

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

**Zdroje topografických dat a odvozené topografické atributy  
pro popis variability zemědělského pozemku**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Mgr. Jitka KUMHÁLOVÁ, Ph.D.

Diplomant: Bc. Markéta LADMANOVÁ

2016

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Markéta Ladmanová

Aplikovaná ekologie

Název práce

Zdroje topografických dat a odvozené topografické atributy pro popis variability zemědělského pozemku

Název anglicky

Topographical data sources and derived topographic attributes for describing the variability of agricultural plot

---

### Cíle práce

- zpracovat rešerši k problematice výběru vhodných zdrojů dat a odvození topografických atributů používaných v zemědělství
- vybrat a zpracovat vhodné zdroje topografických dat
- odvodit topografické atributy za účelem popisu variability pozemku
- porovnat výsledné modely s výnosem a určit jejich podíl významnosti na tvorbě výnosových prvků
- zhodnotit využití topografických dat v zemědělství v závislosti na použitých zdrojích

### Metodika

Literární rešerše bude zaměřena na problematiku výběru vhodných zdrojů dat za účelem odvození topografických atributů pro zemědělské účely. Dále zde bude popsán výběr a charakteristika topografických atributů, které lze využít pro hodnocení variability zemědělského pozemku. V praktické části autorka odvodí z vybraných zdrojů dat vhodné topografické atributy popisující pozemek a porovná je s výnosem plodiny pěstované na daném pozemku v roce 2014. Na základě porovnání a statistické analýzy autorka zhodnotí využití topografických dat a odvozených atributů v závislosti na použitých zdrojích pro zlepšení managementu na daném pozemku. V diskuzi autorka dále zhodnotí a porovná výsledky své práce s odbornou literaturou. Řešení praktické části diplomové práce počítá s využitím geografických informačních systémů, především SW ArcGIS a jeho nadstaveb.

**Doporučený rozsah práce**

40 – 80 stran

**Klíčová slova**

Topografické atributy, výnos, digitální model terénu, LiDAR

---

**Doporučené zdroje informací**

- Hengl, T. & Reuter, H. I. (2009). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier B.V. 772 s.
- Kumhálová, J., Kumhála, F., Novák, P., & Matějková, Š. (2013). Airborne laser scanning data as a source of field topographical characteristics. *Plant Soil Environment*, 59 (9), 423-431.
- Kumhálová, J. & Moudrý, V. (2014). Topographical characteristics for precision agriculture in conditions of the Czech Republic. *Applied Geography*, 50, 90-98.
- Schmidt, F. & Persson, A. (2003). Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. *Precision Agriculture*, 4, 179-192.
- Wehr A. & Lohr U. (1999). Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 68–82.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2015/16 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 24. 3. 2016

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2016

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 08. 04. 2016

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Jitky Kumhálové, Ph.D. a že jsem v seznamu literatury uvedla veškeré zdroje, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne 19. 4. 2016

.....

## **Poděkování**

V první řadě bych ráda poděkovala vedoucí své diplomové práce Mgr. Jitce Kumhálové, Ph.D. za ochotu, pomoc, trpělivost a za velmi cenné rady a připomínky.

Poděkování bych také ráda věnovala Tomáši Komárkovi, za podporu nejen při zpracování této práce, ale po celou dobu magisterského studia. Můj vděk patří i prostorám Národní technické knihovny v Praze.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá zkoumáním vlivu topografie na výnos na zemědělském pozemku. Teoretický přehled dané problematiky je dán v literární rešerši a je zaměřen na zdroje výškových dat pro Českou republiku, dále na popis topografických atributů, které ovlivňují výnos na zemědělském pozemku.

Praktická část práce se zabývá vyhodnocením dat o zemědělském pozemku ve Vendolí u Svitav ve východních Čechách. Cílem práce bylo porovnat dvě sady výškových dat a vhodnost jejich použití pro popis variability pozemku. Výšková data poskytnuta ČÚZK byla získána metodou leteckého laserového skenování povrchu (DMR 4G), druhou sadou výškových dat byla data měřená pomocí DGPS přijímače umístěného na sklízecí mlátičce. Z výškových dat byly odvozeny topografické atributy pomocí běžně dostupných nástrojů v ArcGIS 10.2. Následně byly tyto atributy porovnávány s výnosem na daném pozemku. Výnosová data pšenice ozimé pro rok 2014 pocházela rovněž ze sklízecí mlátičky. V datech se projevila závislost výnosu na digitálním výškovém modelu. Pro ostatní topografické atributy se významný vztah nepotvrdil.

## **Klíčová slova**

Topografické atributy, výnos, digitální model terénu, LiDAR.

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on examination of effect topography on yield on the field. Theoretical research is given in literary overview and it is focused on sources of elevation data in conditions of the Czech Republic. Further there is given description of topographic attributes, which have influence on crop on the agricultural field.

Practical part of this thesis processed data about agricultural field in Vendolí near Svitavy in East Bohemia. One of aims of this thesis was to compare two sets of elevation data. First set of elevation data was provided by Czech office for surveying, mapping and cadastre, data came from airborne laser scanning. Second set of elevation data was measured by DGPS receiver placed on combine harvester during the harvest. Topographic attributes were derived from these two sets of elevation data with help of tools in software ArcGIS 10.2. In the further process topographic attributes were compared with yield of winter wheat from 2014 to assess relationship between topography and yield. In given data there was found dependence of yield on digital elevation model (higher amount of yield was found in higher elevations). Significant relationship between yield and other topographic attributes has not been proved.

## **Key words**

Topographic attributes, yield, digital elevation model, LiDAR.

## Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	CÍLE PRÁCE.....	12
3	LITERÁRNÍ REŠERŠE .....	13
3.1	Precizní zemědělství.....	13
3.1.1	Technologie využívané v precizním zemědělství .....	15
3.1.2	Význam a přínos precizního zemědělství .....	16
3.1.3	Problémy precizního zemědělství .....	17
3.1.4	Kruh precizního zemědělství.....	17
3.2	Dálkový průzkum Země .....	18
3.3	Globální poziční systém .....	20
3.3.1	Využití GPS .....	21
3.4	Letecké laserové skenování .....	22
3.4.1	Skener.....	23
3.4.2	GPS a inerciální měřicí jednotka .....	24
3.4.3	Zpracování ALS dat .....	24
3.5	GIS.....	25
3.5.1	Vektor.....	26
3.5.2	Rastr .....	26
3.6	Zdroje výškových dat pro ČR.....	27
3.6.1	ZABAGED.....	27
3.6.2	DMR 4G.....	27
3.6.3	DMR 5G.....	28
3.6.4	DMP 1G .....	28
3.6.5	Výšková data ze sklízecí mlátičky .....	29
3.7	Interpolace .....	29
3.7.1	IDW.....	30
3.7.2	Kriging .....	31
3.8	Topografie .....	33
3.8.1	Vliv topografie na výnos na zemědělském pozemku.....	33
3.8.2	Topografické atributy.....	34
3.8.2.1	Primární topografické atributy .....	34
3.8.2.2	Sekundární topografické atributy .....	38



4	METODIKA .....	40
4.1	Data .....	40
4.1.1	Výškopisná data DMR 4G .....	40
4.1.2	Výškopisná data ze sklízecí mlátičky .....	40
4.1.3	Výnosová data .....	41
4.1.4	Hranice zájmového území .....	41
4.2	Zpracování dat .....	41
4.2.1	Import dat do mapového dokumentu .....	41
4.2.2	Interpolace povrchu a modelu výnosu .....	42
4.2.3	Odvození topografických atributů .....	43
4.3	Statistické zpracování .....	44
5	CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍHO ÚZEMÍ .....	45
5.1	Lokalizace .....	45
5.2	Přírodní poměry .....	45
5.3	Půdní poměry .....	46
6	VÝSLEDKY PRÁCE .....	48
7	DISKUZE .....	52
8	ZÁVĚR .....	57
9	ZDROJE .....	59
9.1	Literatura .....	59
9.2	Internetové zdroje .....	63
9.3	Zdroje obrázků .....	65
9.4	Software .....	66
10	PŘÍLOHY .....	67

# 1 ÚVOD

Organizace spojených národů (OSN) odhaduje, že do roku 2030 naroste světová populace o 1 miliardu lidí (na 8,5 mld.), do roku 2050 je očekáván další nárůst, kdy by lidská populace měla dosáhnout 9,7 miliard (United Nations, 2015). Rychlý růst obyvatelstva na světě má za následek zvyšující se nároky na přírodní a hospodářské zdroje (Murdych, 1985) a zvýšený tlak na produkci potravin. Předpokládá se, že do roku 2050 bude potřeba zvýšit produkci potravin o 60 %, jinak bude hrozit globální hlad (United Nations, 2015). Intenzivně se hledají prostředky a nástroje jak tyto nároky uspokojit.

Pro horizontální rozšiřování ploch orné půdy přestává být prostor. Řešení globální poptávky po produkci potravin tedy spočívá ve zvyšování efektivity zemědělství (vyšší výnosy na stejné ploše). Jednou z možností efektivnějšího způsobu zemědělství je využívání moderních technologií a postupů jako tomu je v precizním zemědělství (Čuba a kol., 1999). Precizní zemědělství není nástroj pouze pro zefektivnění zemědělství, ale zároveň je to způsob, jak snižovat negativní dopady zemědělské činnosti na životní prostředí. Základní myšlenkou systému precizního zemědělství je, že obhospodařovaný pozemek není homogenní prostředí, ale je v různých svých částech ovlivňován různými faktory (Kumhálová, 2014). Při tradičních způsobech hospodaření si toto lidé uvědomovali a podle toho k poli přistupovali. Znalost variability pole a následný individuální přístup k různým částem pole vycházel ze vztahu lidí k půdě. Vztah k půdě byl v lidech v minulosti silně zakořeněn. Předpokladem, který v minulosti umožňoval individuální přístup k poli, byly malé rozlohy pole (Lukas a kol., 2011). Tento přístup se stává nemožným, při současné průměrné velikosti zemědělského subjektu 152 ha<sup>1</sup> (Mácová, 2014).

Tradiční způsob obhospodařování pozemku lze simulovat zavedením systému precizního zemědělství, který využívá moderní technologie pro získání informací o zemědělském pozemku. Díky technologiím, kterými jsou geografické informační systémy, globální polohový systém, dálkový průzkum Země nebo moderní výpočetní technika, je možné získat velmi detailní informace o pozemku. Díky těmto technologiím mohlo precizní zemědělství vzniknout (Rybka, Šťastný, 1998).

---

<sup>1</sup> Údaj pochází z dat z roku 2010.

Jak již bylo řečeno, základním vstupem do systému precizního zemědělství jsou informace o daném pozemku neboli data získaná průzkumem pozemku. Jsou to například data o výnosu, data z rozborů půd nebo výskytu zaplevelení, ale i data o nadmořské výšce. Z výškových dat lze odvodit topografické atributy (například sklon, aspekt, akumulaci povrchového odtoku). Vliv topografie na výnos byl mnoha autory intenzivně studován. Aby bylo možné topografické atributy pole odvodit co nejpřesněji, je zapotřebí znát přesná výšková data. Vstupní data o nadmořské výšce a poloze pochází z různých zdrojů. Cílem této práce je najít vhodné zdroje za účelem odvození topografických atributů pro účely precizního zemědělství.

## 2 CÍLE PRÁCE

Jedním z cílů stanovených v předkládané diplomové práci je zpracování literární rešerše k problematice výběru vhodných zdrojů výškových dat, dále bude uveden přehled k výběru topografických atributů používaných v zemědělství k hodnocení pozemků.

Dalším dílčím cílem je z výškových dat odvodit topografické atributy za účelem popisu variability pozemku a porovnat výsledné modely topografických atributů s výnosem a určit jejich podíl významnosti na tvorbě výnosových prvků. Bude následovat zhodnocení využití topografických dat v zemědělství v závislosti na použitých zdrojích.

Cílů bude dosaženo analýzou dat v prostředí geografického informačního systému (ArcGIS 10.2), statistické zpracování dat počítá s využitím volně dostupného statistického softwaru RStudio.

### 3 LITERÁRNÍ REŠERŠE

V teoretické části diplomové práce je popis, jak v zemědělství může pomoci dobrá znalost topografie pro účely precizního zemědělství. S tím souvisí dostupnost výškových dat v rámci České republiky, čtenář zde najde popis zdrojů výškových dat na českém trhu. Pozornost je také věnována popisu jednotlivých topografických atributů, protože dobrá znalost topografie je jedním z nejdůležitějších aspektů precizního zemědělství.

#### 3.1 Precizní zemědělství

V rámci jednoho pole je výnos pěstovaných plodin v jednotlivých místech různý. Tyto výkyvy se s využitím moderních technologií dají vypořádat, měřit a analyzovat. Na základě těchto informací se dá k jednotlivým místům na poli přistupovat individuálně a veškeré agrotechnické zákroky na obhospodařovaném pozemku cílit podle konkrétních podmínek v daném místě. Takový přístup k zemědělskému pozemku je označován pojmem **precizní zemědělství** (PZ, *Precision Agriculture*, *Precision Farming*, *Site-Specific Agriculture*) (Rybka, Šťastný, 1998). Cílem takového obhospodařování pole je dosažení co nejvyšších výnosů s co nejnižšími vstupními náklady (Srbinovska a kol., 2015).

Počátky precizního zemědělství lze najít v 80. a 90. letech 20. století v USA, kde byly obhospodařovány rozsáhlé zemědělské celky, které jsou pro PZ vhodné (rok 1985 – první komerční postřikovač s variabilní aplikací v USA, 1992 – zavedení určování polohy zemědělských strojů pomocí GPS). České zemědělství se rovněž vyznačuje nadprůměrnými velikostmi zemědělských jednotek (více než je průměr EU), což je předpokladem pro zavedení systému precizního zemědělství do praxe (Rybka, Šťastný, 1998). Velké zemědělské celky jsou pozůstatkem minulého režimu, kdy docházelo ke scelování pozemků a intenzivní mechanizaci zemědělství (Lukas a kol., 2011). První rozsáhlý projekt v precizním zemědělství uskutečnil Langendoen v Holandsku v roce 2006 (Srbinovska a kol., 2015). PZ je v současnosti rozšířeno zejména ve vyspělých částech světa (Severní Amerika, Austrálie, Evropa).

PZ je tedy moderní technologie umožňující přizpůsobení zemědělských operací v závislosti na prostorové a časové variabilitě pole (Shirich, Bhalerao, 2013).

Umožňuje přesnější a cílenější dávkování hnojiv či pesticidů (v rámci jednoho pole je pak v různých částech pole aplikováno odlišné množství přípravků), dále usměrňuje technologii zpracování půdy, setí nebo zavlažování. Je to způsob hospodaření, který je ekonomičtější (šetří náklady na hnojiva nebo pesticidy), šetrnější k životnímu prostředí (menší zátěž na životní prostředí v podobě aplikace menšího množství průmyslových hnojiv a chemických postřiků) (Rybka, Šťastný, 1998).

Základní princip precizního zemědělství spočívá v myšlence, že pole není homogenní prostředí, různé části pole mají různé vlastnosti a tomu je uzpůsobeno obhospodařování (Kumhálová, 2014). Prvním krokem při zavádění systému precizního zemědělství musí být identifikace variability v rámci pozemku (např. zásoba živin, zaplevelení), na základě znalosti variability lze provádět zemědělské operace (variabilní aplikace hnojiv, herbicidů). Nejčastěji používaným identifikátorem variability podmínek v rámci jednoho pole jsou výnosové mapy, ze kterých lze zjistit rozdílnost výnosu v částech pole (Lukas a kol., 2011). Nejen prostorová variabilita pozemku, ale i časová variabilita je předmětem zkoumání systému precizního zemědělství. Podstatou precizního zemědělství je dělat zásahy na pozemku na správném místě, se správnou intenzitou a ve správný čas (Shirich, Bhalerao, 2013; Lukas a kol., 2011).

V současné době v České republice neexistuje žádná právní úprava této problematiky, vše je v režii soukromých osob, podnikatelů. Mapování pozemků pro účely precizního zemědělství v ČR začalo v roce 1997 (Lukas a kol., 2011). Od této doby se trh pro PZ silně rozvíjí.

obtížná	choroby	počasí	
	organická hmota	zrnitost půdy infiltrace vody	
náprava	zasolení	meliorace	
	škůdci	eroze půdy	
snadná	deficit N	plevelé	
	odrůda	reliéf terénu	
	nízká	variabilita výnosu	vysoká

**Obrázek 1.** Faktory ovlivňující variabilitu výnosu a možnosti jejich nápravy.  
Zdroj: Lukas a kol., 2011.

### 3.1.1 Technologie využívané v precizním zemědělství

Uvedení precizního zemědělství do praxe bylo umožněno díky rozvoji moderních technologií, zejména pak globálního pozičního systému (GPS, *Global positioning system*), diferenčního globálního pozičního systému (DGPS, *Differential global positioning system*) a geografických informačních systémů (GIS, *Geographic Information system*) (Srbinovska a kol., 2015). Dalšími technologiemi využívanými v PZ jsou dálkový průzkum Země (DPZ) a variabilní aplikační systémy (Shirich, Bhalerao, 2013).

Informace o vlastnostech pozemku musí být spojeny s informací o přesné poloze. Informace o poloze stroje na poli v každém okamžiku jeho pojezdu je určována systémem GPS (Rybka, Šťastný, 1998).

Dálkový průzkum Země leteckým nebo družicovým snímkováním je jedním z důležitých zdrojů informací o prostorové variabilitě v rámci pozemku. Z dat DPZ je možné získat řadu biofyzikálních parametrů. (Gisat, 2013). Při DPZ se využívá spektrálních vlastností půd (tedy její odrazivosti). Odrazivost půdy se snižuje např. při vyšší vlhkosti půdy, vyšším podílu jílových částic či obsahu organické hmoty, proto se vlhčí, těžší či humózní půda jeví tmavší (Lukas a kol., 2011). Technologie DPZ je podrobněji rozepsána v kapitole 3.2.

Způsobů sběru dat, popisující variabilitu pozemku, je mnoho, od přímého sběru půdních vzorků po nepřímé (senzorové) metody. Technologie, které měří výnos, se pomalu stávají standardní výbavou sklízecích mlátiček. Výnosové senzory zrna

využívají optického, mechanického, radiačního nebo kapacitního měření (záleží na výrobci). Zároveň musí být zaznamenávána vlhkost zrna pomocí vlhkoměrů, která slouží k přepočtu výnosu na konstantní vlhkost (standardně se výnos udává v tunách na hektar při vlhkosti zrna 15 %<sup>2</sup>) (Lukas a kol., 2011). Zařízení na měření množství zrna vstupujícího do zásobníku měří množství zrna jak z jednotlivých částí pole, tak i veškerý výnos z celého pole (Rybka, Šťastný, 1998).

### **3.1.2 Význam a přínos precizního zemědělství**

Precizní zemědělství se může stát nástrojem trvale udržitelného zemědělství, poskytuje řešení k uspokojení po zvýšené poptávce po produkci potravin v důsledku setrvalého růstu počtu obyvatel planety. Zároveň však přispívá k udržení (nebo dokonce zlepšení) kvality životního prostředí a ochraně přírodních zdrojů (Mandal, Ghosh, 2000). Systém precizního zemědělství je příslibem vyšších výnosů při nižších vstupních nákladech díky zefektivnění obdělávání zemědělského pozemku. Tento systém pomáhá minimalizovat dopady na životní prostředí (Shirich, Bhalerao, 2013).

#### **Ekonomické výhody**

Rybka, Šťastný (1998) uvádí příklad z Minnesoty, kde při sledování efektivity precizního způsobu hospodaření zjistili úsporu 11 až 72 USD.ha<sup>-1</sup>. Takových úspor je možné dosáhnout pouze, pokud je měrná dávka hnojiv správně stanovena a plocha, na kterou je hnojivo aplikováno stanovena co nejpřesněji.

#### **Ochrana životního prostředí**

Nadměrné hnojení polí způsobuje, že živiny, které byly aplikovány v podobě hnojiv a které nebyly využity pěstovanými plodinami, jsou při deštích splachovány do povrchových i podzemních vod (Rybka, Šťastný, 1998). Výsledkem je známá eutrofizace vodních nádrží nebo znečištění podpovrchových vod nitráty. Současné analytické metody jsou ale schopny určit přesné množství hnojiv, které je potřeba na dané pole aplikovat a tím pádem eliminovat množství nevyužitých živin (Shirich, Bhalerao, 2013).

