1.4.1 Metoda Thin Plate Spline

TPS je interpolační metoda, která hledá „minimálně ohnutý“ hladký povrch, který prochází kontrolními body (v našem případě myslíme body identické). Název Thin Plate Spline vychází z faktu, že metoda přibližně simuluje chování tenkého kovového plátu který je ohýbán, viz [Elo]. Metodu poprvé prezentoval Fred Bookstein v [Boo89].

Podle [Boo89]: je dáno n bodů (různých a nekolineárních) v rovině: $P_i = (x_i, y_i)$ a jejich obrazy $P'_i = (x'_i, y'_i)$, $i = 1, \dots, n$. Hledáme funkci $f(x, y)$, která minimalizuje ohybovou energii, tj.

$$I_f = \iint_{\mathbf{R}^2} \left[\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial xy} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 \right] dx dy$$

Řešení bude ve vektorovém tvaru:

$$\mathbf{f}(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + \sum_{i=1}^n w_i U(|P_i - (x, y)|), \quad (1.1)$$

kde funkce $U(|P_i - (x, y)|)$ je fundamentálním řešením biharmonické rovnice [Boo89], [Jež10]. Podle [Jež09] lze označit $r_{ij} = U(|P_i - (x, y)|)$, pak pro $r_{ij} \neq 0$ je $U = r_{ij}^2 \ln(r_{ij})$ a pro $r_{ij} = 0$ je $U = 0$.

Z vlastností biharmonické rovnice vyplývají další tři podmínky:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n x \cdot w_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n y \cdot w_i = 0.$$

Následně sestavíme matici \mathbf{K} , kde prvky této matice jsou $\mathbf{K}_{ij} = U(r_{ij})$. Získáme symetrickou matici s nulami na diagonále. Dále je potřeba vytvořit matice \mathbf{P} a \mathbf{O} :

$$\mathbf{P}_{n \times 3} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{O}_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

a vektory:

$$\mathbf{v}_{n \times 1} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{o}_{3 \times 1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{w}_{n \times 1} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_{3 \times 1} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix},$$

kde n označuje počet známých (identických) bodů, x_i, y_i jsou souřadnice těchto bodů a z_i je známá hodnota interpolované veličiny v daném bodě i . V našem případě se jednalo o rozdíl v zeměpisné šířce (délce).

Hledané vektory koeficientů určíme následujícím způsobem:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T & \mathbf{O} \end{pmatrix}}_{\mathbf{L}} \begin{pmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{o} \end{pmatrix},$$

tedy výsledek lze psát jako:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{a} \end{pmatrix} = \mathbf{L}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{o} \end{pmatrix},$$

pomocí vypočtených koeficientů a_1, a_2, a_3 a w_1, w_2, \dots, w_n můžeme určit interpolovanou hodnotu v bodě o souřadnicích (x, y) vzorcem 1.1.

Obecně lze metodu TPS použít pro různé účely. Velice časté využití je například při práci s počítačovou grafikou, kdy dochází k transformaci obrazu. Například podle [WFY⁺10] je TPS využito pro modelování a vykreslování „nemožných“ objektů. V [Ped01] se zkoumá odhad parametrů TPS transformace ze snímků bílkovin. Dále pak podle [WY04] je TPS použita pro syntézu textur. Jako další příklad může být využití TPS pro transformaci obrazů s minimálním úhlovým zkreslením, viz [LKF12].

1.4.2 Metoda Inverse Distance Weighted

Metoda Inverse Distance Weighted (IDW) je založena na výpočtu interpolované hodnoty pomocí váženého aritmetického průměru. Podle [Idw] je tento typ metod založen na předpokladu, že interpolovaná hodnota je více ovlivněna body, které se nacházejí blíže, než body, které leží ve větší vzdálenosti. Pomocí vzorce lze metodu popsat následovně:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i,$$

kde n je počet známých (identických) bodů, f_i značí hodnotu posunu pro daný bod a w_i představuje váhovou funkci pro každý bod. Výpočet váhové funkce pro IDW je tento:

$$w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-p}},$$

kde p je kladné číslo (typicky $p = 2$) a h_i je vzdálenost mezi bodem se známou hodnotou a interpolovaným bodem. Můžeme tedy psát, že:

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2},$$

přičemž (x, y) jsou souřadnice interpolovaného bodu a (x_i, y_i) jsou souřadnice identického bodu.

Jako jeden z příkladů využití IDW lze uvést [MPM⁺04], kde je tato metoda použita pro interpolaci rastru s hodnotami kvality půdy.

Kapitola 2

Historie a vývoj S-JTSK, Bpv a ETRS89

Cílem této kapitoly je stručný popis historie systémů. Dále je zde uveden jejich vývoj a zdůrazněny jsou především změny, ke kterým došlo v poslední době. Kapitola také vysvětluje, proč došlo k nové realizaci systému ETRS89 na našem území, a tedy i důvodu změny souřadnic bodů v tomto systému, což bylo jedním z podnětů ke vzniku této práce. Součástí popisu systému Bpv je také souhrn využití výškových systémů v GIS.

2.1 Historie S-JTSK

Podle [Vug] lze S-JTSK definovat jako *závazný geodetický referenční systém na celém území státu, definovaný Besselovým elipsoidem, Křovákovým konformním kuželovým zobrazením v obecné poloze a souborem souřadnic bodů z vyrovnání trigonometrických sítí.*

Následující dvě části popisují budování trigonometrické sítě a historii Křovákova zobrazení.

2.1.1 Historie budování trigonometrické sítě

Tato část vychází z [Geo98]. Československá Jednotná trigonometrická síť katastrální (JTSK) byla budována v letech 1920-57 ve třech základních etapách. Nejprve byla zaměřena „Základní trigonometrická síť“ (1920-27), dále pak proběhlo zaměření a zpra-

cování „JTSK I. řádu“ (1928-37) a poté došlo k Zaměření a zpracování souřadnic ostatních bodů JTSK, tj. bodů II., III., IV. a V. řádu (1928-57).

V první etapě bylo snahou co nejrychleji vybudovat spolehlivý základ pro další zhušťování, jednotně pro celé území nově vzniklé republiky. Z časových a technických důvodů nebylo možno tyto základy vybudovat podle všech tehdy známých požadavků, nedošlo tak k novým astronomickým měřením, nebyly měřeny geodetické základny a síť nebyla spojena se sítěmi sousedních států.

Rovněž z časových důvodů byla na části území (převážně v Čechách) převzata část starých měření směrů z II. vojenské triangulace (1862-98). Na dalších bodech byla prováděna nová měření a došlo k připojení sítě na jižním Slovensku.

Vyrovnáním sítě I. řádu JTSK byl určen jen její definitivní tvar. Protože, jak již bylo řečeno, z časových důvodů nebyly měřeny ani základny, ani nebyla vykonána měření astronomická, byl její rozměr a orientace na Besselově elipsoidu určeny nepřímou z rakouské vojenské triangulace. Detailnější popis lze dohledat například v [Geo98].

2.1.2 Historie Křovákovy zobrazení

Tato část textu vychází z [Chl10]. Kartografické zobrazení mělo být jednotné pro celé území tehdejší ČSR a závazné pro všechny zeměměřické práce vykonávané státním orgánem, zobrazení se mělo přizpůsobit poloze a protáhlému tvaru tehdejšího státu, mělo být konformní, maximální redukce směrů měla být $1'' / 5 \text{ km}$, maximální délkové zkreslení se mělo pohybovat v rozmezí $\pm 10 \text{ cm / km}$, větší mohlo být jen v případě praktických výhod, celé území mělo ležet v jednom kvadrantu pravoúhlé souřadnicové soustavy.

Výnosem Ministerstva financí č. 126 197 ze dne 16. prosince 1937 bylo definitivně rozhodnuto o zavedení kuželového zobrazení vypracovaného předsedou Triangulační kanceláře Ing. Josefem Křovákem. Zobrazení se označuje jako dvojité, protože referenční elipsoid (Besselův) je nejprve konformně zobrazen Gaussovým zobrazením na kouli (tzv. Gaussovu kouli) a „zmenšená“ Gaussova koule je opět konformně zobrazena na kuželovou plochu v obecné poloze. Referenční elipsoid byl použit Besselův z roku 1841, s referenčním bodem Hermannskogel. Vybraný elipsoid není geocentrický. To znamená, že se střed elipsoidu neshoduje se středem Země. Parametry elipsoidu jsou uvedeny v tabulce 2.1

Název	Hodnota
hlavní poloosa a	6 377 397, 155 m
vedlejší poloosa b	6 356 078, 963 m
inverzní zploštění f^{-1}	299, 15281535132334 m

Tabulka 2.1: Parametry Besselova elipsoidu

2.2 Současný vývoj S-JTSK (vznik S-JTSK/05)

Následující kapitola vychází převážně z [KCČ⁺10]. K významným změnám v možnosti určování polohy bodů došlo s nástupem technologie Globálních navigačních družicových systémů (GNSS) v 80. letech 20. století. Výrazně se změnila hlavně rychlost sběru dat při zachování přesnosti v řádech cm („geodetická přesnost“). Bylo také nezbytné integrovat geodetické základy do celoevropského souřadnicového systému a propojit prostorový souřadnicový systém, se kterým pracuje technologie GNSS a systém rovinných souřadnic v kartografickém zobrazení, se kterým pracují klasické geodetické metody.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.1.1, docházelo při tvorbě trigonometrické sítě k chybám. Z tohoto důvodu je problém s převodem dat mezi S-JTSK a ETRS89, kdy samotný převod je poměrně komplikovaný a nejednoznačný, jelikož převádíme data mezi „starým“ (co se doby vzniku a použitými metodami týká) systémem S-JTSK a „novějším“ systémem ETRS89, který je popsán dále, viz kapitola 2.4. Proto se přistoupilo k realizaci nového systému S-JTSK/05, kdy byla využita přesná měření pomocí technologie GNSS, realizována v kampani *DOPNUL* a dále zaměření trigonometrických bodů v rámci akce *Údržba vybraných bodů trigonometrické sítě*. Pro měření v rovinných souřadnicích používá souřadnicový systém modifikovaného Křovákova zobrazení, čímž je zajištěna kontinuita se stávajícím závazným souřadnicovým systémem S-JTSK.

Podle [KCČ⁺10], výsledný souřadnicový systém S-JTSK/05 obsahuje:

- elipsoidické souřadnice B, L, H , vztažené k elipsoidu GRS80 v souřadnicovém systému ETRS89 s použitím konvenčního referenčního rámce ETRF2000.
- rovinné souřadnice Y, X v modifikovaném Křovákově zobrazení a nadmořské výšky h_{Bpv} ve výškovém systému *Balt po vy-*

rovnání.

Mezi S-JTSK a S-JTSK/05 platí vztah:

$$\begin{aligned}Y_{S-JTSK} &= Y_{S-JTSK/05} - 5\,000\,000 + dY \\X_{S-JTSK} &= X_{S-JTSK/05} - 5\,000\,000 + dX\end{aligned}$$

Kroky transformace mezi ETRS89 (s využitím nového rámce ETRF2000) a S-JTSK/05 lze dohledat v [KCČ⁺10].

Důležitým prvkem pro zpřesnění transformace je znalost souřadnic zhruba 46 tisíc trigonometrických a zhušťovacích bodů. Souřadnice těchto bodů byly známy jak v S-JTSK, tak v ETRS89 (nová realizace ETRF2000), tudíž je možné ze souřadnic v ETRS89 pomocí kroků popsaných v [KCČ⁺10] určit souřadnice v S-JTSK/05. Díky znalosti souřadnic v S-JTSK a S-JTSK/05 lze pouhým odečtením získat korekce dY , dX pouhým odečtením souřadnic od sebe:

$$\begin{aligned}dY &= Y_{S-JTSK} - Y_{S-JTSK/05}, \\dX &= X_{S-JTSK} - X_{S-JTSK/05},\end{aligned}$$

z vypočtených korekcí bylo možné provést interpolaci a získat tak pravidelnou síť s hodnotami korekcí. Rozměr sítě byl empiricky určen jako 2×2 km [KCČ⁺10]. Důvodem pro přikročení k interpolaci hodnot dY , dX je fakt, že vzhledem k nepravidelné deformaci bodového pole S-JTSK, nelze exaktně matematicky definovat převod mezi S-JTSK a S-JTSK/05. Použitou interpolační metodou byla Inverse Distance Weight (IDW) viz 1.4.2 a interpolované hodnoty byly uloženy do transformační tabulky.

