

# Vyhodnocení topografických dat pro účely precizního zemědělství v podmínkách České republiky

Jan Komárek<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování, Fakulta životního prostředí,  
Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129,  
165 21, Praha 6 – Suchbátka, Česká republika  
honzakomarek@seznam.cz

**Abstrakt.** Výnosovost zemědělských plodin je ovlivněna mnoha různými faktory, mimo jiné i topografickými aspekty, které ovlivňují fyzikální i chemické vlastnosti půdy, a tím i výši výnosu. Práce se zabývá modelováním topografických charakteristik ze tří různých sad výškových dat (ALS, RTK GPS, ZABAGED) v prostředí ArcGIS. Pomocí střední polohové chyby (RMSE) je ověřena kvalita vzniklých digitálních modelů terénu, které společně s modely akumulace vody, modely sklonitosti a výnosovými daty ve sledovaném období 2004 – 2012 (mimo 2009) vstupují do vícenásobné lineární regresní analýzy za účelem nalezení vztahu mezi topografií experimentálního pozemku a variabilitou výnosovosti zemědělských plodin. Statistická metoda RMSE potvrdila vhodnost všech použitých vstupních výškových sad dat pro modelování topografických charakteristik. Na základě koeficientů determinace, jako výsledku regresní analýzy, lze konstatovat, že topografické charakteristiky mají často významný vliv na výnosovost plodin, zvláště pak v sušších letech. Nelze ovšem stanovit obecnou míru závislosti výnosu na topografii.

**Klíčová slova:** GIS, výnos, digitální model terénu, model sklonitosti, model akumulace vody, RMSE, regresní analýza.

**Abstract.** The assessment of topographical data for the purpose of precision farming system in the Czech republic conditions. Crop yield is affected by many factors including topography that influence physical and chemical properties of soil as like as yield. The paper looks into modelling of topographical features from three elevation data sets (ALS, RTK GPS, ZABAGED) in ArcGIS software. Root Mean Square Error (RMSE) is used to verify created Digital Elevation Models (DEM). DEMs together with Slope Models, Flow Accumulation Models and crop yield data for seasons 2004 – 2012 (except 2009) are variables for Multiple Linear Regression analysis. The analysis evaluates relationship and influence of topography on crop yield. RMSE demonstrated all three data sources can be used for modelling of topographical features. The outcome of the analysis, coefficients of determination very vary, yet the results showed topographical features influence crop yield especially in the drier seasons. Nevertheless there is no universal value of the impact of yield on topography.

**Keywords:** GIS, crop yield, digital elevation model, slope model, flow accumulation model, RMSE, multiple regression.

## 1 Úvod

V zemědělské prvovýrobě je vyvíjen rostoucí tlak na vysoký výnos k zásobení stále se zvyšující populace. Zároveň ale, obzvláště po přijetí evropské legislativy, jsou zemědělci nuceni snížit dopady aplikačních látek na životní prostředí. Tím vzniká náročný trh, který tlačí na maximální zisk a minimální vliv na životní prostředí. Systémem, který splňuje obě podmínky a zároveň nabízí minimalizaci vstupních nákladů a následnou maximalizaci výnosu, hmotného i finančního, je hospodaření v režimu precízního zemědělství. To se nedívá na ornou půdu jako na homogenní blok, ale množství heterogenních ploch, které potřebují různorodé ošetření. Díky variabilní aplikaci látek do heterogenních částí půdy dochází k použití pouze potřebného množství látek, což vede nejenom ke snížení finanční náročnosti, ale také k požadované ochraně životního prostředí – do půdy se dostanou pouze takové látky v takovém množství, které je nezbytně nutné ke správnému vývoji plodiny.

Heterogenita půdních vlastností, která způsobuje variabilní výši výnosu, je podmíněna také terénními aspekty pozemku. Výnosovost zemědělských plodin je ovlivněna celou řadou nejrůznějších faktorů. Závisí na klimatických a meteorologických podmínkách, především dostupnosti vody pro plodiny a pedologických poměrech, zvláště pak na obsahu dostupných živin. Terénní aspekty – topografické charakteristiky ovlivňují fyzikální i chemické vlastnosti půdy, a tím i výši výnosu. Cílem studie je posoudit použitelnost a vhodnost různých sad vstupních výškových dat pro tvorbu digitálních modelů terénu a z něj odvozených topografických charakteristik prostřednictvím metody střední polohové a střední absolutní chyby (RMSE, MAE). Nalezení souvislostí a stanovení vztahu (závislosti) mezi variabilitou výnosu zemědělských plodin a topografickými charakteristikami terénu experimentálního pozemku v klimatických a půdních podmínkách České republiky je hlavním cílem. Závislost variability výnosovosti na topografii terénu bude posouzena na základě koeficientů korelace a determinace lineární regresní analýzy.

