

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

Jaroslav HENDL

**POKROČILÉ TECHNIKY VÝPOČTU FRAKTÁLNÍ
DIMENZE V GEOVĚDÁCH**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Miroslav Rypka, Ph.D.

Olomouc 2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci bakalářského studia oboru Geoinformatika a geografie vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Miroslava Rypky, Ph.D.

Všechny použité materiály a zdroje jsou citovány s ohledem na vědeckou etiku, autorská práva a zákony na ochranu duševního vlastnictví.

Žádná poskytnutá ani vytvořená Digitální data nebudu bez souhlasu školy poskytovat.

V Olomouci 19. srpna 2014

podpis_____

Děkuji vedoucímu práce Miroslavu Rypkovi za podněty a připomínky při vypracování práce. Dále děkuji RNDr. Jaroslavu Burianovi za rady ohledně získání a úpravy dat.

Vložený originál **zadání** bakalářské/diplomové práce (s podpisy vedoucího katedry, vedoucího práce a razítkem katedry). Ve druhém výtisku práce je vevázána fotokopie zadání.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	6
ÚVOD	7
1 CÍLE PRÁCE.....	8
2 POUŽITÉ METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ	9
2.1 Použitá data	9
2.2 Použité programy	9
2.3 Postup zpracování	9
3 FRAKTÁL.....	11
4 FRAKTÁLNÍ GEOMETRIE	11
4.1 Fraktální dimenze.....	11
4.2 Zvolené dimenze	12
4.2.1 Topologická dimenze.....	12
4.2.2 Pokrývací dimenze (box-counting dimension).....	12
4.2.3 Korelační dimenze (Correlation dimension)	13
4.2.4 Lakunarita	14
5 FRAKTÁLY A GEOGRAFIE	16
5.1 Fraktály ve fyzické geografii	16
5.2 Fraktály v socio-ekonomické geografii	17
6 SLEDOVANÁ MĚSTA.....	20
6.1 Geografie a geomorfologie vybraných měst	20
6.2 Rozdělení Měst.....	22
7 ZDROJE A ÚPRAVA DAT.....	24
8 ALGORITMY.....	26
9 PRAKTICKÉ VÝPOČTY	27
9.1 Případová studie lakunarity	27
9.2 Případová studie pokrývací dimenze	30
9.3 Případová studie Korelační dimenze.....	33
9.4 Vztahy mezi dimenzemi.....	36
10 DISKUZE	38
11 ZÁVĚR	39
12 POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	40
SUMMARY	
PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
ČSÚ	Český statistický úřad
ESRI	Environmental System Research Institute
GIS	Geografický informační systém
TM	Thematic mapper
TMS	Tiger Map Service
WMS	Web Map Service

ÚVOD

Fraktály ve vědě jsou poměrně novou disciplínou, jejíž definiční znalost a popularita roste teprve od druhé poloviny 20. století. Přesto fraktály mají, i za tak krátkou dobu, kdy byly definovány, poměrně významnou roli pro společnost. Fraktály mají využití pro řadu různých oborů.

Fraktály a především fraktální dimenze tedy nejsou výhradně matematickou či fyzikální disciplínou, ale plně etablovanou v odlišných oborech užívanou metodou. Výpočet fraktálních dimenzí v současnosti má značně zastoupení v medicíně, materiálovém inženýrství, ale má i využití pro takzvané fraktální antény, jejichž kompilovaná struktura umožňuje příjem více frekvenčních pásem.

V geografii a urbanismu zaujímají fraktály také pevné místo. Jejich dimenze jsou používány (především v zahraniční literatuře), jak pro výpočty ve fyzické geografii, tak i v socio-ekonomické geografii. Existuje několik různých programů a kódů pro výpočet rozmanitých dimenzí.

Jak můžeme vidět, problematika fraktálu je zajímavou a ne úplně probádanou oblastí. Tato práce má za úkol porovnat algoritmy vzniklé v programu Matlab a dokázat, že zástavba a komunikace tvořící město mají fraktální dimenzi, která se dá kvantifikovat a můžeme je mezi sebou statisticky porovnávat.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s problematikou fraktální dimenze a způsoby jejího chápání. Dalším cílem je, na základě doporučené literatury, provedení rešerše, a využití dimenzí v geovědách. Nabyté poznatky se zhodnotí při praktických výpočtech na snímcích měst. Pokusem se také posoudí vhodnost jednotlivých způsobů výpočtu fraktální dimenze k popisu složitosti měst a jejich vývoje. Výsledkem bude pochopení a úskalí různých možností výpočtu fraktální dimenze a její praktické použití v rámci geověd.

2 POUŽITÉ METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

2.1 Použitá data

Veškerá obrazová data socioekonomického charakteru (komunikace a sídla) pro Českou republiku byla získána ve vektorovém formátu ze serveru Geofabrik¹. Server slouží jako databáze dat všech kontinentů pro Open street map (OSM), kde jsou tato data volně stažitelná pro nekomerční účely, pokud je jejich původ uveden ve zdrojích. Pro výpočty fraktálních dimenzí vektorový formát dat není vhodný, tudíž bylo nezbytné data konvertovat na rastrový formát TIFF a JPG v souřadnicovém systému GCS_WGS_1984. Pro oříznutí hranic měst byly digitalizovány hranice měst nad WMS mapou ze serveru ČUZK.

2.2 Použité programy

Veškerá úprava dat (konverze) byla provedena v programu ArcGIS 10.1 od společnosti ESRI (Environmental System Research Institute). Pro tvorbu a úpravu algoritmů bylo zvoleno prostředí MATLAB r2012a. Všechny statistické výpočty probíhaly v programovacím jazyku R uživatelského prostředí RStudio. Výsledky byly zpracovány v programu Microsoft Office Excel 2007. Práce byla sepsána v programu Microsoft Office Word 2007.

2.3 Postup zpracování

Prvním krokem bylo zajištění literatury (domácí i zahraniční) z důvodu seznámení se s problematikou fraktálu a jeho dimenzí. Následovala teoretická část, která byla věnovaná vysvětlení fraktálu, fraktální geometrii a fraktálním dimenzím. Dalším krokem byla tvorba rešerší, která zahrnovala dosavadní použití algoritmů v geografii a geovědách. Posléze proběhlo hledání vhodných dat a výběr vhodných dimenzí pro výpočty GIS. Po konzultaci s vedoucím práce byly zvoleny tyto tři dimenze:

1. **pokrývací dimenze**
2. **korelační dimenze**
3. **lakunarita**

Poté následovalo rozhodnutí, pro která města budou dané algoritmy použity. Zvolená města této bakalářské práce byla města České republiky, která mají počet obyvatel od 50 000 do 170 000, kvůli statistickému porovnání jejich dimenzí.

Vhodná data pro všechna města byla získána ze serveru GEOFABRIK. Tato data stažená z tohoto serveru musela být konvertována z vektorového formátu.shp do vhodných rastrových formátů.tiff a.jpg (viz kapitola 7).

¹ www.geofabrik.de

Některé algoritmy této práce částečně pocházejí a byly upraveny ze stránky Mathworks a některé byly vytvořeny. Pro použití a tvorbu algoritmů byla také nastudována příručka matematického programu Matlab. V tomto programu byly veškeré algoritmy vyhotoveny.

Poslední krok spočíval ve statistických analýzách v programu RStudio mezi jednotlivými dimenzemi.

Celkem bylo provedeno 108 výpočtů, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulkách č. 2 až 7. Výsledky statistických analýz jsou znázorněny v tabulkách č. 8-10. Výsledné dimenze pro všechny tři algoritmy byly také znázorněny v grafech 1-6. Poté následovala tvorba webových stránek.

3 FRAKTÁL

Co je vlastně fraktál? Existuje mnoho definic tohoto útvaru. Přestože definovat ho je obtížné, nejjednodušeji se dá určit nejspíše slovy jeho objevitele: *fraktál lze nejjednodušeji definovat jako nekonečně členitý útvar* (Mandelbrot 2003). Jednou z nejdůležitějších vlastností fraktálu jsou tvary, u nichž detail reprodukuje část a část reprodukuje celek. Tento stav se podle Mandelbrota označuje jako soběpříbuznost nebo také soběpodobnost.

Pojem fraktál definoval (spolu s dalšími matematiky) vědec a matematik Benoit Mandelbrot v druhé polovině 20. století, Mandelbrot tyto geometrické objekty nazval Fraktál, což je odvozené slovo z latinského slova *fractus*, jenž znamená zlomený, eventuálně též rozbitý.

Fraktální tvary, jako geometrické útvary, byly známy už dlouhou dobu před samotným objevením. Ovlivňovaly a inspirovaly řady umělců a architektů v jejich umělecké a okrasné tvorbě, i když tento útvar nebyl v dřívějších dobách vysvětlen. Známa byla před objevením fraktálu tzv. Kochova křivka (souvislá, ale bez jakékoliv derivace) a některá další „matematická monstra“. Fraktály doprovází přírodní stavbu (jako nejčastější příklad fraktálního tvaru se uvádí list kapradí). Z fyzikálních jevů je možno uvést jako typický fraktální tvar blesk. Fraktály jsou, ať už v přírodě či uměle vytvořeny nejen pro okrasu, ale najdeme je všude tam, kde je potřeba uspořít místo nebo ustát velký tlak na konstrukci. Více o problematice charakteristiky fraktálu a jeho rozdělení zmiňuje práce *Softwarové možnosti výpočtu fraktální dimenze geografických jevů* (Čepová 2012).

4 FRAKTÁLNÍ GEOMETRIE

Popisem fraktálu se zabývá fraktální geometrie, která jako vědní disciplína vznikla propojením ezoterické matematiky s dalšími vědami v druhé polovině 20. století. Tato disciplína dávala odpovědi na otázky typu jak změřit pobřeží Bretaně, jak charakterizovat tvar pobřeží a řek, jak stanovit rychlost větru. V posledních deseti letech se intenzivně zkoumá složitost internetové sítě a mnohé jiné, které se zdály do té doby neřešitelnými úlohami (Mandelbrot 2003).

Měření pobřeží sepsal a zpracoval, jako první Richardson a praktikoval na francouzském ostrově Korsika. Přičemž zjistil, že čím je měřítko mapy větší, tím se zvětšuje i detail pobřežní linie. Použil k tomu obvodovou metodu. Na jeho výzkum navázal i Mandelbrot, který toto vyzkoušel v praxi na Britských ostrovech a potvrdil předchozí Richardsonovy hypotézy.

4.1 Fraktální dimenze

Jednou z nejdůležitějších charakteristik fraktální geometrie a fraktálního objektu je jeho fraktální dimenze, která se označuje písmenem D (Mandelbrot 2003). Dokud B. Mandelbrot nepřišel s teorií, že nejsou jen celočíselné dimenze (jak bylo poznamenáno výše, *fractus* znamená zlomený, tudíž neceločíselná hodnota), používala se pouze jednoduchá

celočíslná Euklidovská geometrická zákonitost, která je nepraktická a nemůže simulovat složitější děje a stavbu reálného světa. Po tomto poznatku vědci a matematici přišli s mnohými dimenzemi, jak celočíslnými, tak i neceločíslnými. Pouze jen některé jsou však vhodné pro reálné použití v geografii a v geovědách.

