

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ



VYHODNOCENÍ TOPOGRAFICKÝCH DAT
PRO ÚČELY PRECIZNÍHO ZEMĚDĚLSTVÍ
V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.
Autor: Jan Komárek

2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D. za použití zdrojů, jež jsou uvedeny v seznamu zdrojů a literatury. Při vypracovávání jsem se držel Metodických pokynů pro zpracování diplomové práce na FŽP (aktuálním ke 28. 2. 2013).

V Praze 17. 4. 2014

Jan Komárek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za věcné konzultace a odborné rady.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za jejich podporu a trpělivost během celého studia. Rovněž děkuji Bc. Michaele Šádkové za její výdrž a statečnost.

Děkuji také Zeměměřičskému úřadu a Výzkumnému ústavu rostlinné výroby, v.v.i. za poskytnutá data pro potřeby této práce.

V Praze 17. 4. 2014

Abstrakt

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

Klíčová slova

GNSS, GIS, DPZ, výnos, digitální model terénu, model sklonitosti, model akumulace vody, RMSE, regresní analýza.

Abstract

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

Keywords

GNSS, GIS, RS, crop yield, digital elevation model, DEM, slope model, flow accumulation model, FAM, RMSE, multiple regression.

Obsah

1. Úvod a cíl práce.....	8
2. Literární rešerše – precizní zemědělství.....	10
2.1 Historie a vývoj.....	13
2.2 Sběr dat.....	15
2.2.1 Technologie GNSS	16
2.2.2 Dálkový průzkum Země.....	20
2.2.3 Měření výnosu	22
2.2.4 Měření půdy.....	27
2.2.5 Evidence informací.....	29
2.3 Analýza dat – geografické informační systémy	31
2.4 Digitální modely terénu (DEM).....	34
2.5 Cyklus precizního zemědělství	36
2.6 Aplikace, variabilita.....	38
2.7 Budoucí vývoj.....	40
2.8 Porovnání běžných systémů hospodaření	41
3. Metodika	43
3.1 Zájmové území.....	43
3.2 Typy zpracovávaných dat.....	44
3.3 Formáty získaných dat	46
3.4 Import dat.....	47
3.6 Tvorba DEM v ArcGIS	48
3.6.1 Vstupní hodnoty do tvorby DEM.....	50
3.6.2 Vytváření konkrétních DEM.....	51
3.6.3 Vyhodnocení kvality vzniklých DEM	55
3.7 Tvorba odvozených modelů – SM, FAM.....	57
3.8 Analýza výnosových dat.....	59
3.9 Stanovení závislosti – regresní analýza.....	60
4. Výsledky	62
5. Diskuze.....	66
6. Závěr	71
7. Přehled literatury a použitých zdrojů	72
Příloha 1 – Výsledky RMSE.....	77
Příloha 2 – Výsledky MAE	78
Příloha 3 – Vizualizace DEMs	79
Příloha 4 – Vizualizace SMs	80
Příloha 5 – Vizualizace FAMs	81
Příloha 6 – Vizualizace výnosovosti.....	82
Příloha 7 – Výsledky regresní analýzy	84

1. Úvod a cíl práce

Na farmáře – zemědělce je v dnešní době vyvíjen rostoucí tlak na vysoký výnos k zásobení stále se zvyšující populace. Zároveň je ale, především po přijetí legislativy Evropské unie, nucen snížit dopady aplikačních látek na životní prostředí, tedy chránit krajinu. Vzniká tu tak náročný trh, který tlačí na maximální zisk a minimální vliv na životní prostředí. V současné době existují technologie, které tento trh mohou uspokojit. Systémem, který splňuje obě podmínky a zároveň nabízí minimalizaci vstupních nákladů a následnou maximalizaci výnosu, hmotného i finančního, je hospodaření v režimu precizního zemědělství. Již v dobách dávno minulých zemědělci věděli, že půda není jednotná, že může dojít k vyčerpání půdních živin a půda se tak může stát zcela neúrodná. Existovaly různé systémy hospodaření (např. dvojpolní, trojpolní ...), kde se plodiny střídaly v různých částech pole, nebo docházelo k různorodému zatěžování polních částí. Farmáři věděli, kde jim jaká plodina poroste a kde naopak určitý druh nikdy neporoste. V některých případech dokonce znali i příčiny, proč tomu tak je, a situaci se přizpůsobovali. Šlo to však pouze omezeně a ještě na pozemcích malých výměr. Je zřejmé, že to souvisí s jevem, který je dnes označován jako heterogenita půdy. Daleko sahající historie, zkušenosti vlastní i zkušenosti předků, půdní vzorky nebo i jenom pohled na pole vzrostlé plodiny obhospodařování konvenčním způsobem nám ukazuje, že pozemek není homogenní. Hospodařením na heterogenní půdě se zabývá právě precizní zemědělství. To využívá řadu moderních technologií, které slouží k úspoře vstupů a zvýšení výnosů. Díky variabilní aplikaci látek do heterogenních částí půdy dochází k použití minimálního potřebného množství chemikálií, což vede nejen ke snížení finanční zátěže, ale především k maximalizaci ochrany životního prostředí, protože se do půdy dostanou pouze takové látky a takové množství látek, které je nezbytně nutné ke správnému vývoji plodiny.

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

2. Literární rešerše – precizní zemědělství

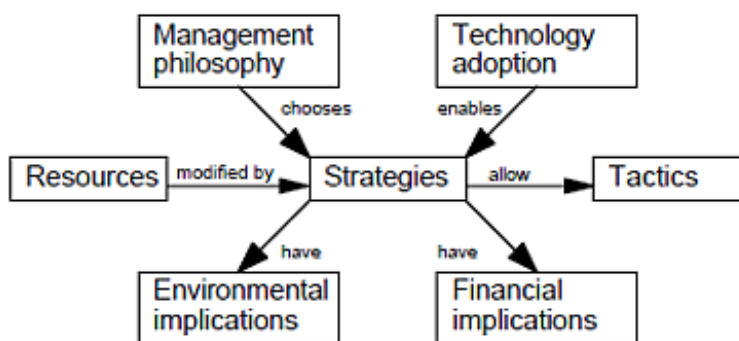
Zemědělství je páteří ekonomik všech zemí po celém světě. V některých zemích tvoří až 50% podíl na HDP a zaměstnává až 90% obyvatel. V ČR má zemědělství klesající trend podílu na HDP, v roce 2013 nedosahovalo ani 1%. Přesto je zemědělství naprosto nezbytné odvětví, bez kterého by se žádná země světa neobešla. Produktivita zemědělských ploch má obrovský dopad na ekonomiku. Se stále vzrůstajícím počtem obyvatel se bude tento dopad navyšovat. Za poslední čtyři dekády se produktivita zdvojnásobila a pracovní síla redukovala na třetinu. Tento efekt lze připsat využívání závlah, mechanizaci zemědělství a vylepšení chemických hnojiv a pesticidů. Tradiční konvenční zemědělství se zabývá pěstováním jedné konkrétní plodiny, a proto vnímá pole jako jednu homogenní jednotku. Tomuto způsobu hospodaření pak odpovídá celoplošný způsob hnojení, ve kterém je na celý homogenně pojatý pozemek aplikována uniformní dávka hnojiva – chemického přípravku i tam, kde ho není potřeba. Chemické přípravky používané k ošetřování půdy a plodin jsou navíc velmi nákladné. Vysoký výnos, jako cíl konvenčního zemědělství, je z pravidla doprovázen narůstajícím znečištěním prostředí. Projevuje se především zneužíváním pesticidů a hnojiv. Zároveň je ale vyvíjen vzrůstající tlak na ochranu životního prostředí, v případě zemědělské prvovýroby se tento tlak projevuje narůstajícím důrazem na zdravý životní styl. Hlavní soudobý problém tedy je, jak zefektivnit tento proces zemědělské prvovýroby, snížit vstupy a náklady i negativní dopady aplikačních látek na životní prostředí. Precizní zemědělství nevnímá pole jakou jednu jednotku, ale jak několik specifických sub jednotek. Precizní nebo také počítačem podporované zemědělství (z angličtiny Precision Agriculture, Precision Farming, v němčině Teilflächenwirtschaft) je systém hospodaření se zemědělskou půdou, který si klade za cíl zvýšení výnosů plodin při současném snížení vstupů, tzn. při levnější investici vyšší finanční výnos. Termín precizní zemědělství vznikl jako mezinárodně sjednocený název pro nový směr hospodaření popisovaný v anglické literatuře jako: *Computer Aided Farming, Spatially Variable Agriculture, Soil Specific Crop Management, Site Specific Farming, Intelligent Farming* a mnoho dalších. Je relativně novým směrem bojujícím proti všeobecně zažitým

způsobům uniformního hospodaření s půdou. V systému precizního hospodaření je snaha důsledně respektovat konkrétní požadavky rostlin a konkrétní stav půdy. Zároveň je kladen velký důraz na šetrné zacházení s půdou, ochranu životního prostředí a snížení vstupů a nákladů (Studničková et al., 2011; Backes et al., 2003; Reyns et al., 2002; Ryant, 2001; Mandal et al., 2000; Kavka et al., 1998).

Křen et al. (2007) tvrdí, že precizní zemědělství dokáže v zásadě maximalizovat výnosy plodin, přesně sledovat a současně snížit provozní náklady, obecně zvýšit zisk a vlivem variabilní aplikace látek do půdy snížit dopady na životní prostředí. Principem tohoto systému je tedy usměrňovat vstupy do půdy a technologie maximálně efektivně, tzn. pouze tam, kde jsou potřeba, pouze v takovém množství, jaké je třeba, a pouze tehdy, je-li třeba. Proto lze tento způsob hospodaření označit jako prostorově i časově cílený – k dílčím částem pozemku se přistupuje individuálně. Využívá, vzhledem k heterogenitě pozemku, lokálně specifické informace o plodinách i půdě, aby mohlo dojít ke zpřesnění vstupů stimulujících produkci plodin. Jednou z jeho klíčových vlastností je mapování výnosu zemědělských plodin. Rozdílná výnosovost je primární počáteční informace o dané půdě. Znalost konkrétních požadavků rostlin, konkrétního stavu půdy a snaha o šetrné hospodaření se stalo moderním trendem bojujícím proti uniformnímu hospodaření a konvenčnímu způsobu zemědělského smýšlení. Precizní zemědělství využívá rychlých nedestruktivních cenově efektivních metod potřebných pro management půdy a kvalitu plodin za použití hnojiv, hnoje i kompostu v rozdílných mírách vzhledem k heterogenním potřebám půdy. Farmář si musí ale také osvojit fakt, že systém precizního hospodaření požaduje mimo běžné každodenní práce i práci s informačními technologiemi a prostředím Internetu (Kodaira et al., 2013; Stoszek 2009; Kroulík et al., 2006; Ryant, 2001; Kavka et al., 1998).

