

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO
PLÁNOVÁNÍ

**Podrobný digitální model terénu jako
prediktor výnosu**
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Jan Komárek, Ph. D.

Diplomant: Bc. Jakub Bilík

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Bilík

Regionální environmentální správa

Název práce

Podrobný digitální model terénu jako prediktor výnosu

Název anglicky

Detailed digital elevation model as a predictor of yield

Cíle práce

Cílem práce je zhodnotit přínos podrobného digitálního modelu terénu při sledování závislosti topografických charakteristik terénu na výnos zemědělských plodin. Autor zhodnotí, zda podrobný model poskytuje přesnější topografické charakteristiky než model s menším prostorovým rozlišením.

Metodika

V rámci precizního zemědělství se sleduje závislost různých topografických, půdních a meteorologických charakteristik na výnos zemědělských plodin. Na základě digitálního modelu terénu (DMT) je možné pro každé zemědělsky využívané území vypočítat topografické charakteristiky (indexy). Hodnoty topografických indexů jsou ovlivňovány rozlišením použitého DMT. Pomocí bezpilotních systémů lze získat podrobný DMT (0,1 m), přesným druhem DMT je v ČR DMR5G s rozlišením 2 m, celosvětově dostupnými modely jsou pak např. SRTM (30 m) a ASTER (20 m × 30 m). Literární rešerše bude zaměřena na vytvoření přehledu topografických indexů používaných při studiu jejich závislosti na výnosu. Nad uvedenými DMT budou vypočítány hodnoty vybraných topografických indexů. Pomocí vhodné statistické metody autor vyhodnotí vztah vypočítaných topografických indexů a výnosového potenciálu ve sledované lokalitě. Autor také zhodnotí využitelnost podrobných modelů a vyhodnotí jejich přínos oproti volně dostupným světovým modelům.

Doporučený rozsah práce

50-70 normostran textu

Klíčová slova

topografické indexy, precizní zemědělství, UAV, výnos plodin, DMR 5G, ASTER, SRTM

Doporučené zdroje informací

Kaspar T. C. a kol., 2000. Relationship of Corn and Soybean Yield to Soil and Terrain Properties. American Society of Agronomy, 709(96), 700–709.

Kumhálová, J., 2010: Využití GIS v precizním zemědělství. Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta, Brno. 120 s. (dizertační práce) „nepublikováno“.

Munoz, J. D. a kol., 2014. Cover crop effect on corn growth and yield as influenced by topography. Agriculture, Ecosystems and Environment, 189, 229–239.

Pacina J. a Brejcha M., 2014: Digitální modely terénu. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí, Ústí nad Labem, 73 s.

Vaze J., Teng J., a Spencer G., 2010: Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. Environmental Modelling and Software, 25(10), 1086–1098.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jan Komárek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2019

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 15. 04. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Komárka, Ph. D. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze 15. 4. 2019

.....

Poděkování

Za vedení práce, poskytnutá data a rady děkuji Janu Komárkovi. Za data výnosového potenciálu také děkuji Zemědělskému družstvu Vendolí. Dále děkuji rodičům za podporu během celého vysokoškolského studia.

Abstrakt

Stále více se v zemědělství rozšiřují postupy souhrnně označované jako precizní zemědělství. V rámci precizního zemědělství se také sleduje závislost různých topografických, půdních a meteorologických charakteristik na výnos zemědělských plodin. Na základě digitálního modelu terénu (DMT) je možné pro každé zemědělsky využívané území vypočítat topografické charakteristiky (indexy). V práci byly srovnány různě podrobné DMT. Pomocí bezpilotního prostředku byl získán podrobný DMT (rozlišení 0,6 m). Dále byly dostupné tyto DMT: DMR 5G (2 m), SRTM (30 m) a ASTER GDEM (20 m × 30 m). Literární rešerše byla zaměřena na vytvoření přehledu topografických indexů. Následně byly nad daty DMT vypočítány následující indexy: sklon, orientace, zakřivení, podélné zakřivení, profilové zakřivení, akumulace odtoku, relativní nadmožská výška a index TWI (Topographic Wetness Index). Pomocí lineární regrese byla vypočítána závislost s daty potenciálu výnosu. Také byly zhodnoceny rozdíly mezi jednotlivými DMT.

Mezi topografickými indexy a potenciálem výnosu byla zjištěna pouze velmi malá závislost, která neprokázala u konkrétní lokality vliv terénu na potenciální výnos. Nejvyšší závislost vyjádřená koeficientem determinace byla 0,032. Závislost tedy není statisticky významná. Dále byly zjištěny rozdíly mezi jednotlivými DMT, které byly následně zhodnoceny pomocí chyb RMSE, MAE a vizuálně.

Klíčová slova:

Topografické indexy, DMT, drony, výnos plodin, DMR 5G, SRTM, ASTER GDEM.

Abstract

In agriculture are increasing constantly more spread practices such as precision farming. Precision agriculture also monitors the dependence of various topographical, soil and meteorological characteristics on crop yields. Based on the Digital Terrain Model (DMT), topographical characteristics (indices) can be calculated for each agricultural area. Various DMTs were compared. A detailed DMT (0.6 resolution) was obtained using an unmanned vehicle. In addition, the following DMTs were available: DMR 5G (2 m), SRTM (30 m) and ASTER GDEM (20 m × 30 m). The literary research was focused on creating an overview of topographic indices. Subsequently, the following indices were calculated over DMT data: slope, orientation, curvature, plan curvature, profile curvature, flow accumulation, relative altitude, and the Topographic Wetness Index (TWI). Linear regression was used to calculate dependence on yield potential data. Differences between DMTs were also evaluated.

Only a very small dependence was found between the topographic indices and the yield potential, which did not show the effect of the terrain on the potential yield for a particular locality. The highest dependence expressed by determination coefficient was 0.032. Thus, dependence is not statistically significant. Furthermore, differences were found between individual DMTs, which were subsequently evaluated by RMSE, MAE and visual errors.

Keywords:

Topographic indices, DMT, drones, crop yield, DMR 5G, SRTM, ASTER GDEM.

Obsah

1. Úvod.....	12
2. Cíle práce.....	14
3. Literární rešerše	15
3.1. Precizní zemědělství.....	15
3.2. Bezpilotní prostředky	17
3.3. Získávání dat pomocí dronů	19
3.4. Digitální model terénu.....	23
3.4.1. Rastrový model a jeho využití.....	23
3.4.2. TIN	27
3.5. Zdroje digitálních modelů terénu.....	28
3.5.1. Způsoby pořizování digitálních modelů terénu.....	28
3.6. Topografické charakteristiky terénu	30
3.6.1. Dělení topografických charakteristik	32
3.6.2. Sklon	33
3.6.3. Orientace.....	34
3.6.4. Akumulace odtoku vody.....	35
3.6.5. Topographic wetness index	38
3.6.6. Zakřivení (Curvature).....	39
3.6.7. Profilové zakřivení (Profile curvature)	39
3.6.8. Podélné zakřivení (Planar curvature).....	40
3.6.9. Vzdálenost od akumulace odtoku (distance to flow accumulation – DFL).....	41
3.6.10. Nadmořská výška	42
3.6.11. Délka odtoku – flow distance – flow length	43
4. Metodika.....	44
4.1. Charakteristika studijního území	44
4.2. Charakteristika dat.....	45

4.2.1	DEM z dronu	45
4.2.2	DMR 5G	45
4.2.3	SRTM	46
4.2.4	ASTER GDEM.....	46
4.2.5	Výnos plodin	46
4.3	Tvorba topografických charakteristik.....	48
4.3.1	Výpočet sklonu	49
4.3.2	Výpočet orientace.....	49
4.3.3	Výpočet akumulace odtoku vody	49
4.3.4	Výpočet hodnot indexu TWI.....	50
4.3.5	Výpočet zakřivení	51
4.3.6	Výpočet relativní nadmořské výšky.....	51
4.4	Hodnocení přesnosti DEM	51
5	Výsledky	53
5.1	Hodnocení přesnosti DEM	53
5.2	Hodnocení závislosti topografických charakteristik na výnosu	56
6	Diskuze.....	58
7	Závěr	60
8	Přehled literatury a použitých zdrojů	61

Seznam použitých zkratek

ASTER GDEM	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Global Digital Elevation Model
CCD	Charge - Couple Device
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DEM	Digital Elevation Model (digitální výškový model)
DFL	Distance to Flow accumulation Lines
DGPS	Diferenciální GPS
DMP	Digitální model povrchu
DMR	Digitální model reliéfu
DMT	Digitální model terénu
GIS	Geographic Information System (geografický informační systém)
GNSS	Global Navigation Satellite System (globální družicový polohový systém)
DPZ	Dálkový průzkum Země
IDW	Inverse Distance Weighted
LiDAR	Light Detection and Ranging
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
RMSE	Root Mean Square Error (střední kvadratická chyba)
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RTK	Real Time Kinematic
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
STI	Soil Topographic Index
TWI	Topographic Wetness Index (topografický vlhkostní index)

UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
WMS	Web Map Service (webová mapová služba)

1. Úvod

Stále více se v zemědělské praxi rozšiřuje koncept precizního zemědělství. V rámci tohoto konceptu je důležité získat informace o podmínkách na poli, které ovlivňují výši úrody. Výnos je ovlivňován půdními, hydrologickými, pedologickými a topografickými vlastnostmi pole. Jedním z faktorů, které ovlivňují výnos zemědělských plodin je topografie terénu (Kravchenko a Bullock, 2000) a (Kaspar a kol., 2004). Topografii terénu lze charakterizovat topografickými atributy. Mezi tyto topografické charakteristiky lze řadit nadmořskou výšku, sklonitost, orientaci, zakřivení, směr odtoku, index akumulace odtoku, vlhkostní index (TWI index), index transportu sedimentů (STI index) nebo index vzdálenosti od linií odtoku (DFL index) (Marques da Silva a Silva, 2008).

Tyto topografické charakteristiky lze získat z digitálního výškového modelu (DEM). Jedná se o digitální model terénu, který obsahuje nadmořskou výšku bodů terénu. DEM modely se vytvářejí s různou mírou podrobnosti a přesnosti. Existují globální modely, které pokrývají celou planetu (SRTM nebo ASTER). Tyto modely mají rozlišení v řádu desítek metrů. Každý stát má pak vlastní model, který pokrývá pouze jeho území. V České republice se jedná o DMR 5G. Tento model má rozlišení 2 m. Dále je možné vytvořit model pro konkrétní zájmové území. Pro pořízení těchto modelů lze využít různé zdroje a postupy. Jednou z možností je využít snímkování povrchu Země pomocí dronu. Takto vytvořené modely jsou velmi podrobné a jejich rozlišení může dosáhnout až 1 cm/pixel (Jamcopters, 2019).

Jedním z předmětů zájmu v rámci precizního zemědělství je hodnocení vlivu topografie terénu na výnos plodin. Výsledné hodnoty topografických charakteristik jsou ovlivněny kvalitou DEM (Vaze a kol., 2010). Ve většině studií se pro výpočet topografických atributů používá pouze jeden model. Rozlišení modelů se pohybuje od 1 m až do desítek metrů. Hodnocením přesnosti různě podrobných modelů se zabývali Vaze a kol. (2010). Hodnota vypočtených charakteristik by měla záviset na podrobnosti modelu. U modelů s menším rozlišením by se mělo jednat o méně spojitě hodnoty, které model dostatečně necharakterizují. Naopak u modelu s vysokým rozlišením by přechody mezi hodnotami pixelu měly být pozvolnější a měly více daný terén charakterizovat.

Jen omezeně byl zatím studován vliv různého rozlišení DEM na výpočet topografických charakteristik. V rámci práce je řešen vliv podrobnosti DEM na topografické charakteristiky a jejich závislost na potenciálu výnosu zemědělských plodin. Dále je hodnocena přesnost méně podrobných modelů ve vztahu k referenčnímu DEM.

2. Cíle práce

Cílem práce je zhodnotit přínos podrobného digitálního modelu terénu při sledování závislosti topografických charakteristik terénu na výnosu zemědělských plodin. Cílem je zhodnotit, zda podrobný model poskytuje přesnější topografické charakteristiky než model s menším prostorovým rozlišením.

3. Literární řešerše

3.1. Precizní zemědělství

Digitální technologie se využívají i v zemědělství. Spojení digitálních technologií a lokálního přístupu k ošetřování polí je označováno jako precizní zemědělství. Precizní zemědělství je soubor postupů a technologií, které umožňují přizpůsobit zemědělské operace (např. hnojení, aplikaci postřiků atd.) v závislosti na prostorové variabilitě pozemku (Gisat, 2019). Cílem precizního zemědělství je přizpůsobení zásahů na poli lokálním podmínkám stanoviště. Přehled částí precizního zemědělství je zobrazen na obrázku č. 1.

Obr. 1: Části precizního zemědělství



Zdroj: Ryant, 2001

V minulosti, kdy se každý staral o své pole, lidé dobře znali podmínky na konkrétním stanovišti. Dokázali určit místa, kde se plodinám daří více a kde méně. V dnešní době rozsáhlých půdních bloků a velkých zemědělských podniků nelze jednoduše rozlišit a zhodnotit podmínky na jednotlivých polích. Pro precizní zemědělství jsou tedy v České republice dobré podmínky, protože jsou zde velké půdní bloky o velikosti i několika

desítek hektarů, kde se pěstuje stejná plodina. Zároveň jsou zde velké zemědělské podniky, které často obhospodařují půdu o celkové rozloze převyšující i 1 000 hektarů. Při takové velikosti už má ekonomický smysl aplikovat přístupy precizního zemědělství. Naše země je navíc různorodá z hlediska geologického, pedologického, hydrologického a klimatického v kombinaci s členitostí terénu (Lukas a kol., 2010). V různých částech jsou tedy různé podmínky pro pěstování plodin. Jednotlivá pole se navzájem liší. Zároveň může existovat variabilita i v rámci jednoho pole. Pokud se podaří tuto variabilitu změřit a správně vyhodnotit, lze následně jednotlivé činnosti na poli také variabilně měnit. Následně lze na pozemky aplikovat lokálně specifický přístup. Aby toto bylo možné, je nutné v zemědělství používat digitální technologie. V posledních desetiletích sledujeme velký rozvoj digitálních technologií. Pro zemědělství je důležitý rozvoj GNSS (Global Navigation Satellite System) systémů, geoinformačních systémů, senzorové techniky a aplikačních ovládacích prvků.

GNSS systémy se používají při navádění strojů na pozemku, při sběru půdních vzorků, při sběru údajů o sklizni nebo při navádění polních robotů atd. (Kumhálová, 2010). Navigační systémy umožňují řídit pohyb stroje po poli, a tím ulehčují práci řidiče stroje. Samotné stroje můžou nést přístroje a senzory (tzv. on-the-go senzory), které průběžně zaznamenávají měřené parametry. Může se jednat o elektrické a elektromagnetické senzory (např. mapování vodivosti půdy), mechanické senzory (mapování tahové síly) nebo elektrochemické senzory (měření pH půdy) (Kroulík, 2012). Ze získaných dat je možné dělat mapy půdních vlastností a výnosové mapy. Jelikož mají tyto data přiřazená i data o poloze, je možné je používat v geografických informačních systémech (GIS) a porovnávat je navzájem. Dalším zdrojem dat pro GIS jsou snímky dálkového průzkumu Země (DPZ), snímky z leteckého snímkování nebo data z laserového snímání (LIDARu). GIS systémy se využívají v desktopových verzích nebo v mobilních verzích.

Další součástí precizního zemědělství je senzorová technika, která měří přímo na poli při sklizni nebo při ošetřování pozemku. Často se používají senzory pro hodnocení spektrálních vlastností porostů cílené pro určení výživného stavu, pro měření hustoty porostů, pro mapování půdních vlastností (např. vlhkosti půdy nebo měření elektrické vodivosti půdy) a mapování výnosů při sklizni (Lukas a kol., 2010).

Posledním článkem jsou aplikační prvky, které slouží pro provedení diferencovaných zásahů. Na základě aplikačních map umožňují plynulou změnu dávky hnojiva nebo postřiku.

Mezi hlavní přínosy uplatňování zásad precizního zemědělství patří úspora hnojiv a pesticidů, úspora pohonných hmot u pojezdových strojů, nižší environmentální zatížení půdy, automatizace a optimalizace operací a možnost shromažďovat komplexní data o vývoji pozemku (Jamcopters, 2019).

Na základě zjištěných údajů má uživatel zemědělské půdy několik možností, jak na pozemcích hospodařit. Méně úrodnou půdu může vyčlenit pro plodiny, které nejsou tak náročné na podmínky. Druhou možností je ovlivnit podmínky na poli lokálními zásahy tak, aby se zvýšila úrodnost půdy.

