Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta Katedra geoinformatiky

MODELOVÁNÍ MORFOLOGIE KOMÁŘÍCH LÍHNIŠŤ POMOCÍ GEOSTATISTICKÝCH NÁSTROJŮ

Diplomová práce

Bc. Jan DEDIČ

Vedoucí práce Mgr. Karel Macků, Ph.D.

Olomouc 2025

Geoinformatika a kartografie

ANOTACE

Tato diplomová práce si klade za cíl prozkoumat a ověřit efektivitu vybraných interpolačních metod, s důrazem na metody založené na krigingu, pro detailní modelování prostorového rozložení a tvaru a morfologie komářích líhnišť. V rámci stanoveného zájmového území (CHKO Litovelské Pomoraví) bude provedena klasifikace existujících líhnišť na základě jejich geometrických charakteristik. Následně budou tyto líhniště modelovány pomocí různých interpolačních technik v několika scénářích, které budou simulovat změny vodního stavu. Získané modely budou podrobeny srovnání uživatelem vytvořenými referenčními daty za účelem kvantifikace přesnosti jednotlivých interpolací s jejich parametry. Na základě těchto analýz budou formulována doporučení pro řešení podobných úloh modelování líhnišť v budoucnu, s ohledem na specifické vstupní podmínky. Výstupem práce bude rovněž automatizační skript, který usnadní opakovatelné provádění modelovacích postupů a interpolací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Interpolace; Kriging; Tvarové metriky; Empirical Bayesian Kriging

Počet stran práce: 81 Počet příloh: 7 (z toho 3 volné a 4 vázané)

ANOTATION

This master thesis focuses on modelling the morphology of ponds, important as mosquito breeding places in the Litovelsky Pomoraví Protected Landscape Area, with the aim of improving prediction and prevention of mosquito calamities. Due to the limitations of LiDAR technology, which does not allow data collection below the water surface, it is necessary to apply different spatial interpolation methods to model the shape of the bottom of the ponds. The aim is to find the best method and to verify its accuracy in places that are not flooded. Based on the results of the interpolation analysis, a program was developed that automatically finds flooded ponds, estimates their shape and recommends which interpolation method to use for a given pond. It then performs the interpolations, which in the next step are merged with the reference raster, this fills in the NoData values (flooded ponds) and create the resulting raster, to which a polygon layer of the centroids of all polygons is created, for possible manually re-measurement of the values of these centroids in the terrain (for more accurate interpolation results).

KEYWORDS

Interpolation; Kriging; Shape metrics; Empirical Bayesian Kriging

Number of pages: 81 Number of appendixes: 7 Autorským prohlášením se student explicitně přihlašuje k výhradnímu autorství práce a současně vyjadřuje znalost práv UP Olomouc k tomuto dílu. Odevzdáním práce v digitální podobě do evidence STAG student autentizuje toto prohlášení. V případě, že autor v práci navázal na cizí autorské dílo, musí být tato skutečnost v prohlášení výslovně uvedena.

Prohlašuji, že

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

 v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

 použít výsledky a výstupy mé diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše). Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Mgr. Karlu Macků, Ph.D. za četné a podnětné připomínky, časté konzultace a odborné vedení, které významně přispělo k finální podobě práce.

Zároveň patří poděkování konzultantovi práce RNDr. Janu Brusovi, Ph.D. za vstřícnost, poskytnutí klíčových dat a odborné rady, které významně přispěly k dosažení relevantních výsledků a porozumění dané problematice.

Závěrem patří poděkování mým kamarádům, kteří byli mými osobními konzultanty a díky jejich pomoci, radám a podpoře jsem si udržel motivaci a pozitivní přístup během celého procesu tvorby, což mi pomohlo překonat náročné části této práce **UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI**

Přírodovědecká fakulta Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jan DEDIČ
Osobní číslo:	R230716
Studijní program:	N0532A330009 Geoinformatika a kartografie
Téma práce:	Modelování morfologie komářích líhnišť pomocí geostatistických nástrojů
Zadávající katedra:	Katedra geoinformatiky

Zásady pro vypracování

Cílem magisterské práce je ověřit použitelnost vybraných interpolačních metod (založených především na metodě kriging) pro potřeby modelování průběhu komářích líhnišť. Student nejprve klasifikuje pozorovaná líhniště ve stanoveném zájmovém území dle jejich tvarových charakteristik. Následně se pokusí modelovat průběhy líhnišť interpolačními metodami dle různých scénářů – při měnícím se vodním stavu a s přidáváním doplňujících geodetických měřeních. Modelované tvary porovná s dostupnými referenčními daty a vyhodnotí přesnost jednotlivých modelových situací. Výstupem práce bude mimo jiné vyhodnocení kvality interpolace v různých scénářích a doporučení pro řešení podobných úloh v závislosti na vstupních podmínkách.

Text práce student zpracuje v souladu se závaznou šablonou pro kvalifikační práce KGI. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku a poster. Celou práci (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, poster a web) odevzdá student v digitální podobě na datové úložiště katedry. Do evidence STAG student odevzdá úplný text práce s přílohami, které určí vedoucí práce. Fyzicky student odevzdá výtisk posteru ve formátu A2 a přílohy určené vedoucím práce.

Rozsah pracovní zprávy:	max. 50 stran
Rozsah grafických prací:	dle potřeby
Forma zpracování diplomové práce:	elektronická

Seznam doporučené literatury:

Biernacik, P., Kazimierski, W., & Włodarczyk-Sielicka, M. (2023). Comparative Analysis of Selected Geostatistical Methods for Bottom Surface Modeling. Sensors, 23(8), 3941. https://doi.org/10.3390/s23083941

Isaaks, E. H., & Srivastava, M. R. (1989). Applied Geostatistics. Oxford University Press.

Oliver, M. A., & Webster, R. (2015). Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15865-5

Stein, M. L. (1999). Interpolation of Spatial Data. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1494-6

Vedoucí diplomové práce:

Mgr. Karel Macků, Ph.D. Katedra geoinformatiky Datum zadání diplomové práce:8. prosince 2023Termín odevzdání diplomové práce:7. května 2025

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D. děkan

4 01

L.S.

prof. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D. vedoucí katedry

V Olomouci dne 11. prosince 2023

OBSAH

	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	
1		
1 2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	
3	METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ	
4	INTERPOLACE TŮNÍ	27
	4.1 Tůně obdélníkového tvaru	
	4.2 Tůně tvaru písmene C (půlměsícovité)	43
	4.3 Tůně kulaté a mírně elipsovité	51
	4.4 RBF a IDW	58
5	VYHODNOCENÍ INTERPOLACE	65
6	AUTOMATIZAČNÍ SKRIPT	68
7	PŘÍPADOVÁ STUDIE	70
8	DISKUZE	77
9	ZÁVĚR	81
	POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
СНКО	Chráněná krajinná oblast
TIFF	Tag Image File Format
3D	3 dimensional
RBF	Radial Basis Functions
IDW	Inverse Distance Weighted
EBK	Empirical Bayesian kriging
LiDAR	Light Detection And Ranging
OK	Ordinary kriging
SK	Simple kriging
RK	Robustní kriging
CK	Co-kriging
UK	Universal kriging
GIS	Geografický informační systém
QGIS	Quantum GIS
DMR	Digitální model reliéfu
BLUE	Best Linear Unbiased Estimator
MLS	Moving Least Squares
px	pixel
FCK	Fractal Compensation Kriging
RMSE	Root Mean Squared Error
TIN	Triangulated Irregular Network
MAE	Mean Absolute Error
GWA	Gaussian-weighted average
MSE	Mean Squared Error
MD	Mean Differerence
LAS	LIDAR Aerial Survey
LAZ	LASzip
GPKG	GeoPackage
UMT	Universal Transverse Mercator
DTM	Digital terrain model
USGS	United States Geological Survey
TPS	Thin plate spline
GB	Gigabyte
MCC	Multi-scale curvature classification
HW	Hardware
USV	Unmanned surface vehicle

ÚVOD

Oblast kolem Olomouce, známá též jako Litovelské Pomoraví je chráněnou krajinnou oblastí. Na první pohled rozmanitá a dle druhů rostlin a živočichů bohatá oblast. Jedná se však o přirozené líhniště komára. Ti zde kladou vajíčka, ze kterých vyrůstají dospělí jedinci a způsobují časté komáří kalamity. Aby se tomu zabránilo, je potřeba tyto tůně lokalizovat a analyzovat. K tomu je využito geostatistických metod pro modelování morfologie, zvláště dat z laserového leteckého snímkování. Jelikož LiDAR neumožňuje snímání pod vodní hladinou, je potřeba tento terén modelovat pomocí různých interpolačních metod. Cílem je tak nalézt optimální metodu a její parametry, přičemž výsledky budou ověřeny pomocí dat z referenčních, nezaplavených tůní. Na základě těchto poznatků byl vytvořen skript, který automatizuje proces vyhledávání tůní, následné interpolace a výpisu doporučení, jak a kterou interpolaci použít, případně nepoužít pro nalezené tůně.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je ověřit použitelnost vybraných interpolačních metod (založených především na metodě kriging) pro potřeby modelování průběhu komářích líhnišť.

Klasifikace líhnišť ve stanoveném zájmovém území dle jejich tvarových charakteristik. Následné modelování průběhu líhnišť interpolačními metodami dle různých scénářů – při měnícím se vodním stavu a s přidáváním doplňujících geodetických měřeních. Porovnání modelovaných tvarů s dostupnými referenčními daty a vyhodnocení přesnosti jednotlivých modelových situací.

Vyhodnocení kvality interpolace v různých scénářích, vytvoření doporučení pro řešení podobných úloh v závislosti na vstupních podmínkách a tvorba automatizačního skriptu.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

První část rešerše je zaměřena na interpolace, vznik interpolací, využití a metody. Druhá část je zaměřena na studie o problematice interpolací morfologie den.

Ve statistice se setkáváme s problémem neúplných dat, ať už tím, že data změřit nelze, nebo chybou v datech. K tomu existuje metoda s názvem Interpolace.

Interpolace je matematický a statistický nástroj, sloužící k odhadování hodnot mezi dvěma známými body (červené body jsou známé a zelená linie je výsledkem interpolace). Ve statistice se setkáváme s interpolací jednorozměrnou, Obecně jednodušším předchůdcem prostorové interpolace. Tou nejjednodušší metodou je lineární interpolace, která předpokládá přímý vztah mezi dvěma body. Na *Obrázku 1*. je zobrazena polynomiální interpolace, kterou zařazujeme do skupiny jednorozměrných interpolací. Nicméně tato metoda zahrnuje vytvoření polynomu, který prochází všemi známými body.



Obrázek 1 Polynomiální interpolace (zdroj: autor práce)

Prostorové interpolace jsou rozšířením těchto (jednorozměrných) principů do více dimenzí. Máme-li nepravidelnou síť bodů a zajímá nás průběh veličiny mezi nimi, musíme proto použít vhodnou interpolační metodu pro dopočet hodnot. Interpolačních metod existuje celá řada a fungují na principu prokládáním vhodných funkcí, ať už lineární (přímkou), složitějším polynomem, vážených průměrech nebo přiřazením hodnoty podle nejbližšího známého bodu. Tyto funkce tak popisují vlastnosti a strukturu povrchu, jakou jsou hladkost, zakřivení nebo kontinuita, kde každá z nich je vhodná pro jiný typ povrchu. Volba interpolační metody tak závisí na prostorovém chování veličiny (Josef Ježek, 2015).

Interpolace jsou tu od dob starověku, kde fungovala pro zaplnění mezer v tabulkách obsahující astronomická data. Popis lineární interpolace nalezneme v knize Almagest od Ptolemaia (E. Meijering, 2002). V roce 1795 publikoval J. Lagrange interpolační metodu (dnes známou pod názvem Lagrangeova interpolace), tato metoda je základním stavebním

kamenem pro polynomiální interpolace (Interpolation – history of interpolation, 2006; *Lagrange Interpolation Formula: Definition, Properties, Uses, 2023*).

O pár desítek let později (1950), kdy s probíhající těžkou surovin bylo třeba vyhodnocení ložisek, vzniká metoda zvaná Kriging, se kterou přišel francouzský matematik a geolog Georges Matheron. Přibližně o 20 let později, v éře sálových počítačů, vznikly komerční softwarové balíky pro velké těžební společnosti, jako například BLUEPACK (1970) a ISATIS (1990). V dnešní době jsou programu pro geostatistiku zahrnuty v komerčních programech jako například ArcGIS PRO, QGIS, aj. kde se rozrostly. Co se týče využití, na další oblasti přírodních věd, jako například demografie, ekologie, hydrogeologie, kartografie, apod. (Josef Ježek, 2015).

Interpolace tak zasahuje přes celou škálu oborů. V Geostatistice je používána například pro odhadování hodnot znečištění půdy. Meteorologové ji využívají pro prostorové rozložení počasí (teploty, srážky). Kartografové v rámci vytváření map, například zobrazení nadmořské výšky. Přesuneme-li se do věd jako ekonomie nebo zdravotnictví, i zde má interpolace uplatnění. Pro ekonomiku je to odhad trendů, jako jsou ceny nemovitostí a vývoj trhu, zatímco zdravotnictví ji využívá při analýzách prostorového chování nemocí a epidemií.

IDW

Jednou z nejjednodušších a často používaných metod je "metoda inverzních vzdáleností", anglicky Inverse Distance Weighting (IDW), která je založena na váženém průměru, jehož váhy jsou nepřímo úměrné nějaké mocnině vzdálenosti mezi interpolovaným bodem a datovými body (Ježek, 2015). Váha je funkcí inverzní vzdálenosti. (*How IDW works*) To znamená, že vliv proměnných na neznámý bod, klesá se vzdáleností od tohoto bodu.

RBF

Metoda radiálních bázových funkcí (RBF - Radial Basis Function) je podobná metodě IDW v tom, že zachovává myšlenku, že každý datový bod ovlivňuje interpolaci ve svém okolí a všem směrem stejným způsobem a úměrně vzdálenosti od něj. RBF se dělí z hlediska použité funkce, například Gaussovská, Multikvadratická, Inverzní Multikvadratická, Lineární, aj. Metody RBF naráží na problém, pokud jsou data obsáhlá, na základě toho se zvyšuje výpočetní čas. Proto se musí data aproximovat k interpolantu, aby se tak snížila výpočetní náročnost (Ježek, 2015; Wilna du Toit, 2008). (Johnston a kol., 2001) Tvrdí, že metody RBF pasují DMR (Digitální model reliéfu) přes naměřené hodnoty vzorku při minimalizaci celkového zakřivení povrchu a mohou předpovídat hodnoty pod minimem naměřené hodnoty a nad maximem naměřených hodnot, což je výhoda ve srovnání s IDW, ale metoda není efektivní, pokud dojde k náhlým změnám naměřených hodnot.

SPLINE

Bartels a kol., (1985) ve své knize vysvětlují interpolační metody spline. Tato metoda je zde vysvětlena pro oblast počítačové grafiky, nicméně lze částečně interpretovat i pro geostatistiku. Oproti RBF používá spline funkce kusy polynomů (spline) k aproximaci funkce mezi body. Nejčastěji tak polynomy třetího řádu. Ty jsou spojité až do druhé derivace, tím je zaručený hladký přechod mezi segmenty. Výsledný povrch prochází přes vstupní body. V porovnání s RBF má obecně nižší výpočetní náročnost.

Spline má dvě metody, regularizovaný a spline s tenzí. Regularizovaný spline vytváří hladký povrch, hodnoty mohou ležet mimo rozsah dat vzorku, do výpočtů zahrnuje více proměnných. Zatímco spline s tenzí počítá obecně s více body vzorku, tím pádem je interpolace hladší, ale výpočetně náročnější.[16]

Kriging

Kriging představuje jednu z nejdůležitějších geostatistických interpolačních metod. Alternativní název BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) přesně vystihuje její podstatu. Metoda využívá omezený soubor bodů k odhadu hodnoty proměnné v spojitém prostorovém poli.

Na rozdíl od jednodušších interpolačních metod kriging systematicky zohledňuje prostorovou korelaci mezi body. Váha přiřazená bodům poblíž místa zájmu je větší než u bodů vzdálených, přičemž váhy pro každý bod se počítají podle prostorové struktury interpolovaného místa ve vztahu ke všem vzorkovaným bodům. Kriging si zachovává prostorovou variabilitu, pokud existuje v prostoru alespoň mírná autokorelace (*Kriging Interpolation*).

Variogram

Variogram je grafická metoda k určení prostorové autokorelace využívaná v geostatistice (Fortin a Dale, 2005). V podstatě se jedná o funkci, která popisuje závislost mezi hodnotou proměnné vzhledem ke vzdálenosti. Modelování vhodného variogramu je základní částí krigingu, protože představuje prostorovou variabilitu dat v prostoru (BOSTAN, 2017).

Nugget – představuje variabilitu na velmi malých vzdálenostech, včetně chyb měření

Sill (práh) - maximální hodnota variogramu, která odpovídá celkové variabilitě dat **Range (dosah)** - vzdálenost, při které variogram dosáhne prahu; body, které jsou vzdálenější, než je hodnota Range už spolu statisticky nesouvisí

Model variogramu – matematická funkce aproximující empirický variogram, nejčastěji:

Sférický model – nejpoužívanější, má jasně definovaný dosah

Exponenciální model – vhodný pro data s postupným přechodem závislosti

Gaussovský model – vykazuje velmi plynulý průběh v blízkosti počátku

Lineární model – nejjednodušší model bez asymptotické hranice

Vyhledávací parametry – určují, které body budou zahrnuty do výpočtu:

Vyhledávací poloměr (rádius)- definuje maximální vzdálenost, ze které se body zahrnují do výpočtu

Standardní (Standard) - kruhové nebo eliptické vyhledávací okolí

Hladké (Smooth) - dává přednost bodům rovnoměrně rozloženým ve všech

Tvar vyhledávacího okolí – kruh (izotropní) nebo elipsa (anizotropní)

Minimální a maximální počet bodů – určuje horní a spodní hranici počtu vstupních bodů **Sektory** – nastavení počtu a úhlu sektorů při sektorovém vyhledávání

Anizotropie – Rozdělení sektorů (Major and Minor Semi-axis) - délky os elipsy při anizotropním vyhledávání

Úhel natočení (Angle) - orientace hlavní osy elipsy při anizotropním vyhledávání

Všechny tyto parametry lze v průběhu modelování upravovat podle charakteristik konkrétního datového souboru. Volba správného modelu variogramu a jeho parametrů zásadně ovlivňuje výsledky interpolace a je často nejnáročnější částí procesu. Kriging jako pokročilá metoda poskytuje kromě samotného odhadu i údaj o chybě odhadu, což umožňuje kvantifikovat nejistoty v interpolovaných datech.

Typy Krigingů

Dle vhodnosti využití má kriging mnoho typů. Esmaeel Ashrafpour, (2021) jednoduše říká, že u Ordinary Kriging (OK) je globální průměr neznámý, zatímco u Simple Krigingu (SK) je známý. Z názvu vyplývá, že SK je jednoduší z hlediska matematiky a modelování, ale v praxi je častěji používána metoda OK, jelikož nabízí flexibilnější řešení.[12]. Dalším typem je Universal Kriging (UK), který oproti předcházejícím typům zahrnuje prostorový trend (deterministickou funkci), proto je vhodné ho využít na data vykazující trend nebo systematické změny v prostoru. Ko-kriging (CK) je rozšíření obyčejného krigingu, při kterém se ke zlepšení přesnosti interpolace zájmové proměnné používají další pozorované proměnné (tzv. ko-varianty, které jsou často korelované se zájmovou proměnnou) *(Co-Kriging)*. Za zmínku stojí i Robustní kriging, který je méně citlivý na odlehlé hodnoty. Dalším typem je například blokový kriging, který odhaduje průměrné hodnoty v dané oblasti (bloku). Zajímavým typem je i Bayesovský kriging, který kombinuje kriging společně s Bayesovou teorií pravděpodobnosti, jakožto nejistotu v parametrech modelu.

STUDIE

Přesuneme-li se na studie, BOSTAN, (2017) porovnával OK, RK a UK, modelování na jezeru Lake Van v Turecku. Zjistil, že OK je vhodné použít pro případ, kdy není zřejmý trend. Zároveň je přijatelnější a jednoduší než RK/UK. Pokud ovšem lokální trend existuje (mezi pozorování a kovariáty) v rámci studované oblasti, pak UK a RK poskytují více informací. Metody RK a UK jsou složitější, jelikož do postupu přidávají více informací, což zlepšuje predikci, (viz. *Obrázek: 2*).

Table 3. Performance comparison of kriging methods obtained with one-fold cross-validation

	OK	RK	UK
RMSE	1.71	0.96	1.29
Coefficient of Determination (R ²)	0.03	0.13	0.42
Correlation between observation and prediction	-0.16	0.36	0.65

Obrázek 2 Porovnání OK, RK a UK v rámci studie predikce průměrné teploty jezera Lake Van (BOSTAN, 2017)

Ve studii Qin a Dai, (2023) ze Šanghajské univerzity byl použit OK, kde došli k závěru, že tato metoda je, oproti IDW, MLS (Moving Least Squares), TIN (Triangulated irregular network) a RBF, vhodnější, respektive přesnější při složitějším terénu, co se týče drsnosti povrchu. Zatímco Chen a kol., (2014) představili vylepšený algoritmus krigingu, tzv. Fractal Compensation Kriging (FCK), který bere v potaz to, že přírodní jevy vykazují sebepodobnost. Metoda FCK tak bere v úvahu sebepodobnost a nepravidelnost terénu, zároveň lépe odráží trend a má dobrou adaptibilitu vzhledem k průběhu terénu. Diaconu a kol., (2019) porovnávají interpolační metody z hlediska počtu zaměřených bodů. V případě malého počtu bodů, společně s metodou IDW, tak SK poskytuje spolehlivé výsledky. Obecně kriging zde byl nejlepší metodou. OK měl nejmenší RMSE (root mean squared error), oproti SK

nebyl tolik ovlivněný počtem bodů. UK byl užitečný v případě, pokud byl zřejmý trend.

V rámci studie se Chen a kol., (2014) snažili vylepšit Kriging pomocí fraktální kompenzace. Kde byl IDW porovnávaný společně s metodou Kriging, GWA (Gaussianweighted average) a bilineární interpolací. IDW a jemu podobné metody tak přináší přílišné vyhlazení původních dat, tím pádem dochází ke ztrátě dat a interpolace není tak přesná. Jelikož je metoda IDW a GMA založena na tzv. approaching-point distance weighting. Jinými slovy, obě metody neberou v úvahu sebepodobnost terénu.

Diaconu a kol., (2019) porovnávají interpolace z hlediska počtu zaměřených bodů pod vodní hladinou. V případě malého počtu bodů se IDW ukazuje jako spolehlivé. Samozřejmě

platí, že s rostoucím počtem bodů je IDW přesnější, ale v případě většího množství bodů je vhodnější použít jiných metod interpolace.

Ježek, (2015) říká, že u metody IDW je v potaz brát omezení okolí, ať už vzdálenostně, nebo počtem bodů vstupujících do interpolace. Špatně nastavená omezení můžou vést ke vzniku artefaktů, které znehodnotí interpolaci. Zároveň je třeba dbát na problém s blízkými nebo totožnými body, které mění průběh interpolace. Tato metoda je velmi oblíbená, jednoduchá a rychlá. Nicméně neuvažuje vlastnosti prostorové veličiny a vzájemné rozložení datových bodů.

Wilna du Toit, (2008) v článku došel k závěru, že po různých simulacích metod RBF, není zcela jasné, jakou přesně bázovou funkci zvolit pro konkrétní aplikaci. Gauss je například extrémně citlivý na tvorbu parametru tvaru. Dobrých výsledků se dobralo použitím polyharmonického splajnu a multikradratické RBF (polyharmonické splajnjy nemají parametr tvaru (*How radial basis functions work*). Obecně se ale RBF používají pro vytváření hladkých povrchů z velkého počtu bodů, jelikož poskytují dobré výsledky pro jemně se měnící povrchy. Ovšem RBF není vhodná, pokud dochází k velkým změnám hodnot na povrchu v krátkých vzdálenostech nebo pokud jsou data náchylná k chybě měření. Metoda RBF oproti metodě IDW předpovídá hodnoty nad maximální/minimální naměřenou hodnotou.

Pro přehlednost byla vytvořena jednoduchá tabulka, která shrnuje všechny zmíněné interpolace. Červenou barvou je v tabulce vyznačená informace, která může být brána jak pozitivně, tak negativně.