Prvotním oborem precizního zemědělství je sběr dat. Abychom mohli k jednotlivým homogenním částem pozemku přistupovat variabilně, potřebujeme velké množství vstupních dat. Precizní zemědělství proto využívá množství technologií, které tato data zajistí. Základními technologiemi jsou globální poziční družicové systémy (GNSS), geografické informační systémy (GIS), dálkový průzkum země (DPZ), terénní senzory, odpovídající software

a aplikační prvky. Systém precizního zemědělství sjednocuje informace z mnoha odvětví a integruje moderní informační technologie a techniky, což umožňuje farmářům lépe pochopit a kontrolovat jejich hospodářské plochy. Napomáhá tak k vytváření správných rozhodnutí o pěstebních zásadách a opatřeních (Gnip et al., 2003). Blackmore (2003) tvrdí, že precizní zemědělství není pouze schopnost aplikovat různorodá opatření, ale musí o něm být uvažováno jako o schopnosti přesně monitorovat, kontrolovat a vyhodnotit způsob agrotechnických zásahů. Je také nutné, aby bylo dostatečně porozuměno procesu, který obnáší aplikace vstupů s cílem dosažení příslušných cílů precizního zemědělství, což nemusí být nezbytně maximalizace výnosu, ale mělo by být dosaženo v režimu ekologických omezení určité finanční výhody.



Obr. 1: Diagram vytváření strategie a jejího dopadu (Blackmore, 2003).

Blackmore (2003) popisuje obecný systém hospodaření (obr. 1). Základem je vytvoření konkrétní strategie, která je ovlivněna určitými vstupy a zároveň vytváří výstupy, a ze které je utvářena taktika k dosažení požadovaných cílů. Primárním článkem jsou zdroje, ty vstupují do procesu tvorby strategie a jsou jí zároveň pozměněny. Strategii vybírá zvolená filozofie organizace hospodaření, resp. farmářův konkrétní postoj. Vytváření strategie je umožněno stupněm technologického vývoje nebo osvojení, což nepřímo souvisí s již zmíněnou filozofií managementu. Zvolená strategie, z níž se utváří taktika k dosažení záměrů, pak samozřejmě má konkrétní environmentální dopady a finanční důsledky. Například měření a zaznamenávání výnosů nebo odběr půdních vzorků, jako nezbytná praxe v systému precizního hospodaření, je tak technologickou implementací do systému utváření strategie organizace práce.

2.1 Historie a vývoj

Lokálně cílené obhospodařování není zcela novým výdobytkem poslední doby. Běžně se tímto způsobem v dřívějších dobách pracovalo na menších pozemcích. S narůstající rozlohou pole však úměrně klesala možnost heterogenní identifikace i následná individuální aplikace. Nové technologie umožňují přesnější hodnocení heterogenity půdy, hodnocení časové dynamiky procesů ovlivňujících výnosovost, umožňují také provádět přesnější zásahy. Technologie precizního zemědělství se ale adaptovaly relativně pomalu oproti jiným vědám vznikajícím ve stejné době. Dosavadní zemědělský systém ve velké míře přistupuje diferencovaně pouze k jednotlivým pozemkům jako nejmenším částem systému. Vývoj aplikačních technologií a navigační systém GPS a rychlý pokrok elektroniky dává možnost přistupovat individuálně k nejmenším částem pozemků (Křen et al., 2007; Hamouz et al., 2006; Lowenberg-DeBoer, 2003; Ryant, 2001).

Krátký historický přehled (Stoszek, 2009; Křen, et al., 2007; Ryant, 2001):
60. léta 20. století první zmínky o lokálně cíleném hospodaření v USA,
1985 – první postřikovač s variabilní aplikací pro komerční využití (USA),
1992 – první mezinárodní konference v Minneapolis (Minnesota, USA),
1992 – rozmach zavádění lokalizačních technologií GPS pro zemědělství,
1996 – na konferenci v Minneapolis dochází ke sjednocení názvu,
1997 – první evropská konference ve Warwicku (Anglie),
1997 – začíná vycházet mezinárodní časopis Precision Agriculture.

Jak již bylo popsáno výše, předkové si uvědomovali nerovnoměrnost pozemků, každý sedlák věděl, která jeho část pozemků je úrodnější, a na které se nevyplatí intenzivně hospodařit. Změny v nedávné historii, především v období kolektivizace, vedly ke vzniku nových zemědělských podniků, jednotných zemědělských družstev, zkráceně JZD, obhospodařovávající plochou velmi rozsáhlé pozemky, kde samozřejmě chyběl nejen generační přístup k půdě, ale také potřebná technologie i technika. Při zjištění různorodosti pozemků vyvstala otázka, jak problémy s nízkou výnosovostí na některých částech pozemku řešit. Ve výsledku jsou dvě možnosti,

jak problém vyřešit. Vyrovnat tyto rozdíly nebo se jim při pěstování přizpůsobit, což by vedlo k velké ekonomické zátěži při úpravě méně úrodných ploch, která je často až nerealizovatelná. Druhou možností je optimální hospodaření na plochách s rozdílnou výnosovostí (Lukas et al., 2010).

Před masivním rozšířením navigačních satelitních systémů, které by přesně lokalizovaly potřebný zásah, se využívaly alternativní systémy pro variabilní aplikaci. V 80. letech 20. století se v Evropě se začaly využívat počítačové sestavy, tzv. automatické řízení podniku, které zpracovávaly získaná data z terénu. Program data vyhodnotil a na jeho základě pak agronom rozhodoval o množství použitého hnojiva, množství chemického ošetření apod. Ovšem až satelitní navigační systémy zajistily polohově přesnou aplikaci potřebných zásahů. Rüscher (2001) tvrdí, že systém precizního zemědělství byl vyvíjen především na evropském kontinentu, nicméně byl převzat severoamerickými farmáři v mnohem větší míře, než ve zbytku světa. Proto je hlavním iniciátorem systému precizního zemědělství právě severní Amerika. V Evropě patří mezi nejúrodnější půdy ty, derivované ze sprašové mateční horniny, a není tak divu, že se na nich intenzivně hospodaří již po několik staletí, čímž nevyhnutelně dochází k jejich postupné degradaci. Sprašové půdy jsou považovány za velmi homogenní, proto jim nebyla v minulosti věnovávána dostatečně velká pozornost z hlediska různorodosti a proměnlivosti půdních vlastností (Sobota, 2009 ex. Špelina, 1999; Vitharana et al., 2008).

Lowenberg-DeBoer (2003) říká, že osvojení systému precizního hospodaření oproti jiným zemědělským technikám je pomalé a nerovnoměrné. Lowenberg-DeBoer přirovnává přijetí precizního zemědělství k osvojení bezorebné technologie ve druhé polovině 20. století než k převzetí geneticky modifikovaných semen v 90. letech. Zdůvodňuje přirovnání tím, že systém precizního zemědělství přišel na trh v celku nerozvinuté formě, kdy ještě neexistoval integrovaný systém, který by zajistil profit. Firmy využily mnoho hospodářů a pěstitelů k tzv. beta testování, tj. otestování systému na několika subjektech, než dojde ke komerčnímu využití. Po čase došlo na trhu k rozsortování na firmy úspěšné a neúspěšné.

2.2 Sběr dat

Gnip et al. (2003) říká, že dobrá data jsou pouze ta data nebo ty informace pořízené ve správný čas na správném místě. Jednoduché pravidlo, které lze uplatnit i v zemědělské produkci. Pro spoustu lidí je práce v zemědělství velmi těžká s minimem volného času, ovšem precizní zemědělství přináší do systému hospodaření moderní technologie. Mapování poskytuje informace nezbytné k posouzení půdních nedostatků, problémů a potencionálních příležitostí, jak vylepšit půdní vlastnosti a tím i zvýšit výnos a zlepšit stav krajiny (Whitney, 1999).

Globální navigační satelitní systémy (GNSS) jsou primárním článkem zajišťujícím lokalizaci pozemku i přesnou lokalizaci na pozemku. Stávají se naprosto nedílnou součástí precizního zemědělství, neboť všechny informace o prostorové variabilitě a terénní operace jsou vázané na přesnou polohu na daném pozemku. Nejvyužívanější systém pro civilní záležitosti je americký NAVSTAR Global Positioning System (GPS). Dále pak ruská ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА, zkracovaná jako GLONASS, evropský systém GALILEO (současně stále ve výstavbě), čínský systém COMPASS nebo lokální systémy QZSS (Japonsko) a IRNSS (Indie) (Lukas et al., 2010). Navigační systémy jsou obsahem kapitoly 2.2.1.

Mimo přesné lokace je třeba terénních senzorů, které umožní efektivní stanovení variability půdy na pozemku. Nejpoužívanějšími senzory jsou tzv. N-testery, cropmetry, senzory pro mapování půdních vlastností (utužení/zhutnění, vlhkost, elektrická vodivost) a senzory výnosovosti. Předpokladem sensorických měření je využití GNSS a zpracování dat v GIS (Lukas et al., 2010). Sensorická měření jsou popsána v kapitole 2.2.4.

Dalšími vstupními daty jsou pak odběry vzorků půdy přímo v terénu, jejich chemická analýza a následné zpracování výsledků a dálkový průzkum země (snímkování) prováděný letadly s potřebným technickým vybavením, satelity nebo ultralehkými RC modely, nesoucími snímkovací zařízení. Terénním vzorkováním a dálkovým průzkumem Země se budou zabývat kapitoly 2.2.2. a 2.2.4.

Zpracování vstupních dat, jejich analýza, syntéza a export výsledků probíhá v geografických informačních systémech (GIS). GIS může být desktopový nebo mobilní program, se kterým provedeme nejrůznější analýzy dle potřeby, a export dvou základních dat – vektorů a rastrů. Nejznámější GIS aplikací pro zemědělce je webové rozhraní LPIS (Lukas et al., 2010). Popis GIS technologií lze nelézt v kapitole 2.3.