4.2 Zvolené dimenze

Pro výpočty fraktální dimenze musely být vybrány ty vhodné dimenze. Úkolem bylo vyhodnotit, jaké dimenze jsou vhodné k řešení pro výpočty na dostupných datech. Poněvadž ne všechny dimenze jsou použitelné pro praktické výpočty. Po dlouhém výběru na základě rešerší a domluvě s vedoucím práce byly do výpočtů zvoleny následující dimenze v následných podkapitolách. U všech použitých dimenzí v této práci byl uveden vzorec pro výpočet.

4.2.1 Topologická dimenze

Tato celočíslná dimenze není vhodná pro složitější výpočty (je zde zahrnuta pouze pro pochopení dimenzí), ale lze na této dimenzi demonstrovat hodnoty fraktálních dimenzí geometricky celočíslných hladkých tvarů. Topologická dimenze pro bod je 0, přímka má topologickou dimenzi 1, plný čtverec má dimenzi 2 a konečně topologická dimenze 3 označuje krychli. Tato znalost se hodí pro pozdější výpočty a pochopení výsledků. Tato dimenze se označuje jako D_T

4.2.2 Pokrývací dimenze (box-counting dimension)

S touto dimenzí přišel Pasquale Nardone. Dimenze používá k výpočtu hodnot pokrytí čtverci nebo disky. Typy disků pro výpočet jsou samostatné disky nebo spojené disky s průnikem. Dvojice disků s nenulovým průnikem se označují dublety, trojice disků se vzájemným nenulovým průnikem jsou triplety a čtveřice těchto disků mající vzájemný průnik jsou kvadruplety.

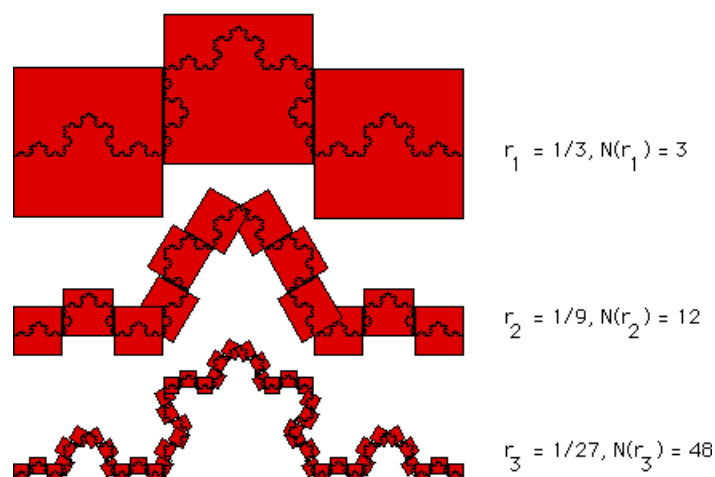
Použití čtverců je běžnější způsob v praxi. Pro pokrývání se používá čtvercová síť složená ze čtverců o určité délce hran. Způsob použití čtvercové metody je aplikován na obrázku č. 1.

Algoritmus pokrývací dimenze je jednoduchý a výpočetně nenáročný, avšak vyžaduje velký prostor paměti počítače (pro uchování adres všech boxů) a velké množství vstupních dat.

Podle Raghavendra. a Dutt (2010) je vzorec pro pokrývací dimenzi

$$D_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log(N(\epsilon))}{\log \frac{1}{\epsilon}} \quad (1)$$

Kde D_0 označujeme, jako pokrývací dimenze, $N(\epsilon)$ je hodnota „plných boxů“ (disků, či čtverců) o velikosti ϵ . Výsledné hodnoty dimenze jsou nezáporná čísla.



Obrázek 1: Pokrytí Kochovy křivky čtverci, ukazuje různou velikost čtverců velikosti ϵ (na obrázku označeno jako r) „plných boxů“ (zdroj: <http://classes.yale.edu/fractals/fracanddim/boxdim/KochBoxDim/KochBoxDim.html>.)

4.2.3 Korelační dimenze (Correlation dimension)

Korelační dimenze není v geografii tolik rozšířená jako zbylé dvě dimenze. Definovali ji Grassberger a Proccacia v 80. letech 20. století. Výpočet dimenze se používá k získání co nejvíce informací z dat.

Pro výpočet korelační dimenze slouží jednoduchý algoritmus, na rozdíl od pokrývací dimenze, nenáročný na paměť. Čas výpočtu je sice delší, jelikož pro výpočet každého bodu roste čas výpočtu, neboť je potřeba množinu konečného počtu bodů převést do dvojrozměrného prostoru. Kolem jakéhokoliv bodu této množiny se vynese kružnice o poloměru ϵ a spočítají se všechny body uvnitř této kružnice. Tento postup se provede pro všechny body pro co nejvíce poloměrů (Rypka 2008).

Korelační dimenzi získáme ze vzorce (Rypka 2008)

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log(C_2(\epsilon))}{\log \epsilon} \quad (2)$$

Kde D_2 označuje korelační dimenzi, $C_2(\epsilon)$ je druh korelace mezi dvěma body, s rostoucím poloměrem čtverce (kružnice) poloměru ϵ .

4.2.4 Lakunarita

Lakunaritu neboli takzvanou „děrovitost“ poprvé popsal B. Mandelbrot. *Lakunarita udává, jak moc je v obrazci zaplněn prostor* (Čepová 2012). Lakunaritu odvodil z anglického slova „lake“ česky je můžeme označit za tzv. „jezera“. Není to klasická dimenze, jako předchozí dvě dimenze. Lakunaritu označujeme A nebo L . Mandelbrot ji popsal jako: *charakteristika fraktálu se stejnými dimenzemi s různými texturními vzhledy* (Mandelbrot 2003). Z této definice můžeme usoudit, že její úloha je kvantifikovat především texturu či heterogenitu obrazu. Tedy neceločíslnou hodnotu, kterou měříme odchylku geometrické struktury. Hodnota lakunarity narůstá s hrubostí testovaného povrchu. Výsledkem výpočtu lakunarity, jako v předchozích dvou případech, jsou nezáporné hodnoty.

Vzorců a metod pro výpočty lakunarity je hned několik druhů. Pro snímky v odstínech šedi se používá Vossova metoda (Dong 2000). $P(m, L)$ je pravděpodobností, že intenzita bodů m uvnitř boxové velikosti L je koncentrována okolo libovolného bodu ve snímku.

$$\sum_{i=1}^N P(m, L) = 1 \quad (3)$$

kde N je hodnota možných bodů v boxu L .

$$M(L) = \sum_{m=1}^N mP(m, L) \quad (4)$$

a

$$M^2(L) = \sum_{m=1}^N m^2 P(m, L) \quad (5)$$

lakunarita je definována jako

$$L = \frac{M^2(L) - (M(L))^2}{(M(L))^2} \quad (6)$$

Allain a Cloitre navrhli v roce 1991 zřejmě nepoužívanější metodu pro výpočet lakunarity. tzv. „gliding box“ algoritmus pro výpočet lakunarity. Postup podle Dong (2000) probíhá tak, že box velikosti r se „vznáší se“ (anglicky „glides“) nad snímkem ve všech možných směrech. Tento postup (algoritmus) lze použít pouze pro binární data² (kde 0 je pro prázdná místa a pro obsazená 1).

² Snímky pouze 1 bitové

$$\Lambda(r) = \frac{S_s^2(r)}{\bar{S}^2(r)} + 1 \quad (7)$$

Kde $\bar{S}(r)$ je průměr a $S_s^2(r)$ variance hodnot obsazených sítí velikosti r (velikost „*gliding box*“ $r \times r$)

5 FRAKTÁLY A GEOGRAFIE

Už od objevení fraktálu byla snaha použít tento objev v praktické aplikaci geografie. Prvními pokusy byly právě pokusy výpočtu délky pobřeží Korsiky a Velké Británie.

S rozvojem hardwaru počítače a moderního GIS softwaru vznikly vhodné podmínky pro tvorbu rozmanitých analýz a různých simulací dat, které pomáhají pochopit jevy zemského povrchu, úkazy na nebeské sféře. Výpočty poodhalující i socioekonomické jevy, které nejsou na první pohled patrné.

Samozřejmě, že použití výpočtů fraktálů v geografii a v geovědách limitovaly vhodné algoritmy fraktální dimenze a data. V současné době má vliv na rozmach výzkumu v geografické sféře dostupnost digitálních satelitních snímků a před nimi snímky z leteckého snímkování, které byly zprvu černobílé, později barevné a nakonec digitální. S těmi všemi daty je možno pracovat při výpočtu fraktálních dimenzí. Dalšími daty vhodnými pro zkoumání se naskýtají například data z databází ze sčítání lidí, historické mapy (časové intervaly) a různé vektorové databáze, ale pro jejich použití je třeba jejich úprava.

Fraktál splňuje pro simulaci terénu a povrchu podmínku, že má prostorový vzhled. Modelování povrchů fraktálu v GIS tedy nic nebrání.

5.1 Fraktály ve fyzické geografii

Fyzická geografie a fraktály se používají k pochopení a odhadům meteorologických a hydrologických jevů v přírodě. Můžeme se tedy setkat s rozmanitými disciplínami, kde bylo použito výpočtů fraktálních dimenzí.

V článku se věnoval **Goodchild** (1987) některým autorům, kteří se zajímali o tuto problematiku. Postupy jsou zajímavé i z dnešního hlediska. Burrough aplikoval fraktálové modely k prostorovému rozložení půd. Sám Mandelbrot se věnoval této aplikaci, představil fraktální analýzy turbulencí v kapalině. Ve spolupráci s Wallisem definoval fraktální funkce k modelování hydrologických časových řad. Woronow charakterizoval nepravidelné útvary pokrývky Marsu měřením obrazce obvodu plochy upravením na fraktální křivky. Ke kompenzování měřítka odhadované délky hranice, vytvořil Woronow nekonečně malý útvar měřený dělením hranice plochou.

Goodchild se věnoval také problematice DPZ v článku **Goodchild** (1980), která je zajímavá z pohledu na zlepšování přesnosti dat z DPZ. Autor došel k závěru, že fraktální dimenze je unikátní v předpovědi důsledku generalizace a prostorového vzorkování pro pixely dálkového průzkumu Země. Nalezl pro snímky Landsat správné klasifikování k přítomnosti nebo absenci zalesněné plochy. Celková zalesněná plocha je vypočtena počítáním pixelů, ale velikost pixelů bude ovlivňovat přesnost odhadu. Tato přesnost odhadu bude mnohem menší, pokud je zalesněná plocha roztroušena v malých částech na snímku, než pokud je lesní plocha koncentrována

v jednom jednoduše hraničním kruhovitým útvaru. Standardní chyba jako procento plochy odhadu je úměrná $\alpha \left(\frac{1-D}{4}\right)$ kde α je plocha pixelu a D je charakteristický parametr fenoménu. Standardní chyba je pro vysoce rozptýlenou lesní plochu $\alpha^{\frac{1}{2}}$. Pro jeden kruhovitý zalesněný tvar s hladkým rozhraním je pak chyba $\alpha^{\frac{3}{4}}$.