Metoda	Výhody	Nevýhody		
IDW	Jednoduchost, rychlost,	Citlivost na hustotu		
	kvalitní interpolace při	vzorku, neinterpoluje		
	rovnoměrném rozložení	nad max/min hodnoty,		
	bodů.	špatná interpolace		
		členitých dat (kopce,		
		hory).		
RBF	Vytváření hladkých	Méně vhodné pro náhlé		
	povrchů, <mark>oscilace mimo</mark>	změny, citlivé na		
	naměřené max/min	rozložení dat.		
	hodnoty.			
Spline	Hladká interpolace,	Méně vhodné pro náhlé		
	vhodné pro spojitá data,	změny, nevhodné na		
	oscilace mimo naměřené	interpolaci zlomových		
	max/min hodnoty.	linií (efekt vyhlazení).		
Kriging	Zohledňuje směrové vlivy	Neprochází žádnou		
	(eroze, vítr)	z bodových hodnot,		
	oscilace mimo naměřené	komplexnost.		
	max/min hodnoty.			
Simple Kriging (SK)	Zohledňuje prostorovou	Méně flexibilní, méně		
	autokorelaci a chybu	přesný.		
	měření.			
Ordinary Kriging (OK)	Zohledňuje prostorovou	Složitá implementace,		
	autokorelaci a chybu	neschopnost zpracovat		
		nestacionární data.		

	měření, Odstraňuje trend	
Universal Kriging (UK)	Zohledňuje prostorovou autokorelaci i globální trendy.	Složitější než OK, potřeba znalosti trendů v datech.

Tabulka 1 Přehled jednotlivých interpolačních metod (zdroj: Advantages And Disadvantages Of Inverse Distance Weighting; Types of Interpolation Methods; DAYA, Ali Akbar a BEJARI, Hadi, 2015)

Dan McLeod, John Jacobson, Mark Hardy, Carl Embry, (2013) Autoři ve své studii představují 3D LiDAR jako moderní nástroj pro přesnou a efektivní inspekci podmořských infrastruktur, který nabízí řadu výhod oproti klasickým vizuálním metodám. Popisují nasazení 3D LiDAR senzoru DP2[™] na autonomní podvodní vozidlo Marlin®, vyvinuté ve spolupráci společností Lockheed Martin a 3D at Depth. Cílem projektu bylo propojit 3D sonar a LiDAR za účelem tvorby detailních 3D modelů, detekce změn a lokalizace odchylek vůči referenčním strukturám. Terénní testy probíhaly v letech 2012–2013 a následně v roce 2014 u pobřeží Floridy. Technologie umožňuje rychlý sběr georeferencovaných 3D dat a nachází uplatnění při inspekci potrubí, kotev a dalších podmořských zařízení. Zmenšená verze by byla (velmi teoreticky) použitelná i pro monitorování tůní, alespoň těch větších a hlubších.

3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Základním stavebním kamenem jsou data. Zde konkrétně data získaná leteckým laserovým skenováním CHKO Litovelské Pomoraví. Data jsou rozdělena do menších celků o rozměrech 1250 x 1000 m. Tyto plochy obsahují rozmezí zhruba 70 až 105 milionů bodů. Průměrný počet bodů na 1 m² je zhruba 42.

Použité metody

V této práci byly použity interpolační metody, které jsou podrobně rozepsány v *Kapitole 2.* Konkrétně se jednalo o Kriging (Empirical Bayesian kriging (EBK), OK, UK), Spline a IDW.

Interpolovaná data byla validována pomocí čtyřech klíčových chybových metrik, a to: MSE (mean squared error), RMSE (root mean squared error) MAE (mean absolute error) a MD (mean difference).

Tyto metriky slouží k vyhodnocení přesnosti predikovaných modelů, respektive jaká je odchylka od skutečných hodnot. Willmott a Matsuura, (2005) a Chai a Draxler, (2014) diskutovali, zda je lepší MAE nebo RMSE. Oba autoři uvádějí argumenty pro upřednostnění jedné metriky před druhou, ale obecně nelze říct, že nějaké metrika je sama o sobě lepší (Hodson, 2022). RMSE je vhodnější použít pro normální Gaussovo rozložení chyb a MAE je optimální pro Laplaceovo rozložení chyb.

MSE měří průměrnou kvadratickou odchylku mezi predikovanými a skutečnými cílovými hodnotami.

Výpočet MSE pomocí vzorce:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Y_i - Y'_i)$$

Rovnice 1 Výpočet střední kvadratické chyby (MSE)

kde: Y_i představuje pozorované hodnoty nadmořské výšky (DMR)

Y_i představuje predikované hodnoty interpolací

n je počet bodů

Nevýhodou je citlivost na odlehlé hodnoty. RMSE udává odchylky predikce (v našem případě v metrech), v podstatě se jedná o druhou odmocninu z MSE (*Mean squared error, 2025*).

MAE je průměr absolutních hodnot chyb, definovaný vzorcem:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |Y_i - Y'_i|$$

Rovnice 2 Výpočet průměrné absolutní chyby (MAE)

kde: Y_i představuje pozorované hodnoty nadmořské výšky (DMR)

Y_i představuje predikované hodnoty interpolací

n je počet bodů

Je méně citlivá na velké chyby ve srovnání s RMSE, protože každá chyba přispívá k MAE přímo úměrně své absolutní hodnotě (Acharya, 2021).

RMSE je odmocněný průměr absolutních hodnot, které je definováno vzorcem:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Y_i - Y'_i)}$$

Rovnice 3 Výpočet odmocněné střední kvadratické chyby (RMSE)

kde: Y_i představuje pozorované hodnoty nadmořské výšky (DMR)

- Y_i představuje predikované hodnoty interpolací
- *n* je počet bodů

Pokud ovšem odstraníme absolutní hodnoty, dostáváme MD. Ta spočítá průměr hodnot chyb. Tím pádem říká, jestli interpolace podhodnocuje nebo nadhodnocuje hodnoty.

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Y_i - Y'_i)$$

Rovnice 4 Výpočet průměrné chyby (MD)

kde: Y_i představuje pozorované hodnoty nadmořské výšky (DMR)

- Y_i představuje predikované hodnoty interpolací
- *n* je počet bodů

Kromě samotných výpočtů byly použité i metody, které obsahuje ArcGIS Pro, jako například Zonal Statistics as Table pro vytvoření chybových metrik uvnitř vybraného polygonu, dále pak Multidirectional rastry, pro vizuální porovnání. Na závěr příčné řezy tůněmi, pro zachycení průběhu interpolace.

Pro zjištěný tvaru tůně byly použity tvarové metriky.

Rectangularity (Obdélníkovost)

Obdélníkovitost vyjadřuje, jak moc se daný tvar podobá obdélníku. Počítá se jako poměr plochy objektu k ploše jeho minimálního ohraničujícího obdélníku. Hodnoty blížící se 1 znamenají, že tvar je téměř obdélníkový, zatímco nižší hodnoty ukazují na nepravidelné tvary.

Ellipticity (Eliptičnost)

Eliptičnost popisuje podobnost objektu k elipse a je definována jako poměr hlavní osy elipsy k její vedlejší ose. Pokud je hodnota 1, tvar je dokonalý kruh. Čím vyšší hodnota, tím více je objekt protáhlý.

Perimeter-Area Ratio (Poměr obvodu k ploše)

Tato metrika vyjadřuje vztah mezi obvodem objektu a jeho plochou. Čím vyšší hodnota, tím členitější a nepravidelnější je tvar. Hladké objekty mají nižší hodnoty, zatímco tvary s mnoha výběžky nebo složitými hranicemi vykazují vyšší hodnoty.

Circularity (Kruhovitost)

Kruhovitost měří, jak moc se tvar blíží ideálnímu kruhu. Je definována jako poměr mezi plochou objektu a čtvercem jeho obvodu, přičemž do vzorce vstupuje konstanta 4π. Dokonalý kruh má hodnotu 1, zatímco ostatní tvary mají hodnoty nižší.

Convexity (Konvexita)

Konvexita porovnává skutečný obvod objektu s obvodem jeho konvexního obalu (nejmenšího konvexního mnohoúhelníku, který objekt zcela obklopuje). Hodnota 1 znamená, že tvar je dokonale konvexní, zatímco nižší hodnoty indikují nepravidelné a vyduté tvary.

Elongation (Protažení, podlouhlost)

Podlouhlost udává míru protažení objektu a je vypočítána jako poměr délky hlavní osy k délce vedlejší osy, které jsou odečteny od 1. Hodnota se pohybuje v rozmezí 0 (kruh) až 1 (velmi eliptický tvarů).

Použité programy

ArcGIS Pro

ArcGIS Pro je desktopová aplikace GIS od společnosti Esri. ArcGIS Pro umožňuje zkoumat, vizualizovat a analyzovat data, vytvářet 2D mapy a 3D scény a sdílet práci na ArcGIS Online nebo na portálu ArcGIS Enterprise (*Introduction to ArcGIS Pro*). V této práci byla použita verze 3.4.0

Python

Python je interpretovaný, objektově orientovaný a vysoce úrovňový programovací jazyk s dynamickou sémantikou. Díky vestavěným datovým strukturám, dynamickému typování a vazbě je ideální pro rychlý vývoj aplikací i jako skriptovací jazyk pro propojení různých komponent. Jeho jednoduchá a čitelná syntaxe usnadňuje údržbu kódu. V této práci byla použita verze 3.10.11

Podporuje moduly a balíčky, což zvyšuje modularitu a znovu použitelnost kódu. Python i jeho rozsáhlá standardní knihovna jsou zdarma dostupné pro všechny hlavní platformy (*What is Python? Executive Summary*).

Microsoft Excel

Excel je tabulkový procesor od společnosti Microsoft, který je součástí skupiny produktů Microsoft Office a Office 365 (*What is Excel? Everything You Need to Know - Definition by WhatIs.com*). V této práci byla použita verze 3.4.0

Inkscape

Inkscape je volně dostupný vektorový grafický open source editor. Nabízí bohatou sadu funkcí a je široce používán pro různé ilustrace (*Inkscape.com*). V této práci byla použita verze 1.2

QGIS

QGIS (dříve známý jako Quantum GIS) je bezplatný a open-source software pro různé platformy, který umožňuje uživatelům analyzovat a upravovat prostorové informace a vytvářet a exportovat grafické mapy. QGIS podporuje rastrové i vektorové vrstvy (*Kumar*, 2019). V této práci byla použita verze softwaru 3.30's-Hertogenbosch.

RStudio Desktop

RStudio je bezplatný statistický, open-source software a programovací jazyk, který se používá pro statistickou analýzu dat a vychází ze staršího programovacího jazyka S (*Statistical & Qualitative Data Analysis Software: About R and RStudio*).

CPU-Z

Program pro zjištění softwarových a hardwarových parametrů počítače. Dostupný z <u>https://www.cpuid.com/</u>. Verze 2.13.0.

Postup zpracování



Celý proces začíná přípravou dat. Importací data ve formátu LAS. Následuje filtrace bodového mračna a poté tvorba DMR. Paralelně s importem LAS dat probíhá konverze LAS do GPKG a filtrace bodů na "ground". Následně dochází k ořezání bodů reprezentujících tůň a její okolí. Poté tvorba uměle zatopených tůní. U uměle zatopených tůní tak vzniká vodní hladina, které představuje polygon, kterému jsou vypočítány tvarové metriky. Z ořezaných bodů se provede vhodná interpolační metoda. Po provedení interpolace dochází k vyhodnocení interpolace. Tento krok zahrnuje analýzu interpolace, porovnání interpolace s referenčním rastrem a výpočet RMSE, MSE, MAE a MD. Na základě této interpretace se vyhodnotí vhodnost metod a formulují se doporučení nejvhodnější interpolační metody/metod.

Na závěr bude napsán python skript, který celý proces automatizuje. Ten se pak spustí na vybraná území v rámci případové studie.

Příprava dat

Lidarové bodové mračno, ve formátu LAZ (LASzip), bylo potřeba dekomprimovat do formátu LAS (LIDAR Aerial Survey), a to importováním a znovu exportováním v programu QGIS. Pro práci s bodovým mračnem bylo potřeba převodu LAS na formát GeoPackage (GPKG), čímž vznikne jeden soubor, který na rozdíl od shapefile nemá velikostní omezení 2 GB. Pro tento účel byl v jazyce Python vytvořen skript, který převádí LAS na GPKG, navíc vybere pouze body, které jsou klasifikovány jako povrch (ground). Výsledný geopackage obsahuje atributy se souřadnicemi X, Y a Z v souřadnicovém systému UTM (Universal Transverse Mercator) zone 33N, EPSG: 32633.

Výběr "ground" bodů z bodového mračna bylo provedeno pomocí skriptu, který zároveň převáděl LAS na GPKG. Bodové mračno bylo předem klasifikováno od poskytovatele jejich algoritmem, který spadá pod know-how firmy. Z toho důvodu nelze úplně určit o jaký algoritmus/metodu se jedná a jakou má klasifikace chybovost.

Přesnost DTM (Digital Terrain Model) je významně ovlivněna sklonem terénu a výškou vegetace v podrostu. S rostoucím sklonem terénu se přesnost DTM snižuje a vyšší vegetace v podrostu také přispívá k větším chybám. Hodnota RMSE, která měří chybu modelu, má souvislost s úhlem sklonu terénu. (V některých případech se uvádí, že RMSE se blíží 1,5násobku hodnoty úhlu sklonu terénu.) (Krzysztof Stereńczak a kol., 2017).

V další studii se zkoumalo, jak vegetace ovlivňuje přesnost LiDARu, přičemž se zjistilo, že dochází k systematickému nadhodnocování výšky směrem nahoru zhruba o 5-17 cm), které běžné filtry neodstraní u nízké vegetace. Tato studie navrhuje korekci podle typu vegetace nebo textury bodového mračna, přičemž textura má potenciál, ale vyžaduje další testování. Právě problém s vegetací do 10 cm je tak malý, že směrodatná odchylka je zanedbatelná, což činí její odstranění prakticky nemožné, na rozdíl od vyšší vegetace (30 cm a více). (Ben G. H. Gorte, Norbert Pfeifer a Sander Oude Elberink, 2005).

Na RMSE se projevuje i sklon snímkování. RMSE je nejpřesnější v oblasti off-nadir (3 až 6 stupňů), což naznačuje, že sklon má větší vliv na přesnost výsledného DTM než úhel off-nadir (Su, J. and Bork, E., 2006).

Vzhledem k území CHKO Litovelského Pomoraví je třeba brát v potaz hustou vegetaci a její vliv na přesnost DTM. Jak uvádějí Su, J. and Bork, E., (2006), hustý porost, zejména vysoká vegetace jako stromy, keře a traviny, omezuje průchodnost LiDAR paprsků k terénu, což vede k nadhodnocení výškových hodnot. Tento efekt je zesílený v oblastech se strmými svahy, kde dochází k odrazům v různých úhlech, což snižuje přesnost interpolace terénního modelu. Přítomnost husté vegetace tak zvyšuje nejistotu výsledného DTM, zejména v kombinaci se strmým terénem, jak ukazují výsledky této studie.

Po filtraci všech bodů tak zůstaly body klasifikovaných jako "ground". Bylo potřeba vybrat reprezentativní tůně z hlediska jejich tvaru. Vybrány byly tůně, které připomínají

tvar obdélníku, kruhu a tvaru písmene C. Tůně se liší ve velikostech, některé mají na délku jednotky metrů, zatímco některé jsou dlouhé i několik desítek metrů. Tůně byly klasifikovány podle tvarových metrik, které popisovali jejich tvar.

Tyto tůně a jejich vybrané okolí (velikost okolí byla jedním ze zkoumaných faktorů ovlivňující vliv interpolace) vstupují do interpolace. Pro vyhodnocení přesnosti interpolace bylo zapotřebí mít referenční rastr. Jednou z možností bylo jeho vytvoření z bodového mračna. K tomu sloužil nástroj *Feature to Raster* v programu ArcGIS Pro, do nějž vstupovalo bodové mračno (klasifikované jako "ground"). Důležitá bylo i zachování podrobnosti dat, proto byla zvolena velikost pixelu 0,25 metru. Dle dokumentace USGS (United States Geological Survey) LiDAR Base Specification je doporučená velikost pixelu několikanásobkem průměrné vzdálenosti mezi body v LiDAR datech (HEIDEMANN, Hans Karl, 2012). Výpočet průměrné vzdálenosti mezi body se počítá dle vzorce:

$$d = \sqrt{\frac{1}{D}}$$

Rovnice 5 Výpočet průměrné vzdálenosti mezi body

kde: D je hustota bodů na m^2

Počet bodů na metr čtvereční, byla vytvořena, za pomocí nástroje *Create Fishnet*, síť o velikost buňky 1x1 metr. Všechny body, které byly obsaženy v síti, byly sečteny a následně děleny počtem buněk v síti. Tímto způsobem byl vypočítán průměrný počet bodů na metr čtvereční, který byl přibližně 40–45. Po dosazení do vzorce vyjde přibližně 0,15 cm, což by znamenalo velikost pixelu 0,3 až 0,45 metru, dle doporučení USGS. Na základě tohoto doporučení a konzultace s vedoucím diplomové práce, bylo rozhodnuto pro velikost pixelu 0,25 metru.

Nástroj LAS Dataset To Raster (který na závěr nebyl použitý pro výpočty) nabízí interpolační metodu binning nebo triangulaci. Binning se sám o sobě nechová jako interpolace. Do buňky přiřadí hodnotu, ale pokud v buňce nejsou žádná data, hodnota zůstává NoData (LAS Dataset To Raster (Conversion)). Bodové mračno obsahuje místa, kde se body nevyskytují vůbec (například kvůli výskytu vody). Tyto místa je vhodné vyplnit interpolací, aby byl DMR kontinuální plochou bez NoData hodnot. Z toho důvodu je potřeba dbát na vhodný výběr interpolace. Pro získání výsledného DMR pro proběhnutí finálního automatizačního skriptu, byla nakonec použita metoda Focal Statistics, pro doplnění NoData hodnot a DMR, který byl vytvořený výpočtem z průměru hodnot nadmořské výšky bodů vyskytujících se v pixelu (0,25 m). Ačkoliv by kriging poskytnul přesnější výsledky, než nástroj Focal Statistics, jeho výpočetní náročnost pro tolik bodů by byla zbytečně náročná, jak na čas, tak na hardware (ALCARAS, Emanuele; AMOROSO, Pier Paolo a PARENTE, Claudio, 2022; Kriging Interpolation – The Prediction Is Strong in this One; MCKENZIE, Helen, 2023). Vzhledem k tomu, že NoData hodnoty se vyskytují na některých tůních sporadicky, a při velikosti tůní v řádu metrů a velikosti pixelu 0,25 metru, tak vliv použité metody interpolace na NoData pixely má vliv v rámci jednotek centimetrů, což při takové rozloze není tolik významné, zvlášť pokud interpolované plochy jsou velmi malé (viz. Obrázek: 3). Metoda Focal Statistics používá pro vyplnění na základě okolních bodů kruh o rádiusu tří metrů. Zároveň zachovává přirozenější terénní vzhled. Druhou možností byl předem připravený referenční rastr, který byl dodán vedoucím diplomové práce. Ten byl na závěr použitý pro veškeré rozdílové rastry, ačkoliv má rozlišení 0,5 m. Jelikož při porovnání výsledků rozdílů interpolace vůči referenčnímu rastru (0,5 m) a vytvořeného DMR (0,25 m), hodnoty RMSE se ve výsledku liší pouze v řádech milimetrů (pro 0,25 jsou tyto hodnoty horší). Určit, jak moc je referenční rastr přesný, by vyžadovalo terénní měření, které nebylo realizováno. Z toho hlediska jsou veškeré hodnoty v tabulkách v této práci výsledkem porovnání interpolace vůči rastru dodaným vedoucím diplomové práce.



Obrázek 3 NoData pixely v referenčním rastru a tůni o velikost zhruba 28x31 metrů.

Výběr tůní, simulace zaplavení a interpolační metody

Bylo vybráno celkem devět tůní, od každého tvaru tři zástupci, včetně jejich okolí. Vodní plochy nelze, kvůli pohlcení laserového paprsku vodou, naskenovat. Na místech, kde se vyskytuje voda vznikají NoData hodnoty (*viz Obrázek 3*), prázdná místa v datech, která by bylo nutné doplnit interpolací. Přesnost takové interpolace nelze ověřit, protože neexistuje referenční rastr. Proto nelze tyto zaplavené tůně použít. Z tohoto důvodu byly vybrány tůně, které v době skenování měli zcela, případně z velké části, vyschlé dno. Takové tůně slouží jako referenční rastr, jelikož podstatná část pixelů tvořící dno a okolí tůně není zkreslená interpolací, ale získaná jako průměrná hodnota bodů nacházejících se uvnitř pixelu.

Přes atributovou tabulku byly seřazeny body (vždy pro každou jednotlivou tůni) od nejnižšího pod nejvyšší z hlediska nadmořské výšky. Aby došlo k umělému zaplavení tuně, je potřeba k nejnižšímu bodu (nejnižší hodnotě nadmořské výšky v tůni) přičíst, o kolik centimetrů se tůň zaplaví. (Například nejnižší hodnota nadmořské výšky v tůni je 230,10 m n.m., pokud navýšíme hladinu o 10 centimetrů, budou odmazány body v rozmezí nadmořské výšky 230,10 až 230,20 m n.m.). Tyto vybrané body byly odstraněny, což způsobilo vznik NoData hodnot na dně tůně (umělé zaplavení), které bylo nutné dopočítat pomocí interpolace (viz. kapitola Interpolace).

Na základě rešerše bylo vybráno několik interpolačních metod (RBF, Spline, Kriging, IDW), převážně se zaměřením na kriging. Cílem diplomové práce bylo mimo jiné otestovat interpolační metody a zaměřit se na jejich parametrizaci. Součástí testování různé volby parametrů, byl testován i rozsah okolních bodů, které nespadají do části vymezené jako tůň. Zároveň zkoumání vlivu hloubky zatopení tůně, anizotropie a přidání bodů na dno tůně.

Pro vyhodnocení přesnosti interpolací byly použity chybové metriky, jako RMSE, MAE, MSE a MD. Aby se počítala chyba pouze uvnitř tůně, byla vytvořena polygonová vrstva, kopírující tvar zaplavené části tůně. Pro výpočet těchto metrik bylo potřeba odečíst interpolace od referenčního rastru. Posléze byla použita funkce Zonal Statistic as Table,

která vypočítala průměr všech čtverců rozdílového rastru v polygonu. Tím bylo dosaženo hodnot MD. Stejným způsobem, akorát umocněním tohoto rozdílu, byly získány kvadratické chyby, jejich průměrem pak hodnota MSE, jejím odmocněním RMSE.

Tohle hodnocení ovšem odečítalo interpolace od referenčního terénu, který má velikost pixelu 0,5 metru. Pro přesnější a správnější porovnání by bylo vhodné lepšího přístupu, a to porovnáním hodnot interpolace vůči původním laserovým datům v místě zaplavení tůně. To bylo docíleno tím, že body, které se umělým zatopením smazaly, tak byly vstupem do funkce *Feature to Raster*, tím vzniknul DMR (pokud se tedy v textu hovoří o DMR, je to rastr o velikosti pixelu 0,25 m) z původních LAS bodů. Zbylé body pak vstupovali jako input pro interpolace. Jelikož způsob použití 0,25 m/px vykazoval pouze minimální rozdíl, byl tak použit pouze v některých případech (pokud byl použitý, vždy je to napsané u daného textu/obrázku/grafu). V rámci vyhodnocení se tak primárně použil rastr o velikosti pixelu 0,5 metru.

Následně pokračoval skript stejným způsobem, a to výpočtem chybových metrik, použití funkce Zonal Statistic as Table a výpočtem tvarových metrik pro polygonovou vrstvu, která slouží jako uměla vodní hladina. Výsledkem této mezifáze bylo získání povědomí o chybovosti jednotlivých interpolací, které pomáhalo k finálnímu rozhodnutí o použití nejlepší interpolace.

Na závěr bylo potřeba celý proces zautomatizovat. Uživatel nahraje data ve formátu LAS/Feature Layer a výsledkem automatizace je vytvořena rastrová vrstva, která je doplněna o interpolované rastry. K tomu vytvořená polygonová vrstva tůní, včetně jejich těžišť. Zároveň doporučení, které tůně je potřeba doměřit ručně přímo v terénu, a u kterých lze spolehnout na přesnost interpolace.

4 INTERPOLACE TŮNÍ

Obecný přehled interpolačních metod, jejich výhody, nevýhody a využití byl představen již v úvodu práce. Tato kapitola podrobně popisuje jednotlivé tůně s konkrétním nastavením (hloubka, okolí, metoda interpolace včetně změny vlastních parametrů a přidání bodu/ů do prostoru tůně).