Vlivem topografických charakteristik na variabilitu výnosu se také již zabývali Marques da Silva et al. (2008) a Kravchenko et al. (2000), kteří potvrzují vztah topografie a výnosu. Mimo jiné konstatují, že vyšší výnosy jsou situovány v nižších polohách pozemku. Negativní korelační koeficienty mezi výnosem a nadmořskou výškou tedy ukazují obecně vyšší výnosy v nižších polohách terénu. V sušších letech má voda tendenci akumulovat na konkávních plochách a nižších polohách terénu. Vyšší hodnoty koeficientů korelace mezi konkrétními topografickými charakteristikami a výnosem vyjadřují významný vliv na variabilitu výnosu. Naopak nižší koeficienty korelace vypovídají, že jsou i jiné charakteristiky, které mají vliv na variabilitu výnosu.

## **2 Metodika výzkumu**

### **2.1 Zájmové území**

Všechna zpracovávaná data zastupují hodnoty konkrétního pozemku, situovaného v areálu Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v. v. i. Pozemek se nachází na SZ okraji hl. m. Prahy v městské části Praha Ruzyně (N50° 05.00' E14° 17.50'). Plocha je ohraničena ze S strany pozemkem letiště, z V pozemek vymezuje silniční městský okruh a z jihu je pozemek vymezen železničním koridorem. Zájmová plocha, o celkové rozloze 11.5ha, se nachází v řepařské výrobní oblasti. Pozemek je situován na mírném svahu s převážně S-J orientací, průměrná nadmořská výška dosahuje 345m, průměrný sklon je relativně malý – přibližně 3,5°.

### **2.2 Zpracovávaná data**

Jsou zpracovávány tři sady výškopisných dat získaných různými způsoby. První sadou, kterou pro účely studie zapůjčil Zeměměřičský úřad (ČÚZK), jsou data ze Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED). Druhá sada výškopisných dat byla získána pomocí technologie LiDAR (Light Detection and Ranging) jako metody dálkového průzkumu Země. Poslední skupinu dat tvoří data, získaná ručním měřením technologií RTK GPS.

Všechna získaná data byla zpracována v desktopovém geografickém informačním softwaru ESRI ArcGIS 10.2. Statistické analýzy byly provedeny v tabulkovém procesoru MS Excel 2013, LibreOffice 4.1.4.2 a analytickém softwaru Statistica 12 společnosti StatSoft. Na začátku byla data importována do prostředí ArcGIS. Data ze sady ZABAGED byla poskytnuta ve standardním formátu ESRI. Import dat získaných pomocí ALS do ArcGIS musí být proveden pomocí funkce Create LAS Dataset, kde vybereme požadované .las soubory a konkrétní souřadnicový systém. LAS Dataset má v prostředí ArcGIS specifické chování umožňující ukládání, zobrazení a správu LiDARových dat. Při práci s takovýmto objemem dat je nutnost použít tento specifický nástroj, který má určitou ředící schopnost, čímž výrazně urychluje vykreslení dat v malých měřítkách. GPS data zpracovaná LeicaGeoOffice a následně uložená v MS Excel lze snadno naimportovat do prostředí ArcGIS a vytvořit ESRI shapefile, který umožňuje provádění analýz.

Aby bylo možné vyhodnotit přesnost nově vzniklých modelů, je použito hodnocení střední polohové chyby. Pro účely výpočtu této chyby před vlastním vytvářením modelů je odebráno konkrétní procento vstupních bodů z každé bodové sady. Vzhledem k počtu vstupních bodů je odebráno 10% z celkového počtu u sad RTK GPS a ZABAGED. U sady dat vzniklé metodou ALS, kde počet celkových bodů přesahuje tři sta tisíc, je odebráno 1% vstupních bodů. Zvolené body, které byly odstraněny z dat vstupujících do tvorby DEM a které budou sloužit pro kontrolu nově vzniklých modelů, byly vybrány náhodně. K tomuto účelu byla zvolena sada analytických nástrojů, která byla volně stažena jako neoficiální rozšíření do software ArcGIS. Hawth's Analysis Tools for ArcGIS svojí funkcí Create Random Selection zajistila náhodný výběr konkrétního procenta bodů. Tabulka 1 vyjadřuje konkrétní hodnoty vstupující do výpočtů modelů a střední polohové chyby. Dalším důležitým údajem mimo počtu bodů je jejich hustota. Pro zjištění hustoty bodů u ALS dat bylo zapotřebí sady nástrojů LAStools, která pracuje právě s LiDARovými soubory .las. Pomocí toolboxového rozšíření v ArcGIS nebo pomocí dílčích miniaplikací, do kterých se požadovaný soubor nahraje, je možné zjistit řadu informací o konkrétním leteckém skenování. Mimo jiné je získána informace o hustotě bodů na 1m<sup>2</sup>. U dat vzniklých měřeními RTK GPS nebo poskytnutých Zeměměřičským úřadem lze zjistit hustotu bodů na 1m<sup>2</sup> pomocí funkce Point Density, jež je součástí extenze Spatial Analyst v ArcGIS. Konkrétní hodnoty hustoty bodů jednotlivých sad dat obsahuje tabulka pod tímto textem, rozloha zájmového území je již zmíněných 11,5ha.