Stejným způsobem lze určit množství chemických postřiků (např. herbicidů) a aplikovat ho pouze lokálně na nejrizikovější místa s ohledem na výskyt škůdců

---

<sup>2</sup> Jiné zdroje udávají vlhkost zrna 14 %.



nebo nemocí zjištěných např. DPZ. Tím pádem aplikace chemických postřiků není plošná a zátěž na životní prostředí je značně redukována. S tím se nese ruku v ruce ochrana zdraví lidí a ochrana mimoprodukčních druhů rostlin.

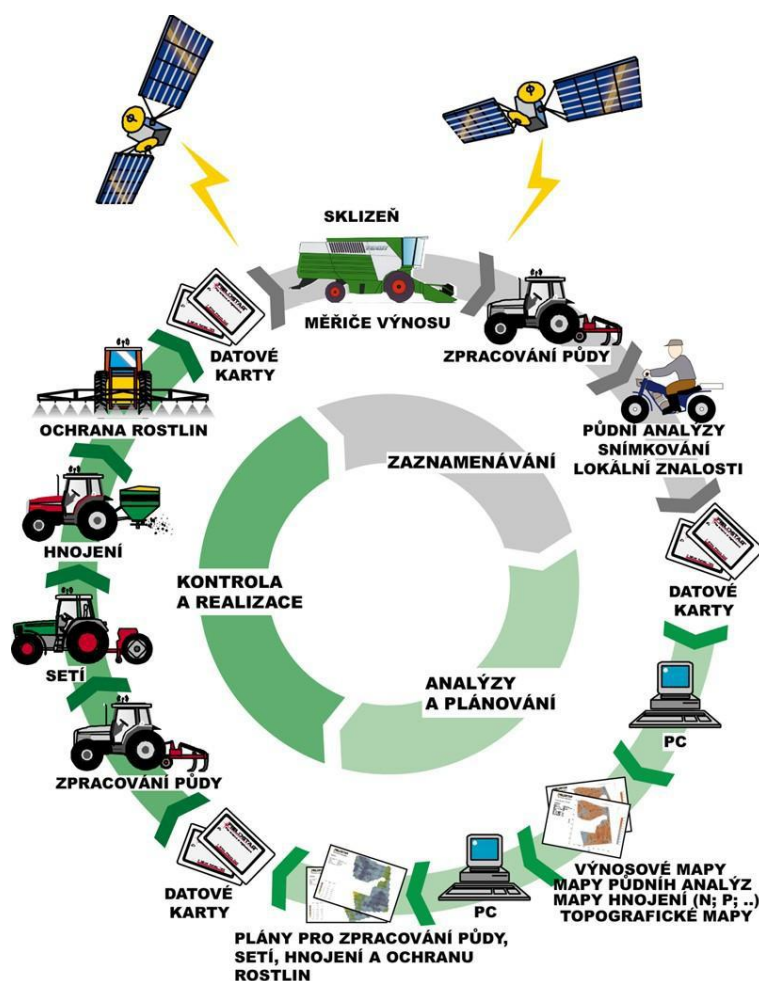
### **3.1.3 Problémy precizního zemědělství**

Znalosti získané v procesu precizního zemědělství nejsou pro řadu agronomů žádnou novinkou, zemědělci už mnoho let takový přístup k pozemku praktikují, aniž by tento termín používali. Někteří lidé z praxe vidí tuto technologii pouze jako další manažerský systém, nástroj k zásobování pěstitelů informacemi, které už dávno znají. V uplatňování této technologie by se nemělo zapomínat na zkušenosti zemědělců, kteří svá pole znají z jiné (také velmi užitečné) perspektivy (Rybka, Šťastný, 1998).

Dalším problémem při uvádění technologie do praxe mohou být pořizovací náklady potřebných technologií, které však nesmí přesáhnout ekonomický efekt metody. Avšak ty se neustále snižují, a proto je systém stále dostupnější. Problematická je i finanční a časová náročnost sběru dat, také zde existuje možnost chybné interpretace získaných dat.

### **3.1.4 Kruh precizního zemědělství**

Prvním krokem v procesu precizního zemědělství je sběr dat (snímání vlastností půdy a porostů) o daném pozemku: obsah živin v půdě, půdní reakce, obsah organické hmoty v půdě, výskyt plevelů, chorob, výnos pěstovaných plodin. Data podléhají zpracování, analýze a interpretaci – prostorově proměnlivá data se mapují, k čemuž se využívá GIS software. Na základě naměřených dat se vytvoří mapy (např. výnosová mapa, mapa zásob živin, topografická mapa, půdní mapa), které jsou obohaceny o zkušenosti farmáře (Rybka, Šťastný, 1998). Ten je schopen na základě všech informací vytvořit aplikační mapu (mapa výsevu, mapa hnojení, mapa ochranných prostředků). Výsledkem celého procesu je rozdělení daného pozemku do zón s relativně homogenním obhospodařováním (tzv. management zóny). Variabilní aplikace hnojiv probíhá podle aplikačních map s využitím navigačního systému GPS/DGPS. Aplikační mapa je importována do řídicího počítače, který řídí dávkování hnojiv podle polohy (Lukas a kol., 2011).



Obrázek 2. "Kruh" precizního zemědělství. Zdroj: Ryant, 2001.

### 3.2 Dálkový průzkum Země

DPZ je měření nebo získávání informací o vlastnostech objektů nebo jevů záznamovým zařízením, které není ve fyzickém kontaktu se studovaným objektem nebo jevem (Murdych, 1985). Jedná se o způsob sběru dat na dálku pomocí senzorů umístěných na letadlech nebo družicích (Wilson, Gallant, 2000a). Dálkovým průzkumem Země člověk získává kvalitativní a kvantitativní informace o těchto jevech a o jejich vlivu na okolí (Halounová, Pavelka, 2005). DPZ využívá techniky, jako jsou lasery, přijímače rádiových vln, sonary, seizmografy, gravimetry, magnetometry a radiometry (Murdych, 1985). DPZ je založen na přenosu informací pomocí elektromagnetického záření. Tato informace může být obsažena v jeho frekvenčním obsahu, intenzitě nebo polarizaci<sup>3</sup> elektromagnetické vlny. Elektromagnetické záření prostupuje prostorem rychlostí světla od zdroje přímo nebo

<sup>3</sup> Polarizace elektromagnetické vlny představuje orientaci směru vektoru k zemskému povrchu (Halounová, Pavelka, 2005).

nepřímo odrazem či rozptylem. Data z DPZ podléhají složitému procesu zpracování (Halounová, Pavelka, 2005).

DPZ může být zdrojem výškových dat, lze jím zmapovat velká území, ale má své limity. Žádný senzor nemůže spolehlivě změřit nadmořskou výšku povrchu pod vegetačním pokryvem. I když na daném místě žádný vegetační pokryv není, je nadmořská výška měřena s významnou náhodnou chybou, která závisí na vlastních limitech daného pozorovacího přístroje a také závisí na sklonu a drsnosti povrchu. Tato metoda vyžaduje přesně lokalizované kontrolní body za účelem minimalizace systematické chyby. Nejlepší možná standardní výšková chyba družicových systémů se pohybuje mezi 1 a 10 metry, ale mohou být mnohem větší (přes 100 metrů v nepříznivých podmínkách). Jednou z metod DPZ je fotografování zemského povrchu, kterým lze v případě absence vegetace získat data s přesností kolem jednoho metru (Wilson, Gallant, 2000a). Vyhodnocováním fotografií se zabývá fotogrammetrie, tedy matematické vyhodnocování snímků (Murdych, 1985).

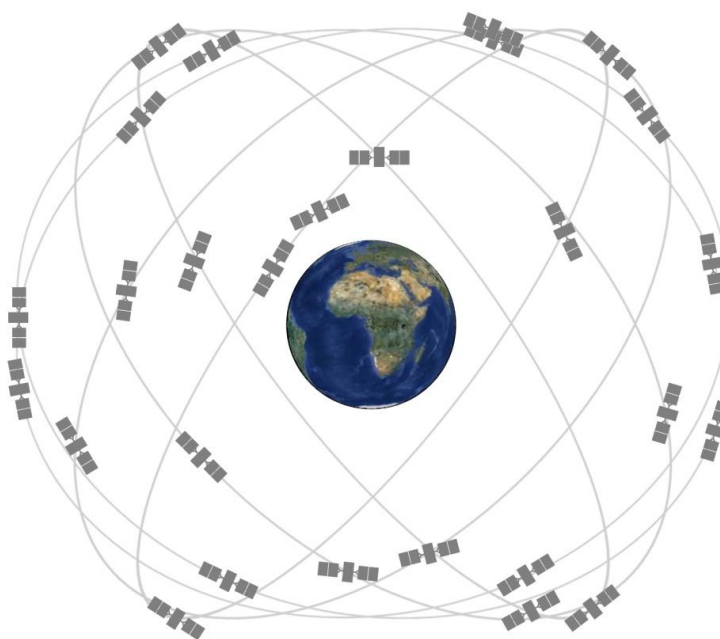
Existují dvě nejvýznamnější mezinárodní vědecká uskupení věnující se DPZ – EOS (*Earth Observing System*) a GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) (Pavelka, 2010). Program EOS vznikl v rámci uceleného programu na zkoumání celé Země ESE (*Earth Science Enterprise*) v americké NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). EOS je pozorovací systém určen k dlouhodobému sledování povrchu Země, biosféry, atmosféry a oceánů (Halounová, Pavelka, 2005). Program GMES představuje evropskou alternativu k americkému EOS a má zajistit efektivní sběr, předávání a využívání informací o stavu životního prostředí a bezpečnosti (Pavelka, 2010).

Poznatky získané z družic DPZ přispívají ke zlepšení předpovědi počasí, napomáhají zemědělství (včetně precizního), lesnímu hospodářství, mořskému rybolovu či při plánování rozvoje území. Využití nalézají také při výzkumu dopadů klimatické změny (Pavelka, 2010). DPZ má své nezastupitelné uplatnění v zemědělství. Může se jím sledovat například vývoj zasetých plodin v průběhu vegetačního cyklu, vývoj chorob plodin, výskyt plevele, odhad úrody, vliv zavlažování a hnojení, následky živelných pohrom, erozi půdy, záplavy (Murdych, 1985).

### 3.3 Globální poziční systém

GPS je jedním z globálních navigačních satelitních systémů (GNSS)<sup>4</sup>. Vývoj GPS byl zahájen v 70. letech 20. století ministerstvem obrany USA pro vojenské účely, později (90. léta) byl celý systém GPS zpřístupněn i civilnímu použití (Šára, 2011). Záhy se systém určování polohy celosvětově rozšířil a našel uplatnění v mnoha odvětvích. Dramatický pokles nákladů na pořízení GPS vybavení během 90. let, vedl k obrovskému nárůstu počtu uživatelů systému (Lechner, Baumann, 2000).

Systém GPS se skládá z družic, operačních a řídicích pozemních center a vhodných koncových přijímačů (uživatel). Vesmírné družice obíhají kolem Země po přesně definovaných oběžných drahách ve výšce 20,2 km nad zemským povrchem. Každý satelit obletí Zemi dvakrát za den. Rozmístění družic zaručuje, že v každý okamžik jsou nad každým místem na Zemi minimálně čtyři satelity. V roce 2011 byl systém rozšířen o tři satelity (na 27), tím došlo k dalšímu zlepšení pokrytí Země signálem (GPS, 2011).



Obrázek 3. Rozmístění satelitů kolem Země. Zdroj: GPS, USA.

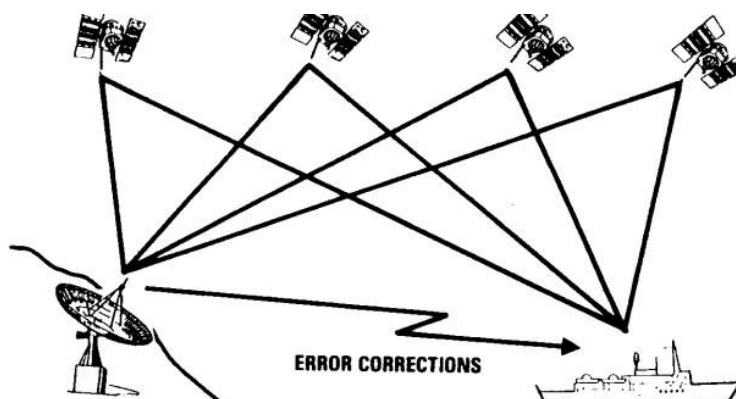
Každá družice je vybavena přijímačem, vysílačem a atomovými hodinami. Družice neustále vysílají radiový signál na celkem pěti vysílacích kanálech o různé

<sup>4</sup> Dalšími jsou například Galileo (EU), GLASOD (Rusko), Beidou (Čína).

frekvenci (L1 – L5), některé vysílají pro vojenské účely, jiné pro civilní uživatele a jiné pro leteckou navigaci (Šára, 2011).

Tyto signály z družic jsou schopné přijímat speciální uživatelské přijímače, které tak získávají informaci o své poloze a čase. K určení dvojrozměrné polohy (zeměpisná délka a šířka) je využíváno signálu ze tří družic, pro určení trojrozměrné polohy (tzn. včetně nadmořské výšky) je potřeba signálu ze čtyř družic. Uživatelské přijímače nijak nekomunikují s družicemi, ale pouze přijímají signál (Šára, 2011). Z tohoto důvodu mohou družice obsloužit neomezený počet uživatelů. Systém je bezplatný. Při uvolnění systému k civilnímu využití byla do systému americkou vládou záměrně vložena chyba. Tato chyba byla v roce 2000 vyjmuta a přesnost GPS se zvýšila na metry.

Pro zpřesnění určování polohy byl zaveden systém DGPS, který využívá síť pozemních referenčních stanic o známé poloze (Rybka, Šťastný, 1998). Síť českých referenčních (permanentních) stanic CZEPOS provozuje Zeměměřický úřad podle zákona č. 359/1992 Sb. (CZEPOS, 2016).



Obrázek 4. Princip DGPS. Zdroj: Dronepic.

### 3.3.1 Využití GPS

GPS systém má velmi širokou škálu uplatnění, využívá ho např. armáda, letecká a námořní doprava, rybolov, záchranný systém, geodézie, mapování a další čistě uživatelské využití (např. turistika, automobilová doprava). Široké uplatnění našel GPS i v zemědělství. Pomocí GPS systému lze získat detailní informaci o zemědělském pozemku. DGPS představuje způsob, jak v zemědělství získat velké množství cenově dostupných výškových dat (Wilson, Gallant, 2000a). Přesnost určování polohy DGPS systému je závislá na kvalitě přijímače a na poloze na Zemi, řádově se však pohybuje v jednotkách metrů (Lechner, Baumann, 2000). Navigace

poskytuje lokální data o pozemcích, systém umožňuje např. přesné navádění, ovládání a řízení zemědělské techniky po poli nebo pomáhá při lokalizaci zón různé aplikace chemických a průmyslových hnojiv. Dále poskytuje data o členitosti (topografii) pole, slouží při odběru půdních vzorků či mapování výnosů (Neményi a kol., 2003).

### 3.4 Letecké laserové skenování

Letecké laserové skenování povrchu (ALS, *Airborne laser scanning*) je typ aktivního (umělý zdroj vysílaného záření) DPZ (Wehr, Lohr, 1999). Vysílané záření se pohybuje v pásmu viditelného a infračerveného záření (Halounová, Pavelka, 2005) ve vlnových délkách od 800 nm do 1600 nm (1,6  $\mu\text{m}$ ) (Wehr, Lohr, 1999).

Nosičem laseru při leteckém laserovém skenování, jak již název napovídá, bývá letadlo popřípadě helikoptéra (Vosselman, Maan, 2010). Princip ALS (stejně jako všech laserových technik DPZ) spočívá v měření vzdálenosti mezi zdrojem laserového paprsku (skenerem na letadle) a jeho odrazem od země. Tuto vzdálenost lze vypočítat z doby letu paprsku, jelikož je známá rychlost letu paprsku, který letí rychlostí světla (Wehr, Lohr, 1999).

$$(1) \quad t_L = 2 \frac{R}{c}$$

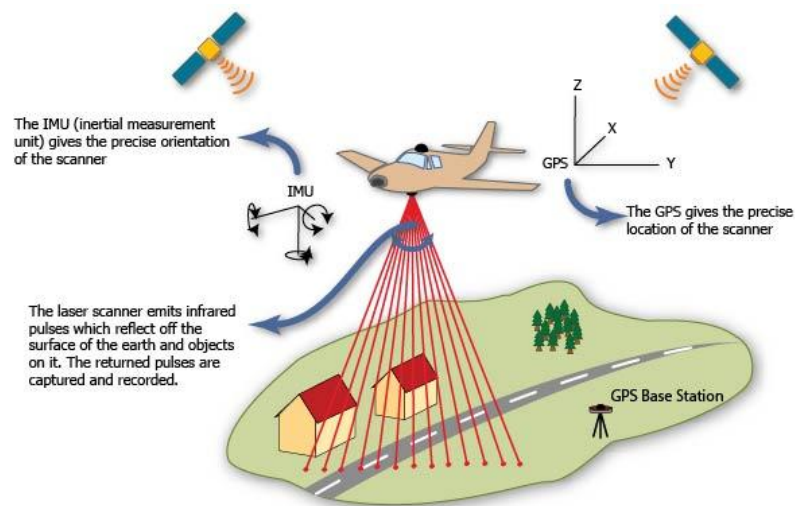
Kde:

$t_L$ ... čas letu laserového paprsku,

R... vzdálenost mezi skenerem a skenovaným objektem na povrchu (popřípadě terénem),

c... rychlost světla (Wehr, Lohr, 1999).

Metoda ALS je tedy založena na dvou hlavních komponentech: laserový skener, který měří vzdálenost k objektu na zemi pomocí vyzařovaného laserového paprsku a GPS a IMU (*Inertial Measurement Unit*, inerciální měřicí jednotka) zařízení, které měří přesnou polohu a orientaci měřicí letící jednotky. Výhodou metody ALS oproti jiným metodám je, že je nezávislá na slunečním záření, tudíž skenování může probíhat ve dne i v noci (Vosselman, Maas, 2010).



**Obrázek 5.** Schematické znázornění principu leteckého laserového skenování povrchu. Zdroj: GMV.

### 3.4.1 Skener

Skenovací zařízení na palubě letadla se skládá z mechanických a optických zařízení. Laserový paprsek je vyslán směrem k zemi, buď kontinuálně (po celou dobu letu) nebo přerušovaně (impulsy v určitém časovém intervalu) (Wehr, Lohr, 1999). Současné technologie umožňují pořizovat přibližně 50 bodů na  $m^2$  (záleží na letové výšce a rychlosti) (Vosselman, Maas, 2010). Vzdálenost je určena rozdílem času mezi vysláním paprsku a jeho zpětným přijetím po odrazu od terénu popřípadě od jiných objektů na zemském povrchu (Dibavod, 2014). Letecký skener má široký záběr, u některých typů je skenovací úhel až  $60^\circ$  (Halounová, Pavelka, 2005).

Laserový paprsek je během průchodu zemským povrchem postupně odrážen a jeho část může proniknout až na samotný terén. Přístroje jsou schopny vyhodnotit pořadí jednotlivých odrazů v rámci jednoho paprsku. V případě vícenásobného odrazu jsou z prvního odrazu získány informace o povrchu (koruny stromů, střechy domů) a z posledního o samotném terénu. Výstupem ALS je mračno bodů se známými 3D souřadnicemi ( $x, y, z$ , kde  $z$  je nadmořská výška). V tomto mračnu bodů se ovšem vyskytuje „šum“ způsobený například aktuálním stavem atmosféry nebo náhodnými odrazy (např. letící pták, jiná letadla v nižší letové výšce) (Dibavod, 2014).