Nejpřesnější metodou, zároveň výpočetně nejnáročnější, je kriging. Konkrétně Empirical Bayesian kriging. Oproti jiným metodám krigingu, EBK nevyžaduje ruční nastavení parametrů, ale automaticky je počítá pomocí procesu dílčích nastavení a simulací. Zároveň se liší tím, že zohledňuje chybu vzniklou odhadem základního semivariogramu, což ostatní krigovací metody nezohledňují a tím podhodnocují standardní chyby predikce (*What is empirical Bayesian kriging?; EBK Regression Prediction (Geostatistical Analyst)*).

Veškeré interpolace byly prováděny v programu ArcGIS Pro, verze 3.1.1

4.1 Tůně obdélníkového tvaru

Tvar interpolované oblasti ovlivňuje spolehlivost prostorových interpolačních metod. Na základě toho tvrzení byly tůně rozděleny dle tvaru. V této kapitole se budeme zabývat tůněmi, které připomínají tvar obdélníku. Jelikož se jedná o přírodní objekt, tak se nebude nikdy jednat o dokonalý obdélník, ale tůň tvarem bude připomínat jakýsi protáhlý obdélník (polygon).

Obdélníková tůň č. 1

Prvního zástupce obdélníkových tůní viz. *Obrázek 4*. Tato tůň se skládá konkrétně ze tří dílčích tůní (1, 2, 3). Do interpolace vstupovaly pouze tůně 2 a 3, se zaměřením na tůň 2. Tůň 1 obsahuje vysoké množství NoData hodnot, z toho důvodu ji nebylo možné použít jako jednu ze zkoumaných tůní. Zájmové území je na obrázku vykresleno červeným čtvercem o rozměrech 93 x 88 metrů, který obsahuje přibližně 296 000 bodů vstupujících do interpolace. Tůň 2 je podélně dlouhá zhruba 68 metrů, tůň tři cca 45 metrů (podélně).



Obrázek 4 Obdélníková tůň číslo 1, umělé zatopení 20 cm

Po výběru všech bodů byly tůně uměle zaplavené, a to do výšky hladiny 10 a 20 centimetrů, což dalo vzniknou několika plochám, kde byla porovnávána přesnost interpolace. Na *Obrázku 5* lze vidět několik, barvou odlišených, uměle vzniknutých vodních ploch. Červená elipsa představuje hlavní zkoumanou plochu nacházející se v tůni číslo 2. Žluté elipsy označují sekundární vodní plochy. (Na závěr růžová elipsa, která nebyla cílem zkoumání, jelikož v době pořizování dat byla tato ploch zaplavená, tudíž obsahuje NoData hodnoty a neexistuje tak referenční model pro porovnání přesnosti interpolace).



Obrázek 5 Obrázek nalevo zobrazuje nově vzniklé, uměle zatopené, vodní plochy. Zelené tečky jsou body vstupující do interpolace. Obrázek napravo zobrazuje interpolaci.

V dalším kroku byla prováděna konkrétní změna parametrů. Ta byla kategorizována dle měnících se parametrů na:

- Volba souřadnic středu predikovaného bodu
- Změna rádiusu
- Zvýšení počtu maximálních a minimálních sousedních bodů
- Zvýšení počtu maximálních a minimálních sousedních bodů a změna rádiusu
- Zvýšení počtu maximálních a minimálních sousedních bodů a změna sektoru
- Zvýšení počtu maximálních a minimálních sousedních bodů, změna sektoru a změna rádiusu

Rádius definuje poloměr vyhledávacího okruhu pro určení sousedních bodů použitých k lokálním odhadům. Pro tuto tůň byla volba rádiusu 1, 5, 15, 30 a 60 metrů. A to kvůli velikost zájmového území.

Maximální počet sousedů (maxn) a minimální počet sousedů (minn) určují největší a nejmenší počet bodů, které musí být použity k odhadu hodnoty. Pro tuto tůň byla volba bodů (S rádiusem 1 metr.):

- maxn 20 a minn 20
- maxn 30 a minn 25
- maxn 45 a minn 35
- maxn 64 a minn 64

Nicméně ArcGIS Pro automaticky zvětšuje rádius, pokud nedokáže najít maximální počet bodů v daném rádiusu. Což znamená, že toto nastavení automaticky mění i rádius, jelikož data nejsou natolik hustá, aby došlo k nalezení tolik bodů v rádiusu jednoho metru (body do jednoho metru se pohybují v rámci jednotek až nižších desítek).

V dalším kroku byla použita kombinace změny rádiusu a zvýšení počtu maximálních a minimálních sousedních bodů. Tento krok byl kombinací dvou předešlých kroků. Tudíž parametry zůstávají stejné:

- rádius 5, maxn 20, minn 15
- rádius 15, maxn 30, minn 25
- rádius 30, maxn 45, minn 35
- rádius 60, maxn 64, minn 64

Zvyšování maximálního a minimálního počtu sousedů a zároveň rádiusu přináší stejné výsledky, jako pouhé zvyšování počtu sousedů. Proto nemá smysl testovat takovou kombinaci parametrů. (Ten byl testován pouze na dvou tůních).

Z dalšího nastavení byla provedena změna volby sektoru, ze kterého se vybírají sousední body pro interpolaci. Doposud byl sektorem kruh, tudíž se body vybíraly rovnoměrně. V tomto kroku došlo ke změně sektoru na čtyři sektory, oblast se rozdělila na kvadranty a z každé se vybírali body (nastavení sektorů slouží primárně k tomu, pokud jsou data nerovnoměrně rozložená, aby nebyla interpolace příliš ovlivněna hustotou bodů v jedné části dat). S čtyřmi sektory se změnil i počet maximálních a minimálních bodů:

- rádius 1, maxn 4, minn 4, sektory 4
- rádius 1, maxn 8, minn 8, sektory 4
- rádius 1, maxn 12, minn 12, sektory 4
- rádius 1, maxn 16, minn 16, sektory 4

Vzhledem k tomu, že se rádius přizpůsobuje maximálním a minimálním počtu sousedům, tak kombinace (a samotné nastavení) těchto dvou parametrů byla použita pouze pro testování na jedné tůni a dále se s ní nebude počítat, bude se počítat pouze s parametrem změny sektorů.

- rádius 5, maxn 4, minn 4, sektory 4
- rádius 15, maxn 8, minn 8, sektory 4
- rádius 30, maxn 12, minn 12, sektory 4
- rádius 60, maxn 16, minn 16, sektory 4

Ostatní parametry zůstaly zachovány ve výchozím nastavení: Subset size: 100 Overlap Factor: 1 Number of Simulations: 100 Output Surface Type: Prediction Transformation: None Semivariogram Type: Power Neighborhood Type: Standard Circular

Jedním z parametrů je i "Transformation". Pokud by data neměla normální rozdělení, bylo by třeba provést transformaci. K ověření normality dat, byla vybrána obdélníková tůň č. 1, protože celé území obsahuje velké množství bodů. Z testovací tůně byl náhodně vybrán vzorek 5000 bodů, který byl vstupem pro Shapiro-Wilkovův test normality. Kompletní oblast této tůně (všechny importované body) vstupovala do Kolmogorov-Smirnovova a Andreson-Darlingova testu, jelikož umí pracovat s celý datasetem a nejsou omezeny počtem vstupních bodů (jak je tomu u Shapiro-Wilkova testu). Testování probíhalo v programu Rstudio (verze 4.3.2). Následně byl vytvořen histogram (*viz Obrázek 6*).

Histogram nadmořské výšky



Obrázek 6 Histogram nadmořské výšky

Histogram vizuálně potvrzuje normalitu, ale všechny testy potvrdili, že data nemají normální rozdělení. Výsledné p-value bylo u všech testů stejné, a to: 2.2⁻¹⁶. Ačkoliv se jedná o velmi nízké p-value, tím pádem byla nulová hypotéza zamítnuta, tak je diskutabilní, jestli při velmi velkém počtu bodů (které data obsahují) nejsou testy velmi citlivé a tím pádem nikdy nemůžou potvrdit normalitu dat. Data tím pádem mají normální rozdělené.

Varouchakis a kol., (2012) Ve své studii tvrdí, že výběr vhodných normalizačních transformací a semivariogramových modelů zlepšuje přesnosti krigingových odhadů. Transformace (konkrétně se jednalo o Gaussovu anamorfózu, Trans Gaussův kriging a Box-Coxova) zlepšují průměrnou absolutní chybu predikce v srovnání s aplikací obyčejného krigingu na netransformovaných datech. Z výběru transformací by byla vhodná Box-Cox transformace, nicméně EBK nabízí použití pouze Empirické transformace a Logaritmické transformace. Ta nebyla použitá, jelikož šikmost vyšla 0.0638, to se blíží nule, data jsou symetrická, tím pádem byla zvolena empirická transformace a typ semivariogramu K-Bessel. A to na parametrech:

- rádius 60, maxn 30, minn 25, 1 sektor, funkce K-Bessel, transformace Empirical
- rádius 60, maxn 8, minn 8, 4 sektory, funkce K-Bessel, transformace Empirical
- rádius 60, maxn 16, minn 16, 4 sektory, funkce K-Bessel, transformace Empirical
- rádius 60, maxn 64, minn 64, 1 sektor, funkce K-Bessel, transformace Empirical

Gundogdu a Guney, (2007) Testovali několik semivariogramů na hladině podzemní vody a jako nejlepší typ (na základě hodnot RSME) byl Circular a Spherical. K-Bessel byl v pořadí 9 z 11 testovaných semivariogramů. EBK nenabízí tyto varianty (v ArcGIS Pro). V základu jsou zde transformace Empirical a Log Empirical. Z typů semivariogramů je to: Exponenciální, Whittle a K-Bessel (a jejich varianty, kde je odstraněný trend, takzvané Detrended).

Ordinary a Universal Kriging

Mnoho studií potvrzují metodu Ordinary Krigingu a Universal Krigingu jako jednu z nejlepších možností pro interpolaci povrchu. Vzhledem k potřebě transformovat data, OK/UK nabízí *Box-Cox* transformaci, po které vychází p-value testu na normalitu dat 0.959 (data mají normální rozdělení). Zároveň přináší na výběr spousty jádrových funkcí a možnost odstranění trendu. Cílem bylo ověřit rozdíly mezi exponencionální a Gaussovskou jádrovou funkcí a zároveň rozdíly mezi OK a UK.

Pang a kol., (2012) tvrdí, že exponencionální jádrová funkce převyšuje Gaussovu i sférickou. V rámci OK byl prozkoumán vliv jádrové funkce na interpolaci.

Prvním parametrizace byla bez použité transformace dat. Dle studie (Gundogdu a Guney, 2007) byla testována Exponencionální, Cirkulární, Sférická a Gaussovská jádrová funkce (na základě RMSE). První parametrizace, u které byl testovaný vliv modelu na výslednou interpolaci:

• Lag Size: 0,25; Model: Gaussian; Max Neighbors: 20; Min Neighbors: 15; Major & Minor Semiaxis: 5; Sector: 1 Sector;

Model: Stable, Circular, Spherical, Exponencial, Gaussian

V dalších interpolacích zůstala parametrizace stejná, pouze se měnil model (jak u prvního nastavení) a *Lag Size* zůstal optimalizovaný dle modelu. Tahle parametrizace byla zvolena kvůli ověření optimalizace parametru *Lag Size*.

• Lag Size: Optimalizované dle modelu; Model: Gaussian; Max Neighbors: 20; Min Neighbors: 15; Major & Minor Semiaxis: 5; Sector: 1 Sector;

Ve třetím Ordinary Krigingu došlo ke změně počtu sousedů a optimalizaci velkosti os elipsy. V *Tabulce 2 (Pro EBK)* vyšla jako nejlepší interpolace ta, kde byl nastavený větší rádius (60 metrů), ať už pomocí vysokého (64 sousedů) maximálního a minimálního počtu sousedů, tak přímo parametrem rádius. Proto i v tomhle kroku bylo použito stejného nastavení.

 Lag Size: Optimalizované dle modelu; Model: Gaussian; Max Neighbors: 64; Min Neighbors: 64; Major & Minor Semiaxis: Optimalizované dle modelu; Sector: 1 Sector;

Ačkoliv data mají normální rozložení a nevykazují žádný trend, tak i přes to byl testován Universal Kriging (UK). Ten předpokládá, že můžeme vyjádřit hodnotu Z jako součet deterministické funkce a stochastického členu (*What You Need About Universal Kriging: A Complete Guide*). Tento trend byl modelován pomocí funkcí z předvoleb ArcGIS Pro. V prvé řadě byl testován vliv této funkce na trend, společně s *bandwidth* (šířka jádra), počtem maximálních a minimálních sousedů, a velikostí os. V každém případě interpolace byla hlavní osa delší, kvůli testování anizotropie. Semivariogramu byl nastavený *Lag Size* 0,06, model byl použit *Stable*, jelikož z předchozího testování se jednalo o nejpřesnější model. Dále pak *Major Range*, na hodnoty 50, 80 a 150. Samotný model (ale i trend) byl jedno sektorový, s měnícím se počtem max a min sousedů.

Konkrétní parametrizace UK:

Trend – Bandwidth: (3, 15, 30); Kernel Function: (Gaussian, Exponential, Quartic, Epanechnikov, Fifth-order polynomial, Constant); Max Neighbors: (100, 250, 1200); Min Neighbors: (100, 250, 1200); Sector: 1 Sector; Major Semiaxis: (20, 80, 120); Minor Semiaxis: (50, 120, 160); Angle: 40; Lag Size: 0,06; Model: Stable; Max Neighbors: (10, 120, 200); Min Neighbors: (10, 120, 200); Major & Minor Semiaxis: (50, 80, 150); Sector: 1 Sector;

Čísla a text v závorkách představují hodnoty, které byly použity postupně v parametrizaci, celkově tak vzniklo 18 interpolací, které můžeme rozdělit na tři hlavní třídy parametrizace, veškeré hodnoty byly brány popořadě, jak jsou napsané v závorkách.

Finálním krokem bylo přidání bodů na dno tůně. V jednom případě byl přidán pouze jeden bod, v dalším body tři. Tyto body byly rovnoměrně rozmístěny. Vliv byl testován jak pro EBK, tak pro OK a UK.

Obdélníková tůň č. 2

Druhá obdélníková tůň (*viz Obrázek 7*) se nachází v blízkosti řeky, Při zvýšení hladiny (zhruba o 122 cm) dojde k propojení vodní hladiny s řekou, Tato tůň je zaplavena 60 centimetry vody. Velikostí tůně je 30 x 5 metrů (čtverec o velikosti 99 x 85 metrů, obsahující 280 000 bodů).



Obrázek 7 Obdélníková tůň číslo 2, umělé zatopení 60 cm

Obdélníková tůň č. 3

Poslední obdélníková tůň (*viz Obrázek 8*), které se též nachází v blízkosti řeky. Při zvýšení hladiny tak dojde k propojení s řekou. Délka tůně je 34 metrů, šířka se postupně mění od čtyř až po devět metrů (čtverec o velikosti 180 x 124 metrů, obsahující zhruba 552 tisíc bodů).



Obrázek 8 Obdélníková tůň číslo 3, umělé zatopení 40 cm

Vyhodnocení (obdélníkové tůně)

Ve stejném pořadí, v jakém byly testovány parametry, tak navazuje i vyhodnocení. Prvním parametrem byl zvyšující se rádius. Tůň vyznačená červenou elipsou (ta protáhlejší elipsa, nacházející se níž na *Obrázku 9*), měla šířku vodní hladiny čtyři metry. V takovém případě EBK nedokázalo dopočítat hodnoty bez chyby a docházelo k podhodnocení hodnot uvnitř tůní, respektive se vytvořil jakýsi šev, který rozdělil tůň na dvě části. V jedné interpolace nadhodnocuje a v druhé podhodnocuje. V místě švu (kde se potkávají podhodnocené a nadhodnocené hodnoty) je výrazný rozdíl hodnot. S rostoucím rádiusem roste i počet pixelů, kde hodnota není tolik podhodnocená a dochází tak k přesnější predikci hodnot, ale pouze do určité šířky hladiny (zhruba 3-4 metrů). Na delší vzdálenosti jsou hodnoty podhodnocené a EBK nepřesně modeluje povrch dna. Zároveň při vyšším rádiusu dochází k výrazným změnám hodnot uvnitř tůně, a to v rozdíly v řádech jednotek centimetrů (ojediněle i rozdíly až 15 centimetrů).



Obrázek 9 Porovnání rozlišné parametrizace EBK, prezentováno na rozdílovém rastru obdélníkové tůně číslo 1, umělé zatopení 20 cm

Automaticky zvyšovat rádius by mělo i zvyšování maximálních a minimálních sousedů, za předpokladu, že nemůže tyto body najít ve vymezeném okolí. V dalším kroku tak došlo pouze ke zvýšení počtu bodů, rádius byl jeden metr. Chování takové interpolace bylo stejné jako v případě, kdy se zvyšoval jen rádius. Nicméně nadhodnocovala hodnoty před jejich prudkým poklesem uprostřed tůně. Na *Obrázku 10* (společně s grafy) lze vidět vytvořené úsečky, které naznačují příčné řezy tůně. Tyto řezy jsou níže zobrazeny formou grafů, které ukazují průběh interpolací, oproti referenčnímu terénu. Problémové místa se nachází na dně tůně, kde má interpolace problém správně predikovat hodnoty a dochází tak k podhodnocení hodnot. Kolem těchto černých pixelů (*viz Obrázek 9*) uvnitř tůně vznikají nadhodnocené hodnoty (bílé pixely). Obecně veškeré použité interpolace predikují body pod referenční terén, viz hodnoty MD v tabulkách.

Na příčném řezu 1 je větší počet bodů kompletně rozlišný od referenčního rastru. Zatímco nižší počet bodů víceméně kopíruje skutečný tvar tůně, krom dna, kde je mírně nadhodnocené. Na příčném řezu 2 jsou nadhodnocené obě interpolace. Příčný řez 3 kopíruje tůň téměř přesně (alespoň vizuálně), ale ve spodní části dochází k propadu hodnot. Na příčném řezu 4 je křivka průběhu referenčního terénu velmi nízko pod hodnotami interpolace. To může být způsobeno tím, že tůň tvarově spíše připomíná tvar kruhu, nikoliv elipsy. Na základě toho je předpoklad, že kulaté tůně budou mít s interpolacemi problém a hodnoty tak budou nadhodnocené.

Třetím krokem bylo spojení dvou předchozích parametrizací, takže se zvyšujícím počtem sousedů došlo i ke zvýšení rádiusu. Tohle nastavení přineslo naprosto totožné výsledky s tůněmi, kde došlo pouze k nastavení počtu sousedních bodů. Pokud dochází ke zvýšení maximálního a minimálního počtu sousedních bodů, je zbytečné zvyšovat rádius. EBK to udělá automaticky za uživatele.

Dále proběhlo k vyhodnocení změny počtu sektorů (z jednoho na čtyři) a s tím spojeného vlivu na interpolaci. Vizuálně je interpolace v místech zaplavení nadhodnocená (jako u všech předchozích variant). Pro hodnocení odchylky predikovaných hodnot od referenčního rastru byly použity metriky, jako jsou MSE, RMSE a MD, viz *Tabulka 2.* (Ukazatel MD poskytuje údaj o tom, že modely jsou nadhodnocené). Interpretací tabulky vzešly nejlepší interpolace (dle RMSE, MSE a MD): 4, 5, 3 (v tomto pořadí). Z toho vyplývá, že nejvhodnější je použití velkého rádiusu, ať už v rámci jednoho sektoru, tak i 4 sektorů. Na druhou stranu i rádius 5 metrů a nižší počet bodů vykazují poměrně malé odchylky. Na veškerých tabulkách, kde se objevuje slovo K-Bessel, tak je tím myšleno pokaždé empirická transformace, funkce K-Bessel.

]	1 2	23	8 4	5	6	7	8	9	10

Tůň obdélník číslo. 1, výška hladiny 20 cm	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor	max 15 min 10 rádius 1 1 sektor	max 20 min 15 rádius 5 1 sektor	max 64 min 64 rádius 60 1 sektor	max 16 min 16 rádius 60 4 sektory	max 4 min 4 rádius 5 4 sektory	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor K-Bessel			
MSE	0.0039	0.0048	0.0036	0.003	0.0035	0.006	0.0058	0.005	0.0058	0.006
RMSE (m)	0.0624	0.0695	0.0596	0.0545	0.0591	0.0773	0.076	0.0704	0.0761	0.0777
MD	-0.0522	-0.06	-0.0474	-0.037	-0.0534	-0.0693	-0.0678	-0.0639	-0.069	-0.0687

Tabulka 2 Komparativní analýza EBK interpolace s různými parametry obdélníkové tůně č. 1, umělé zatopení 20 cm





Obrázek 10 Příčné řezy obdélníkové tůně 1, umělé zatopení 20 cm. Grafy zobrazující průběh jednotlivých interpolací vůči referenčnímu terénu.

Tabulka 3 zobrazuje tyto metriky pro OK, ten umožňuje zkoušet jak BoxCox transformaci, tak různé typy modelů. Zároveň lze model optimalizovat, ovšem pokud dojde k optimalizaci, může nastat problém ve velmi nízké hodnotě pole *Lag Size* a *Major range*, ta způsobí to, že uvnitř tůně nepostupuje interpolace kontinuálně směrem dolů, ale vytvoří celistvou plochu v jedné rovině. Konkrétně model *Gaussian* optimalizoval rozsah os v rámci desítek centimetrů, proto model vychází jako velmi špatný a místo optimalizace byla velikost os nastavena na 50 metrů (přibližně, jako ostatní modely). Při testování OK byla vybrána jistá parametrizace (shodná z předešlých EBK interpolací) a měnila se pouze funkce (*viz Tabulka 3*).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
								20		
	max 20	max 20 🛛 👘	max 20	max 20	max 20	max 20				
	min 15									
Tůň obdélník	rádius os 5									
číslo. 1, výška	1 sektor									
hladiny 20 cm	lag 0,25	lag OPT								
Ordinary Krig.	Exponencial	Stable	Spherical	Circular	Gaussian	Exponencial	Stable	Spherical	Circular	Gaussian
MSE	0.0895	0.0048	0.0732	0.0547	0.0663	0.0073	0.0048	0.0658	0.0071	0.0043
RMSE (m)	0.2992	0.0696	0.2705	0.2338	0.2576	0.0857	0.0696	0.0842	0.0842	0.0658
MD	-0.2693	-0.0635	-0.2275	-0.0635	-0.0635	-0.0785	-0.0635	-0.0773	-0.0773	-0.0569
OPT = OPTIMALIZED	1					I 1				

Tabulka 3 Komparativní analýza OK interpolace s různým nastavení funkce obdélníkové tůně č 1, umělé zatopení 20 cm

Nejlepším modelem je *Stable*. Pro velmi nízký *Lag Size*, počet sousedů a velikost os, má tento model řádově nižší hodnoty, oproti některým modelům. Tento model vyšel jako druhým nejlepším i při optimalizovaném *Lag Size*. V OK, kde byla optimalizace této hodnoty, tak byl nejlepším modelem *Gaussian*. Ačkoliv se jedná jen o desítky milimetrů, v případě RMSE). Tyto modely mají chybu RMSE zhruba 7 centimetrů.

Při optimalizaci *Lag Size* a os, počtu max a min sousedů 64, byl nejlepším modelem *Stable*, chyba RMSE zhruba 5,5 cm. Obecně se modely liší v jednotkách centimetrů. Jako nejlepší vychází použití *Stable*. Následně Circular/Gaussian. V případu většího rádiusu os jsou si modely velmi podobné (například exponencionální model je nejhorší pro krátké vzdálenosti os, ale při větších délkách je srovnatelný s ostatními použitými modely).

Výsledná tabulka chyb pro Universal Kriging potvrzuje, že všechny interpolace, ve své parametrické třídě, jsou si podobné, skoro shodné. Největší rozdíly (v rámci milimetrů) nabízí nejnižší parametrizace. Všechny interpolace dosahují hodnot RMSE 9,3 cm. V další třídě parametrizace dosahuje RMSE 7 cm. V té poslední je to pouhých 5,9 cm. Nejhorších výsledků dosahovala interpolace, kde byla použita v rámci trendu, exponenciální funkce (pořád se jedná o jednotky milimetrů).

V rámci přesnosti byla použita i *BoxCox* transformace pro nejlepší metodu (*Stable*), výsledky byly shodné pro model *Stable* bez použití *BoxCox* transformace.