**Tabulka 1.** Počet bodů vstupujících do konkrétních výpočtů.

	Σ bodů	hustota na 1m <sup>2</sup>	DEM	RMSE
ALS	317303	2,74	316986	317
RTK GPS	1189	0,0068	1070	119
ZABAGED	1201	0,0092	1081	120

### 2.3 Vytváření digitálních modelů

Do výpočtu digitálních modelů terénů (DEM) vstupují hodnoty ochuzené o body, které slouží k následné kontrole vzniklého modelu. Všechny ArcGIS operace potřebné k vytvoření modelu a jeho kontrole jsou vytvářeny v prostředí ModelBuilderu, který zajišťuje vyšší přehlednost a kontrolovatelnost dílčích procesů při tvorbě DEM. ALS data byla zpracována pomocí funkce LAS Dataset to Raster a funkce LAS Dataset to TIN a následně TIN to Raster. Ručně naměřená data RTK GPS a data ZABAGEDu byla interpolována funkcí Spline s třemi různými nastavení, tzn., že bylo vytvořeno 6 různých rastrů – o konkrétním nastavení funkce informuje Tabulka 2. Poslední technikou modelu terénu byla funkce IDW. Ta byla vzhledem k V-Z anizotropii pozemku vytvořena pomocí extenze Geostatistical Analyst. Do IDW vstupují výšková data ze série RTK GPS a ZABAGED pouze jednou. Všechny digitální modely terénu byly vytvořeny pro porovnání s rozlišením 0,5 a 1,0.

**Tabulka 2.** Nastavení interpolační metody SPLINE jednotlivých modelů terénu.

	SPLINE TYPE	NUMBER OF POINTS	WEIGHT	OUTPUT CELL SIZE
RTK GPS1	TENSION	20	0,1	0,5/1,0
RTK GPS2	REGULARIZED	20	0,1	0,5/1,0
RTK GPS3	REGULARIZED	20	1,0	0,5/1,0
ZABAGED1	REGULARIZED	50	0,1	0,5/1,0
ZABAGED2	TENSION	50	0,1	0,5/1,0
ZABAGED3	TENSION	50	1,0	0,5/1,0

## 2.4 Vyhodnocení kvality DEMs

Každá prostorová data obsahují chyby nebo nepřesnosti, které mohou více nebo méně ovlivnit kvalitu výsledku analýz. Chyby se mohou vyskytnout v různých stádiích zpracovávání dat nebo již při jejich sbírání. Při vytváření jakéhokoli modelu terénu je třeba nějakým způsobem kvantifikovat jeho kvalitu. V případě digitálních modelů terénu závisí jejich kvalita především na zdroji dat a způsobu jejich interpolace. Pokud eliminuje hrubé chyby, které vznikají chybami člověka nebo jeho techniky, zbývají ještě chyby systematické a nahodilé. Systematické chyby jsou způsobeny většinou nedostatkem vstupních dat nebo jejich zpracováváním. Nahodilé chyby existují v mnoha měřeních a nelze je vhodně modelovat [4]. Běžnou metodou kontroly kvality modelů terénu je vynechání konkrétního procenta vstupních bodů, z nichž pak lze vypočítat chybu/kvalitu DEM [9]. Root Mean Square Error, střední polohová chyba, je nejčastěji používaná metoda pro kvantifikaci systematických a nahodilých chyb. RMSE vyjadřuje kvadratický průměr neboli druhou odmocninu aritmetického průměru druhých mocnin série čísel. V případě digitálních modelů terénu RMSE určuje rozptyl odchylek mezi hodnoty z DEM a hodnotami kontrolními. Vyšší číslo RMSE tedy vyjadřuje vyšší odchylku mezi dvěma sadami výškových hodnot. Aby bylo možné získat konkrétní hodnoty RMSE pro vytvořené modely, je nutné znát přesnou hodnotu výšky terénu DEM v kontrolních bodech, které byly předem odstraněny z výpočtu DEM. Potřebné hodnoty byly získány pomocí funkce Extract Values to Points. Rozdíl výšek vypočítaných a kontrolních vstupuje do výpočtu jako  $e_i$ . Jejich kvadratický průměr dává konkrétní hodnotu střední polohové chyby. Výsledky RMSE nabývají hodnot od 0,09 do 0,75 v závislosti na typu vstupních dat a zvolené interpolační metodě a jejím konkrétním nastavení.

$$RMSE = \left[ n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i|^2 \right]^{1/2} \quad MAE = \left[ n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i| \right]$$

RMSE je pouze funkcí chyby absolutní (Mean Absolute Error). MAE udává průměrnou hodnotu absolutních rozdílů mezi hodnotou skutečnou a interpolovanou. Distribuce rozsahu chyb nepopisuje průměrnou chybu jako takovou. Hodnoty RMSE, oproti MAE, mají tendenci stále více narůstat, jak se rozsah chyb stává více proměnlivý [11]. Výsledky šetření střední polohové a střední absolutní chyby jsou obsahem Tabulky 4.