3.2 Bezpilotní prostředky

V posledních letech se rozšiřuje používání bezpilotních prostředků (dronů). Drony se rozumí létající stroj bez posádky, který může být řízen na dálku nebo může létat na základě předprogramovaných letových plánů (Droneweb, 2016). Drony lze ovládat pomocí vysílacích zařízení, které jsou určeny pro konkrétní model nebo pomocí univerzálnějších mobilních aplikací, které jsou zdarma pro všechny verze mobilních operačních systémů. Původně se drony používaly především pro armádní účely. V armádě slouží pro průzkumné operace i pro přesně cílené útočné akce. Postupně se začaly objevovat stroje nejdříve pro profesionální použití a v posledních několika letech je možné zakoupit různé modely dronů i pro rekreační použití. Cena dronů se pohybuje od tisícikorun do statisíců korun. Jsou tedy dostupné pro každého. S drony pro rekreační použití je možné natáčet videa nebo pořizovat snímky. Jedná se většinou o stroje menší a lehčí. Pro rekreační použití je možné používat všechny stroje do 0,91 kg. Stroje do 0,91 kg nemusí být vybaveny bezpečnostním systémem Fail-save. Systém Fail-save zajišťuje v případě poruchy, vybití baterie nebo ztráty spojení bezpečné dokončení letu (Dronpro, 2017). Stroje nad 0,91 kg je možné používat pro rekreační účely jen pokud jsou vybaveny tímto systémem.

Pokud se dron používá pro profesionální účely je nutné, aby ho ovládal člověk, který má pilotní zkoušku a je oprávněn řídit tyto stroje. Dále je pak nutné provést evidenci stroje i pilota u Ústavu civilního letectví (Dronpro, 2017). Pokud je dron těžší než 25 kg, tak musí mít každý, kdo ho ovládá, pilotní zkoušku. Provoz dronů je z právního hlediska popsán v doplňku X k obecným pravidlům létání L 2. Jsou zde popsány zakázané činnosti a omezení spojené s provozem dronů. Jsou zde popsány výšková i horizontální omezení. Lze létat maximálně ve vzdušném prostoru třídy G, což je 300 m nad terénem. Dále je

létání omezeno i v horizontálním směru, kdy dron při vzletu a při přistání by měl být vzdálen minimálně 50 m od jiné osoby. Dále by měl být 100 m od jiných prostředků a staveb. Pokud je v okolí hustě osídlený prostor, tak od něho by měl být udržován odstup 150 m.

Bezpilotní letadla jsou označována různými názvy. V České republice se obecně mezi veřejností a v médiích asi nejvíce používá označení dron. V zahraniční odborné literatuře se většinou objevuje označení UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Je možné ho přeložit jako bezpilotní létající prostředek. Pokud bezpilotní prostředek nese některý ze senzorů, už je používáno spojení Unmanned Aerial System (UAS). Může se jednat o digitální kameru, hyperspektrální senzor nebo LIDAR. Součástí takového systému je samozřejmě pilot, který kontroluje let nebo přístroj přímo za letu ovládá. Mezinárodní asociace pro civilní letectví (ICAO) v roce 2007 vytvořila spojení Remotely Piloted Aircraft (RPA) (Cary, 2015). Kompletní systém bezpilotního letadla a řídicího systému se pak nazývá Remotely Piloted Aircraft System (RPAS).

Drony lze dále dělit podle typu křídla, hmotnosti, konstrukce, účelu atd. Podle typu křídla lze rozdělit drony na stroje s jednoduchým křídlem nebo s několika vrtulemi. Drony s vrtulemi lze dále dělit podle počtu vrtulí. Dron s křídlem je poháněn motorem s vrtulí.

Obr. 2: Dron s křídlem SenseFly eBee



Zdroj: Geotronics, 2019

Tento typ dronu nestrutuje kolmo z povrchu, ale stoupá do letové hladiny postupně. Je tedy nutné mít pro tento typ více prostoru. Stejně tak při přistání je určen směr, ze kterého postupně klesá na místo dopadu. Jako zástupce této skupiny dronů lze jmenovat např. přístroj eBee od švýcarské firmy SenseFly (obrázek č. 2). Výhodou tohoto stroje je dlouhá

doba letu. Ve vzduchu vydrží až 45 minut. Model s křídlem použili také Ruzgiene a kol. (2015) při tvorbě DMT. Druhou větší skupinou jsou přístroje, které mají čtyři a více vrtulí. Tyto stroje startují kolmo od povrchu jako helikoptéra. Tuto skupinu lze dělit podle počtu vrtulí, které stroj má. Existují stroje se čtyřmi vrtulemi (kvadrokoptéry), s šesti vrtulemi (hexakoptéry) nebo s osmi vrtulemi (oktokoptéry) atd. Vícevrtulové stroje ve vzduchu vydrží kolem 10 až 20 minut. Záleží na výdrži baterie a rychlosti větru, ve kterém se létá. Tyto stroje jsou rozšířenější a je jejich velké množství.

3.3 Získávání dat pomocí dronů

Drony mohou nést několik druhů senzorů. Ve velké míře zastoupeným senzorem je digitální kamera. Digitální kamera zaznamenává povrch Země a vytváří jednotlivé snímky. Digitální kamera je tvořena CCD (charge-couple device) snímačem, který zachytává dopadající světlo. Snímač je tvořen pixely, které množství dopadajícího světla zaznamenají a převedou ho na digitální hodnotu. Jednotlivé pixely tvoří snímek. Barevné snímky vznikají použitím RGB snímače. RGB snímač zaznamenává hodnoty světelného záření v červeném (R - red), zeleném (G - green) a modrém (B - blue) spektru. Složením těchto tří pásem vzniká barva pixelu. Některé snímače zaznamenávají i v oblasti blízkého infračerveného spektra (NIR). Tyto základní pásma (RGB) zaznamenává každá digitální kamera (fotoaparát). Některé drony mohou nést levné a dostupné fotoaparáty, což může snížit cenu při pořizování potřebných dat. Některé studie byly přímo zaměřeny na porovnání použití dostupných fotoaparátů a profesionálních digitálních kamer. Při studiu výnosu a chorob plodin ověřil možnosti levného fotoaparátu Nebiker a kol. (2016), který srovnával dostupný fotoaparát Canon S110 NIR s profesionálním přístrojem multiSPEC 4C. Profesionální přístroj měl přesnější výsledky, ale data z fotoaparátu byla dostatečná. Lepší výsledky přístroje multiSPEC 4c byly dosaženy díky lepšímu vymezení jednotlivých spektrálních pásem. U levnějšího přístroje se pásma částečně překrývala. Levný fotoaparát Canon S100 použil Ruzgiene a kol. (2015) při vytváření DMT.

Dalším možným senzorem je hyperspektrální kamera. Hyperspektrální kamera funguje na stejném principu. Její výhodou je, že zaznamenává množství dopadajícího světla i v jiném než barevném spektru. Může zaznamenávat záření i v infračerveném a termálním pásmu. Záření může být zaznamenáváno v desítkách i stovkách pásem, které mohou mít šířku i jen 10 nm.

Kombinací spektrálních pásem lze vytvářet spektrální indexy. Spektrální indexy, které zkoumají stav vegetace se nazývají vegetační indexy. Mezi nejznámější vegetační index lze zařadit index NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

UAV může také nést laserový skener LIDAR (Light Detection And Ranging). Tento snímač vysílá v pulsech laserový paprsek. Na základě doby odrazu se vypočítá vzdálenost mezi vysílačem a sledovaným předmětem. LIDAR lze využít pro měření vzdálenosti, při tvorbě modelu terénu či 3D modelů budov. Tyto senzory ve spojení s UAV prostředky jsou často využívány. Zároveň lze tyto senzory vzájemně kombinovat.

Drony jsou používány především při studiu životního prostředí, krajiny, při mapování a v zemědělství. V těchto oborech jsou používány všechny zmíněné senzory. Každý senzor má své výhody a nevýhody. Lze je vzájemně kombinovat a můžou se výhodně doplňovat. Digitální kamery lze využít více způsoby. Jedním ze způsobů využití je vytváření snímků pro následné vytvoření digitálního modelu terénu. Lze je využít jak pro vytvoření digitálního modelu povrchu (DMP), tak pro vznik digitálního výškového modelu (DEM). Tyto digitální modely terénu lze vzájemně porovnávat a následně vytvořit normalizovaný výškový model rostlin Hoffmeister a kol. (2015), Yue a kol. (2017), Van Iersel a kol. (2018), Holman a kol. (2016). a De Souza a kol. (2017). Výška rostliny je důležitým ukazatelem zdravotního stavu rostliny, dostatku vody v době růstu a výnosu plodiny Chang a kol. (2017). Vzájemně porovnávat modely lze i pokud byly pořízeny z dat snímání pomocí LIDARu. Nejdříve se nasnímá povrch bez vegetace. Následně se snímání provede ve fázi vegetačního růstu nebo před sklizením zemědělské plodiny. Lze takto vytvořit časové řady a sledovat vývoj růstu vegetace. Model výšky vegetace lze kombinovat s vegetačními indexy a tím zpřesnit model pro určení velikosti biomasy Yue a kol. (2017).

Použití dronů pro mapování má své výhody a nevýhody. Mezi nevýhody lze zařadit omezenou dobu letu, která je závislá na kapacitě baterie. Let může být také ovlivňován povětrnostními podmínkami. Silný vítr může let i znemožnit. Pokud je potřeba určit výšku vegetace, tak není vhodné snímat během silného větru, protože vítr může ovlivnit výšku rostlin (Van Iersel a kol., 2018). Ta je pak na modelu menší než ve skutečnosti, protože rostlina se při silném větru ohýbá. Mezi výhody použití dronu patří možnost nasnímat velké území za krátký čas ve srovnání s kontaktními metodami. Jelikož je použití dronu bezkontaktní, tak se nepoškozuje úroda. Pokud by bylo potřeba měřit přímo na poli, tak by došlo k poškození porostu na místech, kde by se měřilo.

Spojení UAV a multispektrálního senzoru bylo využito při studiu množství biomasy (Wu, 2017). RGB snímky jsou často využity pro vytvoření digitálního modelu terénu a digitálního modelu povrchu (Li, 2017). Z těchto dvou modelů byly vypočteny výšky rostlin. Dále bylo vypočteno velké množství vegetačních indexů. Součástí studie bylo také měření v terénu, kde byly odebrány vzorky biomasy a byla změřena výška vegetace. Na základě porovnání výšky biomasy, vegetačních indexů a měření v terénu byl vytvořen model velikosti vegetace.

Pro stejné účely využili RGB snímky z dronu ve své studii Li a kol., (2016). Z modelu povrchu odvodili několik výškových parametrů kukuřice pro dané území. Z pásem RGB byly vypočítány základní vegetační indexy. Výška rostlin byla porovnávána s vegetačními indexy a byl vytvořen model, který popisoval množství biomasy. Tento model byl porovnán s měřením v terénu. Výsledná střední chyba modelu terénu byla 11 cm. Podobný postup použil Holman a kol. (2016). Ve dvou po sobě následujících letech zkoumali na 25 odrůdách pšenice vliv rozdílné aplikace dusíku na růst rostlin. Pomocí UAV vytvořili digitální model terénu a digitální model povrchu. Z rozdílu těchto výšek odvodili výšku rostlin. Výšku vegetace v povodí sledovali Van Iersel a kol., (2018). Pomocí levného fotoaparátu (Canon IXUS 125 HS) nasníмали území povodí v průběhu roku. Vytvořili normalizovaný model výšky rostlin jako rozdíl výškového modelu a digitálního modelu povrchu. Zároveň vypočítali vegetační index. Kombinací těchto modelů vytvořili mapu typu vegetačního pokryvu (náletová vegetace, sečená tráva, tráva bez obhospodařování atd.).

Data získaná z měření pomocí UAV jsou často kombinována s dalším měřením, které se provádí v terénu. Pomocí snímků lze vytvořit digitální model terénu a digitální model povrchu. Pro vytvoření modelu bývá často použita metoda Structure from Motion (SfM) (Chang a kol., 2017), (Li a kol., 2016) a (Van Iersel a kol., 2018). Při této metodě se využívají snímky, které se vzájemně překrývají. Nejméně tři fotografie musí překrývat každé místo. Pro pořízení snímků postačuje běžný fotoaparát. Na snímcích se porovnávají a hledají místa, která jsou stejná. Na základě podobnosti se vytvoří model. Porovnáním modelů je získána výška porostu. Chang a kol. (2017) na několika místech získali výšku rostlin také měření v terénu. Jelikož byly data získávána v 10denních intervalech, vznikla časová řada výšek. Z těchto časových řad byly vytvořeny křivky průběhu přírůstku výšky porostu.

Pro fotogrammetrickou tvorbu modelu je možné také použít metodu Area – Based Matching (ABM), při které se porovnávají hodnoty šedi na dvou nebo více snímcích a hledají se místa, která jsou stejná. Hodnoty šedi se porovnávají v pohybujiícím se čtverci pixelů. Mřížka pixelů má rozměry od 5×5 do 17×17 pixelů. Velikost mřížky se určuje na základě rozlišení rasteru. Čím větší rozlišení rastru je, tím se použije více pixelů v mřížce. Tuto metodu využil Ruzgiene a kol. (2015) při tvorbě digitálního modelu povrchu.

Aasen a kol. (2015) sledovali závislost výšky porostu a zdravotního stavu porostu. Zdravotní stav porostů sledovali na základě vypočtených indexů, které byly vypočteny z hodnot odrazivosti získaných z hyperspektrálního senzoru. Pomocí indexů zhodnotili stav rostlin z hlediska biochemického a biofyzikálního. K odvození výšky porostu bylo využito snímkování povrchu bez plodiny a následně s plodinou.

Velmi se rozšiřuje také využití DMT vytvořeného pomocí UAV při studiu eroze Pineux a kol. (2016). Klasické měření eroze je totiž náročné na pracovní síly, což proces prodražuje. Při studiu eroze je nutné vytvořit velmi podrobný DMT s velikostí pixelu např. 6 cm.

Někteří autoři se také zaměřili na ověření přesnosti získaného digitálního modelu terénu. K ověření lze využít měření v terénu. Lze změřit více bodů a následně některé použít pro georeferencování modelu a některé pro ověření přesnosti modelu. Uysal a kol. (2015) ověřil přesnost digitálního modelu terénu, který vznikl z RGB snímků pořízených UAV při letu v 60 metrech nad terénem. Digitální model terénu georeferencoval pomocí 27 bodů, které byly zaměřeny v terénu. Dále bylo zaměřeno 30 kontrolních bodů, které sloužili k ověření správnosti modelu. Průměrná střední chyba byla 6,62 cm.

Vliv směru letu UAV na vytvoření digitálního modelu povrchu pěstované plodiny sledoval De Souza a kol. (2017). Území bylo nalétáno ve směru sever-jih a západ-východ. Nejpresnější výsledek dosahoval model, který byl vytvořen ze snímků z obou letů. Použitím snímků o obou letů se zvýšil překryv jednotlivých snímků, což mělo vliv na generovaný model. Vliv míry překryvu snímků a výšky letu UAV studoval Torres-Sánchez a kol. (2017). Snímky byly pořízeny ve výšce 50 a 100 m. Snímkování bylo prováděno nad sadem olivovníků.

Byl pozorován vliv faktorů na rychlost výpočtu modelu, na kvalitu tvorby 3D modelu stromu olivovníku a detekci jednotlivých stromů v sadu. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při podélném překryvu 95 % a příčném překryvu 60 % a výšce letu 100 m.

3.4 Digitální model terénu

Digitální model terénu (DMT) je „digitální reprezentace reliéfu zemského povrchu v paměti počítače, složená z dat a interpolačního algoritmu“ (VÚGTK, 2004). Ve stejném významu je využívám pojem digitální model reliéfu (DMR). Anglickým překlad je digital terrain model (DTM), který je využíván v literatuře. V USA je toto označení používáno pro model, který obsahuje výškové body, které jsou doplněny dalšími důležitými terénními charakteristikami (liniemi např. hrází nebo vodních toků). Méně používaným termínem je digital elevation model (DEM).

Dalším důležitým pojmem je digitální model povrchu (DMP), což je označení pro zobrazení povrchu terénu a všech objektů na něm (střech, korun stromů atd.) (Brůha, 2016). Anglický překlad je digital surface model (DSM). DMP se vytváří pomocí automatizovaného sběru bodů pomocí obrazové korelace ve fotogrametrii, pomocí laserového skenování nebo radarového měření pomocí dálkového průzkumu Země (DPZ) (Oršulák, 2010). Následným zpracováním se vytváří DMT.

DMT se využívá v mnoha oborech. Využívá se ve vědách o Zemi (např. v geologii, hydrologii nebo geomorfologii), ve stavebnictví (projektování staveb nebo vizualizace), zemědělství (definování erozních pozemků) atd. DMT může být vytvářen různými způsoby a následně prezentován různými modely.