Pro efektivní způsob interpretace prostorového vzorkování vodní sítě v Čínské lidové republice zkoumali **Ting a kol.** (2007) pomocí algoritmů lakunarity „*gliding box*“ a 3TLQV odvodňování říční pánve Jiu Yuangou. Data použili DEM s 5m rozlišením buňky, která konvertovali na Grid DEM složený z 1 a 0 (1 reprezentující vodní tok a 0 nodata). Výsledky ukázaly při těchto výpočtech algoritmus 3TLQV přesnější než „*gliding box*“. Autoři aplikovali „*gliding box*“ pro interpretaci prostorového vzorkování v každém analyzovaném měřítku a 3TLQV použili pro získání přesných rozdílových bodů. Z výsledků došli k úsudku, že je to efektivní způsob pro interpretaci prostorového vzorkování a může být použit i pro jiné sítě, jako jsou například hřbetnice.

V bakalářské práci *Softwarové možnosti výpočtu fraktální dimenze geografických jevů* (Čepová 2012) byly zkoumané případové studie dvou říčních sítí a hranic dvou měst na různých typech programů vypočítávající hodnoty fraktální dimenze. Zároveň byly tyto programy porovnány a hodnoceny.

5.2 Fraktály v socio-ekonomické geografii

Pro trvale udržitelný růst měst je nutné analyzovat charakteristiky a vývoj územního celku. Toto si uvědomuje stále více urbanistů. Jedni, kdo se tomuto tématu věnovali a zkoumali, byli **Zhao a Feng** (2002). Jejich práce analyzovala a studovala snímky pro město Shaoxing³ v Čínské lidové republice. Autoři porovnávali výřezy TM snímků ze dvou různých časových období, konkrétně roky 1984 a 1997. Po provedení spektrální charakteristiky snímků, získali informace o sledovaném území na základě různých spektrálních hodnot obou časových řad. Posléze převedli výsledek do vektoru. Převedením do vektorového formátu získali atributovou tabulku, pomocí které vypočítali agregační dimenzi, dále pro nás zajímavou prostorovou korelační dimenzi a fraktální dimenzi D . Agregační dimenze označuje disperzi nebo agregaci stavu okolo centra území. Pomocí korelační dimenze výše uvedení autoři zjišťovali trvalý růst městské agregace. Fraktální dimenze D prostorového vzoru značí komplexnost a stabilitu, což zahrnovalo mj., jestli se zde nenachází Brown field⁴. Výsledky Agregační dimenze ukazovaly, hustotu výstavby, která klesá postupně okolo centra. Dále od centra se rozprostírala plocha s

³ Shaoxing město na východě Číny s 5 000 000 obyvateli

⁴ Brown field je urbanistické označení pro nepoužívané plochy, pozemky nebo jednotlivé budovy, jejichž existence má negativní dopad.

prostorovou optimalizovanou strukturou. Korelační dimenze poodhalovala neproporcionálnost rozšíření města, inklinaci k agregaci u dopravních cest. S rychlým ekonomickým růstem města roste neudržitelně nová výstavba, prostorový vzor je více komplexní a nestálý než v jiných čínských městech.

Doposud používané metody lakunarity už nedostačují pro zachycení jevů na zemském povrchu. Někteří autoři se snaží vymyslet nové metody nebo upravit stávající techniky pro její výpočet a porovnávají jejich přesnost s původními metodami. Různé algoritmy pro lakunaritu porovnávali v praxi **Myint a Lam** (2005) na multispektrálních snímcích z Ikonos se 4 m rozlišením ve spektru RGB a blízkého infračerveného záření pro město Norman s 94 000 obyvateli v Oklahomě. Město reprezentující suburbanizaci s land-cover plochami obchodními, industriálními, parky, zemědělstvím, obytnými budovami, školami a trvale zatravněnými plochami (rok 2000). Pro binární data použili „*gliding box*“. Na snímky v odstínech šedi aplikovali Vossovou metodu a novou triangulační hranolovou oblastní metodu založenou na irasthmické metodě, variogramu a triangulační hranolové metodě. Triangulační hranolová oblastní metoda byla nejpřesnější ze všech tří metod.

Dříve než **Myint a Lam** se věnoval tomuto tématu **Dong** (2000). Dong porovnával a popsal rozdílné druhy algoritmů lakunarity pro GIS. Vossovou metodou a novou metodou popsanou jako diferenciací „*gliding boxů*“ popsal algoritmy snímků ve stupních šedi. Pro binární data použil už několikrát zmíněný „*gliding box*“. Došel k závěru, že pro texturu binárních snímků i snímků ve stupních šedi je důležitý stupeň prostorové heterogenity. Nejpřesnější se projevila metoda založená na diferenciacích „*gliding boxů*“ určení lakunarity než metoda, kterou navrhl Voss.

Ve Spojených státech amerických (ve městě Houston, v okrese Harris) **Wu a Sui** (2001) z texaské univerzity porovnávali pomocí lakunarity obytné separování obyvatelstva na základě rozdílných ras (běloši, Hispánci, Afroameričani a Asiaty) a příjmů (nízko-příjmové, střední třída a vysoko-příjmové). Data byla použita z let 1980 a 1990. Chtěli potvrdit Wilsonovu hypotézu, která tvrdí, že obytná separace Spojených států amerických je vymezená příjmy nad rasou. Použili data ze sčítání lidu z obou sčítacích roků, která byla konvertována z vektorového formátu na rastrová. Pro výpočet lakunarity použili algoritmus „*gliding box*“. Výsledky autorů ukázaly, že Afroameričané jsou vysoce koncentrovanou skupinou uprostřed centra v obou dekadách. Bělošská populace klesala v centrech a naopak rostla na okrajích města. Celková populace Asiátů oproti ostatním skupinám, v roce 1980 klesala, ale v roce 1990 narůstala. Přesto se stala v obou sledovaných letech ze všech nejmenší. Hispánské obyvatelstvo bylo druhé největší v roce 1980, ale v roce 1990 kleslo až na třetí místo za Afroameričany a Asiáty. Poměr Hispánců v populaci byl vysoký blízko center v roce 1980 a do roku 1990 se jejich počet ještě zvětšil. Přestože Hispánci a Afroameričani se nachází v centru města, jejich výskyt se nepřekrýval. Ekonomická separace vysoko-příjmových skupin byla největší ze všech ostatních příjmových skupin. Vysoko-

příjmová skupina expandovala do více částí města, avšak pryč z center. Nízko-příjmová skupina se v roce 1990 stále více koncentrovala okolo centra. Střední třída se homogenně rozkládala napříč studovanou plochou. Výsledky ukázaly, že rasa je stejně dominantním faktorem při rozhodování výběru bydliště, stejně tak jako ekonomický příjem.

Z urbanistického hlediska se věnoval fraktálním dimenzím **Shen** (2001). Zkoumal dvacet největších měst Spojených států amerických. Na těchto dvaceti městech zkoumal vztahy mezi fraktální dimenzí, urbanizovanou plochou a počtem obyvatelstvem. Zvláště se věnoval městu Baltimore, které zkoumal v dvanácti časových intervalech od roku 1792 do roku 1992. Na městě Baltimore byla zkoumána vazba mezi fraktální dimenzí a městským růstem. Pro výpočty použil algoritmus pokrývací dimenze. Rastrové snímky měly formát PICT a byly stažené ze serveru TMS (Tiger Map Service). Výsledky z porovnávání časových intervalů města Baltimore ukazovaly, že čím bylo zastavěné území větší, tím se zvětšovala i hodnota jeho dimenze. Dále se ukázalo, že zatímco populace města může mít značné změny (růst či klesání) jeho urbanizované plochy obvykle narůstají. Výsledky dvaceti měst ukazovaly podobné hodnoty fraktální dimenze u měst s rozdílným počtem obyvatel (Dallas 3,805,838 a Chicago 7,642,330). Města s rozdílnou geografii mohou mít podobné hodnoty fraktální dimenze. Vnitrozemské město Dallas mělo velmi podobnou dimenzi jako město Chicago ohraničené z jedné strany vodní plochou. Fraktální dimenze se projevila jako vyhovující indikátor pro zjišťování urbanizovaných ploch, ale nevhodnou pro měření hustoty obyvatel v území.

6 SLEDOVANÁ MĚSTA

Vývoj měst má podle Sýkora a Mulíček (2012) čtyři etapy, které postihují v podstatě všechna města. Tyto etapy se nazývají urbanizace, suburbanizace, deurbanizace a reurbanizace. První fáze je urbanizace, při které se město rozrůstá, vzniká průmysl na okrajích města, lidé se do města stěhují. Druhou fází je suburbanizace, kdy se bydlení v centrech stává neúnosné a obyvatelé stěhují na okraje měst (tzv. periférií). V této fázi se v současné době nachází většina velkých českých měst. Toto platí i pro větší města všech ekonomicky vyspělých států světa. V rešerších této práce je zmíněna studie města Houston (toto město je použito jako příklad suburbanizace), kdy se bohatí lidé stěhují na okraje města a do center se stěhují nižší třídy, což má za následek úpadek centra. Deurbanizace je největší úpadek města, při němž dochází k hromadnému odchodu obyvatel z měst. Poslední fází je reurbanizace, což je návrat do měst, kdy jsou revitalizovaná centra měst. Všechny tyto fáze mají vliv na rozvoj či úpadek městské zástavby, které ovlivňují velikost dimenzí.

Tabulka 1 Sledovaná města a počet obyvatel k roku 2013. (data zdroj: Český statistický úřad)

	město	počet obyvatel
1	Plzeň	167 472
2	Liberec	102 113
3	Olomouc	99 471
4	Ústí nad Labem	93 747
5	České Budějovice	93 467
6	Hradec Králové	93 035
7	Pardubice	89 467
8	Havířov	77 371
9	Zlín	75 555
10	Kladno	68 551
11	Most	67 490
12	Opava	58 054
13	Karviná	57 842
14	Frýdek Místek	57 523
15	Jihlava	50 598
16	Teplice	50 330
17	Děčín	50 289
18	Karlovy Vary	50 172

6.1 Geografie a geomorfologie vybraných měst

Tato podkapitola byla věnována geografii a geomorfologii zvolených měst z tabulky 1. Všechna města jsou statutární.