2.2.1 Technologie GNSS

Již v roce 1957, kdy byl vypuštěn na oběžnou dráhu Země první člověkem vyrobený satelit, vznikla myšlenka vybudovat komplexní satelitní navigační systém. Od té doby byly satelitní systémy vyvíjeny dvěma supervelmocemi tehdejší doby, a sice Spojenými státy Americkými a Sovětským svazem, které je primárně využívaly pro navigaci ponorek a další vojenské účely. Technologie družicových globálních navigačních systémů (GNSS) umožňuje kdykoli a kdekoli na Zemi určit polohu, rychlost a směr pohybu přijímače. Princip GNSS je založen na přijímání radiového signálu z družic, které obíhají na různých oběžných dráhách v různých vzdálenostech od Země. Družice jsou kontrolovány a řízeny sítí pozemních stanic umístěných po zemském povrchu. Každý GNSS přijímač tedy obdrží signál z družice a následkem toho vyhodnotí svoji trojdimenzionální polohu a informaci o přesném čase, která je nezbytná pro korekční účely přijímaného signálu. Družice jsou tedy schopné poskytnout uživateli jeho zeměpisnou délku, šířku i výšku. Principem získání těchto informací je měření vzdálenosti přijímače od satelitu, jehož poloha je známa. Signál z jednoho satelitu je schopen určit, že se přijímač vyskytuje na kulové ploše s poloměrem rovným právě vypočtené vzdálenosti. Druhý satelit nám vytvoří druhou kulovou plochu, která se s první protíná v kružnici. Třetí měření nám definuje další kulovou plochu, která se protíná s předchozími, tzn., že tato kulová plocha protne kružnici vzniklou průnikem dvou přechozích kulových ploch, což nám definuje 2 body, z nichž jeden z nich bude ležet pravděpodobně ve vesmíru. Máme tedy jeden bod, který nám definuje polohu přijímače. V reálu je tento model mnohem

složitější, protože nezohledňuje vlivy prostředí, nesynchronnost hodin satelitu a přijímače, a další faktory náhodně ovlivňující výsledky měření (Bhatta, 2010; Dvorkin et al., 2009; Rapant, 2002).

Satelitní navigační systémy jsou zpravidla členěny do tří segmentů. Kosmický segment se skládá z většinou pravidelně rozmístěných družic umístěných na určitých oběžných drahách Země v konkrétní výšce. Typ oběžné dráhy, resp. výška družice od povrchu nebo středu Země, určuje rychlost obíhání družice. Kontrolní segment pak přijímá signál vysílaný družicemi. Je tvořen sítí pozemních stanic, které mají za úkol monitorovat kosmický segment, kontrolovat a řídit ho, případně korigovat chování družic nebo určovat parametry oběžných drah a poskytovat družicím podporu v určování času, jako nezbytného prvku při určování pozemní polohy pomocí satelitů obíhajících kolem Země. Pozemní stanice lze rozdělit na bezobslužné, které automaticky vyhodnocují signál a posílají ho do hlavní obslužné stanice se stálou posádkou. Komunikace kontrolního a kosmického segmentu je zajišťována prostřednictvím pozemních antén, které se tak stávají nejzranitelnějším článkem systému. Koncový, resp. uživatelský segment je tvořen vlastními zařízeními využívajícími družicový signál. GNSS přijímače jsou nakonfigurovány pro příjem konkrétní frekvence signálu, který je přijímán anténou, jako nezbytnou součástí přijímače. Přijatý signál zařízení vyhodnotí a poskytne uživateli polohu v konkrétním souřadnicovém systému. Uvádí se, že systémy satelitní navigace jsou relativně bezpečně, resp. dobře zabezpečené v případě válečného konfliktu. Satelity na oběžných drahách kolem Země, ale i hlavní pozemní kontrolní stanice, mají různé systémy ochrany a zabezpečení, např. odolají elektromagnetickému impulsu. Nejslabším článkem celého systému, jak již bylo zmíněno výše, je zajištění komunikace mezi pozemními stanicemi a družicemi obíhajícími kolem Země. Systém GPS by údajně měl být schopen až tříměsíčního autonomního provozu při ztrátě veškeré komunikace mezi kontrolním a kosmickým segmentem (ESA, 2014; MDČR 2014).

Na území evropského kontinentu existuje systém EGNOS (European Geostacionary European Overlay Service). EGNOS je označení pro Evropskou geostacionární službu, kterou provozuje Evropská vesmírná agentura (ESA). Systém vznikl jako společný projekt právě ESA, Evropské komise a Evropské organizace pro bezpečnost leteckého provozu. EGNOS je podpůrný systém, který poskytuje formou diferenčního signálu ze 3 geostacionárních satelitů a sítě pozemních stanic korekce k přijímanému signálu GPS, čímž dochází ke zpřesnění určované polohy na území Evropy. Systém EGNOS je označován za předchůdce evropského satelitního navigačního systému GALILEO, který má být plně funkční v roce 2020 (ESA, 2014).

Pro civilní použití je dnes jediný plně funkční globální satelitní navigační systém americký GPS. Jeho využití je omezené pouze uživatelem a počtem viditelných satelitů, přesnost zdarma poskytnutého signálu je relativně vysoká (desítky až jednotky metrů). Tuto přesnost lze ještě navýšit na desítky až jednotky centimetrů použitím tzv. diferenční GPS (dGPS) a přijímáním korekčních informací ze sítě pozemních stanic. Diferenční GPS eliminuje chyby signálu při průchodu atmosférou, vícecestný signál a další vnější vlivy. Poskytuje až sub-decimetrou přesnost v reálném čase. Principem je tzv. relativní určování polohy, kdy je přijímač o známých souřadnicích, tzv. referenční stanice. Referenční stanice vyhodnocuje přijatý signál a počítá korekce polohy určené cílovým přijímačem. Metoda dGPS RTK (Real Time Kinematic) využívá k přenosu fázových korekcí v reálném čase prostřednictvím radiovysílače datové spojení mezi přijímačem a referenční stanicí (nejběžněji je tak využito datové spojení GPRS). Cílem RTK metody je tak poskytnout co nejpřesnější polohu v co nejkratším čase, resp. v reálném čase, tj. když je přijímač v pohybu. Okamžitá a meziroční přesnost služby RTK se pohybuje s přesností kolem 2-5 cm. V České republice existuje síť permanentních stanic pro určování polohy, tzv. CZEPOS. Síť se skládá z celkem 26 referenčních stanic přibližně pravidelně rozmístěných po republice zpravidla na budovách katastrálních úřadů. V příhraničních oblastech bylo do systému využito i několika zahraničních permanentních referenčních stanic. Cena za využití služeb systému CZEPOS, resp. cena za přijímání korekčních dat se liší dle typu služby, kterou požadujeme. Využití

služby dGPS za 3600 sekund, tj. za 1h odebrání dat, stojí 20Kč. Při využití přesnější služby – RTK, pak už 80Kč/1h. Mimo služby CZEPOS nalezneme v České republice od roku 2009 také soukromou RTK síť s virtuálními referenčními stanicemi (tzv. VRS) určenou pro zemědělské potřeby. Spojení vysílače korekcí a přijímače (zemědělského stroje) je zajišťováno pomocí telefonní služby GPRS nebo pomocí krátkovlnných vysílaček. Tento systém soukromého RTK VRS provozuje firma Leading Farmers, a.s., roční odběr jejich korekčních služeb se pohybuje kolem 30 tisíc Kč (ČÚZK, 2014; Rapant, 2006; Řezníček 2006).

Kromě amerického systému GPS, lze obdobně využít i ruský navigační systém ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), transkribováno jako GLONASS. Tento systém byl vyvíjen bývalým Sovětským svazem, nyní spravován Úřadem ruských vojenských vesmírných sil. Glonass čelil na přelomu 21. století svým existenčním problémům, protože ve 2. polovině 90. let byl jeho vývoj prakticky zastaven. Systém byl postoupen veřejnosti v roce 1995, kdy ruská vláda zpřístupnila signál zdarma. Využití obou systémů by zároveň navýšilo počet dostupných družic a zlepšilo by tak přijímaný signál. Evropský systém GALILEO, který bude kompatibilní se systémem GPS, by měl být plně provozuschopný v roce 2020. Společná kooperace systémů by tak čítala okolo 60-ti družic, které by posilovaly integritu a přesnost poskytovaných služeb (Dvorkin et al., 2009; MDČR 2014).

GNSS systémy umožňují nepřetržitě zaznamenávat půdní variabilitu pole sadou geografických dat. Pro ukládání a správu těchto dat lze poté efektivně využít geografické informační systémy (GIS). Využití systémů GNSS se neuplatňuje pouze v precizním, ale i konvenčním zemědělství. Dnes jsou již běžně stroje vybaveny palubním počítačem a anténou GNSS. Tento systém sbírá data během práce stroje, jako je například hranice pole, začátek a konec práce, a pomáhá řidiči s požadovaným směrem jízdy, především s udržováním přímého směru na dlouhých vzdálenostech (Sobota, 2009; Neményi et al., 2003).

2.2.2 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země neboli Remote Sensing (DPZ, RS) může být využit pro precizní zemědělství mnoha způsoby. Jde v podstatě o získávání informací o objektu (půdě, plodinách...) z velké vzdálenosti. Snímá okem viditelné i neviditelné vlastnosti půdy. Observace DPZ jsou zaznamenány na digitální nosiče a georeferencování pro pozdější analýzy v GIS. Ačkoliv je DPZ více jak dvě desetiletí starý, jeho přesnost ke snímání pro účely zemědělství je relativně nová. DPZ se nezabývá pouze vlastním snímáním, ale i zpracováním snímků a především jejich účelovou interpretací, ze které vyvozuje závěry a doporučení pro potřebná pěstební opatření v dalších fázích růstu. DPZ nelze použít jako jediný zdroj informací, ale jako jeden z možných zdrojů dat, který poskytuje prostorové rozložení jednotlivých proměnných (Šafář et al., 2006; Mandal et al., 2000).

