JITKA KUMHÁLOVÁ

ODVOZENÍ TOPOGRAFICKÝCH CHARAKTERISTIK PRO ÚČELY PRECIZNÍHO ZEMĚDĚLSTVÍ

KUMHÁLOVÁ, J. (2014): Inference of topographical characteristics for precision agriculture. *Geografie*, 119, No. 2, pp. 161–178. – Quantitative knowledge of the factors and interactions affecting agricultural yield is essential for site-specific yield management. Topography of the terrain certainly remains on these yield affecting factors. For this reason, this paper deals with the prospects of modelling topographic features – digital elevation models and slope models for an experimental plot with an area of 11.5 hectares. The basis for the creation of these models is formed by data from various sources (combine yield monitor, RTK-GPS and data from airborne laser scanning). These data sets have been then modified via ArcGIS software in order to most accurately describe the topography of the analysed landscape. The resulting models of topographical characteristics were compared with crop yields during the observed period of 2004–2012, in order to determine which data source is best for the evaluation of the influence topography holds over yield values. Data from airborne laser scanning turned out to be the most suitable dataset for the tasks, because of their sufficient accuracy and frequency.

KEY WORDS: topography – digital elevation model – slope model – crop yields.

1. Úvod

Jedním ze základních směrů vývoje moderního zemědělství ve vyspělých zemích je precizní zemědělství. Jeho podstata spočívá v tom, že se k danému pozemku (jako základní jednotce obhospodařování v rostlinné výrobě) nepřistupuje jako k celku. Při jeho obdělávání se reaguje na lokální rozdílnosti, které v jeho rámci mohou být a jak se ukazuje, zpravidla také bývají. Správným vyhodnocením vstupních dat a následně i vhodným obděláváním pozemku se dá dosáhnout jak ekologických, tak i ekonomických výhod. Významný vliv na výnosy zemědělských plodin má bezesporu také reliéf pozemku. Právě tvorba modelů topografických charakteristik je nezbytná ke správné predikci výnosů, k tvorbě lokálně specifických zón pro aplikaci hnojiv a chemických ochranných prostředků a také pro zmírnění erozní činnosti na pozemku. Modelováním topografie na zemědělských pozemcích a následným porovnáním ať již s výnosy plodin, či jinými charakteristikami ovlivňující růst zemědělských rostlin, se již zabývalo mnoho autorů. Tyto studie byly převážně zaměřeny na pozemky o jiné výměře, v jiných oblastech Země (např. v USA, Švédsku, Německu, Španělsku či Portugalsku), čili v jiných klimatických, meteorologických a půdních podmínkách a s jinými osevními postupy, než jsou v Česku.

Variabilita výnosu může být zapříčiněna mnoha faktory, ale jedním z nejdůležitějších je topografie (Kravchenko, Bullock 2000). Topografie ovlivňuje

fyzikální a chemické vlastnosti půdy erozními a naplavovacími procesy (Ebeid a kol. 1995), obsahem organické hmoty (Changere, Lal 1997; Kravchenko, Bullock 2000) a ze všeho nejvíce dostupností vody (Hanna, Harlan, Lewis 1982; Verity, Anderson 1990).

Rozvoj technologií GIS umožňuje rozvoj nástrojů vzniklých vývojem informačních technologií, umožňuje jednoduše vytvořit digitální výškový model (*digital elevation model* – DEM) pro analýzu terénu. Z těchto DEM jsou odvozeny některé topografické parametry, které jsou pak použity v analýze variability výnosu. Wilson a Gallant (2000) rozdělili topografické parametry do dvou kategorií: 1. primární atributy, vypočítané přímo z DEM a 2. sekundární neboli složené atributy, vypočítané kombinací primárních atributů. Tyto sekundární atributy jsou fyzikálně založené nebo empiricky odvozené indexy, které mohou charakterizovat specifické procesy působící v krajině (Moore a kol. 1991). Mnohé z nich popisují hydrologické procesy související s topografií, a jsou často označeny jako hydrologické atributy (Iqbal a kol. 2005).

Nejběžnější primární atributy jsou nadmořská výška, sklon reliéfu, orientace, zakřivení (horizontální i vertikální), délka toku a sběrná plocha odtoku. Podobně nejvíce používanými sekundární atributy jsou směr odtoku, akumulace odtoku, index vlhkosti, index proudové síly, index transportu sedimentů (*sediment transport index* – STI) nebo DFL index (vzdálenost od linií akumulace odtoku; Marques da Silva, Silva 2006; Marques da Silva, Silva 2008). Nejvíce studií však analyzovalo vztah mezi primárními topografickými atributy a variabilitou výnosu (Sinai, Zaslavsky, Golany 1981; Jenson, Dominique 1988; Moore a kol. 1993; Changere, Lal 1997; Timlin a kol. 1998; Yang a kol. 1998; Bakhsh a kol. 2000; Kravchenko, Bullock 2000; Kaspar a kol. 2003). Vztah mezi výnosem a sekundárními topografickými atributy je už zmiňován méně (Kravchenko, Bullock 2000; Iqbal a kol. 2005; Marques da Silva, Silva 2006).

V literatuře byly velmi často uváděny vyšší výnosy v nižších pozicích terénu (Stone a kol. 1985; Afyuni, Cassel, Robarge 1993; Changere, Lal 1997; Kravchenko, Bullock 2000; Iqbal a kol. 2005). Negativní korelace mezi výnosem a nadmořskou výškou tedy ukazuje, že obecně v nižších pozicích terénu jsou vyšší výnosy. Kravchenko a Bullock (2000) zjistili vyšší výnos v nižších nadmořských výškách pole a široké spektrum hodnot výnosů v průměrných a vyšších nadmořských výškách v průměrných až suchých klimatických podmínkách, ale nižší výnosy byly naměřeny v nižších nadmořských výškách pozemku ve vlhčích letech. V letech, kdy byl objem srážek pod úrovní potřeby rostlin, se předpokládalo, že nižší místa pozemku by měla mít vyšší výnos. Voda má tendenci se akumulovat v konkávních místech a nižších pozicích terénu a lepší dosažitelnost vody vede k vyšším výnosům (Marques da Silva, Silva 2006). Kaspar a kol. (2003) zjistili negativní korelaci mezi výnosem kukuřice a relativní nadmořskou výškou, sklonem reliéfu a zakřivením v letech s nadprůměrnými srážkami. Vyvozují, že tato negativní korelace by mohla z části vyplývat z vlivů erozních efektů a vlastností terénu na půdní vlastnosti, které mohou ovlivnit vsakování vláhy a její uložení v půdě.