## 2.5 Modelování odvozených charakteristik

Mimo digitální model terénu byly vytvořeny odvozené modely – model sklonitosti (SM, Slope Model) a model akumulace odtoku vody po pozemku (FAM, Flow Accumulation Model). Dalším z odvozených modelů, který by vstupoval do regresní analýzy za účelem stanovení závislosti topografie na výnosovosti plodin, by mohl být model orientace (AM, Aspect Model). Pozemek má ale JV-JZ expozici (převážně čistě J), proto lze předpokládat, že by parametr orientace ke světovým stranám v tomto případě výsledky regrese příliš neovlivnil. Modely orientace ke světovým stranám pro vzniklé DEM proto vytvořeny nejsou. Vytvoření dalších modelů je podmíněno již vytvořenými modely terénu, protože sklonitost i odtok je závislý na hodnotách výšky terénu daného území. Pro další práci byly vybrány modely s nejnižší hodnotou střední polohové chyby z každé kategorie. To znamená celkem 6 DEMs. Konkrétně ze sady dat GPS po jednom modelu vytvořeném metodou IDW a Spline, stejně tak pro data ze série ZABAGED. Modely ALS dat byly vybrány všechny, resp. rastrový terén a rastrový terén vytvořený z TINu (Triangular Irregular Networks). Model sklonitosti terénu byl vytvořen funkcí Slope, která reprezentuje úroveň změny nadmořské výšky pro každou buňku digitálního modelu terénu. Pro relevanci nově vzniklého modelu byla opět použita funkce Extract Values to Points, která extrahuje hodnoty svahu v kontrolních bodech. Funkce Flow Accumulation, pomocí které jsou vytvářeny modely akumulace odtoku vody, je nástroj, který počítá akumulovaný tok, jako akumulovanou váhu všech buněk vtékajících po svahu do každé buňky nového rastru. Funkce v prostředí ArcGIS pracuje s relativně jednoduchým principem výpočtu směru toku vody, tzv. D8. Algoritmus D8 aproximuje směr odtoku skrze nejstrmější klesání v 3x3 okolí buňky. Z toho vyplývá, že směr toku vody z buňky do další buňky bude násobkem 45°, jak naznačuje také obrázek pod tímto textem. Vstupním rastrem do funkce Flow Accumulation je výstupní rastr funkce Flow Direction [1]. Za účelem získání relevantních hodnot vytvořených FAMs byla aplikována kruhová fokální statistika – funkce Focal Statistics, ve velikosti 15 buněk pro data GPS a ZABGED, a 150 buněk pro ALS (vzhledem k množství vstupních dat).

## 2.6 Analýza výnosových informací

Pro interpolaci hodnot výnosu za jednotlivé roky byla využita další z deterministických interpolačních metod, a sice metoda tzv. přirozeného souseda (Natural Neighbor). Metoda vkládá interpolované body do sítě Thiessenových polygonů, čímž existují dvě sítě polygonů. Polygon nově vzniklého bodu se částečně překrývá se sítí polygonů vstupních bodů. Body polygonů, které se překrývají s právě interpolovanými body polygonů, se označují přirozenými sousedy. A právě tyto body vstupují do výpočtu interpolace bodu nového. Interpolace bodu je ovlivněna vahou přirozených sousedů, která se vypočítává v závislosti na velikosti překrývajících se polygonů. Interpolační metoda Natural Neighbor je spolu se stochastickou metodou Kriging běžným způsobem analýzy výnosových a jim podobných dat [2, 5, 8].

Výnosová data za roky 2004 – 2012, mimo 2009, byla pro účely studie poskytnuta Výzkumným ústavem rostlinné výroby, v. v. i. (VÚRV) Údaje o výši výnosu byly

získány pomocí kombajnového monitoru výnosu LH500. Prostorová přesnost byla zajištěna technologií dGPS korigovanou systémem EGNOS. Data o výnosu byla společně s aktuální polohou zaznamenávána na palubní počítač každé 3 sekundy. Měřena byla také vlhkost zrna, proto mohl být výnos přepočítán na 14% vlhkost. Data za jednotlivé roky byla, celkem 8, zinterpolována metodou přirozeného souseda. Obdobně jako u předešlých modelů byly funkcí Extract Values to Points extrahovány hodnoty výnosu v kontrolních bodech. Funkce byla použita celkem 24-krát (3 sady kontrolních bodů po 8 letech mapování výnosu). Hodnoty dále vstupují do vícenásobné regresní analýzy.