Od počátků využití DPZ pro potřeby zemědělství byla snaha vytvořit katalog, který by charakterizoval určité plodiny v jednotlivých fenofázích, ovšem vzhledem k velkému množství faktorů, které ovlivňují odrazivost rostlin, je prakticky nemožné vytvořit katalog, který by měl obecnou platnost. DPZ dokáže za stejných stanovištních podmínek odlišit dvě odrůdy stejné plodiny, ovšem jedna odrůda za rozdílných podmínek vykazuje velkou různorodost údajů. Letecký průzkum šetřeného území je vhodný zdroj dat pro precizní zemědělství, obzvláště pak pro mapování sezónní proměnlivosti půdních podmínek a vlastností rostlin. Letecké snímání je limitováno snímacím rozlišením (danými spektrálními pásmy), dobou od pořízení dat do aplikace navržených opatření a v poslední řadě neadekvátním opakováním pokrytí. Na metody DPZ pro účely precizního zemědělství se váže několik podmínek. Musí být vhodně a přesně určen termín snímání na základě rozhodujícího vývojového období. Musí být stanovena doba mezi začátkem snímání a realizací opatření, tedy maximální možná doba získávání a zpracovávání dat. Vynaložené náklady by neměly být větší, nežli úspory, které by využití DPZ přineslo (Šafář et al., 2006; Ždímal et al., 2011).

Jak bylo popsáno výše, prostřednictvím DPZ se vytvářejí doporučení pro následující období růstu plodin. Ačkoliv je růst a vývoj plodin přírodní pomalu probíhající proces, pro účely DPZ tento dlouhodobý proces trvá pouze

několik dní, u některých odvětví (např. vinařství) dokonce pouze několik hodin. Za tuto relativně krátkou dobu je třeba vybrané území nasnímat, digitální záznam zpracovat, na jeho základě vyrobit podklady pro posouzení území a interpretovat získaná data, navrhnout pěstební opatření a zásahy a vymezit je v reálném terénu, tzn. specifikovat, které plochy mají být jakým způsobem ošetřeny. Vzhledem k faktu, že je data potřeba nasnímat a interpretovat v co možná nejkratší době je třeba v praxi reagovat na několik základních zásad. Snížení hodinových nákladů lze docílit využitím nízkonákladových letounů nebo rádiem řízených (RC) modelů. Využitím digitálních kamer, u kterých je oproti řadovým leteckým kamerám výrazně snížena doba potřebná k získání záznamu do dalšího softwarového zpracování, docílíme časové úspory. Zvýšení přesnosti lokalizace docílíme použitím dGPS namísto analytické triangulace. Dopředu zpracovaný digitální model terénu území (DEM) zrychlí proces ortogonalizace – tvorby ortofotomapy, která je základním podkladem pro interpretaci získaných dat a zároveň slouží jako základní lokalizační prvek na území. Na základě výše psaných technicko – finančních podmínek rozdělit DPZ pro účely precizního zemědělství do dvou skupin. První skupina, rozlohou šetřeného území do cca 5ha, využívá tzv. RC modelů, tedy rádiem řízených (obvykle 10ti kanál) letounů nebo vrtulníků, v poslední době také oblíbených kvadrakoptér, které mají lepší stabilitu i ovladatelnost. Na model je připevněn běžný digitální fotoaparát s CCD prvkem (charge couple device, snímá obrazové informace). Po přistání se data stáhnou do laptopu, kde se zkontroluje jejich úplnost, případně bude snímání pokračovat. Přesnost dat na místě je cca 8m, při post-processingu lze dosáhnout přesnosti kolem 3m. Druhá skupina, rozlohou šetřeného území nad 5ha, je složena z nízkonákladového letounu, často Z-37 Čmelák, který je právě primárně určen pro potřeby zemědělství, a digitální kamery s počítačem řízenou expozicí, kterou jsou lokalizovány pomocí GPS. Zde se využívá metoda tzv. pin-point, kdy je předem naplánováno snímání a snímá se podle předem známých středů projekcí. Objektivy kamery jsou vybaveny filtry pro snímání potřebných spektrálních pásem. Ortogonalizací leteckých snímků na předem připravený DEM a syntézou jednotlivých požadovaných spektrálních pásem dosáhneme přesnosti kolem 65cm (Šafář et al., 2006).

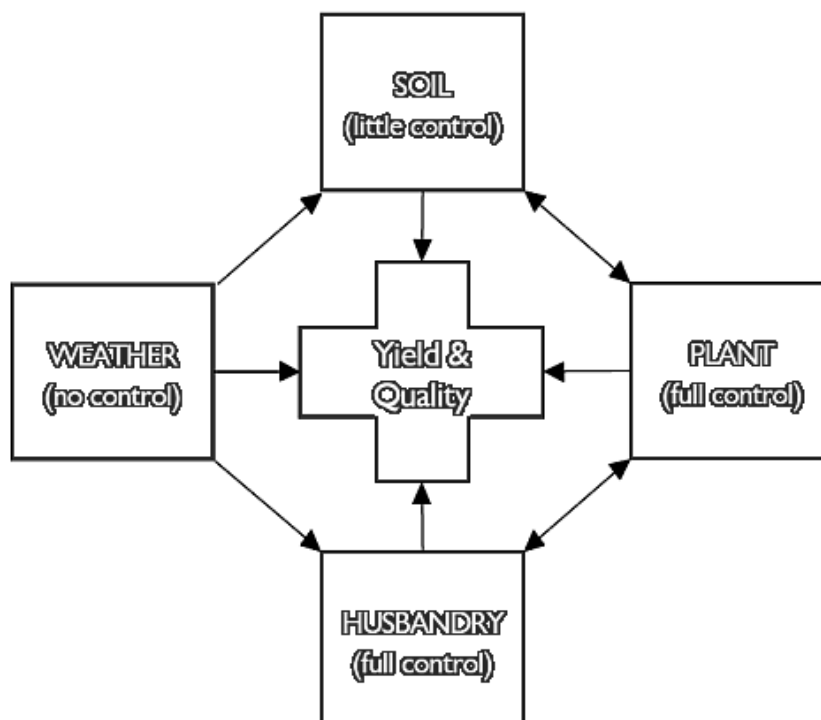
Letecký DPZ nám poskytuje množství informací a lze ho využít v celé řadě oborů. Letecký průzkum lze s výhodou využít pro mapování dřívějšího využívání krajiny. Na snímcích mohou být patrná např. koryta toku před meliorací, naznačené změny hranic pozemků nebo místa bývalých nebo černých skládek. DPZ nám může poskytnout informace i o podmáčenosti pozemků nebo lokalizovat povrchy se stojící vodou, kde dochází k řídnutí nebo vymizení porostu. Pro čistě zemědělské potřeby lze DPZ využít pro sledování plevelů nebo potřeby hnojení. Největší vliv na charakteristiku druhu mají obvykle listy, které svojí největší plochou (vzhledem k rostlině) ovlivňují odrazivost a emisní vlastnosti rostliny a jejich pozadí. Vzhledem k různým vývojovým fázím rostlin a jejich měnící se velikosti listů lze sledovat jednotlivé plodiny v průběhu jejich růstu. Pokud jsou časové vývojové fáze jednotlivých rostlin posunuty, lze tak díky velikosti odrazivosti eliminovat plodinu od plevelu. Mapování potřeby hnojení má pro zemědělce pravděpodobně největší význam z hlediska finančního výnosu. Letecké snímkování rostlinného povrchu využívá tzv. vegetační indexy, které dokáží zvýraznit informace získané pomocí DPZ. Vegetační indexy vyjadřují vztah mezi odrazivostí ve viditelné části červeného spektra (RED, 630-690nm) a v blízké infračervené části spektra (NIR, 750-900nm). Poměrové číslo normalizovaného diferenčního vegetačního indexu (NDVI) je vyjádřeno výpočtem:

$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$. Odrazivost rostlin je ovlivněna podmínkami, ve kterých se rostlina vyvíjí, ale i obsahem chlorofylu a dalších pigmentových látek obsažených v rostlině, jakož i obsahem vody a povrchovou strukturou listu. Tyto podmínky jsou relativně stálé až na ty, kde nějakým způsobem zasáhl člověk (Šafař et al., 2006; Ždímal et al., 2011).

2.2.3 Měření výnosu

Výnos je specifikován základními životními procesy rostliny, tedy fotosyntézou a dýcháním. Životní pochody rostliny jsou ovlivněné nevyhnutelně také půdními procesy a vlastnostmi, jako je pohyb živin v půdě, dostupnost živin pro rostliny, pH půdy nebo vodní a vzdušné poměry půdy. Výnos je tak chápán jako kvantitativní interpretace úrovně pěstování rostlin,

kteřé závisí na celé řadě faktorů půdního prostředí nebo klimatu. Rüsche (2001) specifikuje faktory, které lze ovlivnit zcela, částečně nebo vůbec (obr. 2). Nejmarkantnějším faktorem, nad kterým neexistuje kontrola, je klima, resp. počasí (weather). Částečnou kontrolu můžeme mít nad půdou (soil), ve které plodina roste. Zatímco výběr plodiny (plant) nebo systém hospodaření (husbandry) můžeme ovlivnit zcela.



Obr. 2: Faktory ovlivňující výnos a kvalitu (Rüsche, 2001).

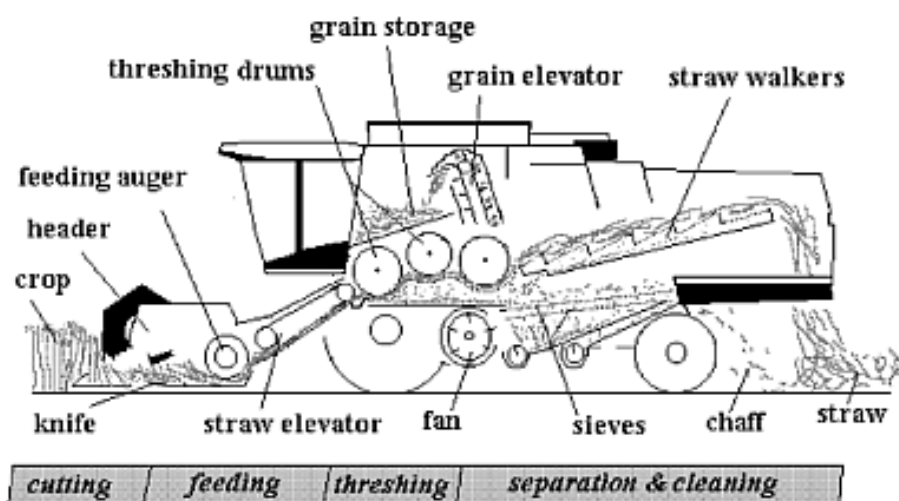
Rüsche (2001) rozděluje půdní faktory na inherentní (struktura, textura, zrnitost, vodní režim apod.) a získané (hnojiva, obsah organických látek atd.). Faktor plodiny závisí zcela na farmáři – výběr plodiny a její odrůdy vhodné lokality nebo rozestupy v řadách a mezi řadami. Systém hospodaření je také plně ovlivnitelný. Volíme způsob obhospodařování, načasování dílčích zásahů, typy hnojiv, pesticidů, herbicidů, insekticidů a dalších. Je nutné, aby farmář při plánování sezóny zvažil všechny výše uvedené faktory.