### **3.4.2 GPS a inerciální měřicí jednotka**

GPS přijímač na palubě letadla je umístěn na svrchní části letadla, aby mohlo přijímat ničím nerušený signál ze satelitů. Inerciální měřicí jednotka (IMU) je umístěna buď přímo na laserovém skeneru nebo blízko něj (Vosselman, Maas, 2010).

Přesnost ALS je závislá na pohybu letadla, který ale není dokonalý. Let je zdrojem řady chyb a zkreslení. Chyby vznikají například snosem větru, nepřesným udržováním výškové hladiny. Působením větru dochází k narušení přímé letové dráhy a tím i k driftovému posunu přiřazení pozemních naměřených dat. Změna výšky způsobuje změnu velikosti obrazového elementu. Vyřešení těchto problémů vyžaduje instalaci inerciálního a navigačního zařízení (Halounová, Pavelka, 2005). Pro přesné určení polohy měřených bodů je nutné znát přesné souřadnice a orientaci snímače (skeneru) na palubě letadla. IMU slouží k zaznamenání orientace a rychlosti letadla (úhel podélného sklonu, úhel příčného sklonu a rychlost letu). Zařízení IMU se skládá z gyroskopů a akcelerometrů (Vosselman, Maas, 2010).

### **3.4.3 Zpracování ALS dat**

Výsledné mračno bodů musí být podrobena dalšímu zpracování, které spočívá v klasifikaci a filtraci dat. Základní klasifikací je rozlišení v mračnu bodů mezi body, které představují terén (laserový paprsek dosáhl zemského povrchu) a mezi těmi, které neleží na povrchu terénu (laserový paprsek zasáhl objekty na povrchu nebo ve vzduchu). Existuje celá řada různých filtračních algoritmů (Vosselman, Maas, 2010). Lze použít např. software SCOPP++. Výsledkem tohoto procesu jsou samostatné soubory dat rozříděné podle dopadu paprsku na různé prvky v prostoru a objekty zemského povrchu. Úspěšnost automatizovaných postupů správné klasifikace výškových bodů značně závisí na ročním období, ve kterém byla data pořizována, tj. na stupni rozvinutí vegetace (Brázdil a kol., 2012). ALS se dnes zabývá množství soukromých firem, které provádí letecké laserové skenování menších ploch pro různé účely.



### 3.5 GIS

Jak již bylo řečeno, systém precizního zemědělství by nemohl vzniknout bez GPS a GIS technologií. Podstatná část této práce byla zpracována v prostředí GIS, proto je zde zařazena kapitola, která je věnována podrobnějšímu popisu tohoto systému.

GIS je softwarové prostředí pro analýzu geograficky určených dat. Rozvoj GIS a jejich aplikací se ukazuje jako jeden z neefektivnějších a cenově nejméně nákladných nástrojů pro prostorové analýzy, aktualizaci a vizualizaci prostorových dat (Korte, 1994). GIS umožňuje vyvíjení přesných modelů prostorového rozprostření, analýzy lokálních trendů, zkoumání a předvídání časoprostorové dynamiky. Dokáže řešit úlohy, které kombinují dotazy na vlastnosti objektů spojené s jejich polohou a vztahem k dalším objektům (Martínek a kol., 2007).

GIS má všestranné využití, uplatňuje se například při analýzách v životním prostředí (mapování rostlin a živočichů, modelování šíření znečištění), při dopravních analýzách (jak se co nejrychleji dostat z bodu A do bodu B), v urbanistických studiích nebo například v záchranném systému. Významným uživatelem GIS systémů je i státní správa (správa daní, volební a školní okrsky, územní plánování, inženýrské sítě). Jednoduše řečeno, analýzy v prostředí GIS se dají využít všude, kde je informace zároveň geograficky určená (vztažená k určité poloze na Zemi) (Rapant, 2002).

GIS zpracovává digitální data v kombinaci s počítačovou grafikou do podoby map. Práce s daty v prostředí GIS probíhá v podobě mapových vrstev (Longley, Batty, 1996). Vývoj GIS softwaru započala společnost ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), která byla založena v roce 1969 v USA. Tato společnost je největším poskytovatelem topologicky určených dat, poskytuje instalační licence a technologickou podporu pro ArcGIS (Korte, 1994).

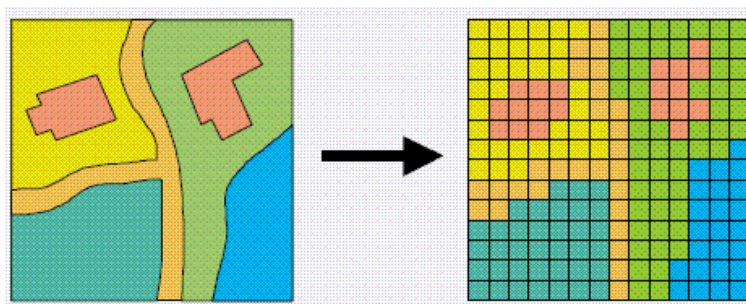
Data popisující geografickou realitu jsou uložena v podobě digitálních databází a GIS software poskytuje nástroje pro práci s těmito databázemi. Existují dvě základní struktury dat podle geometrického vyjádření. Rozlišuje se mezi vektorovým a rastrovým formátem.

### 3.5.1 Vektor

Vektorové zobrazení dat využívá pro popis reality lineární geometrické prvky (vektory). Vektory jsou orientované úsečky, které mají definovaný počáteční a koncový bod. Tím pádem mají určený směr a mají definováno vpravo a vlevo, což je základním předpokladem topologického určení dat. Základními geometrickými prvky vektorové struktury dat jsou body, linie a polygony reprezentující plochy (Rapant, 2002).

### 3.5.2 Rastr

Základní jednotkou rastrové reprezentace je buňka (*cell*), která má v drtivé většině případů tvar čtverce (ale může mít i tvar trojúhelníku či šestiúhelníku). Hrana tohoto čtverce představuje rozlišení rastru. Rozlišení (velikost buňky) je jednotné pro všechny buňky v rastru. Každá buňka je charakterizována číslem řádku a sloupce, ve kterém se nachází (Pike a kol., 2009). Buňky mají přiřazenou právě jednu hodnotu, která představuje určitou charakteristiku prostředí (např. teplotu, množství srážek, nadmořskou výšku). Rastry jsou běžně používány pro reprezentaci digitálních výškových modelů (DEM, *digital elevation model*) a řady dalších charakteristik prostředí (ESRI, 2013). I když má rastrová struktura dat mnoho nevýhod (pravoúhlé uspořádání bez ohledu na morfologii studovaného území, velké nároky na paměť pro uložení dat) patří mezi neoblíbenější a nejvyužívanější struktury pro uchovávání a analýzu prostorových dat.



**Obrázek 6.** Příklad vektorové (vlevo) a rastrové (vpravo) reprezentace stejného jevu.  
Zdroj: ESRI, 2013b.

## **3.6 Zdroje výškových dat pro ČR**

Největším poskytovatelem výškopisných dat na území České republiky je Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK). ČÚZK poskytuje několik datových sad o výškových poměrech terénního reliéfu (popřípadě povrchu) na rozdílné úrovni podrobnosti a přesnosti výškopisu.

### **3.6.1 ZABAGED**

Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED) je digitální geografický model území ČR. ZABAGED se skládá ze dvou částí – polohopisné a výškopisné. Polohopisná část obsahuje dvourozměrné (2D) prostorové informace. Výškopisná část obsahuje trojrozměrné (3D) prvky terénního reliéfu v podobě 3D souboru vrstevnic. Tvorba ZABAGED začala v roce 1995 vektorizací, dokončena byla v roce 2004. Průběžně probíhá aktualizace a zpřesnění polohy (ČÚZK, 2015b).

ZABAGED – výškopis 10x10 m: digitální model reliéfu v podobě pravidelné mříže (10x10 m) trojrozměrně vedených (3D) bodů, který je odvozený z vrstevnic a terénních hran ZABAGED. Přesnost výšky jednotlivých výškopisných bodů je 0,7-1,5 metrů v odkrytém terénu, 1-2 m v sídlech a 2-5 metrů v zalesněném terénu.

ZABAGED – výškopis 3D vrstevnice: vrstevnice jsou v intervalu 5, 3 nebo 1 m v závislosti na charakteru terénu.

Data jsou zpoplatněna, ale prohlížení na webových aplikacích portálu ČÚZK je zdarma.

### **3.6.2 DMR 4G**

Digitální model reliéfu 4. generace (DMR 4G) je výstupem „Projektů tvorby nového výškopisu České republiky“, který vznikl jako společný projekt ČÚZK, Ministerstva obrany a Ministerstva zemědělství České republiky.

DMR 4G byl pořízen metodou leteckého laserového skenování, které bylo realizováno systémem LiteMapper 6800 firmy IGI GmbH s využitím leteckého laserového skeneru RIEGL LMS – Q680 s příslušenstvím pro autonomní určování polohy skeneru GPS a IMU. Skenování probíhalo v letové výšce 1200 až 1400 m nad střední rovinou terénu v jednotlivých blocích dle realizačního projektu

a v závislosti na vegetaci. Území (převážně o šířce 10 km) s podobnou členitostí a výškovými poměry se pro realizaci ALS spojují do bloků s maximální délkou 60 km (Brázdil a kol., 2012). Skenování pro DMR 4G probíhalo od roku 2009 do roku 2013 (ČÚZK, 2015a).

DMR 4G zobrazuje přirozený nebo lidskou činností ovlivněný zemský povrch v digitálním tvaru ve formě diskretních bodů v pravidelné síti (5x5 m) s úplnou střední chybou výšky 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu (ČÚZK, 2015a). DMR 4G je v podobě georeferencovaných souborů výškových bodů. Body jsou reprezentovány souřadnicemi  $x$ ,  $y$  v matematickém souřadnicovém referenčním systému JTSK (*S-JTSK Krovak East North*) a ve výškovém referenčním systému Bvp (Balt po vyrovnání) (Brázdil a kol., 2012). Cena jednoho mapového listu (5 km<sup>2</sup>) činí 500 Kč.

### 3.6.3 DMR 5G

Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) zobrazuje přirozený nebo lidskou činností pozměněný zemský povrch v digitální podobě ve formě diskretních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) o souřadnicích  $x$ ,  $y$ ,  $h$ , kde  $h$  představuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Bvp s úplnou střední chybou 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu (ČÚZK, 2015c). Skenování metodou ALS probíhalo od roku 2010 a k 11. 11. 2015 pokrývá oblast o rozloze 49 000 km<sup>2</sup> (Čechy). Dokončení DMR 5G se předpokládá ke konci roku 2016 (Brázdil a kol., 2015). Jeden mapový list (5 km<sup>2</sup>) je k dispozici za 620 Kč.

### 3.6.4 DMP 1G

Digitální model povrchu České republiky 1. generace (DMP 1G) reprezentuje území včetně staveb a rostlinného pokryvu ve formě nepravidelné sítě (TIN) výškových bodů. Úplná střední chyba výšky činí 0,4 m u přesně vymezených objektů (např. budov) a 0,7 m u nepřesně ohraničených objektů (např. lesy) (ČÚZK, 2015d). DMP 1G byl pořízen metodou leteckého laserového skenování, které proběhlo v letech 2010-2013. Skenování bylo uskutečňováno pomocí systému LiteMapper 6800 (Dušánek a kol., 2015). DMP 1G by měl být dostupný pro celou ČR ke konci roku 2016 a je zpoplatněn (jeden mapový list 700 Kč).

### 3.6.5 Výšková data ze sklízecí mlátičky

Zdrojem lokálních výškových dat (např. konkrétního zemědělského pozemku) mohou být data pořízena přijímačem DGPS signálu z družic umístěného na palubě sklízecí mlátičky. Data jsou měřena při pojezdu sklízecí mlátičky po poli společně s informací o výnosu. Jedná se o bazální součást systému precizního zemědělství (Rybka, Šťastný, 1998).

## 3.7 Interpolace

Většina vlastností prostředí může být měřena kdekoli na nekonečně mnoho místech, ale v praxi je to jen těžko proveditelné. Měření probíhají většinou pouze na omezeném počtu bodů. Hlavním důvodem je časová a finanční náročnost odběru vzorků či měření. I přesto je zásadní znát hodnoty i mimo přímo naměřené body. Tyto hodnoty musíme odhadnout z dat, které jsme schopni získat přímým měřením (Webster, Oliver, 2001). Aby bylo možné z jednotlivých bodových měření odvodit souvislý povrch, musí být provedena **interpolace**. Cílem interpolace je tedy z bodových měření získat souvislou reprezentaci daného jevu, například nadmořské výšky, tlaku vzduchu, kontaminantu v půdě, množství srážek atd. (Vosselman, Maas, 2010). Předpokladem interpolace bodových dat je, že daný jev je spojitý nebo prostorově závislý.

Pokud se nyní omezíme pouze na digitální reprezentaci nadmořské výšky (terénu), výstupem interpolace je digitální model terénu. DEM obsahuje informaci o poloze (souřadnice  $x$ ,  $y$ ) a informaci o nadmořské výšce ( $z$ ), taková reprezentace je nazývána 2,5 D reprezentace, kde  $z$  je funkcí  $x$ ,  $y$  (každé nadmořské výšce  $z$  je přiřazena poloha  $x$ ,  $y$ ).

$$(2) \quad z = f(x, y)$$

Interpolovaný povrch (reprezentace reality), bez odkazu na původní bodová data, je základem pro další operace. Existuje celá řada interpolačních metod a není vždy jednoznačné, kterou metodu je v jakém případě správné použít. Zvolenou interpolační metodou je ovlivněna celá další analýza, proto by jí měla být věnována náležitá pozornost. Interpolační metoda je volena podle typu vstupních dat a podle záměru další analýzy. Kontrolou interpolace je, pokud hodnoty ve výsledném modelu nejsou systematicky příliš vysoké nebo příliš nízké. Druhou objektivní

kontrolou přesnosti interpolace je stanovení tzv. střední polohové chyby (RMSE – *root mean square root error*, která je vyjádřena ve stejných jednotkách jako data) (Chilès, Delfiner, 1999).

Existuje mnoho hledisek, podle kterých lze interpolační metody dělit:

- deterministické *x* stochastické,
- globální *x* lokální,
- exaktní *x* aproximující,
- metody váženého průměru *x* metody základních funkcí.

Deterministické interpolace odhadují povrch přímo z naměřených hodnot (výsledný odhad bude vždy stejný), mezi tyto metody patří např. Thiessenovy polygony, metoda přirozeného souseda (*Natural neighbour*), IDW (*Inverse distance weighting*) nebo *Spline*. Stochastické metody využívají teorie pravděpodobnosti, tyto metody jsou založeny na statistickém modelu, který předpokládá prostorovou závislost vstupních dat (výsledný odhad je jednou z mnoha možností), řadí se sem například *Kriging*. Při použití lokálních interpolačních metod vstupuje do výpočtu pro dané místo pouze omezený počet sousedních bodů (např. IDW). Globální interpolační metody zahrnují do výpočtu odhadu daného bodu interpolovaného modelu všechny naměřené hodnoty. Model odhadovaný pomocí exaktních interpolačních metod bude obsahovat přesně naměřené hodnoty vstupních dat, u aproximujících metod je tomu naopak (výsledný model může obsahovat hodnoty pod i nad přesně naměřené hodnoty). Metody váženého průměru jsou založeny na váženém průměru hodnot známých bodů, naopak metody základních funkcí využívají lineární kombinaci základních matematických funkcí (Křikavová, 2009).

V následující části jsou přiblíženy dvě interpolační metody: *IDW* a *Kriging*. Mezi těmito metodami jsem se rozhodovala, která bude lépe vystihovat data, týkající se pokusného pozemku.

### 3.7.1 IDW

Metoda inverzních vzdáleností patří mezi nejpopulárnější a nejvyužívanější interpolační metody, zejména protože je součástí mnoha GIS softwarů. IDW předpokládá, že věci, které jsou si prostorově blíže, jsou si více podobné. Na základě

tohoto předpokladu pracuje přiřazování vah jednotlivým bodům, které jsou zahrnuty do výpočtu. IDW bere inverzní vzdálenosti bodů a upravuje je o exponent:

$$(3) \quad \frac{1}{D^r}$$

kde  $D$  je vzdálenost mezi známým a určovaným bodem,  $r$  je exponent, kterým je tato vzdálenost umocňována (obvykle volen 1, 2 nebo 3).

$$(4) \quad \lambda = \frac{\frac{1}{D_i^r}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{D_j^r}}$$

Z toho vyplývá, že pokud je navýšena hodnota exponentu  $r$ , větší váha je kladena bližším bodům. Různé hodnoty faktoru  $r$  vedou k velmi různým výsledkům interpolovaného modelu (Webster, Oliver, 2001). Čím je hodnota exponentu  $r$  nižší, tím podobnější váhy jsou jednotlivým bodům přiřazovány a výsledný model se blíží aritmetickému průměru (ESRI, 2013b). Nejčastěji volenou hodnotou exponentu  $r$  je 2. Touto metodou nelze obdržet hodnoty ve výsledném modelu, které by byly nižší nebo vyšší než hodnoty vstupních dat, jinými slovy IDW neextrapoluje.

### 3.7.2 Kriging

Kriging je geostatistická<sup>5</sup> interpolační metoda založená na statistických modelech, které zohledňují prostorovou autokorelaci (Webster, Oliver, 2001). Pod prostorovou autokorelací se rozumí prostorová závislost daného jevu, to znamená, zda přítomnost nějakého jevu v jedné prostorové jednotce zvyšuje či snižuje pravděpodobnost přítomnosti tohoto jevu v blízkých územních jednotkách (Spurná, 2008). Tato technika je schopna nejen predikovat (odhadovat<sup>6</sup>) povrch, ale také stanovovat míru nejistoty, velikost chyb a přesnost predikce (Chilès, Delfiner, 1999).

Metoda je pojmenována podle D. G. Krige, který byl důlním inženýrem ve zlatonosných dolech v Jižní Africe. Krige vynalezl metodu, která přispěla ke zlepšení přesnosti odhadování koncentrace zlata a dalších kovů v rudě

<sup>5</sup> Geostatistika je soubor metod pro analýzu a popis prostorových vztahů, závislostí a pro prostorový odhad, je to aplikace teorie prostorově závislé proměnné. Hlavními geostatistickými nástroji jsou variogram pro popis prostorové závislosti a kriging jako interpolační metoda (Webster, Oliver, 2001).

<sup>6</sup> Statisticy upřednostňují název předvídaní, predikce (*prediction*), v geostatistice je tento proces označován jako odhad, odhadování (*estimation*).

a v dobových rezervách. Dodnes je v tomto oboru a mnoha dalších odvětvích využívána. Tuto techniku zdokonalil G. Matheron a jeho kolegové na Pařížské univerzitě hornictví. Pojem *kriging* zavedl právě Matheron a dnes je celosvětově používán (Minnit, Assibey-Bonsu, 2014). Pomocí krigingu se dnes řeší mnohem komplexnější problémy v hornictví, ropném průmyslu, při kontrole znečištění životního prostředí a při jeho zmírnění nebo při zkoumání dopadů na veřejné zdraví (Webster, Oliver, 2001).

Kriging je v jistém ohledu podobný s IDW. Obě metody jsou lokální interpolační metody a obě metody přiřazují váhu okolním bodům na základě jejich vzdálenosti od odhadovaného bodu (nejbližší měření získávají největší váhu při výpočtu váženého průměru). Avšak váhy jednotlivým měřením (bodům) nejsou u krigingu pouhým váženým průměrem (jako u IDW), ale berou v potaz i prostorové uspořádání měřených bodů okolo místa určované hodnoty. Na základě prostorových vztahů jsou jednotlivým bodům přiřazovány váhy, které jsou určovány výpočtem prostorové autokorelace (Kačmařík, 2016). Prostorová autokorelace je vyjádřena semivariogramem. Poté co je semivariogram odvozen, následuje prostorová predikce (tzn. určení vah a výpočet prostorového modelu na základě těchto vah). Webster, Oliver (2001) udává, že obecně lze říci, že čtyři až pět nejbližších bodů mohou nést až 80 % celkové váhy. Obecně také platí, že shluk bodů nese menší váhu, než izolované jednotlivé body ve stejné vzdálenosti. Snahou krigingu je určit vliv okolních bodů na interpolovanou hodnotu, který se mění se vzdáleností od určovaného bodu a v jaké vzdálenosti je tento vliv již zanedbatelný (Kačmařík, 2016), tzn. určit vzdálenost, ve které vliv autokorelace přestává působit.