## 2.7 Hledání souvislostí – nalezení vzahu

Regresní analýza popisuje závislost dvou a více číselných hodnot, resp. proměnných, utváří matematický model, tj. regresní funkci  $y=f(x)$ . Vícenásobná regrese pak popisuje závislost jedné proměnné na skupině jiných, tj. regresní funkce  $y=f(x_1, x_2 \dots x_n)$ . Tato analýza tak vyjadřuje charakter závislosti a zobrazuje co možná nejpřesněji průběh změn podmíněných průměru závisle a nezávisle proměnných. Cílem vícenásobné regresní analýzy je vysvětlení rozptylu proměnné  $y$ , odhadnutí vlivů nezávisle proměnných  $x$  na závisle proměnnou  $y$ , predikovat hodnoty  $y$  pro jednotlivé případy na základě sestavené rovnice. Výsledkem analýzy mimo jiné je koeficient determinace  $R^2$ , který kvantifikuje míru vztahu závisle proměnné a proměnných vysvětlujících [3, 10]. Funkci použitou pro výpočet vícenásobné lineární regresní analýzy vyjadřuje tento vztah:  $y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3$ .

Jednotlivé členy vztahu jsou definovány následovně:  $y$  ... závisle proměnná,  
 $\beta$  ... regresní koeficienty,  
 $x$  ... nezávislé proměnné.

Do rovnice regresní analýzy počítané metodou Enter jsou zaváděny pouze relevantní proměnné. Závisle proměnná je pro účel práce hodnota výnosu, nezávislé – vysvětlující proměnné jsou hodnoty z digitálních modelů terénu, modelů sklonitosti a modelů odtoku – akumulace vody. Do výpočtu konkrétního koeficientu determinace, jako jednoho z výsledků regresní analýzy, vstupují tedy hodnoty výnosu za určitý rok a hodnoty výšky a sklonu terénu a hodnoty odtoku vody. Všechny vstupní hodnoty, jejichž počet odpovídá počtu kontrolních bodů pro konkrétní sadu výškových dat, jsou vztaheny ke konkrétnímu prostorovému zaměření, tzn., že jednotlivé sady vstupních bodů do regresní analýzy mají identické souřadnice.

## 3 Výsledky a diskuze

Výsledkem studie je 48 hodnot koeficientů determinace vícenásobné lineární regresní analýzy  $R^2$ , které určují míru vlivu vytvořených topografických charakteristik na výnos zemědělských plodin konkrétního pozemku. U každého ze 3 zdrojů výškových dat bylo provedeno několik interpolačních metod s různými nastaveními, z čehož byly následně vybrány 2 nejpřesnější modely z každé skupiny, tj. celkem 6. Dílčím výsledkem je vyhodnocení kvality, resp. přesnosti modelů vzniklých různými interpolacemi (Tab. 4).

**Tabulka 3.** Celkové množství srážek a průměrné teploty v růstovém období plodin.

	2004	2005	2006	2007	2008	2010	2011	2012
SRÁŽKY	307,2	381,6	254,6	271,4	317,5	320,4	401,3	480,8
TEPLOTA	13,0	12,1	17,6	12,6	11,9	16,6	12,0	10,5

**Tabulka 4.** Hodnoty RMSE a MAE pro jednotlivé vytvořené modely terénu.

<b>RMSE rozlišení 0,5m</b>		<b>MAE rozlišení 0,5m</b>	
GPS_IDW	0,741	GPS_IDW	0,068
GPS_SPLINE_1	0,334	GPS_SPLINE_1	0,031
GPS_SPLINE_2	0,364	GPS_SPLINE_2	0,033
GPS_SPLINE_3	0,344	GPS_SPLINE_3	0,032
ZABAGED_IDW	0,438	ZABAGED_IDW	0,040
ZABAGED_SPLINE_1	0,098	ZABAGED_SPLINE_1	0,009
ZABAGED_SPLINE_2	0,091	ZABAGED_SPLINE_2	0,008
ZABAGED_SPLINE_3	0,092	ZABAGED_SPLINE_3	0,008
ALS_TIN_RASTER	0,488	ALS_TIN_RASTER	0,027
ALS_RASTER	0,511	ALS_RASTER	0,029
<b>RMSE rozlišení 1,0m</b>		<b>MAE rozlišení 1,0m</b>	
GPS_IDW	0,742	GPS_IDW	0,068
GPS_SPLINE_1	0,362	GPS_SPLINE_1	0,033
GPS_SPLINE_2	0,392	GPS_SPLINE_2	0,036
GPS_SPLINE_3	0,371	GPS_SPLINE_3	0,034
ZABAGED_IDW	0,438	ZABAGED_IDW	0,040
ZABAGED_SPLINE_1	0,092	ZABAGED_SPLINE_1	0,008
ZABAGED_SPLINE_2	0,116	ZABAGED_SPLINE_2	0,011
ZABAGED_SPLINE_3	0,093	ZABAGED_SPLINE_3	0,008
ALS_TIN_RASTER	0,566	ALS_TIN_RASTER	0,032
ALS_RASTER	0,594	ALS_RASTER	0,033