Účelem nově vytvořeného souřadnicového systému S-JTSK/05 je nahradit stávající systém S-JTSK pro účely praktické geodézie. Systém je primárně realizován souřadnicemi bodů sítě CZEPOS a výběrové údržby v ETRF2000 a rovinnými souřadnicemi v modifikovaném Křovákově zobrazení, výšky v systému Bpv. Pro převod do S-JTSK se předpokládá užití tabulky. [KCČ⁺10]

Z výše uvedeného popisu je vidět, že převod mezi systémy je poměrně komplikovaný, jak je možné vidět, tak je také využito interpolace pro získání hodnot dY , dX . Nabízí se tedy otázka, zda by nebylo možné přistoupit k „jednoduššímu“ způsobu převodu, který zpracovává tato práce a je popsán v kapitole 3, kdy je využito pouze interpolace pro celý převod.

2.3 Výškový systém baltský - po vyrovnání

Teoretická část týkající se výškových systémů na území ČR byla sepsána v rámci předmětu *Geomatics - Specialization Project* na Norwegian University of Science and Technology v Trondheimu, kde jsem absolvoval po dobu jednoho semestru studijní pobyt, viz [Chl12]. Pro diplomovou práci byla vybrána část textu týkající se výškového systému Balt po vyrovnání (Bpv).

Po druhé světové válce došlo k sjednocení výškových referenčních systémů v zemích tzv. východního bloku. Jako výchozí výškový bod byla zvolena nulová hodnota stupnice mořského vodočtu v Kronštadu a došlo k propojení nivelační sítě států východního bloku. Na začátku byly používány dva dočasné výškové systémy: *Baltský B68* jehož realizace proběhla odečtením hodnoty 0.68 od výšek v do té doby používaném jadranském systému a byl používán pro vojenské účely a *Baltský B46* jehož realizace proběhla odečtením hodnoty 0.46 od výšek v do té doby používaném jadranském systému a byl využíván pro účely civilní. V roce 1957 proběhlo nové vyrovnání mezi státy východního bloku a byl realizován Bpv. Jako datum systém využívá kvazi-geoid, který je realizován jako střední hladina Baltského moře s nulovým bodem v Kronštadu. Systém používá normální výšky založené na Moloděnského teorii.

Nivelační síť systému se skládá z nivelačních bodů, které tvoří výškové bodové pole. Toto pole se dělí na základní a podrobné. Síť obsahuje 119500 bodů. V současnosti je nivelační síť napojena na Jednotnou evropskou nivelační síť (UELN) a využívá systému geopotenciálních čísel.

2.3.1 Řešení výškových systémů pro práci v GIS

Řešení problematiky převodu mezi výškovými systémy v GIS proběhlo již v diplomové práci Romany Kubátové, viz [Kub09]. V rámci zmíněné práce nedošlo k implementaci metody gridu pro transformaci výšek z důvodu, že zkoumané aplikace v té době neposkytovaly potřebnou funkcionalitu pro práci s výškovými systémy a jejich transformaci. Byl pouze připraven transformační grid s hodnotami, který by bylo možné v budoucnu implementovat.

Pro analýzu řešení pro práci s výškovými systémy v současných GIS byly zkoumány možnosti využití práce s výškami ve stejných prostředích, pro která byl řešen výpočet přesné transformace metodou gridu. Jednalo se tedy o prostředí knihovny PROJ.4

a prostředí ArcGIS. Obě prostředí budou zmíněna v dalších kapitolách. Jak bylo zmíněno v kap. 1.1.1, pro transformaci mezi souřadnicovými systémy je využíváno EPSG kódů.

Výškové systémy v databázi EPSG - Databázi EPSG lze také využít pro definování a převod mezi výškovými systémy. Na stránce <http://spatialreference.org/> lze najít EPSG kódy, kterými jsou definovány výškové systémy. Podle dokumentu [Eps12] lze provádět také transformace mezi výškovými souřadnicovými systémy a jsou zde uvedeny tři transformační metody. Jelikož je vycházeno z anglicky psané literatury, tak jsou v závorce uvedeny původní názvy v angličtině. Metody jsou: *Výškový posun (Vertical Offset)*, *Výškový posun na základě gridu (Vertical Offset by Interpolation of Gridded Data)* a *Výškový posun a sklon (Vertical Offset and Slope)*. V dokumentu [Eps12] lze také najít podrobnější informace pro jednotlivé metody.

Výškové systémy v prostředí knihovny PROJ.4 - podle [Prob] byla do knihovny přidána možnost `+geoidgrids`, která umožňuje specifikovat grid vertikální posun. Tento grid musí být ve formátu `.gtx`, který je blíže popsán v [Vda]. Z [Prob] je možné stáhnout několik vytvořených `.gtx` souborů, které lze použít pro převod. Do formátu `.gtx` lze exportovat data také pomocí utility GDAL, viz 3.1.4. Ve zdroji je ještě uvedeno, že knihovna od verze 4.8.0 podporuje parametry `+vunits` a `+vto_meter` pro výškové jednotky.

Výškové systémy v prostředí ArcGIS - umožňuje kromě nastavení horizontálního souřadnicového systému, také nastavení systému výškového. K dispozici je nastavení výškového systému pro elipsoidické i pro nadmořské výšky. V [Arcc] jsou uvedeny tabulky, ve kterých jsou seznamy transformací dostupných v prostředí ArcGIS a jejich přesnost.

2.4 Stručná historie ETRS89

Následující odstavce vycházejí z [Eur]. IAG¹ a CERCO² se v roce 1987 dohodly na vyvinutí nového evropského geodetického referenčního rámce založeném na technologii GNSS. Tento rámec by měl být přesný, měl by zahrnovat celý kontinent, podobně jako WGS84 a měl by být použitelný pro mezinárodní geodata. Rámec by měl sjed-

¹International Association of Geodesy - Mezinárodní geodetická asociace

²Comité Européen des Responsables de la Cartographie Officielle - Evropský výbor představitelů národních zeměměřických služeb

notit národní referenční systémy pro potřeby geodézie, tvorby map, GIS a navigace v Evropě. V roce 1990 na konferenci ve Firenzi (Itálie) bylo navrženo, aby byl European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) založen na základě systému ITRS (International Terrestrial Reference System), který je pevně svázán s Evropou, takže vztahy mezi měřicími stanicemi v Evropě zůstaly neměnné. Souřadnice v ETRS89 jsou vyjádřeny buď jako prostorové kartézské souřadnice X , Y , Z , nebo jako prostorové elipsoidické souřadnice φ , λ , H_{el} . Jako referenční elipsoid slouží GRS80, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2.

Název	Hodnota
hlavní poloosa a	6 378 137 m
vedlejší poloosa b	6 356 725, 31414 m
inverzní zploštění f^{-1}	298, 2572215381486 m

Tabulka 2.2: Parametry elipsoidu GRS80

2.5 Nová realizace ETRS89 v ČR

Dle [Cuza] vstoupila dne 2. 1. 2011 v čase 00:00:00 (GMT) v platnost nová realizace systému ETRS89 v ČR, kdy u systému ETRS89 došlo k přechodu z rámce ETRF89 na rámec ETRF2000. V rámci toho přechodu byla také nově souhrnně zpracována, včetně nového komplexního vyrovnání, všechna měření GNSS provedená v ČR na trigonometrických a zhušťovacích bodech v rozmezí let 1996-2009. Díky této změně došlo ke změně geocentrických souřadnic bodů v Databázi bodových polí (DATAZ).

Se změnou souřadnic bylo také nezbytné upravit transformační programy pro převod mezi ETRS89 a S-JTSK, viz [Cuzb]. Byla vypracována metodika pro převod mezi novou realizací ETRS89 a S-JTSK a dále také VÚGTK, v.v.i. vyvinulo transformační program *etrf00-jtsk_v1012*, který převádí souřadnice s využitím systému S-JTSK/05, který je popsán v kapitole 2.2. Tento program bylo možné využít na celém území ČR kromě 18-ti triangulačních listů (TL), kde vykazovaly odchylky po transformaci velmi nehomogenní průběh. Program proto nebylo možné využít pro transformaci měření v těchto TL, pokud byla vyžadována přesnost odpovídající PPBP³. Z tohoto důvodu

³Podrobné polohové bodové pole

byla v roce 2011 provedena potřebná doplňující měření, díky kterým došlo k aktualizaci transformačních tabulek. Došlo tedy k uvedení nového transformačního programu *etrf00-jtsk_v1203*, který se od předchozího programu lišil pouze v hodnotách uvedených v souboru transformačních tabulek a pro přechod na zpřesněnou novější verzi je tedy postačující provést jednoduchou záměnu těchto souborů.

Z výše uvedeného vyplývá, že bylo potřeba vytvořit několik transformačních programů. Nejprve byl k dispozici program pro transformaci před uvedením nových souřadnic ETRS89, dále pak již zmíněný program *etrf00-jtsk_v1012*, který bylo možno použít pro data získaná od 2. 1. 2011 do 31. 12. 2012 a nyní lze využít programu *etrf00-jtsk_v1203*, který je možno použít pro získaná od 1. 7. 2012. Pro každou novou změnu souřadnic je tedy nutné vytvořit nový transformační program, či minimálně dodat soubor s novými hodnotami transformačních tabulek. Předpokladem je, že bude i nadále docházet ke změnám souřadnic, ať už přechodem na nový rámec, či zpřesněním na základě nových měření. Vzhledem k těmto neustálým změnám by mohlo být řešení převodu navržené a realizované v této práci elegantnější, při zachované přesnosti.

Kapitola 3

Odvození transformačních koeficientů pro transformaci metodou NTv2 mezi ETRS89 a S-JTSK

Tato kapitola popisuje princip odvození a výpočtu transformačních koeficientů pro výpočet transformace pomocí metody gridu. Grid je v tomto konkrétním případě odvozen pro převod mezi referenčními souřadnicovými systémy ETRS89 a S-JTSK. V kapitole popsány jednotlivé kroky postupu a použité metody. Na začátku je uveden základní popis software použitého pro výpočet. V závěrečné části je zahrnuto zhodnocení dosažené přesnosti na základě testování výsledků a je posouzena vhodnost zvoleného postupu pro danou transformaci.

Samotný výpočet transformace je realizován konkrétně pro tyto dva souřadnicové systémy, čímž došlo k jistému zkonkretizování tématu zadání. Nicméně je možné níže zmíněný postup analogicky aplikovat i pro výpočet transformačních koeficientů mezi jinými souřadnicovými systémy. Pro jiné systémy je však nejprve nutné provést analýzu vstupních identických bodů z hlediska možnosti využití pro transformaci pomocí metody gridu.

3.1 Software použitý pro výpočet a správu dat

Pro uložení dat a jejich správu, stejně tak i pro výpočet transformace je využito databázového systému PostgreSQL s nadstavbou pro práci s prostorovými daty PostGIS. Pro maticové výpočty je využito statistického jazyka R, které je taktéž nadstavbou pro PostgreSQL. Pro export dat z databáze do gridu je využita knihovna GDAL.