Existuje několik metod odhadů povrchu krigingem: základní (*ordinary kriging*), jednoduchý (*simple kriging*), vzájemný (*Cokriging*), univerzální (*Universal kriging*), vylučovací (*Disjunctive kriging*), bodový a blokový kriging (*Point/Punctual kriging*, *Bloc kriging*) (ESRI, 2013b).

Při zpracování dat v této diplomové práci byl použit základní kriging, který matematicky vypracoval Kolmogorov ve 30. letech 20. století. Jedná se o v praxi nejvyužívanější typ krigingu (Webster, Oliver, 2001).

**Použití základního krigingu pro mapování.** Nejstarší příklady použití této metody pro interpolaci povrchu pochází z 80. let 20. století (Webster, Oliver, 2001).



Webster, Oliver (2001) také zmiňují příklady použití základního krigingu pro účely precizního zemědělství: Mulla (1997), Frogbrook (1999), Frogbrook a kol. (1999). Kriging pro interpolaci výškových dat použili i Schmidt, Persson (2003).

## **3.8 Topografie**

Pořízení a vznik DEM je popsán výše, v této kapitole je přiblížena problematika topografie a její vliv na výnos. Dále jsou zde popsány nejdůležitější topografické atributy, které lze odvodit z DEM a které mají největší význam z hlediska hodnocení zemědělského pozemku.

### **3.8.1 Vliv topografie na výnos na zemědělském pozemku**

Existuje mnoho faktorů, kterými je pole (a následně výnos) ovlivněno. Je to například vlhkost, změny pH nebo odrůdové vlastnosti pěstovaných plodin (Rybka, Šťastný, 1998). Znalost faktorů, které ovlivňují výnos na poli, je zcela zásadní při obdělávání zemědělského pozemku. Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících variabilitu výnosu v rámci jednoho pole je také topografie (Kravchenko, Bullock, 2000; Marques da Silva, Silva, 2008). Topografie ovlivňuje výnos v mnoha ohledech: ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti půdy erozními a naplavovacími procesy, obsahem organické hmoty a dostupností vody (Kumhálová, 2010). Dostupnost vody je jedním z nejvíce limitujících faktorů pro pěstování zemědělských plodin. Distribuce vody na poli je ovlivněna řadou faktorů. Patří mezi ně velikost půdních částic, obsah organické hmoty, z části je ovlivněna i propustností půdy (horizontální i vertikální) a z části právě topografií – sklonem povrchu a tím pádem povrchovým odtokem. Vyrovnanějších výnosů je dosaženo, pokud je voda po poli distribuována rovnoměrně (Schmidt, Persson, 2003).

Detailní znalost topografie pozemku může sloužit k odhadu výnosu, k tvorbě zón pro aplikaci hnojiv a chemických ochranných prostředků, k identifikaci míst náchylných k erozi půdy a následně k uskutečnění opatření pro jejich zmírnění (Kumhálová, 2010). Topografické vlastnosti zemědělského pozemku jsou také zohledněny v bonitované půdně ekologické jednotce (BPEJ). Konkrétně sklon a expozice pozemku vůči světovým stranám jsou zahrnuty ve čtvrtém čísle tohoto pětimístního kódu (BPEJ, 2015).

## **3.8.2 Topografické atributy**

K hodnocení vlivu topografie na výnos na zemědělském pozemku se běžně používají topografické atributy, které lze odvodit z digitálního výškového modelu území. Mezi nejvýznamnější topografické atributy ovlivňující výnos jsou řazeny nadmořská výška, sklon, aspekt (orientace ke světovým stranám), zakřivení povrchu, směr povrchového odtoku, délka a akumulace povrchového odtoku, index zamokření.

Lze je rozdělit na primární a sekundární (Wilson, Gallant, 2000a). Primární jsou odvozeny přímo z DEM, sekundární vznikají kombinací dvou nebo více primárních atributů.

### **3.8.2.1 Primární topografické atributy**

Mezi primární topografické atributy se řadí nadmořská výška, sklon, aspekt, zakřivení povrchu, délka odtoku (Gallant, Wilson, 2000).

#### **3.8.2.1.1 DEM**

DEM představuje matematickou reprezentaci zemského povrchu v digitální podobě a je základním vstupem do analýz v prostředí GIS (Vosselman, Maas, 2010). Typickým formátem pro uchování DEM je rastr. Nadmořská výška v rámci jedné buňky je vztažena ke středovému bodu této buňky (Wilson, Gallant, 2000a). Tvar povrchu je reprezentován změnou nadmořské výšky sousedících buněk. Digitální výškové modely s pravidelnou čtvercovou mřížkou jsou nejvíce využívanou strukturou dat, protože jsou nejjednodušším vstupem do dalších analýz (Vosselman, Maas, 2010).

#### **3.8.2.1.2 Sklon**

Sklon (*Slope*) měří poměr změny nadmořské výšky ve směru nejpříkřejšího poklesu. Svažitost reliéfu umožňuje působení gravitace na vodu a odnos materiálu. Tento nástroj má velký význam pro hydrologické a geomorfologické analýzy terénu. Ovlivňuje rychlost povrchového i podpovrchového odtoku, tím pádem lze určit objem půdní vody, náchylnost k vodní erozi a další důležité procesy.

Výpočet sklonu závisí na výšce ve čtyřech hlavních směrech. ArcGIS používá formuli, která závisí na nadmořské výšce ve všech osmi směrech sousedních buněk.

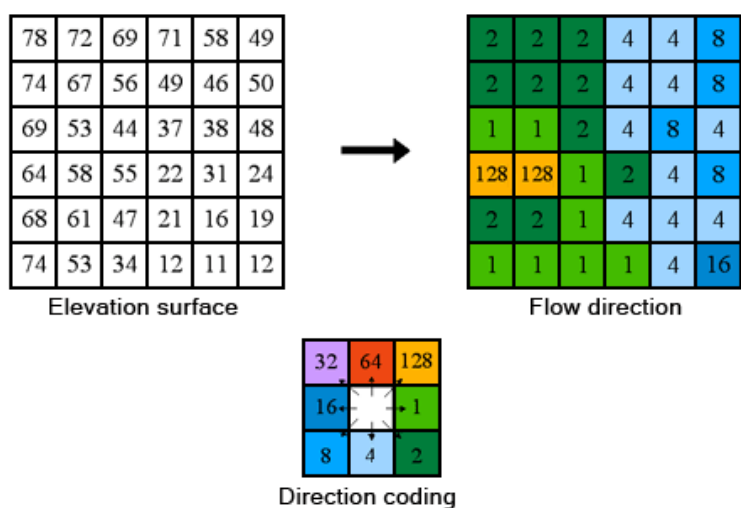
Sklon může být také vypočítán použitím největšího sestupného sklonu (největší klesání) do jedné z osmi nejbližších sousedních buněk (Gallant, Wilson, 2000).

### 3.8.2.1.3 Aspekt

Orientace povrchu ke světovým stranám se obvykle vyjadřuje ve stupních (0-360°) ve směru hodinových ručiček, s tím že počátkem je sever (sever odpovídá 0°). Aspekt je často využíván v ekologických průzkumech. Společně se sklonem může být použit k odhadu slunečního záření. Dále může být využit při vizualizaci terénu, zejména pokud je dobře zvolena barevná škála (ESRI, 2013). Analýza orientace svahů ke světovým stranám ztrácí smysl v území s velmi malým sklonem (Gallant, Wilson, 2000).

### 3.8.2.1.4 Směr povrchového odtoku

Povrchový odtok úzce souvisí se sklonem a orientací povrchu. Hlavní směr odtoku odpovídá směru s nejpříkřejším sklonem. Primární směr odtoku (*Primary flow direction – FLOWD*) vyjadřuje přibližně stejnou informaci jako aspekt. Aspekt je v podstatě primární směr odtoku pro vodu, která se pohybuje po povrchu a identifikuje směr k sousední buňce s největším sklonem (Gallant, Wilson, 2000). V ArcGIS je směr odtoku (*Spatial Analyst Tools → Hydrology → Flow Direction*) vypočítán na základě D8 algoritmu (obrázek 7).



The coding of the direction of flow

**Obrázek 7.** Princip vzniku směrů povrchového odtoku v ArcGIS na základě D8 algoritmu.  
Zdroj: ESRI, 2013b.

Pokud neexistuje žádná sousední buňka s nižší nadmořskou výškou, než kterou má buňka pro kterou probíhá výpočet, potom je daná buňka bezodtokovým místem (pokles v nadmořské výšce). To znamená, že nemá definovaný sklon ani aspekt

a tudíž ani směr povrchového odtoku. Někdy je potřeba pro další analýzu tyto poklesy z dat odstranit, protože by způsobovaly problémy při dalších výpočtech. Existují nástroje, které umožňují se jejich jednoduché odstranění (v ArcGIS je to nástroj ze sady *Spatial Analyst Tools* → *Hydrology* → *Fill*).

#### **3.8.2.1.5 Křivost**

Zakřivení povrchu (*Curvature*) je myšleno jako zakřivení linie, která by byla formována průnikem roviny a reliéfu. Rozlišuje se mezi dvěma druhy křivosti terénu: vrstevnicové ( $K_c$ , *contour curvature*) a profilové ( $K_p$ , *profile curvature*) (Gallant, Wilson, 2000).

$K_p$  je myšleno ve vertikální rovině odtokové křivky (ve směru nejvyššího sklonu). Poměr změny sklonu a odtokové čáry měří poměr změny potenciálního gradientu, který je důležitý pro určení změn v odtokové rychlosti a při procesu transportu a sedimentace. Hodnoty  $K_p$  jsou negativní pro sklon, který se zvyšuje směrem z kopce (konvexní odtokový profil, typický na vyšších sklonech) a je pozitivní pro sklon, který se snižuje směrem z kopce (konkávní, typický pro nižší sklony).  $K_c$  představuje zakřivení v horizontální rovině vrstevnic, znázorňuje poměr změny aspektu podél vrstevnic (kolmo na směr nejvyššího sklonu). Pomocí  $K_c$  lze měřit náchylnost vody ke sbíhavosti (konvergenci) či rozbíhavosti (divergenci) při odtoku po povrchu.  $K_c$  je negativní pro odtok rozbíhavý (na hřebenech) a je pozitivní pro sbíhavý (v údolích).

Zakřivení je udáváno v radiánech na metr (tzn. změna v orientaci vycházející z posunutí o jeden metr podél příslušné linie). Pozitivní hodnoty výsledného rastru indukují, že v dané buňce je povrch vzestupně konvexní, negativní odpovídá konkávnímu povrchu nebo depresním sníženinám, zakřivení rovno nule představuje rovinu (ESRI, 2013b).

Modelování zakřivení povrchu nalézá své využití při modelování odtokových charakteristik či vykreslení geomorfologických jednotek.  $K_c$  může být využito při rozlišení mezi hřbety, údolími a úbočími, kdežto  $K_p$  může rozlišit mezi horními (konvexními) a nižšími (konkávními) sklony (Gallant, Wilson, 2000).

#### **3.8.2.1.6 Jednosměrný odtok – metoda D8**

Akumulace povrchového odtoku je počítána na základě rastru znázorňujícího směry povrchového odtoku. Je definována součtem všech buněk, které přispívají

svým přítokem do dané buňky (Gallant, Wilson, 2000). Absolutní hodnota akumulace odtoku závisí na celkovém počtu buněk v mapě. Tím pádem závisí na použitém rozlišení a na velikosti zájmového území (Kumhálová a kol., 2011). Akumulace povrchového odtoku tedy není vhodná pro porovnávání různých území o různé velikosti a rozlišení, ale je užitečná při vyhodnocování vztahů mezi výnosem a topografií (Kravchenko, Bullock, 2000).

Tento algoritmus dovoluje odtoku z určité buňky odtéci pouze do jedné z osmi sousedních buněk a sice do té s největším sklonem ( $D8 = \text{deterministic eightmode}$ ). Znamená to, že odtok se může v dané buňce hromadit z buněk s vyšší nadmořskou výškou, ale odtéci může pouze do jediné buňky „pod“ danou buňkou. Touto metodou lze modelovat sbíhavost odtoku v údolích, ale nelze s ní modelovat rozbíhavost odtoku na hřebenech.

Dalším defektem této metody je, že má tendenci modelovat odtok do paralelních linií podél preferovaného směru (odpovídá aspektu). Například na povrchu s aspektem v rozmezí 0 až 22,5°, D8 algoritmus bude předvídat konstantní směr odtoku ( $FLOWD = 128$ , viz obrázek 7). Avšak i s těmito omezeními, je D8 algoritmus stále nejčastěji používaným algoritmem, zejména díky jeho jednoduchosti (Gallant, Wilson, 2000).

### **3.8.2.1.7 Náhodně rozdělený jednosměrný odtok**

Rho8 algoritmus (*random eight-node*) je stochastická verze D8 algoritmu, ve kterém je do výpočtu zanesen stupeň volnosti směru odtoku. Cílem algoritmu je rozbít paralelní odtokové linie (které jsou produkovány D8 algoritmem) a vytvořit průměrný směr odtoku úměrný k aspektu. Tento algoritmus není schopen modelovat rozbíhavost odtoku (divergenci), ale lze s ním simulovat odtokovou síť, která je díky této metodě reálnější. Dochází k narušení dlouhých paralelních odtokových linií, ale za cenu zavedení mnohem více buněk, které nemají žádnou spojitost s buňkami „nad“ sebou a dochází ke znáhodnění odtokových směrů. Důsledkem toho je, že ze stejných dat program vymodeluje pokaždé jinou odtokovou síť, což je nežádoucí jev a Rho8 algoritmus již nepatří k používaným algoritmům (Gallant, Wilson, 2000).

### **3.8.2.1.8 Vícesměrný odtok**

FD8 a FRho8 (*Multiple-Flow-Direction Methods*) algoritmy jsou modifikacemi D8 a Rho8. Tyto dvě metody dovolují vodě odtékat do více než jedné ze sousedních buněk, a tím umožňují modelovat divergenci odtoku.

FD8 a FRho8 algoritmy poskytují více realistické rozdělení povodí ve vyšších polohách, a zároveň eliminují paralelní odtokové linie. Jejich nevýhodou ale je, že mají tendenci vytvářet značné rozptýlení odtoku v údolích. Tento jev je nežádoucí, protože odtokové linie v údolích jsou obvykle velmi dobře definované. Další méně podstatnou nevýhodou těchto algoritmů je delší doba výpočtu (kvůli vyšší hustotě spojů odtokových linií) (Gallant, Wilson, 2000).

### **3.8.2.1.9 DEMON**

Konečný čtvrtý algoritmus poskytuje zcela jiný přístup při modelování akumulace a rozbíhavosti odtoku. Algoritmem DEMON (*digital elevation model network extraction*) je odtok generován každou buňkou a je nasměrován do buňky s největším sklonem. Tímto způsobem algoritmus postupuje celým DEM až k okraji nebo dokud nedosáhne bezodtokové oblasti (Gallant, Wilson, 2000).

### **3.8.2.2 Sekundární topografické atributy**

Sekundární topografické atributy mohou poskytovat informace o struktuře prostředí, která poukazuje na určitý vnitřní proces. Díky těmto atributům lze kvantifikovat rozprostření vody v krajině, množství slunečního záření dopadajícího na povrch a podobně. Jsou užitečné pro hydrologické, geomorfologické a ekologické hodnocení krajiny (Wilson, Gallant, 2000b). Jsou to např. indexy vlhkosti (TWI), proudové síly, transportu sedimentů, vzdálenost od linií akumulace odtoku, slunečního ozáření povrchu, teplotní indexy a další.

Indexy proudové síly a transportu sedimentů jsou časovými vyjádřeními vynaložené energie. Jsou široce využívané v analýzách zaměřených na erozi, transport sedimentů či geomorfologii, jako měřítko erodující síly odtékající vody. Index slunečního záření je používán pro odhad prostorového a časového rozprostření slunečního záření na zemském povrchu. Topografie může zásadně ovlivňovat množství dopadajícího slunečního záření na místo na zemském povrchu – variabilita nadmořské výšky, sklonu či aspektu mohou způsobovat podstatné rozdíly

v slunečním záření, čímž ovlivňují biofyzikální procesy, ohřívání půdy a vzduchu, evapotranspiraci nebo primární produkci (Wilson, Gallant, 2000b).

### 3.8.2.2.1 TWI

Index vlhkosti známý jako TWI (*Topographic Wetness Index*, někde se uvádí *Hillslope Wetness Index*) je zde podrobněji rozepsán, protože byl jako jediný zástupce sekundárních topografických atributů analyzován v této práci. TWI je široce využívaný topografický ukazatel, který slouží k určení vlivu topografie na lokalizaci saturovaných oblastí a množství vody v nich (Schmidt, Persson, 2003).

Výpočet TWI pracuje s rastry reprezentující sklon a akumulaci povrchového odtoku. Výsledné hodnoty TWI jsou tedy silně závislé na použitém algoritmu pro výpočet akumulace povrchového odtoku (Schmidt, Persson, 2003). Pro lepší vizualizaci relativní vlhkosti musí být přizpůsobena klasifikace rastru (Cooley, 2015). Nízko položené nebo rovinaté oblasti budou snáze hromadit vodu, kdežto z příkrých, oblastí bude voda rychle odtékat (Wilson, Gallant, 2000b).

$$(5) \quad TWI = \ln \left( \frac{As}{\tan B} \right)$$

Kde:

TWI..... index vlhkosti (bezrozměrný),

As..... plocha buněk přispívajících přítokem do dané buňky (rastr akumulace povrchového odtoku),

B.....sklon ve stupních (rastr sklonu) (Cooley, 2015).

## 4 METODIKA

V praktické části diplomové práce byly odvozeny topografické atributy ze dvou zdrojů výškopisných dat – z DMR 4G a ze sklízecí mlátičky. Byly vybrány ty, které vhodně popisují pozemek. Následně byly atributy porovnány s výnosem pšenice ozimé z roku 2014.

### 4.1 Data

Tato diplomová práce zpracovává již existující data, která byla poskytnuta vedoucí předložené diplomové práce Mgr. Jitkou Kumhálovou, Ph.D a ČÚZK. Data popisují zemědělský pozemek u obce Vendolí ve východních Čechách.

#### 4.1.1 Výškopisná data DMR 4G

Prvním datovým souborem jsou výšková data z leteckého laserového skenování povrchu České republiky DMR 4G poskytnuta ČÚZK (dále ALS data). Letecké laserové skenování bylo realizováno systémem LiteMapper 6800 firmy IGI GmbH s využitím leteckého laserového skeneru RIEGL LMS – Q680 s příslušenstvím pro autonomní určování polohy skeneru GPS a IMU. Skenování povrchu probíhalo z průměrné letecké výšky 1200-1400 m nad střední rovinou terénu. DMR 4G je v souřadnicovém referenčním systému JTSK (S-JTSK/Krovak East North) a ve výškovém referenčním systému Bpv. Data DMR 4G byla interpolována do pravidelné čtvercové sítě 5x5 m. Střední chyba výšky modelu je 0,3 m v terénu bez souvislé vegetace a zástavby a 1 m v terénech pokrytých husou vegetací (Brázdil a kol., 2012). Na orné půdě bez vegetace je střední chyba výšky redukována na 0,13 m. Počet bodů pokrývající pole je 10 568 (jeden mapovací bod vychází přibližně na 25 m<sup>2</sup>). Data pro zájmové pole se nacházela na dvou mapových listech LITM29\_4g a POLI20\_4g (dva čtverce o rozměru 2x2,5 km).