Tabulka 3 zobrazuje průměrné hodnoty srážek a teplot ve sledovaném období (agrometeorologická stanice VÚRV). Koeficienty determinace dokazují vliv topografie na výnos v závislosti na teplotě a především na množství poskytnutých srážek v daném roce. V letech 2004, 2005, 2010 a 2012 jsou průměrné hodnoty koeficientů determinace nižší. Pro zmíněné roky se interval průměrných hodnot z jednotlivých modelů terénu pohybuje od 0,051 do 0,114 (průměrně 0,075), tzn., že by topografie terénu vysvětlovala konkrétní výnosovost pouze 7,5%. Zbylé roky vysvětlují vztah terénu a výnosu výrazně vyššími hodnotami. Interval průměrných hodnot z jednotlivých modelů terénu je 0,285 – 0,504 (průměrně 0,35), což by znamenalo, že by byl výnos z 35% vysvětlen topografickými charakteristikami. Jedná se ale pouze o průměrné



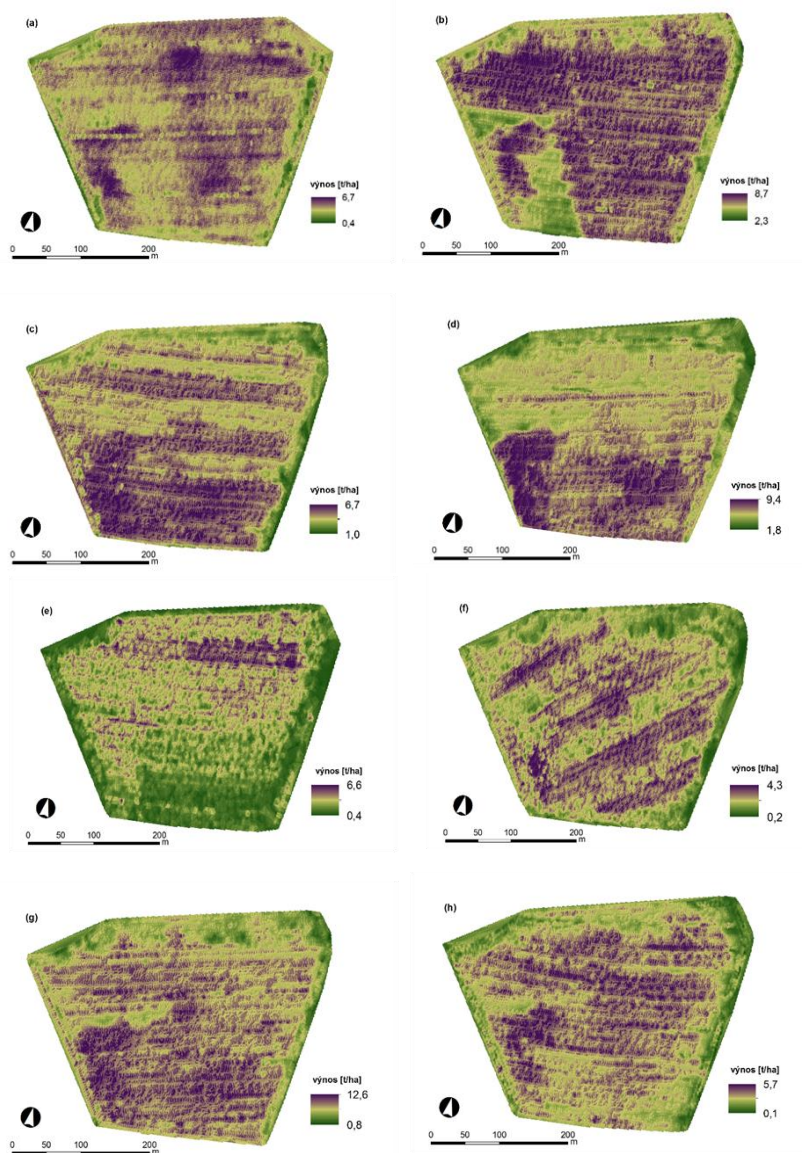
hodnoty. Výsledky regresní analýzy jsou za rok 2004 nejnižší (průměrně 5,1%). Za rok 2007 jsou naopak výsledky nejvyšší (průměrně 50%). Ve výsledkově špatném roce 2004 jsou hodnoty koeficientů determinace velmi rozkolísané – hodnoty mají rozpětí od 0,49 do 10,69. Nejvyšší hodnota tak vyjadřuje téměř 22-ti násobek hodnoty nejnižší. V roce 2007, kdy jsou výsledky regresní analýzy nejpozitivnější, jsou jednotlivé koeficienty determinace velmi vyrovnané, všechny kolísají kolem průměrné hodnoty 50%. Nižší koeficienty determinace  $R^2$  tedy indikují další významné faktory ovlivňující výnosovost zemědělských plodin.

Tabulka 5 – koeficienty korelace jednotlivých topografických charakteristik a procentuálně vyjádřené koeficienty determinace ve všech sledovaných obdobích. Signifikantní koeficienty (tučně) jsou vázány k hladině významnosti  $p = 0,05$ . S odkazem na výsledky regresní analýzy lze konstatovat, že hodnoty koeficientů determinace jsou velice různorodé. Pro jednotlivé roky, dokonce i v rámci jednoho roku pro různá vstupní výšková data, jsou koeficienty velmi nevyrovnané. Proto nelze stanovit obecnou míru závislosti topografie terénu na výnosovosti plodin.