Marques da Silva a Silva (2008) zjistili pozitivní korelaci mezi nadmořskou výškou a výnosem, která může být vysvětlena vyšším obsahem jílu v horní vrstvě půdy na vyšších pozicích terénu těchto pozemků. Vyšší obsah jílu je ovlivněn erozními procesy, kde je splaven půdní horizont A (nejsvrchnější

eluviální horizont) ze spodního (iluviálního) horizontu B. Půdní horizont B má vyšší obsah jílů, který zadržuje více vody v suchých letech.

Vysoké koeficienty korelace, ať už pozitivní či negativní, mezi specifickými atributy a výnosem mohou vyjadřovat významný vliv sledovaného faktoru na variabilitu výnosu. Nízké koeficienty korelace ukazují, že jsou zde i jiné faktory, které mají vyšší vliv na variabilitu výnosu (Marques da Silva, Silva 2008). Složitost topografie ve vlněném terénu může vést k některým omezením v použití těchto primárních topografických atributů. Například index sklonu reliéfu nemůže odlišit plochy s nízkou hodnotou sklonu reliéfu ve vysokých pozicích terénu od těch v nízkých pozicích terénu. Index nadmořské výšky (hodnota nadmořské výšky v m v daném místě terénu) tedy prezentuje omezení, od kterých může být dosažena určitá hodnota nadmořské výšky na vrcholu malé vyvýšeniny nebo na dně malé deprese ve vyšších pozicích terénu. Tato omezení mohou způsobit nízké koeficienty korelace mezi výnosem a některými atributy (Marques da Silva, Silva 2008).

Ebeid a kol. (1995) popsal proces, kdy se s větší dostupností vody zvyšuje výnos. Marques da Silva a Silva (2006) uvedli, že vysoká pozitivní korelace mezi výnosem a indexem vlhkosti signalizují, že dostupnost vody je, když ne nejdůležitějším, tak velice důležitým výnos ovlivňujícím faktorem. Pozitivní korelace mezi výnosem a akumulací odtoku znamená, že výnos je vyšší v místech, kde se sbíhají odtokové linie vody, tudíž je zde větší dostupnost vody. DFL index tuto domněnku potvrzuje, protože obecně je zaznamenán pokles výnosu se zvýšením DFL. Marques da Silva a Silva (2008) zjistili, že blízko linií akumulace odtoku byla větší hloubka půdy. Kombinace mezi větší hloubkou půdy a vyšší dostupností vody dává rostlinám lepší podmínky k růstu, přenesené k produkci vyšších výnosů. Pozitivní i negativní korelaci mezi akumulací odtoku a výnosem kukuřice na různých pokusných polích hodnotili Kravchenko a Bullock (2000). Tyto rozdílné typy korelace vysvětlují vztahem mezi topografií (obzvláště zakřiveností) a srážkami ve vegetačním období. Momm a kol. (2013) se zabývali vlivem sklonu reliéfu, lokální rozdílností terénu a velikostí zvoleného rastru na tzv. složený topografický index.

Reuter a Kersebaum (2008) se zabývali ve své studii precizním zemědělstvím z pohledu geomorfometrie. Uvedli, že geomorfometrie může podporovat precizní zemědělství různými způsoby. Nicméně problémem zůstává, jakým způsobem vytvořit modely, aby byly aplikovatelné v zemědělské praxi. Dalším problémem může být vytváření půdních, hydrologických a meteorologických informací potřebných pro rozhodovací systém využitelný v precizním zemědělství. Geomorfometrie může preciznímu zemědělství pomáhat také v posklizňové analýze tak, že zlepší pochopení procesů spojených s topografií a jejich vlivy na výnos. Tato analýza může nejenom zlepšit pochopení vlivu topografie na růst plodin a jejich výnos, ale také na prostorovou variabilitu chorob, plevelů, kvalitu porostu atd. Precizní zemědělství podobně jako geomorfometrie může získávat velké soubory dat, nicméně přeměnit tyto informace na rozhodovací procedury je problém, jehož řešení vyžaduje množství zkušeností a může být bariérou k jejich zavádění do praxe.

Jak vyplývá z předchozího literárního přehledu, topografické charakteristiky mohou mít na výnos rozdílný vliv. Určením těchto vlivů se již v minulosti zabývalo množství autorů avšak přesto je tato problematika stále aktuální (Momm

a kol. 2013). Proto je cílem tohoto příspěvku zjistit jaké zdroje dat jsou pro odvození topografických charakteristik na poli s ohledem na praktickou využitelnost v rámci precizního zemědělství výhodné, a to především v podmínkách Česka. Tento příspěvek využívá k odvození topografických charakteristik data ze tří zdrojů, které jsou v zemědělské praxi dostupné. Topografické charakteristiky jsou pak porovnány s výnosem s ohledem na meteorologické podmínky zkoumaných let. Výsledky porovnání mají poskytnout informaci, za jakých podmínek a jakou intenzitou mohou působit vybrané topografické charakteristiky jako výnosotvorné faktory pro dané zemědělské plodiny a který z vybraných zdrojů dat je nejlépe využitelný pro zemědělskou praxi.

2. Materiál a metody

2.1. Popis pokusného pozemku

Pokusný pozemek se nachází v areálu Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v. v. i. (VÚRV) v Praze-Ruzyni ($50^{\circ}05'N$, $14^{\circ}18'E$; obr. 1). Celková výměra pokusného pozemku je 11,5 ha a jeho průměrná nadmořská výška 345 m. Pozemek je situován na mírném svahu s jižní orientací, kde je severní okraj položen nejvýše a dosahuje nadmořské výšky 357,5 m n. m. Nejnižší bod je na jižním okraji pozemku a dosahuje nadmořské výšky 338,5 m. Průměrná svazitost je $3,5^{\circ}$. Pokusný pozemek se nachází v řepařské výrobní oblasti.

Obr. 1 – Orientační mapa pokusného pole v Praze-Ruzyni. Zdroj: www.mapy.cz.