#### 4.1.2 Výškopisná data ze sklízecí mlátičky

Druhým souborem dat vstupujících do analýzy jsou výšková data se sklízecí mlátičky (dále SM data), která byla měřena při pojezdu stroje po poli při sklizni. Typ použité sklízecí mlátičky je New Holland CR9080, jedná se o axiální sklízecí mlátičku se dvěma axiálními bubny. Ta byla vybavena přijímačem DGPS



s horizontální přesností  $\pm 0,1-0,3$  m a vertikální přesností  $\pm 0,2-0,6$  m. Pojezdová rychlost sklízecí mlátičky po poli závisí na hustotě porostu. Maximální dosažená rychlost činila  $9,9 \text{ km.h}^{-1}$  ( $2,8 \text{ m.s}^{-1}$ ), průměrná rychlost pojezdu byla  $4,6 \text{ km.h}^{-1}$  ( $1,28 \text{ m.s}^{-1}$ ). Záběr žacího válu je 8,9 m. Čas odečtu mapovacího systému je 1 sekunda. Z toho vyplývá, že plocha průměrného mapovacího bodu vychází na  $11,37 \text{ m}^2$ . Mapovacích bodů je celkem 23 782.

#### **4.1.3 Výnosová data**

Výnosová data byla zaznamenávána na palubní počítač sklízecí mlátičky New Holland CR9080. Počet mapovacích bodů pokrývajících pole je rovněž 23 782.

Při pojezdu sklízecí mlátičky byly zaznamenávány výkyvy výnosu a vlhkost zrna společně s přesnou polohou stroje. Sklízecí mlátička je vybavena vlhkoměrem, který měří vlhkost zrn každých 30 sekund. Výnos byl zaznamenáván nárazovým výnosovým čidlem New Holland každou sekundu. Výnosová data jsou vyjádřena v tunách na hektar ( $\text{t.ha}^{-1}$ ) a přepočítána na vlhkost zrna 14 %. Zároveň byly shromažďovány další informace o sklízecí mlátičce – pojezdová rychlost, přesná poloha stroje a další parametry. Výnosová data pochází z roku 2014, kdy pěstovanou plodinou byla pšenice ozimá.

#### **4.1.4 Hranice zájmového území**

K dispozici byla vektorová polygonová vrstva hranic pozemku ve standardním formátu ESRI (.shp).

### **4.2 Zpracování dat**

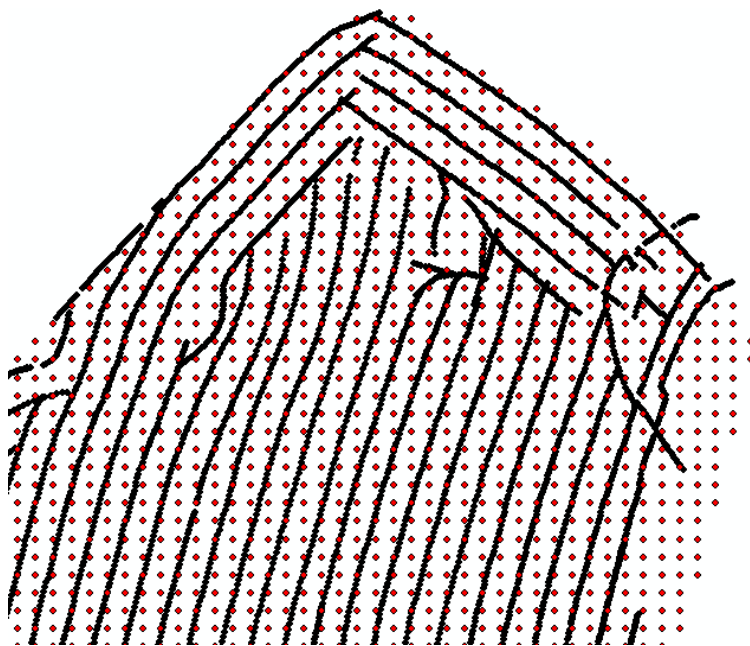
Data byla analyzována v geografickém informačním softwaru ArcGIS 10.2 společnosti ESRI (ArcMap – mapový dokument, ArcCatalog). Dílčí analýzy (příprava dat pro import do ArcGIS) byly provedeny v prostředí MS Excel 2007.

#### **4.2.1 Import dat do mapového dokumentu**

Původní ALS data byla v textovém formátu (.txt), obsahovala souřadnice a nadmořskou výšku daného bodu. Taková data jsou připravena k importu do formátu vstupujícího do mapového dokumentu. K tomu slouží nástroj

v ArcCatalog *Create Feature Class from XY table*, výstupem je vektorová bodová vrstva ve formátu *.shp*, která představuje základ pro další analýzu v mapovém dokumentu. Tato vrstva byla oříznuta podle hranic zájmového území (nástroj *Clip*). ALS data jsou v pravidelné čtvercové mřížce 5x5 m.

Data pocházející ze sklízecí mlátičky (výškopisná a výnosová data) jsou uložena v souboru MS Excel spolu s dalšími informacemi (souřadnice, rychlost pojezdu, ujetá vzdálenost a další). Data byla importována do mapového dokumentu (*ArcMap* → *File* → *Add Data* → *Add XY Data*) a dále byla exportována do formátu *.shp* (*Data* → *Export Data*). Tímto způsobem vznikly vektorové bodové vrstvy, které tvořily základní vstupy pro další analýzu. Data pocházející ze sklízecí mlátičky byla nepravidelně rozmístěna po pozemku. Na jejich rozmístění lze pozorovat linie pojezdu sklízecí mlátičky po poli (obrázek 8).



**Obrázek 8.** Náhled na původní strukturu dat - ALS data v pravidelné čtvercové mřížce 5x5 m (červená) a SM data kopírující pojezdové linie sklízecí mlátičky (černá). Obrázek má pouze ilustrační charakter, jedná se o výřez části studovaného pole. Zdroj: vlastní.

#### **4.2.2 Interpolace povrchu a modelu výnosu**

Z bodových pozorování výškových dat byl interpolován DEM geostatistickou metodou *kriging* (*Geostatistical Analyst* → *Geostatistical Wizard*). Pro účely vizualizace prostorových dat byla zvolena tato geostatistická metoda především z důvodu dostatečného množství dat vstupujících do analýzy a standardního průběhu variogramu. Dále byl zvolen základní kriging (*Ordinary kriging*), kdy střední

hodnota je neznámou konstantou. Webster, Oliver (2001) zmiňuje, že tato metoda byla použita v řadě studií týkající se precizního zemědělství: Mulla (1997), Frogbrook (1999), Frogbrook et al. (1999). Použití krigingu pro interpolaci výnosových dat dále zmiňují: Lukas a kol., 2011; Neményi a kol., 2003. Prvním krokem krigingu je výpočet semivariogramu a tedy stanovení prostorové autokorelace dat. Druhým krokem je výpočet vah na základě prostorových vztahů. Výsledná predikční mapa byla převedena na rastr (*GA Layer To Grid*), rozlišení bylo stanoveno na 1x1 m. *Ordinary kriging* byl použit rovněž pro odvození modelu výnosu.

### 4.2.3 Odvození topografických atributů

Ze dvou sad výškových vznikly dva DEM (ALS data a SM data). Z obou DEM byly odvozeny topografické atributy pomocí běžně dostupných nástrojů v ArcMap ze sady nástrojů *Spatial Analyst Tools (SA)*.

Model sklonu terénu byl vytvořen nástrojem *Slope (SA → Surface)*, přičemž DEM je jediným vstupem do této funkce. V nastavení funkce lze zvolit jednotky výsledného rastru sklonu (stupně nebo procenta). Rastr znázorňující orientaci pozemku ke světovým stranám byl vytvořen nástrojem *Aspect (SA → Surface)*. Orientace svahů je odvozena z DEM, žádná další nastavení funkce nejsou možná. Rastr zakřivení pozemku byl odvozen z DEM pomocí nástroje *Curvature (SA → Surface)*. V nastavení funkce lze volitelně vytvořit rastry profilového a vrstevnicového zakřivení (*profile, plan curvature*).

Aby bylo možné vypočítat model akumulace povrchového odtoku, bylo nejprve nutné vytvořit model směrů odtoků pomocí nástroje *Flow Direction (SA → Hydrology)*. Směry povrchového odtoku jsou počítány na základě rozdílů ve sklonu terénu, hlavní odtokový směr je dán nejpříkřejším sklonem. Akumulace povrchového odtoku (*SA → Hydrology → Flow Accumulation, FA*) byla následně vypočítána na základě rastru směrů odtoku. Nástroj *FA* v ArcGIS pracuje na základě D8 algoritmu (viz kapitola 3.8.2.1.6). Aby byl model akumulace povrchového odtoku porovnatelný s krigovaným modelem výnosu, musely být linie akumulace odtoku upraveny do srovnatelné formy (Kumhálová a kol., 2011). K tomu byla použita fokální statistika (*SA → Neighborhood → Focal Statistics*). Fokální statistika je nástroj, který umožňuje spočítat zvolenou statistiku (např. maximum, minimum,

průměr, sumu) ve volitelně definovatelném okolí dané buňky (např. kruh, čtverec, prsteneček). Všechny středy buněk, které jsou obsaženy v takto definovaném okolí, jsou zahrnuty do výpočtu. Podle Kumhálové a kol. (2011) byly pomocí fokální statistiky linie převedeny na polygony ve tvaru kruhu o poloměru 30 buněk (při rozlišení 1x1 m odpovídá 30 metrům).

Ze sekundárních topografických atributů byl vypočítán TWI index, který byl odvozen z rastru akumulace povrchového odtoku a sklonu podle vzorce 5 v kapitole 3.8.2.2.1. TWI index byl spočítán pomocí nástroje *Raster Calculator (SA → Map Algebra)* a následně reklasifikován na škálu od 1 do 10, přičemž 1 odpovídá plochám, kde se snáze hromadí voda a 10 odpovídá plochám s rychlým odtokem.

Výsledné rastry topografických atributů byly převedeny na bodové vektorové vrstvy nástrojem *Raster To Points* (ze sady nástrojů *Conversion Tools → From Raster*). Atributové tabulky těchto bodových vrstev nesou hodnoty jednotlivých topografických atributů. Hodnoty byly vyexportovány do textového formátu (MS Excel) a v této podobě vstupovaly do statistické analýzy.

### **4.3 Statistické zpracování**

Statistické zpracování dat bylo realizováno ve volně dostupném softwaru RStudio (RStudio, 2015). Normalita dat byla testována Kolmogorov-Smirnov testem, kdy nulová hypotéza  $H_0$  zněla: data mají normální rozdělení. Dva soubory výškových dat (ALS data a SM data) byly mezi sebou porovnány Mann-Whitney (U) testem, zda je mezi soubory statisticky významný rozdíl.

Vztah mezi topografickými atributy a výnosem byl testován korelační analýzou, což je soubor statistických metod, kterými lze testovat sílu vztahu mezi dvěma proměnnými.

## 5 CHARAKTERISTIKA STUDIJNÍHO ÚZEMÍ

### 5.1 Lokalizace

Studijní území se nachází u obce Vendolí v okrese Svitavy v Pardubickém kraji. Na obrázku 9 lze vidět hranice zájmového pole zobrazené na ortofotomapě České republiky spolu s polohou pole v rámci celé republiky. V příloze 1 je zájmové území zobrazeno na základní mapě ČR (ČÚZK).



Obrázek 9. Zájmové území v kontextu ČR. Zdroj podkladové mapy: ČÚZK.

### 5.2 Přírodní poměry

Pozemek, jehož výměra činí 26,4 ha, se rozkládá v nadmořské výšce od 543 m do 571 m nad mořem. Průměrný sklon pole je 3,4°, což odpovídá přibližně 6 %.

Tento sklon řadí pozemek do druhé kategorie sklonitosti podle charakteristiky BPEJ, tedy do kategorie s mírným sklonem (3-7°). Studované pole má všesměrnou expozici (BPEJ, 2015). Rozsah expozice pozemku je 0-359,85 ° (mapu orientace svahů pozemku vůči světovým stranám lze vidět v příloze 4). Reliéf je typu pahorkatiny až vrchoviny.

Pole se nachází v sedmé klimatické oblasti, tedy v mírně teplé a vlhké s průměrnou roční teplotou mezi 6 a 7 °C. Průměrný roční úhrn srážek se v této oblasti pohybuje v rozmezí 650-750 mm (BPEJ, 2015). Podle kategorizace zemědělských výrobních oblastí spadá pole do bramborářské oblasti (Němec, 2001).

### 5.3 Půdní poměry

Zájmové pole se skládá z několika parcel, které jsou vedeny jako orná půda. BPEJ<sup>7</sup> těchto parcel – 7.25.14 a 7.30.14 – patří do 3. třídy ochrany zemědělského půdního fondu (ZPF). Výnosnost půdy je na škále od 0 do 100 hodnocena 23 body. Hlavní půdní jednotkou je kambizem modální eu- až mesobazická, kambizem vyluhovaná eu- až mesobazická, kambizem pelická, oglejení se projevuje jen slabě.

Půda je hluboká až středně hluboká, mocnost ornice a mocnost humusového horizontu je středně hluboká, struktura ornice je drobtovitá a další horizonty jsou bezstrukturní. Půda na poli je převážně slabě až středně skeletovitá. Jedná se o půdu s dobrou vodní kapacitou, vláha je závislá na srážkách. Půda je silně náchylná k erozi (BPEJ, 2015). Z geologického hlediska se pozemek nachází v regionu Český masív, typ podložní horniny je vápnitý a jílový jemnozrný pískovec v oblasti Svrchní křídly.

Pozemek spadá pod Zemědělské družstvo Vendolí (ZD Vendolí), které na něm hospodářství konvenčním způsobem. ZD se zabývá především pěstováním obilovin, zejména potravinářské pšenice, sladovnického ječmene a ozimé řepky (ZSČR, 2016). Na pozemku není žádný ekologicky významný prvek. Celý pozemek spadá do zranitelné oblasti dusičnanů, do kategorie mírně a silně erozně ohrožené půdy spadá 3,39 ha z celkové výměry pozemku (LPIS, 2015).

---

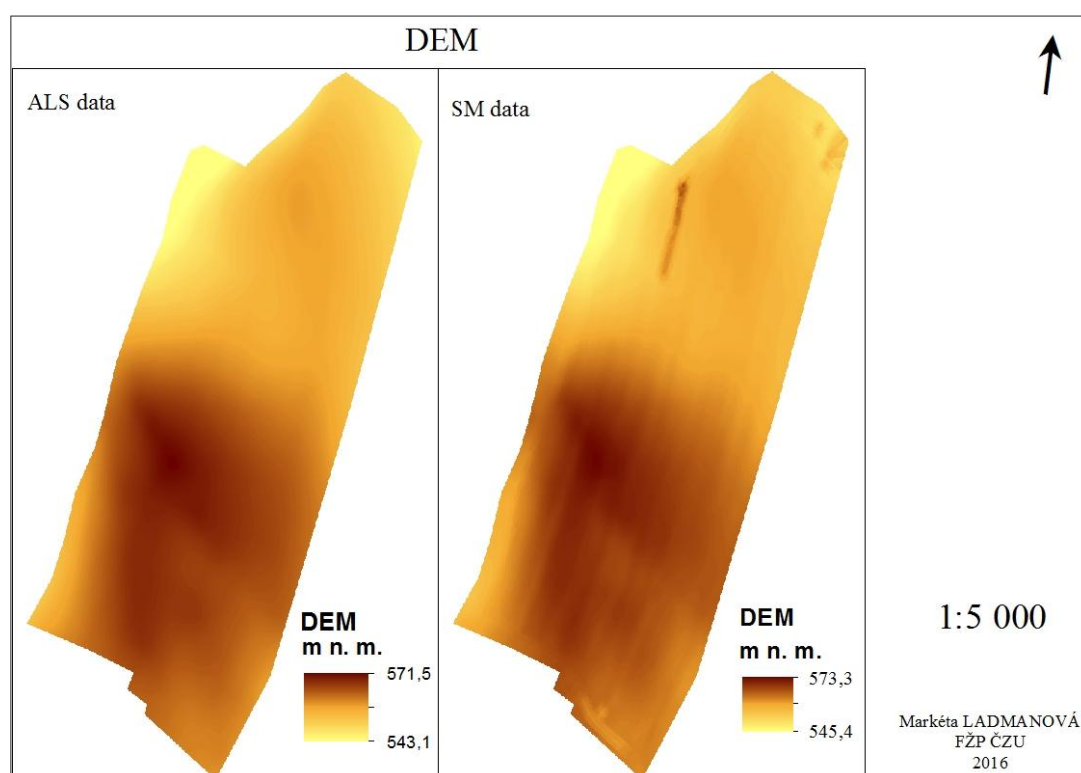
<sup>7</sup> Bonitovaná půdně ekologická jednotka – pětimístný číselný kód, který charakterizuje zemědělské pozemky.



**Obrázek 10.** Pohled na studované pole ze středu pole směrem na sever, fotka byla pořízena po sklizni 2014. Foto: Jitka Kumhálová.

## 6 VÝSLEDKY PRÁCE

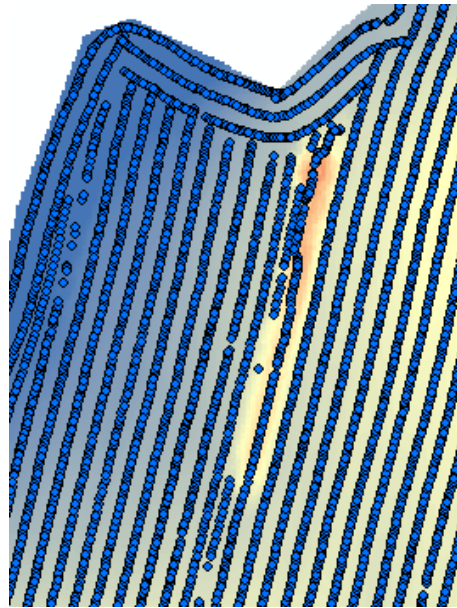
Z výškových dat DMR 4G (ALS data) a výškových dat ze sklízecí mlátičky (SM data) byly vytvořeny DEM interpolační metodou kriging o rozlišení 1x1 m (obrázek 11). Nadmořská výška modelu vytvořeného z ALS dat se pohybuje v rozmezí od 543,1 do 571,5 m. n. m., zatímco u modelu ze SM dat je celkově o dva metry posunuta. Tento rozdíl je způsoben různým zdrojem dat a z toho vyplývající různou přesností dat. Na DEM vytvořeném ze SM dat jsou patrné pojezdové linie sklízecí mlátičky.



Obrázek 11. Výškové modely (DEM) z ALS dat a ze SM dat. Zdroj: vlastní.

Při pojezdu sklízecí mlátičky po poli dochází při měření výškových dat k řadě nepřesností (např. v místech otáčení stroje). Vznikly terénní nerovnosti, které ve skutečnosti na poli nejsou. V severovýchodní části pole se objevil pruh vyšších nadmořských výšek (okolo 566 m n. m.), přičemž v modelu z ALS dat je nadmořská výška v této části do 560 m n. m. V porovnání se základní mapou ČR (ČÚZK) jsem usoudila, že chyba je v SM datech. Při bližším pohledu na originální sadu bodových dat ze SM, lze pozorovat splynutí dvou pojezdových linií sklízecí mlátičky (obrázek 12). Tato chyba vznikla při pojezdu sklízecí mlátičky po poli, což je úskalí tohoto zdroje dat.





**Obrázek 12.** Bližší náhled na chybu v datech, splynutí dvou pojezdových linií. Zdroj: vlastní.

Z obou DEM byly v prostředí GIS odvozeny tyto topografické atributy: sklon, aspekt, zakřivení, zakřivení vrstevnicové a profilové, směr a akumulace odtoku a index vlhkosti pomocí běžně dostupných GIS nástrojů. Mapy výsledných modelů těchto topografických atributů jsou v přílohách 2 až 8.

Model výnosu pšenice ozimé z roku 2014 byl vytvořen rovněž interpolační metodou kriging (příloha 9). Hodnoty výnosu se pohybují od 0,2 do 10,8 t.ha<sup>-1</sup>. Nejnížší výnosy jsou při okrajích pole, naopak nejvyšší se nachází ve středové části.

Popisná statistika dvou sad výškových dat (ALS a SM data) a výnosových dat je zobrazena v tabulce 1.