3.4.1 Rastrový model a jeho využití

V rastrovém modelu je povrch reprezentován pravidelnou mozaikou buněk (pixelů) (Oršulák T., 2010). Každý pixel má stejnou velikost. Buňky jsou většinou čtvercového tvaru. Každá buňka rastru má určenou x a y prostorovou souřadnici. Třetí hodnota (z hodnota) vyjadřuje prezentovaný jev. Jedná se většinou o jev, který je spojitý. Může jím být např. teplota vzduchu, množství srážek nebo nadmořská výška atd. Pokud rastr vyjadřuje nadmořskou výšku, reprezentuje ji hodnota z (Brůha, 2016). Další skupinou jsou primární obrazová data rastrového charakteru. Patří sem družicová obrazová data, letecké měřické snímky a fotografie (např. budov). Primární obrazová data nesou informaci o odraženém (vyzařovaném) elektromagnetickém záření. V závislosti na výšce letu a velikosti jednotlivých buněk snímače se u těchto dat mění velikost pixelu. U družicových snímků se většinou velikost pixelu pohybuje v řádu desítek až stovek metrů.

Například družice SPOT5 má rozlišení 10 x 10 m. Letecké měřické snímky mají rozlišení v řádu desítek centimetrů. Například rozlišení ortofota České republiky, které pořizuje Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK), má 20 cm. V poslední době se zvyšuje počet použití přístrojů UAV pro účely podrobného mapování. Digitální snímky pořízené drony mají rozlišení v řádu jednotek centimetrů.

Při studiu množství biomasy, určování výšky rostlin a velikosti výnosu zemědělských plodin lze využít jak data pořízená družicovými snímky, tak data pořízená z dronů. Hlavní roli pro správný výběr zdroje dat by měla hrát velikost sledovaného území. Pro globální výzkumy, kdy se zkoumají celé světadíly nebo státy, je dostatečné rozlišení v řádu desítek i stovek metrů. Pokud je zkoumaná plocha velká několik km², tak toto rozlišení může být nedostatečné. Je nutné pak využívat data, která mají rozlišení v řádu metrů nebo centimetrů.

Velmi důležitým parametrem u rastrového modelu je velikost pixelu. U obrazových dat, které jsou zdrojem informací, je velikost pixelu daná.

Rozlišení digitálního výškového modelu 10 m využili pro sledování vlivu topografie terénu na množství biomasy a velikosti indexu NDVI Riihimäki a kol. (2017). Stejného rozlišení byly i snímky z družice SPOT 5. Území bylo velké několik km², proto je toto rozlišení dostatečné. Pro studium vlivu různých algoritmů pro výpočet směru odtoku byl použit DEM s rozlišením 10 m (Pei a kol., 2010). Velikost území byla 51,76 km². Rozlišení 10 m také použili Radula a kol. (2017), kteří studovali závislost velikosti vlhkostního indexu na půdní vlhkosti, kdy porovnávali různé algoritmy pro výpočet směru odtoku. Rozlišení 10 m bylo použito pro studium vlivu topografie terénu na rozložení extrémních teplot na poli (Dixit. a Chen, 2010). Velikost pixelu 10 m použili i Green a kol. (2007). Zkoumali závislost topografických charakteristik (nadmořské výšky, sklonu, orientace, zakřivení povrchu, velikosti odtokové oblasti a TWI indexu) na velikost výnosu za pomoci nástrojů neuronových sítí a regrese. Větší rozlišení (4,41 m) využili pro tvorbu výškového modelu Iqbal a kol. (2005). Výškové body byly nasbírány pomocí přenosného GPS přístroje, který měřil s přesností 1 cm v horizontální rovině a 2 cm ve vertikální rovině. Rozlišení DEM 3 m použili Wu a kol. (2016) pro výpočet vlhkostního indexu (TWI) a půdního topografického indexu (STI). DEM byl vytvořen pomocí LIDARu. Rozlišení 1 m použili při studiu vlivu topografie terénu na výnos brambor Persson a kol. (2005). Digitální výškový model vznikl interpolací bodů, které byly nasbírány mobilním GPS přístrojem. Byl nasbíráán jeden bod každého 1,5 m. Další možností sběru bodů je využití přístroje, který

je umístěn na zemědělském stroji. Takovou možností využili Kaspar a kol. (2004). Měřené body byly zaznamenávány každé 4 m. Následně byl vytvořen digitální výškový model s rozlišením 2 m. Marques Da Silva a Alexandre (2005) využili DEM s rozlišením 1 m. Výšková data byla pořízena pomocí GNSS přístroje pro pole o velikosti 26 ha. Data byla pořízena každých 5 m v řadě. Mezi řadami byla vzdálenost 15 m.

Při použití dronu se velikost pixelu sníží a dostává se do centimetrových hodnot. Při studiu možností detekce poléhání rýže na poli byly využity snímky s prostorovým rozlišením 5,5 cm (Yang a kol., 2017). Podobného rozlišení využil Van Iersel a kol. (2018) při vyhodnocení výšek různých druhů porostu. Snímky byly foceny z výšky 233 m, a proto stačilo k pokrytí 306 ha pouze 424 snímků. Při sledování výšky cukrové řepy byly vytvořeny modely povrchu a terénu s rozlišením 50 cm (De Souza a kol., 2017). Velmi velké rozlišení DMT (5 cm) použil Chang (2017) pro vytvoření modelu výšek čiroku. Velmi podrobný model je nutné použít pro studium eroze. Velikost pixelu by měla být v řádu centimetrů (např. 6 cm) (Pineux a kol., 2016).

Výhodou rastrového modelu je jednoduchost výpočtu mezilehlých bodů. Nad rastrovým modelem se také rychleji provádějí různé analýzy. Pokud existuje více rastrových modelů pro stejné území lze je snadno porovnávat. Je možné nad nimi provádět různé matematické operace a výpočty. Nevýhodou rastrového modelu je, že i v oblastech, které mají stejnou nadmořskou výšku (roviny nebo vodní plochy) se musí vytvořit buňky rastru, které mají ale stále stejnou hodnotu. Tím se zbytečně zvyšuje objem dat.

Rastrový model vzniká metodou interpolace. Interpolace je proces výpočtu neznámých hodnot určitého jevu na určitém místě na základě známých hodnot (Křikavová, 2009). Prostorové jevy jako teplota vzduchu, množství srážek nebo nadmořská výška jsou spojitě. V prostoru se pozvolna mění, proto lze na základě daných metod dopočítat.

Metoda inverzních vzdáleností (Inverse Distance Weighted, IDW) je metoda, kdy se hodnota bodu vypočítává z hodnot bodů, které jsou v jeho okolí. Na základě vážených průměrů, kde váha je nepřímo úměrná vzdálenosti od počítaného bodu, se odvodí hodnota bodu (Brůha, 2016). Pokud je váha vyšší, tak hodnota bodů je více závislá na hodnotách bližších bodů.

Vzdálenější body mají na výpočet menší vliv. Metoda umožňuje volit počet bodů, které budou do výpočtu zahrnuty. Používá se pro pravidelně i nepravidelně rozmístěné body. Lepších výsledků je dosaženo při pravidelně rozmístěných bodech. Výsledný model má vyhlazený povrch.

Další metodou je metoda přirozených sousedů (Natural Neighbor). Tato metoda je také založena na váženém průměru. Metoda využívá vytvořenou síť Thiessenových polygonů. Body, které jsou součástí sousedních Thiessenových bodů jsou zahrnuty do výpočtu. Váhami je plocha polygonů, které navazují na interpolovaný bod (Křikavová L., 2009).

Další metoda Spline generuje model s minimální křivostí (Pacina a Brejcha, 2014). Prochází co nejpřesněji vstupními body (Oršulák T., 2010). Metoda Spline při výpočtu používá segmentaci, pomocí níž je oblast rozdělena na menší části, které jsou reprezentovány jinou spline funkcí. Modifikací parametrů funkce je možné povrch vyhladit. Při použití metody Spline jsou vypočítány nižší i vyšší hodnoty než jsou ve vstupních datech.

Méně využívanou metodou je kriging, který patří mezi geostatistické metody. Metoda kriging zkoumá prostorové chování jevu (prostorovou autokorelaci). Na základě autokorelace jsou zjištěny váhy jednotlivých bodů (Křikavová L., 2009).

Vytvořený DEM se může dále upravovat. Při některých použitích DEM není žádoucí, aby měl DEM bezodtoké oblasti tzv. sinks. Jsou to místa, kam v rámci modelu voda pouze přitéká, ale neodtéká. Některé algoritmy přímo při vytváření modelu s tímto jevem počítají a přímo vytváří hydrologicky korektní model. Jedná např. o algoritmus „Topo to raster“ implementovaný v softwaru ArcGIS. Po jeho použití v modelu nevzniknou oblasti, které by okolí měly vyšší. Ostatní algoritmy mohou vytvářet bezodtoké oblasti. Pokud není vhodné, aby model měl bezodtoké oblasti, je možné tyto oblasti vyplnit. Software ArcGIS nabízí funkci „Fill“. Tato funkce zajistí, že žádná bezodtoká oblast v modelu nebude. Je možné navíc zadat mez, kdy se prohlubeň má vyplnit a kdy už ne. Tuto funkci využil Iqbal a kol. (2005) při výpočtu topografických charakteristik (nadmořská výška, sklon, orientace, zakřivení terénu, směr odtoku, akumulace vody, délka odtoku, vlhkostní index a index transportu sedimentu) z DEM při studiu závislosti těchto charakteristik na výnosu bavlny. Při studiu eroze na zemědělských pozemcích použili pro odstranění prohlubní tuto funkci také Pineux a kol. (2016). Při studiu závislosti výnosu na vzdálenost od odtokových linií využili vyplnění prohlubní i Marquez da Silva a Silva (2007).

Pro oblasti s malým zásahem člověka do přírody doporučují využití funkce vyplnění Moore a kol. (1991). Upozorňují ale i na existenci typů krajiny, kde jsou bezodtoké oblasti častým jevem (např. prairie v Americe).

Pomocí dronů lze vyfotografovat zemský povrch a následně fotogrametricky vytvořit DMT. Pro zpracování snímků je potřeba, aby se snímky překrývaly. Překryv musí být

nejméně 60 % (Pacina a Brejcha, 2014). Překryv je důležitý pro to, aby každé území bylo viditelné minimálně na dvou snímcích. Jednotlivé řady snímků by se měly překrývat minimálně z 20 %. Při vyhodnocení výšek různých druhů porostů využili Van Iersel a kol. (2018) překryv 70 až 90 % v podélném směru a 60 až 80 % v příčném směru. Při studiu eroze použil Pineux a kol. (2016) překryv 80 % v příčném i podélném směru letu. V rámci softwaru, který je dodáván s profesionálními drony, je možné si nastavit minimální procentuální překryv snímků. Obecně platí, že čím je překryv snímků větší, tím se zvětšuje přesnost daného DMT (Torres-Sánchez a kol., 2017). Se zvětšujícím se překryvem se zvyšuje i počet snímků potřebných pro vytvoření DMT. To zvyšuje nároky na hardware, který výsledný DMT vytváří. V rámci softwaru lze také nastavit požadované rozlišení. Podle toho se provádí snímkování v určité výšce nad terénem. Pokud se snímkuje z menší výšky, tak je opět potřeba poříditi větší množství snímků.

Rozlišení pixelu modelu DMT při využití snímků z dronu lze vypočítat pomocí následující rovnice:

$$GSD = p \frac{H}{c}$$

kde p je velikost pixelu senzoru, H výška letu a c je ohnisková vzdálenost kamery (Ruzgiene a kol., 2015).

3.4.2 TIN

TIN (Triangulated Irregular Network) reprezentuje povrch formou nepravidelných trojúhelníků, které mezi sebou mají topologické vztahy (Oršulák T., 2010). Mezi hlavní výhody tohoto modelu patří adaptabilita na množství vstupních bodů. V oblastech s vysokou hustotou výškových bodů se vytváří velké množství trojúhelníků a v oblastech s malým množstvím bodů se vytváří velké trojúhelníky. To je výhoda oproti rastrovému modelu, kde jsou buňky rastru stejně velké. I na rovině tak musí být vytvořeny buňky rastru se stejnou nadmořskou výškou. TIN model je z tohoto důvodu méně datově náročný. Proces vytváření TIN modelu se nazývá triangulace. Triangulací by se měly vytvářet trojúhelníky, které se nejvíce podobají rovnostranným trojúhelníkům. Mezi nejpoužívanější metodu triangulace patří Delaunayho triangulace, která toto pravidlo splňuje aplikací pravidla minimálního úhlu. Triangulace maximalizuje minimální vnitřní úhel vytvářených trojúhelníků. TIN model je nevhodný pro porovnávání hodnot odvozených z digitálního modelu terénu s hodnotami z jiných vrstev (např. data srážek).

Naproti tomu rastrový model je z důvodu pravidelného uspořádání buněk pro operace, kdy se porovnávají hodnoty z více vrstev, více vhodný.

3.5 Zdroje digitálních modelů terénu

Existují různé zdroje pro tvorbu digitálních výškových modelů (DEM) a digitálních modelů povrchu (DMP). Lze pracovat s již vytvořenými modely nebo vytvořit vlastní model na základě měření v terénu. Vlastní modely jsou používány pro menší území. Jedná se většinou o území jednoho pole nebo několika polí, které jsou v různých sledovaných lokalitách. Pro studie, které řeší území v řádu km², se přebírají již vytvořené většinou národní modely. Existují modely vytvořené na národní nebo mezinárodní úrovni. Každý stát má svůj národní DEM nebo DMP. Na území České republiky existuje několik verzí DEMu. Jednotlivé verze byly vytvářeny různými způsoby. Nejnovějším modelem je DMR 5G. Také existují mezinárodní DEM (např. model SRTM nebo Aster).

3.5.1 Způsoby pořizování digitálních modelů terénu

Podle způsobu pořízení dat lze metody rozdělit do dvou kategorií: přímé (kontaktní a bezkontaktní) a nepřímé (Pacina a Brejcha, 2014). Přímé metody jsou metody, kdy se získávají měřená (primární) data. Přímé metody lze dále dělit na kontaktní a bezkontaktní. Při kontaktních metodách se měření provádí přímo v terénu. Mezi takové metody lze zařadit nivelaci, tachymetrii nebo měření pomocí GNSS přístrojů. Výhodou kontaktních metod je velká přesnost naměřených dat. Nevýhodou je časová náročnost při mapování větších území. Při bezkontaktních metodách není měřicí přístroj přímo na místě měření. Měří se většinou z atmosféry pomocí metod dálkového průzkumu země (DPZ). Mezi takové metody patří fotogrammetrie, laserové skenování nebo radarové snímání. Výhodou je malá časová náročnost pro zmapování velkých územních celků. Naopak takto vzniklé DMT jsou méně přesné než DMT vzniklé při použití přímých metod.

Nepřímé metody jsou takové metody, při kterých se zpracovává již existující DMT. Z analogových map lze vektorizací vrstevnic získat výšky terénu. Nivelace a tachymetrie jsou geodetické metody, které se používají pro mapování malých území (např. stavby, nové dálnice atd.). Tachymetrii použil CHI a kol. (2009) při sledování závislosti topografických charakteristik na výnosu pšenice. Další metodou je použití systému GNSS. Tento satelitní navigační systém je složen z několika segmentů. V současnosti

se používají navigační systémy několika zemí. Mezi nejznámější systém patří GPS Navstar provozovaný USA. Dalším systémem je ruský GLONASS. V Evropě vzniká systém GALILEO. Systémy jsou tvořeny soustavou družic, které obíhají kolem Země. Na Zemi je pak přijímač, který získává z družic informaci o její poloze a času vyslané zprávy. Pokud přijímač tyto informace zachytí ze čtyř družic, může přesně určit svou polohu. Na našem území se polohová přesnost pohybuje kolem 5 až 10 m (Štroner, 2016). Je několik metod, jak tuto přesnost zvýšit. Mezi hlavní metody patří metoda DGPS (diferenciální GPS) a metoda RTK (Real Time Kinematic). Metoda DGPS je založena na umístění jednoho přijímače na místo o známých souřadnicích. Druhý přijímač se pohybuje a získává korekce z prvního přijímače. Metodu DGPS použili Holman a kol. (2016) při tvorbě DMP a DEM, kdy následně z rozdílu těchto modelů určili výšku rostlin. Rozšířenou metodou je metoda RTK. Při této metodě existuje síť referenčních stanic. V České republice existuje síť CZEPOS (provozuje ČÚZK) nebo síť Trimble VRS NOW (Trimble). Přístroj, se kterým se měří, z těchto stanic získává korekční signál. Signál je získáván z internetu pomocí GSM modemu. Za příjem tohoto signálu se platí. Při použití tohoto typu korekcí je možné si nastavit výslednou velikost odchylky. Ta se může pohybovat v závislosti na nastavení přesnosti od cm do jednotek metrů. Podle míry odchylky se také mění cena služby. Metodu RTK pro sběr vlíčovacích bodů využil Chang (2017) při vytváření modelu výšek vegetace, Pineux a kol., 2016) při studiu eroze a Uysal a kol. (2015) při tvorbě DEM. Ve všech studiích byly změřeny tyto body s přesností okolo 1 cm. Vlícovací body by měly být rozmístěny na různých místech v území a neměly by být rozmístěny v jedné přímce. Měly by být rozmístěny na hranicích i ve středu sledovaného území. Bodů nemusí být mnoho. Záleží na velikosti sledovaného území. Na území velké několik desítek ha je možné mít okolo 10 vlíčovacích bodů.