U obdélníkových tůní byl testován vliv anizotropie na výsledky interpolací. Cílem bylo posoudit, jak anizotropie ovlivňují průběh a spolehlivost interpolace v rámci zkoumané tůně. Ta byla testována pro model *Stable* a Gaussian. Pro tyto modely bylo použito stejné parametrizace, jako v *Tabulce 3.* V případě *Stable* se model zhoršil (dle RMSE) o tři centimetry, což může být způsobeno rozdílností velikost os. Zde byla hlavní osa nastavena na 100 metrů a vedlejší na 20 metrů, celá elipsa byla rozdělená do čtyřech sektorů. Gaussian vykazoval zlepšení, ale jenom o 2 centimetry, což taktéž mohlo být způsobeno rozdílným rádiusem os (hlavní 5, vedlejší 1,4 metrů). Další anizotropie byla v rámci
Gaussova modelu s výrazně větším rádius os (hlavní 150, vedlejší 120 metrů), ani výrazné zvýšení os nepomohlo interpolaci. Ačkoliv anizotropie nijak nezlepšuje nebo nezhoršuje hodnoty RMSE, při 3D porovnání lze říct, že anizotropie má vliv na přesnost interpolace.

Dalo by se zjednodušeně říct, že čím větší rádius, tím přesnější interpolace. Pro rádius 60 metrů bylo RMSE 5,45 centimetrů, zatímco po navýšení rádiusu více než dvojnásobně, se RMSE změnilo na 5,31. Zde bylo počítáno zhruba se 2 317 000 body, ve čtverci o velikost stran 270 metrů.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tůň obdélník číslo. 1, výška hladiny 20 cm	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor	max 15 min 10 rádius 1 1 sektor	max 20 min 15 rádius 5 1 sektor	max 64 min 64 rádius 60 1 sektor	max 16 min 16 rádius 60 4 sektory	max 4 min 4 rádius 5 4 sektory	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor K-Bessel			
MSE RMSE (m) MD	0.0039 0.0624 -0.0522	0.0048 0.0695 -0.06	0.0036 0.0596 -0.0474	0.003 0.0545 -0.037	0.0035 0.0591 -0.0534	0.006 0.0773 -0.0693	0.0058 0.076 -0.0678	0.005 0.0704 -0.0639	0.0058 0.0761 -0.069	0.006 0.0777 -0.0687
Bod uprostřed										
MSE RMSE (m) MD	0.0037 0.0607 -0.0523	0.0042 0.0648 -0.0573	0.0037 0.0607 -0.0523	0.0026 0.0511 -0.0390	0.0032 0.0563 -0.0523	0.0050 0.0708 -0.0646	0.0051 0.0712 -0.0619	0.0045 0.0668 -0.0595	0.0050 0.0708 -0.0595	0.0053 0.0731 -0.0633

Tabulka 4 Komparativní analýza EBK interpolace s různými parametry obdélníkové tůně č. 1, umělé zatopení 20 cm: Vliv přidaného bodu na chybové metriky

Tabulka 5 ukazuje výsledky RMSE pro jednotlivé parametry EBK interpolace. Přidáním bodu na dno tůně, se zlepšila hodnota RMSE (u EBK) v průměru o 3,6 cm (o 1,8 %). (*viz Tabulka 4*). V rámci obdélníkových tůní bylo potvrzeno, že bod uvnitř tůně zlepšuje přesnost interpolace, čím více bodů, tím přesnější. Nicméně interpolace číslo 3 měla menší přesnost (velmi nepatrnou). EBK bez bodů má průměrnou chybu 34,15 % vůči zatopení (20 cm). S jedním bodem se tato chyba sníží na 32,25 % a se třemi na 29,45 %

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tůň obdélník číslo 3, výška hladiny 40 cm	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor	max 15 min 10 rádius 1 1 sektor	max 20 min 15 rádius 5 1 sektor	max 64 min 64 rádius 60 1 sektor	max 16 min 16 rádius 60 4 sektory	max 4 min 4 rádius 5 4 sektory	max 64 min 64 rádius 30 1 sektor	max 16 min 16 rádius 30 4 sektory K-Bessel	max 8 min 8 rádius 15 4 sektory	max 30 min 25 rádius 15 1 sektor
MSF	0.0200	0.0248	0.0200	0.0130	0.0157	0 0293	0.0589	0.0556	0.0590	0.0600
RMSE (m)	0.1413	0.1575	0.1413	0.1139	0.1252	0.1713	0.2427	0.2358	0.2429	0.2449

Tabulka 5 Komparativní analýza EBK interpolace s různými parametry obdélníkové tůně č. 3, umělé zatopení 40 cm

V rámci obdélníkové tůně číslo 3 bylo provedeno testování pomocí příčného a podélného řezu, kde byly vstupem čtyři interpolace (*Obrázek 11*). Vůči referenčnímu terénu se oranžová interpolace ukazuje jako ta, která se nejvíc blíží referenčnímu terénu, ačkoliv se zde vytvořila deprese, které v určitých místech proniká pod referenční terén. Světle modrá interpolace, která má stejné parametry jako oranžová, akorát se zvýšil počet sektorů, kopíruje referenční terén jako druhá nejblíže. Tyto dvě interpolace jsou si velmi podobné, akorát u světle modré nedochází k náhlému podhodnocení. Navzdory výraznému

snížení hodnot u šedé interpolace, i přes to je poměrně dost přesná. U takové interpolace, která má velmi nízké hodnoty parametrů dochází ke skokům změn hodnot. Poslední interpolací je žlutá, které používá empirickou transformaci (funkce K-Bessel). Tato interpolace mnohem výrazněji nadhodnocuje hodnoty, defacto průběh interpolace jde opačným směrem než všechny ostatní interpolace.



Obrázek 11 Podélný a příčný řez v obdélníkové tůni č. 3, umělé zatopení 40 cm. Porovnání čtyř rozlišných parametrizací

Obrázek 12 Vyobrazuje 3D modely jednotlivých interpolací s různými parametry (barevné) vůči DMR (šedý). Tyto parametry jsou shodné i pro ostatní kategorie tůní ve 3D porovnání. Pouze u kulatých OK byla použita navíc *BoxCox* transformace. Která byla vyzkoušena i u obdélníkových tůní, nicméně nedošlo k významné změně interpolace.

Zelená: EBK, rádius 60, 1 sektor, max a min sousedů 64
Modrá: EBK, rádius 60, 1 sektor, max a min sousedů 64, transformace Empirická – funkce K-Bessel
Žlutá: EBK, rádius 5, 4 sektory, max a min sousedů 4
Červená: EBK, rádius 60, 4 sektory, max a min sousedů 16
Světle modrá: OK, rádius 100/30, Anizotropie, 4 sektory (45°), max a min sousedů 50, Lag size – optimalizovaný, funkce – Stable
Růžová: OK, rádius 100, 4 sektory (45°), max a min sousedů 50, Lag size – optimalizovaný, funkce – Stable

Pro představu a vizuální porovnání byly tůně importovány do programu Blender 4.1. První vybranou tůní byla obdélníková tůň číslo 3. Bylo vybráno šest různých parametrizací, a to dle hodnot RMSE. Vybrané parametrizace: Zelená, jakožto nejlepší interpolace. Modrá, která má stejnou parametrizaci jako zelená tůň, akorát používá empirickou transformaci (funkce K-Bessel). Žlutá interpolace, které je dle hodnot RMSE nejhorší, červená, která kombinuje vysoké hodnoty rádiusu, počtu sousedů a zároveň je čtyř sektorová a na závěr dvě OK interpolace. Ty byly porovnány s DMR (šedou tůní). Nejlepší a nejhorší interpolace se v podstatě liší přesností, a to tak, že žlutá trošku méně kopíruje tvar DMR. Ve žluté tůni, se na jejím dnu vyskytují jakési příčné vystouplé prahy (což je způsobeno nízkým počtem sousedů a krátkým rádiusem). Zatímco zelená více kopíruje DMR, vzniká zde podélný šev (který je i u žluté tůně), ve kterém se hodnoty liší řádově o pět centimetrů. Dokonce zde, jako na jediném místě, interpolace podhodnocuje predikci pod DMR. Tento jev byl zaznamenán i na červené interpolaci, kde není šev tak ostrý, ale principiálně jsou si interpolace velmi podobné, jediný rozdíl je, že červená interpolace přesněji (zanedbatelně) kopíruje DMR. Závěrem z EBK interpolací, je tůň modrá, která je jako jediná podhodnocená oproti DMR, ale v místech, kde je tůň nejširší (obecně má interpolace problém s výpočtem) dochází k nadhodnocení hodnot, což vypadá jako funkce méně strmé, záporné paraboly. Světle modrý a růžový rastr je vytvořený metodou Ordinary kriging. Světle modrá interpolace zohledňuje anizotropii. Z porovnání lze vidět, že anizotropie má pozitivní vliv na

Pro lepší představu byl vytvořen i rozdílový rastr (*Obrázek 13*), od interpolace odečtením vytvořeného DMR. Rozlišení tohoto rastru (DMR) je 0,25 metrů, ten byl vytvořen z původních bodů. Hodnoty jsou v metrech, zelená je kladná část, zde interpolace nadhodnocuje, naopak červená záporná část značí, že interpolace podhodnocuje hodnoty. Polygon, kterým je tůň ořezaná, má buffer zhruba 2 metry kolem zonální vrstvy, která naznačuje hladinu zaplavené tůně. Na rozdílovém rastru se tak vyskytuje kolem dokola část, ve které se vyskytovaly body. Jinými slovy, na rozdílovém rastru jsou části (okrajové, kolem dokola), které se interpolovaly přímo z naměřených hodnot, takže je v nich zanedbatelná odchylka.Tenhle postup byl aplikovaný i pro další tvary tůní. Zároveň byly přidány histogramy, ukazují počet jednotlivých hodnot pro každý rozdílový rastr. Bílé pixely jsou NoData pixely.

Jelikož ArcGIS Pro neumožňuje v symbologii vrstvy nastavit desetinná čísla, tak hodnoty kladné kolem nuly, jsou zobrazeny červeně. Nicméně to výrazně neovlivňuje výsledek.



Obrázek 12 Vizuální porovnání interpolací obdélníkové tůně č. 3 (umělé zatopení 40 cm), ve 3D (barevně rozdělené pro větší přehled, šedá barva je DMR)

EBK, rádius 60, 1 sektor, max min bodů 64 EBK, rádius 60, 1 sektor, max min bodů 64 transformace K-Bessel

EBK, rádius 5, 4 sektory, max min bodů 4



EBK, rádius 60, 4 sektory,
max min bodů 16OK, rádius 100/30, anizotropie,
4 sektory, max min bodů 50OK, rádius 100,
4 sektory, max min bodů 50Obrázek 13 Rozdílový rastr obdélníkové tůně číslo 3, umělé zatopení 40 cm, interpolace EBK



Obrázek 14 Histogramy jednotlivých rozdílových rastrů obdélníkové tůně č. 3, umělé zatopení 40 cm

Z histogramů (*Obrázek 14*) vyplývá několik důležitých poznatků. Všechny použité interpolační metody vykazují největší počet pixelů kolem hodnoty -2. Interpolace OK mají nejmenší počet záporných hodnot, což naznačuje, že podhodnocují výrazně méně než EBK. Všechny histogramy zároveň mají delší "ocas" na pravé straně, což ukazuje na méně časté, avšak významné pozitivní odchylky. Celkově lze říct, že metody OK mají tendenci produkovat přesnější výsledky s menší mírou podhodnocení, zatímco použití empirické transformace (funkce K-Bessel) v rámci EBK přispívá ke zlepšení interpolace. Rozdíly mezi jednotlivými histogramy zároveň potvrzují, že volba konkrétní metody a jejích parametrů výrazně ovlivňuje výslednou přesnost. První a čtvrtý histogram má méně extrémních hodnot a tím pádem jsou tedy více konzervativní v odhadech. To znamená, že tyto interpolace jsou méně náchylné k vytváření extrémních hodnot.

4.2 Tůně tvaru písmene C (půlměsícovité)

Poměrně častým zástupcem, co se týče tvaru, jsou i tůně připomínající tvar písmene C, které jsou pravděpodobně pozůstatky meandrů, které jsou nyní zanesené.

Tůň tvaru písmene C č. 1

Tato, v průměru menší tůň, o velikost 20 x 18 metrů *(Obrázek 15)*, obsahuje zhruba 106 000 bodů k interpolaci (okolní polygon o rozměrech 48 x 48 metrů). Při zaplavením



Obrázek 15 Tůň tvaru písmene C č. 1, umělé zatopení 40 cm

pouhými 10 cm vody vzniknul tvar "C" (oproti půlměsícovité tůni č. 2). Parametrizace tůně byla shodná s obdélníkovou tůní č. 1. Vzhledem k menšímu okolí, byl pro parametr tůní s empirickou transformací (funkce K-Bessel), zvolený menší rádius, a to 30 metrů.

V tůni "C" č. 1 byla testována přesnost EBK po přidání jednoho a tří bodů (ty byly rovnoměrně rozmístěny po celé délce) na dno tůně. Ze zkušeností interpolací obdélníkových tůní, bylo očekávání zvýšení přesnosti i v těchto případech.

Tůň tvaru písmene C č. 2

Druhou zkoumanou tůní z kategorii půlměsícovitých je tůň vyobrazena na *Obrázku 16.* Tato tůň dosahuje rozměrů zhruba 40 x 50 metrů (čtverec o velikosti 90 x 70 metrů, obsahující 311 000 bodů). Červenou barvou vyznačená elipsa označuje část tůně,



Obrázek 16 Tůň tvaru písmene C č. 2, umělé zaplavení 20 cm

kde při zaplavení 10 centimetrů vzniká díra v datech, tudíž vhodná plocha pro interpolace. Žlutá elipsa označuje vedlejší část celku tůně, kde umělá vodní hladiny vzniká až po zaplavení 20 cm vody. Při simulaci zatopení 50 centimetry je téměř celá tůň zaplavená. Bylo potřeba ověřit, jak se interpolace chová v tůni tvaru písmene C, při zaplavení tůně do zhruba 40 centimetrů vznikají menší tůně, které jsou tvarově spíše obdélníkové. Výška vodní hladiny až 50 centimetrů vytvořila tvar "C"

Tato tůň byla zatopena 50 cm a 60 cm vody. Na *Obrázku 17* se nachází nalevo tůň zatopená 50 cm. Při takové hloubce nedochází k propojení levé a pravé strany tůně, nicméně vzniká tvar otevřeného písmene C (napravo). Naopak při hloubce 60 cm došlo ke kompletnímu zatopení tůně.



Obrázek 17 Tůň tvaru písmene C č. 2, umělé zaplavení 50 cm nalevo, 60 cm napravo

Tůň tvaru písmene C č. 3

Poslední tůní vstupující do interpolace, o rozměrech 40 x 30 m, je na *Obrázku 18*. (čtverec o velikosti 90 x 100 metrů, obsahující přibližně 270 000 bodů). Tato tůň je součástí pravděpodobně vedlejšího ramene řeky, které se zaplní celé při zvýšení vodní hladiny o metr (k stavu vodní hladiny v době snímkování). Vymezená oblast tůně zahrnovala pouze koncovou část tohoto ramene. Tato tůň byla zaplavena 50 cm vody.



Obrázek 18 Tůň tvaru písmene C č. 3, umělé zaplavení 50 cm

Vyhodnocení (půlměsícovité tůně)

Porovnání referenčního rastru, od kterého byla odečtena interpolace se změnou minimálního/maximálního počtu sousedů a volbou čtyř sektorů. Při zatopení tůně 50 centimetry dosahovala šířka uměle vzniklé vodní hladiny až 7 metrů. V místech, kde byla tato šířka do 3.5 metrů, interpolace vykazovala rozdíly v jednotkách centimetrů (na některých pixelech ojediněle až 15 centimetrů) nad referenční rastr. V místech, kde šířka byla větší než 3.5 metru, interpolace nadhodnocovala hodnoty od 15 do 40 cm.

Se zvyšujícím počtem sousedních bodů klesá chyba rozdílu hodnot pixelů uvnitř tůně. Nicméně zároveň s tím je spojená změna průběhu terénu. U nižšího počtu sousedů dochází k okamžitému a kontinuálnímu klesání hodnot směrem do tůně (tyto hodnoty jsou nadhodnoceny téměř okamžitě od míst, kde se nevyskytují body). Zatímco u vyššího počtu sousedů, interpolace klesá velmi mírně dolů (zhruba 1 až 2 metry od konce známých hodnot) a zároveň nadhodnocuje v tomhle kontinuálním terénu hodnoty pixelů. Ale poté dochází k razantní změně predikovaných hodnot (to lze pozorovat v červeném kruhu na Obrázku 19). Interpolace silně podhodnocuje hodnoty, černé pixely dosahují hodnoty 20 až 40 centimetrů pod referenční terén. Minimální a maximální počet sousedních bodů ovlivňuje i rádius, a to tak, že pokud nenajde zvolené množství bodů, tak se rádius automaticky zvětší. Proto stačí nastavit pouze maximální nebo minimální počet bodů a nechat algoritmus nastavit vhodný rádius. Výsledky metrik RMSE, MSE a MD dopadly stejně jako u tůní obdélníkových, pořadí parametrizací zůstává stejné. Na základě těchto výsledků obdélníkových a půlměsícovitých tůní lze říct, že bez ohledu na tvar, má největší vliv rádius (potažmo počet sousedních bodů). Zároveň byla porovnána nejlepší parametrizace s nově vytvořenou, kde byl rádius zvolen 150 metrů. Interpolace proběhla z bodů ve čtverci o rozměrech 155 metrů (zhruba 1 170 000 bodů). Výsledné hodnoty jsou zcela zanedbatelně zhoršené.

Hodnocení tůně tvaru C číslo 1 - *Tabulka 6* Dle hodnot RMSE, v rámci nejlepší interpolace (4) je odchylka 5,2 centimetrů. Tento rastr obsahuje uvnitř tůně (na jejím "dnu") hodnoty pixelů až 16 cm nad referenční rastr.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tůň tvaru C	max 15	max 15	max 20	max 64	max 16	max 4	max 64	max 16	max 8	max 30
	min 10	min 10	min 15	min 64	min 16	min 4	min 64	min 16	min 8	min 25
číslo. 1, výška hladiny 20 cm EBK	rádius 60 1 sektor	rádius 1 1 sektor	rádius 5 1 sektor	rádius 60 1 sektor	rádius 60 4 sektory	rádius 5 4 sektory	rádius 30 1 sektor K-Bessel	rádius 30 4 sektory K-Bessel	rádius 15 4 sektory K-Bessel	rádius 15 1 sektor K-Bessel
MSE	0.0048	0.0059	0.0048	0.0027	0.0034	0.0079	0.0060	0.0045	0.0052	0.0065
RMSE (m)	0.0694	0.0765	0.0694	0.0516	0.0582	0.0886	0.0776	0.0672	0.0720	0.0807
MD	-0.0537	-0.0595	-0.0537	-0.0358	-0.0485	-0.0756	-0.0637	-0.0552	-0.0591	-0.0657

Tabulka 6 Komparativní analýza EBK interpolace s různými parametry tůně tvaru písmer	ıе
C č 1, umělé zatopení 20 cm	

Po přidání jednoho bodu na dno tůně se očekávatelně zvýšila přesnost. V průměru je hodnota RMSE 0.0711 m, s jedním bodem 0.0680 a se třemi 0.0554. V případu, že byly přidány tři body na dno tůně je průměrné RMSE 27,7 % vůči žádného tůni bez bodu uprostřed (bez bodu 35,55 %).

Zatímco rozdíl mezi jedním bodem uprostřed a žádným bodem je 1,5 %, mezi jedním a třemi body to je 6,3 %, což poukazuje na to, že přidání tří bodů je výrazně přesnější než přidání pouze jednoho bodu.

K samotnému porovnání RMSE bylo přidáno i vizuální porovnání dvou multidirectional rastrů (pro přehlednější vizualizace a představu, jak tůně ve skutečnosti vypadá, (*viz Obrázek 20*), a to tůně bez přidaného bodu a tůně se třemi body. Kolem každého ze tří bodů (znázorněno červeným bodem na obrázku) na dně tůně vznikají mělké deprese. Na dně tůně bez bodu je znázorněna (červenou úsečkou) protáhlá deprese kopírující tvar tůně. Ta je právě těmito přidanými body narušena a vznikly již zmiňované mělké deprese, zhruba jeden metr kolem každého bodu.

Na tůni tvaru písmene C, číslo 2, bylo provedeno zaplavení 50 a 60 centimetry vody (*viz Obrázek 19*). Pokud je hladina vody vyšší, vzniká tak větší prostor k interpolaci, tudíž chyby jsou očekávatelně vyšší. RMSE je rozdílné zhruba o tři centimetry (*viz Tabulka 8*). Ačkoliv u interpolací s empirickou transformací (funkce K-Bessel) dochází k rozdílu až osmi centimetrů.



Obrázek 19 Porovnání rozlišných parametrů interpolace u tůně tvaru C č 2, umělé zatopení 50 cm



Obrázek 20 Porovnání tůně tvaru písmene C č. 1 (umělé zatopení 40 cm), pomocí více směrového rastru. Nalevo je tůň bez přidaného bodu, napravo se třemi body na dně tůně.

Tůň tvaru písmene C č. 3, výška hladiny 50 cm EBK	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor	max 15 min 10 rádius 1 1 sektor	max 20 min 15 rádius 5 1 sektor	max 64 min 64 rádius 60 1 sektor	max 16 min 16 rádius 60 4 sektory	max 4 min 4 rádius 5 4 sektory	max 64 min 64 rádius 30 1 sektor K-Bessel	max 16 min 16 rádius 30 4 sektory K-Bessel	max 8 min 8 rádius 15 4 sektory K-Bessel	max 30 min 25 rádius 15 1 sektor K-Bessel
MSE	0.0238	0.0292	0.0237	0.0331	0.0170	0.0411	0.0547	0.0444	0.0580	0.0607
RMSE (m)	0.1544	0.1709	0.1539	0.1820	0.1305	0.2028	0.2338	0.2108	0.2408	0.2463
MD	-0.0590	-0.0994	-0.0332	0.0208	-0.0552	-0.1480	-0.1784	-0.1637	-0.1888	-0.1898

Tabulka 7 Komparativní analýza EBK interpolací s různými parametry a rozdílným zatopením tůně tvaru písmene C č. 3, umělé zatopení 50 cm

Tabulka 7 Pro porovnání RMSE s ostatními tůněmi tvaru písmene C. Tato tůň byla součástí delšího ramene řeky, pro oddělení a vytvoření tvaru C byla maximální hloubka tůně 50 cm.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tůň tvaru C číslo. 2, výška hladiny 50 cm EBK	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor	max 15 min 10 rádius 1 1 sektor	max 20 min 15 rádius 5 1 sektor	max 64 min 64 rádius 60 1 sektor	max 16 min 16 rádius 60 4 sektory	max 4 min 4 rádius 5 4 sektory	max 64 min 64 rádius 30 1 sektor K-Bessel	max 16 min 16 rádius 30 4 sektory K-Bessel	max 8 min 8 rádius 15 4 sektory K-Bessel	max 30 min 25 rádius 15 1 sektor K-Bessel
MSE RMSE (m) MD	0.0194 0.1394 -0.1065	0.0230 0.1518 -0.1192	0.0194 0.1394 -0.1065	0.0133 0.1152 -0.0723	0.0166 0.1289 -0.0997	0.0278 0.1666 -0.1365	0.0381 0.1952 -0.1532	0.0331 0.1820 -0.1430	0.0359 0.1895 -0.1488	0.0381 0.1951 -0.1527
Tůň tvaru C číslo. 2, výška hladiny 60 cm EBK	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor	max 15 min 10 rádius 1 1 sektor	max 20 min 15 rádius 5 1 sektor	max 64 min 64 rádius 60 1 sektor	max 16 min 16 rádius 60 4 sektory	max 4 min 4 rádius 5 4 sektory	max 64 min 64 rádius 30 1 sektor K-Bessel	max 16 min 16 rádius 30 4 sektory K-Bessel	max 8 min 8 rádius 15 4 sektory K-Bessel	max 30 min 25 rádius 15 1 sektor K-Bessel
MSE RMSE (m) MD	0.0283 0.1683 -0.1150	0.0339 0.1840 -0.1396	0.0284 0.1687 -0.1151	0.0222 0.1490 -0.0649	0.0221 0.1486 -0.1079	0.0428 0.2069 -0.1668	0.0758 0.2753 -0.2184	0.0728 0.2698 -0.2141	0.0780 0.2793 -0.2235	0.0769 0.2772 -0.2206

Tabulka 8 Komparativní analýza EBK interpolací s různými parametry a rozdílným zatopením tůně tvaru písmene C č. 2, umělé zatopení 50 cm a 60 cm

Obrázek 21 porovnává, na tůni tvaru písmene C č. 2, chování dvou parametrizací interpolace na hloubku 60 cm. Porovnání jedno sektorové nejlepší (nalevo) a nejlepší čtyř sektorové (napravo)



Obrázek 21 Tůň tvaru písmene C č. 2, umělé zatopení 60 cm - porovnání nejlepších interpolací dle Tabulky 8. Nalevo parametrizace č. 4, napravo parametrizace č. 5

Pro tuto tůň bylo vytvořeno i 3D vizuální porovnání (*viz Obrázek 22*), akorát od pohledu nelze přehledně poznat, která interpolace je přesná a které nikoliv. Barevně jsou interpolace rozděleny stejně, jak u obdélníkové tůně číslo 3. Ordinary kriging interpolace (světle modrá a růžová) jsou podhodnocené, vůči DMR, stejně tak modrá tůň s empirickou transformací (funkce K-Bessel). Tuto podobnost vykazuje i obdélníková tůň č. 3. Ačkoliv (OK) interpolace podhodnocuje predikci hodnot, tak u obou krigingů, je dno tůní bezešvě interpolováno. U anizotropie je okolí (mimo tůň) v rámci možností dost přesné, až v tůni nastává výrazný propad hodnot pod DMR.