	Výšková data (m n. m.)		Výnosová data (t.ha <sup>-1</sup> )
	ALS	SM	SM
Počet bodů	10 568	23 782	23 782
Průměr	562.40	563.83	6.97
Medián	562.80	564.20	7.31
Modus	561.00	562.00	7.45
Rozptyl	25.70	25.34	3.32
Směrodatná odchylka	5.07	5.03	1.82
Minimum	543.27	545.35	0.18
Maximum	571.65	573.38	11.06
Šikmost	-0.48	-0.47	-1.15
Metoda interpolace	Kriging	Kriging	Kriging

**Tabulka 1.** Popisná statistika dvou sad výškových dat a výnosu pšenice ozimé z roku 2014. ALS označuje výšková data pocházející z DMR 4G, SM reprezentuje data ze sklízecí mlátičky.

Dvě sady výškových dat byly mezi sebou porovnány Mann-Withney (U) testem (neparametrická obdoba t-testu, která zkoumá, zda je mezi průměry dvou sad vzorků významný rozdíl). Bylo zjištěno, že mezi nimi je statisticky významný rozdíl a to na hladině významnosti  $p$  menší než 0,05. Tento výsledek odpovídá tomu, že data pochází z odlišných zdrojů pořízení o různém rozlišení.

Jednotlivé topografické atributy byly následně korelovány s výnosem za účelem zjištění jejich vztahu. Výsledky korelační analýzy výnosu a topografických atributů odvozených z ALS dat jsou v tabulce 2. Výsledky korelační analýzy mezi výnosem a SM topografickými atributy jsou zobrazeny v tabulce 3.

ALS topografické atributy	SM Výnos	$p$
DEM	0.299	2.20E-16
Sklon	-0.159	2.20E-16
Aspekt	-0.153	2.20E-16
Zakřivení	-0.017	2.20E-16
Profilové zakřivení	0.004	4.49E-02
Vrstevnicové zakřivení	-0.025	2.20E-16
Směr povrchového odtoku	0.200	2.20E-16
Akumulace povrchového odtoku	-0.082	2.20E-16
TWI	0.000	8.84E-01

**Tabulka 2.** Korelační koeficienty ( $r$ ) mezi výnosem a topografickými atributy odvozenými z ALS dat.

SM topografické atributy	SM Výnos	<i>p</i>
DEM	0.304	2.20E-16
Sklon	0.014	2.56E-13
Aspekt	-0.114	2.20E-16
Zakřivení	0.002	2.70E-01
Profilové zakřivení	-0.004	4.66E-02
Vrstevnicové zakřivení	0.001	5.92E-01
Směr povrchového odtoku	0.077	2.20E-16
Akumulace povrchového odtoku	-0.024	2.20E-16
TWI	0.001	5.37E-01

**Tabulka 3.** Korelační koeficienty (*r*) mezi výnosem a topografickými atributy odvozenými ze SM dat.

## 7 DISKUZE

V tabulce 1 je uvedena popisná statistika vstupních dat. Nejvíce bodů vstupujících do analýzy pocházelo ze sklízecí mlátičky (23 782 naměřených hodnot), což je přibližně dvakrát tolik než z druhého zdroje dat (10 568 hodnot z ALS dat). Sady výškových dat se vzájemně mírně liší. Průměrná nadmořská výška ALS dat dosahuje 562,4 m n. m., u dat ze sklízecí mlátičky je to více jak o 1 metr výš (563,83 m n. m.). Prostřední hodnota (medián) je u ALS dat rovna 562,8 m n. m., zatímco u SM dat je tato hodnota rovna 564,2 m. Minima a maxima dvou sad výškových dat jsou také odlišná – výšková data ze SM jsou posunuta o dva metry výš. Variabilita rozdělení souborů nadmořských výšek kolem střední hodnoty (rozptyl) je u obou zdrojů výškových dat velmi podobná. Nízké hodnoty směrodatné odchylky u obou souborů dat naznačují, že naměřené hodnoty nadmořské výšky jsou si podobné. Koeficient šikmosti charakterizuje symetrii rozdělení souboru (pokud je roven 0, soubor je symetricky rozdělen kolem průměru). U obou souborů vstupních dat záporné hodnoty šikmosti značí, že odlehlejší hodnoty se vyskytují vlevo od průměru, opět u obou souborů dat jsou tyto koeficienty velmi podobné.

Výšková data ze SM jsou výrazně ovlivněna pojezdem stroje po poli (například v místech otáčení stroje vznikají nepřesnosti), tím jsou následně ovlivněny všechny odvozené topografické atributy ze SM dat. Výsledné korelační koeficienty výnosu s topografickými atributy odvozených ze SM a z ALS dat se od sebe liší v závislosti na kvalitě vstupních dat. Rozdíly mezi dvěma sadami výškových dat se promítají do jednotlivých topografických atributů jednak v korelačních koeficientech (tabulky 2 a 3), ale lze je pozorovat i vizuálně v mapových výstupech v přílohách 2-8. Rozdíly v korelačních koeficientech nejsou zcela zásadní, pro obě sady dat vychází podobně.

Na modelu nadmořské výšky (příloha 2) a modelu sklonu (příloha 3) lze pozorovat, že pole je velmi variabilní. Z výsledků korelační analýzy je patrné, že nejvyšší, i když nepříliš významný, vliv na variabilitu výnosu měl DEM. Pozitivní korelační koeficient (0,299 z ALS dat a 0,304 ze SM dat) značí, že vyšší výnosy se vyskytovaly ve vyšších partiích pole. V literatuře je častěji zmiňována negativní korelace mezi výnosem a nadmořskou výškou, tedy vyšší výnosy v terénních sníženinách (Kravchenko, Bullock, 2000; Kumhálová a kol., 2008;

Kumhálová a kol., 2011; Kumhálová, 2014; Kumhálová, Moudrý, 2014). To ovšem závisí na hodnoceném poli. Například Marques da Silva, Silva (2008) hodnotili zavlažovaná pole v jižním Portugalsku a pozorovali jak negativní tak pozitivní korelace nadmořské výšky a výnosu. Nadmořská výška měla na výnos výraznější vliv na polích s vyšším stupněm sklonitosti (Kravchenko, Bullock 2000).

Jelikož nebyla analyzována půda ani obsah živin v půdě, není jasné, jakou měrou se na výsledcích podílí právě distribuce živin v půdě. Nejvyšší výnos byl zaznamenán na horních částech pole (příloha 10), kde je ovšem půda velmi kamenitá (obrázek 13). Ozimé plodiny mohou být více náchylné k distribuci vody, kvůli hromadění vody v akumulacích sníženinách, kde může dojít k přemokření porostu. V důsledku čehož zde mohou být nalézány nižší výnosy. Toto tvrzení může být podpořeno faktem, že pozemek je tvořen převážně kambizemí, která v určité míře dokáže zadržovat vodu. V akumulacích sníženinách je půda spíše jílovitá, kde se může držet voda a negativně tak ovlivňovat výnos. Světlá skvrna na ortofotu v jižní části pole (obrázek 9) je bažina. Proto je možné, že pěstovaným plodinám více vyhovují horní části pole, kde je vody dostatek, ale není příliš zamokřený. Nižší výnosy v okrajích pole (na souvratích) mohou být způsobeny utužením půdy (v těchto místech dochází k otáčení zemědělské techniky a půda je vystavována vyššímu tlaku), nižší výnosy na příkrých svazích mohou být způsobeny erozními procesy (Jitka Kumhálová, IV. 2016, in verb).



**Obrázek 13.** Pohled na horní partii pole, kde je půda velmi kamenitá, ale paradoxně zde byly naměřeny nejvyšší výnosy. Foto: Jitka Kumhálová.

V příloze 7 jsou linie akumulace povrchového odtoku zobrazeny na výnosové mapě za účelem vizuálního zhodnocení závislosti výnosu na akumulaci odtoku. Linie akumulace odtoku odvozené z ALS dat jsou soustředěny v SZ a v JV části pozemku v nižších pozicích terénu. Přestože je v těchto místech soustředěn odtok, hodnoty výnosu jsou zde nízké (předpokládaný důvod popsán výše). Oproti tomu linie odvozené ze SM dat jsou mnohem drobnější a více rozprostřeny po celé rozloze pozemku (jak v místech s vysokými tak s nízkými hodnotami výnosu). Důvodem rozdílné modelace odtokových linií z použitých sad dat může být velký rozdíl v počtu vstupních dat (popsáno výše). V obou sadách dat se objevila nepatrná pozitivní korelace se směrem povrchového odtoku (příloha 6) a velmi slabá negativní korelace s akumulací povrchového odtoku (tabulka 2 a 3). Obsah půdní vody je považován za zásadní faktor ovlivňující výnos (Shmidt, Persson, 2003). Dostupnost vody v půdě ovlivňuje distribuci živin po poli (Kumhálová a kol., 2011). Pozitivní i negativní korelace výnosu a akumulace odtoku byla objevena na různých polích (Illinois, USA) ve studii autorů Kravchenko, Bullock (2000). Obsah vody v půdě je vyšší blíž liniím akumulace povrchového odtoku (Marques da Silva, Silva, 2006), ti také objevili závislost výnosu na vzdálenosti od linií akumulace povrchového odtoku. Významnou závislost mezi akumulací odtoku a výnosem prokázali i Marques da Silva, Silva (2008), jejichž pokusy se odehrávaly v podmínkách zavlažovaného pole v jižním Portugalsku, kde srážky ve vegetačním období pěstovaných plodin během pozorovaných let nebyly prakticky žádné.

Modely sklonu odvozené ze dvou sad výškových dat jsou v příloze 3. Sklon nabývá nejvyšších hodnot v západní části pozemku (maximální sklon dosahuje 22 %). Sklonitost pole je velmi variabilní a nelze v ní pozorovat jednotný trend. Výsledný korelační koeficient z ALS dat ukazuje velmi slabou negativní korelaci (-0,159) mezi výnosem a sklonem, u dat ze SM se vztah neprojevil vůbec. Negativní korelace mezi výnosem a sklonem je přičítána faktu, že na svazích s vyšším sklonem je zvýšené riziko eroze a tím pádem odnos živin. V literatuře se objevuje víceméně negativní korelace sklonu a výnosu – na částech pole s vyšším sklonem byly nalezeny menší výnosy (Kravchenko, Bullock, 2000; Marques da Silva, Silva, 2008; Kumhálová, 2010).

V datech se neprojevil žádný vliv zakřivení povrchu pole (ani jednoho typu zakřivení) na výnos. Zakřivení pole je velmi variabilní, možná proto se žádný trend

neobjevil. Model zakřivení pole je v příloze 5. Avšak Kravchenko, Bullock (2000) pozorovali výraznější trend mezi zakřivením pole a výnosem. V letech s nízkými srážkami nacházeli negativní korelace mezi výnosem a zakřivením. Konkávní povrch (negativní hodnoty zakřivení), dokážou poskytovat plodinám více vody než plochy s konvexním povrchem (pozitivní hodnoty zakřivení). Na druhou stranu přílišné hromadění vody v konkávních oblastech během výrazněji srážkově bohatších let má naopak redukční efekt na výnos plodin (Kravchenko, Bullock, 2000). Také Marques da Silva, Silva (2008) pozorovali silný efekt zakřivení pole na výnos, pozorovali jak negativní, tak pozitivní korelace mezi zakřivením a výnosem. V analýze se neprojevil žádný vztah mezi výnosem a TWI (příloha 8).

Vztah mezi výnosem a topografií může být určován množstvím vody v půdě a akumulací vody na poli, což může být důsledkem předchozích meteorologických podmínek (McConkey a kol., 1997). Jejich vlivem (zejména pak množstvím srážek) na vztah mezi výnosem a topografií se zabývalo mnoho prací. Byl pozorován větší vliv topografie na výnos v suchých než ve srážkově vydatnějších letech (Kumhálová a kol., 2011; Kumhálová, 2014). Například byla objevena vyšší závislost výnosu na DEM, na sklonu a na akumulaci povrchového odtoku pro sušší a teplejší roky, ale už nebyla objevena tak vysoká závislost výnosu na topografii v letech, které byly srážkově bohatší a chladnější (Kumhálová a kol., 2008).

Rozpory mezi výsledky této práce a výsledky uvedených autorů mohou být vysvětleny velkými rozdíly mezi půdními a klimatickými podmínkami, ve kterých byly výzkumy realizovány. Vzhledem k tomu, že jsou k dispozici výnosová data pouze z jednoho roku, nelze zatím vyvodit obecnější závěry o chování zkoumaného pole. Také nejsou k dispozici podrobnější analýzy půdy (například zásoby živin v půdě, o půdních reakcích, o mechanickém stavu půdy, o výskytu chorob a škůdců), které by také mohly leccos napovědět.

Jedním z cílů práce bylo porovnat vhodnost dvou sad výškových dat (z DMR 4G a ze sklízecí mlátičky) pro účely precizního zemědělství. Oba soubory dat mají své výhody a nevýhody. Mezi nevýhody ALS dat patří pořizovací náklady datových sad, které jsou ovšem jen jednorázové. Mezi výhody ALS dat patří především jejich přesnost (0,13 m pro plochy bez souvislé vegetace). Mezi nevýhodami SM dat lze uvést menší přesnost, objevuje se zde řada chyb kvůli pojezdu sklízecí mlátičky po poli (např. otáčení stroje na konci pole, terénní

nesrovnalosti), zpracování dat klade vyšší nároky na znalosti uživatele, který je musí umět analyzovat a správně interpretovat. Mezi nesporné výhody SM dat patří, že jsou hned k dispozici prostřednictvím monitoru na sklízecí mlátičce. Data ze SM jsou použitelná pro účely precizního zemědělství (Kumhálová a kol., 2011; Kumhálová a kol., 2008).

ALS data jsou po pořízení rovnou připravena pro vstup do analýz uživatele, u dat ze sklízecí mlátičky tomu tak není. Data měřená sklízecí mlátičkou při pojezdu po poli většinou zajišťuje zaplacená firma, která se specializuje na mapování pozemků pro účely precizního zemědělství, pokud nemá zemědělské družstvo vlastní sklízecí mlátičku s mapovacím systémem. Výstupem bývají pouze výnosové mapy v obrazovém formátu. Problém může nastat ve chvíli, kdy by se uživatel chtěl dostat k surovým datům. To byl případ i pro pole ve Vendolí, kdy musela být objednána další firma, která byla schopná díky licencovanému softwaru data vyexportovat do formátu vhodného pro další zpracování. Po upravení dat ze SM do požadovaného formátu je práce s daty velmi podobná. Z hlediska dalšího zpracování nejsou mezi soubory dat velké rozdíly. Základním předpokladem zpracování takových dat je přístup ke GIS softwaru a v neposlední řadě také odborné znalosti pro správné zpracování dat.



## 8 ZÁVĚR

V literární rešerši je zpracován úvod do problematiky precizního zemědělství a jeho potenciál při hledání řešení zvýšené poptávky po produkci potravin v důsledku růstu počtu obyvatelstva. Je zde uveden přehled o možnostech získání vhodných výškových dat pro popis pozemku, dále je zde uveden popis topografických atributů, které popisují variabilitu v rámci pozemku.

V samotné práci byly porovnávány dva zdroje výškových dat – z leteckého laserového skenování povrchu České republiky (DMR 4G) a data měřená DGPS přijímačem na sklízecí mlátičce. Dvě sady výškových dat byly zkoumány z hlediska jejich vhodnosti pro popis variability zemědělského pozemku pro účely precizního zemědělství. Odvozené topografické atributy (pomocí běžně dostupných nástrojů v SW ArcGIS) z obou sad výškových dat byly porovnávány s výnosem korelační analýzou. Nejvýznamnější vliv na výnos měl DEM. Vyšší výnosy byly situovány ve vyšších partiích pole. Vztah mezi výnosem a ostatními odvozovanými topografickými atributy se buď neprojevil vůbec, nebo velmi slabě.

Výšková data ze sklízecí mlátičky obsahovala řadu chyb, které byly způsobeny nepřesnostmi při pojezdu sklízecí mlátičky po poli. Jejich nespornou výhodou však je, že jsou okamžitě dostupná pro zemědělce z monitoru na sklízecí mlátičce (za předpokladu, že zemědělské družstvo disponuje takto vybavenou sklízecí mlátičkou). Data z DMR 4G jsou mnohem přesnější a lépe popisují variabilitu na pozemku. Rozdíly ve vstupních datech ovlivňují i výsledné korelační koeficienty. Byly nalezeny rozdíly mezi korelačními koeficienty topografických atributů s výnosem z dat ze sklízecí mlátičky a z DMR 4G dat. Tyto rozdíly ale nejsou tak zásadní, aby nebylo možné konstatovat, že oba zdroje dat jsou použitelné pro účely precizního zemědělství.

Poznatky o závislosti výnosu na topografických attributech mohou být užitečné při vymezení tzv. management zón na pozemku. Zároveň se však tato závislost výnosu na topografii může (a z literárního přehledu vyplývá, že tomu tak je) velmi často měnit a je závislá na daných meteorologických podmínkách daného roku.

Z toho důvodu, že v práci byla použita výnosová data pouze z jednoho roku, nelze vyvozovat doporučení pro agronomická opatření na pozemku. Pro budoucí

výzkumy by bylo vhodné porovnat topografii pole s výnosy z dalších let. Výnosové mapy by bylo dále vhodné porovnat informacemi o zásobách živin v půdě, o půdních reakcích, o výskytu chorob a škůdců či o mechanickém stavu půdy.

## 9 ZDROJE

### 9.1 Literatura

Brázdil K., Bělka L., Dušánek P., Fiala R., Gamrát J., Kafka O., Peichl J., Šíma J., 2012: *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G)*. Zeměměřický úřad, vojenský geografický a hydrometeorologický úřad, Pardubice, 11 s.

Brázdil K., Bělka L., Dušánek P., Fiala R., Gamrát J., Kafka O., Peichl J., Šíma J., 2015: *Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G)*. Zeměměřický úřad, vojenský geografický a hydrometeorologický úřad, Pardubice, 12 s.

Chilès J. P., Delfiner P., 1999: *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. John Wiley & Sons, Inc., United States of America: 695.

Čuba F., Hurta J., Trnka F., 1999: *Vytváření ziskového zemědělství, precizní zemědělství*. Edice TOKO a.s., Praha, 64 s.

Dolanský T., 2004: *Lidary a letecké laserové skenování*. Acta Universitatis Purkynianae 99, Univerzita J. E. Purkyně, Ústí nad Labem, 100 s.

Dušánek P., Hron V., Hoffman P., Setnička M., Šíma J., 2015: *Technická zpráva k digitálnímu modelu povrchu 1. generace (DMP 1G)*. Zeměměřický úřad, vojenský geografický a hydrometeorologický úřad, Pardubice, 17s.

Gallant J. C., Wilson J. P., 2000: *Primary Topographic Attributes*. In: Wilson J. P., Gallant J. C. (eds.): *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, United States of America: 51-85.

Halounová L., Pavelka K., 2005: *Dálkový průzkum Země*. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 192 s.

Hutchinson M. F., Gallant J. C., 2000: *Digital Elevation Models and Representation of Terrain Shape*. In: Wilson J. P., Gallant J. C. (eds.): *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, United States of America: 29-50.

Korte G. B., 1994: *The GIS Book*. OnWord Press, Santa Fe, United States of America: 220.

Kravchenko A. N., Bullock D. G., 2000: *Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties*. *Agronomy Journal* 92: 75-83.

Křikavová L., 2009: *Interpolace bodových dat v GIS*. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Praha, 55 s.

Kumhálová J., 2010: *Využití GIS v precizním zemědělství*. Disertační práce, Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta, Brno, 120 s.

Kumhálová J., 2014: *Odvození topografických charakteristik pro účely precizního zemědělství*. *Geografie* 119, č. 2: 161-178.

Kumhálová J., Kumhála F., Kroulík M., Matějková Š., 2011: *The impact of topography on soil properties and yield and the effect of weather conditions*. *Precision Agriculture* 12: 813-830.

Kumhálová J., Kumhála F., Novák P., Matějková Š., 2013: *Airborne laser scanning data as a source of field topographical characteristics*. *Plant, Soil and Environment* 59: 423-431.

Kumhálová J., Matějková Š., Fiferňová M., Lipavský J., Kumhála F., 2008: *Topography impact on nutrition content in soil and yield*. *Plant, Soil and Environment*, 54: 255-261.

Kumhálová J., Moudrý V., 2014: *Topographical characteristics for precision agriculture in conditions of the Czech Republic*. *Applied Geography* 50: 90-98.