Pro DMT je nutné určit souřadnicový systém. Jsou dva způsoby, jak toho dosáhnout. Fotografická jednotka může mít zabudovaný GNSS systém přímo v těle přístroje. V takovém případě se souřadnicový systém DMT přiřadí přímo při sestavování modelu. Běžně dostupné fotoaparáty v základní výbavě modul GNSS nemají.

V takovém případě je nutné ve sledovaném území rozmístit orientační (vlíčovací) body, které mají přesně určené souřadnice. Pomocí vlíčovacích bodů se digitálnímu modelu přiřadí souřadnicový systém.

3.6 Topografické charakteristiky terénu

Výnosy plodin jsou ovlivňovány mnoha faktory. Výnosy ovlivňují klimatické, hydrologické, půdní a v neposlední řadě také topografické faktory. Jedná se o topografické charakteristiky vyplývající z průběhu terénu v místě pěstování. Topografie terénu má velký význam na půdní vlhkost (Radula a kol., 2018). Terén přímo ovlivňuje směr odtoku vody a její akumulaci. Toto jsou dva faktory, které ovlivňují přenos a akumulaci látek. Proudění povrchové a podpovrchové vody přímo ovlivňuje transport látek, které mají vliv na úrodnost půdy. Z vyšších míst, kde je navíc větší sklon jsou látky vodou unášeny do nižších partií, kde dochází k jejich akumulaci. Pokud dochází k přímému nesení zrněk půdy, může dojít k odnosu do míst, kde se voda akumuluje a odtéká. Jedná se o nejbližší strouhy a potoky. Pokud jsou látky a půdní hmota odnese až sem, tak dochází ke ztrátě těchto látek. Pokud se jedná o látky, které znečišťují okolí a jsou plošného charakteru, můžou mít vliv na ekosystém v místě, kde dochází k jejich akumulaci (Infascelli, 2013).

Velký vliv na výnos má také velikost a rozložení srážek v průběhu vegetačního období. Každá rostlina potřebuje pro svůj ideální růst jiné rozložení srážek v průběhu roku. Množství srážek má velký vliv na míru korelace mezi výnosem a topografickými indexy (Chi a kol., 2009). Větší výnos je dosahován v depresních partiích, naopak na kopcích je výnos nižší (Iqbal a kol., 2005). Rozdíl mezi výnosem v depresích a na kopcích je výrazný v sušších letech, kdy rostliny ve vyšších partiích mají větší nedostatek vody. Pokud je srážek dostatečné množství není rozdíl mezi výnosem tak výrazný. Rostlina má dostatek vláhy ve vyšších partiích i v nižších partiích. Naopak při nadprůměrných srážkách může docházet v nižších partiích k akumulaci vody a vytváření míst se stojící vodou. Pokud je rostlina, která na to není určená, ve stojící vodě, může docházet naopak k zastavení růstu a odumírání.

Topografické indexy lze využít k určení erozních rýh na zemědělských pozemcích. Sheshukov a kol. (2018) zkoumali čtyři indexy. Byli to CTI (compound topographic index), SA (kombinace sklonitosti a plochy), AS^2 a WTI (wetness topographic index). Erozními rýhami je unášena voda a v ní rozpuštěné půdní částice a živiny, což má negativní vliv na úrodnost půdy.

Hoffmeister a kol (2015) sledovali závislost výšky cukrové řepy, ječmene a pšenice na topografických indexech. Zároveň byla tato závislost sledována v průběhu růstu rostlin. Sledovali tyto topografické indexy: sklon, zakřivení, podélné zakřivení a profilové zakřivení. Iqbal a kol. (2005) sledovali vliv půdních vlastností a topografických

charakteristik na výnos bavlny. Sledovali vliv nadmořské výšky, sklonu, orientace, zakřivení, směru odtoku, akumulace odtoku vody, délky odtoku, vlhkostního indexu a indexu transportu sedimentů. Největší vliv na výnos měla kombinace nadmořské výšky a směru odtoku. Riihimäki a kol. (2017) sledovali vliv topografie terénu na velikost biomasy v oblastech kolem polárního kruhu ve Finsku. Jednalo se o území velkého rozsahu (několik km²), proto zde byli velké rozdíly v nadmořské výšce, která měla hlavní vliv na množství biomasy. Významný byl také vliv míry slunečního osvětlení. Dále byla použita orientace a TWI.

Topografické charakteristiky terénu mají také vliv na velikost biomasy (Riihimäki a kol., 2016). Ve studii byl vyhodnocen vztah topografických charakteristik terénu (např. orientace svahu) a vegetačního indexu NDVI na množství biomasy. Na plochách, kde byla odebrána biomasa byl určen index NDVI. Hodnoty odrazivosti byly získány ze satelitního měření z družice SPOT. Digitální model terénu byl převzat z národní databáze Finska a měl rozlišení 10 m. Největší vliv na velikost biomasy (hodnotu NDVI indexu) má nadmořská výška a míra osvětlení svahu (expozice svahu). Největší množství biomasy bylo v nižší nadmořské výšce a na více osvětlených místech.

Vytvářet digitální model povrchu pomocí UAV je přínosné při studiu množství stonků rýže, která polehává v důsledku kombinace silných srážek a větru Yang a kol. (2017). Kromě digitálního modelu povrchu byly využity metody klasifikace barevného obrazu a metody pro klasifikaci textury obrazu. Na základě těchto analýz byl rozlišen krajinný pokryv území a nalezeny plochy, kde došlo k polehnutí stonků rýže. Vliv jednotlivých parametrů topografie terénu na výnos sledoval Muñoz a kol. (2014). Byla sledována závislost nadmořské výšky, svažitosti, akumulace vody, délky odtokové linie, zakřivení povrchu pole a míry osvětlení terénu na výnos kukuřice a červeného jetele. Každá plodina je ale ovlivňována jinak v závislosti na různých klimatických podmínkách v průběhu celého roku. Jetel je pěstován na podzim, v zimě a na jaře. Následně je zaseta kukuřice. V kombinaci s klimatickými podmínkami topografické parametry ovlivňují růst jednotlivých plodin jiným způsobem. Největší vliv na růst rostlin měla svažitost a míra akumulace vody.

Vliv topografie terénu na rozložení teplot na poli sledoval Dixit a Chen (2010). Provedli měření teploty na poli na 25 bodech v průběhu dvou let, kdy jeden rok bylo pole bez plodiny a druhý rok se zde pěstovala pšenice. Digitální model terénu byl vytvořen interpolací bodového měření. Byl sledován vliv nadmořské výšky, expozice a sklonitosti

na rozložení teplot. Bylo zjištěno, že rozložení nižších teplot je více ovlivněno terémem než rozložení vyšších teplot. Zároveň model více vysvětloval rozložení teplot, pokud bylo pole bez plodiny.

Marques da Silva a Silva (2000) analyzovali vztah primárních a sekundárních atributů na různá pole s kukuřicí, která byla zavlažována. Z primárních atributů měla největší vliv nadmořská výška a sklon. V nižších nadmořských výškách byl výnos vyšší než ve vyšších nadmořských výškách. U sekundárních atributů byl zjištěn největší vliv u vlhkostního indexu a vzdálenosti od akumulace odtoku. V dalších studii zjistili vliv vzdálenosti od akumulace odtoku na výnos zavlažované kukuřice Marques Da Silva a Silva (2006). Vliv kombinace topografických podmínek a půdních charakteristik na výnos sledovali v další studii Marques Da Silva a Alexandre (2005). Byl zjištěn vliv velikosti plochy odtoku, sklonu svahu a vlhkostního indexu na výnos. Pokud plocha odtoku je větší, vzrůstá možnost, že do plochy přitéká více vody, která bude dostupnější pro rostliny. Zároveň vzrůstá riziko, že pokud bude vody nadbytek, nedokážou rostliny tuto vodu přijmout a výnos bude klesat. Byla zjištěna negativní závislost mezi draslíkem a sklonem svahu. Naopak byla zjištěna pozitivní závislost mezi hodnotou pH nebo množstvím vápníku a zakřivením terénu. Výnos kukuřice byl také pozitivně korelován s množstvím draslíku v půdě.

3.6.1 Dělení topografických charakteristik

Topografické parametry lze dělit na dvě skupiny (Wilson a Gallant, 2000). První skupinou jsou primární atributy. Tyto primární atributy se vypočítávají přímo z DEM. Nejvíce používané primární atributy jsou: nadmořská výška, sklon, orientace, zakřivení, délka toku a sběrná plocha odtoku (Marques da Silva a Silva, 2008). Primární atributy nejsou tak komplexní. Například u sklonu svahu nelze rozlišit, zda se jedná o malý sklon ve velké nadmořské výšce nebo naopak o velký sklon v nižší nadmořské výšce. Toto je jisté omezení, pokud se např. porovnávají pole nacházející se v různých nadmořských výškách. Druhou skupinou jsou sekundární parametry. Sekundární parametry jsou indexy, které jsou složeny z primárních parametrů. Nejčastěji používanými sekundárními parametry jsou: směr odtoku (flow direction), akumulace odtoku (flow accumulation), vzdálenost od akumulace odtoku (distance to flow accumulation - DFL), topografický index vlhkosti (topographic wetness index), index proudové síly (stream power index - SPI) a index transportu sedimentů (sediment transport index - STI) (Marques da Silva a

Silva, 2008). Sekundární parametry popisují nebo charakterizují prostorovou proměnlivost specifických procesů, které se vyskytují v přírodě (Moore a kol., 1991). Může se jednat např. o distribuci vody v půdě nebo erozi půdy.

Persson a kol. (2005) sledovali vliv šesti topografických indexů na výnos brambor ve Švédsku. Byly to následující indexy: délka odtoku, kombinace dvou délek odtoku, horizontální index, vertikální index, plocha odtoku a kombinovaná plocha odtoků. Kaspar a kol. (2004) sledovali vliv 20 parametrů půdy na výnos kukuřice a sojových bobů. Mezi parametry byli i primární topografické parametry. Jednalo se o nadmořskou výšku, sklon, zakřivení příčné i podélné (plan curvature a profile curvature) a hloubku sníženin (depth depression). Na základě faktorové analýzy byla zjištěna negativní závislost výnosu na sklonu a pozitivní závislost na hloubce sníženin a zakřivení terénu.

Topografické charakteristiky jsou často také porovnávány s půdními charakteristikami. Sleduje se obsah organické hmoty v půdě, množství jednotlivých zrnitostních kategorií a obsah anorganických látek (draslík, fosfor atd.).

3.6.2 Sklon

Sklon je podíl rozdílu výšek mezi dvěma body. Vyjadřuje svažitost terénu. Tato charakteristika patří mezi často využívané indexy. Výhodou tohoto indexu je jednoduchost výpočtu. Jedná se o základní charakteristiku terénu, a proto je tato funkce součástí většiny programů, které pracují s rastrovými daty (tvorba DMT). Sklon lze vyjádřit ve stupních nebo v procentech. Ve stupních se počítá následovně:

$$\tan\theta_s = \frac{h}{d}$$

V procentech se vyjadřuje následovně:

$$\tan\theta_p = \frac{h}{d} * 100$$

kde θ_s je sklon (ve °), θ_p (v %), h je výškový rozdíl (v m) a d je vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším bodem (v m).

Když je rozdíl výšek stejný jako vzdálenost dvou bodů v dvojrozměrném prostoru, tak je sklon 45° nebo 100 %.

V rastrovém modelu je sklon buňky určen z okolních osmi buněk. V softwaru ArcGIS se sklon (ve °) vypočítá následovně:

$$sklon = \arctan \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} * \frac{180}{\pi}$$

a	b	c
d	e	f
g	h	i

$$\frac{dz}{dx} = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / (8 * velikost\ buňky\ rastru)$$

$$\frac{dz}{dy} = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / (8 * velikost\ buňky\ rastru)$$

3.6.3 Orientace

Orientace je směr buňky rastru vůči světovým stranám. Může nabývat 0 až 360°, kde 0° je sever, 90° východ, 180° jih a 270° západ. V rastrovém modelu je orientace svahu určena z osmi buněk v okolí. V softwaru ArcGIS je výpočet proveden následovně:

a	b	c
d	e	f
g	h	i

$$\text{orientace} = \arctan2\left(\frac{dz}{dy}, -\frac{dz}{dx}\right) * \frac{180}{\pi}$$

kde

$$\frac{dz}{dx} = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g))/8$$

$$\frac{dz}{dy} = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c))/8$$

Pokud vychází záporná hodnota, je hodnota převedena do kladného rozmezí 0° až 360°.

3.6.4 Akumulace odtoku vody

Akumulace odtoku (flow accumulation) udává součet hodnot buněk, které přispívají do buňky. Pro vyhodnocení velikosti akumulace odtoku je nutné nejdříve určit směr odtoku (flow direction) z každé buňky rastru.

Následně je možné určit i tzv. odtokovou trasu, která je uspořádaným řetězcem buněk vzniklým postupným sledováním směru odtoku. Software ArcGIS pro výpočet směru odtoku používá D8 algoritmus, D-Infinity (DINF) a Multi Flow Direction (MFD).

D8 algoritmus funguje následovně: z okolních osmi buněk se vybere buňka s největší změnou nadmořské výšky. Pokles se určuje následovně:

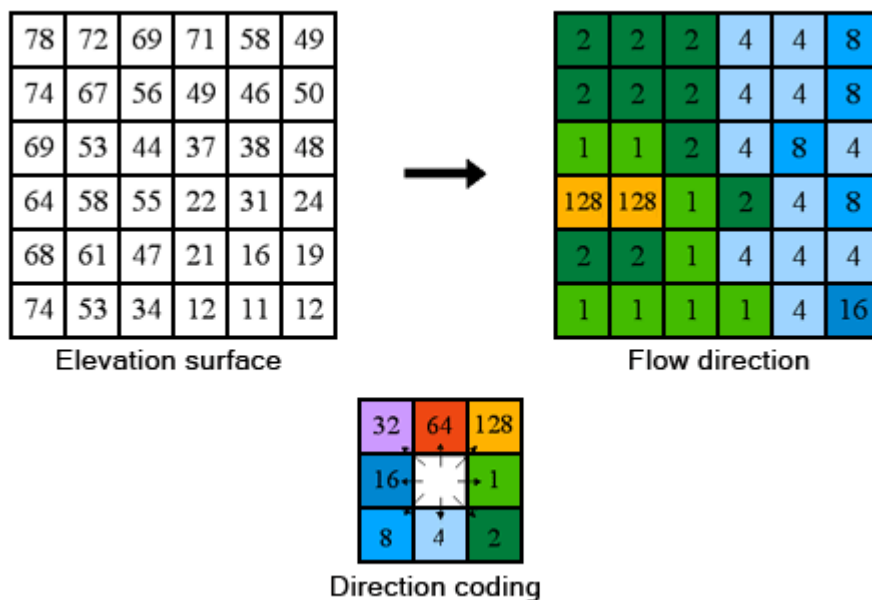
$$\text{největší pokles} = \frac{\text{změna výšky}}{\text{vzdálenost mezi buňkami}}$$

Vzdálenost mezi sousedními buňkami v ortogonálním směru je rovna velikosti pixelu. V diagonálním směru je vzdálenost center buněk rovna odmocnině z velikosti pixelu. Pokud je velikost buňky 1, tak vzdálenost v diagonálním směru je 1,414216. Pokud je největší pokles stejný mezi více buňkami, tak se zvětší posuzované okolí na 22 pixelů. Až je nalezen směr poklesu, tak se do buňky tento směr zaznamená. Pokud je jako odtoková určena buňka přímo vpravo, je označena číslem 1 (viz obrázek č. 3). Pokud žádná z buněk nemá nižší nadmořskou výšku, tak se buňce přiřadí hodnota nadmořské výšky podle buňky s její nejmenší hodnotou. Odtok je veden do této buňky.