3.1.1 Popis databázového systému PostgreSQL

PostgreSQL je open-source objektově-relační databázový systém. Je možné jej spustit na všech nejčastěji používaných operačních systémech jako Linux, UNIX a Windows. Poskytuje funkcionalitu běžnou pro dnešní databázové systémy, umožňuje například tvorbu procedur, funkcí, či pohledů a obsahuje většinu SQL:2008 datových typů. Pro práci s tabulkami je možné využít indexů, kdy lze použít některý z následujících typů B-tree, R-tree, hash, nebo GiST. PostgreSQL využívá uložené procedury vytvořené v mnoha programovacích jazycích jako Java, Perl, Python, Ruby, Tcl, C/C++, či R (viz 3.1.3) a dále pak svůj vlastní procedurální jazyk PL/pgSQL, který je podobný procedurálnímu jazyku PL/SQL používaným u databází Oracle. Ve standardní funkční knihovně jsou uloženy stovky vestavěných funkcí od základních matematických až po kryptografické, či funkce zajišťující kompatibilitu s Oracle. Triggery a uložené procedury lze napsat v jazyku C a vložit do databáze jako knihovnu. Databáze je publikována pod svobodnou open-source licencí PostgreSQL License. Tyto informace vycházejí z [MS05], [Pos] a [Wikd], kde lze získat i detailnější popis.

V rámci diplomové práce bylo využíváno jazyka SQL a dále procedurálních jazyků PL/pgSQL pro vkládání dat do databáze a základní operace s daty.

3.1.2 Popis nadstavby pro prostorová data PostGIS

PostGIS je open-source rozšíření prostorové databáze pro PostgreSQL. Poskytuje podporu pro geografické objekty a díky jazyku SQL umožňuje vytvářet prostorové dotazy. Díky této nadstavbě je možné v databázi pracovat s novými typy jako geometry, geography, raster a další. Do databáze jsou díky PostGIS přidány funkce a indexy, které je možné využít pro práci s těmito typy. Jelikož je tato nadstavba vytvořena v jazyce C, lze také využít další knihovny vytvořené touto jazyce. Využita je například

funkcionalita následujících knihoven a nástrojů.

- GEOS - pro algoritmy zpracovávající geometrii
- PROJ.4 - pro práci s kartografickými zobrazeními a pro transformace souřadnic
- GDAL - pro zpracování rastrů a podporu rastrových formátů
- LibXML2 - pro parsování XML¹
- JSON-C - pro parsování JSON

Pro práci se souřadnicovými systémy je po propojení s PostgreSQL vytvořena v databázi tabulka *spatial_ref_sys* (viz obr. 4.2), ve které jsou pod příslušným EPSG kódem uloženy informace o souřadnicových systémech. Díky tomu lze pomocí EPSG kódu přiřadit tabulce v databázi, která reprezentuje určitý prostorový prvek, její geometrii.

PostGIS je vytvořen pod licencí GNU General Public License. Tyto odstavce vycházejí z [OH11], [Pgi] a [Wic], kde lze také najít podrobnější informace.

Pro diplomovou práci bylo využito funkcionality PostGIS například pro tvorbu geometrie ze souřadnic, transformaci dvou geometrií, či získání vzdálenosti dvou bodů. Nejvíce bylo využito možnosti pracovat přímo v databázi s datovým typem raster, kdy byla interpolovaná data ukládána přímo pomocí tohoto datového typu. Využití datového typu raster bylo výhodné zejména pro následný export dat z databáze.

3.1.3 Popis statistického jazyka R

R je programovací jazyk a prostředí pro statistické výpočty a grafické zobrazení dat, který vychází z programovacího jazyka S. Dále umožňuje efektivní manipulaci s daty a jejich uložení. R poskytuje širokou škálu statistických a grafických technik a nabízí široké možnosti pro rozšíření. Základní distribuci je možné rozšířit o tzv. balíky, které jsou dostupné například z internetových úložišť CRAN². Jelikož je R vytvořen jako programovací jazyk, je tedy možné, aby si uživatel doplnil přídatnou funkcionalitu definováním nových funkcí. Pro výpočetně náročné úkoly lze připojit kódy v jazyce C, C++, nebo Fortran. Lze také přistupovat přímo k objektům jazyka R pomocí jazyka C. R je možné využívat na běžně používaných operačních systémech jako Linux, UNIX

¹Extensible Markup Language

²Comprehensive R Archive Network

a Windows. R je dostupný jako Free Software pod licencí GNU General Public License. Více informací lze získat například v [Rpr]

Pro diplomovou práci bylo využito procedurálního jazyka PL/R, což je rozšíření pro databázi PostgreSQL (viz 3.1.1), které umožňuje vytvářet funkce v této databázi v jazyce R. PL/R bylo využito pro maticové výpočty při interpolaci hodnot.

3.1.4 Popis knihovny GDAL

Geoaspatial Data Abstraction Library (GDAL) je knihovna pro práci s rastrovými formáty, která umožňuje například import rastrů do, či export z databáze. Knihovna obsahuje jednotlivé utility, které poskytují různou funkcionalitu, jako například utilita pro export rastru z databáze do podporovaných formátů. S knihovnou souvisí také knihovna OGR, která je její součástí a GDAL/OGR je vyvíjen jako společný projekt. Knihovna je vydávána pod open-source licencí X/MIT. Detailnější informace lze najít například v [Gdaa], [Gdac], [Wika] a [Wikb].

V diplomové práci je GDAL využita pro export rastru z databáze do formátu, který lze použít pro transformaci pomocí gridu (viz 3.2.2).

3.2 Popis výpočtu transformačních koeficientů

Kapitola popisuje postup, jakým došlo k odvození a výpočtu transformačních koeficientů pro převod mezi ETRS89 a S-JTSK. Jako transformační metoda byla zvolena výše popsaná NTV2 (viz kapitola 1.3.2). Důvodem pro zvolení právě této metod je skutečnost, že je implementována ve většině dostupných GIS software. Proto je možné po správném nastavení příslušného software využívat transformaci pro požadované účely.

3.2.1 Vstupní data a jejich import do databáze

Příprava vstupních dat a jejich nahrání do databáze bylo provedeno v rámci semestrální práce z předmětu Prostorové databáze (KMA/PDB) studovaném v rámci navazujícího studia.

Jako vstupní data sloužily souřadnice 40 622 bodů trigonometrických a zhušťovacích bodů, které měly souřadnice v obou souřadnicových systémech, jak v ETRS89, tak

v S-JTSK. Pro body je směrodatná souřadnicová odchylka v S-JTSK podle [ČS10] 0.015 m pro body základního polohového bodového pole a 0.020 m pro body zhušťovací. Souřadnice bodů lze získat ze systému Databáze bodových polí (DATAZ) dostupného na internetu z [Dat], který provozuje ČÚZK. Jelikož došlo od 1. 1. 2011 k nové realizaci souřadnicového systému ETRS89 na našem území (viz kapitola 2.5), proto je nutné, aby výše zmíněné body měly již tyto nové souřadnice. Jako databázový software byl využit PostgreSQL (viz 3.1.1) s nadstavbou pro prostorová data PostGIS (viz 3.1.2), proto byla většina následujících kroků realizována pomocí SQL příkazů, případně bylo využito procedurálního jazyka PL/pgSQL, či PL/R pro tvorbu funkcí.

Nejprve byla v databázovém software vytvořena databáze *dataz*, do které byla do tabulky nahrána vstupní data. Jednotlivé body obsahovaly kromě souřadnic v obou systémech také další doplňující informace. Jednalo se o identifikační číslo (ID) bodu, číslo základního triangulačního a triangulačního listu (TL), ve kterém se bod nacházel, číslo bodu v příslušném TL³, druh bodu⁴, dále je u bodu ještě uvedena výška v systému Baltický po vyrovnání (Bpv) a výška elipsoidická. Podrobnější informace k tvorbě databáze lze najít v [Ch11].

Dalším krokem byl převod rovinných souřadnic identických bodů $(Y, X)_{S-JTSK}$ v systému S-JTSK (EPSG kód 2065) na souřadnice zeměpisné $(\varphi, \lambda)_{S-JTSK}$ (EPSG 4156), protože jak již bylo uvedeno výše (kapitola 1.3), tak transformační metody založené na bázi gridu pracují se zeměpisnými souřadnicemi. Zde je možné vidět pro lepší představu všechny kroky transformace:

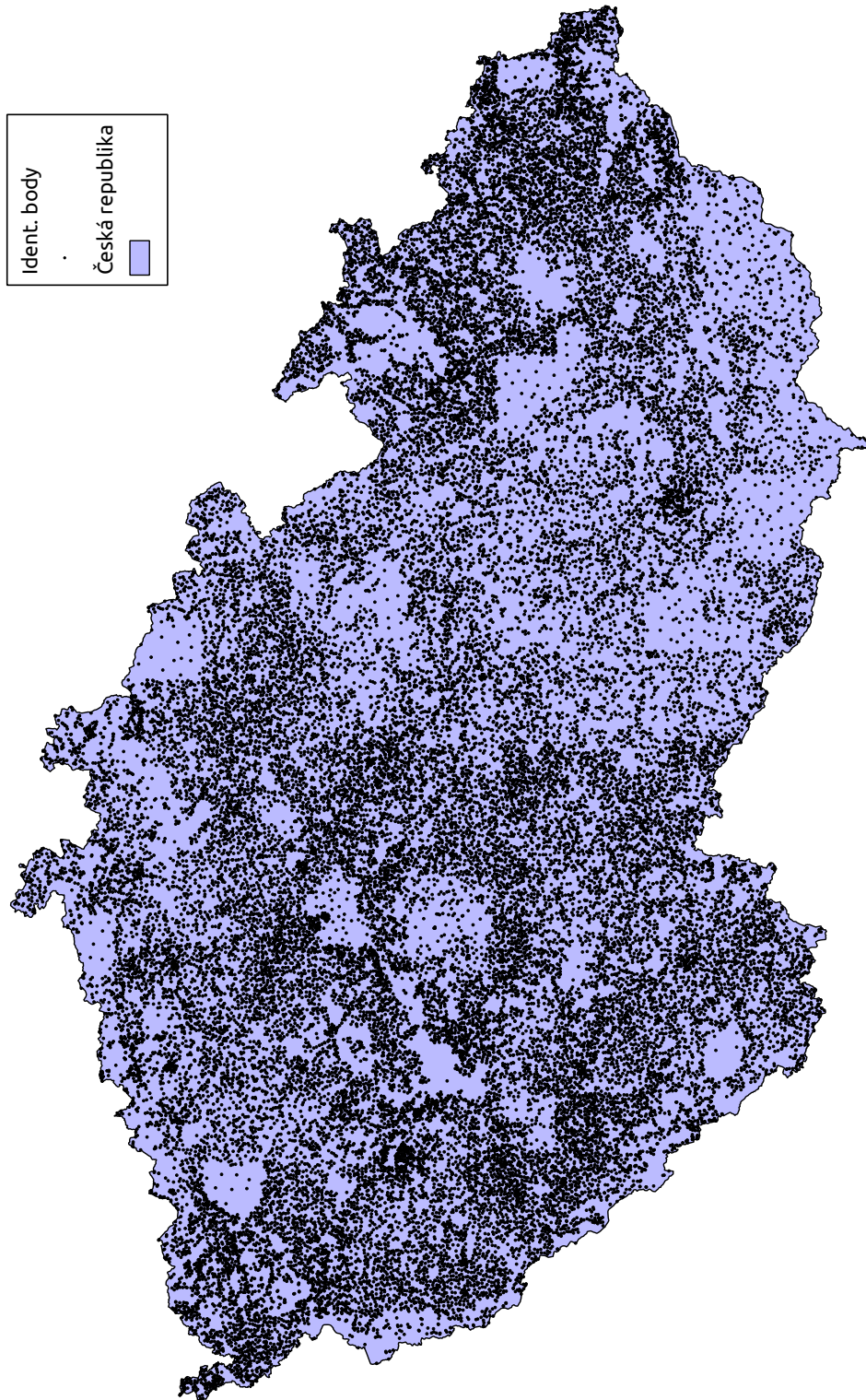
$$(X, Y)_{EPSG2065} \xrightarrow{\text{kart.zobr.}} (\varphi, \lambda)_{EPSG4156} \xrightarrow{NTv2} (\varphi, \lambda)_{EPSG4258}$$

Následně tedy bylo potřeba vypočítat odchylky mezi zeměpisnými souřadnicemi identických bodů v systémech ETRS89 (EPSG 4258) a S-JTSK (EPSG 4156). Vypočtené odchylky se dále použily pro interpolaci transformačního gridu.