Tab. 1 – Průběh srážek a teplot na sledovaném pozemku rozdělený do jednotlivých fenologických fází pěstovaných plodin v letech 2004–2012

	Srážky (mm)							
	2004	2005	2006	2007	2008	2010	2011	2012
Plodina	Řepka ozimá	Pšenice ozimá	Oves	Ječmen ozimý	Řepka ozimá	Oves	Pšenice ozimá	Řepka ozimá
Odnožování	103,4	83,4	111,4	122,4	105,3	93,4	104,4	167,8
Květ	157,2	90,4	48,6	2,4	112,6	84,7	39,5	54,1
Sklizeň	46,6	207,8	94,6	146,6	99,6	142,3	257,4	258,9
Suma	307,2	381,6	254,6	271,4	317,5	320,4	401,3	480,8
Průměr	102,4	127,2	84,9	90,5	105,8	106,8	133,8	160,3
	Teplota (°C)							
	2004	2005	2006	2007	2008	2010	2011	2012
Plodina	Řepka ozimá	Pšenice ozimá	Oves	Ječmen ozimý	Řepka ozimá	Oves	Pšenice ozimá	Řepka ozimá
Odnožování	5,4	4,0	14,1	6,9	5,3	12,3	3,4	4,3
Květ	14,6	13,9	16,6	12,8	11,8	16,5	14,8	9,5
Sklizeň	19,1	18,4	22,2	18,1	18,9	21,1	17,9	17,8
Průměr	13,0	12,1	17,6	12,6	11,9	16,6	12,0	10,5

V areálu VÚRV se nachází agrometeorologická stanice, ze které byly převzaty veškeré informace o úhrnu srážek a teplotě během sledovaných let 2004–2012. Informace o srážkách a teplotě byly zprůměrovány do období tzv. fenologických fází plodin, kde se bere v úvahu pouze vegetační období plodiny. Srážkové a teplotní poměry jednotlivých sledovaných let jsou popsány v tabulce 1.

Podle materiálů VÚRV lze půdu pokusného pozemku označit jako modální hnědozem, částečně na křídové opuce, s vyšším obsahem hrubého prachu a nižším obsahem jílnatých částic a jílu. Ornice o mocnosti 26–33 cm přechází subhorizontem 34–54 cm do výrazného ořechovito-prismatického iluviálního horizontu zasahujícího do hloubky 77–80 cm s přechodem do spraše v hloubce 85–120 cm. Hodnota sorpční kapacity činí v ornici při obsahu jílu 20–35 %. Celý profil je neutrální a sorpčně nasycený až plně nasycený. Obsah přístupných živin je dobrý až velmi dobrý. Ve svažitých polohách a spraši se nacházejí profily smytých hnědozemí se zbytky iluviálního horizontu, eventuálně silně smyté hnědozemě, kde ornice leží bezprostředně na spraši (VÚRV 2004).

Od roku 2001 byl na pokusném pozemku následující osevní postup: cukrová řepa (2001), ječmen jarní (2002), pšenice ozimá (2003), řepka ozimá (2004), pšenice ozimá (2005), oves (2006), ječmen ozimý (2007), řepka ozimá (2008), pšenice ozimá (2009), oves (2010), pšenice ozimá (2011), řepka ozimá (2012). Od roku 2004 je měřen okamžitý výnos a jiné agronomické charakteristiky a tímto rokem také začalo experimentální sledování pozemku.

2.2. Výšková data

Výšková data byla získána ze tří zdrojů. Prvním a původním zdrojem, který se v rámci našeho pokusu začal používat pro modelování DEM a sklonu reliéfu

(SM – *slope model*) byla výšková data z výnosového monitoru sklízecí mlátičky. Sklízecí mlátička Sampo 2075 byla vybavena výnosovým monitorem LH 500 (LH Agro, Dánsko) a přijímačem DGPS s EGNOS korekcí s horizontální přesností $\pm 0,1\text{--}0,3$ m a vertikální přesností $\pm 0,2\text{--}0,6$ m. Výnos byl během sklizně společně s polohou a nadmořskou výškou ukládán do palubního počítače každé tři sekundy. Pracovní záběr sklízecí mlátičky je 4 m. Plocha základního mapovacího bodu vychází v průměru přibližně na 26 m^2 . Počet hodnot v souboru se pohyboval každoročně kolem 9 000. Soubor dat byl uložen v souřadnicovém systému WGS_84 a výškovém systému Bpv. Hodnoty výnosu včetně informací o poloze a nadmořské výšce byly opraveny pomocí stanovení intervalu spolehlivosti, který byl určen podle vzorce: střední hodnota ± 3 s. Takto upravená data (výnosová i výšková) byla připravena pro další zpracování. Výchozí soubor, který byl použit pro tvorbu DEM, obsahoval po této úpravě 8 822 bodů.

Dalšími zdroji dat, které sloužily k vytvoření topografických modelů, byla data získaná z přijímače RTK-GPS. V roce 2008 bylo zaměřeno ručním přijímačem RTK-GPS (Trimble 5800) na pokusném pozemku 300 bodů s velmi přesnými údaji (horizontální i vertikální přesností $\pm 0,02$ m) o nadmořské výšce. Těchto 300 bodů bylo zaměřeno v relativně pravidelné síti s důrazem na terénní nerovnosti v souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém systému Bpv. Tento soubor dat byl kvůli vzájemnému porovnání souborů následně transformován do souřadnicového systému WGS_84.

Třetí sadu výškových dat tvořila data z leteckého laserového skenování povrchu (ALS data), která byla laskavě poskytnuta Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (ČÚZK). Mračno ALS bodů bylo situováno do 2 čtverců o rozloze 2×2 km (celkem 13 162 370 bodů). Po oříznutí zájmového území v oblasti pokusného pozemku zůstalo 317 303 bodů. Data byla poskytnuta v souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém systému Bpv. Stejně jako soubor dat z RTK-GPS byl i tento soubor ALS dat transformován do souřadnicového systému WGS_84.

2.3. Výnosová data

Po základní úpravě byla výnosová data dále zpracovávána pomocí SW GS+ (Gamma Design Software, St. Painwell, MI, USA) a ArcGIS 9.2 a 10 (ESRI 2006). Data se zpracovávala postupně, a proto se měnila verze SW ArcGIS 9.2 na verzi 10. Protože sady výnosových dat obsahovaly každoročně více než 8 000 hodnot, byla pro další zpracování zvolena momentová metoda (*Method of Moments*, MoM) k vypočítání experimentálních variogramů. Experimentální variogramy výnosových dat byly spočítány a modelovány pomocí metody nejmenších čtverců v SW GS+. Jako nejvhodnější model variogramu byl pro výnosy ze všech sledovaných let zvolen model exponenciální. Pro vizualizaci výnosových dat byl zvolen bodový kriging v SW ArcGIS 9.2 (10), kde byla použita příslušná data rozmístěná ve vzdálenosti 6,5 m od sebe a také vypočítané parametry variogramu.