**Tabulka 5.** Standardizované korelační koeficienty  $b^*$  a koeficienty determinace  $R^2$ .

		2004	2005	2006	2007	2008	2010	2011	2012
ALS_rastr	DEM	0,111	0,085	<b>-0,595</b>	<b>-0,734</b>	<b>0,630</b>	<b>-0,290</b>	<b>-0,515</b>	-0,046
	SM	-0,022	-0,043	0,021	0,029	-0,026	-0,028	0,010	0,003
	FA	0,053	<b>-0,156</b>	-0,054	-0,042	-0,013	-0,103	-0,053	<b>-0,230</b>
	$R^2$ [%]	1,21	3,10	33,85	51,31	38,16	9,92	25,78	5,32
ALS_TIN	DEM	-0,108	<b>-0,305</b>	<b>-0,632</b>	<b>-0,798</b>	<b>0,253</b>	<b>-0,623</b>	<b>-0,695</b>	<b>-0,622</b>
	SM	0,010	0,103	0,053	0,043	-0,061	-0,014	0,032	0,051
	FA	<b>0,262</b>	<b>0,432</b>	0,032	0,078	<b>0,518</b>	<b>0,430</b>	<b>0,228</b>	<b>0,738</b>
	$R^2$ [%]	3,79	9,16	33,70	51,46	49,38	16,31	27,34	22,29
GPS_IDW	DEM	0,050	-0,108	<b>-0,615</b>	<b>-0,753</b>	<b>0,357</b>	<b>-0,298</b>	<b>-0,585</b>	-0,195
	SM	-0,049	0,172	0,037	0,069	0,068	-0,069	0,014	0,034
	FA	-0,039	-0,121	-0,155	-0,086	-0,009	-0,024	0,070	-0,018
	$R^2$ [%]	0,49	3,84	34,05	50,66	15,37	10,78	36,00	3,25
GPS_SPL	DEM	0,095	0,065	<b>-0,528</b>	<b>-0,638</b>	0,355	0,051	<b>-0,623</b>	0,000
	SM	0,254	-0,032	-0,224	0,059	0,271	-0,109	0,093	0,215
	FA	0,307	0,040	-0,210	0,151	0,239	<b>0,355</b>	0,056	<b>0,430</b>
	$R^2$ [%]	4,65	0,12	33,05	50,58	19,04	16,16	34,73	9,27
ZBG_IDW	DEM	<b>0,262</b>	<b>0,317</b>	<b>-0,337</b>	<b>-0,649</b>	<b>0,633</b>	<b>-0,252</b>	<b>-0,407</b>	0,138
	SM	-0,007	-0,022	-0,171	-0,109	0,094	0,018	-0,022	0,029
	FA	-0,116	0,150	-0,143	-0,104	0,085	-0,071	-0,056	0,029
	$R^2$ [%]	9,54	9,17	20,28	49,30	46,07	5,47	16,84	2,34
ZBG_SPL	DEM	0,483	-0,285	-0,544	<b>-0,780</b>	<b>0,520</b>	<b>-0,717</b>	-0,516	-0,283
	SM	0,156	0,382	0,127	-0,109	0,085	<b>0,500</b>	0,008	0,281
	FA	0,370	-0,218	-0,036	-0,104	-0,076	-0,029	-0,105	-0,170
	$R^2$ [%]	10,67	10,37	15,88	49,28	44,72	9,88	17,17	3,59

Obecně lze říci, že korelace mezi topografií a výnosem je vyšší v letech s nižší průměrnou srážkou, zároveň jsou v těchto obdobích koeficienty determinace pro různé výškové modely z různých zdrojů dat výrazně vyrovnanější (zjednodušeně lze říci, že mezi vstupními výškovými daty není pro stanovení vztahu terénu na výnosu rozdíl). Níže je vizualizace interpolovaných výnosových dat (Obr.1) za roky 2004 – 2012 (mimo rok 2009, pro který nejsou data k dispozici). Značení výnosových map je chronologické (a – h, 2004 – 2012).