Podle [Jež09] bylo před začátkem výpočtu interpolace ještě třeba analyzovat množinu identických bodů s ohledem na rozložení odchylek mezi oběma systémy. Proto, aby bylo možné data vhodně interpolovat je zapotřebí plynulého průběhu těchto odchylek, dále je potřeba, aby bylo dané území dostatečně pokryto identickými body. Pro testování (viz kapitola 3.3) byla proto také zvolena území, která se počtem bodů lišila.

³V případě bodů sítě CZEPOS se jednalo o zkratku stanice

⁴stanice CZEPOS, zhušťovací bod, trigonometrický bod, atd.



Obrázek 3.1: Rozložení bodů výběrové údržby

Pro analýzu byly identické body převedeny z ERTS89 (EPSG 4258) do S-JTSK (EPSG 2065) pomocí 7-prvkové transformace. Následně byl vizualizován rozdíl mezi souřadnicemi S-JTSK transformovanými a souřadnicemi S-JTSK původními (viz obr. 3.2). Vizualizace obsahuje linie, kdy každá linie začíná na souřadnici původního bodu v S-JTSK a končí na souřadnici bodu transformovaného. Pro lepší čitelnost byla odchylka mezi souřadnicemi zněkolikanásobena. Vhodnost rozložení bodů na území lze posoudit na základě obr. 3.1 a obr. 3.3.

Podle vizualizace a následného rozboru dat je možné konstatovat, že body dostatečně pokrývají dané území a rozložení odchylek je plynulého charakteru. Proto lze tvrdit, že pro zvolená data lze použít interpolaci pro získání mezilehlých hodnot.

3.2.2 Interpolace vypočtených odchylek a export gridu

Před samotným výpočtem interpolace je nutné určit velikost buňky gridu, tzn. její šířku a výšku. Dále je třeba zvolit vhodnou interpolační metodu a případně její parametry. Zvolení správné metody a velikosti gridu je důležité z hlediska toho, aby grid poskytoval dostatečnou přesnost pro transformaci a zároveň je třeba také dbát na to, aby výsledná velikost souboru s gridem nebyla příliš velká.

Pro interpolaci byly testovány metody TPS, viz 1.4.1 a IDW, viz 1.4.2 pro velikost buňky $0.02^\circ \times 0.02^\circ$. V případě interpolace IDW byly také porovnávány různé hodnoty parametru p . Porovnání bylo provedeno pro parametr $p = 2$, $p = 3$ a $p = 4$. Pro každou metodu byla v databázi vytvořena funkce, pomocí které byla interpolace provedena. Na základě testování míry ztotožnění identických bodů byla jako nejvhodnější zvolena metoda TPS. Byla tedy zvolena stejná metoda jako v případě [Jež09]. Porovnání přesnosti metod bylo provedeno na oblasti č.1 (viz kapitola 3.3). Výsledné hodnoty míry ztotožnění bodů jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Metoda interpolace	Míra ztotožnění (m_d)
IDW ($p = 2$)	0.1424 m
IDW ($p = 3$)	0.0576 m
IDW ($p = 4$)	0.0448 m
TPS	0.0151 m

Tabulka 3.1: Míra ztotožnění identických bodů podle metody interpolace

V případě počítání interpolovaného gridu pro transformační metodu NTV2 pro využití v knihovně PROJ.4 bylo potřeba zvolit oblast pro interpolaci větší na každou stranu o polovinu hodnoty velikosti buňky. Bylo tomu tak z důvodu, že při následném výpočtu transformace např. pomocí *cs2cs* (viz kapitola 4.2) jsou akceptován grid menší právě o tuto velikost. Interpolovaný rastr musí být tedy vytvořen o jednu buňku větší (půl buňky na každou stranu). Dále je potřeba pro použití v knihovně PROJ.4 interpolovat grid pro převod z S-JTSK do ETRS89.

V případě počítání interpolovaného gridu pro transformační metodu NTV2 pro využití v prostředí ArcGIS byla již oblast pro interpolaci zvolena bez zvětšení rozměru. Samotný výpočet gridu musí být realizován pro převod z ETRS89 do S-JTSK.

Volba dostatečné velikosti buňky gridu byla provedena na základě [Jež09]. Byla již tedy přímo testována velikost buňky 0.02° jak ve směru zeměpisné šířky, tak ve směru zeměpisné délky. Pro testované oblasti (viz kapitola 3.3) byl vypočten rozměr gridu na 8×8 buněk (velikost je již po zvětšení).

Export gridu byl proveden pomocí jednoduchého příkazu (viz ukázka 3.1). Bylo tak možné převést grid z databáze do formátu, který využívá metoda NTV2 (viz kapitola 1.3.2). Pro účely diplomové práce bylo využito formátu pro metodu NTV2. Jako `<output file format>` lze zvolit jeden z nabídky [Gdab]. Výhodou toho postupu byl fakt, že po exportu byl k dispozici již přímo binární soubor s příponou *.gsb*, který bylo možné dále využít pro transformaci např. v prostředí knihovny PROJ.4 (viz kapitola 4.2).

Zdrojový kód 3.1: Ukázka příkazu pro export gridu z databáze

```
gdal_translate -of <output file format> "PG:host=<host name>
port=<port number> dbname='<database name>' user='<user
name>' schema='<schema name>' table='<table name>' column
='<column name>' " <output file name>
```

3.3 Testování přesnosti

Vzhledem časové náročnosti výpočtů bylo testování dosažené přesnosti provedeno pouze na několika lokálních oblastech na území ČR. Testování bylo prováděno pro grid využívající transformační metodu NTV2 pro využití v prostředí knihovny PROJ.4.

Celkem bylo vybráno sedm oblastí (viz obrázek 3.3). Rozložení bylo voleno převážně do míst v pohraničí, kde docházelo k největším odchylkám mezi souřadnicemi bodů v S-JTSK (EPSG 2065) a souřadnicemi bodů transformovaných do S-JTSK z ETRS89 (EPSG 4258) pomocí 7-prvkové transformace (viz 3.2). Záměrně byla zvolena také jedna oblast (č.7) v místech, kde odchylky naopak nedosahovaly příliš velikých hodnot. Oblasti se také lišily počtem identických bodů, které obsahovaly. Cíleně byla pro testování zvolena také oblast č.3, kde byl oproti jiným oblastem počet bodů zhruba čtvrtinový.

Velikost oblastí byla zvolena na $0.14^\circ \times 0.14^\circ$. Další parametry oblastí jako např. souřadnice levého horního rohu (LH) v ETRS89 a počet bodů jsou uvedeny v tabulce 3.2. Detailní obrázky všech oblastí jsou uvedeny na příloženém CD. Aby bylo možné testované oblasti porovnat, byla pro každou oblast a pro každý testovací způsob vypočtena míra ztotožnění (odhad střední chyby):

$$m_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}, \quad (3.1)$$

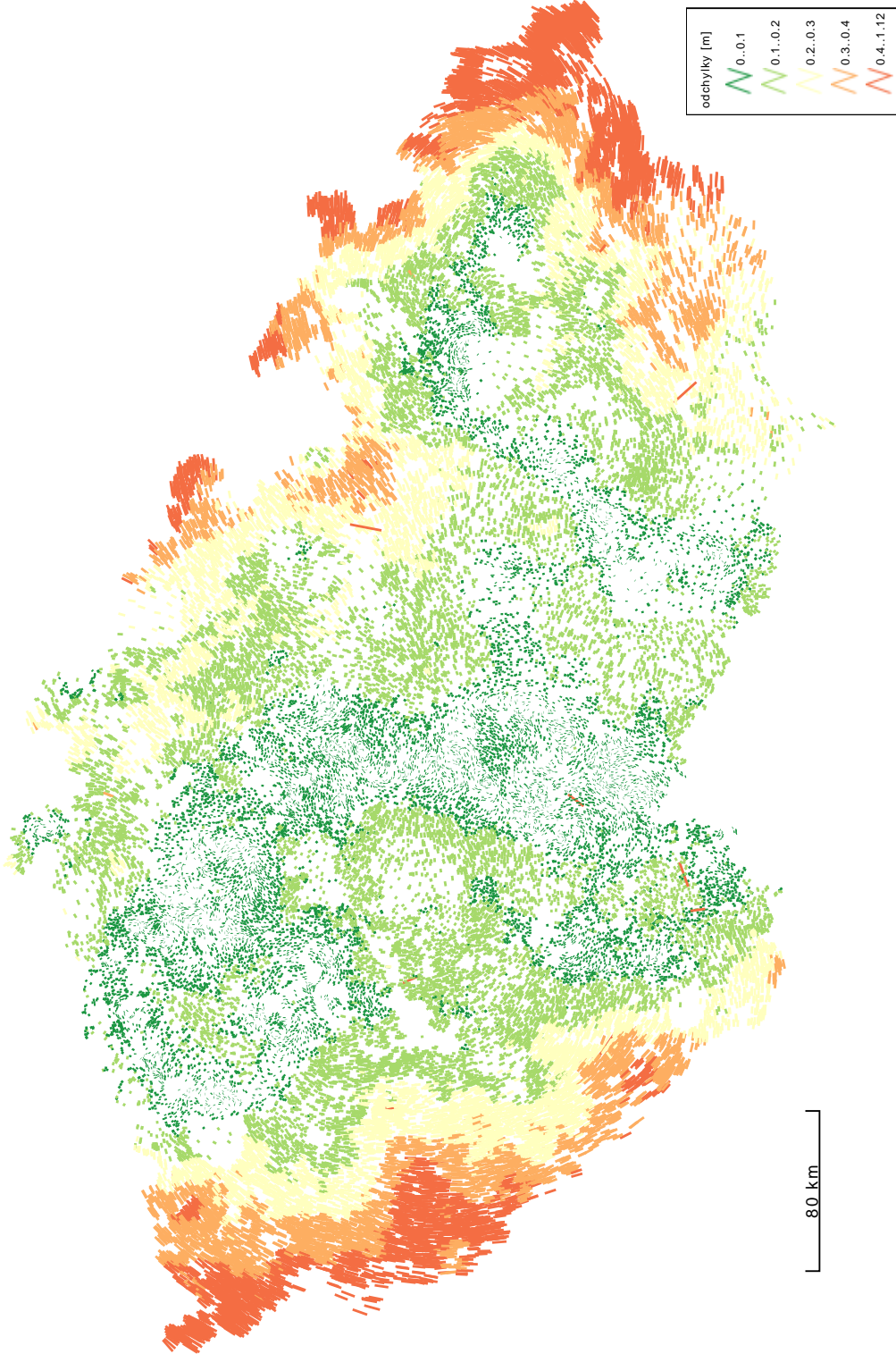
kde $d_i = \sqrt{(x_i^A - x_i^B)^2 + (y_i^A - y_i^B)^2}$ a n je počet bodů.