2.4. Metody zpracování výškových dat

První sadu dat tvořila zeměpisná délka, šířka a nadmořská výška, která se během sklizně společně s informací o výnosu ukládala na PCMCIA kartu na palubním počítači sklízecí mlátičky. Výšková data byla po úpravě, kdy se pomocí stanovení intervalu spolehlivosti vyčlenila chybná data, dále vizualizována pomocí interpolační metody IDW do podoby DEM. Hengl a MacMillan (2008) ve své studii uvádějí, že pro tvorbu DEM je vhodnější metoda kriging z důvodu lepší predikce chyb. V podmínkách Česka se modelováním DEM pomocí interpolační metody *kriging* zabývali ve své práci Svobodová a Voženílek (2010) a došli ke stejným závěrům jako předchozí autoři.

Při výběru vhodnosti interpolačních metod byly vytvořeny experimentální variogramy. Lokální trendy experimentálních variogramů vypočítaných pro všechna výšková data jasně vykazovaly na začátku konkávní tvar křivky. V tomto případě se jeví interpolační metoda kriging pro tato nestabilní data jako nevhodná (Oliver, M.A., osobní konzultace). Směrové variogramy ukazovaly mimo jiné i anizotropní variaci. Z tohoto důvodu byla použita interpolační metoda IDW jako alternativa k metodě *kriging*, ačkoliv zde bylo dostatek dat pro použití *krigingu*. Pro všechny datové sady byl nastaven parametr *power 2*. Při nastavení pokročilé analýzy v metodě IDW byl dále nastaven poměr polos 2:1 (eliptický tvar zkoumaného regionu) a úhel 90° (faktor anizotropie 2). Takto nastavené parametry použité metody berou v potaz východo-západní anizotropii zkoumaného pozemku. Z DEM dále vznikl SM. Protože SM z dat ze sklízecí mlátičky vykazoval množství chybných dat vzniklých především pojezdem stroje a jeho otáčením se na souvratích, byl sklon reliéfu ručně přeměřen sklonoměrem. K tomuto přeměření byla použita síť 70 GPS zaměřených bodů, která sloužila k odběru půdních a rostlinných vzorků. Následně byla chybná data ze SM odstraněna a naopak byla doplněna zpřesněná data.

Protože účelem tvorby všech modelů bylo především porovnat vliv topografických faktorů na výnos plodin, bylo potřeba výsledné modely převzorkovat do devíti kategorií rastru a v tomto tvaru pak byly použity k porovnání s výnosy sledovaných let. Soubor dat z RTK-GPS, který obsahoval 300 přesných hodnot, nemusel být před interpolací podroben takové úpravě jako soubor výškových dat ze sklízecí mlátičky. Pro vizualizaci DEM byla opět zvolena interpolační metoda IDW. Z tohoto výstupu byl dále vytvořen SM. Výsledné modely byly opět převzorkovány do devíti kategorií rastru pro účely porovnání s výnosy sledovaných let. ALS data byla modifikována na tři výchozí soubory, se kterými se pracovalo. První soubor byl tvořen původními daty (317 303 bodových hodnot nadmořské výšky). Další dva soubory byly odvozeny z původního souboru dat. V SW ArcGIS 10 byla kolem 300 bodů naměřených RTK-GPS vytvořena kruhová plocha s poloměry 6 a 12 m. Tyto ALS body, které náležely do těchto ploch, byly zprůměrovány do jednoho bodu. Tak vznikly další dva soubory dat obsahující 300 hodnot nadmořské výšky. První soubor (ALS6) tvořil hodnoty zprůměrovaných nadmořských výšek z poloměru 6 m kolem pomocných bodů z RTK-GPS. Druhý soubor (ALS12) tvořil hodnoty zprůměrovaných nadmořských výšek z poloměru 12 m kolem pomocných bodů z RTK-GPS. Tyto dva soubory vznikly z důvodu porovnání přesnosti mezi jednotlivými soubory dat z různých zdrojů. Ze všech tří souborů ALS dat byl vytvořen DEM a SM.

Jednotlivé modely z ALS6 a ALS12 dat byly vytvořeny stejným způsobem jako modely z 300 dat z RTK-GPS.

Protože původní soubor ALS dat obsahoval velké množství přesných dat, docházelo při zpracování tohoto souboru k občasným komplikacím (delší doba zpracování, náhlé přerušení procesu zpracování dat atp.). Přes všechny komplikace byl použit stejný způsob zpracování a úprav jako u předešlých souborů. Pro tento soubor dat bylo charakteristické, že jednotlivé body byly nepravidelně zaměřeny ve vzdálenosti menší než 1 m od sebe. Už z malého výřezu pokusného pole s hodnotami nadmořské výšky ALS dat bylo zřejmé, že rozdíl hodnot nadmořské výšky je v V–Z směru menší než ve směru S–J. Je zde tedy evidentní S–J aspekt pokusného pole. Další problém je v přesnosti ALS dat. I když je jasný S–J aspekt pozemku, můžeme pozorovat u nepravidelně rozmístěných bodů hodnoty nadmořské výšky, které by měly být podle směru svahu na vyšším místě s vyšší hodnotou nadmořské výšky, ale hodnota nadmořské výšky je naopak ve skutečnosti nižší než hodnota, která je podle směru svahu níže. Z tohoto lze usuzovat, že soubor ALS dat je natolik přesný, že dokáže zaměřit každou nerovnost na poli, tedy např. i hroudy a další nerovnosti způsobené např. kultivačními zásahy na pokusném poli. Aby se eliminovaly tyto nerovnosti, byl původní soubor dat (317 303 hodnot nadmořské výšky) upraven pomocí analytických nástrojů v SW ArcGIS 10 a tím byl i snížen počet dat na 112 987 hodnot nadmořské výšky. Nejprve bylo pokusné pole rozděleno na čtvercovou síť o hranicích 1×1 m. V každém čtverci se nacházelo 0 až 12 bodů z původních ALS dat. Body v každém čtverci byly následně zprůměrovány a byly vypočteny nové souřadnice (centroidy) každého ze čtverců. Tímto došlo k uhlazení povrchu pokusného pozemku. Vzniklý soubor byl označen ALS1m. Takto upravená data sloužila jako podklad pro vytvoření DEM a SM. Pro vizualizaci DEM (pro ALS i pro ALS1m data) byla opět zvolena interpolační metoda IDW. SM vznikl běžnou cestou zpracování z DEM.

3. Výsledky a diskuze

Pro tvorbu topografických charakteristik byly zvoleny zdroje, které jsou pro zemědělskou praxi dobře dostupné. Z nich pak byly odvozeny DEM a SM. Tyto dvě topografické charakteristiky (nadmořská výška a sklon reliéfu) byly vybrány především z důvodu primárního vlivu na růst plodin. Sklon reliéfu mimo jiné ovlivňuje distribuci vody na poli, která je velmi důležitá pro vstřebávání živin při růstu rostlin. Právě tyto dvě topografické charakteristiky jsou to první, co lze zjistit při posuzování zemědělského pozemku a tvoří pak pilíře pro odvozování dalších topografických charakteristik.