V levém i pravém ramenu zelené a červené tůně vznikají švy, výrazné odskoky hodnoty mezi sousedícími pixely. Červená interpolace je nepatrně "blíž" DMR. Oproti obdélníkové tůni č. 3, se žlutá interpolace jeví poněkud spolehlivá, je sice nadhodnocená, ale zároveň nevznikají až tak velké švy v ramenech (tento rozdíl hodnot se nachází pouze v pravém ramenu tůně).

I přes to, že světle modrý rastr (OK) nevytváří šev v ramenech tůně a interpolace dna je velmi přesná, tak obecně je interpolace podhodnocená, a to celkem významně. Nejlepší interpolací, ačkoliv nadhodnocuje nad DMR a vytváří menší šev, je červená (čtyř sektorový EBK).



Obrázek 22 Vizuální porovnání interpolací tůně tvaru písmene C č. 2 (umělé zaplavení 50 cm), ve 3D (barevně rozdělené pro větší přehled, šedá barva je DMR)

Stejně jako u obdélníkových tůní, tak i zde byl vytvořený rozdílový rastr *(viz Obrázek 23)*. Ten byl vytvořen na stejném principu. Zároveň s rozdílovým rastrem vznikly histogramy, vysvětlující rozložení hodnot.

Nejlepších výsledků (nejnižší RMSE) dosahují interpolace s vysokým rádiusem a velkým počtem max a min bodů. V rámci jedno sektorových interpolací se vytváří švy na dnech tůní. Pro čtyř sektorovou je velikost švu menší, proto je vhodnější interpolací než jedno sektorová. Na základě histogramů lze pozorovat *(Obrázek 24)* největší rozptyl hodnot od -4 do 0. I když součet je kladný (interpolace nadhodnocují), tak histogramy ukazují, že většina hodnot je záporná. To může být způsobeno vykreslováním histogramů v Rstudiu. Nejvíce nadhodnocené interpolace jsou OK, kde je součet kladných hodnot největší.



EBK, rádius 60, 4 sektory, max min bodů 16 OK, rádius 100/30, anizotropie, 4 sektory, max min bodů 50 OK, rádius 100,4 sektory, max min bodů 50





Obrázek 24 Histogramy jednotlivých rozdílových rastrů tůně tvaru písmene C č. 2, umělé zatopení 50 cm

4.3 Tůně kulaté a mírně elipsovité

Poslední kategorií byly tůně, které svým tvarem připomínají kruh. Tyto tůně vykazují podobnost s kategorií obdélníkových tůní. Jednu takovou tůni lze pozorovat na *Obrázku* 4,5, kde součástí trojice "obdélníkových" tůní je i tůně připomínající lehce protáhlou elipsu. Zároveň je proveden i řez tůní, který se od řezů protáhlými tůněmi liší. Na řezu této mírně elipsovité tůně, se interpolace chová tak, že od určité výšky zaplní tůni vodorovně.

Kulatá tůň č. 1

Obecně jsou kulaté tůně na snímcích značně zaplavené (proto nad většinou nešla provádět interpolace), nebo velmi malé (v řádech jednotkách metrů). První zkoumaná tůň má rozměr 4 x 5 metrů *(Obrázek 25)*. Byla zaplavena 30 centimetry vody. Obsahuje zhruba 260 000 bodů (okolní polygon o rozměrech 105 x 68 metrů).



Obrázek 25 Kulatá tůň č. 1, umělé zaplavení 30 cm

Kulatá tůň č. 2

Druhá zkoumaná tůň *(Obrázek 26)* byla o poznání větší, mírně elipsovitá. Rozměrově 12 x 17 metrů. Tato tůň byla zaplavena 30 centimetry vody. Obsahuje přibližně 550 000 bodů (polygon, ve kterém se nachází tyto body má rozměr 160 x 110 metrů).



Obrázek 26 Kulatá tůň č. 2, umělé zaplavení 30 cm

Kulatá tůň č. 3

Třetí tůň (27) je též mírně elipsovitá. Rozměrově 10 x 15,5 metrů. Tato tůň byla taktéž zaplavena 30 centimetry vody. Obsahuje přibližně 543 000 bodů (polygon o rozměrech 170 x 120 metrů).



Obrázek 27 Kulatá tůň č. 3, umělé zaplavení 30 cm

Vyhodnocení (kulaté tůně)

Tyto tůně vykazují podobnost v tom, že interpolace není schopná interpolovat dno tůně. Dle *Obrázku 28 a Obrázku 30*, tak z počátku, interpolace víceméně kopíruje tvar referenčního terénu. S rostoucí vzdáleností, směrem do středu, se zvyšují rozdíly mezi referenčním rastrem a interpolacemi. MD tvrdí, že interpolace je nadhodnocená, příčné a podélné řezy toto tvrzení potvrzují.



Obrázek 28 Porovnání příčných a podélných řezů na kulaté tůni č. 1 (umělé zatopení 30 cm) s bodem uprostřed (dole) a bez bodu (nahoře)

Dle hodnot RMSE, je interpolace č. 4 nejlepší a č. 6 nejhorší. Nicméně na grafech *(viz Obrázek 28)* se interpolace č. 6 přibližuje více referenčnímu terénu, což potvrzuje přesný opak. To je způsobeno tím, že RMSE bere v potaz celé území tůně, ze kterého se pak vypočítává. Na základě grafů je vidět, jak v případě jednoho bodu se interpolace výrazně zpřesní a přesněji kopíruje referenční terén. Kulatá tůň č. 2 potvrdila, že u kulatých tůni interpolace nedokáže vystihnout její dno.

Při porovnání výsledků RMSE vůči referenčního rastru o velikostí pixelu 0,5 metru oproti DMR, vytvořeného z LAS bodů o velikosti pixelu 0,25 metru, tak při podrobnějším rastru dochází ke zhoršení hodnot RMSE zhruba o tři centimetry. Tato chyba je konstantní pro všechny parametry interpolace, což může být taky způsobeno detailnějším rastrem. Na *Obrázku 29* jsou zobrazeny tři rozdílové rastry (vůči 0,25 m rastru). Nalevo je zobrazená nejlepší interpolace, která tvoří jakýsi tvar hvězdy uvnitř tůně. Uprostřed je interpolace, která má taktéž vysoký počet sousedů a rádius, ale je čtyř sektorová, z toho plyne, že by měla brát v potaz okolní terén do všech směrů. Uvnitř tůně se vytvořil tvar, podobný první interpolaci, akorát protáhlý dle směru hlavní osy elipsy. V poslední tůni (napravo) byla interpolace doplněna o empirickou transformaci pomocí funkcí K-Bessel. Tato interpolace probíhá postupně a konzistentně směrem do středu tůně. Nedochází tak k výrazným skokům hodnot mezi jednotlivými pixely. Všechny interpolace jsou nadhodnocené, a to o 30 %. Detailní porovnání všech tůní a jejich parametrů při EBK interpolaci zobrazuje *Tabulka 9*



Obrázek 29 Porovnání třech různých parametrů interpolace u kulaté tůně č. 2, umělé zaplavení 30 cm

Tůň kulatá č. 1 výška hladiny 30 cm EBK	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor	max 15 min 10 rádius 1 1 sektor	max 20 min 15 rádius 5 1 sektor	max 64 min 64 rádius 60 1 sektor	max 16 min 16 rádius 60 4 sektory	max 4 min 4 rádius 5 4 sektory	max 64 min 64 rádius 30 1 sektor K-Bessel	max 16 min 16 rádius 30 4 sektory K-Bessel	max 8 min 8 rádius 15 4 sektory K-Bessel	max 30 min 25 rádius 15 1 sektor K-Bessel
MSE	0.0108	0.0132	0.0108	0.0070	0.0095	0.0172	0.0152	0.0119	0.0156	0.0170
RMSE (m)	0.1041	0.1149	0.1041	0.0834	0.0977	0.1310	0.1234	0.1093	0.1247	0.1305
MD	-0.0775	-0.0859	-0.0775	-0.0550	-0.0716	-0.1023	-0.0931	-0.0814	-0.0941	-0.0988
Tůň kulatá č. 2 výška hladiny 30 cm EBK	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor	max 15 min 10 rádius 1 1 sektor	max 20 min 15 rádius 5 1 sektor	max 64 min 64 rádius 60 1 sektor	max 16 min 16 rádius 60 4 sektory	max 4 min 4 rádius 5 4 sektory	max 64 min 64 rádius 30 1 sektor K-Bessel	max 16 min 16 rádius 30 4 sektory K-Bessel	max 8 min 8 rádius 15 4 sektory K-Bessel	max 30 min 25 rádius 15 1 sektor K-Bessel
MSE	0.0189	0.0199	0.0190	0.0150	0.0169	0.0206	0.0264	0.0260	0.0264	0.0265
RMSE (m)	0.1374	0.1410	0.1378	0.1223	0.1300	0.1435	0.1625	0.1613	0.1626	0.1627
MD	-0.1220	-0.1253	-0.1223	-0.1073	-0.1073	-0.1275	-0.1428	-0.1420	-0.1437	-0.1434
Tůň kulatá č. 3 výška hladiny 30 cm EBK	max 15 min 10 rádius 60 1 sektor	max 15 min 10 rádius 1 1 sektor	max 20 min 15 rádius 5 1 sektor	max 64 min 64 rádius 60 1 sektor	max 16 min 16 rádius 60 4 sektory	max 4 min 4 rádius 5 4 sektory	max 64 min 64 rádius 30 1 sektor K-Bessel	max 16 min 16 rádius 30 4 sektory K-Bessel	max 8 min 8 rádius 15 4 sektory K-Bessel	max 30 min 25 rádius 15 1 sektor K-Bessel
MSE	0.0155	0.0175	0.0144	0.0104	0.0123	0.0173	0.0254	0.0245	0.0260	0.0260
RMSE (m)	0.1245	0.1323	0.1198	0.1020	0.1111	0.1317	0.1595	0.1567	0.1614	0.1622
MD	-0.1035	-0.1084	-0.0991	-0.0854	-0.0955	-0.1150	-0.1403	-0.1385	-0.1428	-0.1426

Tabulka 9 Komparativní analýza EBK interpolace s různými parametry obdélníkové tůně č. 1, 2 a 3, umělé zatopení 30 cm



Obrázek 30 Příčný a podélný řez kulatou tůni č. 2 - porovnání nejlepší a nejhorší interpolace oproti referenčnímu terénu

Obrázek 31 zobrazuje 3D modely interpolací (EBK a OK), které jsou porovnávány s DMR. Barva interpolací (parametry) jsou shodné jako u předchozích 3D vizualizací tůní. Jelikož se jedná o malou tůň, o průměru přibližně 5 metrů, predikce interpolovaných hodnot kopíruje referenční rastr jen s velmi malými odchylky, v průměru 11 centimetrů. Nejlepší interpolace (dle RMSE) zelená, velmi dobře odpovídá referenčnímu terénu, i co se týče ve fázi, kde začíná svah klesat směrem dolů. Na dně tůně jsou hodnoty ovšem nadhodnocené. Nejpřesnější interpolace dna dosahuje OK (světle modrá), který naopak dno tůně kopíruje velmi věrohodně, nicméně okolí, které se svažuje tato interpolace podhodnocuje. Nejlepší možností by tak byla kombinace zelené interpolace a světle modré (EBK a OK). Modrá, žlutá a červená interpolace mají nadhodnocené dno tůně, ale zbytek svažujícího terénu podhodnocují. Růžová a světle modrá tůň mají stejné parametry, akorát do výpočtu světle modré je zahrnuta anizotropie. Jak již bylo zmíněno, pravděpodobně nejlepší interpolací je světle modrá (OK).



Obrázek 31 Vizuální porovnání interpolací kulaté tůně č. 1 (umělé zatopení 30 cm) ve 3D (barevně rozdělené pro větší přehled, šedá barva je DMR)

K těmto 3D modelům byl vytvořený rozdílový rastr (na stejném principu jako u předešlých tůní). Zde se jednalo o poměrně malou tůň, ale i přes to docházelo k nadhodnocení. Nejlepší interpolací se jeví OK (s anizotropií), dále pak EBK s velkým rádiusem a vysokým počtem sousedů. V rámci histogramů *(Obrázek 32)* je největší výskyt hodnot kolem -2 až 0. Součty hodnot ovšem znovu potvrdili nadhodnocení (stejně jako rozdílové rastry). OK je vůči DMR o zhruba 2 cm blíž. Proto pro případ této tůně je vhodnější použití metody OK než EBK.



Obrázek 33 Histogramy jednotlivých rozdílových rastrů kulaté tůně č. 1, umělé zatopení 30 ст

max min bodů 64

EBK, rádius 60, 1 sektor,

EBK, rádius 60, 1 sektor, max min bodů 64 transformace K-Bessel

EBK, rádius 5, 4 sektory, max min bodů 4



EBK, rádius 60, 4 sektory, max min bodů 16

OK, rádius 100/40, anizotropie, 4 sektory, max min bodů 50

OK, rádius 100,4 sektory, max min bodů 50

Obrázek 32 Rozdílový rastr kulaté tůně číslo 1, umělé zatopení 30 cm, interpolace EBK

4.4 RBF a IDW

RBF

Jelikož se předchozí část zaměřovala hlavně na interpolační metodu kriging, tak v této kapitole bude popsána interpolace RBF a IDW. Metody Inverse Distance Weighting a Radial Basis Functions jsou deterministické interpolátory, často využívané pro tvorbu hladkých modelů terénu. Obě metody zaručují, že interpolovaný povrch prochází všemi měřenými body, avšak liší se ve způsobu určování vah, rozsahu předpovědí i parametrizaci hladkosti [49].

Ačkoliv RBF se převážně používá k vytváření hladkých povrchů z velkého počtu datových bodů, tak má i dobré výsledky pro jemně se měnící povrchy, jako je například převýšen (*How radial basis functions work*). Rozlišení mezi "jemnou" a "výraznou" změnou povrchu lze považovat za fuzzy (dle fuzzy logiky). Po vytvoření interpolací byly vytvořeny rozdílové rastry (pro tůně: Obdélníková č. 3, Tvaru písmene C č. 2 a Kulatá tůň č. 1.) Parametrizace RBF

- Kernel function: Regularizovaný spline, rádius 60, 4 sektory, max a min sousedů 16, Kernel parametr 15
- Kernel function: Regularizovaný spline, rádius 30, 1 sektor, max a min sousedů 16, Kernel parametr 40
- Kernel function: Regularizovaný spline, rádius 60, 1 sektor, max a min sousedů
 64, Kernel parametr 40
- Kernel function: Regularizovaný spline, rádius 60, 1 sektor, max a min sousedů
 64, Kernel parametr 80
- Kernel function: Regularizovaný spline, rádius 60 na 40, 4 sektory, max a min sousedů 16, Kernel parametr 40



Obrázek 34 Rozdílový rastr tůně tvaru C č. 2, umělé zatopení 50 cm, interpolace RBF

Co se týče volby parametrů, při zachování funkce regularizovaného splinu *(Obrázek 34),* maximální a minimální hodnoty zůstávají víceméně stejné. Až na první případ, kde kvůli nízkým hodnotám vzniknul poměrně významný odskok hodnot, ale pouze na ojedinělých pixelech. Pro každou jedno sektorovou funkci, vzniká šev na dně tůně, ve kterém dochází k prudké změně hodnot. Tomuto problému bylo předejito použitím více sektorů. Nejlepší parametrizací bylo čtyř sektorové RBF, s anizotropií a maximálně možným počtem sousedů. RBF nabízí možnost nastavení Kernel parametr, který určuje, jak moc se bude povrch měnit na krátkých vzdálenostech mezi datovými body, čím vyšší hodnota, tím hladší povrch interpolace (krom Inverse Multiquadric). Tento parametr byl nastavený podle optimalizace modelu programem ArcGIS Pro.

Dalším parametrem byla volba jádrové funkce (Kernel function). ArcGIS Pro nabízí pět možností (+ výpis vlastností):

- Completely regularized spline (regularizovaný spline) Pro hladké zobecnění a potlačení šumu
- Spline with tension (spline s tenzí) Pro prozkoumání vlivu tuhosti povrchu a zachycení lokálních změn
- Multiquadric (multi-kvadratický spline) Pro hladkou interpolaci komplexních nelineárních dat
- Inverse multiquadric (inverzní multi-kvadratický spline) Pro lokální přizpůsobení s menším vlivem vzdálených bodů
- Thin plate spline (TPS) Pro přirozeně hladký povrch minimalizující ohyb

V tomto kroku byly testovány výše uvedené jádrové funkce, jelikož každá má rozlišné vlastnosti v oblasti hladkosti výsledného povrchu. Volba těchto metod umožnila porovnat různé přístupy k interpolaci s ohledem na hladkost, respektování dat a modelování lokálních/globálních trendů. Zapletal, (2007) Popisuje rozdělení bázových funkcí na dvě kategorie: po částech hladké funkce a nekonečně hladké funkce. Po částech hladké funkce (do kterých spadají: Spline s tenzí a za jistých okolností i TPS) jsou výpočetně méně náročné a lépe lokálně reagují na změny v datech. Zároveň platí, že s rostoucím počtem bodů se stává interpolant hladkou funkcí. Zatímco nekonečně hladké funkce jsou vhodné pro modelování jevů, u kterých předpokládáme plynulé změny. U této skupiny může nastat problém, že lokální změna v datech ovlivní celý interpolant. Přesnost a stabilita závisí na počtu datových bodů a hodnotě parametru tvaru (kernel parametr).

U tůně tvaru písmene C, číslo 2 *(Obrázek 35),* tak všechny (až na poslední) interpolace jsou téměř shodné. V místech, kde se nachází nejširší část tůně dochází k nadhodnocení hodnot až o 47 centimetrů (maximum). Multi-kvadratický spline tohle číslo redukuje na 40 centimetrů (maximum), což je však stále poměrně vysoká hodnota, ale ze všech interpolací má nejlepší výsledky pro celou oblast tůně. Poslední funkce Thin Plate Spline má rozmezí hodnot od - 15 až po 52 centimetrů (minimum a maximum), nicméně to se vyskytuje pouze na lokálním místě. Na *Obrázku 35* konkrétně poslední obrázek, vzniká v horní části červený kruh záporných hodnot dosahujících minim. Napravo od něj naopak pruh s maximálními hodnotami. Ovšem zajímavá je zbylá část, kde interpolace nadhodnocuje pouze o 15 až 20 centimetrů. Ve výsledku je interpolace o 15 centimetrů blíže referenčnímu rastru.

Při použití EBK platí, že interpolace dosahuje nižšího nadhodnocení než RBF (regularizovaný spline). Pokud se vezme absolutní hodnota nejnižší a nejvyšší hodnoty, sečtou se, pak vychází RBF (o jednotky centimetrů) jako méně přesnější interpolace. Za situace, kdy se použije multi-kvadratická jádrová funkce, je interpolace RBF schopna překonat absolutní součet EBK. Nicméně pořád platí, že tato interpolace je nadhodnocená.

V porovnání s referenčním rastrem ukazuje, že nejlepší hodnoty odpovídají 20 % výšky zatopení (tj. při 50 cm zatopení činila nejvyšší naměřená hodnota 10 cm). Zatímco u EBK je to 22 %.

Výhodou nadhodnocování RBF je posunutá spodní hranice hodnot směrem k nula, tudíž nedochází k tak velkému podhodnocení.



RBF - Multi-kvadratická, rádius 60 na 40, Obrázek 35 Rozdílový rastr tůně tvaru C č. 2, umělé zatopení 50 cm, interpolace RBF – vliv jádrové funkce

Metoda RBF byla testována i pro kulatou tůň č. 1. *viz Obrázek 36* (zobrazena jako rozdílový rastr). Rozlišná parametrizace tůní výrazně měnila spodní hranici hodnot (až o 20 cm). Horní kladná hranice hodnot zůstává víceméně neměnná. Oproti EBK je tak metoda RBF méně přesná, minimálně co se týče interpolace na malé ploše. To platí i pro použití RBF s Multi-kvadratickou jádrovou funkcí. Ta je sice přesnější než regularizovaný spline, ale i přes to nedosahuje kvality přesnosti jako metoda EBK, potažmo OK.

Vůči referenčnímu rastru, nejlepší interpolace (dle RMSE), dosahuje hodnot výšky zatopení 22,7 %. U EBK 27,7 %



RBF - regularizovaný spline, rádius 60, 1 sektor, max min bodů 64, Kernel parametr 80

RBF - regularizovaný spline, rádius 60, 4 sektory, max min bodů 16, Kernel parametr 16

RBF - regularizovaný spline, rádius 60 na 40, 4 sektory, max min bodů 16, Kernel parametr 25

Obrázek 36 Rozdílový rastr kulaté tůně tvaru č. 1, umělé zatopení 30 cm, interpolace RBF

Poslední testovanou tůní, interpolací RBF, byla obdélníková č. 3. Na *Obrázku 37* (zobrazena jako rozdílový rastr) lze vidět, že spodní hranice je podhodnocená o 9 centimetrů. Tato tůň je zaplavená 40 centimetry vody, RBF nadhodnocuje dokonce nad tuto hranici, a to o 10 centimetrů.

V porovnáním s referenčním rastrem, multi-kvadratická RBF je v průměru nadhodnocena o 36,75 % (z celkového zaplavení), zatímco EBK pouze o 28,5 %. Nejlepší EBK je pouze o 2 centimetry méně nadhodnocené, avšak součet $|-Z_{min}| + |Z_{max}|$ je o 14,6 cm vyšší, než u multi-kvadratické RBF.



RBF - regularizovaný spline, rádius 60, 4 sektory, max min bodů 16, Kernel parametr 9000

RBF - regularizovaný spline, rádius 120, 4 sektory, max min bodů 16, Kernel parametr 9000

RBF - regularizovaný spline, rádius 120 na 80, 4 sektory, max min bodů 16, Kernel parametr 9000

Obrázek 37 Rozdílový rastr obdélníkové tůně č. 3, umělé zatopení 40 cm, interpolace RBF

Tůň obdélník č. 3, výška hladiny 40 cm RBF	max a min: 20 kernel parametr: 9000 rádius: 30 1 sektor regularizovaný spline	max a min: 64 kernel parametr: 9000 rádius: 60 1 sektor regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 9000 rádius: 60 4 sektory regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 9000 rádius: 120 4 sektory regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 9000 rádius: 120 na 80 4 sektory regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 0 rádius: 120 na 80 4 sektory multi-kvadratická funkce
RMSE (m)	0.1875	0.1925	0.1885	0.1874	0.1880	0.1473
Tůň tvaru C číslo. 2, výška hladiny 50 cm RBF	max a min: 64 kernel parametr: 40 rádius: 60 1 sektor regularizovaný spline	max a min: 64 kernel parametr: 80 rádius: 60 1 sektor regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 40 rádius: 30 4 sektory regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 15 rádius: 60 4 sektory regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 40 rádius: 60 na 40 4 sektory regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 0 rádius: 60 na 40 4 sektory multi-kvadratická funkce
RMSE (m)	0.1430	0.1441	0.1366	0.1379	0.1394	0.1118
Tůň kulatá č. 1, výška hladiny 30 cm RBF	max a min: 20 kernel parametr: 40 rádius: 30 1 sektor regularizovaný spline	max a min: 64 kernel parametr: 40 rádius: 60 1 sektor regularizovaný spline	max a min: 64 kernel parametr: 80 rádius: 60 1 sektor regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 16 rádius: 60 4 sektory regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 25 rádius: 60 na 40 4 sektory regularizovaný spline	max a min: 16 kernel parametr: 0 rádius: 60 na 40 4 sektory multi-kvadratická funkce
RMSE (m)	0.0914	0.0932	0.0943	0.0918	0.0900	0.0679

Tabulka 10 Komparativní analýza RBF interpolace s různými parametry obdélníkové tůně č. 3 (40 cm), tůně tvaru písmene C č. 2 (50 cm) a kulaté tůně č. 3 (30 cm)

IDW

Vytvořené RBF interpolace byly porovnány s IDW (Porovnání *Tabulky 10 a Tabulky 11*). To přiřazuje každému datovému bodu váhu podle vzorce $w_i = \frac{1}{d_i^p}$, kde d_i je vzdálenost od interpolovaného bodu a p (obvykle 2) určuje, jak rychle váha klesá s rostoucí vzdáleností. Výsledná hodnota v bodě je lokálně vážený průměr okolních bodů v definovaném okolí (např. kruhu nebo pevném počtu nejbližších sousedů). Díky této konstrukci IDW nikdy nevygeneruje hodnotu mimo interval původních dat (min-max).