Pokud je nadmořská výška stejná ve více směrech a jedná se o dno terénní prohlubně, směr odtoku není určen. Hodnota směru odtoku je určena jako součet hodnot směrů odtoků buněk se stejnou nadmořskou výškou. Pokud je změna nadmořské výšky doleva a doprava stejná, směr odtoku je určena jako součet ($16 + 1 = 17$).

Pokud je nadmořská výška stejná ve více směrech a nejedná se o dno terénní prohlubně, je použita jiná metoda.

Obr. 3: Princip výpočtu směru odtoku

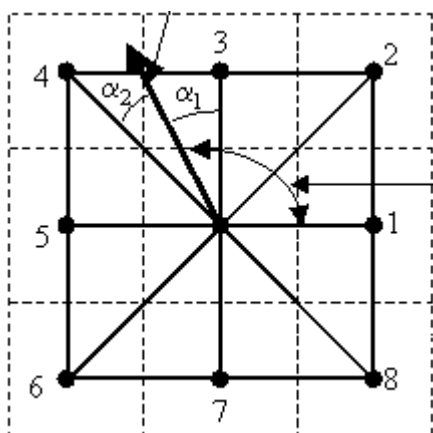


Zdroj: ESRI, 2018

Pokud mají všechny okolní buňky větší nadmořskou výšku a nelze tedy určit směr odtoku, je taková buňka označena jako dno (sink). Tyto „bezodtoké“ pixely musejí být následně vyplněny, aby se v modelu nevyskytovaly. V případě, že jsou tyto pixely na hranici zájmového území, nejsou vyplněny, protože nejsou kompletně obklopeny sousedy. Mezi výhody D8 algoritmu patří jeho jednoduchost a rychlost. Nevýhodou je, že příliš akumuluje odtok do jednoho místa. Na tento typ algoritmu také upozorňují ve své studii Peo a kol. (2010), kteří upozorňují, že odtok směřuje pouze do jedné buňky. Toto chování není vhodné především na plochách, které mají malý sklon. Zde je odtok směřován do více stran. Není tedy vhodné používat tento algoritmus na plošších místech s menším sklonem. Algoritmus D8 také nedostatečně pracuje s rozptýleným odtokem po svahu. Vznikají následně paralelní odtokové linie na plochých svazích.

Lepší výpočet akumulace odtoku nabízí algoritmus D – infinite. U algoritmu D – infinite jsou středy osmi okolních buněk spojeny se středem posuzované buňky. Vznikne trojúhelníková síť. Následně se určí, který trojúhelník má největší sklon. Tento trojúhelník označí dvě buňky rastru, do kterých bude rozdělena hodnota odtoku, podle velikosti úhlu, který svírá spojnice středů buněk rastru se směrem odtoku (obrázek č. 4). V důsledku toho není odtok příliš akumulován do jednoho místa.

Obr. 4: Princip vytvoření trojúhelníku algoritmu D - infinite



Zdroj: ESRI, 2018.

Třetí možností je použít Multiple Flow Direction (MFD) algoritmus. Tento algoritmus rozděluje hodnotu odtoku do všech buněk, které mají nižší nadmořskou výšku. Rozdělení probíhá pomocí vah, které se přidělí pixelům s nižší nadmořskou výškou. Pomocí těchto vah je rozdělena hodnota odtoku z buňky.

Po vytvoření vrstvy směrů odtoku je možné vypočítat, kolik buněk „přitéká“ do dané buňky. Buňky s velkým množstvím akumulace přítoku tvoří odtokovou síť. Buňky s nulovým přítokem jsou vyvýšená místa. Může se jednat o hřebeny kopců.

Tento index má vztah k distribuci vody na poli v závislosti na velikosti plochy, ze které voda odtéká. Obecně výnos plodiny klesá se vzrůstající vzdáleností od linií akumulace odtoku (Marques da Silva a Silva, 2006).

3.6.5 Topographic wetness index

Topographic wetness index (TWI) je jedním z nejvíce používaných sekundárních topografických indexů. Někteří autoři ho označují pouze jako topographic index (TI) (Infascelli, 2013), wetness index nebo topographic index (Sujit, 2015). TWI index patří k dobrým indikátorům rozložení půdní vlhkosti (Pei a kol., 2010) a (Sujit, 2015). Půdní vlhkost následně může určit velikost organické hmoty v půdě. Organická hmota zvyšuje vlhkost půdy zadržováním vody. TWI kombinuje změnu sklonu svahu v určité oblasti a sklon svahu v konkrétním bodě. Používá se k popisu hydrologických procesů v terénu. Pomocí tohoto indexu lze určit místa akumulace vody. TWI se vypočítá následovně:

$$TWI = \ln \frac{a}{\tan b}$$

kde a je poměr plochy, ze které voda přitéká a velikost dráhy odtoku a b je sklon svahu v konkrétním bodě. Proměnná a se udává v m^2m^{-1} . Sklon se udává v $m \cdot m^{-1}$.

Pokud model vyhodnotí některé plochy se záporným indexem, jedná se plochy konvexní. Následně se plochy se záporným indexem neberou v úvahu (Sheshukov a kol., 2018). Green a Erskine (2004) vysvětlily pomocí TWI velikost výnosu pšenice z 38 až 48 %. Pomocí topografického indexu a jeho pozměněných variací lze určit podmáčenou zem (Infascelli, 2013). Území s většími hodnotami indexu označuje sníženiny, kam voda stéká a shromažďuje se. Nižší hodnoty indexu označují plochy, ze kterých voda odtéká. Jedná se o nějaké vyvýšeniny. Pro rozdělení ploch do těchto dvou množin se stanovuje kritická hodnota TWI indexu (Sheshukov a kol., 2018). Vliv TWI na velikost výnosu pšenice v západní Kanadě sledoval (Chi a kol., 2009). Byl zjištěn rozdíl v korelaci indexu s výnosem mezi vlhkými a suššími roky. Větší vliv terénu u tohoto indexu byl zjištěn

v sušších letech. Byla zjištěna pozitivní korelace. Vlhkostní index je vhodný pro identifikaci ploch na poli, kde nižší výnos je způsoben nedostatkem vody (Marques Da Silva a Alexandre, 2005). Byla zjištěna větší závislost mezi velikostí organické hmoty v půdě a TWI indexu, pokud pro výpočet směru odtoku byl použit algoritmus, který dělil odtok do více buněk (Pei a kol, 2010).

3.6.6 Zakřivení (Curvature)

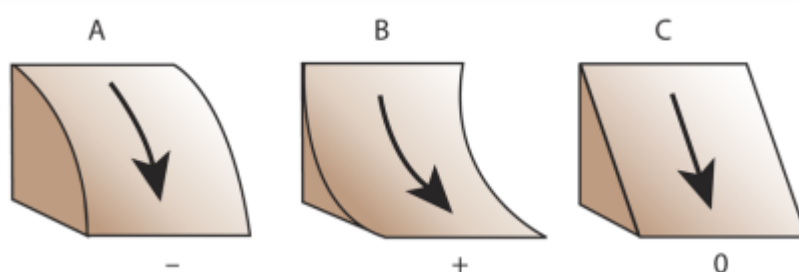
Pomocí tohoto indexu lze rozlišit tvar ploch. Tvar plochy ovlivňuje proudění vody po svahu nebo míru eroze. Lze rozlišit dva základní druhy zakřivení. Jedná se o profilové (profile) a podélné (plan) zakřivení. Negativní hodnoty označují místa, kde je tvar terénu konkávní. Jedná se o prohlubně. Naopak pozitivní hodnoty určují místa s konvexním tvarem terénu. Tuto charakteristiku použil Green a kol. (2007) při zkoumání závislosti topografických charakteristik terénu na výnosu ozimé pšenice. Tuto charakteristiku použil také Iqbal a kol. (2005) při studiu závislosti na výnosu bavlny a půdních vlastností. Byla zjištěna negativní závislost mezi zakřivením a výnosem. Vliv na tuto závislost měly srážky, kdy ve vlhčím roce byla závislost větší. Slabou závislost sledovali CHi a kol. (2009) mezi zakřivením a výnosem pšenice. Větší závislost byla sledována ve vlhčím roce. Zakřivení terénu použili jako jednu z topografických charakteristik i Guo a kol., (2012), kdy studovali vztah topografie terénu, vodivosti půdy a snímků Landsat na výnos bavlny. Munoz a kol. (2014) sledovali vliv pěstování červeného jetele jako předplodiny na výnos kukuřice. Na vyšší výnos kukuřice ve vlhčím roce mělo vliv větší zakřivení terénu. Naopak v sušším roce nebyl tento vliv pozorován. Naopak červený jetel produkoval více biomasy v rovinatějších částech pole. Pro sledování závislosti výšek plodin na topografii terénu využil zakřivení Hoffmeister a kol. (2015). Byla zjištěna závislost zakřivení na výšce cukrové řepy.

3.6.7 Profilové zakřivení (Profile curvature)

Profilové zakřivení se počítá ve směru maximálního sklonu. Popisuje rychlost proudění vody po povrchu, což má vliv na erozi půdy. Pokud je index kladný, jedná se o plochy konkávní. Pokud je index záporný, jedná se o plochy konvexní (viz obrázek č. 5). Po konvexních svazích teče voda pomaleji. Po konkávních plochách voda stéká rychleji. Nulové hodnoty značí rovnou plochu bez zakřivení. Vysokou pozitivní korelaci profilového zakřivení na výnos kukuřice a sójových bobů sledovali Kaspar a kol. (2004).

Zakřivení terénu má vliv na erozi. Při vodní erozi jsou unášeny půdní částice z horních partií do nižších. V konvexních místech dochází k odnosu půdy, a naopak na konkávních plochách dochází k její akumulaci. Do míst s konvexním zakřivením se dostává z vyšších partií méně vody, než pokud se jedná o místa s konkávním tvarem. Profilové zakřivení použili Marques Da Silva a Alexandre (2005), kteří sledovali jeho vliv na výnos kukuřice. Byla zjištěna pozitivní závislost zakřivení na pH půdy a obsahu vápníku. Guo a kol. (2012) zjistili slabou pozitivní korelaci s výnosem bavlny. Hoffmeister a kol. (2015) zjistili závislost profilového zakřivení na výšce ječmene a pšenice.

Obr. 5: Typy terénu u profilového zakřivení

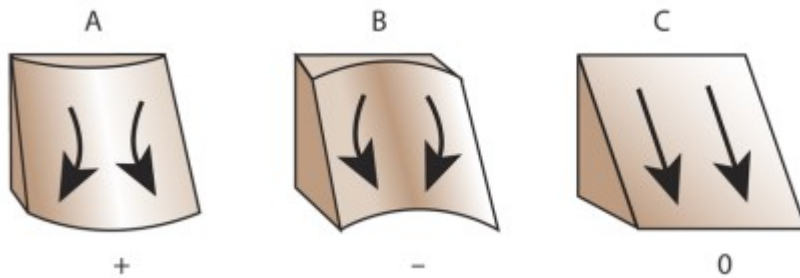


Zdroj: ESRI,2018

3.6.8 Podélné zakřivení (Planar curvature)

Podélné zakřivení je kolmé ke směru maximálního sklonu. Označuje, zda se na určité ploše proudění vody sbíhá ke středu nebo od středu. Popisuje obsah vody v půdě v daném místě. Kladné hodnoty označují konvexní plochy, kde je proudění od středu plochy. Záporné hodnoty označují konkávní plochy, kde je proudění do středu plochy. Nulové hodnoty označují rovné plochy, kde není žádné podélné proudění. Podélné zakřivení lze využít při výpočtu compound topographic indexu (CTI) Sheshukov a kol. (2018). Kaspar a kol. (2004) využili podélné zakřivení při studiu závislosti terénu na výnos kukuřice a sojových bobů. Slabou negativní korelaci s výnosem bavlny zjistili Guo a kol. (2012).

Obr. 6: Typy terénu u podélného zakřivení



Zdroj: ESRI, 2018

3.6.9 Vzdálenost od akumulace odtoku (distance to flow accumulation – DFL)

Výnos plodin závisí na dostupnosti vody v půdě. Byla zjištěna závislost mezi vzdáleností od akumulace odtoku a výnosem plodin. Se vzrůstající vzdáleností od odtokových linií se snižuje výnos. Jedním z důvodů vyšších výnosů v blízkosti odtokových linií je velikost půdního profilu. Místa blíž odtokovým liniím mají vyšší půdní profil (Marques Da Silva a kol., 2008). Rostliny tak mají větší možnost mít větší kořenový systém. Velikost půdního profilu ovlivňuje také možnost zadržování vody a obsah chemických látek v půdě. Byla zjištěna závislost mezi vlhkostním indexem a vzdáleností od akumulace vody. S narůstající vzdáleností klesá hodnota vlhkostního indexu. Vzdálenost od odtokových linií ovlivňuje množství dostupné vody. V blízkosti odtokových linií je dostupnost vody vyšší a v případě jejího nedostatku se okolo odtokových linií tento nedostatek neprojevuje tak výrazně, což má vliv na růst rostlin. Naopak přímo v místě odtokové linie může vznikat problém s odtokem, pokud je srážek velké množství (Marques Da Silva a kol., 2008). Voda se pak v místě odtokových linií zdržuje a může mít negativní vliv na růst rostlin z důvodu nadměrného obsahu vody v půdě. Kořeny rostlin nemají přístup ke kyslíku a může docházet k úhynu rostlin nebo ke snižování růstu a pozdějšímu dozrávání.

V jiné studii zkoumali Marques Da Silva a Silva (2006) vliv vzdálenosti od akumulací odtoku na výnos kukuřice a vlhkost sklizně na zavlažovaných polích mezi léty 2002 a 2004. Byl zjištěn vliv blízkosti akumulací odtoku na výnos z důvodu většího obsahu vody v půdě. Celkově se výnos kukuřice více lišil v letech, kdy nebylo zavlažování dostatečně veliké, což způsobovalo větší rozdíly v obsahu vody v půdě. Také vlhkost sklizených zrn byla ovlivněna vzdáleností od akumulace odtoku. Vyšší vlhkost sklizených zrn byla zjištěna v místech, které jsou blíže akumulacím odtoku. Výjimkou byl rok 2004, kdy

vlhkost sklizených zrn se měnila ve vztahu k vzdálenosti od akumulace odtoku jen málo a spíše narůstala se zvyšující se vzdáleností. V software ArcGIS se pro výpočet vzdálenosti od akumulace odtoku využívá funkce Euclidean distance. Pro výpočet vzdálenosti je nutné nejdříve určit směr odtoku (flow direction) z každé buňky rastru. Pro výpočet směru odtoku je možné použít tři algoritmy. Jedná se D8 algoritmus, D-Infinite algoritmus (DINF) a multi – flow direction algoritmus (MFD). Rozdíly mezi těmito algoritmy jsou popsány v části věnující se výpočtu akumulace odtoku vody.

3.6.10 Nadmořská výška

Lze rozlišit absolutní nadmořskou výšku a relativní nadmořskou výšku. Absolutní nadmořská výška je vztažena k hladině moře. Při studiu závislosti na výnosu je také využitelná relativní nadmořská výška. Relativní výška se počítá jako rozdíl nejmenší nadmořské výšky v dané lokalitě (plocha pole) a nadmořské výšky v daném bodě. Při použití relativní nadmořské výšky lze porovnat sledování mezi lokalitami. Pokud se tedy srovnává více lokalit mezi sebou, je vhodnější využít relativní nadmořskou výšku.

Hodnoty nadmořské výšky využili Kaspar a kol. (2004), kteří sledovali vliv vlastností půdy a topografie terénu na výnos kukuřice a sojových bobů. Green a kol. (2007) zkoumali závislost nadmořské výšky na výnosu ozimé pšenice.

Relativní nadmořská výška měla negativní korelaci s výnosem pšenice (Chi a kol., 2009). Na vyvýšených místech byl výnos menší. Tato negativní korelace byla sledována více autory. Guo a kol. (2012) sledovali vztah výnosu bavlny na půdní vlastnosti a topografické charakteristiky. Korelační koeficient měl hodnotu -0,35 v suchém roce a -0,2 ve vlhčím roce. Zaznamenali, že relativní výška měla větší závislost než zakřivení terénu. Závislost na relativní výšce je důsledek proudění vody na poli, kdy z vyšších míst odtéká do nižších míst, kde se drží delší dobu. Při nedostatku srážek se v nižších místech projevuje nedostatek méně. Později zde dochází ke snižování rychlosti růstu rostliny. Zároveň se v nižších partiích akumuluje organická hmota a další látky, které podporují růst rostlin.