Lechner W., Baumann S., 2000: *Global navigation satellite systems*. *Computers and Electronics in Agriculture* 25: 67-85.

Longley P., Batty M., 1996: *Analysis, modelling, forecasting, and GIS technology*. In: Longley P., Batty M. (eds.): *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*. John Wiley & Sons, United States of America: 1-15.

Lukas V., Neudert L., Křen J., 2011: *Mapování variability půdy a porostů v precizním zemědělství – Metodika pro praxi*. Mendelova univerzita v Brně, Brno, 36 s.

Mácová M., 2014: *V čem je české zemědělství jiné?* Statistika a my – měsíčník českého statistického úřadu, 07-08/2014: 27-28.

Mandal D., Ghosh S. K., 2000: *Precision fading – The emerging concept of agriculture for today and tomorrow*. Current Science, 79: 1644-1647.

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 Content at Harvest*. Biosystem Engineering, 94: 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: 183-190.

Martínek K., Kopáčková V., Štych P., Barevný L., 2007: *GIS a DPZ v geologických vědách v prostředí ArcGIS a jeho extenzí*. CITT Akademie kosmických technologií oblast Galileo, GMES, Praha, 158 s.

McConkey B. G., Ulrich D. J., Dyck F. B., 1997: *Slope position and subsoiling effects on soil water and spring wheat yield*. Canadian Journal of Soil Science, 77: 1983-1990.

Minnitt R. C. A., Assibey-Bonsu W., 2014: *Professor D. G. Krige FRSSAf*. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, August 2014: 8-11.

Murdoch Z., 1985: *Dálkový průzkum Země*. Academia, Praha, 144 S.

Němec J., 2001: *Bonitace a oceňování zemědělské půdy České republiky*. VÚZE, Praha, 260 s.

Neményi M., Mesterházi P. Á., Pecze Zs., Stépán Zs., 2003: *The role of GIS and GPS in precision farming*. Computers and Electronics in Agriculture, 40: 45-55.

Pavelka K., 2010: *Dálkový průzkum Země. Družicové systémy*. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 112 s.

Pike R. J., Evans I. S., Hengl T., 2009: *Geomorphometry: A Brief Guide*. In: Hengl T., Reuter H. I. (eds.): *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, 33: 3-30.

Rapant P., 2002: *Úvod do geografických informačních systémů*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 110 s.

Rybka A., Šťastný M., 1998: *Precizní zemědělství (Studijní zpráva)*. Ústav zemědělských a potravinářských informací, Praha, 52 s.

Schmidt F., Persson A., 2003: *Comparison of DEM Data Capture and Topographic Wetness Indices*. Precision Agriculture 4: 179-192.

Shirich P. S., Bhalerao S. A., 2013: *Precision farming: The most scientific and modern approach to sustainable agriculture*. Int. Res. Journal of Science & Engineering, vol. 1: 21-30.

Spurná P., 2008: *Prostorová autokorelace – všudypřítomný jev při analýze prostorových dat?* Sociologický časopis 44: 767 – 787.

Srbínovska M., Gavrovski C., Dimcev V., Krkoleva A., Borozan V., 2015: *Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor network*. Journal of Cleaner Production 88: 297-307.

Šára P., 2011: *Globální polohový systém – fenomén 21. století*. Geodetický a kartografický obzor 57/99 2011/1: 14 – 23.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, *Population Division, 2015: World Population Prospects: The Revision, Key Findings and Advance Tables*. Working Paper No. ESA/P/WP.241.

Vosselman G., Maas H. G., 2010: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, UK, 318 s.

Wilson J. P., Gallant J. C., 2000a: *Digital Terrain Analysis*. In: Wilson J. P., Gallant J. C. (eds.): *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, United States of America: 1 – 27.

Wilson J. P., Gallant J. C., 2000b: *Secondary Topographic Attributes*. In: Wilson J. P., Gallant J. C. (eds.): *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, United States of America: 87 – 131.

Webster R., Oliver M. A., 2001: *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons, Chichester: 271.

Wehr A., Lohr U., 1999: *Airborn laser scanning – an introduction and overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54: 68 – 82.

## 9.2 Internetové zdroje

BPEJ, 2015: *eKatalog BPEJ*. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd, v.v.i., Praha, online: <http://bpej.vumop.cz/72514> a <http://bpej.vumop.cz/73014>, cit. 14.3.2016.

Cooley S. W., 2015: *Hillslope Wetness Index*. GIS 4 Geomorphology, Geomorphometry of Mountain Landscapes & Upland Watersheds, online: <http://gis4geomorphology.com/hillslope-wetness-index/>, cit. 1.11.2015.

ČÚZK, 2015a: *Výškopis – úvod*. Český úřad zeměměřický a katastrální, Praha, online: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(em1rcn32002w2555ngvijk45\)\)/default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopis&side=vyskopis&head\\_tab=sekce-02-gp&menu=30](http://geoportal.cuzk.cz/(S(em1rcn32002w2555ngvijk45))/default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopis&side=vyskopis&head_tab=sekce-02-gp&menu=30), cit. 30.9.2015.

ČÚZK, 2015b: *Základní báze geografických data České republiky – úvod*. Český úřad zeměměřický a katastrální, Praha, online: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(mcv0iqcy0ptd3j3g5mfo2whc\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&text=dSady\\_zabaged&side=zabaged&menu=24&head\\_tab=sekce-02-gp](http://geoportal.cuzk.cz/(S(mcv0iqcy0ptd3j3g5mfo2whc))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24&head_tab=sekce-02-gp), cit. 2.3.2016.

ČÚZK, 2015c: *Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G)*. Český úřad zeměměřický a katastrální, Praha, online: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(0ytwm0gvwe3p3bwzhrpvkm5q\)\)/Default.aspx?lng=CZ&](http://geoportal.cuzk.cz/(S(0ytwm0gvwe3p3bwzhrpvkm5q))/Default.aspx?lng=CZ&)

[mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302](http://geoportal.cuzk.cz/(S(0ytwm0gvwe3p3bwzhrpvkm5q))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302), cit. 2.3.2016.

ČÚZK, 2015d: *Digitální model povrchu České republiky 1. generace (DMP 1G)*.

Český úřad zeměměřický a katastrální, Praha, online:

[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(0ytwm0gvwe3p3bwzhrpvkm5q\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&mapid=8&menu=303](http://geoportal.cuzk.cz/(S(0ytwm0gvwe3p3bwzhrpvkm5q))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&mapid=8&menu=303), cit. 1.3.2016.

ČÚZK, 2016: *Nahlížení do Katastru nemovitostí*. Český úřad zeměměřický a katastrální, Praha, online:

<http://nahliznidokn.cuzk.cz/ZobrazObjekt.aspx?encrypted=544If7RKwQgSaoXwvCP52tNgry1yrgBXyr0Cj7JHZIUKhgmWC0s7MW8ybP7u0BITBhUw4bmAkXS0680BQOuIXNqalS5f7VONKYZt18b93aD5D1VF1CYfoDYGAknppWzj9iS0xCCF9B0CjopnvKHQnuzU-7DNo7wh6Oqmd4cvuIgjAbu89mQB8jA5u5Z5zAjmGO771-id7wnXti4PgYjig1sgZjMU8uXGArqEDc1xebTL9ccof1GjwSJWeGNRo3GS0VqlkfZhZRTwg6CSguKC8WqL5-HkqjWiuYeOdufjnYo>, cit. 13.3.2016.

CZEPOS, 2016: *Síť permanentních stanic GNSS*. CZEPOS Zeměměřický úřad, online: <http://czepos.cuzk.cz/index.aspx>, cit. 25.3.2016.

DIBAVOD, 2014: *Princip leteckého laserového skenování*. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka – odbor ochrany vod a informatiky, Praha, online: <http://www.dibavod.cz/90/princip-leteckeho-laseroveho-skenovani.html?PHPSESSID=uxbjycatmqkz>, cit. 1.3.2016.

Gisat, 2013: *Precizní zemědělství*. Gisat s.r.o., online: <http://www.gisat.cz/content/cz/aplikace/zemedelstvi>, cit. 28.9.2015.

GPS, 2011: *Constellation Arrangement*. Official U. S. Government informatik about the GPS and related topics, online: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>, cit. 29.3.2016.

Gross J., Ligges U., 2015: *Tests for Normality*. CRAN, online: <https://cran.r-project.org/web/packages/nortest/nortest.pdf>, cit. 13.3.2016.



Kačmařík M., 2016: *Zpracování dat v GIS*. Geoinformatika, Institut geoinformatiky při HGF, VŠB-TU Ostrava – výukové materiály, online: <http://gis.vsb.cz/kacmarik/zdgis/cv10/cv10.html>, cit. 10.3.2016.

LPIS, 2015: *Veřejný registr půdy*. Ministerstvo zemědělství ČR, online: <http://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny/>, cit. 29.3.2016.

Tobler W., 2014: *Web of Waldo Tobler*. Waldo Tobler, Department of Geography, University of California, Santa Barbara, online: <http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/bio.html>, cit. 8.3.2016.

ZSČR, 2016: *Zemědělské družstvo Vendolí – základní informace*. Zemědělský svaz České republiky, online: <http://www.zschr.cz/podniky/zemedelske-druzstvo-vendoli>, cit. 13.3.2016.

### 9.3 Zdroje obrázků

**Obrázek 1** Lukas V., Neudert L., Křen J., 2011: *Mapování variability půdy a porostů v precizním zemědělství – Metodika pro praxi*. Mendelova univerzita v Brně, Brno, 36 s.

**Obrázek 2** Ryant P., 2001: *Precizní zemědělství*. Ústav agrochemie a výživy rostlin, uživatelský server Mendelovy univerzity v Brně (online) [cit. 2016.03.20], dostupné z [http://web2.mendelu.cz/af\\_221\\_multitext/hnojeni\\_plodin/pdf/precizni\\_zemedelstvi.pdf](http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/hnojeni_plodin/pdf/precizni_zemedelstvi.pdf)

**Obrázek 3** Oficiální stránky vlády USA o *GPS* (online) [cit. 2016.03.22], dostupné z <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>

**Obrázek 4** Webové stránky společnosti *Dronopic* (online) [cit. 2016.03.30], dostupné z <http://dronopic.co.in/blog/what-is-dgps-differential-gps-how-does-it-work-dgps-pdf.html>

**Obrázek 5** Internetové stránky *Geospatial Modeling and Visualization - GMV* (online) [cit. 2016.03.03] <http://gmv.cast.uark.edu/scanning-2/airborne-laser-scanning/>

**Obrázek 6** ESRI, 2013b: ArcGIS Help Library, ArcGIS 10.2. ESRI 1995-2013.

**Obrázek 7** ESRI, 2013b: ArcGIS Help Library, ArcGIS 10.2. ESRI 1995-2013.

**Obrázek 8** Vlastní.

**Obrázek 9** ČÚZK, 2014: Ortofotomapa České republiky – služba, Český úřad zeměměřický a katastrální.

**Obrázek 10** Foto: Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

**Obrázek 11** Vlastní.

**Obrázek 12** Vlastní.

**Obrázek 13** Foto: Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

## 9.4 Software

RStudio, 2015: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

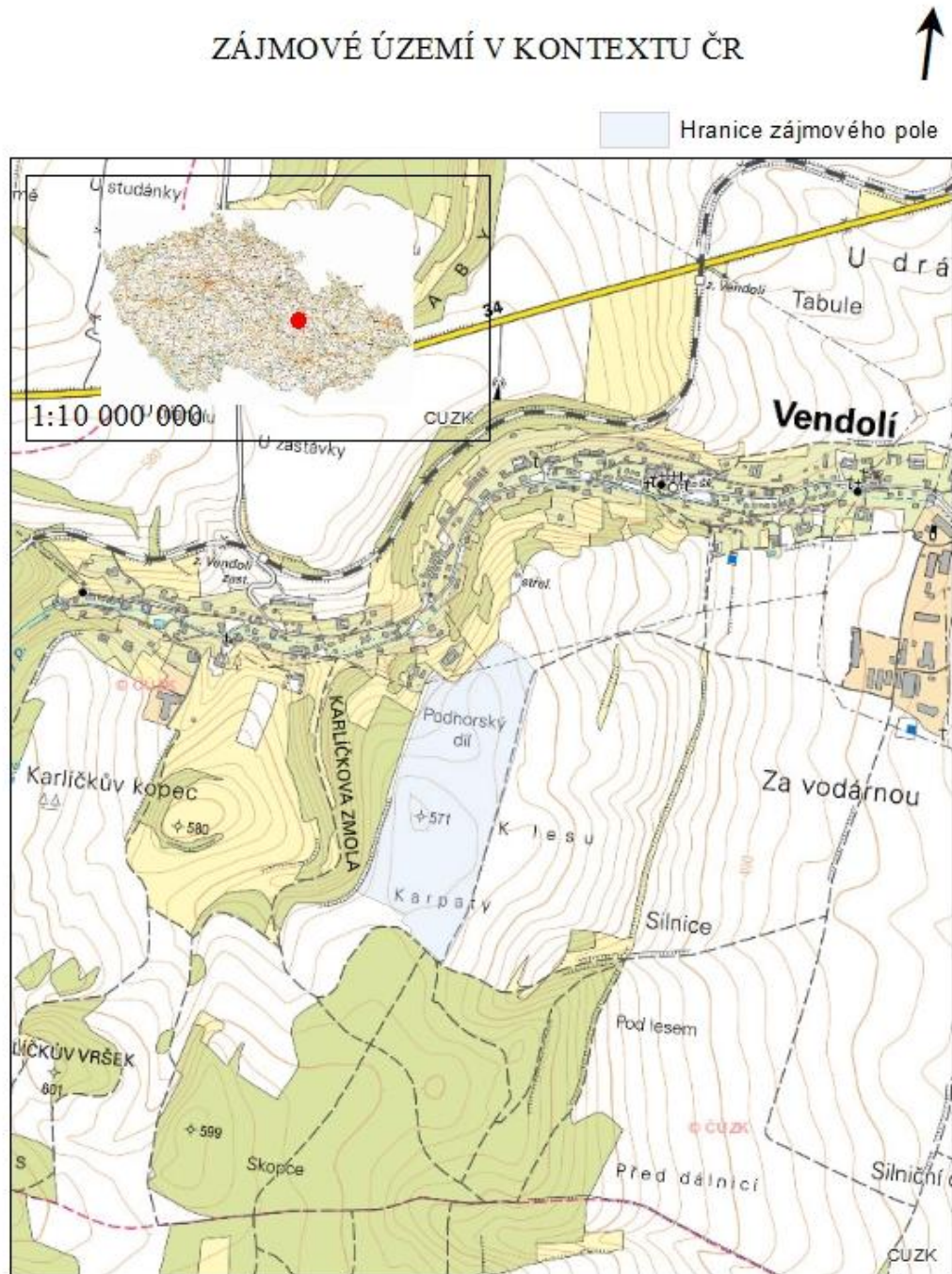
ESRI, 2013a: ArcGIS 10.2, CA, USA.

ESRI, 2013b: ArcGIS Help Library, ArcGIS 10.2. ESRI 1995-2013.

# 10 PŘÍLOHY

## PŘÍLOHA 1

Hranice studovaného pole zobrazené na topografické mapě České republiky (Základní mapa ČR, ČÚZK).

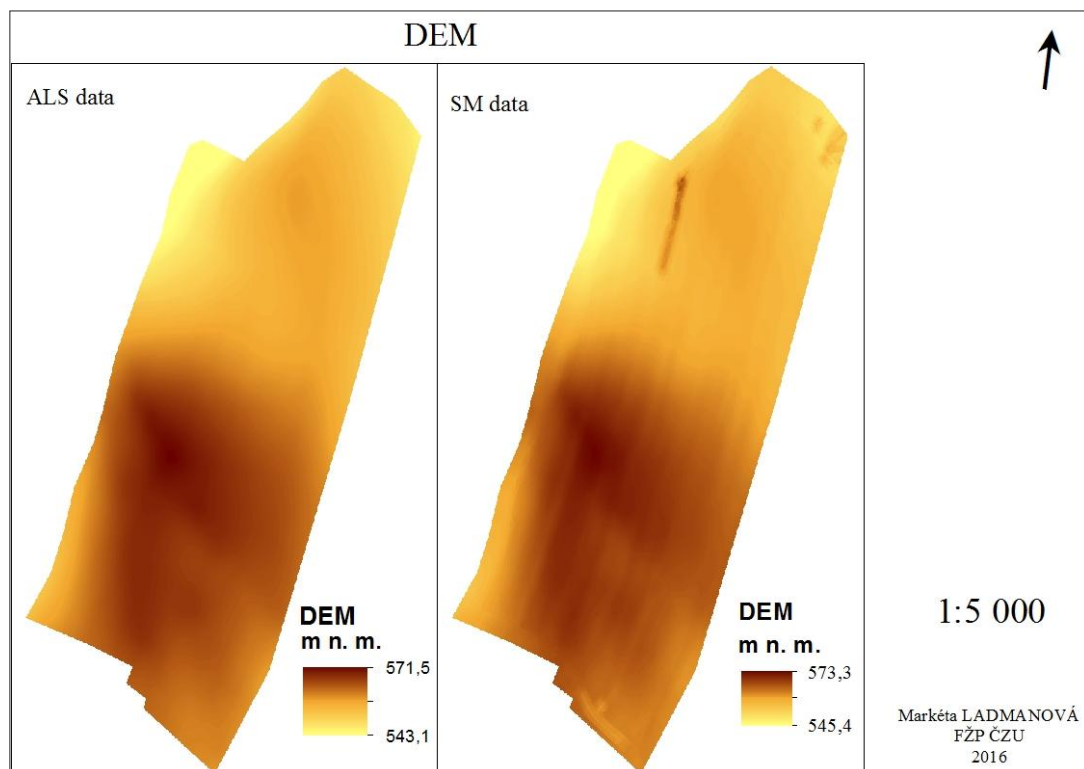


1:20 000

Markéta LADMANOVÁ  
FŽP ČZU 2016  
Zdroj: ČÚZK

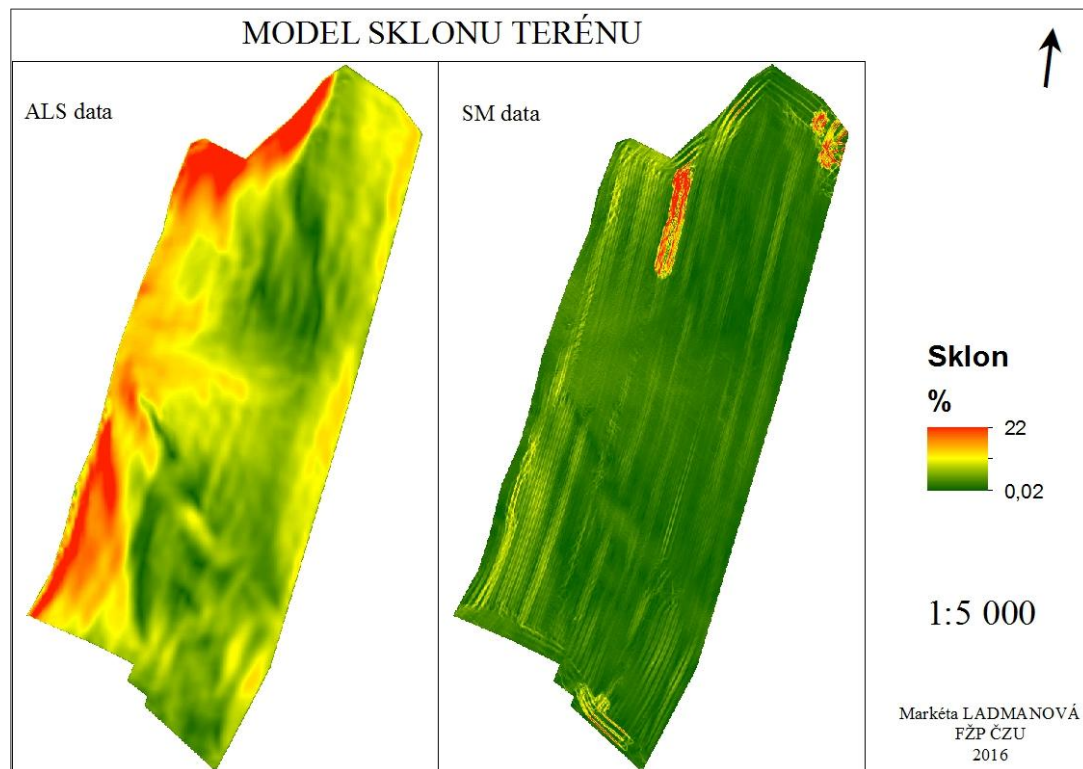
## PŘÍLOHA 2

Vizualizace digitálního modelu povrchu odvozeného z ALS dat a ze SM dat.