**Obr. 1.** Vizualiza výnosových dat za roky 2004 – 2012.

Z výše uvedených výsledků lze usuzovat, že topografická data ovlivňují výnosovost plodin lépe v teplejších, ale především sušších letech. K faktu, že závislost mezi výnosem a topografií je obecně vyšší v sušších letech, došla také Kumhálová et al. (2011). Velké množství negativních signifikantních hodnot lze nalézt především u modelů terénu (roky 2006, 2007, 2010, 2011). To indikuje vyšší výnos právě v nižších polohách, což potvrzuje také vizualizace výnosu (Obr. 3). Zatímco v roce 2008 (spíše podprůměrné množství srážek i teploty) jsou hodnoty koeficientů korelace DEM čistě pozitivní a, až na jeden případ, signifikantní pro všechny sady vstupních výškových dat. Vizualizovaný výnos indikuje vyšší výnos striktně v horních polohách území. Koeficienty korelace u modelů sklonitosti jsou nevyrovnané a nemají, mimo jediné, signifikantní hodnoty. Pozitivní koeficienty má sklon v letech 2011 a 2012. To lze vysvětlit vysoce nadprůměrnými srážkami ve zmíněných letech. Nejvyšší koeficienty vycházejí u sad dat interpolovaných metodou Spline. Pro modely akumulace vody jsou hodnoty koeficientů korelace opět různorodé. Nejvyšší hodnoty lze nalézt u dat ze sady ALS. Koeficienty jsou pro 6 z 8 sledovaných let signifikantní. Roky 2006 a 2007 (2 nesignifikantní) jsou období s vysoce podprůměrnými srážkami. Z výsledků lze usuzovat, že model akumulace vody má jako topografická charakteristika vyšší význam v letech s vyššími srážkami. Koeficienty determinace mohou být ovlivněny také pěstovanými plodinami v jednotlivých letech. Na pozemku byl aplikován následující osevní postup: 2004 řepka ozimá, 2005 pšenice oimá, 2006 oves, 2007 ječmen ozimý, 2008 řepka ozimá, 2010 oves, 2011 pšenice ozimá, 2012 řepka ozimá. V roce 2004 bylo podprůměrné množství srážek, v roce 2012 bylo množství srážek naopak velice nadprůměrné. V obou zmíněných obdobích byly průměrné koeficienty determinace  $R^2$  velmi nízké – 5,06 a 7,67. V obou obdobích byla pěstována ozimá řepka. Lze tedy usuzovat, že topografické charakteristiky obecně lépe popisují výnos obilovin než řepky. Vysvětlení vztahu mezi klimatickými podmínkami a závislostí výnosu na topografii není jednotné. Kravchenko et al. (2000) ex. Halvorson et al. (1991) našli nižší závislost topografických charakteristik na výnosovost plodin v sušších letech. Rozdílnost výsledků by mohla být vysvětlena odlišnými pedologickými i klimatickými podmínkami. Topografie ovlivňuje fyzikální i chemické vlastnosti půdy, obsah organické hmoty a nejvíce pak dostupnost vody, čímž je ovlivněna i výnosovost [7].

Metoda leteckého skenování povrchu poskytuje obrovské množství výškových bodů skrze diskretní povrch. U mračna bodů by ale mohlo docházet až ke zkrácení vlivem obrovského množství bodů, které by zachycovaly až příliš podrobností, jako např. nepřesnosti terénu vzniklé orbou nebo kultivačními zásahy. Nabízí se otázka, zda není lepší, aby si farmáři měřili pozemky ručně, protože dokáží, vzhledem ke svým znalostem, lépe vystihnout podstatu terénu. Na druhou stranu by tento proces byl náročný a zdlouhavý, a tak i přes vysokou pořizovací cenu je nejefektivnější využití metody ALS. Některé instituce nebo komunity dokonce již poskytují LiDARová data zdarma (např. OpenTopography), problémem zatím zůstává omezenost nasnímaného území. Pokud by byl trend poskytování vysoce přesných dat zdarma zachován případně navýšen, stalo by se ALS nejefektivnější metodou sběru topografických dat (poměr cena – kvalita).

## Reference

1. ArcGIS Resources (ESRI). Online, cit. 27. 2. 2014. Dostupné z: <http://resources.arcgis.com>.
2. BACKES M., PLÜMER L. On the adequacy of GIS-generated weed maps for Precision Farming. *9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science, Espoo: pp 261-268*. 2003.
3. BISKUP R. Statistika. Regresní a korelační analýza. *Studijní materiál, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích*. 2008.
4. KADLČÍKOVÁ J. Testování a výběr interpolačních metod DMR v závislosti na typu georeliéfu. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica, Vol. 2007, No. 2: pp 14-18*. 2007
5. KŘIKAVKOVÁ L. Interpolace bodových dat v GIS. *Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze*. 2009.
6. KUMHÁLOVÁ J., KUMHÁLA F., KROULÍK M., MATĚJKOVÁ Š. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture, Vol. 12, No. 6: pp 813-830*. 2011.
7. MARQUES DA SILVA J. R., SILVA L. L. Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosystem Engineering, Vol. 101, No. 2: pp 183-190*. 2008.
8. MITAS L., MITASOVÁ H. Spatial interpolation. *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications, Vol. 1: pp 481-492*. 1999.
9. ORŠULÁK T., PACINA J. 3D modelování a virtuální realita. *Studijní materiál, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem*. 2010
10. RABUŠIČ, L. Mnohonásobná lineární regrese. *Studijní materiál, Masarykova univerzita*. 2004.
11. WILLMONT C. J., MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research, Vol. 30: pp 79-82*. 2005

## Annotation

The paper compares various elevation data sets from different sources for modelling of topographical features. Elevation data sets together with yield data set for the experimental field are analysed for the purpose of evaluation relationship of topography on crop yield. Results of the study are evaluation of accuracy of created elevation models and also the assessment of influence of topographical features on crop yield.