3.6.11 Délka odtoku – flow distance – flow length

Voda z místa, kde spadne na zemský povrch, odtéká. Nesmí se jednat o rovný povrch nebo místo, kde je prohlubeň. Voda odtéká skrze místa s největším sklonem. Postupně tvoří odtokovou síť, která je viditelná v terénu. Vzdálenost od odtokové sítě se může vyjádřit pomocí délky odtoku. Pro výpočet délky odtoku lze v programu ArcGIS využít funkci *Flow distance*. Tato funkce vytvoří vrstvu, kde každá buňka rastru má přiřazenou vzdálenost k nejbližšímu bodu odtokové sítě.

Délka odtoku byla pozitivně korelována s výnosy pšenice. V suchém roce byl koeficient korelace 0,79 (Chi a kol., 2009). Délku odtoku využil také Iqbal a kol. (2005) při sledování vlivu půdních vlastností a topografických charakteristik na výnos bavlny.

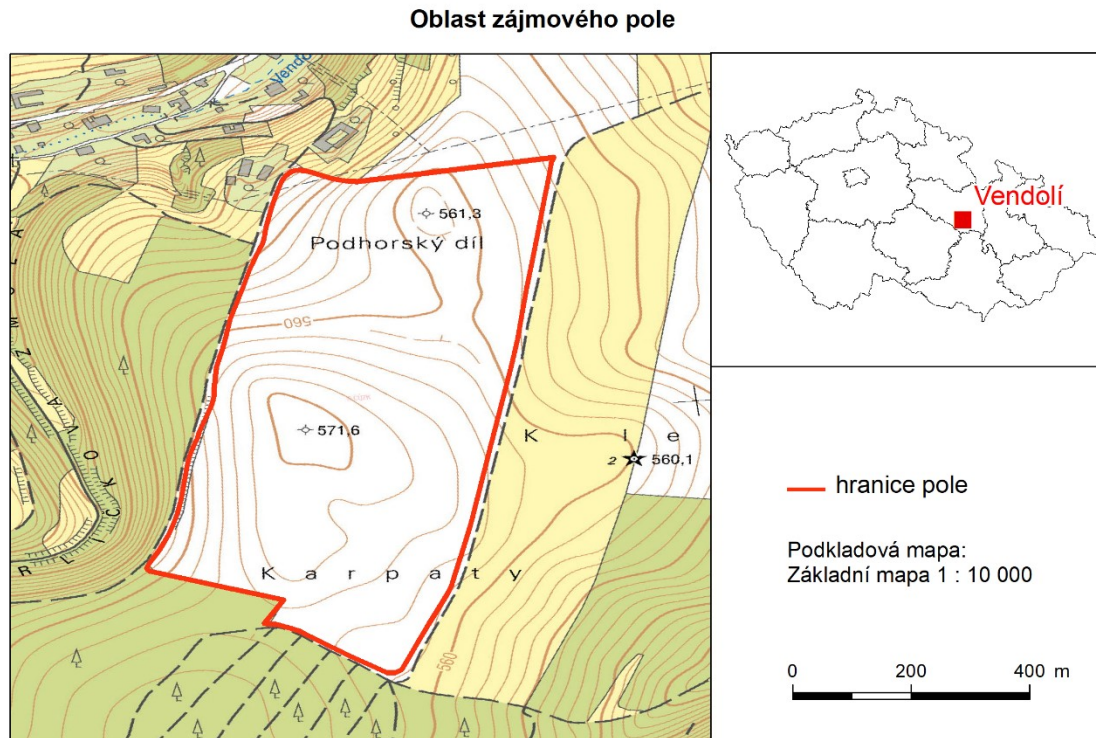
4 Metodika

4.1 Charakteristika studijního území

Model DEM a mapa výnosového potenciálu byly dostupné pro území pole o rozloze 24,16 ha. Pole se nachází v katastrálním území Vendolí, což je asi 5 km západně od města Svitavy ve Svitavské pahorkatině. Nadmořská výška se pohybuje od 544 do 672 m. n. m. Průměrná nadmořská výška pole je 562,97 m. n. m. a průměrná sklonitost je 3,53 °. Pole má všesměrnou orientaci. Pole je obhospodařováno jako konvenční orná půda s pravidelným střídáním plodin. V posledních letech se na pozemku pěstoval ječmen jarní (2015), řepka ozimá (2016), pšenice ozimá (2017) a ječmen jarní (2018). Na pozemku hospodaří Zemědělské družstvo Vendolí (Ministerstvo zemědělství, 2019).

Nejvyšší bod je v centrální části pole. Pozemek se svažuje od středu k okrajům. Nejnižší body jsou v jihozápadní a severozápadní části pole. Nachází se zde dvě bonitované půdně ekologické jednotky (BPEJ): 7.25.14 (5,65 ha) a 7.30.14 (18,4 ha). Podle BPEJ se jedná o klimatický region 7 (mírně teplý a vlhký), kde se průměrná roční teplota pohybuje mezi 6 a 7°C a srážky mezi 650 a 750 mm. Hlavní půdním typem je kambizem. Půda je středně skeletovitá (25 – 50 % skeletu) a středně hluboká (hloubka od 30 cm).

Obr. 6: Oblast zájmového pole a jeho umístění v rámci ČR



Zdroj: vlastní tvorba, 2019

4.2 Charakteristika dat

4.2.1 DEM z dronu

Oblast zájmového území byla nasnímána pomocí dronu. Výsledný DEM má rozlišení 0,6 m a je v rastrové podobě.

4.2.2 DMR 5G

Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN). Nadmořská výška je vztažena k výškovému referenčnímu systému Balt po vyrovnání (Bpv). Tento model je charakterizován úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Model vznikl metodou leteckého laserového skenování výškopisu území České republiky v letech 2009 až 2013.

Je použitelný k analýzám terénních poměrů lokálního charakteru a rozsahu (ČÚZK, 2019). V této práci byl použit DMR 5G v rastrové formě. Rozlišení rastru činí 2 m.

4.2.3 SRTM

Model SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) byl vytvořen v rámci projektu vedeného organizacemi NASA a NGA s přispěním německé a italské kosmické agentury. V roce 2000 se uskutečnila speciální mise raketoplánu Endeavour, který nesl speciální radarovou snímací aparaturu. Během 11 dnu byla pořízena interferometrická radarová data z území celého světa. Více jak 90 % bylo nasnímáno dvakrát. Pro území celého světa je dostupný v prostorovém rozlišení 3° (90 m na rovníku). Vertikální přesnost je 16 m a horizontální přesnost 20 m (Gisat, 2019).

V práci byl použit model SRTM s rozlišením 30 m.

4.2.4 ASTER GDEM

ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model) vznikl ve spolupráci japonského Ministerstva ekonomie, obchodu a průmyslu (METI) a americké kosmické agentury (NASA). ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) je multispektrální barevný skener, který pracuje na družici Terra. Pořizuje data ve 14 spektrálních pásmech. V blízkém infračerveném pásmu lze snímat data i ve směru šikmo dozadu, takže lze pro jednu oblast nasnímat stereoskopickou dvojici snímků s prostorovým rozlišením 15 m. Stereoskopickou dvojici lze použít k prostorovému zobrazení dané oblasti. Model má podobu rastrového modelu s rozlišením 1 úhlové vteřiny, což je na rovníku 30 m. Pokrývá pevninu od 83° s. z. š. do 83° j. z. š. Polohová přesnost je 30 m a výšková přesnost 20 m (Gisat, 2019).

Pro zkoumané území byl použit ASTER GDEM v rozlišení 20 × 30 m.

4.2.5 Výnos plodin

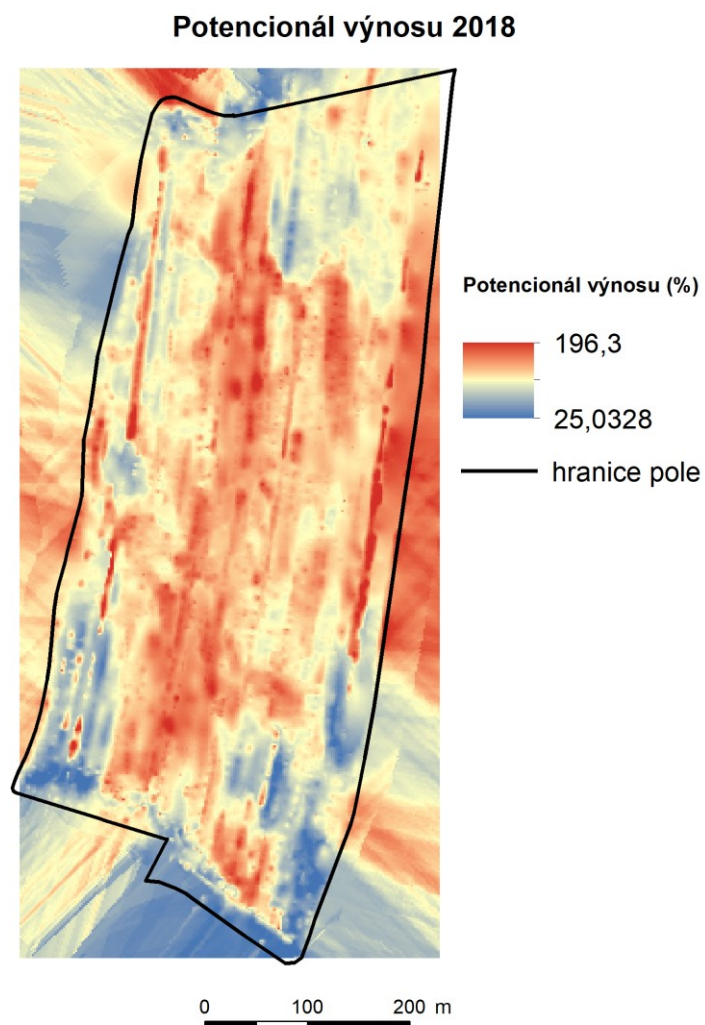
Zemědělské družstvo Vendolí používá sklizňové mlátičky, které obsahují výnosové monitory. Z nich lze získat data o velikosti sklizně. Následně je možné z nich vytvořit mapy výnosů. Pro rok 2018 byly bohužel výnosová data dostupná pouze ve formě mapy výnosového potenciálu. Výnosový potenciál vyjadřuje potenciální výnos za daný rok.

Mapa výnosového potenciálu má rozlišení 2 m. Potenciální výnos lze určit pomocí následující rovnice:

$$Yield_f = \frac{Yield_{pixel}}{average\ Yield_{plot}} \times 100$$

Potenciál výnosu předpokládá vyšší výnos ve středu pole. Naopak na okrajích pole předpokládá nižší výnos viz obrázek č. 7.

Obr. 7: Rozložení potencionálu výnosu



Zdroj: vlastní tvorba, 2019

4.3 Tvorba topografických charakteristik

Pro výpočet topografických charakteristik digitálního výškového modelu byl použit program ArcGIS ve verzi 10.6.1 od firmy ESRI. Tento program je velmi rozšířen a hojně využíván v mnoha organizacích soukromé i státní sféry. Obsahuje celou řadu nástrojů pro komplexní práci s prostorovými daty. Mimo jiné také obsahuje nástroje pro tvorbu DEM a práci s ním. Pomocí dalších nástrojů lze nad digitálními modely terénu provádět další analýzy a vypočítávat různé topografické charakteristiky. Výpočet všech vybraných charakteristik byl prováděn nad územím pole zvětšeným o oblast 100 m. Pro to byla využita funkce *Buffer*. Při porovnání hodnot výnosu a DMT s větší velikostí pixelu bylo provedeno převzorkování na velikost pixelu DMT pomocí funkce *Resample*. Výsledná velikost pixelu byla nastavena podle velikosti pixelu DMT. Pro výpočet hodnoty pixelu je možné zvolit několik metod. Byla vybrána metoda *Bilinear*. Při této metodě se počítá průměr ze čtyř nejbližších buněk. Následně byla použita funkce *Raster to point*, která převedla rastr na bodovou vrstvu. Každý bod má přiřazenou hodnotu podle hodnoty pixelu. Tato vrstva byla ořezána podle hranic pole.

Byla vytvořena nová rastrová vrstva. Každý pixel rastru byl převeden na bod pomocí funkce *Raster to point*. Tímto vzniklo 593 bodů. Každému bodu byly pomocí této funkce předána hodnota, která vyjadřuje výnosový potenciál. Na hodnoty výnosového potenciálu byly navázány hodnoty topografických charakteristik. K tomu byla využita funkce *Extract Values to Points*, která každému bodu přiřadí hodnotu topografické charakteristiky. Bylo sledováno 593 bodů u modelu DEM – dron a DMR 5G. U modelů SRTM a ASTER GDEM bylo sledováno 388 bodů. Tabulky s hodnotami potenciálu výnosu a hodnot topografických charakteristik byly vyexportovány do formátu .txt.

Pomocí programu ArcGIS byly vypočteny následující topografické charakteristiky: orientace, sklon, akumulace odtoku vody. V programu SAGA byly vypočítány hodnoty indexu TWI, celkového zakřivení, profilového a podélného zakřivení.

Z vytvořených dvojic (topografická charakteristika – hodnota výnosového potenciálu) byl pomocí lineární regrese vypočítán koeficient determinace v programu R (verze R x54 3.4.0) pro modely DEM. Do programu R byly načteny tabulky ve formátu .txt, kde každé hodnotě potenciálu výnosu odpovídala vypočtená charakteristika. Následně byl vytvořen model lineární regrese pomocí příkazu *lm (potenciál výnosu ~ topografická charakteristika)*. U všech modelů byl sledován koeficient determinace, který vyjadřuje míru závislosti. Vyšší hodnoty znamenají, že se použitý model hodí pro popis závislosti.

Dále byla u každého modelu sledovaná p – hodnota, která vyjadřuje, zda má regresor statisticky významný vliv na vysvětlení závislé proměnné.

4.3.1 Výpočet sklonu

Pro výpočet sklonu lze využít v programu ArcGIS funkci *Slope*. Sклон byl vypočítán ve stupních.

4.3.2 Výpočet orientace

První topografickou charakteristikou odvozenou z DEM byla orientace. Pomocí funkce *Aspect*. U této funkce lze určit metodu výpočtu. Pro malá území lze zvolit metodu *Planar*, která počítá orientaci ve 2D prostoru. Další možností je volba *Geodetic*, která počítá orientaci v 3D prostoru. Tato metoda bere v úvahu zakřivení Země. Orientace se počítá na elipsoidu. Jelikož se orientace počítá jen pro území jednoho pole, byla zvolena metoda *Planar*.

4.3.3 Výpočet akumulace odtoku vody

Bylo zjištěno, že DEM vytvořený z dat měřených pomocí UAV obsahuje plochy, kde není terén plynulý. Jedná se o místa, která vypadají jako malé prohlubně („sink“). Z těchto míst voda nikam neodtéká, což reálně na poli, které není ploché, nenastává. Místa, u kterých nelze určit směr odtoku lze identifikovat pomocí funkce *Sink*. Tato funkce určí dna terénní prohlubně. Neoznačí celou bezodtokou oblast. Bezodtoká oblast je tak většinou větší než vyznačená místa. Pro další výpočet není vhodné mít DEM s bezodtokými oblastmi. DEM by měl být bez terénních prohlubní („depressionless DEM“).

Je nutné proto použít funkci, pomocí které se z DEM modelu taková místa odstraní. Místa je možné vyplnit pomocí funkce *Fill*. U této funkce je možné nastavit tzv. z-limit, který určuje hranici rozdílu výšek mezi pixely, které se mají vyplnit a které už ne. Pokud toto není nastaveno, tak se vyplní všechny pixely a jsou tak zcela odstraněny bezodtoké oblasti. Jelikož je nutné mít plně bezodtoký model, tak žádný z-limit nebyl zadán. Terénní prohlubně byly tedy zcela vyplněny. Vznikl upravený DEM, kde nejsou žádné terénní prohlubně bez odtoku. Zůstaly zde pouze místa, která jsou plochá. Z těchto míst je odtok realizován do více stran. Funkci *Fill* použil Pineux a kol. (2016) při vytváření modelu DMT pro studium eroze. Takto byl upravený DEM – dron i DMR 5G. Modely SRTM a ASTER

GDEM upraveny nebyly. Upravené modely dále vstupovaly do všech funkcí. V dalším kroku je potřeba vypočítat směr odtoku. Rastr směru odtoku se vypočítá pomocí nástroje *Flow direction*. Tento nástroj vytvoří rastr, kde je pro každou buňku definován směr odtoku. Při použití nástroje je nutné určit, zda u buněk na okraji DEM bude směřovat odtok ven z rastru. Pokud se tato možnost zatrhne, tak u všech okrajových buněk bude určeno, že odtékají ven z rastru. Tohle použito nebylo, protože území pro výpočet bylo rozšířeno za hranice pole o buffer 100 m. Na okrajích pole jsou nižší nadmořské výšky než ve středu. Z toho plyne, že odtok směřuje ven ze sledovaného pole. Také se musí určit, jakým typem výpočtu bude určen směr odtoku. Rozdíl mezi typy je vysvětlen v kapitole 3.6.1 – v části akumulace odtoku vody.