Pro města České republiky je typické, že se většina z nich začala formovat nejpозději ve středověku, mimo sledovaných měst Most a Havířov, která vznikla na zelené louce v druhé polovině 20. století, respektive jejich historické jádro a historická zástavba byly srovnána se zemí. Pro rozvoj veškerých měst jsou důležité podle Baity a Longley (1994) přírodní a sociální překážky, které limitují rozvoj sídel. Mezi přírodní překážky můžeme řadit pohoří, vodní tok, vodní plochu aj. v případě světových aglomerací geologické podloží, zálivy atd. Mezi sociální překážky můžeme řadit především hranice státu, železnice, liniové stavby, chráněná krajinná území a mnohé další. Pro další rozvoj měst je nutné brát na tyto překážky zřetel. Proto byly tyto překážky vypsány níže. Geomorfologie je použita z Wikipedie⁵ a Demek (2006)

Rozbor:

České Budějovice se nachází v Jihočeském kraji na soutoku řek Vltava a Malše. Město leží v Jihočeské pánvi, která je poměrně rovinná.

Děčín se rozkládá podél řeky Labe. Město bylo založeno na Děčínské vrchovině (která je typická kaňony a stolovými horami), Českém Středohoří a Labských pískovců. Rozvoj města je ovlivněn dvěma chráněnými krajinnými oblastmi sousedící s městem CHKO Labské pískovce a CHKO České Středohoří.

Frýdek Místek je městem v Moravskoslezském kraji na rovině Ostravské pánvi, kterým protéká řeka Ostravice.

Město Havířov je nejmladším městem České republiky ležící v Moravskoslezském kraji. Spolu s dalšími městy Třinec, Karviná a Ostrava tvoří spolu konurbaci. Městem protékají řeky Lučina a Sušanka a leží na rovině Ostravské plošině.

Město Hradec Králové v Královéhradeckém kraji leží na soutoku řek Labe a Orlice v tzv. Labské nížině na rovině Východočeské tabuli.

Jihlava leží na stejnojmenné řece v kraji Vysočina. Město se rozkládá na ploché Křižanovské vrchovině.

Karlovy Vary v Karlovarském kraji leží na soutoku řek Ohře, Rolavy a Teplé. Na tvaru města má vliv členitá Karlovarská vrchovina, na které se rozprostírá.

Karviná v Moravskoslezském kraji leží na rovině Ostravské plošině. Sousedí přímo s Polskou republikou, tím je limitován další rozvoj směrem na východ.

Město Kladno ve Středočeském kraji se nachází na Pražské plošině, která je v této části rovinná. Město po roce 1989 opouští od průmyslové výroby a vznikají zde brownfields.

⁵http://cs.wikipedia.org/wiki/Geomorfologick%C3%A9_%C4%8Dlen%C4%9Bn%C3%AD_%C4%8Cesk%C3%A1_republika

Město Liberec se nachází v Libereckém kraji na Žitavské pánvi (někdy označované jako Liberecké pánvi). Leží na úpatí Jizerských hor a Kozích hřbetů. Městem protéká řeka Lužická Nisa a další menší říčky.

Město Most, nacházející se v Ústeckém kraji, se rozprostírá na rovinné Mostecké pánvi. Protéká jím řeka Bílina. Město muselo projít kvůli těžbě v druhé polovině 20. století bouřlivou proměnou, při níž bylo kvůli těžbě uhlí zbourána většina historické zástavby.

Město Olomouc v Olomouckém kraji se nachází na rovinném Hornomoravském úvalu. Na soutoku Moravy, Bystřice a Mlýnského potoka.

Opava se nachází v Moravskoslezském kraji na řece Opavě. Město leží na Zlatohorské vrchovině. V okolí města se rozprostírají Poopavské nížiny a výběžky Hrubého Jeseníku.

Město Pardubice se rozkládá na soutoku řek Labe a Chrudimky, v úrodné Labské nížině a stejně jako u Hradce Králové leží na celkem ploché Východočeské tabuli.

Město Plzeň vzniklo na Plaské pahorkatině na soutoku čtyř řek Mže, Radbuza, Úhlava a Úslava.

Teplice v Ústeckém kraji leží v kotlině mezi Krušnými horami a Českým středohořím. Teplicemi protéká řeka Bystřice.

Ústí nad Labem leží v Českém středohoří. Kolem města se rozkládá CHKO České středohoří.

Zlín ve Zlínském kraji leží na členité Vizovické vrchovině a protéká jím řeka Dřevnice.

6.2 Rozdělení Měst

Velikost zvolených měst je od 50 000 do 170 000 obyvatel. Toto rozmezí bylo vybráno z důvodu vhodného porovnávání jejich dimenzí mezi sebou a velikostí zastavěného území. Typy měst a jejich komunikace, které byly porovnány, byly subjektivně rozděleny podle toho jakou primární funkci plní (či plnila). Města byla roztržena celkem na 3 kategorie: 1. průmyslová, 2. residenční a historická a 3. vytvořená na zelené louce.

Průmyslová města

- **Frýdek Místek**
- **Karviná**
- **Kladno**
- **Opava**
- **Pardubice**
- **Plzeň**
- **Teplice**
- **Ústí nad Labem**
- **Zlín**

Rezidenční a historická města

- **České Budějovice**
- **Děčín**
- **Hradec Králové**
- **Jihlava**
- **Karlovy Vary**
- **Liberec**
- **Olomouc**

Města postavená na zelené louce

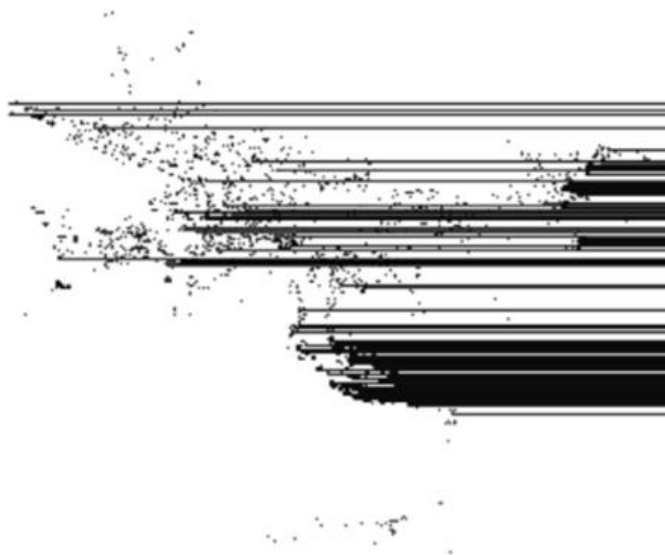
- **Most**
- **Havířov**

7 ZDROJE A ÚPRAVA DAT

Data pro bakalářskou práci byla použita z německého serveru Geofabrik. Server poskytuje data z Open street map zdarma ze všech světadílů (včetně Antarktidy). Pro použití těchto dat dostačuje uvést jejich původ ve zdrojích. Data ze serveru Geofabrik je možno stáhnout pro každý kontinent nebo pro jednotlivé státy. Nižší členění (kraj, ORP) pro Českou republiku nelze ze serveru získat. Avšak například Spolková republika Německo má data pro jednotlivé spolkové země.

Z výše uvedeného serveru lze získat data pro zástavbu, komunikace, vodní toky, železnice, landuse, krajinné prvky, obchody a další. Geofabrik slouží jako alternativa k placeným, nebo jinak právně omezeným datům. Myšlenka projektu se datuje do roku 2006, ale samotný projekt vznikl v roce 2011 v Karlsruhe v Německu. Server nabízí data ke stažení ve třech podobách (u některých zemí jen ve dvou formátech), a to v jedné formě vektorových dat *.shp a ve dvou formátech open street map *.osm a *.osm2. Na serveru je také možnost využít WMS služeb.

Prvním krokem v práci s daty bylo oříznutí vektorové zástavby katastrálními hranicemi měst, které byly nedigitalizovány. Pro výpočty algoritmů fraktální dimenze byla potřeba data v podobě matic složené z jedniček a nul, proto data musela být převedena do rastrových formátů, konkrétně *.jpg a *.tiff. Při konverzi nastal problém s topologií (dané zřejmě nedotahy a přetahy při digitalizaci uživateli), při přímém konvertování dat (*Arctoolbox* → *Conversation tools* → *feature to raster*) vznikl rastr s nežádoucími linkami přes zobrazované území, problém byl vyřešen konvertováním původního vektorového shapefile na linie (*ArcToolbox* → *Conversation tools* → *feature to line*). Poté následovalo konvertování těchto linií zpátky na polygony (*ArcToolbox* → *Conversation tools* → *line to polygon*), následným konečným převedením polygonů na rastr (*ArcToolbox* → *Conversation tools* → *feature to raster*). Posledním krokem bylo převedení dat (pro lakunaritu) na binární 0 a 1 (*ArcToolbox* → *raster reclass* → *reclassify*). Data takto upravená se pro potřeby této práce nezobrazovala správně pod podkladovou WMS mapou, tudíž bylo nezbytné definovat souřadnicový systém (*ArcToolbox* → *Projections and Transformations toolset* → *define projections*) na souřadnicový systém GCS_WGS_1984.



Obr. 3: Původní špatná konverze dat na rastrový formát



Obr. 4 ukázka použitých dat pro zástavbu města České Budějovice



Obr. 5 ukázka použitých dat pro komunikaci města České Budějovice

8 ALGORITMY

Výběr softwaru pro tvorbu algoritmů byl ovlivněn jeho použitelností v praxi při počítání fraktální dimenze a způsobilostí pracovat s rastrovými daty, upravenými v programu ArcGIS 10.1 jako jsou data typu JPEG a TIFF. Matlab naplňuje tyto podmínky, navíc dovede pracovat i s dalšími rastrovými typy dat zajímavými pro GIS, jako jsou GeoTIFF, USGS DEM, ETOPO aj. Pro úpravu algoritmu byla užitečná internetová stránka mathworks⁶.

Algoritmus pro lakunaritu byl vybrán „*gliding box*“, jelikož z rešerše vyšlo, že je to jedna z nejčastěji používaných metod při výpočtu lakunarity a také proto, že data použitá v této práci jsou v binární soustavě. Sám algoritmus byl pro práci s daty stažen a použit z webové stránky Mathworks, kde ho vytvořil J. Vaadakkan. Kód je volně použitelný pro výpočty. Pro spuštění skriptu je důležité, aby zkoumaná data byla ve stejné složce jako spouštěcí algoritmus.

Algoritmus pokrývací dimenze byl částečně modifikován z webové stránky Mathworks, stejně jako algoritmus pro lakunaritu. Avšak pro správné fungování musel být algoritmus opraven a upraven, hlavně v použití pro binární data. Taktéž musela být upravena rychlost algoritmů, která spočívala ve zmenšení vstupního rastru. Rastr je při výpočtu zmenšen na poloviční velikost. Algoritmus funguje jen na data s příponou *.jpg. Rastry JPG jsou složeny ze tří matic RGB, avšak pro potřeby výpočtu dostačuje pouze jedna matice, protože data jsou ve stupních šedi.

Algoritmus korelační dimenze byl vytvořen pro výpočet binárních dat. Stejně jako u algoritmu pokrývací dimenze byl vytvořen vstupní algoritmus, který rastr zmenší a pracuje s jednou maticí z rastru JPG.

Principy fungování všech algoritmů jsou popsány v kapitole 4. Všechny použité kódy algoritmů jsou k nahlédnutí v příloze na DVD.