Všechny tři primární soubory dat, tedy z výnosového monitoru sklízecí mlátičky (skl.m.), RTK-GPS a ALS byly statisticky porovnány (ostatní soubory byly z těchto primárních souborů vždy odvozeny). Nejprve byla pro porovnání dat použita analýza rozptylu. Z jejích výsledků bylo zřejmé, že mezi sledovanými soubory dat existuje statisticky významný rozdíl na hladině významnosti $p=0,05$, a to přesto, že průměry všech tří souborů jsou velmi podobné (liší se od sebe pouze o 0,2 m). Za účelem zjištění, mezi kterými sledovanými soubory konkrétně existuje statisticky významný rozdíl, byly tyto soubory mezi sebou

Tab. 2 – Popisná statistika a metoda interpolace použitá pro tvorbu DTM (m) z různých zdrojů dat na pokusném pozemku

	Nadmořská výška (m)					
	sklízecí mlátička	RTK- GPS	ALS	ALS6	ALS12	ALS1m
Počet bodů	8 822,0	300,0	317 303	299	295	112 987
Stř. hodnota	345,2	345,1	345,3	345,4	345,4	345,7
Medián	345,3	344,9	344,9	345,1	345,3	345,3
Modus	343,0	353,0	337,7			343,3
Rozptyl výběru	16,16	26,88	18,99	26,99	26,23	25,28
Směr. odchylka	4,019	5,185	5,132	5,195	5,12	5,03
Minimum	335,1	337,3	337,4	337,6	337,6	337,5
Maximum	354,0	355,0	356,4	355,2	355,1	356,4
Šikmost	0,201	0,144	0,256	0,150	0,138	0,208
Metoda interpolace			IDW, Power 2			

porovnány t-testem. V tomto případě nebyl na hladině významnosti $p=0,05$ zjištěn statisticky významný rozdíl mezi soubory dat z RTK a ALS a také z RTK a skl. m. Statisticky významný rozdíl však byl nalezen mezi soubory skl. m. a ALS. Popisná statistika jednotlivých datových souborů nadmořských výšek je zobrazena v tabulce 2.

DEM z jednotlivých zdrojů se lišily na základě přesnosti a množství vstupních dat. Nejvíce odlišný od ostatních byl DEM ze sklízecí mlátičky. Na tomto modelu je patrný pojezd sklízecí mlátičky a velké množství méně přesných dat. Ostatní modely DEM se vzájemně příliš neliší. Jak je vidět z obrázku 2, rozdíl mezi DEM z RTK-GPS, ALS, ALS1m, ALS6 a ALS12 dat není skoro zřejmý. Tím, že soubor ALS a ALS1m obsahoval velké množství dat, lze pozorovat nerovnou hranici mezi jednotlivými intervaly nadmořské výšky DEM, na rozdíl od DEM z ALS6 a ALS12 a RTK-GPS. Jak je zřejmé z tabulky 3, koeficienty korelace (r) mezi DEM a výnosem ve sledovaných letech v porovnání mezi jednotlivými soubory jsou podobné.

Z DEM vznikly modely sklonu reliéfu (SM; obr. 3). Tyto modely si nesly v dalším zpracování chyby, které byly popsány u DEM. SM_{ALS1m} a SM_{ALS} byly velmi podrobné jak vizuálně, tak hodnotou r mezi SM a výnosy v jednotlivých letech. SM_{ALS6} se vizuálně podobal $SM_{RTK-GPS}$ z důvodu stejného počtu vstupních hodnot, ale hodnotami r se mírně lišil. SM ze sklízecí mlátičky se velmi lišil od ostatních a to vizuálně i hodnotami r . Nicméně i přes veškeré nepřesnosti a úpravy si SM ze sklízecí mlátičky udržel trend sklonu reliéfu tak, jak je znatelný u ostatních přesnějších modelů.

Všechny modely topografických charakteristik byly porovnány s výnosy jednotlivých sledovaných let s ohledem na meteorologické poměry v jednotlivých fenologických fázích plodin. V předchozích publikacích týkajících se zkoumaného pole (Kumhálová a kol. 2011a, 2011b; Kumhálová a kol. 2008; Matějková, Kumhálová, Lipavský 2010) byl popsán vliv topografických charakteristik na výnos v letech 2004 až 2008 především z agronomického pohledu. Bylo zjištěno, že obecně během sušších a teplejších let docházelo k většímu vlivu topografie na výnos tak, jak je zřejmé z koeficientů determinace (R^2) v tabulce 3. A je tomu

Obr. 2 – Mapy DEM pokusného pole z různých zdrojů dat

tak i v následujících letech 2010 až 2012. Na obrázku 4 je zobrazen výnos na zkoumaném poli během vlhkého a chladného roku 2005, kdy byla během fenologických fází pěstované plodiny (pšenice ozimá) taková distribuce srážek, která zajistila rovnoměrný přístup vody a živin všem rostlinám na poli. V tomto roce byla na poli aplikována variabilní dávka dusíku. Právě tento zásah ukazuje, že i když v jihozápadní části pole nebylo aplikováno dusíkaté hnojivo, nezbytné

Obr. 3 – Mapy SM pokusného pole z různých zdrojů dat

pro dobrý růst rostlin, tak vydatné srážky v růstovém fenologickém období plodiny zajistili na této části pole dostatečný přísun vody a živin. Na zbytku pole je výnos vyrovnaný nebo vyšší než obvykle.

Opačný trend má výnos ječmene ozimého z roku 2007 (obr. 5). Rok 2007 byl z hlediska distribuce srážek a rozložení teplot během fenologických fází plodiny spíše sušší a teplejší, ze sledovaných let 2004–2012 nejsušší a nejteplejší.

Obr. 4 – Výnos pšenice ozimé (t/ha) z roku 2005. Rok byl bohatý na srážky, nejlepší průběh srážek a teplot z hlediska růstu pěstovaných rostlin.

Obr. 5 – Výnos ječmene ozimého (t/ha) z roku 2007. Rok byl suchý s nejhorším průběhem srážek z hlediska růstu pěstovaných rostlin.