Jak tvrdí Kavka et al. (1998) základním kritériem k posouzení konkrétního stavu půdy je výnos. Výnos je vyhodnocen na tzv. výnosových mapách, které dávají prvotní informace o pozemku a odrážejí tak potenciál půdy. Ke správnému fungování systému precizního zemědělství je ale nutné

výnosovou mapu doplnit o další důležitá data, jako zásoba živin, půdní reakce, druh půdy, půdní nedostatky (choroby, škůdci apod.) aj. Využití modelů a agronomické interpretace dat nám umožní vytvářet tzv. aplikační mapy hnojení, ochrany a další. Přesná výnosová data lze získat pouze, pokud je současně s hodnotou aktuálního výnosu zaznamenána i přesná geografická poloha pomocí satelitních navigačních systémů. V ostatních případech pak dochází pouze k orientačnímu výnosu přepočtem na plochu, resp. tun na hektar. V podstatě jediným místem, kde lze výnos snadno měřit, je sklízecí mlátička. Proto během roku 1997 bylo na americké kombajny naistalováno více jak 17 tisíc automatických monitorů výnosu. Původně byly monitory používány při sklizni obilí a sóji, postupně se přidávaly další plodiny. V roce 2001 byly monitory výnosu naistalovány na více jak třetině amerických mlátiček pro sklizeň kukuřice a přibližně na čtvrtině mlátiček pro sklizeň sóji. Ovšem pouze na jedné třetině bylo současně využito technologie GPS, tzn., že pouze na 11% kukuřice a 8% sóji mohlo dojít k vytvoření výnosových map. Bez současného použití monitoru výnosu a GPS antény nelze vytvořit výnosovou mapu, která je důležitá pro efektivní systém precizního hospodaření. Mimo kontinent severní Ameriky bylo mapování výnosů ve 20. století v podstatně menším počtu. V západní Evropě, resp. Velké Británii, Německu, Dánsku, Švédsku, Francii apod., se pohybovaly počty výnosových monitorů na stovky. Měření proběhla také v Jižní Americe nebo Austrálii. Prakticky žádná zaznamenaná měření výnosu nebo aplikované postupy systému precizního zemědělství ve 20. století nenacházíme v Asii, východní Evropě nebo Africe, s výjimkou jižní Afriky. Původní monitory výnosu byly vyvinuty pro obilniny nebo řepku. Nyní lze měřit a monitorovat výnos u celé řady nejrůznějších plodin, např. cukrovky, brambor, rajčat, ale dokonce i ručně sklizených plodin jako jsou např. jablka nebo hrušky (Lowenberg-DeBoer, 2003; Neményi, 2003; Whitney, 1999). Ždímal et al. (2011) tvrdí, že výnosové mapy, vzhledem k šířce sklízecí lišty, kde bude docházet k prostorovým nepřesnostem, lze považovat za nejslabší článek celého procesu sběru informací pro systém precizního zemědělství.

Informace o aktuálním konkrétním výnosu zrna jsou kontrolovány senzorem příčného náklonu stroje. Dle velikosti náklonu stroje je korigován údaj o výnosu zrna. Senzor je umístěn zpravidla uprostřed přední nápravy

sklízecí mlátičky tak, aby nedošlo k jeho poškození. Umístění senzorů pro měření výnosovosti je pochopitelné vzhledem k rozdílným částím a jejich funkcím kombajnu (viz obr. 3). Na sklízecí hlavě je plodina řezána (cutting) a podávána (feeding) do mláticího mechanismu (threshing). Zde se zrna dělí od zbytku plodiny a obojí je navzájem odděleno (separation). V poslední fázi je zrna očištěno od cizího materiálu a plev (cleaning). Čisté zrna je poté dopraveno do zásobníku na zrna pomocí soustavy dopravníků. Měření výnosu čistého zrna lze tedy provést pouze v této poslední fázi. Reyns et al. (2002) tvrdí, že jestli je plodina uříznuta dostatečně nízko u země, lze měření stébel slámy provést téměř ve kterékoli části kombajnu, kterou plodina prochází, dokonce i když je ještě smísená se zrnem. Principem měření aktuálního výnosu je měření hmotnostního nebo objemového toku zrna. Tok lze měřit pomocí několika typů čidel, resp. mechanických, optických, nárazových apod. Signály z čidel mohou být zpřesněny údaji o aktuální vlhkosti zrna. Pro přesnější výsledky je vhodnější měřit hmotnost, objem může být ovlivněn hustotou zrna. Alternativním způsobem měření aktuálního výnosu, který lze použít pro všechny typy sklízeného materiálu, je měření mezery mezi horními a spodními vkladacími válci vkladáče kombajnu. Jedná se tak o jakýsi kompromis mezi kvalitou výsledku měření a technickou náročností měření. Pro konkrétní sklízenou plodinu je nutné zvolit vhodný systém měření okamžitého výnosu (Skalický, 2004; Kavka et al., 1998).



Obr. 3: Fáze zpracování zrna sklízecí mlátičky (Reyns et al., 2002 ex. Missotten, 1998).

Základním principem měření výnosu zrna během práce sklízecí mlátičky je kombinace měření váhy zrna a rychlosti. Masa zrn je často měřena pomocí vážících mechanismů, které zrno také dopravují. Problém této metody může být ve vlhkosti zrna. Navíc je tyto mechanismy obtížné zkonstruovat. Měření výnosu lze tedy spočítat jako změnu hmotnosti zásobníku zrn v čase, na otočném dopravníku nebo vážením dopravníku, který dopravuje čisté zrno do zásobníku. Častým způsobem je tak využití vážících kladek, které nesou dopravníky. Jednotlivé přepady mezi dopravníky dovolují také namontovat pásové váhy. Další měření spočívá ve zjištění množství – objemu masy zrna. Měření objemu probíhá při průchodu senzorem za určitý čas nebo měřením času při průchodu masy o určitém objemu. Musíme znát i hustotu masy, ta závisí na druhu zrna a jeho růstových podmínkách. Pro získání validních výsledků se musí měření hustoty provádět pro každé pole zvlášť nebo dokonce i několikrát pro jedno pole. Nejjednodušší způsob, jak změřit hustotu masy zrn, je použití optických emitorů a detektorů. Většina komerčních senzorů využívá tzv. měření dopadu neboli nárazovou energii. To je založené na měření síly a momentu dopadu, který je ovlivněn změnou rychlosti a intenzitou proudění, zrna na měřicí zařízení, umístěném na vrcholu dopravníku. Různé studie se také zabývaly měřením výnosu slámy, které ale většinou není využito pro účely precizního hospodaření. Sensory pro měření výnosu slámy mohou být využity pro regulování rychlosti kombajnu. Průchod masy stébel slámy výrazně ovlivňuje nakládání mlátičky a regulace rychlosti by tak mohla zefektivnit proces sklizení plodin. Výnos zrna i výnos slámy jsou kvantifikovány jako množství jednotky na plochu. Aby mohlo dojít k vyhodnocení dat z výnosových senzorů, jsou potřebná další data jako výška řezání plodin nebo rychlost mlátičky (Mašek et al., 2008; Reyns et al., 2002).

Kvalita plodin přirozeně ovlivňuje jejich tržní hodnotu. Proto je pro systém precizního zemědělství důležité znát kvalitativní parametry plodin, resp. obsah vody a bílkovin apod. Vlhkost a obsah proteinů lze změřit pomocí senzorů využívající blízké infračervené záření nebo mikrovlny. Pro veškerá měření je důležitá spolehlivost a snadné použití zvolené techniky. Farmáři, kteří chtějí využívat výhody precizního hospodaření, se musejí naučit, jak senzory ovládat a kalibrovat, jak ze získaných dat vytvořit výnosovou mapu a jak takovou mapu interpretovat a použít, aby sloužila k zefektivnění práce

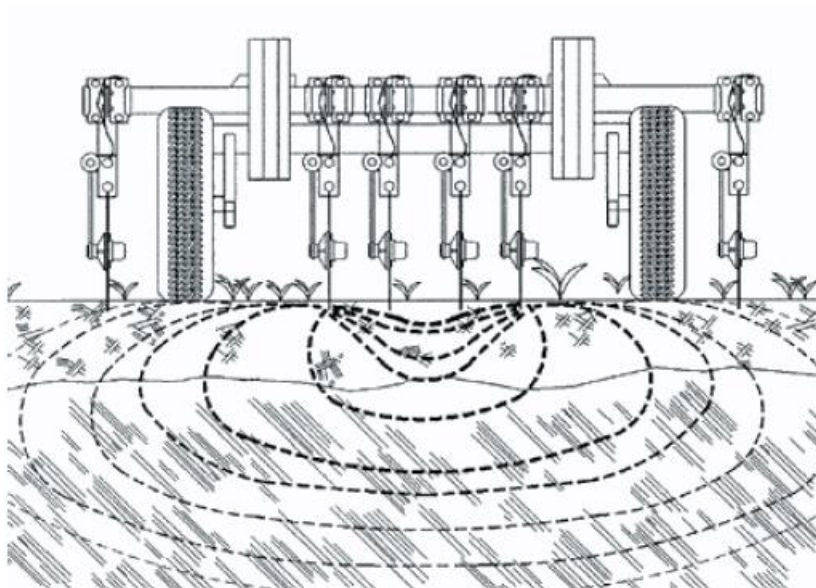
i redukci množství aplikačních látek. Zemědělec může díky měření výnosu přizpůsobit práci lokálně specifickým podmínkám daného pole. Na základě informací, které řidič ze systému získává prostřednictvím příjmu signálu družicového navigačního systému, může dojít k aktuálnímu zefektivnění práce zemědělského stroje. Zároveň může být informace o výnosu důležitá pro dopravce, kteří budou znát hmotnost nebo objem výnosu a mohou tak přizpůsobit logistiku. Rovněž i finální zpracovatelé té konkrétní plodiny budou vědět, s jakým množstvím produktu mohou počítat do výroby (Mašek et al., 2008; Lowenberg-DeBoer, 2003; Reyns et al., 2002).