Číslo oblasti	λ_{LH}	φ_{LH}	Počet bodů
1	12.40°	50.14°	118
2	12.86°	49.54°	125
3	17.60°	49.14°	24
4	18.30°	49.74°	147
5	17.30°	50.14°	96
6	15.90°	50.54°	88
7	15.00°	50.00°	106

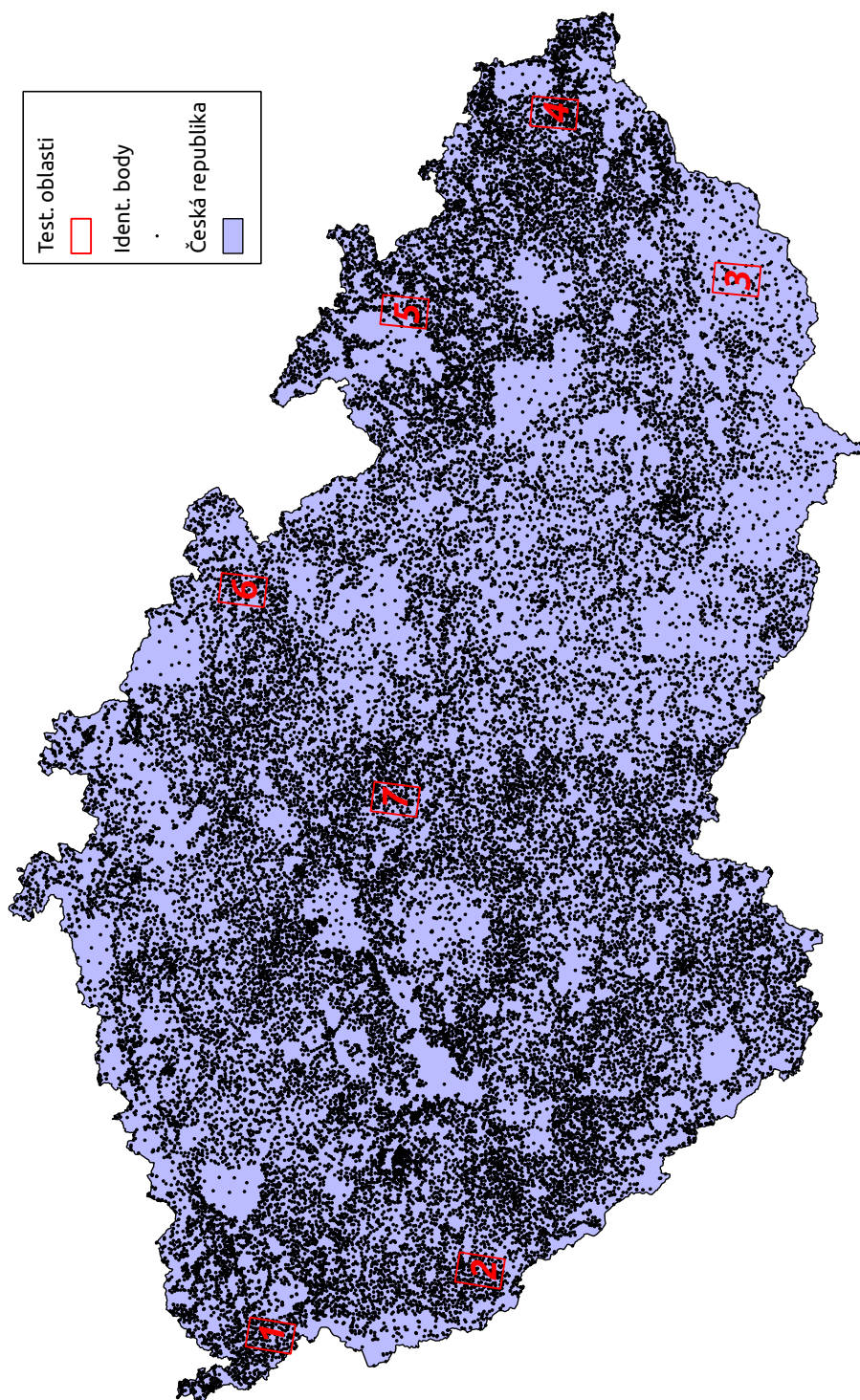
Tabulka 3.2: Parametry testovaných oblastí

3.3.1 Testování míry ztotožnění identických bodů

Pro ověření vhodnosti zvolené metody a ideálního nastavení parametrů gridu došlo k vypočtení odchylek mezi skutečnými souřadnicemi na identických bodech v S-JTSK



Obrázek 3.2: Odchytky po 7-prvkové transformaci



Obrázek 3.3: Přehledka oblastí zvolených pro testování

a souřadnicemi identických bodů transformovaných pomocí gridu do S-JTSK z ETRS89. V případě, že by byla zvolena buňka gridu dostatečně malá, tak by tyto odchylky dosahovaly nulových hodnot (nereziduální transformace).

Pro metodu TPS a velikost buňky gridu 0.02° jsou vypočtené střední chyby podle vzorce 3.1 pro jednotlivá území uvedeny v tabulce 3.3. Bylo předpokládáno, že v oblasti č.7 bude hodnota střední chyby minimální, z důvodu, že se oblast nachází v místech, kde jsou malé hodnoty odchylek mezi souřadnicemi bodů v S-JTSK (EPSG 2065) a souřadnicemi bodů transformovaných do S-JTSK (EPSG 2065) z ETRS89 (EPSG 4258) pomocí 7-prvkové transformace.

Pro všechny oblasti byly také vypočteny četnosti odchylek pro vypočtenou míru ztotožnění, kde tyto hodnoty byly také zobrazeny do grafu. Tabulky s vypočtenými četnostmi pro všechny oblasti jsou uloženy v databázi. Pro ukázkou je zde uveden graf četností 3.4 a tabulka 3.4 s konkrétními hodnotami pouze pro oblast č.1, zbývající grafy jsou součástí příloženého CD. Tímto testem nedochází k ověření přesnosti transformace.

Číslo oblasti	Míra ztotožnění (m_d)
1	0.0151 m
2	0.0129 m
3	0.0130 m
4	0.0171 m
5	0.0150 m
6	0.0096 m
7	0.0064 m

Tabulka 3.3: Míra ztotožnění identických bodů testovaných oblastí

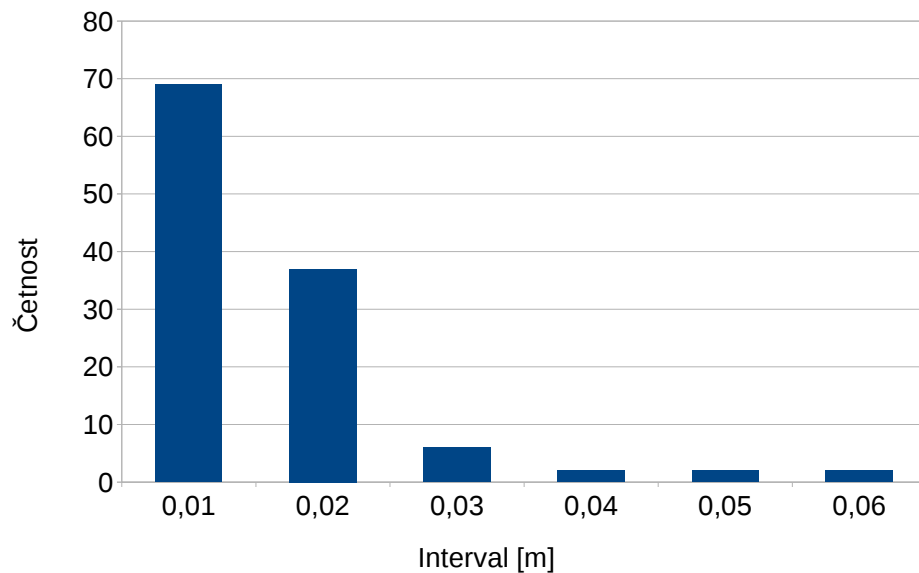
Pomocí dalších testování se již ověří i přesnost, kterou zvolená transformace dosahuje.

3.3.2 Test vynecháním bodu pro výpočet gridu

Podle [Jež09] byl jako další krok testování zvolen výpočet odchylky, ke které dojde při transformaci identického bodu, který byl ale vynechán z výpočtu interpolace gridu.

Interval vzdálenosti [m]	Četnost výskytu bodů
0.00 – 0.01	69
0.01 – 0.02	37
0.02 – 0.03	6
0.03 – 0.04	2
0.04 – 0.05	2
0.05 – 0.06	2

Tabulka 3.4: Četnost bodů pro intervaly odchylek míry ztotožnění identických bodů v oblasti č.1



Obrázek 3.4: Rozložení četnosti odchylek míry ztotožnění identických bodů pro oblast č.1

Detailnější popis lze najít například v [Jež09]. Takto byly otestovány všechny výše zmíněné oblasti, kdy pro každou byla vypočtena míra ztotožnění podle vzorce 3.1.

Testování bylo prováděno pro grid s velikostí buňky 0.02° a opět metodou TPS. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.5. Z výsledků je možné vidět, že maximální střední chyba byla vypočtena v oblasti č.3. Na tento výsledek může mít vliv fakt, že se v oblasti nachází pouze 24 bodů, což je zhruba čtvrtinové množství, než v jiných oblastech. Minimální střední chyba byla vypočtena v oblasti č.7, kde bude podle všeho hrát opět roli fakt, že jsou zde minimální odchylky mezi souřadnicemi bodů v S-JTSK (EPSG 2065) a souřadnicemi bodů transformovaných do S-JTSK (EPSG 2065) z ETRS89 (EPSG 4258) pomocí 7-prvkové transformace.

Pro všechny oblasti byly také vypočteny četnosti odchylek na bodech, kde tyto hodnoty byly také zobrazeny do grafu. Tabulky s vypočtenými četnostmi pro všechny oblasti jsou uloženy v databázi. Pro ukázkou je zde uveden graf četností 3.5 a tabulka 3.6 s konkrétními hodnotami pouze pro oblast č.1, zbývající grafy jsou součástí příloženého CD.

Číslo oblasti	Míra ztotožnění (m_d)
1	0.0150 m
2	0.0132 m
3	0.0183 m
4	0.0178 m
5	0.0149 m
6	0.0101 m
7	0.0063 m

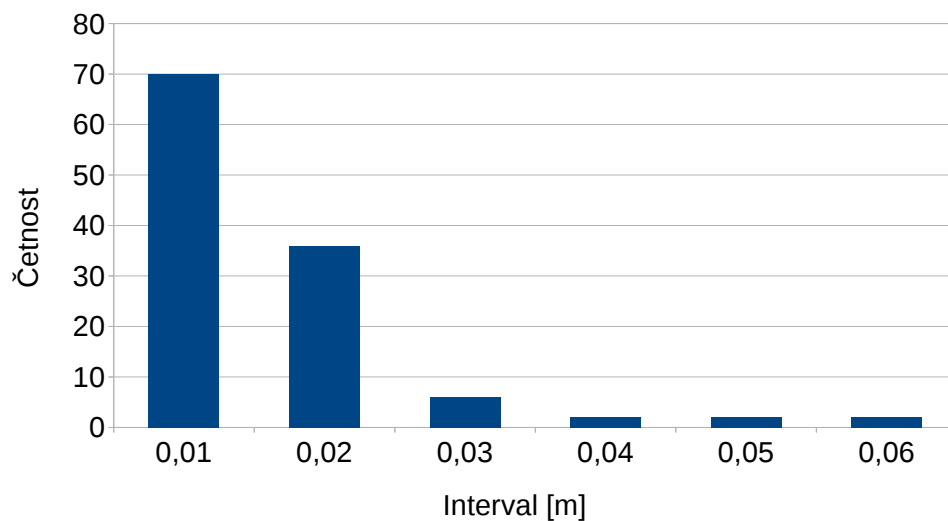
Tabulka 3.5: Míra ztotožnění na základě vynechání bodu pro testované oblasti

3.3.3 Porovnání transformace metodou gridu s transformací realizovanou ČÚZK

Pro porovnání se stávajícím řešením vydaným ČÚZK bylo využito webové aplikace na stránce:

Interval vzdálenosti [m]	Četnost výskytu bodů
0.00 – 0.01	70
0.01 – 0.02	36
0.02 – 0.03	6
0.03 – 0.04	2
0.04 – 0.05	2
0.05 – 0.06	2

Tabulka 3.6: Četnost bodů pro intervaly odchylek pro test vynecháním bodu z výpočtu v oblasti č.1



Obrázek 3.5: Rozložení četnosti odchylek pro test vynecháním bodu z výpočtu pro oblast č.1

[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(stngrdv05ykf2xumv30cea45\)\)/Default.aspx?head_tab=sekce-01-gp&mode=TextMeta&text=wcts&menu=19](http://geoportal.cuzk.cz/(S(stngrdv05ykf2xumv30cea45))/Default.aspx?head_tab=sekce-01-gp&mode=TextMeta&text=wcts&menu=19), kde bylo možno nahrát buď jednotlivé souřadnice, či soubor se souřadnicemi a provést zvolenou transformaci.