Z rozložení výnosu z roku 2007 lze pozorovat přesun vyšších výnosů do akumulačních sníženin, které dobře vykresluje model sklonu reliéfu odvozený z nejpodrobnějšího souboru výškových dat, tedy z ALS dat (obr. 3c). Ve vlhkém a chladném roce 2005 dosahovaly koeficienty determinace (tab. 3) mezi topografickými charakteristikami a výnosem pouze hodnot v rozmezí 0,8 % až 14,3 % v závislosti na zdroji vstupních dat. Naopak v suchém a teplém roce

Tab. 3 – Koefficienty korelace mezi výnosem a topografickými charakteristikami v letech 2004–2012, na 5% hladině významnosti. Koefficienty determinace (R^2) mezi výnosem a topografickými atributy vypočtené krokovou dopřednou lineární regresí (KDRLR).

Rok	Skizovací mlátka		RTK-GPS		ALS		ALS1m		ALS6		ALS12		
	DEM	SM	DEM	SM	DEM	SM	DEM	SM	DEM	SM	DEM	SM	
2004	Výnos	0,185	-0,112	0,053	0,099	0,114	0,258	0,085	0,295	0,111	0,300	0,113	0,353
	KDLR	$R^2 = 7,6 \%$		$R^2 = 0,3 \%$		$R^2 = 7,3 \%$		$R^2 = 10,7 \%$		$R^2 = 9,7 \%$		$R^2 = 13,8 \%$	
2005	Výnos	-0,037	-0,121	0,051	-0,007	-0,044	0,121	-0,055	0,183	-0,044	0,244	-0,046	0,286
	KDLR	$R^2 = 0,8 \%$		$R^2 = 1,6 \%$		$R^2 = 4,3 \%$		$R^2 = 8,5 \%$		$R^2 = 10,3 \%$		$R^2 = 14,3 \%$	
2006	Výnos	-0,288	-0,595	-0,334	-0,241	-0,398	-0,241	-0,438	-0,211	-0,402	-0,106	-0,404	-0,084
	KDLR	$R^2 = 36,9 \%$		$R^2 = 18,7 \%$		$R^2 = 15,8 \%$		$R^2 = 20,1 \%$		$R^2 = 17,5 \%$		$R^2 = 18,9 \%$	
2007	Výnos	-0,620	-0,741	-0,734	-0,583	-0,790	-0,482	-0,801	-0,466	-0,791	-0,341	-0,791	-0,343
	KDLR	$R^2 = 61,1 \%$		$R^2 = 62,3 \%$		$R^2 = 62,2 \%$		$R^2 = 64,7 \%$		$R^2 = 63,4 \%$		$R^2 = 64,1 \%$	
2008	Výnos	0,288	0,181	0,281	0,333	0,323	0,488	0,351	0,587	0,327	0,592	0,330	0,661
	KDLR	$R^2 = 8,3 \%$		$R^2 = 5,3 \%$		$R^2 = 24,6 \%$		$R^2 = 34,5 \%$		$R^2 = 36,4 \%$		$R^2 = 44,9 \%$	
2010	Výnos	-0,227	-0,467	-0,190	-0,069	-0,232	-0,077	-0,277	-0,038	-0,236	0,037	-0,238	0,085
	KDLR	$R^2 = 22,6 \%$		$R^2 = 8,3 \%$		$R^2 = 6,3 \%$		$R^2 = 11,1 \%$		$R^2 = 9,2 \%$		$R^2 = 12,7 \%$	
2011	Výnos	-0,411	-0,566	-0,425	-0,307	-0,437	-0,183	-0,499	-0,156	-0,439	-0,045	-0,439	-0,004
	KDLR	$R^2 = 32,5 \%$		$R^2 = 30,1 \%$		$R^2 = 21,1 \%$		$R^2 = 29,7 \%$		$R^2 = 24,1 \%$		$R^2 = 27,7 \%$	
2012	Výnos	-0,124	-0,325	-0,225	-0,138	-0,156	0,066	-0,163	0,135	-0,154	0,200	-0,155	0,257
	KDLR	$R^2 = 11,6 \%$		$R^2 = 5,9 \%$		$R^2 = 8,1 \%$		$R^2 = 12,5 \%$		$R^2 = 13,8 \%$		$R^2 = 20,2 \%$	

dosahovaly koeficienty determinace mezi topografickými charakteristikami a výnosem hodnot v rozmezí 61,1 % až 64,7 %. Z tabulky 3 můžeme také vyvodit, že během sušších let (rok 2007, 2006) je koeficient determinace obecně mezi jednotlivými zdroji dat vyrovnanější než mezi roky vlhkými (rok 2005, 2011 a 2012). Rozložení a hodnota výnosu záleží na rozložení úhrnu srážek a rozložení teplot vzduchu během fenologických fází plodin. Při porovnání koeficientů determinace v jednotlivých letech mezi jednotlivými soubory dat je přesto zřejmé, že všechny soubory jsou použitelné pro tvorbu modelů topografických charakteristik a zachovávají stejný trend. Výraznější byl tento trend u obilovin, zatímco u řepky ozimé je toto vysvětlení složitější, protože během růstu zde může působit a mít podstatný vliv mnohem více výnosotvorných faktorů než je jen topografie.

V literatuře byly popsány různé vztahy mezi průběhem srážek a teplot, výnosy plodin a topografií. Například Halvorson a Doll (1991) zjistili, že topografie má menší vliv na výnos v sušších letech než ve vlhkých letech, a to především na jílovitých půdách. Mnoho autorů dělalo své pokusy na hlinitých až písčitých půdách (Simmons, Cassel, Daniels 1989; Afyuni, Cassel, Robarge 1993; Sinai, Zaslavsky, Golany 1981; Stone a kol. 1985). Zjistili více uniformní rozložení výnosu s ohledem na topografii během vlhkých let ve srovnání s rozložením výnosu během suchých let. Kravchenko a Bullock (2000) vysvětlily tento protiklad částečně rozdílnými půdními a klimatickými podmínkami a částečně tím, že závislost je významně ovlivněna sklonem a zakřivením reliéfu. Reuter a Kersebaum (2008) uvedli, že výnos během sledovaných tří let rozdílně reagoval na rozdílnosti terénu v rámci jednoho pozemku.