Pomocí funkce *Flow accumulation* se vypočítá hodnota akumulace odtoku pro každou buňku. Jako vstup je použita vrstva směrů odtoku. Výsledkem je rastr, kde hodnota buňky je počet buněk, které do této buňky „přitékají“. V rastru jsou zřetelné odtokové linie. Jedná se o buňky s nejvyšším hodnotou. Naopak buňky s nulovou hodnotou lze označit za vrcholy nebo hřbety, ze kterých voda pouze odtéká. Dále byla vytvořena odtoková síť. Pomocí funkce *Con* se rastr převedl na hodnoty 0 a 1. Hodnotu 1 dostaly buňky, které tvořily odtokovou síť. Mezní hodnota byla pro každý model jiná. Byly vyzkoušeny různé hodnoty. Výsledkem by měla být vizuálně čistá odtoková síť, která neobsahuje buňky, které nenavazují na odtokovou síť.

4.3.4 Výpočet hodnot indexu TWI

Pro výpočet hodnot Topographic Wetness Indexu (TWI) byl použit program SAGA GIS. Tento program nabízí také funkce pro výpočet různých charakteristik a indexů nad rastrovými daty. Pro výpočet TWI indexu je nutné vypočítat sklon a sběrnou plochu odtoku (catchment area). Pro výpočet těchto charakteristik byly použity funkce SAGA GIS. Sběrná plocha odtoku se vypočítá pomocí funkce *Extended neighbourhoods – catchment area*. Na výběr je ze tří metod (*trace flow, parallel a recursive*). Dalším volitelným vstupem při výpočtu TWI je vrstva propustnosti (transmissivity), která nebyla použita. Při výpočtu TWI lze vybrat metodu výpočtu (*Standard* nebo *TOPMODEL*). Byla ponechána metoda *Standard*. Vytvořená vrstva TWI byly vyexportována ve formátu GeoTiff. Tato vrstva byla nahrána do programu ArcGIS a byl jí přiřazen souřadnicový systém. Pomocí funkce *Extract values to Point* byly vytvořeny dvojice hodnot z vrstvy výnosového potenciálu a z vrstvy TWI.

4.3.5 Výpočet zakřivení

Při výpočtu zakřivení byl využit původní DEM – dron i DMR 5G. U tohoto typu DEM nebyla použita funkce „Fill“, protože prohlubně nemají vliv na průběh výpočtu. Pro výpočet hodnot zakřivení povrchu se používá funkce *Curvature*. Pomocí této funkce se vypočítá celkové zakřivení. Dále je možné vypočítat i profilové zakřivení (profile curvature) a podélné zakřivení (plan curvature).

Další možností je použít program SAGA. Zde je možné využít funkci „Slope, Aspect, Curvature“. Při použití této funkce je možné vypočítat zároveň sklon a orientaci. Je možné zvolit jednotky, ve kterých se má výsledek vypočítat. Na výběr jsou stupně, procenta a radiány. Byly vybrány stupně. Tato funkce byla použita a výsledné vrstvy byly nahrány do programu ArcGIS.

4.3.6 Výpočet relativní nadmořské výšky

Nejdříve byla vytvořena vrstva, kde každá buňka měla hodnotu nejmenší nadmořské výšky v území. Pro toto byla využita funkce *Reclassify*. Bod s nejmenší nadmořskou výškou má pro každý model jinou hodnotu. Relativní nadmořská výška byla následně vypočítána pomocí funkce *Raster Calculator*. Od rastru DEM se odečetla vrstva s hodnotou nejmenší nadmořské výšky. Vznikla vrstva rozdílu nadmořských výšek od nejmenší nadmořské výšky v území.

4.4 Hodnocení přesnosti DEM

Modely DEM byly mezi sebou porovnány pomocí střední kvadratické chyby (RMSE), střední absolutní chyby (MAE) a pomocí vizuálního hodnocení. RMSE měří rozptyl rozdělení četnosti odchylek mezi referenčními daty a srovnávanými daty. Větší hodnoty znamenají větší rozptyl mezi daty.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j|$$

Při výpočtu RMSE se porovnávají hodnoty pozorované s hodnotami skutečnými. Nejpresnějším modelem je DEM pořízený dronem. Tento model byl zvolen jako referenční. Následně byl DEM – dron převzorkován pomocí funkce *Resample* do rozlišení DMR 5G. Stejně tak byl vytvořen převzorkovaný DEM s rozlišením modelů SRTM a ASTER GDEM. Byla vytvořena pravidelná síť bodů pomocí funkce *Raster to Point*. Každému bodu byla pomocí funkce *Extract Values to Point* přiřazena hodnota nadmořské výšky převzorkovaného DEM – dron a DMR 5G. Tyto dva modely byly srovnány pomocí 594 bodů. Pro modely SRTM a ASTER GDEM byl vytvořena pravidelná síť, která obsahovala 365 bodů.

Pro všechny modely byly vypočteny také hodnoty sklonitosti. Pro tuto topografickou charakteristiku byly také vypočteny hodnoty RMSE a MAE.

Hodnoty nadmořské výšky a sklonitosti byly vyexportovány a dále zpracovány v softwaru MS excel. Zde byly vypočítány hodnoty RMSE a MAE.

Vizuální hodnocení bylo provedeno pomocí map, které byly vytvořeny pro modely DEM. Byly vytvořeny mapy nadmořské výšky a mapy rozdílu nadmořských výšek mezi referenčním modelem (DEM – dron) a modely DMR 5G, SRTM a ASTER GDEM. Rozdíl nadmořských výšek byl vytvořen pomocí funkce *Minus*. Hodnoty nadmořských výšek DEM – dron se odečetly od hodnot ostatních modelů. Následně byly hodnoty rozdílů rozděleny do tříd a barevně vizualizovány.

5 Výsledky

5.1 Hodnocení přesnosti DEM

Přesnost DEM modelů byla hodnocena pomocí RMSE, MAE a vizuálně. Byly hodnoceny hodnoty nadmořských výšek a sklonitostí. Nejmenší RMSE a MAE chyba byla dosažena u porovnání hodnot DEM – dron a SRTM a to 1,813 resp. 1,487 viz tabulka č. 1. Model SRTM je tedy v této oblasti velmi přesný. Původní předpoklad byl, že nejmenší hodnotu chyby bude mít DEM – dron a DMR 5G, protože to jsou oba podrobné modely a mají velké rozlišení.

Tab. 1: Hodnoty chyb RMSE a MAE pro sledované DEM

Referenční vrstva	Sledovaná vrstva	RMSE	MAE
DEM – dron	DMR 5G	7,093	4,78
DEM – dron	SRTM	1,813	1,487
DEM – dron	ASTER GDEM	12,021	9,407
DMR 5G	SRTM	6,951	4,625
DMR 5G	ASTER GDEM	13,729	10,879

Hodnota chyb mezi DEM – dron a DMR 5G je podobná jako mezi DMR 5G a SRTM. Rozdílné hodnoty nadmořské výšky u modelu DMR 5G se tedy projeví i u srovnání tohoto modelu se SRTM. Konkrétní oblasti rozdílných hodnot nadmořských výšek jsou vidět v mapách (obrázek č. 7 a 8).

U hodnot RMSE a MAE při porovnání hodnot sklonitostí jsou podobné rozdíly jako při srovnání nadmořských výšek viz tabulka č. 2. Nejmenší hodnoty RMSE a MAE jsou dosaženy při porovnání hodnot sklonitostí pro DEM – dron a SRTM.

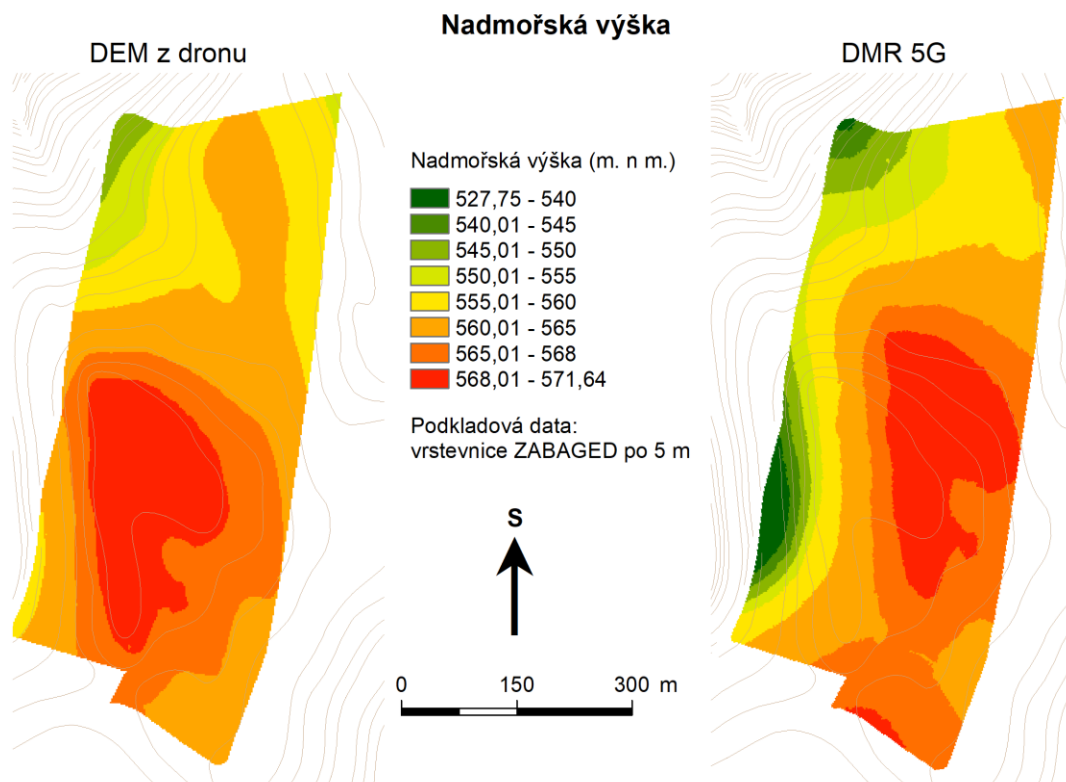
RMSE chyba je 2,398 a chyba MAE 1,67. Až druhé nejnižší hodnoty chyb jsou při srovnání hodnot sklonitostí pro DEM – dron a DMR 5G.

Tab. 2: Hodnoty chyb RMSE a MAE pro sklonitost a orientaci

Referenční vrstva	Sledovaná vrstva	RMSE	MAE
Sklon DEM – dron	DMR 5G	4,811	2,828
Sklon DEM – dron	SRTM	2,398	1,67
Sklon DEM – dron	ASTER GDEM	8,359	6,646

Vizuální hodnocení bylo provedeno pomocí srovnání map absolutních nadmořských výšek a zároveň map rozdílů nadmořských výšek. Mapa nadmořských výšek DEM – dron a DMR 5G ukazuje místa, kde se jednotlivé modely liší. Jako podkladová data byla použita WMS (Web Map Service) služba vrstevnic ZABAGED. Rozestup mezi vrstevnicemi byl 5 m. Vrstevnice odpovídaly svým umístěním i tvarem vytvořenému modelu DEM – dron.

Obr. 7: Mapy nadmořských výšek pro modely DEM z dronu a DMR 5G

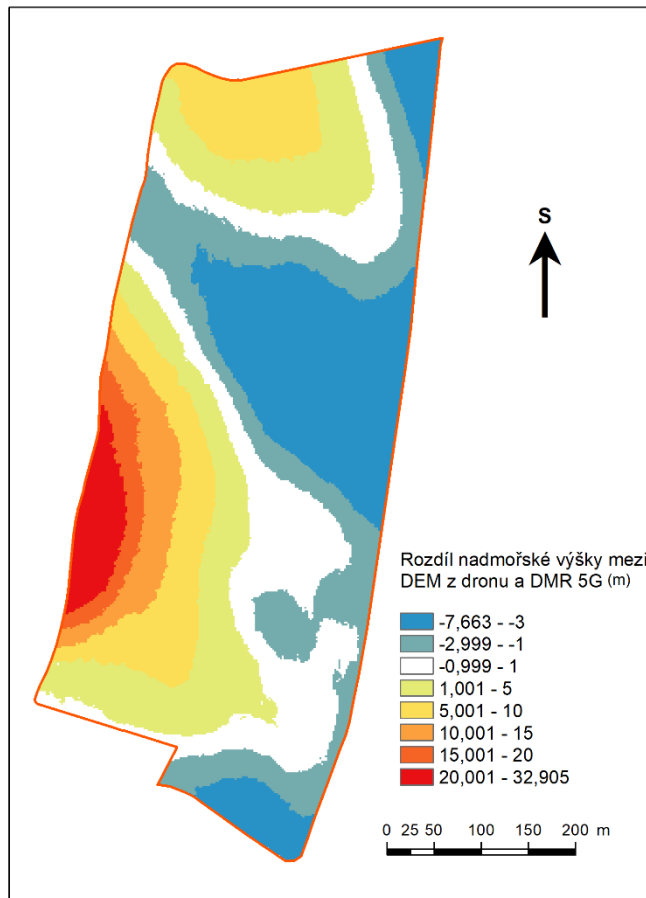


Zdroj: vlastní tvorba, 2019

Následně byly vytvořeny mapy rozdílů nadmořských výšek. Mapa níže (obrázek č. 8) ukazuje rozdíly nadmořských výšek mezi modelem DEM – dron a DMR 5G.

Obr. 8: Mapa rozdílů nadmořských výšek mezi DEM – dron a DMR 5G

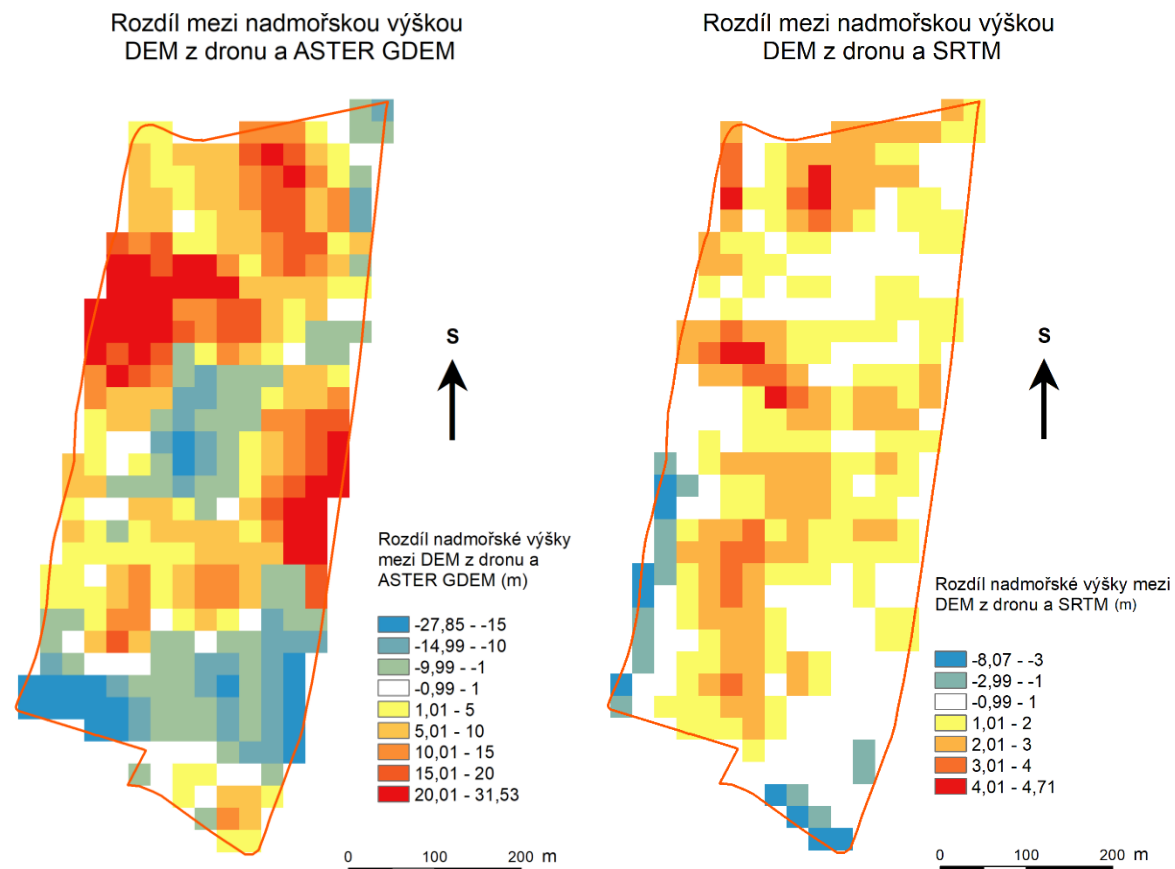
Rozdíl mezi nadmořskou výškou DEM z dronu a DMR 5G



Zdroj: vlastní tvorba, 2019

Na mapě rozdílů nadmořských výšek mezi modelem DEM – dron a SRTM jsou vidět malé rozdíly v absolutní nadmořské výšce. Naproti tomu u mapy rozdílů nadmořských výšek DEM – dron a ASTER GDEM jsou vidět velké rozdíly.