2.2.4 Měření půdy

Jak bylo popsáno výše, měření výnosu a výnosové mapy jsou velmi rozšířeným nástrojem precizního zemědělství. Výnosová mapa dá uživateli kvantitativní představu o tom, jak se výnos plodin liší napříč polem v různých sezónách. Měření výnosu ale nemá vypovídající hodnotou proč tomu tak je. Výnosové mapy nepodávají informace o vlastnostech půdy, resp. typu půdy, obsahu jílových částí, obsahu organické hmoty a živin, vodní půdní kapacitě apod., přitom všechny tyto a další faktory ovlivňují právě výnosovost. Veškeré informace o vlastnostech půdy lze snadno zjistit laboratorními podmínkami. Abychom zjistili relevantní údaje o celém poli, vyžadovalo by to velké množství vzorků a jejich laboratorní analýzu, což je namáhavá, zdlouhavá a finančně náročná záležitost. V České republice je zavedeno systematické půdní vzorkování od 60. let 20. století v rámci Agrochemického zkoušení půdy, resp. odběry vzorků o hustotě příslušné dané výrobní oblasti. Odběry vzorků musí být v takovém množství a kvalitě, aby dostatečně reprezentovaly celou zkoumanou plochu. Odběry se tak provádějí v pravidelné síti bodů nebo z ploch pravidelně rozmístěných po pozemku. Vznikají tak půdní mapy, resp. mapa půdních typů nebo půdních vlastností. Mapy vznikaly za účelem poskytnutí informací pro regionální plánování využití půd. Tomuto účelu odpovídají i velká měřítka, ve kterých mapy vznikaly nejenom v ČR, ale i ve většině ostatních zemích světa. S ohledem na účel takto připravených

map je nelze použít jako vhodný zdroj informací o různorodosti půdních vlastností v rámci jednoho půdního bloku. Informace o rozdílnosti půdních vlastností lze efektivně získat také měřením elektrické vodivosti – konduktivity půdy (Kodaira et al., 2013; Vitharana, 2008; Šařec et al., 2002).

Konduktivita představuje schopnost půdy vést elektrický proud. Velikost této veličiny se liší v závislosti právě na typu půdy. Elektrickou vodivost půdy lze měřit dvěma způsoby – kontaktní a bezkontaktní metodou. První metoda se skládá z několika elektrod, které jsou v přímém kontaktu s půdou (obr. 4). Prostřední pár elektrod pouští do půdy elektrický proud, přičemž ostatní elektrody měří jeho pokles – pro elektrický proud představuje půda odpor, který lze spočítat, když známe právě pokles proudu a hodnotu vstupního elektrického proudu. Elektrická vodivost je pak převrácená hodnota spočítaného elektrického odporu se standartní jednotkou $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (miliSiemens na metr). Vzdálenost párových elektrod představuje odhadovanou hloubku půdy, obecně tedy platí, čím větší vzdálenost elektrod, tím hlubší půdy lze měřit. Elektrická vodivost ale může být ovlivněna různými vlastnostmi půdy, resp. její teplotou, obsahem jílovitých a pískových částic nebo posklizňovými zbytky apod. Druhá metoda je bezkontaktní, tzn., že senzory nemají přímý kontakt s půdou, ale generují indukční elektromagnetické pole, které je přenášeno do půdy a následně měřeno přijímací jednotkou. Obě metody mají přibližně shodnou přesnost výsledků měření. Data jsou zaznamenávána společně s informací o poloze poskytnutou technologií GNSS, která poté umožňuje promítnutí dat do map. Mapy predikují územní rozlišnosti ve vlastnostech půdy. Aby došlo ke správné identifikaci a interpretaci výsledků, je třeba odebrat několik půdních vzorků a podrobit je laboratorní analýze, nicméně v mnohem menším počtu, než by tomu bylo u měření vlastností půdy bez měření konduktivity (Šařec et al., 2002).



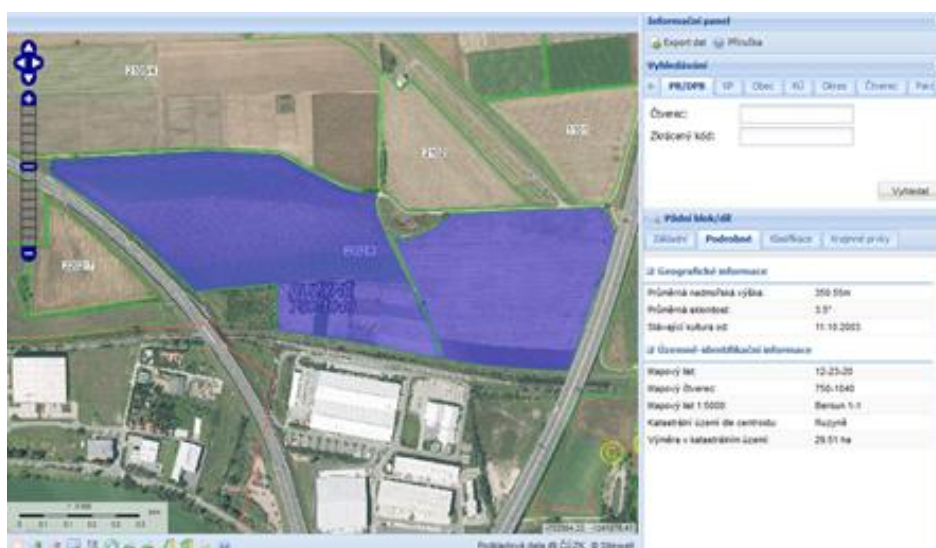
Obr. 4: Měření konduktivity pomocí kontaktních elektrod (Šařec et al., 2002).

Informace o vlastnosti půdy můžeme získat také již při jejím aktuálním zpracování. Při práci stroje lze snadno měřit tahovou sílu, resp. zjistit odpor nářadí nebo zařízení proti jeho pohybu, a z něho odvodit různé fyzikální vlastnosti půdy. U novějších strojů se tahová síla již měří za účelem hydraulické regulace závěsu. Skalický (2004) tvrdí, že takto získaná data mohou být dostatečně přesná pro mapování odporu půdy proti jejímu zpracování, výsledkem tak může být mapa tahových odporů pole.

2.2.5 Evidence informací

Farmář čeká od systému precizního zemědělství především jednoduchou mapu, ve které bude zhodnocena aktuální situace jeho pozemků, plán produkce a sadu doporučení k potřebným pěstebním opatřením. LPIS je geografický informační systém, jehož základním účelem je evidence a správa využití zemědělské půdy. Databáze LPIS funguje od konce března 2004 na základě zákona č. 252/1997 Sb., o zemědělství. Vytvořena byla primárně jako nástroj ověřování dat v žádostech o dotace na zemědělskou půdu z národních zdrojů, ale i zdrojů Evropské unie. Dnes LPIS nabízí celou řadu nadstavbových služeb. Lze ho využít jako podklad pro vedení zákonných evidencí o používání hnojiv, přípravků na ošetřování rostlin apod.

Využití se nalezne také jako zdroj informací z hlediska nitrátové směrnice (předpis EU pro ochranu vod před znečištěním dusičnany ze zemědělské výroby, v rámci tzv. agroenvi opatření). Monitoringu výskytu škodlivých organismů, lokalizace ohnisek nakažených zvířat nebo podklad pro stanovení vratky daní u nafty spotřebované při zemědělské výrobě (tzv. zelená nafta) lze také dosáhnout pomocí databáze LPIS. Koncem roku 2009 s novelou zákona o zemědělství přibylo do databáze LPIS několik nových druhů evidencí, a sice evidence krajinných prvků, evidence umístění objektů hospodářství a evidence obnovy travního porostu (MZeČR, 2014; Sobota, 2009; Gnip et al., 2003).



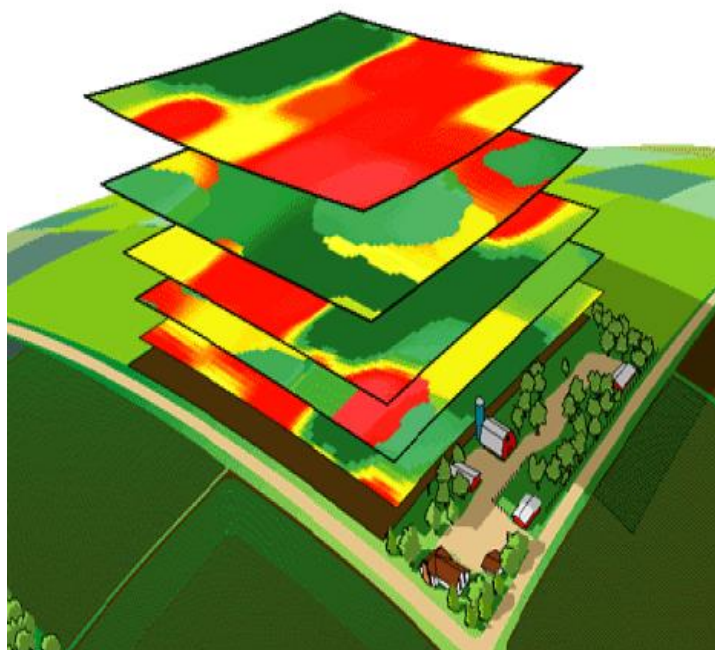
Obr 5: Webové rozhraní pLPIS (MZeČR, 2014).