Závěr

Na základě prezentovaných výsledků lze konstatovat, že všechny tři zdroje dat (z výnosového monitoru sklízecí mlátičky, RTK-GPS a ALS) jsou použitelné pro tvorbu topografických charakteristik na zemědělském pozemku za účelem určení vlivu topografie na výnos. Z hlediska zpracování výsledků hrály velkou roli počet, rozmístění, vzdálenost a přesnost jednotlivých bodů s hodnotami nadmořské výšky. Za účelem odvození topografických charakteristik proto musely být jednotlivé sady dat specificky upravovány. Jako k daným účelům nejhůře použitelný se ukázal soubor nadmořských výšek získaných z výnosového monitoru sklízecí mlátičky. Zde je třeba doporučit terénní kontrolu naměřených hodnot. Tento soubor je však běžně prakticky zdarma dostupný všem, kteří na sklízecí mlátičce vlastní výnosový monitor. Jako nejlepší z hlediska množství a přesnosti vstupních dat se jeví soubor dat z leteckého laserového skenování povrchu. Z hlediska praktického využití zde ovšem může nastat problém ve velkém objemu dat a jejich následném zpracování. Proto byla v příloženém příspěvku použita degradace dat, kdy byl soubor ALS dat zprůměrován na menší soubory dat (ALS1m, ALS6 a ALS12), aby se tímto potvrdilo, že je soubor ALS dat pro tyto účely dostatečně přesný, a že může sloužit i k výběru a zprůměrování dat na určených lokalitách. Použití RTK-GPS při sběru dat nabízí na rozdíl od předchozích dvou zdrojů možnost subjektivního zhodnocení pozemku. Nevýhodou je, že sběr dat je pracný a z hlediska běžného

zemědělského podniku se stává tato metoda nereálnou. Z pohledu praktického využití a přesnosti se jako jednoznačně nejlepší ukazují data z leteckého laserového skenování povrchu. V současné praxi, která je platná v Česku, by bylo zajímavé nabízet pro zhodnocení zemědělských pozemků právě tato data, ale již jako zpracovaný soubor odvozených topografických charakteristik. Jako velmi užitečná se proto jeví větší provázanost mezi znalostí geoinformatiky, topografie a obecné agronomie k lepšímu vyhodnocení agronomických zásahů, či jejich plánování. Zajímavým směrem dalšího výzkumu z tohoto pohledu je určit optimální množství dat a tvar sítě jejich odběru s ohledem na následné modelování akumulace odtoku vody.

Literatura:

- AFYUNI, M. M., CASSEL, D. K., ROBARGE, W. P. (1993): Effect of landscape position on soil water and corn silage yield. *Soil Science Society America Journal*, 57, s. 1573–1580.
- BAKHSH, A., JAYNES, D. B., COLVIN, T. S., KANWAR, R. S. (2000): Spatiotemporal analysis of yield variability for a corn-soybean field in Iowa. *Transactions of the ASAE*, 43, č. 1, s. 31–38.
- EBEID, M. M., LAL, R., HALL, G. F., MILLER, E. (1995): Erosion effects on soil properties and soybean yield on Miamian soil in western Ohio in a season below normal rainfall. *Soil Technol.*, 8, s. 97–108.
- HANNA, A. Y., HARLAN, P. W., LEWIS, D. T. (1982): Soil available water as influenced by landscape position and aspect. *Agronomy Journal*, 74, s. 999–1004.
- HALVORSON, G. A., DOLL, E. C. (1991): Topographic effects on spring beat yields and water use. *Soil Science Society of America Journal*, 55, s. 1680–1685.
- HENGL, T., MACMILLAN, R. A (2008): Geomorphometry – A Key to Landscape Mapping and Modelling. In: Hengl, T., Reuter, H. I. (eds): *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, 33, 772 s.
- CHANGERE, A., LAL, R. (1997): Slope position and erosional effects on soil properties and corn production on a Miamian soil in central Ohio. *Journal of Sustainable Agriculture*, 11, s. 5–21.
- IQBAL, J., READ, J. J., THOMASSON, A. J., JENKINS, J. N. (2005): Relationships between soil-landscape and dryland cotton lint yield. *Soil Science Society America Journal*, 69, No. 3, s. 872–882.
- JENSON, S. K., DOMINGUE, J. O. (1988): Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, s. 1593–1600.
- KASPAR, T. C., COLVIN, T. S., JAYNES, D. B., KARLEN, D. L., JAMES, D. E., MEEK, D. W., PULIDO, D., BUTLER, H. (2003): Relationships between six years of corn yields and terrain attributes. *Precision Agriculture*, 4, s. 87–101.
- KRAVCHENKO, A. N., BULLOCK, D. G. (2000): Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. *Agronomy Journal*, 92, s. 75–83.
- KUMHÁLOVÁ, J., KUMHÁLA F., KROULÍK M., MATĚJKOVÁ Š. (2011a): The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture*, 12, č. 6, s. 813–830.
- KUMHÁLOVÁ, J., KUMHÁLA, F., MATĚJKOVÁ, Š., KROULÍK, M. (2011b): The relationship between topography and yield in different weather conditions. In: Stafford, J. V. (ed.): *Precision Agriculture 2011. Czech Centre for Science and Society, Prague, Czech Republic*, s. 606–616.
- KUMHÁLOVÁ, J., MATĚJKOVÁ, Š., FIFERNOVÁ, M., LIPAVSKÝ, J., KUMHÁLA, F. (2008): Topography impact on nutrition content in soil and yield. *Plant Soil Environment*, 54, č. 6, s. 255–261.

- MARQUES DA SILVA, J. R., SILVA, L. L. (2006): Relationship between distance to flow accumulation lines and spatial variability of irrigated maize grain yield and moisture at harvest. *Biosystems Engineering*, 94, č. 4, s. 525–533.
- MARQUES DA SILVA, J. R., SILVA, L. L. (2008): Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosystems Engineering*, 101, s. 183–190.
- MATEJČKOVÁ, Š., KUMHÁLOVÁ, J., LIPAŤSKÝ, J. (2010): Evaluation of crop yield under different nitrogen doses of mineral fertilization. *Plant, Soil and Environment*, 56, č. 4, s. 163–167.
- MOMM, H. G., BINGNER R. L., WELLS R. R., RIGBY J. R., DABNEY S. M. (2013): Effect of topographic characteristics on compound topographic index for identification of gully channel initiation locations. *Transactions of the ASABE*, 56, č. 2, s. 523–537.
- MOORE, I. D., GRAYSON, R. B., LADSON, A. R. (1991): Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and ecological applications. *Hydrological Processes*, 5, s. 3–30.
- MOORE, I. D., GESSLER, P. E., NIELSEN, G. A., PETERSON, G. A. (1993): Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57, s. 443–452.
- REUTER, H. I., KERSEBAUM, K. C. (2008): Applications in Precision Agriculture. In: Hengl, T., Reuter, H. I. (eds): *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, 33, 772 s.
- SIMMONS, F. W., CASSEL, D. K., DANIELS, R. B. (1989): Landscape and soil property effects on corn grain yield response to tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 53, s. 534–539.
- SINAI, G., ZASLAVSKY, D., GOLANY, P. (1981): The effect of soil surface curvature on moisture and yield: Beer Sheva observation. *Soil Sci.*, 132, s. 367–375.
- STONE, J. R., GILLIAM, J. W., CASSEL, D. K., DANIELS, R. B., NELSON, L. A., KLEISS, H. J. (1985): Effect of erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils. *Soil Science Society America Journal*, 49, s. 987–991.
- SVOBODOVÁ, J., VOŽENÍLEK, V. (2010): Relief for Models of Natural Phenomena. In: Anděl, J., Bičák, I., Dostál, P., Shasneshin, S. (eds.): *Landscape Modelling: Geographical Space, Transformation and Future Scenarios (Urban and Landscape Perspectives)*. Dordrecht, Springer, s. 183–196.
- TIMLIN, D. J., PAPCHEPSKY, Y., SNYDER, V. A., BRYANT, R. B. (1998): Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Science Society of America Journal*, 62, s. 764–773.
- VERITY, G. E., ANDERSON, D. W. (1990): Soil erosion effects on soil quality and yield. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, s. 471–484.
- WILSON, J. P., GALLANT, J. C. (2000): *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley&Sons, Inc., 479 s.
- YANG, C., PETERSON, C. L., SHROPSHIRE, G. J., OTAWA, T. (1998): Spatial variability of field topography and wheat yield in the Palouse region of the Pacific Northwest. *Transactions of the ASAE*, 41, č. 1, s. 17–27.