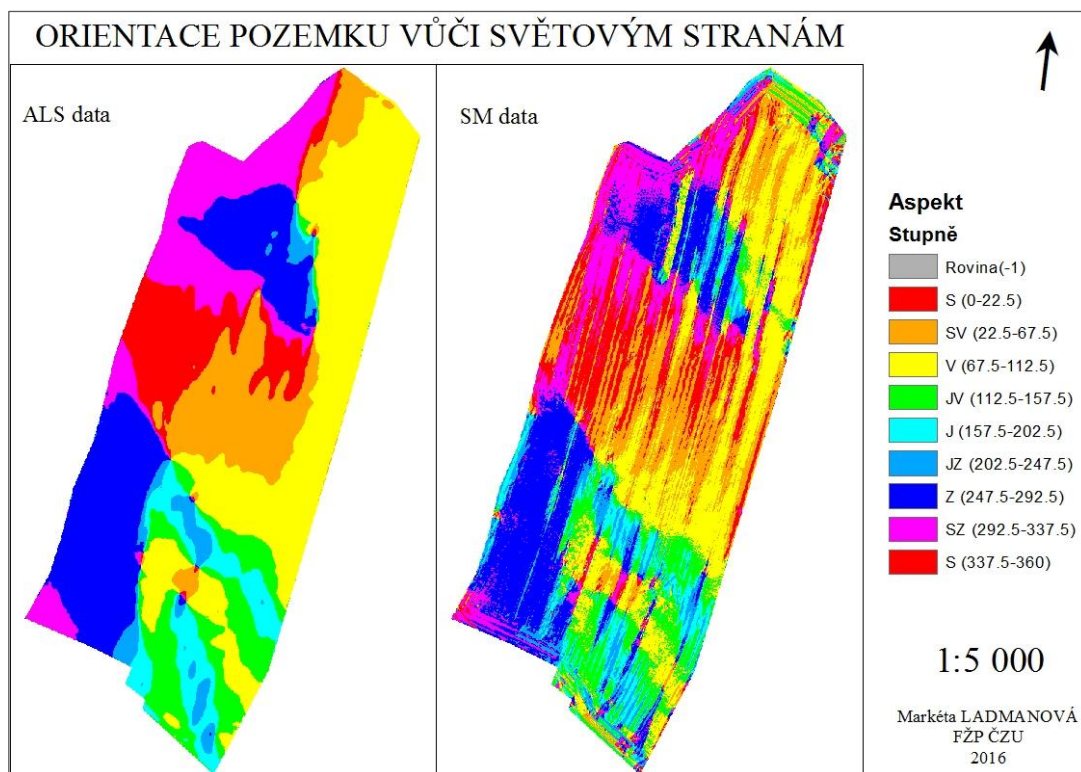
### PŘÍLOHA 3

Model sklonitosti studovaného pole. Sklon je vyjádřen v procentech, nejvyšší sklony se nacházejí při západním okraji pole. Realističtější model sklonu pochází z ALS dat.



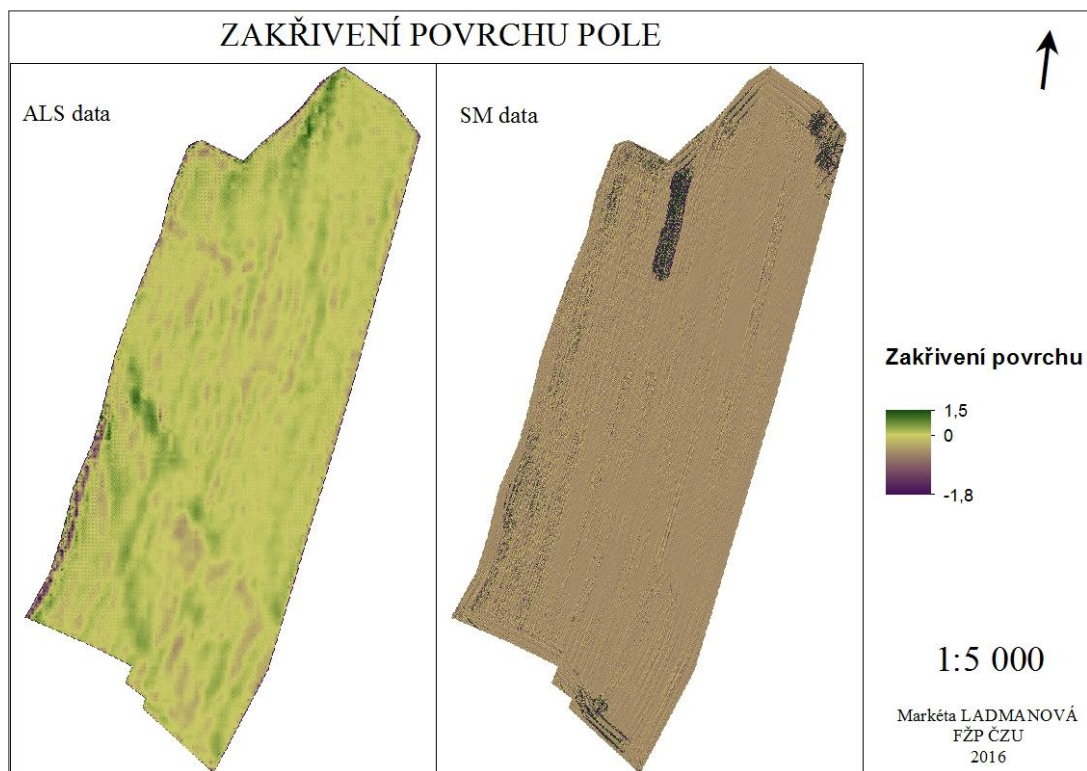
## PŘÍLOHA 4

Model orientace svahů pozemku ke světovým stranám, vyjádřen ve stupních. Kvalitnější vizualizace opět pochází z ALS dat, na modelu ze SM dat jsou opět patrné pojezdové linie.



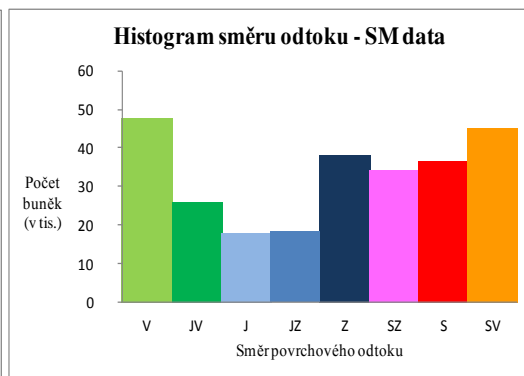
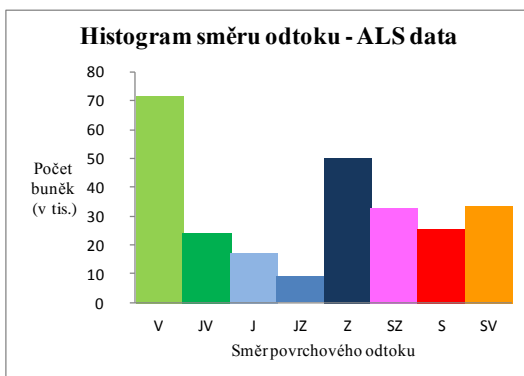
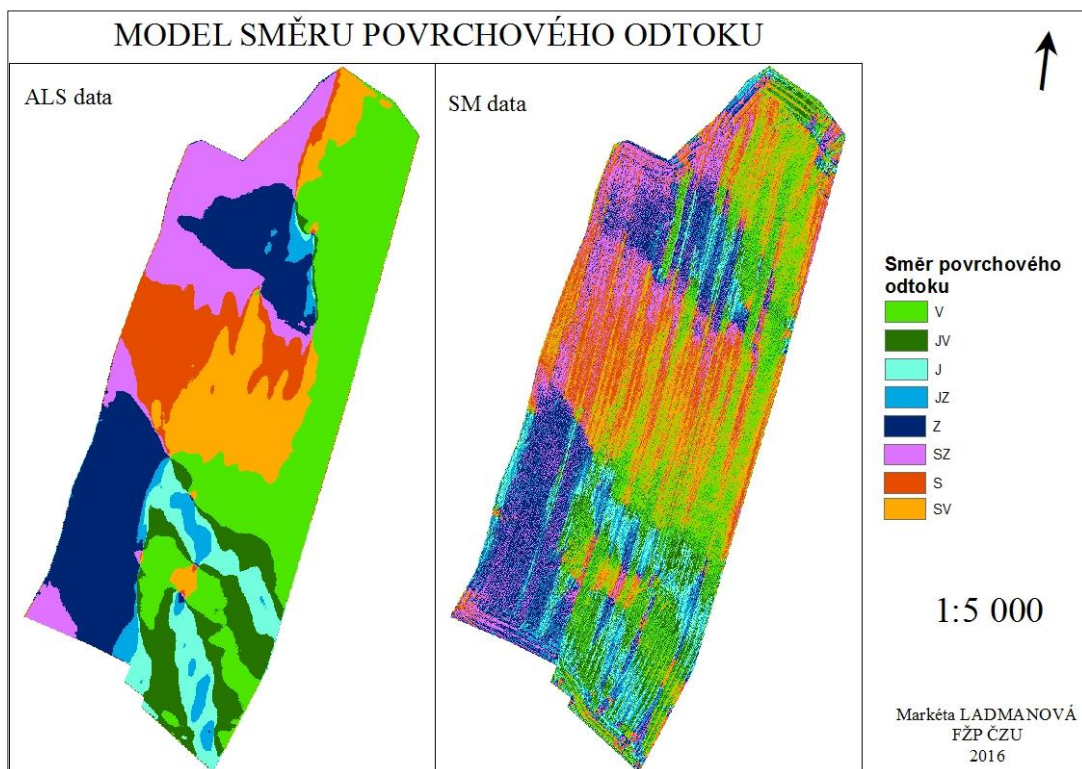
## PŘÍLOHA 5

Model zakřivení povrchu pole.



## PŘÍLOHA 6

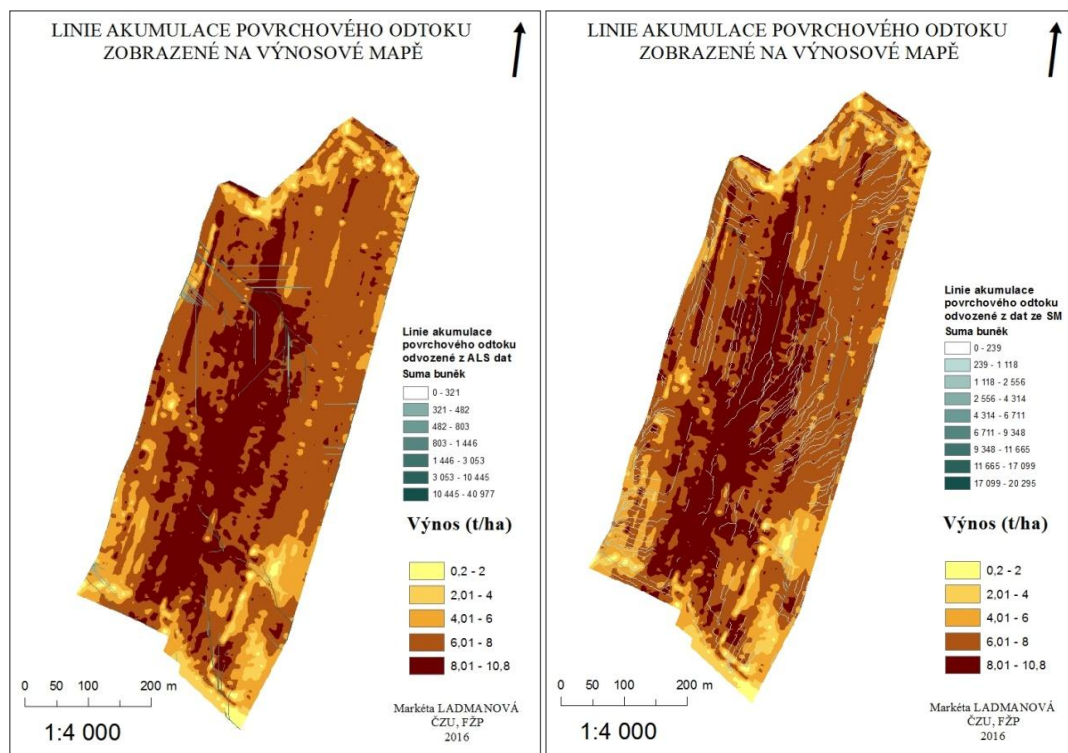
Model směrů povrchového odtoku.





## PŘÍLOHA 7

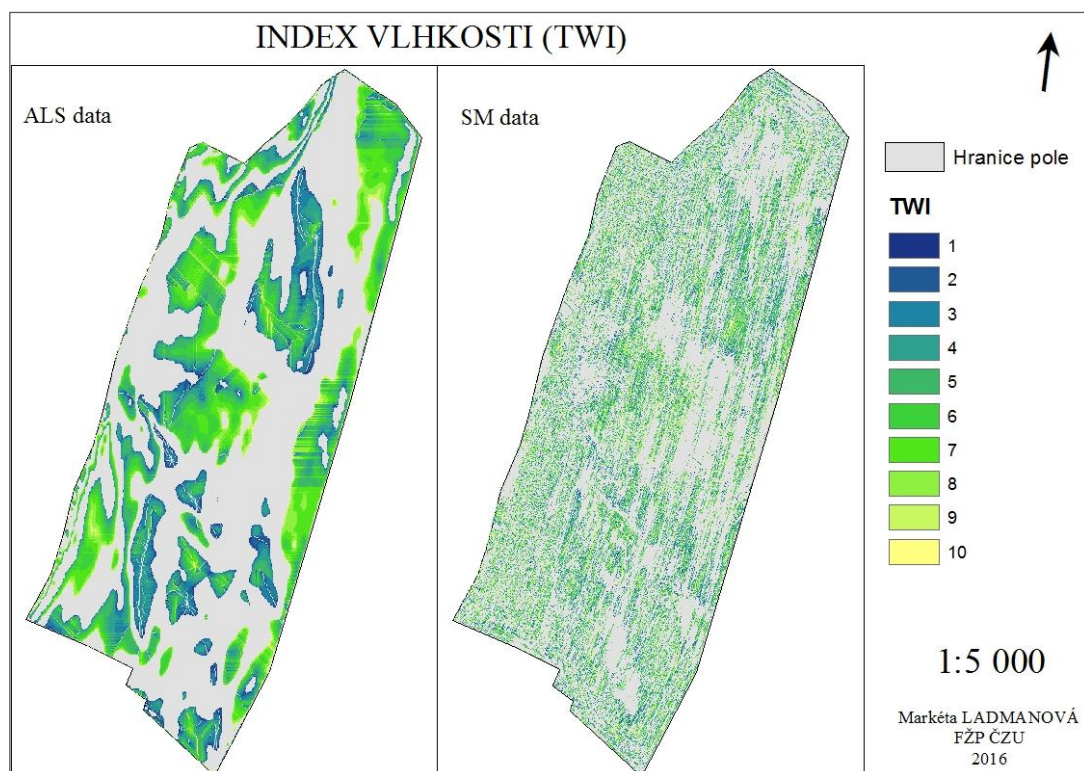
Vizualizace linií akumulace povrchového odtoku na výnosové mapě.



## PŘÍLOHA 8

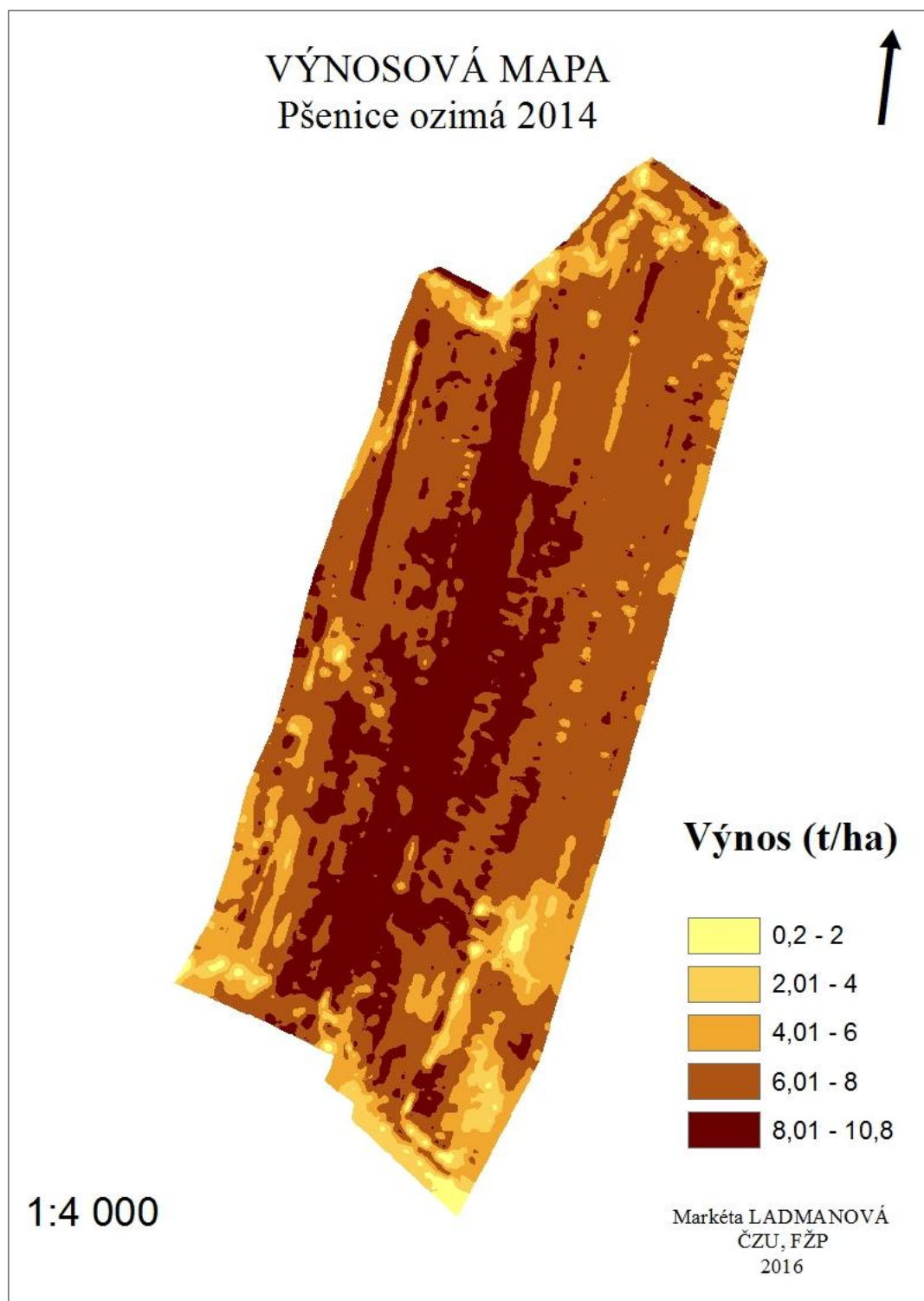
TWI (index vlhkosti) je vyjádřen na škále od 1 do 10, přičemž nejnižší hodnoty (1) představují potenciálně vlhká místa v půdě, ve kterých může docházet ke hromadění vody (konkávní plochy). Vysoké hodnoty TWI indexu indikují místa, která budou vysychat nejdříve (jsou to sklonité plochy s rychlým odtokem).

Vypovídající hodnota TWI indexu z ALS a ze SM dat se značně liší.



## PŘÍLOHA 9

Model výnosu pšenice ozimé v roce 2014.



## PŘÍLOHA 10

Zobrazení modelu výnosu a DEM pro vizuální porovnání.