Z hlediska parametrizace hladkosti nabízí IDW jen exponent p, takže povrch může být místy ostřejší kolem bodů měření. RBF naopak (s výjimkou inverzní multikvadratické) obsahuje samostatný parametr regulující hladkost výsledného povrchu – jeho zvýšením se plocha "vyhladí", snížením se zvýrazní detaily. Co do výpočetní náročnosti je IDW rychlá a jednoduchá (jen lokální vážené průměry), kdežto RBF vyžaduje sestavení a řešení matice o rozměrech počtu datových bodů, což je významně náročnější na čas i paměť (Gradka a Kwinta, 2018).

Tabulka 11 zobrazuje hodnoty RMSE pro jednotlivé parametry v rámci IDW interpolace. Porovnáním s RBF vychází IDW jako méně přesná metoda. Bez ohledu na tvar tůně, pořadí přesnosti interpolace (dle RMSE) se nemění. Nejlepší interpolací je tak v pořadí třetí a nejhorší pátá. Obecně lze říct, že pokud je power (p) vyšší, interpolace má nižší hodnotu RMSE. S vysokým počtem sousedů (250), je interpolace méně přesná, než s počtem 60. Zajímavé bylo, že změna sektoru na čtyři sektory zhoršila hodnoty RMSE.

Konkrétní parametry:

- Rádius 80, 1 sektor, max a min sousedů 60, power 2
- Rádius 80, 1 sektor, max a min sousedů 250, power 2
- Rádius 80, 1 sektor, max a min sousedů 60, power 4
- Rádius 80, 1 sektor, max a min sousedů 250, power 4
- Rádius 80, 4 sektory, max a min sousedů 250, power 2
- Rádius 80, 4 sektory, max a min sousedů 250, power 4

Tůň obdélník	max a min: 60	max a min: 250	max a min: 60	max a min: 250	max a min: 250	max a min: 250
č. 3, výška	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80
hladiny 40 cm	1 sektor	1 sektor	1 sektor	1 sektor	4 sektory	4 sektory
IDW	power 2	power 2	power 4	power 4	power 2	power 4
RMSE (m)	0.2005	0.2322	0.1966	0.2187	0.2587	0.2356
Tůň tvaru C	max a min: 60	max a min: 250	max a min: 60	max a min: 250	max a min: 250	max a min: 250
číslo. 2, výška	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80
hladiny 50 cm	1 sektor	1 sektor	1 sektor	1 sektor	4 sektory	4 sektory
IDW	power 2	power 2	power 4	power 4	power 2	power 4
RMSE (m)	0.1552	0.1882	0.1504	0.1705	0.2194	0.1857
Tůň kulatá č. 1,	max a min: 60	max a min: 250	max a min: 60	max a min: 250	max a min: 250	max a min: 250
výška	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80	rádius: 80
hladiny 30 cm	1 sektor	1 sektor	1 sektor	1 sektor	4 sektory	4 sektory
IDW	power 2	power 2	power 4	power 4	power 2	power 4
RMSE (m)	0.1051	0.1280	0.1008	0.1136	0.1539	0.1257

Tabulka 11 Komparativní analýza IDW interpolace s různými parametry obdélníkové tůně č. 3 (40), tůně tvaru písmene C č. 2 (50 cm) a kulaté tůně č. 3 (30 cm)

5 VYHODNOCENÍ INTERPOLACE

V této kapitole jsou shrnuty výsledky testování různých interpolačních metod a jejich parametrů na přesnost modelování tůní rozdílných tvarů (obdélníkovité, půlměsícovité a kulaté). Hodnocení bylo provedeno pomocí metrik RMSE, MSE a MD příčných a podélných řezů, vizuálního porovnání 3D modelů a rozdílových rastrů.

1. Obdélníkové tůně

Prvním testovaným parametrem byl zvyšující se rádius. Se zvyšujícím se rádiusem rostla přesnost predikce. Obecně lze říct, že je vhodnější nastavit vyšší rádius (ačkoliv to koreluje s počtem maximálních sousedů). Se zvětšující se šířkou tůně rostla celková RMSE a byla by potřeba dodatečná měření v terénu, alespoň jednoho bodu na dně tůně.

Zvyšování maximálního počtu sousedů koreluje s rádiusem, pokud interpolace není schopná nalézt požadovaný minimální počet bodů v nastaveném rádiusu, tak jej přirozeně zvýší. Proto pouze zvyšování počtu sousedů vede k podobným výsledkům (až stejným) výsledkům jako při pouhém zvyšování rádiusu. Kombinace zvyšování rádiusu a počtu sousedů nepřinesla žádné další zlepšení oproti pouhému zvyšování počtu sousedů, jelikož EBK v takovém případě zvyšuje rádius automaticky.

Pro hodnocení přesnosti byly použity metriky MSE, RMSE a MD. Jako nejlepší interpolace se ukázaly varianty s velkým rádiusem (60 m), bez ohledu na počet sektorů (což vyvrátily 3D modely a rozdílové rastry). Při testování Ordinary Kriging (OK) s různými modely se jako nejlepší ukázal model *Stable*, který při optimalizaci *Lag Size* a os, s počtem max a min sousedů 64, dosahoval hodnoty RMSE přibližně 5,5 cm (hloubka tůně 20 cm).

Přidání bodu na dno tůně zlepšilo průměrnou hodnotu RMSE (u EBK obdélníkové tůně č. 1) o 3,6 cm (18 %), vůči tůni bez přidaného bodu. Přidání tří bodů vedlo k dalšímu zlepšení průměrného RMSE o 0,6 cm oproti tůni s přidaným jedním bodem, přičemž nejlepší interpolace dosahovala hodnot RMSE 4,7 centimetrů (hloubka tůně 20 cm). Relativní nadhodnocení: Bez bodů se jednalo o 34 %, s jedním bodem 32,33 % a se třemi 29,5 % (vůči maximální hloubce).

Vizuální 3D porovnání šesti interpolačních metod ukázalo, že nejlepší (zelená) a nejhorší (žlutá) interpolace se lišily především přesností kopírování tvaru referenčního rastru. U žluté interpolace se na dně vyskytovaly příčné vystouplé prahy způsobené nízkým počtem sousedů a krátkým rádiusem. Zelená interpolace lépe kopírovala referenční rastr, avšak s podélným švem, ve kterém se hodnoty lišily o přibližně pět centimetrů (hloubka tůně 20 cm). Metoda OK s anizotropií vykazovala pozitivní vliv na přesnost, ačkoliv hodnoty RMSE se výrazně neměnily.

2. Půlměsícovité tůně

U tůní tvaru písmene C, bylo při zatopení 50 centimetry vody, šířka vodní hladiny až 7 metrů. V místech s šířkou do 3,5 metru vykazovala interpolace rozdíly v jednotkách centimetrů (ojediněle až 15 cm) pod referenční rastr. V místech se šířkou nad 3,5 metru interpolace hodnoty nadhodnocovala. Dle nejnižšího RMSE, predikce nadhodnocuje o 23 %.

Se zvyšujícím počtem sousedních bodů, klesala hodnota RMSE, ale měnila se kontinuita průběhu terénu. U nižšího počtu sousedů docházelo k okamžitému a plynulému klesání hodnot směrem do tůně, zatímco u vyššího počtu sousedů klesala interpolace nejprve velmi mírně (1-2 metry od známých hodnot) a poté docházelo k razantní změně predikovaných hodnot. Následně pak vnikaly švy na dně tůních, ve kterých se hodnota skokově měnila.

Přidání jednoho bodu na dno tůně zvýšilo přesnost. Průměrná hodnota RMSE byla 7,1 cm bez bodu, 6,8 cm s jedním bodem a 5,54 cm se třemi body. Přidání tří bodů zlepšilo přesnost o 27,5 % oproti situaci bez bodu, zatímco rozdíl mezi jedním bodem a žádným činil pouze 1,5 %.

Při tůni tvaru C číslo 2, bylo testováno zaplavení 50 a 60 centimetry vody. Vyšší hladina vody vytvářela větší prostor k interpolaci a vedla k očekávaně vyšším chybám. RMSE se u EBK bez transformací, lišilo přibližně o tři centimetry, u interpolací s empirickou transformací (funkce K-Bessel) dokonce až o osm centimetrů.

3D vizuální porovnání ukázalo, že OK interpolace (světle modrá a růžová, *viz podkapitola Vyhodnocení (půlměsícovité tůně)*) byly podhodnocené vůči referenčnímu rastru, stejně jako modrá empiricky transformovaná varianta (funkce K-Bessel). V levém i pravém ramenu zelené a červené tůně vznikaly výrazné švy hodnot mezi sousedícími pixely. Červená interpolace (čtyř sektorový EBK) se jevila jako nejlepší, ačkoliv nadhodnocovala referenční terén a vytvářela menší šev.

3. Kulaté tůně

U kulatých tůní interpolace nedokázala přesně vystihnout jejich dno. Interpolace z počátku kopírovala tvar referenčního terénu, ale s rostoucí vzdáleností směrem do středu se zvyšovaly rozdíly. Hodnota MD potvrzovala, že interpolace byla nadhodnocená, což bylo viditelné i na příčných a podélných řezech.

Přidání bodu na dno tůně výrazně zpřesnilo interpolaci a umožnilo interpolacím mnohem přesněji kopírovat referenční terén. Při porovnání referenčního rastru s různou velikostí pixelu (0,5 m vs. 0,25 m) docházelo při podrobnějším rastru ke zhoršení hodnot RMSE o přibližně 3 centimetry. Průměrné RMSE činilo 37,3% nadhodnocení vůči referenčnímu rastru, zatímco s jedním bodem se tato hodnota snížila na 23,7 %

U kulaté tůně číslo 1, na dně tůně vznikali různé tvary (*viz Obrázek 29*) - u nejlepší interpolace tvar hvězd, u čtyř sektorové interpolace protáhlý tvar (připomínající tělo neuronu) ve směru hlavní osy elipsy, a u interpolace s empirickou transformací (použitá funkce K-Bessel) postupný a konzistentní průběh směrem do středu tůně bez výrazných změň hodnot. Všechny interpolace byly nadhodnocené zhruba o 30 %.

3D modely ukázaly, že zelená interpolace (nejlepší dle RMSE) dobře odpovídala referenčnímu terénu v oblasti svahu, ale s nadhodnocením na dně tůně. Naopak OK interpolace (světle modrá) kopírovala dno tůně věrohodně, ale podhodnocovala svažující se okolí. Výsledky naznačují, že pro kulaté tůně by byla nejlepší kombinace zelené interpolace a světle modré.

4. Radial Basis Functions

RBF interpolace byly testovány s různými jádrovými funkcemi a parametry. U většiny interpolací s funkcí regularizovaného splinu vznikaly na dně tůně švy s prudkou změnou hodnot, čemuž bylo možné předejít použitím více sektorů. Nejlepší parametrizací bylo čtyř sektorové RBF s anizotropií a maximálním počtem sousedů.

U tůně tvaru písmene C číslo 2, byly téměř všechny interpolace shodné, s nadhodnocením hodnot až o 47 centimetrů (maximum) v nejširší části tůně. Multikvadratický spline redukoval tuto hodnotu na 40 centimetrů (maximum), což představovalo nejlepší výsledek. Funkce Thin Plate Spline měla rozmezí hodnot od -15 až po 52 centimetrů (maximum), avšak pouze lokálně, přičemž zbývající část nadhodnocovala o 15 až 20 centimetrů. Více vypovídajícím ukazatelem než maximum, je hodnota RMSE. Nejlepší RBF s multi-kvadratickou funkcí dosahovalo těchto nadhodnoceních. Tůň tvaru C č. 2, byla nadhodnocena o 22,2 % (porovnání s EBK, které má 28,5 %) vůči referenčnímu rastru, obdélníková č. 3 o 36,8 % (porovnání s EBK, které má 23 %) a kulatá tůň č. 1 o 22,7 % (porovnání s EBK, které má 27,7 %). Nejvyšších hodnot dosahuje obdélníková, jelikož je nejširší a interpolace zde špatně odhaduje hodnoty.

Při porovnání s EBK platí, že RBF dosahovala vyššího nadhodnocení. Pokud se vzal absolutní součet minimální a maximální hodnoty, vycházela RBF jako méně přesná interpolace. Při použití multi-kvadratické funkce však RBF dokázala překonat absolutní součet EBK, ačkoliv zůstávala nadhodnocená.

5. Inverse Distance Weighting

IDW interpolace byla porovnána s RBF a vycházela jako méně přesná metoda, nezávisle na tvaru tůně. Pořadí přesnosti interpolací (dle RMSE) zůstávalo neměnné vůči RBF. Obecně platilo, že s vyšším parametrem power (p) měla interpolace nižší hodnotu RMSE. S vysokým počtem sousedů (250) byla interpolace méně přesná než s počtem 60. Zajímavé bylo, že změna na čtyři sektory zhoršila RMSE.

Celkové shrnutí a doporučení

Na základě provedených testů lze konstatovat:

- 6. **Vliv tvaru tůně**: Bez ohledu na tvar tůně má největší vliv na přesnost interpolace šířka tůně, na to navazuje rádius, počet sousedů a anizotropie.
- Nejlepší interpolační metody: Z testovaných metod vykazoval nejlepší výsledky EBK, případně OK, velký rádius, více sektorový, vyšší počet sousedů, anizotropie. Z toho důvodu byla tato interpolace vybrána i do automatizačního skriptu.
- 8. Vliv přidaných bodů: Přidání bodů na dno tůně výrazně zlepšuje přesnost interpolace. Pro tůň tvaru C alespoň dva až tři body. Pro obdélníkové stačí i jeden bod. Pro kulaté stačí jeden bod.
- 9. **Sektory vs. anizotropie**: Čtyř sektorová interpolace dosahovala lepších výsledků než jedno sektorová, přičemž anizotropie měla pozitivní vliv na přesnost interpolace.
- 10. **Transformace**: Empirical, funkce K-Bessel vykazovala u všech hodnot tůní nejhorší RMSE

Pro jednotlivé typy tůní lze doporučit:

- **Obdélníkové tůně**: EBK s vysokým rádiusem, počtem sousedů, anizotropií a více sektorů.
- **Půlměsícovité tůně**: EBK s vysokým rádiusem, počtem sousedů, anizotropií a více sektorů.
- Kulaté tůně: Kombinace EBK pro svažující se část a OK pro dno tůně.

Výsledky ukazují, že volba správné interpolační metody a jejích parametrů výrazně ovlivňuje přesnost výsledného modelu terénu, přičemž různé tvary tůní vyžadují specifický přístup k interpolaci. Nicméně výsledné nejlepší interpolace a jejich parametry (EBK, OK a případně i určité metody RBF) mají mezi sebou milimetrové rozdíly, proto už záleží na uživateli, jestli pro interpolace chce použít EBK nebo OK.

6 AUTOMATIZAČNÍ SKRIPT

V rámci automatizace dílčích úloh v diplomové práci bylo vytvořeno několik Python skriptů.

Vedlejší skript + filtrační skript

Vedlejší skript provádí EBK interpolaci pro filtrované lidarové bodové mračno, které je převedeno na vektor (pomocí ArcPy). Zároveň vypočítává metriky tvaru pro polygonové vrstvy. Vypočítá RMSE, MD a MSE. Tento skript byl vytvořený pouze pro interní použití, za účelem urychlení procesu interpolací různých (uměle zaplavených) tůní s rozdílnou volnou parametrů.

Filtrační skript slouží k filtraci LAS bodového mračna, které převede na soubor GPKG. Ten, po nahrání do ArcGIS Pro, je vstupem do vedlejšího skriptu.

Hlavní kroky zpracování (vedlejší skript):

- 1. **Vstup a nastavení parametrů:** Skript definuje sadu parametrů, které uživatel zadává (vstupní data, vrstva polygonů, vrstva definující celou oblast, pole s výškou a výstupní geodatabáze).
- Oříznutí vstupních dat: Skript nejprve ořízne vstupní bodovou vrstvu na rozsah definovaný polygonovou vrstvou. Následně se oříznuté body oříznou znovu na rozsah definovaný vrstvou symbolizující umělou vodní hladinu. Vypočítá rozdíl mezi prvním a druhým oříznutím.
- Generování referenčního rastru: Z ořezaných bodů (po druhé oříznutí) se vytvoří DMR, kde hodnota každé buňky reprezentuje průměrnou výšku bodů, které do ní spadají.
- Interpolace nadmořské výšky: Pro body reprezentující tůně (po prvním oříznutí) se provede interpolace nadmořské výšky pomocí metody EBK s různými sadami parametrů.
- 5. Výpočet odchylek a chyb:

Skript vypočítá rastr rozdílů (MD) mezi DMR a interpolovanými rastry. Taky rastr čtverců chyb, který se používá pro výpočet MSE a RMSE

- 6. **Zonální statistiky:** Pro polygony tůní (polygon reprezentující vodní hladinu) se vypočítají zonální statistiky (MD, MSE a RMSE) z rastrů odchylek a chyb.
- 7. **Výpočet tvarových metrik:** Pro každý polygon tůně se vypočítají různé metriky popisující jeho tvar (obdélníkovitost, elipsovitost, kruhovitost atd.).
- 8. **Klasifikace tvaru:** Na základě vypočítaných tvarových metrik se každý polygon tůně klasifikuje do jedné z kategorií (např. čtverec, obdélník, kruh, nepravidelný tvar).
- 9. **Uložení výsledků:** Výsledné rastry a tabulky se statistikami jsou uloženy do výstupní geodatabáze.

Hlavní skript

Tento skript je navržen pro automatizované zpracování dat z bodových mračen formou *Feature Layer* v prostředí ArcGIS. Hlavním cílem je tak automatizované vytvoření rastru, ve kterém jsou zaplavené tůně interpolované. K tomu vytvoření polygonové vrstvy s těžišti tůní o souřadnicích (X, Y, Z), pro případné terénní měření.

Hlavní kroky zpracování (hlavní skript):

- 1. **Vstup a nastavení parametrů:** Skript definuje sadu parametrů, které uživatel zadává (vstupní data, pole s výškou, velikost buňky rastru, vrstvy řek a budov, atd.).
- 2. Generování DMR: Vytvoří se digitální model reliéfu (DMR) z bodových dat.
- 3. **Zpracování a čištění DMR:** NoData hodnoty v rastru jsou nahrazeny, a souvislé oblasti jsou seskupeny (vzniká tak binární rastr 0 a 1, kde 0 jsou NoData hodnoty a 1 jsou pixely, které měli nějakou hodnotu nadmořské výšky).
- 4. **Převod rastru na polygony:** Rastrová reprezentace tůní se převede na vektorové polygony.
- 5. **Vyhlazení polygonů:** Polygony jsou vyhlazeny, aby se odstranily drobné nepravidelnosti.
- 6. **Filtrování polygonů:** Polygony jsou filtrovány podle plochy a konvexity, aby se odstranily příliš malé nebo nevhodně tvarované objekty (řeky, budovy, stromy).
- 7. **Slučování překrývajících se tůní:** Tůně, které se překrývají, jsou slučovány do větších celků (tento krok je kvůli problému s částečně zaplavenými tůněmi).
- 8. **Odstranění tůní v blízkosti řek a budov:** Tůně, které leží příliš blízko řek nebo budov, jsou odstraněny (za předpokladu, že uživatel vloží vrstvu řek nebo budov).
- 9. **Výpočet tvarových metrik:** Pro každou tůň se vypočítají různé metriky (např. obdélníkovitost, eliptičnost, kruhovitost) a tůně se klasifikují podle tvaru.
- 10. **Interpolace nadmořské výšky:** Pro každou tůň se provede interpolace nadmořské výšky pomocí metody EBK.
- 11. **Oříznutí interpolovaných rastrů:** Interpolované rastry jsou oříznuty podle hranic tůní.
- 12. Kombinace rastrů: Interpolované rastry jsou kombinovány s původním DMR.
- 13. **Doplnění NoData hodnot:** Závěrečné doladění rastru, aby se eliminovaly NoData hodnoty (většinou malé, pár pixelové oblasti, které nespadají do klasifikace).
- 14. **Převod polygonů na centroidy:** Polygony tůní jsou reprezentovány jejich centroidy.
- 15. **Uložení výsledků:** Výsledné vrstvy (centroidy tůní a filtrované polygony) jsou uloženy do feature datasetu.

7 PŘÍPADOVÁ STUDIE

Úvod a cíle případové studie

Tato případová studie demonstruje praktické využití vyvinutého automatizačního skriptu pro interpolaci vodních tůní v bodovém mračnu na konkrétním území. Hlavním cílem je ověřit funkčnost a efektivitu skriptu při identifikaci tůní, aplikaci optimálních interpolačních metod a následném spojení s okolním terénem.

Případová studie sleduje tyto specifické cíle:

- Otestovat schopnost skriptu automaticky identifikovat zaplavené oblasti v bodovém mračnu
- Zhodnotit přesnost interpolací různých tvarů tůní v reálném prostředí
- Porovnat výsledky interpolací u přirozeně zaplavených tůní a uměle zatopených referenčních tůní
- Vyhodnotit celkovou efektivitu automatizačního procesu oproti manuálnímu přístupu

Charakteristika zájmového území

Pro případovou studii byly vybrány dvě území v oblasti CHKO Litovelské Pomoraví (*viz Obrázek 38*), které se vyznačují vysokou četností tůní různorodého charakteru. Zájmové území o rozloze přibližně 1000 x 1250 kilometrů (1 250 000 km²) zahrnuje jak přirozeně vzniklé tůně různých velikostí a tvarů, tak i uměle zatopené referenční tůně pro potřeby validace.



Obrázek 38 Lokalizace území v případové studii (nahoře území č. 1, dole území č. 2)

Vstupní data

Pro realizaci případové studie byla využita následující data:

Bodové mračno

- Zdroj: bodové mračno pořízené pomocí leteckého laserového snímkování
- Hustota bodů: 40/m²

• Formát dat: LAZ

Referenční data

• Uměle zatopené tůně: 10 tůní, které vznikly vymazáním bodů pod určitou nadmořskou výšku. Jejich dno je tak interpolované z dat získané jako leteckým laserovým skenováním.

Příprava dat

Před samotným spuštěním automatizačního skriptu bylo nutné provést následující kroky:

- 1. Převést LAZ soubor do vektorové vrstvy, která jako *Feature Layer* vstupuje do skriptu
- 2. Vybrat a uměle zatopit tůně, které budou sloužit jako reference pro ověření funkčnosti skriptu, respektive vyhodnocení chybovosti interpolací (pochopitelně by skript dokázal interpolovat i bez těchto uměle zatopených tůní).

Konfigurace automatizačního skriptu

Pro účely případové studie byl automatizační skript nakonfigurován s následujícími parametry:

- Minimální velikost tůně pro zpracování: 10 m²
- Maximální velikost tůně pro zpracování: 2500 m²
- Parametrizace bufferů pro spojování tůní a vyhlazení tůní
- Interpolační metoda: EBK, čtyř-sektorová, rádius 60 m, max a min počet sousedů 16
- Kritéria tvarových metrik pro výběr tůní: Délka hlavní osy menší nebo rovna 80 m, konvexita větší nebo rovna 60

Proces zpracování

Automatizační skript byl aplikován na celé zájmové území podle následujícího schématu:

- 1. Identifikace prázdných míst (děr) v bodovém mračnu terénu
- 2. Klasifikace děr jako potenciálních vodních tůní na základě tvarových metrik
- 3. Pro každou identifikovanou tůň:
 - Extrakce polygonu tůně a vytvoření bufferu
 - o Aplikace interpolační metody
 - Vyhodnocení kvality interpolace
 - o Vytvoření souvislého rastrového modelu terénu včetně interpolovaných tůní
- 4. Validace výsledků pomocí referenčních dat

Výsledky

Identifikace tůní

Území číslo 1

Automatizační skript identifikoval celkem 205 potenciálních vodních tůní v zájmovém území. Z tohoto počtu bylo 10 korektně identifikovaných uměle zatopených referenčních tůní a 11 tůní bylo odstraněné filtrací dle konvexity a délky hlavní osy.