LPIS nabízí pro veřejnost tři moduly. Nejstarší služba – Registr půdy pro farmáře (iLPIS) funguje od roku 2005, je určena registrovaným farmářům a nabízí kromě evidence dat také nástroje pro vedení osevních postupů. Modul určený široké veřejnosti – Veřejný registr půdy (pLPIS, obr. 5) byl spuštěn v roce 2009, kdy to umožnila novela zákona č 252/1997 Sb. Třetí modul umožňuje načítání dat do externích aplikací, tzv. WMS/WFS služby. Mimo databáze evidence půdy existuje ještě celá řada registrů, které mají farmářům pomáhat v zemědělské výrobě nebo umožnit veřejné správě kontrolu dodržování předpisů. Jednou z databází je např. Evidence přípravků a hnojiv. Spuštěna byla v roce 2007 primárně jako nástroj pro evidenci aplikace hnojiv, pastvy a přípravků na ochranu rostlin a úkonů spotřeby zelené nafty tak,

aby byly splněny příslušné vyhlášky, resp. aby farmáři obstáli před kontrolními orgány. Služba poskytuje zemědělcům počítání přísunu dusíku a jiných živin na plochu (MZeČR, 2014).

2.3 Analýza dat – geografické informační systémy

Geografické informační systémy (GIS) jsou neodmyslitelnou součástí systému precizního zemědělství. Vlastností GIS systémů je integrace dat, která jsou získána z různých zdrojů v různých časech, do počítače, v němž se s daty dále pracuje. Využití technologií GIS se začalo zvyšovat právě s nesprávným hospodařením, hlavně s půdou a vodou. GIS zpracovává prostorové informace vlastností půdy a plodin, zaplevelení apod. Tato data často nejsou získána ve stejný čas, a proto se jedná o jakýsi mezikrok k vytvoření expertních podkladů, které budou sloužit pro ustanovení doporučení k dalším pěstebním zásahům. GIS aplikace jsou nástrojem pro zobrazování a další zpracovávání prostorových dat. Umožňují nejenom zobrazení různých druhů získaných prostorových dat, ale také jejich organizaci, editaci nebo provádění analýz. Vstupními daty pro GIS jsou údaje georeferencované do běžných souřadnicových systémů, aby mohlo dojít k jejich prostorovému zobrazení. Každá sada údajů tvoří datovou vrstvu, se kterou lze provádět různé analýzy nebo vrstvy navzájem kombinovat. Příkladem takové vrstvy (obr. 6) může být mapa rostlinného pokryvu, půdní mapa, topografie zájmového území, mapa zásobení živinami a další. Ze všech vstupních dat – map spolu se zkušenostmi farmáře se vytváří tzv. aplikační mapa (Blackmore, 2003; Mandal et al., 2000).



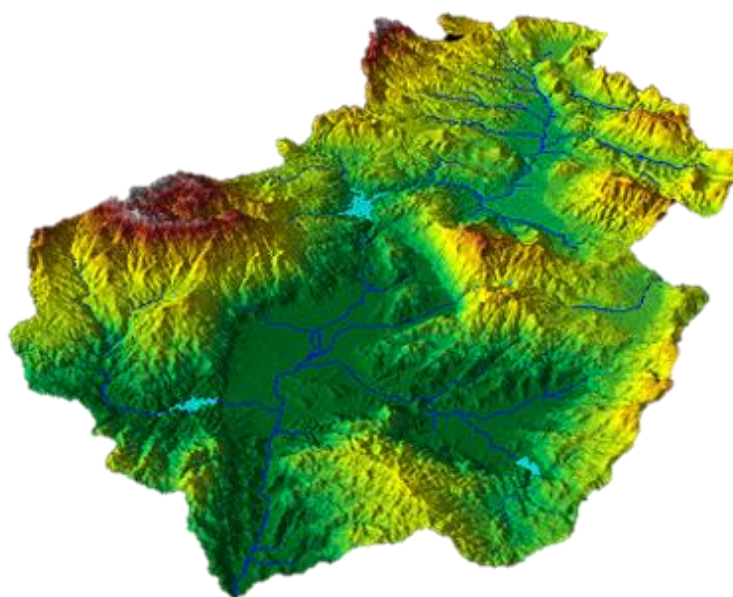
Obr. 6: Znáornění heterogenity georeferencovaných vstupních vrstev do GIS (Ryant, 2001).

GIS nemusí sloužit pouze jako aktuální tvůrce podkladů pro rozhodování, ale i pro dlouhodobé mapování výnosů, aplikaci hnojiv apod. Získaná data lze tak porovnávat i s daty z minulých sezón, což může být cenný zdroj informací. Vhodnými agronomickými analýzami získáme podklady, které budou zásadní při utváření strategie a taktiky na další sezónu. Během rozhodování ale samozřejmě nelze opomenout farmářovy vlastní zkušenosti. Rozlišení a vzhled map, které hrají zásadní roli při vytváření dalšího postupu, musejí být snadno interpretovatelné, aby mapa byla efektivní při řízení výroby. Proto je kódově barevně rozlišená mapa mnohem užitečnější než mapa monochromatická. Nicméně systém precizního zemědělství nevyjadřuje konkrétní metody řízení hospodářství. Pouze umožňuje zemědělcům lepší pochopení vztahů a větší kontrolu nad vstupy do výroby (Blackmore, 2003; Whitney, 1999).

Blackmore (2003) popsal tři možné scénáře zemědělské strategie. První scénář (zachovaný výnos, vysoké vstupy), kdy si farmář přeje maximalizovat svůj výnos na nejvyšší možnou úroveň. Ten vyžaduje velké materiální vstupy a záměrné potlačení environmentálních nároků při vytváření strategie hospodaření. Stres vzniklý zvýšenými nároky na produktivitu území způsobí narůstající poškození místního ekosystému. Muselo by také dojít ke zvýšené kontrole při manipulaci s nebezpečnými chemickými látkami, aby nedocházelo k vystavení látky náhodnému znečišťování. První scénář je pro farmáře pravděpodobně žádoucí, ale určitě nežádoucí pro širší veřejnost. Druhou možností je omezení vstupů, optimální návratnost a základní ochrana životního prostředí. Míra materiálních vstupů je omezena na ekonomické optimum, které odpovídá stupni rizika ze ztráty výnosu. Nejsou stanovena přímá environmentální kritéria, nicméně úroveň aplikovaných pesticidů jsou drženy na rozumném stupni a hnojiva jsou využívána s ohledem na ekonomicky optimální hladinu. Restrikce aplikovaných vstupů a tolerance vyššího prahu škůdců by měla vesměs pozitivní vliv na faunu a flóru obhospodařovaných ploch. Vliv na krajinu bude relativně neutrální. Omezení materiálních vstupů a vysoký stupeň ochrany krajiny je třetím scénářem. Tento model pracuje s faktem, že během utváření strategie bude kladen velký důraz na environmentální aspekty např. v reakci na podporu externích příjmů (dotací). Je také možný dohled orgánů veřejné správy (orgánů ochrany přírody) na plochách intenzivního hospodaření, kde by mohlo docházet ke zvýšené erozi. Dávkování hnojiv mlže být menší než je optimální ekonomická úroveň. Tento scénář má potenciálně nejvyšší význam pro životní prostředí. Nejvyšší přínos tohoto modelu spočívá v možnosti vytvoření žádoucích biologických společenstev nebo celých krajin. Z každé navržené strategie plynou různé finanční důsledky. Jestliže máme za cíl zvýšit výnos a udržet ho na maximální možné úrovni pomocí vysokých vstupů, je tu potenciál k vyrovnání výdajů s narůstajícím výnosem. Na druhé straně, pokud zcela hájíme aspekty životního prostředí a ochranu přírody a krajiny, je tu riziko finančních propadů bez zásahů státu nebo jiných složek správy.

2.4 Digitální modely terénu (DEM)

Digitální model terénu (v anglické literatuře jako Digital Terrain Model nebo častěji Digital Elevation Model – DEM) je digitální rastrovou reprezentací souvislého terénu (obr. 7), resp. kvantifikuje charakteristiky zemského povrchu. DEMs jsou jedním z mnoha možných výstupů geografických informačních systémů. Kvalita, resp. přesnost, modelu závisí především na rozlišení – vzdálenostmi mezi jednotlivými body. Digitální modely terénu, resp. rastrová data souvisle zobrazující průběh hodnot, vznikají obvykle prostorovými interpolacemi naměřených bodů. Prostorová interpolace je proces, resp. matematická funkce, která odhaduje hodnoty v místech, kde nejsou dostupné hodnoty měřené. Interpolace také předpokládá, že vstupní data jsou souvislá, resp. spojitá. Tím je umožněno odhadnutí hodnot terénu ve kterémkoli místě ohraničeném vstupními daty. Dalším předpokladem je, že vstupní data jsou prostorově vázaná – hodnoty, které jsou blíže sobě, jsou si podobnější než ty vzdálenější, jedná se o tzv. prostorovou autokorelaci. Interpolace tak utvářejí povrch z měřených bodů. Bodová data jsou vázána k jednoho místo, zatímco povrchová data vytvářejí souvislou hladinu. Interpolace lze vytvářet nejenom povrch terénu z výškových bodů, ale lze také vytvořit souvislý povrch z dalších kvantitativních charakteristik, jakými jsou např. srážky, teplota, výnos apod. (ESRI, 2014; Li et al., 2005).

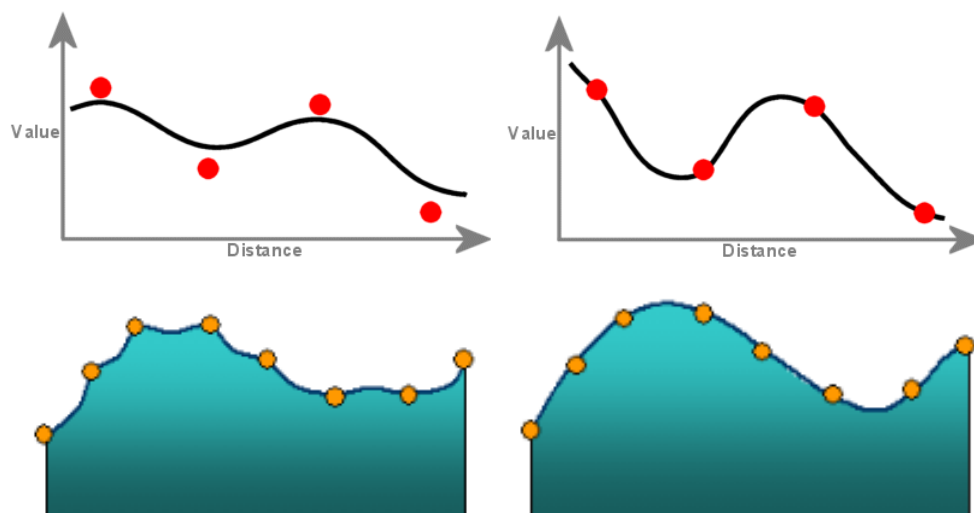


Obr. 7: Vizualizace digitálního modelu povrchu nekonkrétní plochy (ESRI, 2014).