Pro porovnání byla v každé oblasti vygenerována množina bodů se souřadnicemi v ETRS89 (EPSG 4258) tak, aby se jednalo o body odlišné od bodů identických, pomocí kterých byl generován grid. Pro každou oblast bylo takto vytvořeno 169 bodů. Body byly transformovány do S-JTSK (EPSG 2065) jak pomocí gridu, tak pomocí webové aplikace ČÚZK. Grid byl použit stejný jako v případě 3.3.1, tj. s velikostí buňky 0.02° a zvolena byla opět metoda TPS. Z transformovaných souřadnic se v každém území vypočetly odchylky a z nich střední chyby podle vzorce 3.1.

Číslo oblasti	Míra ztotožnění (m_d)
1	0.0105 m
2	0.0112 m
3	0.0305 m
4	0.0133 m
5	0.0183 m
6	0.0104 m
7	0.0063 m

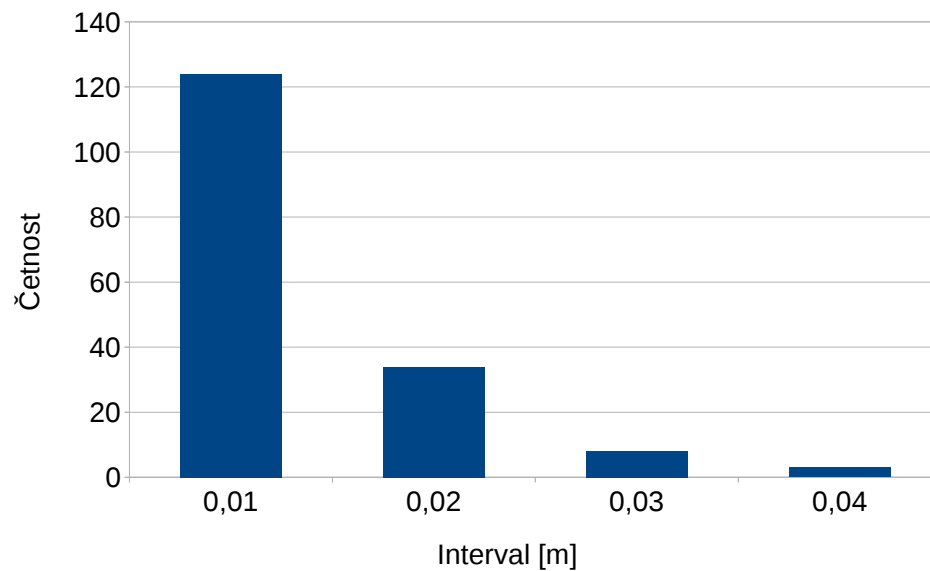
Tabulka 3.7: Míra ztotožnění na základě porovnání transformace pomocí gridu a transformace realizovanou ČÚZK pro zvolené oblasti

Vypočtené výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.7. Z výsledků lze vidět, že maximální střední chyba byla dosažena na území č.3. Je tedy možné usuzovat, že tento výsledek opět ovlivňuje nízký počet bodů v oblasti pro generování gridu. Minimální střední chyba byla jako v obou předchozích testováních vypočtena pro oblast č.7. Opět lze tedy také předpokládat, že je tento výsledek dosažen z důvodu minimálních odchylek mezi souřadnicemi bodů v S-JTSK (EPSG 2065) a souřadnicemi bodů transformovaných do S-JTSK (EPSG 2065) z ETRS89 (EPSG 4258) pomocí 7-prvkové transformace, které byly použity pro vytvoření gridu.

Pro všechny oblasti byly jako v předchozích případech vypočteny četnosti odchylek mezi body transformovanými oběma způsoby a tyto hodnoty byly také zobrazeny do

Interval vzdálenosti [m]	Četnost výskytu bodů
0.00 – 0.01	124
0.01 – 0.02	34
0.02 – 0.03	8
0.03 – 0.04	3

Tabulka 3.8: Četnost bodů pro intervaly odchylek pro test transformace gridem a postupem ČÚZK v oblasti č.1



Obrázek 3.6: Rozložení četnosti odchylek pro test transformace gridem a postupem ČÚZK pro oblast č.1

grafu. Tabulky s vypočtenými četnostmi pro všechny oblasti jsou uloženy v databázi. Pro ukázkou je zde uveden graf četností 3.6 a tabulka 3.8 s konkrétními hodnotami pouze pro oblast č.1, zbývající grafy a tabulky jsou součástí příloženého CD.

Kapitola 4

Implementace vytvořeného řešení do stávajících GIS

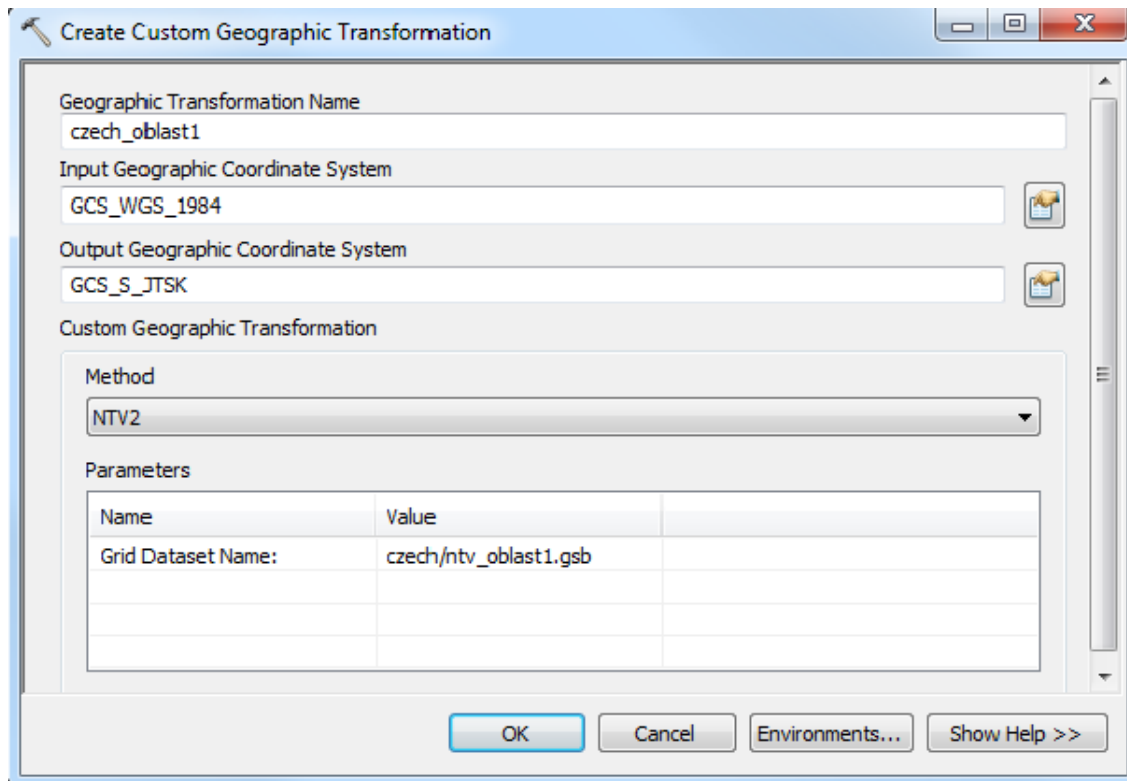
Cílem práce bylo vytvořit transformační grid využitelný pro transformaci pro prostředí ArcGIS a pro GIS software využívající prostředí knihovny PROJ.4. Tato kapitola popisuje, jakým způsobem došlo k implementaci gridu v těchto produktech, aby bylo možné využít přesnost transformace v řádu jednotek cm i v prostředí GIS.

4.1 Implementace řešení pro prostředí ArcGIS

Pro prostředí ArcGIS byl vytvořen grid využívající metodu NTv2 (viz 1.3.2), jelikož toto prostředí umožňuje transformaci založenou na základě tohoto typu gridu.

Aplikace umožňuje vytvoření uživatelem definované transformace díky nástroji v Arc-Toolboxu. Kroky postupu vycházejí z [Arcf]. Nejprve je potřeba vložit vytvořený binární grid do adresáře v programu, kde jsou uloženy další gridy. Uložení je provedeno podle lokalizace oblasti.

Poté je již možné pomocí nástroje *Create Custom Geographic Transformation* definovat novou transformaci (viz obr. 4.1), kde je potřeba zvolit název transformace, poté vstupní a výstupní souřadnicový systém a nakonec metodu pro transformaci gridu a samotný grid. Takto vytvořenou transformaci je poté možné použít pro práci s vektorovými, či rastrovými soubory.



Obrázek 4.1: Vytvoření uživatelem definované transformace v prostředí ArcGIS

4.2 Implementace řešení pro prostředí knihovny PROJ.4

Jak již bylo popsáno výše, tak výpočet gridu byl vytvořen pro použití metodou NTV2 (viz 1.3.2) a knihovna PROJ.4 poskytuje možnost pro transformaci pomocí této metody.

Pro správnou konfiguraci stačí uložit vygenerovaný grid (pro ukázkou je použit grid pro oblast č.1 *ntv_oblast1.gsb*) do domovského adresáře knihovny PROJ.4. Pro výpočet transformace při použití některého z modulů knihovny stačí definovat parametr `+nadgrids`. Pro ukázkou je uveden příkaz modulu `cs2cs` pro převod z ETRS89 do S-JTSK:

```
1 cs2cs -f "%.2f" +proj=latlong +datum=WGS84 +to +proj
2 =krovak +ellps=bessel +nadgrids=ntv_oblast1.gsb
```

podobně lze provést i převod opačný z S-JTSK do ETRS89:

```
1 cs2cs -f "%.10f" +proj=krovak +ellps=bessel +nadgrids
```

```
2 =ntv_oblast1.gsb +to +proj=latlong +datum=WGS84
```

Pro tuto práci bylo využito pro realizaci výpočtů prostředí PostGIS (viz 3.1.2), které také využívá knihovny PROJ.4. Pokud je již transformační grid nahrán v domovském adresáři knihovny, tak poté stačí jen v tabulce *spatial_ref_sys* změnit ve sloupci *proj4text* (viz obr. 4.2) nastavení souřadnicového systému S-JTSK pro EPSG kód 2065 na:

```
1 +proj=krovak +ellps=bessel +nadgrids=ntv_oblast1.gsb
```

	srid [PK] integer	auth_name character varying	auth_srid integer	srtext character varying	proj4text character varying(2048)
61	2060	EPSG	2060	PROJCS[	+proj=utm +zone=40 +ellps=intl +towgs84=-117,-132,-164,0,0,0,0 +units=m +
62	2061	EPSG	2061	PROJCS[	+proj=utm +zone=41 +ellps=intl +towgs84=-117,-132,-164,0,0,0,0 +units=m +
63	2062	EPSG	2062	PROJCS[	+proj=lcc +lat_1=40 +lat_0=40 +lon_0=0 +k_0=0.9988085293 +x_0=600000 +y_0=
64	2063	EPSG	2063	PROJCS[	+proj=utm +zone=28 +a=6378249.2 +b=6356515 +towgs84=-23,259,-9,0,0,0,0 +u
65	2064	EPSG	2064	PROJCS[	+proj=utm +zone=29 +a=6378249.2 +b=6356515 +towgs84=-23,259,-9,0,0,0,0 +u
66	2065	EPSG	2065	PROJCS[	+proj=krovak +ellps=bessel +nadgrids=ntv_oblast1.gsb
67	2066	EPSG	2066	PROJCS[	+proj=cass +lat_0=11.25217861111111 +lon_0=-60.68600888888889 +x_0=37718.0
68	2067	EPSG	2067	PROJCS[	+proj=utm +zone=20 +ellps=intl +towgs84=-0.465,372.095,171.736,0,0,0,0 +u
69	2068	EPSG	2068	PROJCS[	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=9 +k=0.9999 +x_0=200000 +y_0=0 +ellps=intl +t
70	2069	EPSG	2069	PROJCS[	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=11 +k=0.9999 +x_0=200000 +y_0=0 +ellps=intl +
71	2070	EPSG	2070	PROJCS[	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=13 +k=0.9999 +x_0=200000 +y_0=0 +ellps=intl +
72	2071	EPSG	2071	PROJCS[	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=15 +k=0.9999 +x_0=200000 +y_0=0 +ellps=intl +
73	2072	EPSG	2072	PROJCS[	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=17 +k=0.9999 +x_0=200000 +y_0=0 +ellps=intl +
74	2073	EPSG	2073	PROJCS[	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=19 +k=0.9999 +x_0=200000 +y_0=0 +ellps=intl +
75	2074	EPSG	2074	PROJCS[	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=21 +k=0.9999 +x_0=200000 +y_0=0 +ellps=intl +
76	2075	EPSG	2075	PROJCS[	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=23 +k=0.9999 +x_0=200000 +y_0=0 +ellps=intl +
77	2076	EPSG	2076	PROJCS[	+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=25 +k=0.9999 +x_0=200000 +y_0=0 +ellps=intl +
78	2077	EPSG	2077	PROJCS[	+proj=utm +zone=32 +ellps=intl +towgs84=-115.854,-99.0583,-152.462,0,0,0,0

Obrázek 4.2: Ukázka tabulky spatial_ref_sys

Závěr

Pro transformace mezi souřadnicovými referenčními systémy existují různé transformační metody, které poskytují různou přesnost. V prostředí GIS není příliš často kladen požadavek na přesnost v řádu jednotek centimetrů („geodetická přesnost“), jak je tomu v aplikacích pro geodetické účely. Řešení přesné transformace souřadnicových referenčních systémů v této práci však poskytuje geodetickou přesnost i pro účely práce v GIS.