Ačkoliv skript klasifikuje jako tůně i cesty, spadené stromy, nebo jiné terénní nedokonalosti, tak i přes to nalezne reálné tůně.

Území číslo 2

Automatizační skript identifikoval celkem 351 potenciálních vodních tůní v zájmovém území. Z tohoto počtu bylo 10 korektně identifikovaných uměle zatopených referenčních tůní, 21 tůní bylo odstraněné filtrací dle konvexity a délky hlavní osy. (Ačkoliv skript klasifikuje jako tůně i cesty, spadené stromy, nebo jiné terénní nedokonalosti, tak i přes to nalezne reálné tůně).

Aplikace interpolačních metod

Pro identifikované tůně byla aplikována následující interpolační metoda:

 Metoda čtyř sektorového EBK, rádius 60 m, maximální a minimální počet sousedů 16

Přesnost interpolace

Území číslo 1

Přesnost interpolací jednotlivých tůní byla vyhodnocena porovnáním s DMR (vytvořeného z mračna bodů).

- Průměrná absolutní chyba (MAE): 0,1019 m
- Odmocnina střední kvadratické chyby (RMSE): 0,1157 m
- Střední kvadratická chyba (MSE): 0,0148

Území číslo 2

- Průměrná absolutní chyba (MAE): 0,1203 m
- Odmocnina střední kvadratické chyby (RMSE): 0,1403 m
- Střední kvadratická chyba (MSE): 0,0216

Časová efektivita

Území číslo 1

Celkový čas zpracování zájmového území (skript) v závislosti na HW (Obrázek 39):

- Automatizovaný přístup: 1 hodina 14 minut
- Území číslo 2
- Automatizovaný přístup: 1 hodina 23 minut

-Processor						Motherboard					
Name	AMD	Ryzen 5 2600	x	AMD		Manufacturer	Gigaby	te Technolog	y Co. Ltd.		
Code Name	Pinnacle Ridg	ge Max TI	OP 95.0 W			Model	B450 G	AMING X			x.x
Package	Sock	et AM4 (1331))	RT	ZEN	Bus Specs.	PCI-Ex	press 3.0 (8.	.0 GT/s)		
Technology	12 nm Co	ore Voltage	1.380 V		5	Chinset	AM	D	Ryzen S	oc	Rev 00
Specification	AMD Ry	zen 5 2600X Si	x-Core Proce	ssor		Southbridge	AM	D	B450	1	Rev. 51
Family	F	Model	8 Ste	epping	2	IPCIO	TT		11868	6	
Ext. Family	17 E	t. Model	8 Re	evision	PiR-B2	Li cito				~	
Instructions	MMX(+), SSE, S x86-64, AMD-V,	SE2, SSE3, SS AES, AVX, AV	SE3, SSE4.1, K2, FMA3, SH	SSE4.2, S	SSE4A,	BIOS	America	an Megatren	ids Inc.		
Clocks (Core #	=0)	Cache				Version	F41 - A	MD AGESA (Combo-AM4 1	.0.0.3	
Core Speed	4139.04 MHz	L1Dat	6 x 32 K	Bytes	8-way	Date	07/22/	2019	CP	U Microco	de 0x800820D
Multiplier	x 41.5	L1 Inst	6 x 64 K	Bytes	4-way		1-14-14		5		
Bus Speed	99.74 MHz	Level	2 6 x 512	KBytes	8-way	Graphic Interf	ace				
Rated FSB		Level	3 2 x 8 M	Bytes	16-way		Bus		PCI-Ex	press 3.0)
						Current Lin	k Width	x16	Max.	Supported	x16
Selection	Socket #1	- Cores	6	Threads	12	Current Link	Speed	2.5 GT/	/s Max.	Supported	8.0 GT/s
Memory Slot Sel	lection					Display Device	Selectio	n			
Slot #2	DDR4 (UDIN	IM)	Module Size	8 G	Bytes	NVIDIA GeFo	rce GTX	1660	- Per	fLevel	Current 🔹 💌
Max Bandwidt	h DDR4-3602	(1801 MHz)	SPD Ext.	XM	IP 2.0	- CPU					
Module Manuf	f. Patriot	Memory	Week/Year			Name	[NVIDIA Gef	Force GTX 16	60	NVIDIA
DRAM Manuf	f. SK H	łynix	Ranks	Si	ingle	Board Manuf	-	GIGABYT	F Technology	1	GEFORCE"
Part Numbe	er 3600 C	17 Series	Correction			Code Name	т	116-300	Revision	A1	GTX
Serial Numbe	er 🗌		Registered			Technology		12 nm	TDP	140.0 W	
Timings Table —	JEDEC #5	JEDEC #6	JEDEC #7	XMP-36	502						
Frequenc	y 1033 MHz	1066 MHz	1066 MHz	1801 M	1Hz	Clocks	-		Memory		
CAS# Latenc	y 14.0	15.0	16.0	17.0)	GFX Core	30	0.0 MHz	. S	ize	6 GBytes
RAS# to CAS	# 14	15	15	19		Shader / SoC			Ту	pe	GDDR.5
	e 14	15	15	19		Memory	40	5.0 MHz	Vend	dor	Hynix
RAS# Precharge	101 OT 000 000 000 000 000 000 000 000 000	-	36	39		L			Bus Wid	ith	192 bits
RAS# Precharge tRA	S 35	36	00								
RAS# Precharg tRA: tR(S 35 C 49	50	50	68							
RAS# Precharg tRA tR(Command Rate	S 35 C 49	50	50	68							

Obrázek 39 Hardware počítače, na kterém byl spouštěný skript (program CPU-Z)
Vizualizace výsledků



Obrázek 40 Detailní pohled na jednotlivé referenční tůně (1 až 10, číslováno zleva doprava, tůň č. 10 byla filtrací odstraněna, proto nelze použít jako referenční) – území číslo 1



Obrázek 41 Rozdílový rastr s vyznačenými uměle zatopenými tůněmi – území č. 1



Obrázek 42 Detailní pohled na jednotlivé referenční tůně (1 až 10, číslováno zleva doprava) – území číslo 2



Obrázek 43 Rozdílový rastr s vyznačenými uměle zatopenými tůněmi – území č. 2

Zaplavení	Tůně	MAE (m)	MSE	RMSE (m)	Relativní chyba	Zaplaven	í Tůně	MAE (m)	MSE	RMSE (m)	Relativní chyba
20 cm	1	0.0782	0.0079	0.0889	44.45%	50 cm	1	0.1458	0.0330	0.1816	36.32%
20 cm	2	0.0573	0.0045	0.0668	33.40%	20 cm	2	0.0707	0.0075	0.0865	43.25%
40 cm	3	0 1404	0.0269	0 1642	41.05%	30 cm	3	0.0772	0.0076	0.0871	29.03%
40 cm	5	0.1404	0.0203	0.1042	45.00%	30 cm	4	0.1666	0.0321	0.1793	59.77%
40 cm	4	0.1564	0.0324	0.1801	45.03%	40 cm	5	0.1417	0.0274	0.1656	41.40%
20 cm	5	0.0752	0.0069	0.0834	41.70%	20 cm	6	0.0701	0.0063	0.0797	39.85%
30 cm	6	0.1209	0.0188	0.1372	45.73%	30 cm	7	0.1091	0.0154	0.1241	41.37%
30 cm	7	0.1242	0.0193	0.1388	46.27%	40 cm	8	0.1423	0.0287	0.1695	42.38%
20 cm	8	0.0912	0.0100	0.0998	49.90%	60 cm	9	0.1728	0.0429	0.2071	34.52%
20 cm	9	0.0729	0.0067	0.0821	41.05%	30 cm	10	0.1065	0.0150	0.1225	40.83%
	Průměr	0 1019	0.0148	0 1157			Průměr	0.1203	0.0216	0.1403	

Tabulka 12 Chybové metriky (MAE, MSE, RMSE) referenčních tůní (území 1 - nalevo, území 2 - napravo)

Diskuse výsledků

Území číslo 1

Na *Obrázku 41* je zobrazený rozdílový rastr a každá uměle zaplavená tůň je očíslována. Podrobně jsou tyto tůně zobrazeny na *Obrázku 40*. V *Tabulce 12* jsou zobrazeny hodnoty MAE, MSE a RMSE pro každou tůň a jejich průměr. (Zároveň se zde vyskytují tůně, na kterých bylo prováděno testování interpolací: Tůň č. 6 je kulatá tůň č. 2, tůň č. 2 je obdélníková č. 1, tůň č. 4 je kulatá tůň č. 3). Obecně interpolace fungují očekávatelně dle předchozích analýz.

Území číslo 2

Na *Obrázku 43* je zobrazený rozdílový rastr a každá uměle zaplavená tůň je očíslována. Podrobně jsou tyto tůně zobrazeny na *Obrázku 42*. V *Tabulce 12* jsou zobrazeny hodnoty MAE, MSE a RMSE pro každou tůň a jejich průměr. (Obecně interpolace fungují očekávatelně dle předchozích analýz).

Efektivita automatické identifikace tůní

Automatizační skript prokázal střední schopnost správně identifikovat vodní tůně v bodovém mračnu. Hlavními faktory, které ovlivňovaly úspěšnost identifikace, byly:

- faktor 1, tvar tůně
- faktor 2, nekompletní zatopení tůně
- faktor 3, budovy, řeky nebo spadené stromy
- faktor 4, tůně ležící velmi blízko sebe

Potenciál pro zlepšení

Na základě zjištěných výsledků lze doporučit následující možnosti zlepšení automatizačního skriptu:

- Nahrání vrstvy vodních toků, budov, případně jakoukoliv vrstvu pro eliminaci objektů, které nejsou tůně
- Přesnější vymezení tvarů dle tvarových metrik
- Přidání neuronové sítě do procesu klasifikace tvarů
- Ruční doměření bodu/ů na dnech tůní (pro přesnější výsledky interpolací)

Závěr případové studie

Aplikace automatizačního skriptu na zájmových územích prokázala jeho praktickou využitelnost pro interpolaci vodních tůní v bodovém mračnu. Skript byl schopen identifikovat vodní tůně různých typů a aplikovat na ně interpolační metodu.

Hlavní přínosy automatizovaného řešení zahrnují:

- Významnou časovou úsporu oproti manuálnímu zpracování
- Konzistentní metodický přístup k výběru interpolačních metod
- Schopnost zpracovat velké území s množstvím vodních tůní

Výsledky případové studie ukazují na potenciál automatizovaného rozpoznávání a interpolace tůní z velkého množství dat.

Limitujícím faktorem zůstává neúplná schopnost rozlišení tůně od jiných objektů, což představuje potenciál pro další výzkum a vývoj metodiky.

8 DISKUZE

Výsledky této diplomové práce přinášejí významné poznatky o využití interpolačních metod pro modelování terénu komářích líhnišť, zároveň však otevírají řadu otázek a ukazují na komplexnost dané problematiky. V následující diskusi se zaměříme na hlubší analýzu zjištěných poznatků, jejich zasazení do širšího kontextu a kritické zhodnocení metodických postupů.

Vliv tvaru tůně na kvalitu interpolace

Zjištění, že tvar tůně významně ovlivňuje kvalitu interpolace, je konzistentní s obecnými principy prostorové statistiky. Zajímavé je však podrobněji analyzovat, proč právě metody Empirical Bayesian Kriging (EBK) a Ordinary Kriging (OK) dosáhly nejlepších výsledků. Na rozdíl od deterministických metod jako IDW tyto geostatistické přístupy zohledňují prostorovou strukturu dat a umožňují modelovat anizotropii, což je klíčové zejména u protáhlých tůní. Tato vlastnost může být rozhodující při interpolaci terénu s výraznými směrovými charakteristikami.

Otázkou zůstává, do jaké míry je tato závislost kvality interpolace na tvaru tůně univerzální pro různé typy krajin. CHKO Litovelské Pomoraví představuje specifický typ krajiny s charakteristickými tvary depresí, které jsou ovlivněny dynamikou řeky Moravy. V jiných typech krajin, například krasových oblastech nebo oblastech s odlišnou geomorfologickou historií, by vztah mezi tvarem depresí a optimálními parametry interpolace mohl vykazovat odlišné vzorce. Tato otázka by si zasloužila další výzkum zahrnující komparativní analýzu různých krajinných typů.

Parametrizace interpolačních metod a její optimalizace

Zjištění, že efektivita metody kriging je silně závislá na správné parametrizaci, zdůrazňuje potřebu systematického přístupu k nastavení parametrů. Výsledky ukazují, že zejména nastavení rádiusu, počtu sousedních bodů, volba sektoru a zohlednění anizotropie mají zásadní vliv na kvalitu výsledného modelu. Toto zjištění není samo o sobě překvapivé, nicméně významné je kvantifikování těchto vztahů pro specifický typ terénu, jakým jsou zaplavené tůně.

Zatímco některé parametry (jako např. anizotropie) lze odvodit z fyzikálních vlastností modelovaného jevu, jiné (jako např. optimální rádius vyhledávání) jsou často určovány empiricky nebo prostřednictvím iterativních optimalizačních postupů. To otevírá otázku, zda by bylo možné vyvinout automatizované metody optimalizace parametrů specificky pro modelování zaplavených terénních depresí, které by zohledňovaly jejich morfologické charakteristiky.

Vliv doplňujících terénních měření

Pozitivní vliv přidání bodů na dno tůně na přesnost interpolace napříč různými tvary tůní představuje jedno z nejdůležitějších zjištění této práce. Tento výsledek má významné praktické implikace pro metodologii sběru dat. Optimalizace počtu a rozmístění doplňujících bodů však zůstává otevřenou otázkou. Je třeba diskutovat, zda existuje optimální strategie rozmístění těchto bodů v závislosti na tvaru a velikosti tůně.

Nabízí se několik možných přístupů: rovnoměrné pokrytí plochy, zaměření na oblasti s předpokládanou vyšší variabilitou (např. hluboké části tůní nebo oblasti s prudkými změnami sklonu), nebo adaptivní strategie založená na předběžné analýze dostupných dat. Každý z těchto přístupů má své výhody a omezení, jejichž efektivita může záviset na specifických charakteristikách konkrétní tůně. Zajímavé by bylo prozkoumat, zda existuje univerzální pravidlo pro optimální hustotu a distribuci doplňujících bodů, nebo zda je nutné tuto strategii individuálně přizpůsobovat. Nicméně z výzkumu této práce vyplývá, že už při přidání jednoho bodu doprostřed tůně se zvýší přesnost interpolace v řádu nižších desítek procent. Další významnou otázkou je ekonomická efektivita sběru doplňujících dat. Zatímco terénní měření zvyšují přesnost modelů, představují také významné náklady z hlediska času a zdrojů. Bylo by přínosné stanovit kvantitativní vztah mezi počtem doplňujících bodů a zlepšením přesnosti modelu, který by umožnil optimalizovat poměr nákladů a přínosů. To by mohlo vést k vypracování metodiky, která by určovala minimální počet doplňujících bodů potřebných pro dosažení požadované přesnosti modelu.

Porovnání interpolačních metod v kontextu jiných výzkumů

Zjištění, že metody založené na krigingu poskytují přesnější výsledky než IDW a RBF, je v souladu s mnoha studiemi zabývajícími se interpolací terénu např. Chaplot a kol., (2006); Li a Heap, (2011); Arun (2013). Nicméně je třeba poznamenat, že existují i studie s odlišnými závěry, Arun (2013) Popisuje vhodnost metody IDW zejména v případech hladkých a neměnných oblastí. Yao a kol., (2013) popisují jako nejlepší možnou variantu Co-Kriging, jako druhý UK.

Tato variabilita výsledků napříč různými studiemi podtrhuje důležitost kontextu a specifických podmínek při volbě interpolační metody. Je možné, že v našem případě byla výhoda krigovacích metod částečně způsobena charakteristikami zkoumaného území – relativně "plochý" reliéf s lokálními depresemi – kde prostorová struktura dat hraje významnější roli než v oblastech s výraznou topografií.

Zajímavé by bylo rozšířit tuto studii o porovnání s jinými pokročilými interpolačními technikami, které nebyly zahrnuty, například neuronové sítě, strojové učení nebo hybridní postupy kombinující různé interpolační metody. Tyto pokročilé přístupy by mohly přinést další zlepšení v přesnosti modelování, zejména v komplexních terénních situacích.

Limity vstupních dat a jejich vliv na přesnost modelů

Kvalita a přesnost vstupních dat představuje fundamentální limit každé interpolační studie. V případě leteckého laserového skenování je přesnost dat ovlivněna řadou faktorů, které je třeba kriticky zhodnotit. Hustota vegetace, výška nízké vegetace a sklon terénu byly identifikovány jako nejdůležitější faktory ovlivňující přesnost vstupních dat. Tyto faktory mohou způsobovat systematické chyby v modelech, které nelze zcela eliminovat ani pomocí pokročilých interpolačních technik.

Zvláště problematické jsou oblasti s hustou vegetací, kde laserový paprsek nemusí proniknout až na povrch terénu, což vede k nadhodnocení skutečné výšky terénu. Problém s hustou vegetací nastává v jarních a letních měsících, proto je doporučené snímkovat v období vegetačního klidu. Další výzkum by mohl být zaměřen na kvantifikaci těchto chyb v závislosti na typu a hustotě vegetace, což by umožnilo vyvinout korekční modely specifické pro daný typ krajiny.

Otázkou také zůstává časová variabilita přesnosti dat. LiDARové snímkování probíhá v konkrétním časovém bodě, zatímco vegetace i morfologie terénu se v průběhu roku mění. Zejména v případě sezónně zaplavovaných oblastí, jako jsou lužní lesy v CHKO Litovelském Pomoraví, může docházet k významným změnám terénu v důsledku sedimentace a eroze během povodňových epizod. Tato dynamika představuje výzvu pro dlouhodobou platnost modelů a otevírá otázku, jak často by měla být data aktualizována pro zachování jejich relevance.

Filtrace LAS dat a její metodologické implikace

Proces filtrování bodového mračna za účelem identifikace bodů klasifikovaných jako povrch (ground) představuje kritický krok, který významně ovlivňuje kvalitu výsledného digitálního modelu reliéfu. Studie od Almas a Qamar (2020) naznačuje, že volba metody filtrace může mít zásadní vliv na přesnost výsledků, přičemž různé metody vykazují různou efektivitu v závislosti na charakteristikách terénu.

Zejména problematické jsou oblasti s výmladky, pařezy, dřevními zbytky a svahy nad 15°, což jsou prvky běžně se vyskytující v lužních lesích. Tato skutečnost vyvolává otázku,

zda by nebylo vhodné pro různé části zkoumaného území použít různé filtrační algoritmy optimalizované pro konkrétní terénní charakteristiky. Takový přístup by mohl vést k významnému zlepšení přesnosti vstupních dat, a tím i výsledných interpolací.

Vzhledem k tomu, že filtraci dat prováděla externí firma bez podrobné dokumentace použitých postupů, zůstává otázkou, jaký vliv měla zvolená metoda filtrace na výsledky této studie. V budoucích výzkumech by bylo žádoucí mít plnou kontrolu nad procesem filtrace, což by umožnilo systematicky testovat vliv různých filtračních algoritmů na přesnost výsledných modelů. Tato analýza by mohla vést k vypracování optimalizovaných postupů filtrace specificky pro modelování terénu komářích líhnišť.

Problematika referenčních dat a validace modelů

Absence ověření přesnosti referenčních dat pomocí terénního měření představuje významné metodologické omezení této studie. Veškeré hodnocení přesnosti interpolací je vztaženo k referenčnímu rastru, jehož vlastní přesnost není známa.

Vytvoření vlastního referenčního rastru s vyšším rozlišením (0,25 m/px) bylo krokem ke zlepšení této situace, nicméně základní problém přetrvává. Pro skutečné hodnocení by bylo nezbytné získat vysoce přesná terénní data, ideálně pomocí kombinace různých metod (např. GNSS, pozemní laserové skenování). Takový přístup by však byl extrémně náročný na zdroje, zejména pro větší území.

Alternativním přístupem by mohlo být využití statistických metod pro odhad nejistoty referenčních dat a její zahrnutí do hodnocení přesnosti interpolací. Takový přístup by umožnil realističtější posouzení skutečné přesnosti modelů a mohl by vést k robustnějším závěrům ohledně vhodnosti jednotlivých interpolačních metod.

Interpolace vodních ploch a její metodologické výzvy

Problém absorpce laserového paprsku vodou a s tím související chybějící data pro zaplavené oblasti představuje hlavní výzvu pro modelování podvodního terénu komářích líhnišť. Přístup zvolený v této práci – testování na uměle zaplavených tůních a následná aplikace na reálně zaplavené tůně – je metodologicky zajímavý, ale má svá omezení.

Bez přímých měření pod vodní hladinou dochází téměř u každé interpolace (kromě těch signifikantně malých) k nadhodnocení hodnot. Toto systematické zkreslení by mohlo být částečně korigováno pomocí modelů, které by zohledňovaly typické morfologické charakteristiky tůní daného typu. Takový přístup by vyžadoval rozsáhlý výzkum vztahů mezi povrchovými charakteristikami tůní (viditelná část) a jejich podpovrchovou morfologií.

Alternativní přístup navržený v doporučeních – kombinace dat z leteckého laserového skenování s daty získanými pomocí sonaru nebo akustického profilování dna – by mohl přinést významné zlepšení, ten je realistický pouze pro menší území nebo jednotlivé tůně kvůli finanční a časové náročnosti. Zajímavou možností by mohlo být využití kombinace dronů a USV (Unmanned surface vehicle) s batymetrickými senzory nebo ultrazvukovým vysílačem, což by umožnilo efektivnější sběr kombinovaných dat.

Automatizace procesu a její limity

Vyvinutý automatizační skript představuje významný praktický výstup této práce, nicméně jeho omezení v oblasti identifikace tůní poukazují na širší problém automatické klasifikace terénních prvků. Skutečnost, že skript často klasifikuje i jiné objekty jako tůně, ukazuje na obtížnost definice jednoznačných morfologických kritérií pro identifikaci tůní.

V kontextu rychlého rozvoje metod strojového učení se nabízí využití těchto pokročilých technik pro zlepšení automatické identifikace tůní. Neuronové sítě nebo metody hlubokého učení by mohly být trénovány na rozsáhlých datasetech manuálně klasifikovaných tůní, což by potenciálně vedlo k významnému zlepšení přesnosti klasifikace. Takový přístup by však vyžadoval vytvoření rozsáhlého trénovacího datasetu, což představuje samostatný výzkumný úkol.

Zajímavou oblastí pro další výzkum by bylo také zkoumání možností adaptivní parametrizace interpolačních metod v závislosti na automaticky detekovaných charakteristikách tůní. Ačkoliv skript tohle aktuálně dělá, tak naráží na limitaci správné klasifikace. Pokud by skript dokázal nejen identifikovat tůně, ale také klasifikovat jejich tvar a další relevantní charakteristiky s vysokou přesností, mohl by automaticky zvolit optimální parametry interpolace pro každou konkrétní tůň. Takový přístup by mohl významně zvýšit přesnost automaticky generovaných modelů.

Širší aplikace a přenositelnost výsledků

Výsledky této studie jsou primárně platné pro daný typ území – CHKO Litovelské Pomoraví – a podobné typy krajin. Otázkou zůstává, do jaké míry jsou zjištěné vztahy mezi charakteristikami tůní a optimálními parametry interpolace přenositelné na jiné typy krajin a vodních ploch.

Zatímco základní principy prostorové interpolace jsou univerzální, specifické parametry a jejich optimální hodnoty mohou být silně závislé na lokálních geomorfologických, hydrologických a biologických podmínkách. Přenositelnost výsledků by mohla být testována aplikací vyvinuté metodiky na odlišné typy krajin – například horské oblasti s ledovcovými jezery, krasové oblasti s ponory a závrty, nebo pobřežní laguny.

Takové rozšíření studie by mohlo vést k vytvoření obecnějšího rámce pro modelování terénu pod vodní hladinou, který by zohledňoval specifické charakteristiky různých typů vodních ploch a jejich okolí. To by mělo významný přínos nejen pro modelování komářích líhnišť, ale i pro širší oblast hydrologického modelování, managementu vodních zdrojů a ochrany přírody.

Závěrečné úvahy o metodologických limitech a budoucích směrech výzkumu

Tato diplomová práce představuje významný příspěvek k metodologii modelování terénu komářích líhnišť, nicméně jako každá vědecká práce má své metodologické limity, které je třeba reflektovat. Kromě již diskutovaných problémů je třeba zmínit také časový aspekt studie – data byla sbírána v konkrétním časovém období, zatímco morfologie tůní se může v průběhu času měnit v důsledku sedimentace, eroze a biologické aktivity.