⁶ www.mathworks.com

9 PRAKTICKÉ VÝPOČTY

Nejprve je nutné, pro pochopení hodnot, se vrátit ke geometricky jednoduchým tvarům, kde linie má hodnotu 1 a plocha hodnotu 2. Z toho vyplývá, že výsledky, které vzejdou z výpočtů všech dimenzí, musí vycházet mezi hodnotami 1 a 2, přestože, jak komunikace, tak zástavba není dokonalá linie, respektive plocha. Toto potvrzují i Longley, Batty a Sheperd (1991) a Shen (2001), kteří došli k závěru (na výpočtu několika světových měst a metropolí), že výsledky dimenzí pro městskou zástavbu musí být větší než 1 a zároveň menší než 2.

Tedy:

$$1 < D < 2$$

Kde D je hodnota dimenze.

Praktické výsledky tohoto tvrzení jsou uvedeny v podkapitolách (města byla seřazena podle abecedy).

9.1 Případová studie lakunarity

Prvním použitým algoritmem se stala lakunarita. Algoritmus byl spuštěn na datech zástavby měst. Vstupní rastrová data byla s příponou *.tiff. Tato dimenze (lakunarita) je odlišná principem fungování oproti zbylým případovým dimenzím (viz. Kapitola 4).

Z tabulky 2 je patrné, že nejvyšší hodnotu lakunarity dosahuje průmyslové město Kladno. Druhou nejvyšší dimenzi má město Most, postavené na zelené louce. Obě města se nachází na rovině a jejich počet obyvatel je téměř stejný (Kladno má jen o 1000 obyvatel víc). Vysokou hodnotu dimenze má i rezidentní a historické město Hradec Králové. Poté následují další rezidentní a historická města, a to velikostně podobná počtem obyvatel, Liberec a město Olomouc. Naopak nejnižší dimenzi má průmyslové město Pardubice, což je poněkud překvapivé, jelikož se rozkládá na ploché Východočeské tabuli. Většina průmyslových měst (kromě Kladna) má nižší dimenze. Druhé město na zelené louce Havířov si také drží vysokou hodnotu dimenze.

Všechna města, která mají vyšší hodnoty dimenze, se nacházejí na relativně rovné ploše kromě rezidentního a historického Liberce a lázeňského města Teplice.

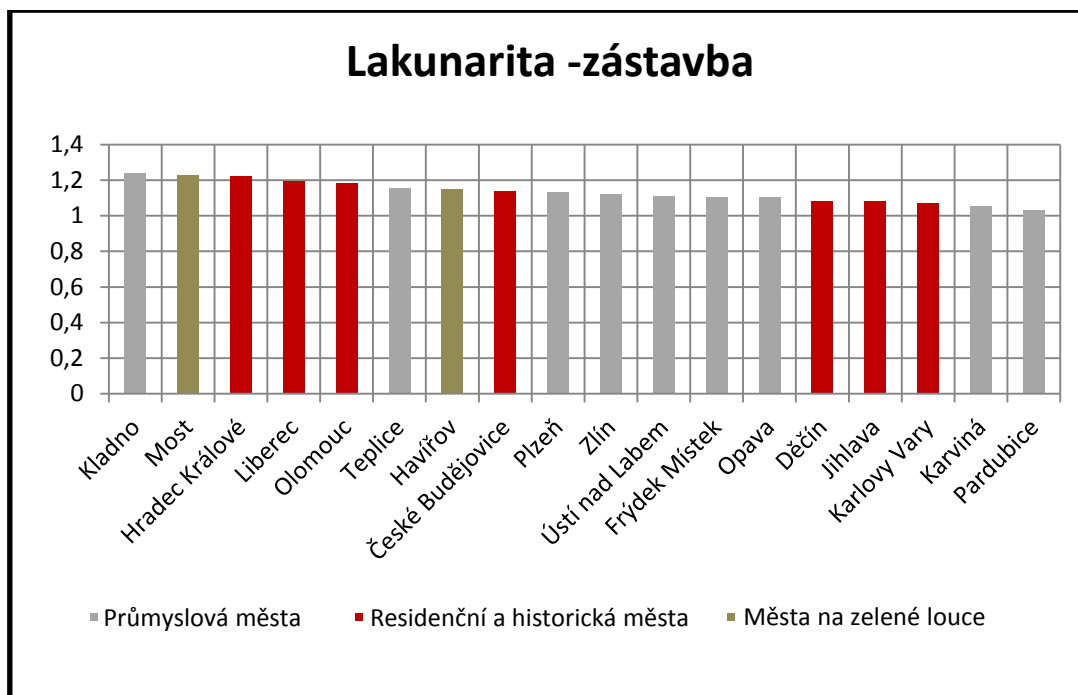
Po výpočtu lakunarity zástavby následoval výpočet lakunarity také pro komunikace.

	Lakunarita - zástavba	
	město	dimenze
1	České Budějovice	1.1362
2	Děčín	1.0834
3	Frýdek Místek	1.1050
4	Havířov	1.1500
5	Hradec Králové	1.2201
6	Jihlava	1.0809
7	Karlovy Vary	1.0707
8	Karviná	1.0545
9	Kladno	1.2380
10	Liberec	1.1943
11	Most	1.2310
12	Olomouc	1.1793
13	Opava	1.1019
14	Pardubice	1.0307
15	Plzeň	1.1303
16	Teplice	1.1565
17	Ústí nad Labem	1.1105
18	Zlín	1.1185

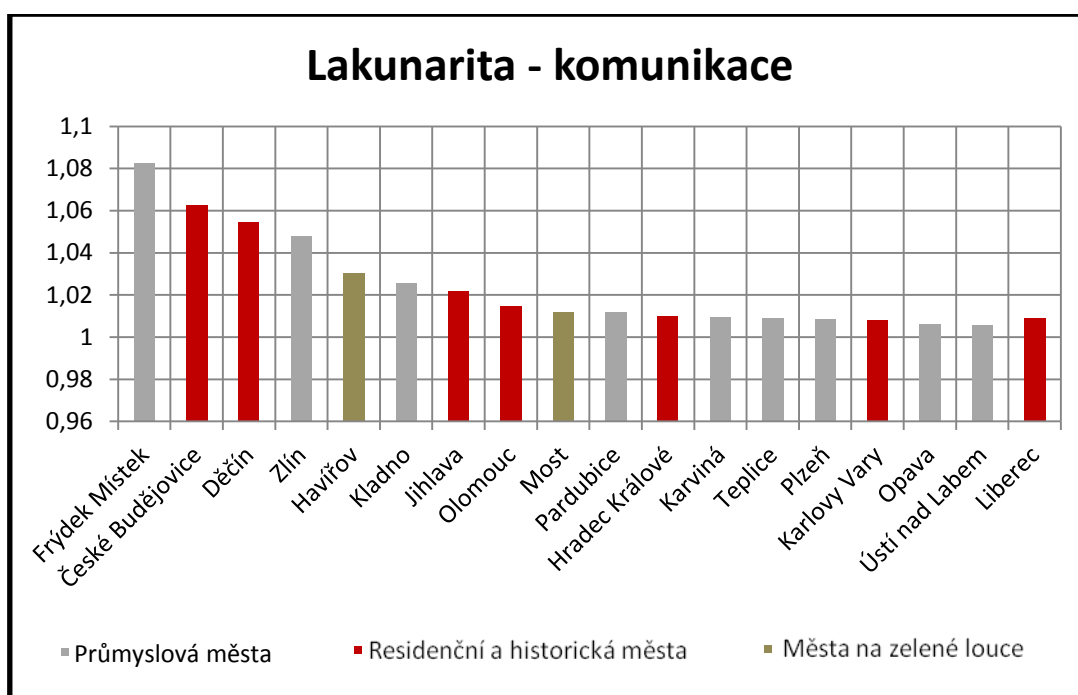
Tabulka 2 Výsledky dimenzí zástavby pro algoritmus lakunarity.

	Lakunarita - komunikace	
	město	dimenze
1	České Budějovice	1.0625
2	Děčín	1.0545
3	Frýdek Místek	1.0828
4	Havířov	1.0302
5	Hradec Králové	1.0101
6	Jihlava	1.0217
7	Karlovy Vary	1.0079
8	Karviná	1.0093
9	Kladno	1.0256
10	Liberec	1.0090
11	Most	1.0119
12	Olomouc	1.0149
13	Opava	1.0063
14	Pardubice	1.0118
15	Plzeň	1.0085
16	Teplice	1.0088
17	Ústí nad Labem	1.0057
18	Zlín	1.0478

Tab. 3 Výsledky dimenzí komunikací pro algoritmus lakunarity.



Obr. 8 Graf velikosti lakunarity zástavby (autor: Jaroslav Hendl)



Obr. 9 Graf velikosti lakunarity komunikací (autor: Jaroslav Hendl)

Na první pohled na tabulku 3 a obr. 9 je zřejmé, že komunikace mají nižší hodnoty dimenze než zástavba. Nejvyšší hodnotu dimenze lakunarity pro komunikace má průmyslové město Frýdek Místek. Vysokou hodnotu dimenze mají i residenční a historická města České Budějovice a Děčín. Tato města následuje se svou hodnotou dimenze průmyslové město Zlín. Minima hodnoty naopak dosahují další průmyslová města Ústí nad Labem, Opava a Plzeň.

Města vybudovaná na zelené louce si drží poměrně vysokou hodnotu dimenze.

9.2 Případová studie pokrývací dimenze

Druhou případovou studií se stal algoritmus pokrývací dimenze. Výsledky pro pokrývací dimenzi vykazují poněkud vyšší hodnoty dimenze než lakunarita, ale i zde hodnoty dimenze vychází $1 < D < 2$. Vstupní data byla v rastrovém formátu *.jpg.