Byl proveden souhrn problematiky souřadnicových referenčních systémů, kde byly nejprve popsány základní pojmy vztahující se k této problematice a dále pak metody používané pro transformaci souřadnicových referenčních systémů. Větší prostor byl věnován popisu transformačních metod založených na bázi gridu, kdy byly také popsány způsoby, jak lze provést výpočet transformačního gridu.

Jelikož byl výpočet přesné transformace realizován konkrétně pro souřadnicové referenční systémy ETRS89 a S-JTSK, byly také oba systémy v práci popsány. Byla zde stručně zmíněna historie a následně hlavně popis současného stavu a změn, ke kterým v posledních letech docházelo. Navíc byl ještě popsán výškový systém Bpv a byla zmíněna problematika výškových systémů v prostředí GIS.

Pro samotný výpočet transformačního gridu bylo využito databázového software PostgreSQL s nadstavbou pro prostorová data PostGIS, kde byly vytvořeny funkce pro interpolaci hodnot gridu. Výhodou použití databáze pro správu data a jejich manipulaci je fakt, že je tento výpočet přenositelný i pro data jiných souřadnicových systémů, či v případě změny souřadnic lze pouhou změnou dat na vstupu elegantně realizovat výpočet gridu nového. SQL kód pro metodu TPS a funkce v PL/R jsou součástí přílohy. Pro export gridu z databáze je využita utilita GDAL, pomocí které byl již přímo získán grid v binární podobě použitelný pro transformaci.

Dále bylo provedeno testování získaného gridu, kde byly využity tři testovací me-

tody, jednou z nichž bylo i porovnání se stávající transformací realizovanou ČÚZK. Výsledky části testů jsou přímo součástí textu a grafy s výsledky testování jsou součástí příloženého CD. Výsledná transformace pomocí metody gridu tedy poskytuje přesnost v řádu přibližně 0.02 m. V porovnání s přesností běžně dostupné 7-prvkové transformace, která se pohybuje kolem 0.5 m se jedná o velmi výrazné zlepšení.

Na závěr byla popsána implementace gridu pro prostředí ArcGIS a pro prostředí GIS produktů využívajících knihovny PROJ.4, kde bylo ukázáno konkrétní použití v software PostGIS.

V době dokončení tohoto textu nebyl ještě výsledný grid pro celé území k dispozici. Důvodem je velká náročnost výpočtu pro výše zmíněné množství identických bodů. Doba trvání výpočet je odhadnuta v řádu několika týdnů. Vlivem na rychlost výpočtu má samozřejmě také výkon počítače. Výpočet gridu je realizován na stroji s procesorem AMD Athlon(tm) 64 X2 Dual Core a pamětí RAM 4GB. Po dokončení výpočtu bude grid poskytnut volně k dispozici pro uživatele.

Na příloženém CD jsou uloženy vytvořené gridy pro testované oblasti a vytvořené funkce a SQL dotazy, které byly využity pro práci v databázi. Dále je na CD uložen i text práce ve formátu PDF a také zdrojový kód práce pro program L^AT_EX. Součástí příloh je i struktura příloženého CD.

Literatura

- [Arca] ArcGIS. Dostupné z URL: <http://www.arcdata.cz/produkty-a-sluzby/software/arcgis/>, [cit. 2013-04-22].
- [Arcb] ArcGIS - Mapping & Analysis for Understanding Our World. Dostupné z URL: <http://www.esri.com/software/arcgis>, [cit. 2013-04-22].
- [Arcc] ArcGIS 10.1 Geographic and Vertical Transformation Tables. Dostupné z URL: http://downloads2.esri.com/support/TechArticles/Geographic_Transformations_10.1.pdf, [cit. 2013-05-20].
- [Arcd] Equation-based methods - ArcGIS 10.1 Desktop Help. Dostupné z URL: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Equation_based_methods/003r00000012000000/, [cit. 2013-02-25].
- [Arce] Grid-based methods - ArcGIS 10.1 Desktop Help. Dostupné z URL: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Grid_based_methods/003r00000013000000/, [cit. 2013-02-25].
- [Arcf] Install a new NTV2 geographic transformation and grid file for use in ArcGIS Desktop. Dostupné z URL: <http://support.esri.com/es/knowledgebase/techarticles/detail/35152>, [cit. 2013-05-20].
- [Boo89] Bookstein, F. L.: Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations. *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, ISSN 01628828.

- [Chl10] Chlup, O.: *Zobrazení České republiky na mapách Evropské unie*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2010.
- [Chl11] Chlup, O.: *Databáze bodového pole ČR*. Semestrální práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2011, předmět Prostorové databáze KMA/PDB.
- [Chl12] Chlup, O.: *Height Reference Systems in Norway and in the Czech Republic*. Semestrální práce, Norwegian University of Science and Technology, 2012, předmět TBA4561 Specialization Project.
- [CM02] Cimbálník, M.; Mervart, L.: *Vyšší geodézie 1*. České vysoké učení technické, 2002, ISBN 9788001025277.
- [Cuza] Nová realizace systému ETRS89 v ČR. Dostupné z URL: http://www.cuzk.cz/Dokument.aspx?PRARESKOD=998&MENUID=0&AKCE=DOC:10-NR%_ETRS891, [cit. 2013-04-15].
- [Cuzb] Zásady pro využití programů etrf00-jtsk_v1012 a etrf00-jtsk_v1203 pro transformaci výsledků měřických činností pro potřeby katastru nemovitostí ČR. Dostupné z URL: https://www.cuzk.cz/Dokument.aspx?PRARESKOD=998&MENUID=0&AKCE=DOC:10-GPS_NAVOD2, [cit. 2013-04-15].
- [D73] Informação Geodésica. Dostupné z URL: http://www.igeo.pt/produktos/geodesia/Grelhas_NTv2.htm, [cit. 2013-05-03].
- [Dat] Databáze bodových polí. Dostupné z URL: <http://dataz.cuzk.cz>, [cit. 2012-11-10].
- [Dhd] Beschreibung der Transformation - DE_DHDN (BeTA, 2007) nach ETRS89. Dostupné z URL: http://crs.bkg.bund.de/crseu/crs/dscrtrans/BeTA/de_dhdn2etrs_beta.php, [cit. 2013-05-03].
- [Ed5] Consejo Superior Geográfico: *Análisis de los diferentes sistemas de cambio*. Dostupné z URL: <http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/0A9286EE-E879-4389-8666-69A2A62722CB/29828/anadif.pdf>.

- [Elo] Elonen, J.: Thin Plate Spline editor - an example program in C++. Dostupné z URL: <http://elonen.iki.fi/code/tpsdemo/>, [cit. 2013-03-01].
- [Eps] EPSG Geodetic Parameter Dataset. Dostupné z URL: <http://www.epsg.org/Geodetic.html>, [cit. 2013-04-20].
- [Eps12] Coordinate Conversions and Transformations including Formulas. Geomatics Guidance Note 7, International Association of Oil & Gas producers, 2012, dostupné z URL: <http://www.epsg.org/guides/docs/g7-2.pdf>.
- [Eur] European Geodetic Reference Systems. Dostupné z URL: http://www.euref.eu/euref_egrs.html, [cit. 2013-04-11].
- [Eye] NTV2 National Transformation version 2. Dostupné z URL: <http://www.eye4software.com/resources/ntv2/>, [cit. 2013-03-05].
- [Gdaa] GDAL - Geospatial Data Abstraction Library. Dostupné z URL: <http://www.gdal.org/>, [cit. 2013-04-25].
- [Gdab] GDAL Raster Formats. Dostupné z URL: http://www.gdal.org/formats_list.html, [cit. 2013-05-09].
- [Gdac] GDAL/OGR Tracker and Wiki. Dostupné z URL: <http://trac.osgeo.org/gdal/>, [cit. 2013-04-25].
- [Geo98] *Geodetické referenční systémy v České republice. Vývoj od klasických ke geocentrickým souřadnicovým systémům*. Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický ve spolupráci s Vojenským zeměpisným ústavem Praha, 1998, ISBN 80-85881-09-8, ročník 44, dostupné z URL: http://www.vugtk.cz/odis/sborniky/cd/cd_zak/systemy/start.htm.
- [Idw] Inverse Distance Weighted Interpolation. Dostupné z URL: http://www.ems-i.com/smshelp/Data_Module/Interpolation/Inverse_Distance_Weighted.htm, [cit. 2013-03-01].

- [Jež09] Ježek, J.: *Implementace transformací souřadnicových systémů v GIS*. Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, 2009.
- [Jež10] Ježek, F.: Geometrické a počítačové modelování. Pomocný učební text. Verze 12. *Fakulta aplikovaných věd. Západočeská univerzita v Plzni*, 2010: str. 123.
- [KCČ⁺10] Kostelecký, J.; Cimbálník, M.; Čepek, A.; aj.: Realizace S-JTSK/05 – varianta 2. Technická zpráva 1153/2010, Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, v.v.i. Stavební fakulta ČVUT v Praze. Zeměměřický úřad, Praha, 2010.
- [Kub09] Kubátová, R.: *Analýza transformace referenčních souřadnicových systémů S-JTSK a ETRS89 v GIS*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2009.
- [LKF12] Lipman, Y.; Kim, V. G.; Funkhouser, T. A.: Simple formulas for quasiconformal plane deformations. *ACM Trans. Graph.*, Z 2012: s. 124:1–124:13, ISSN 0730-0301.
URL <http://doi.acm.org/10.1145/2231816.2231822>
- [MC00] Mitchell, D.; Collier, P.: *GDAit (GDA94 InTerpolation)*. *Software documentation*. Department of Geomatics at the University of Melbourne, 2000, dostupné z URL: http://www.dse.vic.gov.au/__data/assets/pdf_file/0014/104450/GDAit_Software_Doc_V206.pdf.
- [MPM⁺04] Mueller, T. G.; Pusuluri, N. B.; Mathias, K. K.; aj.: Map Quality for Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted Interpolation. *Soil Science Society of America Journal*, Listopad 2004: s. 2042–2047.
- [MS05] Matthew, N.; Stones, R.: *Beginning Databases with PostgreSQL: From Novice to Professional*. Apress, 2005, ISBN 1-59059-478-9.
- [OH11] Obe, R. O.; Hsu, L. S.: *PostGIS in Action*. Manning Publications, 2011, ISBN 9781935182269, 522 s.
- [Osg] Coordinate Transformation: OSGB 1936 to ETRS89. Dostupné

- z URL: http://georepository.com/transformation_5338/OSGB-1936-to-ETRS89-1.html, [cit. 2013-05-03].
- [Ped01] Pedersen, L.: *Estimation of thin plate spline parameters from protein spot positions in 2D electrophoresis gels*. 2001.
- [Pgi] About PostGIS. Dostupné z URL: <http://postgis.net/>, [cit. 2013-04-25].
- [Pos] About PostgreSQL. Dostupné z URL: <http://www.postgresql.org/about/>, [cit. 2013-04-25].
- [Proa] PROJ.4 - Cartographic Projections Library. Dostupné z URL: <http://trac.osgeo.org/proj/>, [cit. 2013-04-25].
- [Prob] PROJ.4 - Vertical Datums. Dostupné z URL: <http://trac.osgeo.org/proj/wiki/VerticalDatums>, [cit. 2013-05-20].
- [Rpr] Introduction to R. Dostupné z URL: <http://www.r-project.org/>, [cit. 2013-04-25].
- [Vda] Datum Transformation Grid (.GTX) Overview. Dostupné z URL: http://vdatum.noaa.gov/dev/gtx_info.html, [cit. 2013-05-20].
- [Vug] Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí. Dostupné z URL: <http://www.vugtk.cz/slovník>, [cit. 2013-04-30].
- [WFY+10] Wu, T.-P.; Fu, C.-W.; Yeung, S.-K.; aj.: Modeling and rendering of impossible figures. *ACM Trans. Graph.*, Duben 2010: s. 13:1–13:15, ISSN 0730-0301.
URL <http://doi.acm.org/10.1145/1731047.1731051>
- [Wika] GDAL. Dostupné z URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/GDAL>, [cit. 2013-04-25].
- [Wikb] GDAL. Dostupné z URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/GDAL>, [cit. 2013-04-25].
- [Wikc] PostGIS. Dostupné z URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/PostGIS>, [cit. 2013-04-25].