Obr. 9: Rozdíl mezi nadmořskou výškou pro model DEM - dron a ASTER GDEM



Zdroj: vlastní tvorba, 2019

Nejmenší rozdíly s podrobným modelem DEM – dron vykazuje model SRTM. Větší rozdíly vykazuje při porovnání s modely DMR 5G a ASTER GDEM (až desítky metrů).

5.2 Hodnocení závislosti topografických charakteristik na výnosu

Pomocí lineárního regresního modelu byly zjištěny hodnoty koeficientu determinace pro potenciál výnosu a vybrané topografické charakteristiky. Pro každou dvojici hodnot potenciál výnosu – topografická charakteristika byl vytvořen lineární regresní model, kdy charakteristika byla regresorem. Zjištěné hodnoty koeficientu determinace byly u všech regresních modelů malé. Nebyly zjištěny rozdíly mezi použitými modely DEM viz tabulka č. 3. Nejvyšší hodnotu měl při porovnání hodnot orientace pro model DEM - dron s potenciálem výnosu. Hodnota koeficientu determinace byla 0,032. Závislost je tedy

vysvětlena pouze z 3,2 %, což je velmi malá závislost. Tento regresor měl p-hodnotu 0,000505. Má tedy statisticky významný vliv na vysvětlení potenciálního výnosu na hladině významnosti $p < 0,001$.

Tab. 3: Hodnoty koeficientu determinace pro topografické charakteristiky a potenciál výnosu

	DEM - dron	DMR 5G	ASTER GDEM
Orientace	0,032	0,002	0,003
Sklon	0,015	0,003	0,0005
Akumulace odtoku	0,0004	0,003	0,0001
Zakřivení	0,001	0,006	0,0002
Profilové zakřivení	0,0009	0,003	0,0003
Podélné zakřivení	0,00007	0,016	0,0002
Relativní nadmořská výška	0,012	0,024	0,008
TWI	0,0003	0,013	0,0008

6 Diskuze

V rámci práce byly porovnávány rozdíly v nadmořské výšce mezi jednotlivými DEM (DEM z dronu, DMR 5G, SRTM a ASTER GDEM). Byl zjištěn rozdíl mezi jednotlivými modely. Rozdíly byly hodnoceny pomocí chyb RMSE, MAE a vizuálně. Nejmenší rozdíly u nadmořských výšek byly zjištěny mezi modelem DEM – dron a SRTM. Hodnota RMSE chyby byla 1,813 a hodnota chyby MAE 1,487. Předpokladem bylo, že model DMR 5G bude vykazovat podobné nadmořské výšky jako DEM – dron. Chyba RMSE i MAE byla příliš velká. Vysvětlením může být použitý výškový systém u použitých DEM. Zatímco model DMR 5G má nastavený výškový systém Balt po vyrovnání, tak modely DEM – dron a SRTM mají výškový systém vztažený k elipsoidu WGS84.

Dále byly srovnány hodnoty sklonitosti. Jelikož jsou hodnoty sklonitosti odvozené z jednotlivých modelů, jejich rozdíly se přenáší i do hodnot této topografické charakteristiky. Nejmenší rozdíly tedy opět vykazovali hodnoty DEM – dron a SRTM. U hodnot sklonitosti byla chyba RMSE 2,398 a MAE 1,67. Model SRTM tedy měl podobné hodnoty sklonitosti jako DEM – dron. Největší rozdíly byly u hodnot DEM – dron a ASTER GDEM.

Vizuální hodnocení potvrzovalo zjištěné hodnoty. Vizuální hodnocení by mělo být první činností, která je provedena při zkoumání konkrétního zájmového území. Může ukázat na chybu v datech, která není na první pohled zřetelná. Proto je vhodné data klasifikovat do tříd a nastavit různým datovým sadám stejné třídy tak, aby bylo možné je lehce porovnat a zjistit odlišnosti.

Dále byly ze získaných DEM vypočítány primární a sekundární topografické charakteristiky. Následně byly hodnoty těchto charakteristik porovnány pomocí lineární regrese s hodnotami výnosového potenciálu pro sledované pole. Pro každou dvojici hodnot (topografická charakteristika – hodnota výnosového potenciálu) byl získán koeficient determinace. Nebyla zjištěna významná závislost na sledovaných topografických charakteristikách. Nejvyšší hodnota koeficientu determinace byla 0,032 pro regresní model dvojice hodnot model DEM – dron a potenciál výnosu. Jelikož se hodnoty koeficientu determinace mezi jednotlivými modely významně nelišily, tak nebylo prokázáno, že je podrobnější model vhodnější pro tvorbu topografických charakteristik.

Z rešerše literatury vyplývá, že závislost jednotlivých primárních a sekundárních topografických indexů na výnosu zemědělských plodin je proměnlivá. Pokud se

porovnává závislost mezi roky, tak se hodnoty koeficientů determinace liší. Závislost výnosu zemědělských plodin na topografii terénu existuje, což vyplývá z mnoha studií např. (Kravchenko a Bullock, 2000) a (Kaspar a kol., 2004). Významný vliv na výnos může mít v některých případech vzdálenost od linií akumulace odtoku (Marques Da Silva a Silva, 2006). Persson a kol. (2005) pomocí vícenásobného regresního modelu zjistili, že topografické atributy vysvětlovali z 20 % výnos brambor. Iqbal a kol. (2005) sledovali topografické a hydrologické atributy, které vysvětlovali výnos bavlny z 40 a 21 %. Velký vliv, zda se projeví vztah terénu a topografické charakteristiky může mít množství srážek v daném roce. Byly zjištěny rozdíly mezi suššími a vlhčími roky (Chi a kol., 2009). V sušších letech se více projevovává závislost výnosu na topografických charakteristikách (Chi a kol., 2009). V této práci byla sledována závislost výnosového potenciálu pouze za jeden rok, takže nebylo možné určit, zda se hodnoty koeficientu determinace mezi roky liší. Také není obvyklé využívat data výnosového potenciálu, ale pro rok 2018 nebyla dostupná klasická data o výnosu. Zajímavé by bylo porovnat, zda se data výnosového potenciálu liší do skutečné velikosti sklizně.

7 Závěr

V rámci práce bylo v rešeršní části zjištěno, že existuje vztah mezi topografickými charakteristikami terénu a výnosem zemědělských plodin. Byl uveden přehled velké části používaných primárních a sekundárních indexů, což je přínosem této práce. V praktické části ovšem nebyla oproti očekávání potvrzena závislost těchto indexů na potenciál výnosu u sledovaného území. Zjištěná závislost nebyla statisticky významná. Pomocí dronu vznikl podrobný model území, který byl srovnán s ostatními modely. Byly zjištěny rozdíly mezi nadmořskou výškou u jednotlivých modelů. Zároveň byly porovnány i hodnoty sklonitosti a orientace. Byly zjištěny velké rozdíly mezi hodnotami orientace a menší u hodnot sklonitosti.

Lze předpokládat, že budou vzrůstat aplikace využití dronů v zemědělství. Drony můžou nést různé druhy senzorů a lze je využít pro rychlé zjištění informací o území. Bude vzrůstat tlak na lokálně specifický management ploch v rámci precizního zemědělství, aby se snížilo využití hnojiv a postřiků. Pokud se dokáže snížit aplikace hnojiv a postřiků, tak by to mělo mít také pozitivní vliv na životní prostředí. V rámci konceptu precizního zemědělství budou drony využitelné.

8 Přehled literatury a použitých zdrojů

Aasen, H., Burkart, A., Bolten, A., & Bareth, G. (2015). Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, 245–259.

Brůha, L., 2016: Digitální modely terénu. Verze 1.0 (online) [cit.2019.10.05] dostupné z <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/projekty/moderni-geoinformacni-metody-ve-vyuce-gis-kartografie-adpz/digitalni-modely-terenu/>

De Souza, C. H. W., Lamparelli, R. A. C., Rocha, J. V., & Magalhães, P. S. G. (2017). Height estimation of sugarcane using an unmanned aerial system (UAS) based on structure from motion (SfM) point clouds. *International Journal of Remote Sensing*, 38(January), 1–13.

Dixit, P. N., & Chen, D. (2011). Effect of topography on farm-scale spatial variation in extreme temperatures in the Southern Mallee of Victoria, Australia. *Theoretical and Applied Climatology*, 103(3–4), 533–542.

Droneweb, 2016: Proč a jak to létá (online) [cit.2019.03.05], dostupné z <http://www.droneweb.cz/konstrukce/item/42-kvadrokoptera-rizeni>

Dronpro, 2017: Pravidla pro létání, aneb co vše s dronem (ne)smíte (online) [cit.2019.03.05], dostupné z <https://dronpro.cz/pravidla-pro-letani-s-drony/>

Geotronics, 2019: SenseFly eBee (online) [cit.2019.03.05], dostupné z <http://geotronics.cz/sensefly-ebee/>

Gisat, 2019: Produkty – digitální model terénu (online) [cit.2019.03.17], dostupné z <http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-teren>

Green, T. R., Salas, J. D., Martinez, A., & Erskine, R. H. (2007). Relating crop yield to topographic attributes using Spatial Analysis Neural Networks and regression. *Geoderma*, 139(1–2), 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.12.004>

- Holman, F. H., Riche, A. B., Michalski, A., Castle, M., Wooster, M. J., & Hawkesford, M. J. (2016). High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing. *Remote Sensing*, 8(12).
- Hoffmeister, D., Waldhoff, G., Korres, W., Curdt, C., & Bareth, G. (2016). Crop height variability detection in a single field by multi-temporal terrestrial laser scanning. *Precision Agriculture*, 17(3), 296–312.
- Chang, A., Jung, J., Maeda, M. M., & Landivar, J. (2017). Crop height monitoring with digital imagery from Unmanned Aerial System (UAS). *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 232–237.
- CHI, B. L., BING, C. S., WALLEY, F., & YATES, T. (2009). Topographic Indices and Yield Variability in a Rolling Landscape of Western Canada. *Pedosphere*, 19(3), 362–370.
- Infascelli, R., Faugno, S., Pindozi, S., Boccia, L., & Merot, P. (2013). Testing Different Topographic Indexes to Predict Wetlands Distribution. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 733–746.
- Iqbal, J., Read, J. J., Thomasson, A. J., & Jenkins, J. N. (2005). Relationships between Soil–Landscape and Dryland Cotton Lint Yield. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 872.
- Jamcopters, 2019: Precizní zemědělství (online) [cit.2019.03.15], dostupné z <https://jamcopters.cz/industry/precizni-zemedelstvi>
- Kaspar T.C. Fenton T. E., Colvin T. S., Karlen D. L., Jaynes D. B. and Meek D.W., (2000). Relationship of Corn and Soybean Yield to Soil and Terrain Properties. *American Society of Agronomy*, 709(96), 700–709.
- Kravchenko, A. N., & Bullock, D. G. (1998). Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties *RE*, 75–83.
- Kroulík, M., (2012): Senzory pro měření půdních vlastností (online) [cit.2019.03.10], dostupné z <https://www.zemedelec.cz/senzory-pro-mereni-pudnich-vlastnosti/>.
- Kříkavová, L. (2009). Interpolace bodových dat v GIS. *České vysoké učení v Praze, fakulta stavební. Praha. 55 s. (bakalářská práce) „nepublikováno“*.
- Kumhálová, J., 2010: Využití GIS v precizním zemědělství. *Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta, Brno. 120 s. (disertační práce) „nepublikováno“*.

- Li, W., Niu, Z., Chen, H., Li, D., Wu, M., & Zhao, W. (2016). Remote estimation of canopy height and aboveground biomass of maize using high-resolution stereo images from a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Ecological Indicators*, 67, 637–648.
- Lukas, V., Neudert, L. a Křen, J. (2010) Precizní zemědělství a jeho přínosy (online) [cit.2019.03.10], dostupné z <https://www.zemedelec.cz/precizni-zemedelstvi-a-jeho-prinosy/>
- Marques Da Silva, J. R., & Alexandre, C. (2005). Spatial variability of irrigated corn yield in relation to field topography and soil chemical characteristics. *Precision Agriculture*, 6(5), 453–466.
- Marques Da Silva, J. R., Peça, J. O., Serrano, J. M., De Carvalho, M. J., & Palma, P. M. (2008). Evaluation of spatial and temporal variability of pasture based on topography and the quality of the rainy season. *Precision Agriculture*, 9(4), 209–229.
- Marques da Silva, J. R., & Silva, L. L. (2008). The yield pattern considering the distance to flow accumulation lines. *European Journal of Agronomy*, 28(4), 551–558.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, a R. (1991). Digital Terrain Modeling : A Review of Hydrological Geomorphological and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30.
- Munoz, J. D., Steibel, J. P., Snapp, S., & Kravchenko, A. N. (2014). Cover crop effect on corn growth and yield as influenced by topography. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 189, 229–239.
- Nebiker, S., Lack, N., Abächerli, M., and Läderach, S. (2016): Light-weight multispectral UAV sensors and their capabilities for predicting grain yied and detecting plant diseases. *Photogramm. Remote Sensing Spatial Inf. Sci*, 963-970.
- Pacina J. a Brejcha M., 2014: Digitální modely terénu. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí, Ústí nad Labem, 73 s.
- Pei, T., Qin, C. Z., Zhu, A. X., Yang, L., Luo, M., Li, B., & Zhou, C. (2010). Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. *Ecological Indicators*, 10(3), 610–619.

- Persson, A., Pilesjö, P., & Eklundh, L. (2005). Spatial influence of topographical factors on yield of potato (*Solanum tuberosum* L.) in central Sweden. *Precision Agriculture*, 6(4), 341–357.
- Pineux, N., Lisein, J., Swerts, G., Biielders, C. L., Lejeune, P., Colinet, G., & Degré, A. (2017). Can DEM time series produced by UAV be used to quantify diffuse erosion in an agricultural watershed? *Geomorphology*, 280, 122–136.
- Raduła, M. W., Szymura, T. H., & Szymura, M. (2018). Topographic wetness index explains soil moisture better than bioindication with Ellenberg's indicator values. *Ecological Indicators*, 85(March 2017), 172–179.
- Riihimäki, H., Heiskanen, J., & Luoto, M. (2017). The effect of topography on arctic-alpine aboveground biomass and NDVI patterns. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 56, 44–53.
- Ruzgiene, B., Berteška, T., Gečyte, S., Jakubauskiene, E., & Aksamitauskas, V. Česlovas. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 73, 619–627.
- Ryant, P. 2005. *Precizní zemědělství*. (online) [cit.2019.03.10], dostupné z http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/hnojeni_plodin/pdf/precizni_zemedelstvi.pdf
- Sheshukov, A. Y., Sekaluvu, L., & Hutchinson, S. L. (2018). Accuracy of topographic index models at identifying ephemeral gully trajectories on agricultural fields. *Geomorphology*, 306, 224–234.
- Štroner, M., 2016. *Globální navigační satelitní systémy (GNSS)*, 8s.
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Borra-Serrano, I., & Pena, J. M. (2017). Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards. *Precision Agriculture*, 1–19.
- Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 73, 539–543.
- Vaze, J., Teng, J., & Spencer, G. (2010). Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling and Software*, 25(10), 1086–1098.

VÚGTK, (2004): Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí (online) [cit.2018.10.11], dostupné z [https://www.vugtk.cz/slovník/termin.php?jazykova_verze=&tid=1050&l=digitalni-model-reliefu--digitalni-model-terenu-\(dmr--dmt\)](https://www.vugtk.cz/slovník/termin.php?jazykova_verze=&tid=1050&l=digitalni-model-reliefu--digitalni-model-terenu-(dmr--dmt))

Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (2000). Terrain Analysis: Principles and Applications, 51–85.

Wu, Y., Giri, S., & Qiu, Z. (2016). Understanding the spatial distribution of hydrologic sensitive areas in the landscape using soil topographic index approach. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(4), 278–283.

Yang, M., Huang, K., Kuo, Y., Tsai, H. P., & Lin, L. (2017). Spatial and Spectral Hybrid Image Classification for Rice Lodging Assessment through UAV Imagery.

Yue, J., Yang, G., Li, C., Li, Z., Wang, Y., Feng, H., & Xu, B. (2017). Estimation of winter wheat above-ground biomass using unmanned aerial vehicle-based snapshot hyperspectral sensor and crop height improved models. *Remote Sensing*, 9(7).