Tab. 4 Výsledky dimenzí algoritmus pokrývací dimenze pro zástavbu

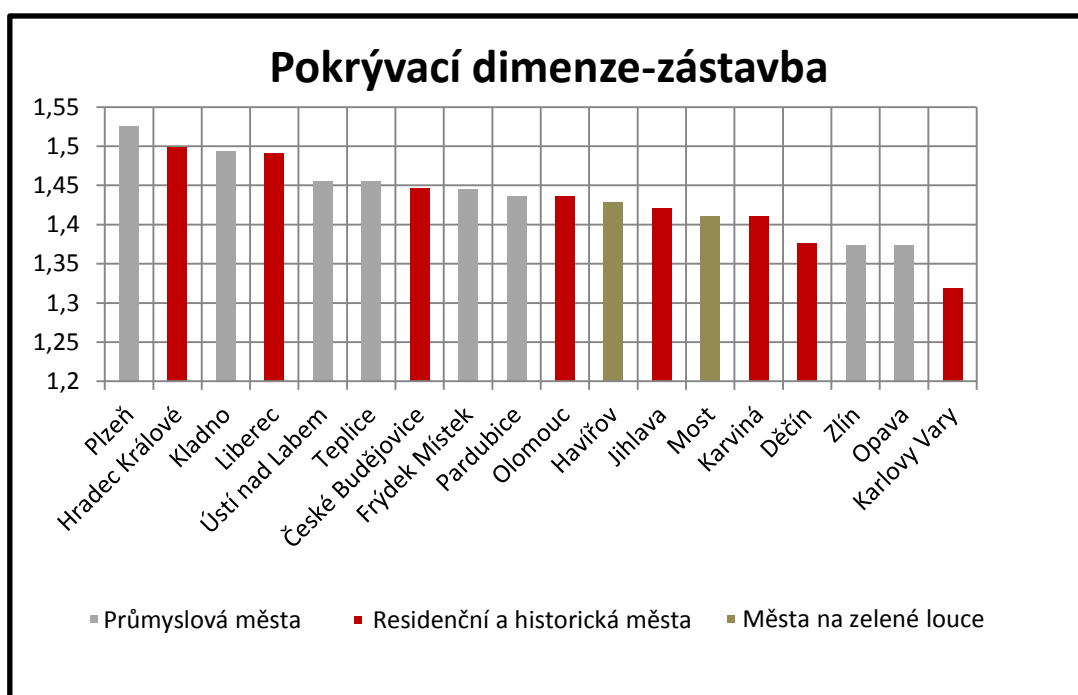
(autor: Jaroslav Hendl)

	Pokrývací dimenze - zástavba	
	město	dimenze
1	České Budějovice	1.4467
2	Děčín	1.3762
3	Frýdek Místek	1.4449
4	Havířov	1.4281
5	Hradec Králové	1.4986
6	Jihlava	1.4209
7	Karlovy Vary	1.3188
8	Karviná	1.4106
9	Kladno	1.4938
10	Liberec	1.4916
11	Most	1.4110
12	Olomouc	1.4358
13	Opava	1.3730
14	Pardubice	1.4359
15	Plzeň	1.5259
16	Teplice	1.4545
17	Ústí nad Labem	1.4550
18	Zlín	1.3740

Z tab. 4 a obr. 8 lze rozpoznat, že nejvyšší hodnotu pokrývací dimenze pro zástavbu má průmyslové město Plzeň. Oproti výsledkům lakunarity je toto město (podle výsledků pokrývací dimenze) umístěno v tabulce výše. Druhou nejvyšší hodnotu dosahuje historické město Hradec

Králové, které má naopak poměrně konstantní umístění ve výsledcích. Vysokou hodnotu mají také města Kladno, Liberec a průmyslový Frýdek Místek. Kromě Liberce se všechna města s vysokou hodnotou nachází na relativně rovné ploše.

Nejmenší dimenzi má naopak další residenční město Karlovy Vary, které, jak v případě lakunarity, tak i v případě pokrývací dimenze, si drží hodnoty v nízké relaci. Poté následují průmyslové město Zlín a rezidentní a historický Děčín. Města s nízkou hodnotou dimenzí se nachází povětšinou na nerovném povrchu nebo jsou omezeny jinými překážkami. Města postavená na zelené louce se nachází se svými hodnotami ve středu tabulky. Celkově se dá říci, že průmyslová města nemají tak nápadně nízkou hodnotu dimenze, tak jako v případě lakunarity.

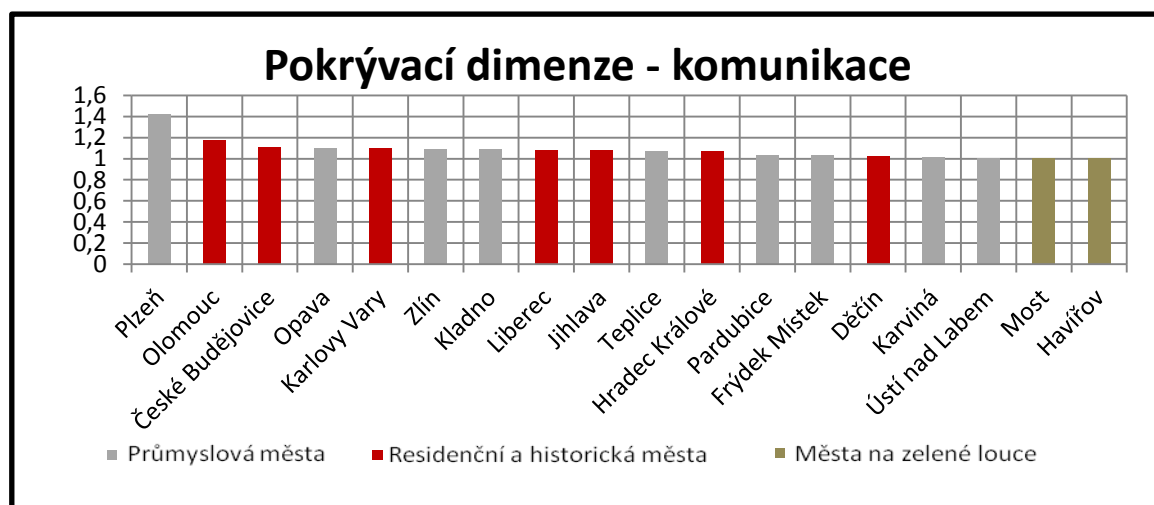


Obr. 8 Graf velikosti pokrývací dimenze komunikací (autor: Jaroslav Hendl)

Tab. 5: Výsledky algoritmu pokrývací dimenze pro komunikace (autor Jaroslav Hendl)

	Pokrývací dimenze - komunikace	
	město	dimenze
1	České Budějovice	1.1041
2	Děčín	1.0255
3	Frýdek Místek	1.0316
4	Havířov	1.0040
5	Hradec Králové	1.0692
6	Jihlava	1.0785
7	Karlovy Vary	1.0991
8	Karviná	1.0155
9	Kladno	1.0869
10	Liberec	1.0800
11	Most	1.0027
12	Olomouc	1.1719
13	Opava	1.1019
14	Pardubice	1.0331
15	Plzeň	1.4178
16	Teplice	1.0716
17	Ústí nad Labem	1.0065
18	Zlín	1.0931

Podle tab. 5 a obr. 9 má nejvyšší hodnotu pokrývací dimenze pro komunikace, jako v případě zástavby, průmyslové město Plzeň. Následují residenční a historická města Olomouc a České Budějovice. Nejnižší hodnotu dimenze mají komunikace obou měst na zelené louce Havířov a Most.



Obr. 9 Graf velikosti pokrývací dimenze komunikací (autor: Jaroslav Hendl)

9.3 Případová studie Korelační dimenze

Posledním aplikovaným algoritmem byla korelační dimenze. Tato dimenze poskytuje podobné výsledky jako pokrývací dimenze. Stejně jako u pokrývací dimenze, tak i u této dimenze byla vstupní rastrová data ve formě *.jpg, reprezentující data 0 a 1.

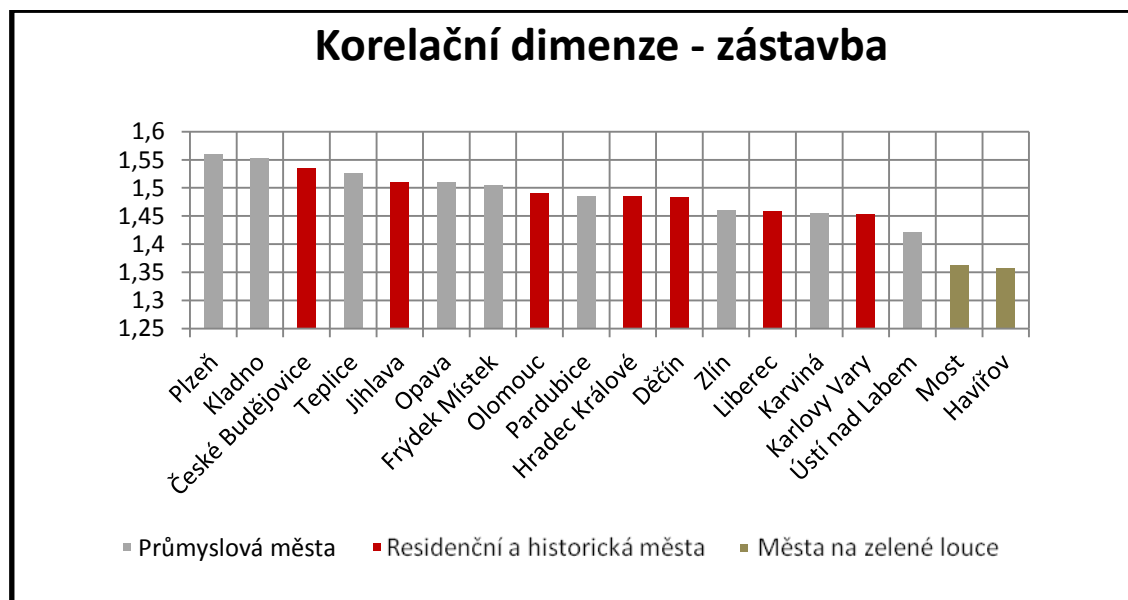
Tab. 6: Výsledky algoritmu korelační dimenze pro zástavbu
(autor: Jaroslav Hendl)

	Korelační dimenze - zástavba	
	město	dimenze
1	České Budějovice	1.5342
2	Děčín	1.4837
3	Frýdek Místek	1.5053
4	Havířov	1.3574
5	Hradec Králové	1.4852
6	Jihlava	1.5110
7	Karlovy Vary	1.4535
8	Karviná	1.4555
9	Kladno	1.5526
10	Liberec	1.4583
11	Most	1.3620
12	Olomouc	1.4901
13	Opava	1.5100
14	Pardubice	1.4861
15	Plzeň	1.5598
16	Teplice	1.5266
17	Ústí nad Labem	1.4215
18	Zlín	1.4604

Podle tab. 6 a obr. 10 je patrné, že absolutně nejvyšší hodnotu korelační dimenze pro zástavbu má průmyslové město Plzeň. Druhou nejvyšší hodnotu dimenze má další průmyslové město Kladno. Vysoké hodnoty mají také města rezidenční a města České Budějovice a Teplice. Naopak nejmenších hodnot dosáhla zástavba obou měst na zelené louce. Jedná se o města Havířov a Most.

Z výsledků je zřejmé, že stejně jako v předchozích případech, mají největší hodnotu dimenze města ležící na rovině s velkou zastavěnou plochu nebo. Toto platí pro města Plzeň, Olomouc, České Budějovice a Jihlavu. Výjimku tvoří stejně jako v případě předchozí pokrývací dimenze město, Teplice, které se nachází v kotlině. Neméně zajímavé jsou velmi nízké hodnoty nově vybudovaných měst Most a Havířov, přestože se nachází také na rovině.

Velikost měst pro vyšší dimenzi je i zde poměrně rozhodující. Města přesahující 90 000 obyvatel mají vyšší dimenzi (např. Plzeň a České Budějovice). Členitost terénu také ovlivňuje velikost dimenze. Dobře viditelné je to u města Liberec, druhého největšího sledovaného města a Ústí nad Labem, čtvrtého největšího sledovaného města.