- [Wikd] PostgreSQL. Dostupné z URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/PostgreSQL>, [cit. 2013-04-25].
- [WY04] Wu, Q.; Yu, Y.: Feature matching and deformation for texture synthesis. *ACM Trans. Graph.*, Srpen 2004: s. 364–367, ISSN 0730-0301.
URL <http://doi.acm.org/10.1145/1015706.1015730>
- [ČS10] ČSN-730415: *Geodetické body*. Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [ČS11] ČSN/EN/ISO-19111: *Geografická informace - Vyjádření prostorových referencí souřadnicemi*. Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

Příloha A

```
1 CREATE OR REPLACE FUNCTION dataz_tps_raster(tab character varying, col character
    varying, numx integer, numy integer, srid integer, zoom numeric)
2     RETURNS raster AS
3     $$
4     DECLARE
5
6     outr raster;
7     myrec record;
8     x float;
9     y float;
10    h integer;
11    w integer;
12    minx numeric;
13    maxx numeric;
14    miny numeric;
15    maxy numeric;
16    xsize numeric;
17    ysize numeric;
18    minval numeric;
19    maxval numeric;
20    k numeric;
21    n integer;
22    box box2d;
23    vec_V double precision[];
24    fun_u numeric;
25    distance numeric;
26    p geometry;
27    the_p varchar[];
28    i int8;
29    point_a varchar[] := array[''];
30    result numeric;
31    vec_K double precision[];
32    vec_l double precision[];
33    vec_x double precision[];
34    vec_y double precision[];
35    mat_K double precision[][];
36    vec_S double precision[];
37    a1 numeric;
38    a2 numeric;
```

```

39  a3 numeric;
40  sum numeric;
41  BEGIN
42  EXECUTE 'SELECT ST_extent(ST_transform(the_geom, ' || srid || ')) FROM ' || tab
      INTO box;
43
44  minx := st_xmin(box) - zoom;
45  maxx := st_xmax(box) + zoom;
46  miny := st_ymin(box) - zoom;
47  maxy := st_ymax(box) + zoom;
48  minx := round(minx::numeric,2);
49  maxx := round(maxx::numeric,2);
50  miny := round(miny::numeric,2);
51  maxy := round(maxy::numeric,2);
52  xsize := (maxx - minx) / numx;
53  ysize := (maxy - miny) / numy;
54  xsize := round(xsize::numeric,4);
55  ysize := round(ysize::numeric,4);
56
57  outr := ST_AddBand(ST_MakeEmptyRaster(numx, numy, minx, maxy, xsize, -ysize, 0,
      0, srid), '32BF'::text);
58
59  h := ST_Height(outr);
60  w := ST_Width(outr);
61
62  EXECUTE 'SELECT COUNT(*) FROM ' || tab INTO n;
63
64  i := 1;
65
66  FOR myrec IN EXECUTE 'SELECT the_geom, ' || col || ' as val FROM ' || tab LOOP
67      point_a[i] := ST_AsText(myrec.the_geom);
68      i := i + 1;
69      point_a[i] := (myrec.val);
70      i := i + 1;
71  END LOOP;
72  FOR j IN 1..n LOOP
73      FOR k IN 1..n LOOP
74          IF (j = k) THEN
75              fun_u := 0;
76          ELSE

```

```

77         distance := ST_Distance(ST_Transform(ST_PointFromText(point_a[j * 2
78             - 1], ST_SRID(myrec.the_geom)), srid),
79         ST_Transform(ST_PointFromText(point_a[k * 2 - 1], ST_SRID(myrec.
80             the_geom)), srid));
81         IF distance = 0 THEN
82             fun_u := 0;
83             EXIT;
84         END IF;
85         fun_u := (distance^2 * log(distance));
86         END IF;
87         IF (j = 1 AND k = 1) THEN
88             vec_k := array[fun_u];
89         ELSE
90             vec_k := dataz_create_vector(vec_k, fun_u);
91         END IF;
92     END LOOP;
93 END LOOP;
94 mat_k := dataz_create_matrix(vec_k, n);
95 FOR j IN 1..n LOOP
96     IF (j = 1) THEN
97         vec_1 := array[1];
98         vec_x := array[ST_X(ST_PointFromText(point_a[j * 2 - 1], ST_SRID(myrec.
99             the_geom)))];
100        vec_y := array[ST_Y(ST_PointFromText(point_a[j * 2 - 1], ST_SRID(myrec.
101            the_geom)))];
102    ELSE
103        vec_1 := dataz_create_vector(vec_1, 1);
104        vec_x := dataz_create_vector(vec_x, ST_X(ST_PointFromText(point_a[j * 2 -
105            1], ST_SRID(myrec.the_geom))));
106        vec_y := dataz_create_vector(vec_y, ST_Y(ST_PointFromText(point_a[j * 2 -
107            1], ST_SRID(myrec.the_geom))));
108    END IF;
109 END LOOP;
110 mat_k := dataz_bind_vector(mat_k, vec_1, 1);
111 mat_k := dataz_bind_vector(mat_k, vec_x, 1);
112 mat_k := dataz_bind_vector(mat_k, vec_y, 1);
113 FOR j IN 1..3 LOOP
114     vec_1 := dataz_create_vector(vec_1, 0);
115     vec_x := dataz_create_vector(vec_x, 0);
116     vec_y := dataz_create_vector(vec_y, 0);
117 END LOOP;

```



```

112 mat_K := dataz_bind_vector(mat_K, vec_1, 2);
113 mat_K := dataz_bind_vector(mat_K, vec_x, 2);
114 mat_K := dataz_bind_vector(mat_K, vec_y, 2);
115 FOR j IN 1..(n + 3) LOOP
116     IF (j = 1) THEN
117         vec_V := array[point_a[j * 2]];
118     ELSE
119         IF (j <= n) THEN
120             vec_V := dataz_create_vector(vec_V, (point_a[j * 2]::numeric));
121         ELSE
122             vec_V := dataz_create_vector(vec_V, 0);
123         END IF;
124     END IF;
125 END LOOP;
126 vec_S := dataz_solve_matrix(vec_V, mat_K);
127
128 a1 := dataz_return_value(vec_S, (n + 1));
129 a2 := dataz_return_value(vec_S, (n + 2));
130 a3 := dataz_return_value(vec_S, (n + 3));
131
132 result := 0;
133 FOR i IN 1..h LOOP
134     FOR j IN 1..w LOOP
135         sum := 0;
136         p = ST_PointFromText('POINT(' || (ST_Raster2WorldCoordX(outr, j) +
137             xsize/2) || '
138             ' || (ST_Raster2WorldCoordY(outr, i) - ysize/2) || ')', ST_SRID(outr));
139         FOR k IN 1..(array_upper(point_a, 1) / 2) LOOP
140             distance := ST_Distance(p, ST_Transform(ST_PointFromText(point_a[
141                 k * 2 - 1],
142                 ST_SRID(myrec.the_geom)), srid));
143             IF distance = 0 THEN
144                 sum := point_a[k * 2];
145                 EXIT;
146             END IF;
147             fun_u := (distance^2 * log(distance));
148             sum := (sum + (dataz_return_value(vec_S, k) * fun_u));
149         END LOOP;
150         result := (a1 + (a2 * ST_X(p)) + (a3 * ST_Y(p)) + sum);
151         outr := ST_SetValue(outr, j, i, result);
152     END LOOP;

```

```
151 END LOOP;  
152 RETURN outr;  
153 END;  
154 $$  
155 LANGUAGE plpgsql VOLATILE;
```

Příloha B

```
1 CREATE OR REPLACE FUNCTION dataz_solve_matrix(vec double precision[], mat double
  precision[][])
2 RETURNS double precision[] AS
3 $BODY$
4 v1 <- solve(mat) **% vec
5 return(v1)
6 $BODY$
7 LANGUAGE plr STRICT;
```

Příloha C

```
1 CREATE OR REPLACE FUNCTION dataz_create_matrix(data double precision[], size
   integer)
2 RETURNS double precision[][] AS
3 $BODY$
4 mat1 <- matrix(data,size)
5 return(mat1)
6 $BODY$
7 LANGUAGE plr STRICT;
```

Příloha D

```
1 CREATE OR REPLACE FUNCTION dataz_bind_vector(mat double precision[][], vec double
    precision[], i integer)
2 RETURNS double precision[][] AS
3 $BODY$
4 if (i == 1)
5 mat1 <- rbind(mat, vec)
6 else if (i == 2)
7 mat1 <- cbind(mat, vec)
8 return(mat1)
9 $BODY$
10 LANGUAGE plr STRICT;
```

Příloha D

Adresářová struktura přiloženého CD:

- detaily_oblasti

- oblast1.pdf

- oblast2.pdf

- oblast3.pdf

- oblast4.pdf

- oblast5.pdf

- oblast6.pdf

- oblast7.pdf

- grafy

- identicke_body

- * graf_id1.pdf

- * graf_id2.pdf

- * graf_id3.pdf

- * graf_id4.pdf

- * graf_id5.pdf

- * graf_id6.pdf

- * graf_id7.pdf

- porovnani_cuzk

- * graf_cu1.pdf

- * graf_cu2.pdf

- * graf_cu3.pdf

- * graf_cu4.pdf

- * graf_cu5.pdf

- * graf_cu6.pdf

- * graf_cu7.pdf

- vynechani_bodu
 - * graf_vy1.pdf
 - * graf_vy2.pdf
 - * graf_vy3.pdf
 - * graf_vy4.pdf
 - * graf_vy5.pdf
 - * graf_vy6.pdf
 - * graf_vy7.pdf
- ntv_grid
 - oblasti_arcgis
 - * ntv_oblast1a.gsb
 - * ntv_oblast2a.gsb
 - * ntv_oblast3a.gsb
 - * ntv_oblast4a.gsb
 - * ntv_oblast5a.gsb
 - * ntv_oblast6a.gsb
 - * ntv_oblast7a.gsb
 - oblasti_proj
 - * ntv_oblast1.gsb
 - * ntv_oblast2.gsb
 - * ntv_oblast3.gsb
 - * ntv_oblast4.gsb
 - * ntv_oblast5.gsb
 - * ntv_oblast6.gsb
 - * ntv_oblast7.gsb
- text_dp
 - diplomova_prace.pdf
 - diplomova_prace.tex