Mapové podklady a materiály:

- ESRI. (2006). *ArcView spatial analyst*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Mapy.cz (2013), http://www.mapy.cz/#!d=ward_13693_1&x=14.298096&y=50.083477&z=13&t=s&l=15 (26. 12. 2013).
- VÚRV (2004): *Pokusná stanice Praha–Ruzyně*, VÚRV, Praha, http://www.vurv.cz/index.php?p=ps_praha&site=vyzkum (29. 4. 2009).

INFERENCE OF TOPOGRAPHICAL CHARACTERISTICS FOR PRECISION AGRICULTURE

Precision agriculture represents one of the principal directions of modern agricultural development. It is characterised by field management which has been specifically adjusted to the location. Correct evaluation of input data and further appropriate cultivation of the field can provide both economic and environmental benefits. Yield variability can be caused by many factors, but topography remains among the most significant ones.

Topographical attributes can be divided into primary and secondary features. The most common primary attributes are i.e. elevation, slope and curvature. The secondary attributes include i.e. flow direction, flow accumulation or wetness index. Higher yields in terrain positioned at lower altitudes are often reported in literature. It was found that water tends to accumulate in the concave areas at lower altitudes. Better water availability results in higher yields. Contrary to this, some studies reported positive correlation between elevation and yield. High correlation coefficients between specific topographic attributes and yield (even positive or negative) can express significant influences of observed factor on yield.

Nevertheless, although this issue has been addressed by many authors in the past, it still remains very current. That is why the main aim of this article was to determine what types of data sources are advantageous for the examination of topographical attributes of a given field with regards to practical applicability in the context of precision agriculture.

The experimental data of this study were collected from our experimental field in Prague-Ruzyně (50°05'N, 14°18'E). Total area of the field is 11.5 ha. The soil of this field is a Haplic Luvisol. The average precipitation reaches 526 mm per year and the average temperature is 7.9 °C. Most of the field has a southern aspect and the elevation ranges from 338.5 to 357.5 m above average sea level (a.s.l.). The average slope of the field is approximately 3.5°. Crop rotation on this field was monitored since 2001. An Agro-meteorological station is situated in the area of the Crop Research Institute campus in Prague-Ruzyně. The information about precipitations and temperatures during observed years was provided by this station. This information was averaged according to phenological growing phases of the crops.

Elevation data were obtained from three sources – combine harvester yield monitor (also the source of yield data), RTK-GPS and airborne laser scanning (ALS data). ALS data were modified to four initial sources – original ALS data, an average from a circular area with the radius of 6 (ALS6) and 12 meters (ALS12) around each of the 300 points for which RTK-GPS data were recorded, and a square grid with a 1 m edge (ALS1m). Digital elevation models (DEM) and slope models (SM) were derived from all those sources.

The creation of topographical characteristics was based resources easily accessible within agricultural practice. DEM and SM were then derived from those sources. DEM and SM were chosen mainly due to their primary influence on plant growth. DEM from individual sources varied in dependence on the accuracy and amount of input data. Possible errors of DEM were, of course also, reflected in SM.

All created models of topographical characteristics were set against yields achieved in the observed year, while keeping account of weather conditions during the cropping seasons. Generally speaking, it was found that the influence of topography on agricultural yield was higher during drier and warmer years. For example, during the drier and warmer year of 2007, higher yields were recorded in terrain depressions. On the contrary, during a wetter and colder year of 2005, in which a more uniform supply of water and nutrients to all plants in the field was secured, the yield turned out to be more balanced as a consequence.

Yield amount and its distribution also depend on rainfall and temperature during different phenological stages of crop growth. Various relationships between the course of precipitation and temperature, crop yield and topography have been reported in literature.

Based on the presented results, it can be concluded that all three evaluated data sources can be used for the creation of models featuring topographical characteristics of an agricultural field in order to evaluate the influence of topography on crop yield. Data file from the combine harvester yield monitor appeared to be the most difficult to use for this purposes. The ALS data file appeared as the best in terms of both accuracy and quantity of input data.

Fig. 1 – Orientation map of the experimental field in Prague-Ruzyně (www.mapy.cz).

Fig. 2 – DEM maps of the experimental field from different data sources: a – RTK-GPS, b – combine harvester, c – original airborne laser scanning (ALS) data, d – ALS data set as an average from 1 m² area, e – ALS data set as an average from a circular area with the radius 6 m, f – ALS data set as an average from a circular area with the radius 12 m.

Fig. 3 – SM maps in the experimental field from different data sources: a – RTK-GPS, b – combine harvester, c – original airborne laser scanning (ALS) data, d – ALS data set as an average for a 1 m² area, e – ALS data set as an average for a circular area with the radius of 6 m, f – ALS data set as an average for a circular area with the radius of 12 m.

Fig. 4 – Winter wheat yield map from the year 2005 – wet year with the best precipitation and temperature distribution in the phenological phases.

Fig. 5 – Winter barley yield map from the year 2007 – dry year with the worst precipitation distribution in the phenological phases.

Pracoviště autorky: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6; e-mail: kumhalova@fzp.czu.cz.

Do redakce došlo 28. 5. 2013; do tisku bylo přijato 11. 2. 2014.

Citační vzor:

KUMHÁLOVÁ, J. (2014): Odvození topografických charakteristik pro účely precizního zemědělství. *Geografie*, 119, č. 2, s. 161–178.