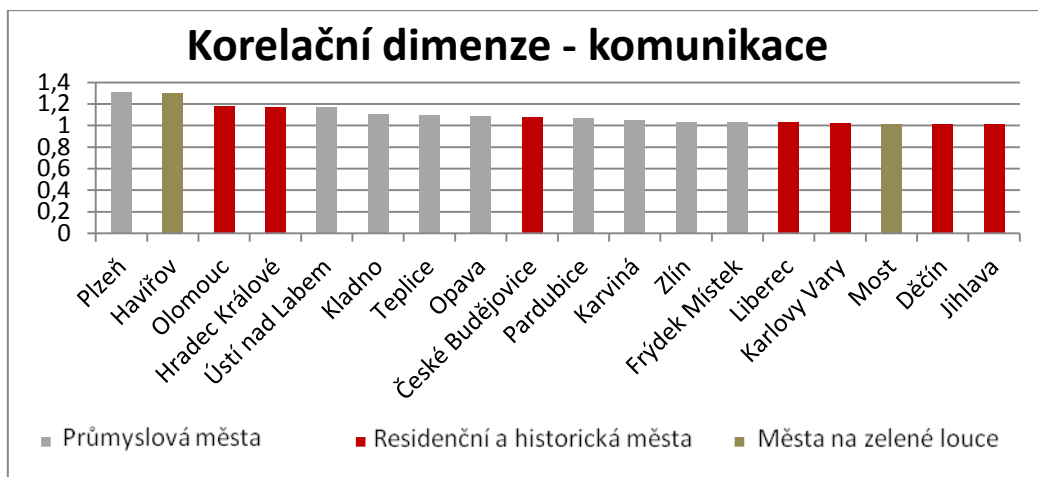


Obr. 10 Graf velikosti korelační dimenze zástavby (autor: Jaroslav Hendl)

Tab. 7 Výsledky korelační dimenze pro komunikace
(autor: Jaroslav Hendl)

	Korelační dimenze - komunikace	
	město	dimenze
1	České Budějovice	1.0747
2	Děčín	1.0164
3	Frýdek Místek	1.0305
4	Havířov	1.3020
5	Hradec Králové	1.1713
6	Jihlava	1.0130
7	Karlovy Vary	1.0220
8	Karviná	1.0497
9	Kladno	1.1015
10	Liberec	1.0265
11	Most	1.0164
12	Olomouc	1.1773
13	Opava	1.0840
14	Pardubice	1.0705
15	Plzeň	1.3092
16	Teplice	1.1000
17	Ústí nad Labem	1.1706
18	Zlín	1.0335

Při pohledu na tab. 7 a obr. 11 je patrné, že stejně jako u případových studií pro lakunaritu a pokrývací dimenzi, má i korelační dimenze nižší hodnoty pro komunikace. Nejvyšší hodnotu pro korelační dimenzi komunikace má průmyslové město Plzeň (stejně jako u pokrývací dimenze). Druhou nejvyšší hodnotu má město na zelené louce Havířov. Třetí a čtvrtou nejvyšší hodnotu dimenze mají residenční a historická města Olomouc a Hradec Králové. Nejmenší hodnoty mají města Jihlava, Děčín a Most. Nízkou hodnotu dimenze, lze také spatřit u residenčního a historického města Liberec, které je druhé největší sledované město.



Obr. 11 Graf velikosti korelační dimenze komunikací (autor: Jaroslav Hendl)

9.4 Vztahy mezi dimenzemi

Poslední krok této bakalářské spočíval ve výpočtu korelačních koeficientů mezi výsledky dimenzí zástavby a mezi výsledky komunikací. Korelační vztah byl vypočten také mezi komunikací a zástavbou totožných dimenzí. Vypočítán byl v jazyce R softwaru RStudio.

Obecná rovnice pro výpočet korelace je:

$$\rho_{xy} = \frac{cov(X, Y)}{\sqrt{(var X)(var Y)}}$$

kde: ρ_{xy} označuje korelační koeficient, $cov(X, Y)$ kovarianci náhodné veličiny X , Y a $\sqrt{(var X)(var Y)}$ směrodatnou odchylku.

Korelační koeficient nabývá hodnot od -1 do 1, kde hodnoty blízké +1 mají silnou lineární závislost mezi dvěma proměnnými. Hodnoty blízké -1 označují nepřímou závislost.

	Korelační koeficient		
	pokrývací a korelační dimenze	pokrývací dimenze a lakunarita	korelační dimenze a lakunarita
Zástavba	0.4138	0.3856	0.0898

Tab. 8 korelační koeficienty mezi dimenzemi zástavby.

Podle tabulky 8 zástavba mezi **pokrývací dimenzí** a **lakunaritou** vykazuje, že se zde nachází středně silná korelace mezi těmito dvěma dimenzemi. Tento koeficient je druhý nejsilnější pro zástavbu s hodnotou 0,3856. Korelační koeficient pro zástavbu mezi **pokrývací dimenzí** a **korelační dimenzí** měl hodnotu 0,4138. Také zde se jedná o středně silnou korelací. Tento vztah byl nejsilnější pro výsledky dimenzí zástavby. Úplně nejslabší korelační vztah pro zástavbu nastal při porovnání **korelační dimenze** a **lakunarity**, kde s hodnotou 0.0898 není vztah téměř žádný.

	Korelační koeficient		
	pokrývací a korelační dimenze	pokrývací dimenze a lakunarita	korelační dimenze a lakunarita
Komunikace	0.4120	0,0506	-0,3913

Tab. 9 korelační koeficienty mezi dimenzemi pro komunikace

Jak je zřejmé z tabulky 9, nejsilnější korelační koeficient pro komunikace nastal v případě mezi pokrývací a korelační dimenzí, kde hodnota koeficientu byla 0.4120. Přesto se jedná pouze o středně silnou korelaci. Mezi pokrývací dimenzí a lakunaritou není vztah téměř žádný. To samé platí u korelační dimenze a lakunarity.

	Korelační koeficient		
	pokrývací dimenze	korelační dimenze	lakunarita
Zástavba a komunikace	0,2178	0,4595	0.1166

Tab. 10: korelační vztah mezi zástavbou a komunikacemi stejných dimenzí

Podle tabulky č. 10 korelační vztah mezi **lakunaritou** zástavby a komunikací nenastal téměř žádný a je nejslabší pro všechny tři dimenze. Hodnota koeficientu byla pouhých 0,1166. Slabý vztah nastal také mezi výsledky **pokrývací dimenze**, kdy hodnota koeficientu byla 0,278. Nejsilnější vztah nastal v **korelační dimenzi**, a to středně silná korelace s hodnotou 0,4595.

10 DISKUZE

Tato bakalářská práce měla několik dílčích cílů. Teoretickým cílem byla tvorba rešerší použitých dimenzí v geovědách. Dále následovaly praktické cíle, a to porovnání vybraných dimenzí na socioekonomických datech (zástavba a komunikace) a posledním byly základní statistické analýzy (korelace).

Během práce se objevilo několik problémů, které práci ztěžovaly a prodlužovaly. Všechny problémy byly ale nakonec vyřešeny.

Prvotním úkolem bylo vybrat města, která by byla vhodná pro porovnání výsledků dimenzí. Nakonec byla zvolena města České republiky, jejichž počet obyvatel dosahoval od 50 000 do 170 000 obyvatel.

První komplikace nastala poměrně brzy. Problém souvisel se sběrem vhodných dat sledovaných měst (bylo obtížné získat vhodná data zejména pro zástavbu) pro výpočet fraktální dimenze. Ze stejného důvodu bylo opuštěno od původního záměru použití dvou vzorců pro lakunarity. Tento problém byl vyřešen stáhnutím potřebných dat ze serveru Geofabrik. Když byla data z tohoto serveru získána, následovala jejich řádná úprava. Data však vykazovala řadu topologických nepřesností. Tyto nepřesnosti se projevovaly při konverzi na maticový rastrový formát. Pro jejich opravu bylo provedeno několik kroků, které práci prodlužovaly, jelikož musely být provedeny na každém shapefilu zvlášť (viz. kapitola 7.). Výsledná rastrová data mají souřadnicový systém GCS_WGS_1984. Pro zástavbu i komunikace byla zvolena stejná velikost pixelu.

Pro tvorbu algoritmů byl původně uvažován programovací jazyk Python, ale v pozdější fázi bylo ustoupeno od tohoto programovacího jazyka a byl zvolen programovací jazyk Matlab. Po výběru programovacího jazyka následovalo načtení příručky výše uvedeného jazyka a vlastní tvorba algoritmů.

Přínosem práce jsou získané hodnoty, které byly vypočítány v průběhu této bakalářské práce, mohou být základem pro další případné studie pro porovnání hodnot dalších měst nebo časových řad. Do budoucna se nabízí srovnání dimenzí měst České republiky s městy okolních států.

11 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s problematikou fraktálu a jeho dimenzí. Dále porovnání tří dimenzí na datech zástavby a komunikací. Vybrané dimenze - korelační, pokrývací a lakunarita jsou používány v mnoha oborech geografii a geověd.

V teoretické části práce byla vysvětlena problematika fraktálu, fraktální geometrie a fraktální dimenze. Podrobně byly popsány a vysvětleny použité dimenze v této práci. Další část byla věnovaná využití fraktální dimenze v sociální a ve fyzické geografii. Poslední část teoretické práce se věnuje geografii a geomorfologii zvolených měst.

Praktická část měla dokázat, že lze vypočítat na městské zástavbě a městské komunikační síti různých měst (měst určité velikosti) různé druhy fraktálních dimenzí.

Data použitá v této práci byla socio-ekonomického charakteru (zástavba a komunikace). Byla získána z německého serveru Geofabrik a po úpravě byla použita pro výpočet 18 měst České republiky. Úprava dat spočívala v konverzi na rastrové formáty tiff a jpeg.

Během praktické části byly aplikovány algoritmy na vybraných městech České republiky. Celkem bylo provedeno 108 výpočtů. Všechny algoritmy použité v této práci (ať už byly upravené z Mathworks nebo nově vytvořené) jsou v kódu Matlab s koncovkou*.m. Ve výběru softwaru mělo rozhodující roli nesložitě uživatelské prostředí, bezproblémové načtení dat a následná práce s nimi. Nutno dodat, že tvorba a úprava algoritmů byla časově náročná, jelikož musela být nastudována příručka a nápověda k softwaru Matlab.

Konstantní výsledky použitých algoritmů vykazovala korelační dimenze, výpočet této dimenze je sice zdoluhavý, ale zřejmě nejlépe vystihuje hodnoty měst. Při výpočtu měla korelační dimenze také nejsilnější vztah pro velikost měst a velikost dimenzí.

Výsledky dokázaly, že lze použít fraktální dimenzí pro zástavbu (nejen hranic měst). Navíc výsledky lakunarity ukázaly, původní domněnku, že lakunarita je nezávislá oproti ostatním dimenzím.