Budoucí výzkum by se mohl zaměřit na dynamiku změn morfologie tůní v čase a její vliv na přesnost interpolace. Opakované skenování stejných oblastí v různých časových obdobích by mohlo poskytnout cenné informace o stabilitě modelů a jejich prediktivní schopnosti. Takový přístup by byl zvláště přínosný v kontextu klimatických změn a jejich potenciálního vlivu na dynamiku povodňových událostí a s nimi souvisejících změn v morfologii terénu.

Z metodologického hlediska by bylo přínosné rozšířit spektrum testovaných interpolačních metod o nejnovější přístupy založené na strojovém učení a umělé inteligenci. Tyto metody by mohly překonat některá omezení tradičních geostatistických přístupů.

V neposlední řadě by bylo žádoucí systematicky prozkoumat vztah mezi přesností modelů terénu komářích líhnišť a jejich praktickou použitelností pro plánování zásahů proti komárům. Jaká úroveň přesnosti je skutečně nezbytná pro efektivní management komářích populací a zjištění, zda se skutečně jedná o tůň, která je potencionálním líhništěm komárů? Tato otázka má významné praktické implikace, neboť umožňuje optimalizovat poměr mezi náklady na sběr a zpracování dat a přínosy v podobě efektivnějšího managementu.

9 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala ověřením použitelnosti vybraných interpolačních metod pro modelování povrchu terénu komářích líhnišť (tůní) a klasifikací líhnišť dle jejich tvarových charakteristik. Cílem bylo vytvořit metodiku pro efektivní a přesné modelování tůní, což má význam pro plánování zásahů proti komárům a hlubšímu porozumění fungovaní interpolací na modelování terénu pod vodní hladinou.

V rámci výzkumu byly naplněny všechny stanovené cíle a přineseny hodnotné poznatky v oblasti modelování specifických terénních prvků, zvlášť zatopených terénních depresí. Byla ověřena použitelnost různých interpolačních metod, především těch založených na krigingu, pro modelování terénu komářích líhnišť. Zajímavým zjištěním bylo, že ačkoliv tvar tůně ovlivňuje optimální parametry interpolačních metod, tento vliv nebyl natolik významný, aby vyžadoval zcela odlišné metodické postupy pro jednotlivé kategorie tvarů (obdélníkovité, půlměsícovité, kulaté). Toto zjištění má praktický význam pro zjednodušení pracovních postupů v terénu.

Provedená klasifikace líhnišť podle tvarových charakteristik (metrik) umožnila systematické zhodnocení vlivu tvaru na volbu optimální interpolační metody. Díky tomu je nyní lépe předpovídat, jaké nastavení interpolačních algoritmů povede k nejpřesnějším výsledkům v závislosti na morfologii zkoumaného terénu. Ačkoliv se v této práci použila pouze metoda EBK pro všechny typy tůní. Vyvinutý automatizovaný skript pro efektivní interpolaci terénu tůní významně zjednodušuje celý proces a umožňuje uživatelům přizpůsobit parametrizaci konkrétním vlastnostem terénu, což výrazně zvyšuje efektivitu práce v praxi.

Z výsledků práce vyplývá několik důležitých zjištění. Především se podařilo kvantifikovat vliv tvaru tůně na přesnost interpolace, což umožňuje predikovat potenciální chyby a nejistoty v modelech. Určení optimálních parametrů interpolačních metod pro různé tvary tůní poskytuje cenný nástroj pro budoucí výzkumy a praktické aplikace. Významným přínosem bylo také prokázání pozitivního vlivu doplňujících terénních měření, zejména bodů na dně tůní, na celkovou přesnost interpolace. Toto zjištění podtrhuje důležitost kombinovaného přístupu k datům – letecké laserové skenování doplněné o cílená pozemní měření v kritických místech.

Vytvořený automatizovaný skript pro zpracování a interpolaci dat z leteckého laserového skenování představuje praktický výstup práce s potenciálem širšího využití a případného rozšíření. Jeho přínos spočívá nejen v časové úspoře při zpracování dat, ale především v možnosti systematické aplikace optimalizovaných postupů.

Výsledky této práce mají přímé uplatnění v oblasti monitoringu a klasifikaci komářích líhnišť, ale přesahují i do obecnější roviny modelování terénu pod vodní hladinou. Do budoucna by bylo přínosné rozšířit výzkum o další typy vodních ploch a odlišné geografické a klimatické podmínky pro ověření univerzální platnosti zjištěných závislostí. Zajímavou oblastí pro další výzkum je také integrace časové složky – sledování změn morfologie tůní v průběhu sezónních cyklů a jejich vliv na vhodnost jednotlivých interpolačních metod.

Poznatky získané v této práci by mohly být dále rozvinuty směrem k vytvoření komplexního systému pro předpovídání dynamiky komářích populací na základě přesných modelů terénu. Další perspektivní směr výzkumu představuje integrace získaných modelů s hydrologickými simulacemi, což by umožnilo lépe předpovídat rizikové oblasti z hlediska tvorby komářích líhnišť při povodňových situacích.

Tato diplomová práce tak přispívá k hlubšímu pochopení možností a omezení interpolačních metod při modelování specifického typu terénu, jakým jsou komáří líhniště, respektive zaplavené terénní deprese. Kromě teoretických poznatků poskytuje i praktické nástroje a doporučení pro jejich efektivnější využití v praxi, což může významně přispět k zefektivnění preventivních opatření proti přemnožení komárů v problematických oblastech

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

What MAE? ACHARYA, Shwetha, 2021. RMSE and Online. are Towardsdatascience. 14, 2021. Dostupné May z: https://towardsdatascience.com/what-are-rmse-and-mae-e405ce230383/. [cit. 2025-05-04].

ALCARAS, Emanuele; AMOROSO, Pier Paolo a PARENTE, Claudio, 2022. The Influence of Interpolated Point Location and Density on 3D Bathymetric Models Generated by Kriging Methods: An Application on the Giglio Island Seabed (Italy). Online. *Geosciences*. Roč. 12, č. 2, s. 23. ISSN 2076-3263. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/geosciences12020062. [cit. 2025-05-04].

ALMAS, Javeria a QAMAR, Usman, 2020. Affect of Data Filter on Performance of Latent Semantic Analysis based Research Paper Recommender System. Online. In: 2020 5th International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA). IEEE, s. 50-54. ISBN 978-1-7281-6042-9. Dostupné z: https://doi.org/10.1109/ICCIA49625.2020.00017. [cit. 2025-05-03].

ARUN, P.V., 2013. A comparative analysis of different DEM interpolation methods. Online. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. Roč. 16, č. 2, s. 133-139. ISSN 11109823. Dostupné z: <u>https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.09.001</u>. [cit. 2025-05-06].

ASHRAFPOUR, Esmaeel, 2021. Difference between Simple Kriging and Ordinary Kriging.

BARTELS, Richard H.; BEATTY, John C. a BARSKY, Brian A., 1985. *An introduction to splines for use in computer graphics and geometric modeling*. Los Altos: Morgan Kaufmann publishers. ISBN 0-934613-27-3.

BOSTAN, Pınar, 2017. Jeo-İstatistik'te Kullanılan Temel Kriging Yöntemleri. Online. *Yüzüncü Yil Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*. 2017-03-31, roč. 27, č. 1, s. 10-20. ISSN 1308-7576. Dostupné z: https://doi.org/10.29133/yyutbd.305093. [cit. 2025-05-04].

CHAI, T. a DRAXLER, R. R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. Online. *Geoscientific Model Development*. Roč. 7, č. 3, s. 1247-1250. ISSN 1991-9603. Dostupné z: https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014. [cit. 2025-05-04].

CHAPLOT, Vincent; DARBOUX, Frédéric; BOURENNANE, Hocine; LEGUÉDOIS, Sophie; SILVERA, Norbert et al., 2006. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. Online. *Geomorphology*. Roč. 77, č. 1-2, s. 126-141. ISSN 0169555X. Dostupné z: <u>https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.12.010</u>. [cit. 2025-05-06].

CHEN, Pengyun; LI, Ye; SU, Yumin; CHEN, Xiaolong a CUEVAS, Erik, 2014. The Improved Kriging Interpolation Algorithm for Local Underwater Terrain Based on Fractal Compensation. Online. *Mathematical Problems in Engineering*. Roč. 2014, č. 1, s. 8. ISSN 1024-123X. Dostupné z: https://doi.org/10.1155/2014/289521. [cit. 2025-05-04].

DAYA, Ali Akbar a BEJARI, Hadi, 2015. A comparative study between simple kriging and ordinary kriging for estimating and modeling the Cu concentration in Chehlkureh deposit, SE Iran. Online. *Arabian Journal of Geosciences*. Roč. 8, č. 8, s. 6003-6020. ISSN 1866-7511. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s12517-014-1618-1. [cit. 2025-05-04].

D. McLeod, J. Jacobson, M. Hardy and C. Embry, "Autonomous inspection using an underwater 3D LiDAR," 2013 OCEANS - San Diego, San Diego, CA, USA, 2013, pp. 1-8, doi: 10.23919/OCEANS.2013.6741175.

DIACONU, Daniel C.; BRETCAN, Petre; PEPTENATU, Daniel; TANISLAV, Danut a MAILAT, Emanuel, 2019. The importance of the number of points, transect location and interpolation techniques in the analysis of bathymetric measurements. Online. *Journal of Hydrology*. Roč. 570, č. 1, s. 774-785. ISSN 00221694. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.070. [cit. 2025-05-04].

FORTIN, Marie-Joseé a DALE, Mark R. T., c2005. *Spatial analysis: a guide for ecologists*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0521009731.

GRADKA, Robert a KWINTA, Andrzej, 2018. A short review of interpolation methods used for terrain modeling. Online. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*. Roč. 1, č. 4, s. 20. ISSN 2300-1496. Dostupné z: https://doi.org/10.15576/GLL/2018.4.29. [cit. 2025-05-04].

GUNDOGDU, Kemal Sulhi a GUNEY, Ibrahim, 2007. Spatial analyses of groundwater levels using universal kriging. Online. *Journal of Earth System Science*. Roč. 116, č. 1, s. 49-55. ISSN 0253-4126. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s12040-007-0006-6. [cit. 2025-05-04].

HEIDEMANN, Hans Karl, 2012. Lidar base specification. USGS Publications Warehouse. Roč. Techniques and Methods, č. 11-B4, s. 114. ISSN 10.3133/tm11B4.

HODSON, Timothy O., 2022. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. Online. *Geoscientific Model Development*. Roč. 15, č. 14, s. 5481-5487. ISSN 1991-9603. Dostupné z: https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022. [cit. 2025-05-04].

JEŽEK, Josef, 2015. *Geostatistika a prostorová interpolace*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum. ISBN 978-80-246-3076-2.

JOHNSTON, Kevin, c2001. Using ArcGIS geostatistical analyst. Redlands: ESRI. ISBN 1589480066.

KETELTAS, Michael a KAW, Autar, 2006. *Interpolation - history of interpolation*. Online. Holistic Numerical Methods. S. 3. Dostupné z: https://nm.mathforcollege.com/mcd/gen/05inp/mcd_gen_inp_bck_history.pdf. [cit. 2025-05-04].

KUMAR, H Shiva, 16 dec. 2019. Introduction to QGIS. Online. International Training Center for Operational Oceanography (ITCOO) INCOIS, Hyderabad, India. Dostupné z: https://incois.gov.in/documents/ITCOocean/Introduction_to_QGIS.pdf. [cit.

2025-05-04].

LI, Jin a HEAP, Andrew D., 2011. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. Online. *Ecological Informatics*. Roč. 6, č. 3-4, s. 228-241. ISSN 15749541. Dostupné z: <u>https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003</u>. [cit. 2025-05-06]. MCKENZIE, Helen, 2023. *Spatial interpolation: which technique is best & how to run it*. Online. CARTO. Jul 20, 2023. Dostupné z: https://carto.com/blog/spatial-interpolation-techniques-tutorial?. [cit. 2025-05-04].

MEIJERING, E., 2002. A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing. Online. *Proceedings of the IEEE*. Roč. 90, č. 3, s. 319-342. ISSN 00189219. Dostupné z: https://doi.org/10.1109/5.993400. [cit. 2025-05-04].

HEIGHT TEXTURE OF LOW VEGETATION IN AIRBORNE LASER SCANNER DA TA AND ITS POTENTIAL FOR DTM CORRECTION, 2014. Online. OUDE ELBERINK, Sander a PFEIFER, Norbert. *HEIGHT TEXTURE OF LOW VEGETATION IN AIRBORNE LASER SCANNER DATA AND ITS POTENTIAL FOR DTM CORRECTION*. Roč. 2014, č. 1, s. 7. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/253820256_HEIGHT_TEXTURE_OF_ LOW_VEGETATION_IN_AIRBORNE_LASER_SCANNER_DA_TA_AND_ITS_POTENT IAL_FOR_DTM_CORRECTION. [cit. 2025-05-04].

PANG, Weichiang; LIU, Fangqian; LI, Yue a FANG, Shurong, 2012. Spatial Correlation and Wind Speed Uncertainties of Hurricane Wind Field Model. Online. *Spatial Correlation and Wind Speed Uncertainties of Hurricane Wind Field Model.* Roč. 1, č. 1, s. 9. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/233752160_Spatial_Correlation_and_ Wind_Speed_Uncertainties_of_Hurricane_Wind_Field_Model. [cit. 2025-05-04]. QIN, Shiwei a DAI, Zili, 2023. Interpolation Technique for the Underwater DEM Generated by an Unmanned Surface Vessel. Online. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. Roč. 136, č. 3, s. 3157-3172. ISSN 1526-1506. Dostupné z: https://doi.org/10.32604/cmes.2023.026874. [cit. 2025-05-04].

SINGH, Ranvijay, 18 října, 2023. *Lagrange Interpolation Formula: Definition, Properties, Uses*. Online. PW. Dostupné z: https://www.pw.live/school-prep/exams/lagrange-interpolation-formula. [cit. 2025-05-04]. STEREŃCZAK, Krzysztof; CIESIELSKI, Mariusz; BALAZY, Radomir a ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI, Tomasz, 2017. Comparison of various algorithms for DTM

interpolation from LIDAR data in dense mountain forests. Online. *European Journal of Remote Sensing*. 2017-02-17, roč. 49, č. 1, s. 599-621. ISSN 2279-7254. Dostupné z: https://doi.org/10.5721/EuJRS20164932. [cit. 2025-05-04].

SU, Jason a BORK, Edward, 2006. Influence of Vegetation, Slope, and Lidar Sampling Angle on DEM Accuracy. Online. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2006-11-01, roč. 72, č. 11, s. 1265-1274. ISSN 00991112. Dostupné z: https://doi.org/10.14358/PERS.72.11.1265. [cit. 2025-05-04].

VAROUCHAKIS, E.A.; HRISTOPULOS, D.T. a KARATZAS, G.P., 2012. Improving kriging of groundwater level data using nonlinear normalizing transformations—a field application. Online. *Hydrological Sciences Journal*. 2012-07-24, roč. 57, č. 7, s. 1404-1419. ISSN 0262-6667. Dostupné z: https://doi.org/10.1080/02626667.2012.717174. [cit. 2025-05-04].

WILLMOTT, CJ a MATSUURA, K, 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Online. *Climate Research*. Roč. 30, č. 1, s. 79-82. ISSN 0936-577X. Dostupné z: https://doi.org/10.3354/cr030079. [cit. 2025-05-04].

YAO, Xueling; FU, Bojie; LÜ, Yihe; SUN, Feixiang; WANG, Shuai et al., 2013. Comparison of Four Spatial Interpolation Methods for Estimating Soil Moisture in a Complex Terrain Catchment. Online. *PLoS ONE*. 2013-1-23, roč. 8, č. 1, s. 14. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <u>https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054660</u>. [cit. 2025-05-06].

ZAPLETAL, Jiří, 2007. *Aplikace Radiálních bázových funkcí*. Diplomová práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni Fakulta aplikovaných věd, Katedra informatiky a výpočetní techniky.

Internetové zdroje (web, webové stránky aj.)

Advantages And Disadvantages Of Inverse Distance Weighting, [21. století]. Online. Advantages And Disadvantages Of Inverse Distance Weighting. Dostupné z: https://fastercapital.com/topics/advantages-and-disadvantages-of-inversedistance-weighting.html. [cit. 2025-05-04]. *Co-Kriging*, [21. století]. Online. Co-Kriging. Dostupné z: https://zia207.github.io/geospatial-r-github.io/cokriging.html. [cit. 2025-05-04].

Kriging Interpolation, [21. století]. Online. Kriging Interpolation. Dostupné z: https://www.publichealth.columbia.edu/research/population-health-methods/kriging-interpolation#Description. [cit. 2025-05-04].

Difference between Simple Kriging and Ordinary Kriging. S. 2.

How radial basis functions work, [21. století]. Online. How radial basis functions work. Dostupné z: https://pro.arcgis.com/en/proapp/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-radial-basis-functionswork.htm. [cit. 2025-05-04].

Radial Basis Function Interpolation, 2008. Diplomová práce. Department of Mathematical Sciences University of Stellenbosch Private Bag X1, 7602 Matieland, South Africa: University of Stellenbosch.

European journal of remote sensing, 2012-. [Cagliari, Italy]: Associazione italiana di telerilevamento. ISSN 2279-7254. Dostupné také z: https://sfx.jib.cz/sfxlcl3?%3Furl_ver=Z39.88-2004&ctx_ver=Z39.88-2004&ctx_enc=info%3Aofi%2Fenc%3AUTF-

8&rfr_id=info%3Asid%2Fsfxit.com%3Aopac_856&url_ctx_fmt=info%3Aofi%2Ffmt %3Akev%3Amtx%3Actx&sfx.ignore_date_threshold=1&rft.object_id=2670000000 157887&svc_val_fmt=info%3Aofi%2Ffmt%3Akev%3Amtx%3Asch_svc&sfx.institut e=ANY

Kriging Interpolation – The Prediction Is Strong in this One, [21. století]. Online. GISGeography. Dostupné z: https://gisgeography.com/kriging-interpolation-prediction/. [cit. 2025-05-04].

EBK Regression Prediction (Geostatistical Analyst), [21. století]. Online. Esri. Dostupné z: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/toolreference/geostatistical-analyst/ebk-regression-prediction.htm. [cit. 2025-05-04].

What is empirical Bayesian kriging?, [21. století]. Online. Esri. Dostupné z: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-empirical-bayesian-kriging-.htm. [cit. 2025-05-04].

LAS Dataset To Raster (Conversion), [21. století]. Online. Esri. Dostupné z: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/conversion/las-dataset-to-raster.htm. [cit. 2025-05-04].

Types of Interpolation Methods, [21. století]. Online. Dostupné z: https://gisresources.com/types-interpolation-methods_3/. [cit. 2025-05-04].

How IDW works, [21 století]. Online. How IDW works. Dostupné z: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm. [cit. 2025-05-04].

Mean squared error, 2025. Online. Britannica.com. Apr 13, 2025. Dostupné z: https://www.britannica.com/science/mean-squared-error. [cit. 2025-05-04].

What is Python? Executive Summary, [21. století]. Online. Pythonorg.com. Dostupné z: https://www.python.org/doc/essays/blurb/. [cit. 2025-05-04].

What You Need About Universal Kriging: A Complete Guide, [21. století]. Online. Giscourse.online. Dostupné z: https://giscourse.online/what-you-need-about-universal-kriging-a-complete-guide/. [cit. 2025-05-04].

Introduction to ArcGIS Pro, [21. století]. Online. Esri. Dostupné z: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/get-started/get-started.htm. [cit. 2025-05-04].

Introduction to QGIS, 2019. Online. Remote Sensing and GIS Applications using
QGIS. Roč. 2, s. 13. Dostupné z:
https://incois.gov.in/documents/ITCOocean/Introduction_to_QGIS.pdf. [cit.
2025-05-04].

Statistical & Qualitative Data Analysis Software: About R and RStudio, [21. století].Online.Kent.edu.Dostupnéz:https://libguides.library.kent.edu/statconsulting/r. [cit. 2025-05-04].

How radial basis functions work, [21. století]. Online. Esri. Dostupné z: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-radial-basis-functions-work.htm. [cit. 2025-05-04].

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy

- Příloha 1 Velikost jednotlivých tůní (v m²) na územích případové studie
- Příloha 2 Tvarové metriky obdélníkových tůní
- Příloha 3 Tvarové metriky kulatých tůní
- Příloha 4 Tvarové metriky tůní tvaru písmene C

Volné přílohy

- Příloha 5 Poster
- Příloha 6 Webová stránka
- Příloha 7 Automatizační skript

Velikost tůně v metrech čtverečných:

úz	zemí číslo 1	území číslo 2
0	Tůň 1: 768,8	Tůň 1: 21,7
0	Tůň 2: 148,2	Tůň 2: 12,8
0	Tůň 3: 103,6	Tůň 3: 24,8
0	Tůň 4: 178,1	Tůň 4: 9,8
0	Tůň 5: 173,4	Tůň 5: 74,4
0	Tůň 6: 135,5	Tůň 6: 29,7
0	Tůň 7: 744,5	Tůň 7: 57,7
0	Tůň 8: 624,1	Tůň 8: 102,9
0	Tůň 9: 162,9	Tůň 9: 166,2
		Tůň 10: 33,9

Příloha 1 Velikost jednotlivých tůní (v m2) na územích případové studie

Tvarové metriky obdélníkové tůně číslo 1 hloubka 20 cm	Tvarové metriky obdélníkové tůně číslo 2 hloubka 60 cm	Tvaro obdéli hloubi
Recantularity: 0.173	Recantularity: 0.453	Recant
Ellipticity: 1.092	Ellipticity: 0.358	Ellipt
Perimeter-Area Ratio: 0.995	Perimeter-Area Ratio: 0.542	Perime
Circularity: 0.125	Circularity: 0.331	Circul
Convexity: 0.518	Convexity: 0.686	Convex
Elongation: 0.084	Elongation: 2.797	Elonga
Klasifikace tvaru: Tvar písmene C	Klasifikace tvaru: Obdélník	Klasif
2		\



Recantularity: 0.446
Ellipticity: 2.377
Perimeter-Area Ratio: 0.397
Circularity: 0.366
Convexity: 0.868
Elongation: 0.579
Klasifikace tvaru: Obdélník



Příloha 2 Tvarové metriky obdélníkových tůní

Tvarové metriky kulaté tůně číslo 1 hloubka 30 cm

31,7 m

Recantularity: 0.680
Ellipticity: 1.278
Perimeter-Area Ratio: 1.198
Circularity: 0.610
Convexity: 0.897
Elongation: 0.218
Klasifikace tvaru: Kruh/Elipsa



Tvarové metriky kulaté tůně číslo 2 hloubka 30 cm

28,5 m

Recantularity: 0.687
Ellipticity: 1.066
Perimeter-Area Ratio: 0.409
Circularity: 0.542
Convexity: 0.935
Elongation: 0.062
Klasifikace tvaru: Kruh/Elipsa



Tvarové metriky kulaté tůně číslo 3 hloubka 30 cm

Recantularity: 0.502
Ellipticity: 1.017
Perimeter-Area Ratio: 0.447
Circularity: 0.599
Convexity: 0.884
Elongation: 0.0169
Klasifikace tvaru: Kruh/Elipsa



Příloha 3 Tvarové metriky kulatých tůní

Tvarové metriky Tůň tvaru písmene C, číslo 1 hloubka 20 cm

Recantularity: 0.285	Reca
Ellipticity: 1.024	E11:
Perimeter-Area Ratio: 1.434	Per:
Circularity: 0.165	Circ
Convexity: 0.563	Conv
Elongation: 0.023	Elor
Klasifikace tvaru: Tvar písmene C	Klas



Tvarové metriky Tůň tvaru písmene C, číslo 2 hloubka 50 cm

Recantularity: 0.436
Ellipticity: 1.250
Perimeter-Area Ratio: 0.556
Circularity: 0.381
Convexity: 0.737
Elongation: 0.200
Klasifikace tvaru: Obdélník

42,6 m

Tvarové metriky Tůň tvaru písmene C, číslo 3 hloubka 50 cm

Recantularity: 0.327
Ellipticity: 1.090
Perimeter-Area Ratio: 0.480
Circularity: 0.266
Convexity: 0.520
Elongation: 0.0829
Klasifikace tvaru: Tvar písmene C



Tvarové metriky Tůň tvaru písmene C, číslo 2 hloubka 60 cm	
Recantularity: 0.271	
Ellipticity: 1.246	
Perimeter-Area Ratio: 0.436	
Circularity: 0.145	
Convexity: 0.399	
Elongation: 0.198	
Klasifikace tvaru: Tvar písmene	C