Na závěr by mělo být řečeno, že stejně jako v práci Shen (2001) výsledky mohly být ovlivněny velikostí snímků, velikostí (boxů, kružnic a okna), přesností dat a několika dalšími faktory (hranice atd.).

Všechna data, výsledky a algoritmy jsou dostupné na přiloženém DVD.

12 POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

ANDĚL, Jiří. *Základy matematické statistiky*. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta UNIVERSITY KARLOVY, 2011. ISBN 978-80-7378-162-0.

BAITY, Michael a Paul LONGLEY. *FRACTAL CITIES: A Geometry of Form and Function*. Bath: ACADEMIC PRESS, 1994, s. 228-273. ISBN 0-12-455570-5.

BELUSSI, Alberto a Christos FALOUTSOS. Estimating the Selectivity of Spatial Queries Using the 'Correlation' Fractal Dimension. 1995, s. 27. Dostupné z:

<http://repository.cmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1559&context=compsci>

ČEPOVÁ, Daniela. Softwarové možnosti výpočtu fraktální dimenze geografických jevů. Olomouc, 2012. bakalářská práce (Bc.). UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Přírodovědecká fakulta

ČSÚ. Počet obyvatel v obcích České republiky k 1. 1. 2013. Český statistický úřad [online]. 2013 [cit. 2014-07-19]. Dostupné z:

[http://www.czso.cz/csu/2013edicniplan.nsf/t/50002DF52B/\\$File/13011303.pdf](http://www.czso.cz/csu/2013edicniplan.nsf/t/50002DF52B/$File/13011303.pdf)

DEMEK, J. *Obecná geomorfologie*. Praha: ČSAV, 1988. 476 s.

DONG, Pinliang. Lacunarity for Spatial Heterogeneity Measurement in GIS. 2000, roč. 6, č. 1, s. 7. DOI:

10.1080/10824000009480530. Dostupné z:

http://www.iseis.cuhk.edu.hk/downloads/full_paper/2000-20-26.pdf

FRAEDRICH, Klaus. Estimating the dimensions of weather and climate attractors. Estimating the dimensions of weather and climate attractors. 1986, roč. 43, č. 5, s. 419-432.

Fractal Geometry: Box-Counting Dimension of the Koch Curve. YALE UNIVERSITY. Fractal Geometry [online]. 10. června 2010 6:58:04 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z:

<http://classes.yale.edu/fractals/fracanddim/boxdim/KochBoxDim/KochBoxDim.html>

Geomorfologické členění Česka. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2014, 29. 7. 2014 [cit. 2014-08-06]. Dostupné z:

http://cs.wikipedia.org/wiki/Geomorfologick%C3%A9_%C4%8Dlen%C4%9Bn%C3%AD_%C4%8Ceska

GOODCHILD, Michael F. a David M. MARK. The Fractal Nature of Geographic Phenomena. 1987, č. 2, s. 15. Dostupné z:

<http://www.jstor.org/stable/2562770>

GUOQIANG, SHEN. Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas. Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas. 2001, roč. 16, č. 5, 419 - 437.

MANDELBROT, Benoit B. Fraktály: tvar, náhoda a dimenze. Vyd. 1. Praha: Mladá fronta, 2003, 206 s. ISBN 80-204-1009-0.

MATHWORKS. Matlab®: Primer. 2014, 221 s. Dostupné z:

http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf

MATLAB CENTRAL. MATHWORKS. MATLAB CENTRAL [online]. The MathWorks, Inc., 1994-2014 [cit. 2014-07-25]. Dostupné z:

http://www.mathworks.com/matlabcentral/?s_tid=gn_mlc_logo

MATLAB documentation: The Language of Technical Computing. The MathWorks, Inc. [online]. © 1994-2014 [cit. 2014-07-13]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/matlab/>

MYINT, Soe W. a Nina LAM. Examining Lacunarity Approaches in Comparison with Fractal and Spatial Autocorrelation Techniques for Urban Mapping. 2005, roč. 71, č. 8, s. 11. Dostupné z:

http://www.asprs.org/a/publications/pers/2005journal/august/2005_aug_927-937.pdf

LONGLEY, Paul.A, Michael BATTY a John SHEPHERD. The Size, Shape and Dimension of Urban Settlements. 1991, roč. 16, č. 1, s. 21. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/622907>

PLOTNICK, Roy.E. Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns. PHYSICAL REVIEW E. 1996, č. 53. Dostupné z: <http://www.geobabble.org/~hnw/plotnick.pdf>

RAGHAVENDRA, B. S. a D. NARAYANA DUTT. Computing Fractal Dimension of Signals using Multiresolution Box-counting Method. [online]. 2010, č. 4, s. 16 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://waset.org/publications/2503/computing-fractal-dimension-of-signals-using-multiresolution-box-counting-method>

RYPKA, Miroslav. Techniky výpočtu fraktálních dimenzí [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: <http://mant.upol.cz/soubory/OdevzdanePrace/m08-04-mr.pdf>. Bakalářská. UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Vedoucí práce RNDr. Jiří Fišer, Ph.D.

SÝKORA, Luděk a Ondřej MULÍČEK. Urbanizace a suburbanizace v česku na počátku 21. století. 2012, XV, č. 5, s. 27-37. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/cvmr/publikace/SykoraMulicek_2012_UUR_15_5_urbanizace_suburbanizace.pdf

TING, Zhang, Tang GUO-AN, Liu XUEJUN, Zhou YI a Jia DUNXIN. Spatial pattern of channel network in Jiuyuangou drainage basin. [online]. 2007, č. 210097, s. 8, 23. června 2010 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: http://www.geocomputation.org/2007/6CApps_Environment_4/6C3.pdf

WU, X.Ben a SUI, Daniel Z. GIS-based Lacunarity Analysis for Assessing Urban Residential Segregation. Texas A&M University [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc02/pap0667/p0667.htm>

ZHAO, Ping a Xue-Zhi FENG. Fractal Analysis of Urban System Spatial Characteristics Based on Remote Sensing and GIS——A Case Study of Shaoxing. SCIENTIA GEOGRAPHICA SINICA [online]. 2002, 22-1124/P, 2003-05-20 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://geoscien.neigae.ac.cn/EN/abstract/abstract9933.shtml#>

SUMMARY

The bachelor thesis focuses on a fractal and calculation of its dimensions. Three non-integer dimensions were selected after consulting the supervisor of this thesis - counting dimension, correlation dimension and lacunarity.

The theoretical part deals with the description of fractal, fractal dimensions and the method of calculating the dimensions. The review part contains the use of these dimensions in practical problems of geography.

The practical part calculates the fractal dimension of the socio-economic data (roads and houses). A total of 18 towns in the Czech Republic with the population between 50,000 and 170,000 inhabitants were selected. Data was provided by the German Geofabrik server that provides data only in shp. format. Algorithms take into account only the matrix so data had to be converted to a raster format in ArcGIS 10.1 program before the calculations.

Some of the algorithms of selected fractal dimensions were created and some modified from the MathWorks website. All the algorithms are written in Matlab code. The thesis comprises of 108 calculations. The final task was to determine whether there is any correlation between the dimensions. The Calculation of correlation conducted in the RStudio program. Other statistical calculations were carried out in Microsoft Office 2007.

The calculations are written in a set of charts and graphs. All results and scripts are available on the website of the Department of Geoinformatics in Olomouc in the appendix on DVD.

Keywords: Fractal dimension, Lacunarity, Box- counting, Correlation dimension,

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

Příloha 1	Graf porovnání dimenzí průmyslových měst - zástavba
Příloha 2	Graf porovnání dimenzí měst na zelené louce - zástavba
Příloha 3	Graf porovnání dimenzí residenčních a historických měst- zástavba
Příloha 4	Graf porovnání dimenzí průmyslových měst – komunikace
Příloha 5	Graf porovnání dimenzí měst na zelené louce - komunikace
Příloha 6	Graf porovnání dimenzí residenčních a historických měst- komunikace

Volné přílohy

Příloha 3	DVD
-----------	-----

Popis struktury DVD

Adresáře a soubory:

Algoritmy

Data_korelační dimenze

Data_lakunarita

Data_pokrývací_dimenze

Metadata

Text_prace

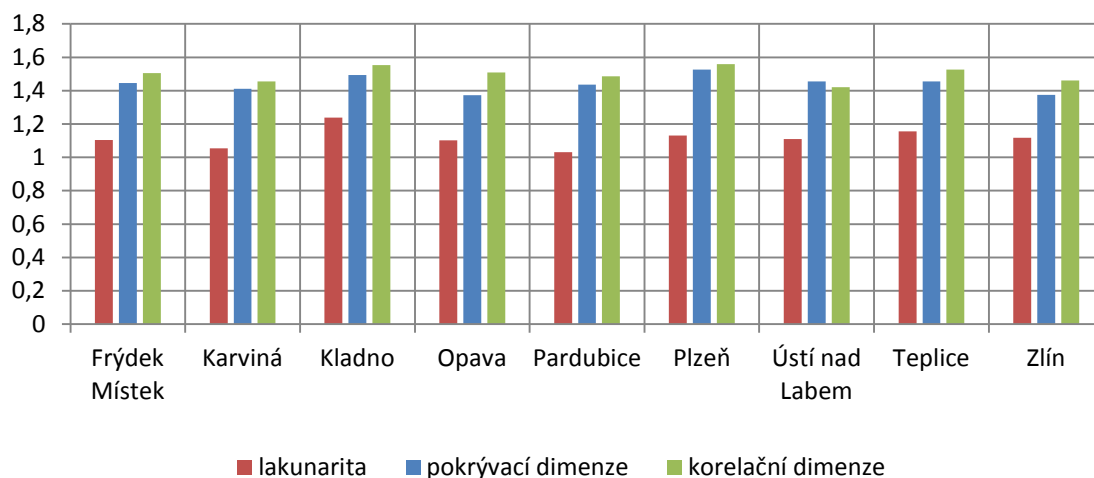
Vstupy_pro_RStudio

Vstupní_data_shp

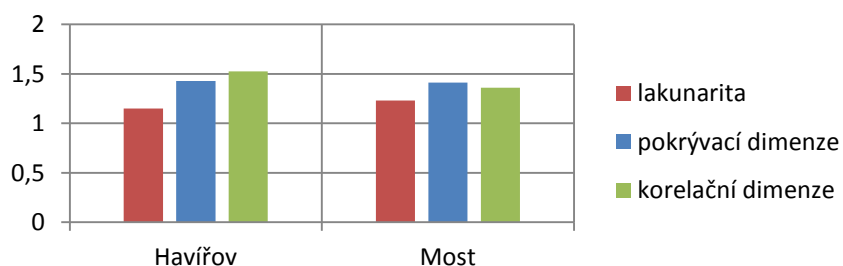
Webove_stranky

Veškerá použitá digitální data byla získána ze serveru Geofabrik

Porovnání dimenzí průmyslových měst - zástavba



Porovnání dimenzí měst na zelené louce - zástavba



Porovnání dimenzí residenčních a historických měst - zástavba