Interpolační metody lze rozdělit na deterministické a stochastické, globální a lokální nebo exaktní a aproximující. Deterministické metody interpolují přímo z naměřených vstupních bodů, zatímco stochastické metody v sobě zahrnují určitý prvek náhodnosti. Metody je založena na stochastickém modelu, který pracuje s prostorovou závislostí mezi jednotlivými vstupními body. Globální metody pro interpolaci zpracovávají všechny měřené hodnoty, pro interpolaci je použita jedna matematická funkce pro celé zkoumané území. Oproti tomu lokální metody používají algoritmus výpočtu opakovaně na konkrétní menší skupinu bodů. Exaktní metody interpolace přesně reflektují vstupní měřené hodnoty, tzn., že výsledný povrch bude procházet všemi vstupními body. U aproximačních metod dochází k určitému zahlazení povrchu v místech se známou hodnotou (Křikavková, 2009, Mitas et al., 1999).

Interpolační metoda IDW aplikuje základní geostatický princip (označován také jako Toblerovo pravidlo), který vychází z předpokladu, že aktuálně počítaná hodnota je více ovlivněna bližšími body než vzdálenějšími. Hodnota konkrétního bodu při počítání je vážena jeho vzdáleností od aktuálně počítaného místa, je tak počítán vážený průměr ze vstupních hodnot. Interpolační metody IDW neumí extrapolovat, tzn., že výsledný model nebude obsahovat vyšší nebo nižší hodnoty, nežli jsou vstupní data. Tím dochází k určitému zploštění výsledku. Výsledný povrch IDW také nikdy nebude procházet naměřenými hodnotami. Interpolační metoda IDW odhaduje hodnoty v neměřených bodech lineární kombinací hodnot bodů měřených. Metoda pracuje s technikou, kdy bližší body interpolovanému bodu jsou reprezentativnější oproti bodům více vzdáleným. Výhodou IDW je její intuitivnost a efektivnost. Nevýhodou je její citlivost na body vzdálené zájmové oblasti. Kriging je metoda podobná IDW v tom, že využívá lineárních kombinací známých bodů k odhadnutí hodnot bodů interpolovaných. Kriging používá semivariogramy. Měří prostorovou korelaci mezi dvěma body – hodnota počítaného bodu je ovlivněna prostorovým uspořádáním vstupních bodů (Wu et al., 2013; Mitas et al., 1999). Wu et al. (2013) ex. Schloeder et al. (2001) hodnotí, že deterministická metoda IDW a stochastická Kriging mají velmi podobné výsledky v přesnosti. Obě metody také kvalitněji reprezentují data výsledným povrchem oproti interpolační metodě Spline.

Výsledný rastr u exaktní metody Spline oproti IDW prochází přesně naměřenými hodnotami (obr. 8). Metoda Spline nejenom interpoluje, ale také extrapoluje, tzn., že spočítá i vyšší a nižší hodnoty než obsahují měřená data. Při tvorbě modelu pomocí metody Spline vstupuje do procesu interpolace i sklon mezi sousedícími body, resp. změny hodnot s jejich vzdáleností. Metoda Spline předpokládá uniformitu vstupních dat. Výhodou je tvorba dostatečně přesných a vizuálně líbivých modelů terénu již z několika málo bodů. Nevýhodou metody pro tvorbu výškových modelů je její extrapolační vlastnost, tzn., že výsledný povrch může mít jiné maximální a minimální hodnoty terénu, než obsahují vstupní data (Wu et al., 2013; Mitas et al., 1999).

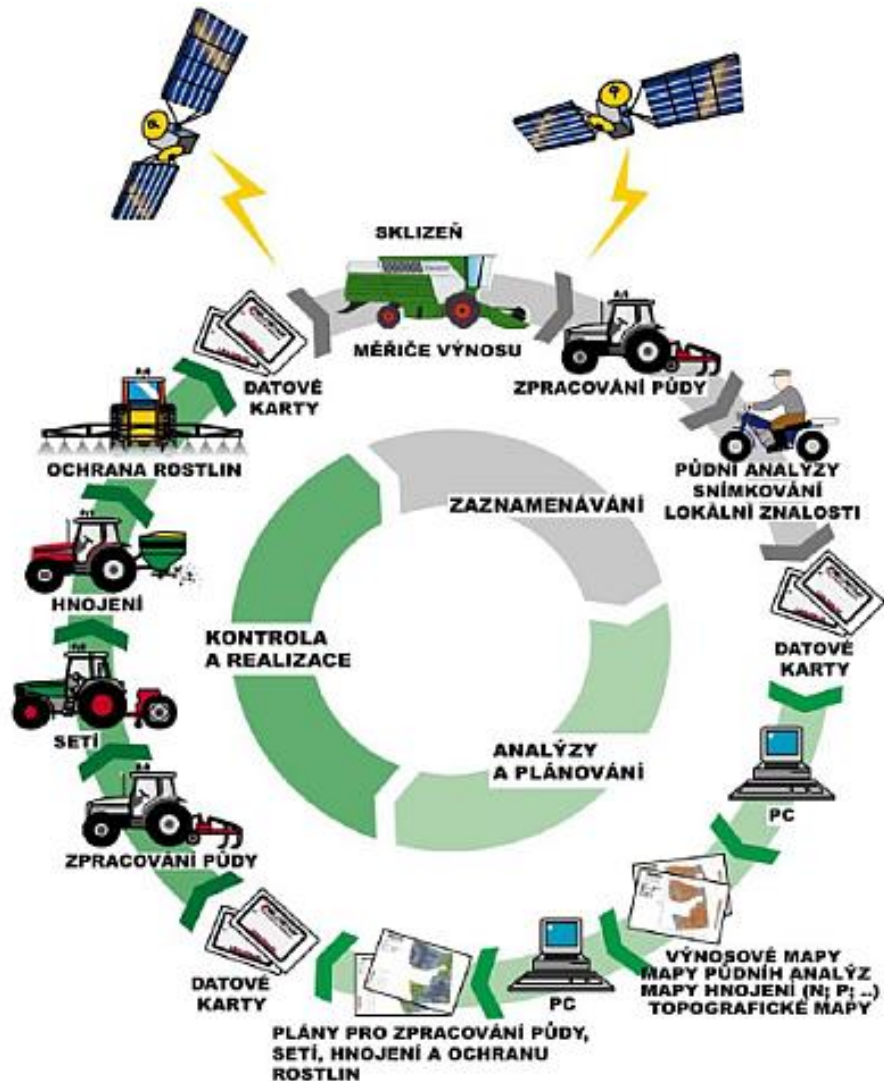


Obr. 8: Vlevo aproximační metoda IDW, vpravo exaktní Spline (GIS Resources, 2014).

2.5 Cyklus precizního zemědělství

Schéma běžných operací prováděných v režimu precizního zemědělství je znázorněno na tzv. kruhu precizního zemědělství (obr. 9). Vnitřní kruh popisuje fáze, které musí být provedeny, zatímco vnější kruh podává grafickou reprezentaci vyžadovaných úkonů. První fáze - zaznamenávání zajišťuje sběr dat, resp. shromažďuje výsledky předchozího cyklu. Zdrojem dat pro tuto fázi jsou údaje o výnosu, data z měření půdy (typ půdy, obsah půdních živin, výskyt patogenů apod.), údaje získané leteckým nebo satelitním dálkovým průzkumem a další získané údaje. Během fáze analýzy a plánování

se všechna nasbíraná data analyzují a hodnotí se charakter dlouhodobosti získaných dat. Důležitá je úplnost a správnost dat, případně identifikování vzniklých chyb (Rüsch, 2001).



Obr. 9: Schéma principu precizního zemědělství (Ryant., 2001).

Rüsch (2001) také tvrdí, že je nezbytné mít data o výnosu za 3 – 6 let zpět, aby mohl být systém precizního hospodaření implementován a abychom mohli určit dlouhodobý trend, vzhledem k možnému výskytu sezónních abnormalit, jako jsou povodně, výskyt nemocí apod. Kromě údajů o výnosu může také informace o dlouhodobém trendu poskytnout satelitní dálkový průzkum Země. Podklady pro další fázi jsou právě zanalyzovaná data. Farmář může vybírat mezi mnoha scénáři zahrnujícími většinu faktorů. Jedná se tak o fázi, kde má farmář podklady a doporučení pro své další rozhodnutí

o zvolených metodách nebo způsobech hospodaření, volbě plodiny, odrůdy apod. Na základě výstupu této fáze farmář navrhne plán výsadby, hnojení a ochrany rostlin pro nadcházející pěstební sezónu. Plán je stanoven díky jeho osobní strategii (zkušenostem) a průměrné zemědělské sezóně. Jakmile bude dokončena tato fáze, sbírá se nová sada informací a výsledků.

2.6 Aplikace, variabilita

Lokálně specifická aplikace dusíkatých hnojiv se provádí pomocí tzv. N testerů, neboli senzoru, který pracuje na principu dálkového optického snímání zbarvení okolního porostu. Zbarvení je ovlivněno obsahem chlorofylu i hustotou porostu, a tedy i potřebou dusíkatých hnojiv. Informace z N senzoru spolu s údaji o intenzitě slunečního záření vyhodnocuje palubní počítač, který na základě rychlosti stroje dává příkazy o množství potřebné aplikace jednotce, která aplikuje látku. Data o aplikovaném množství a aktuální poloze ze systémů GNSS zaznamenávají a mohou se tak dále vyhodnocovat a vytvářet mapy hnojení na pozemku. Využití tohoto systému vede k optimalizaci hospodaření s dusíkatými, ale i jinými látkami. Mimo optické senzory lze v dnešní době využít senzory laserové, které snímají přesný odstín nezávisle na intenzitě slunečního svitu nebo denní době (Skalický, 2004).



Obr. 10: Palubní GNSS přijímač pro zemědělské účely (AGROTEC, 2014).

Na současném trhu lze nalézt tři typy řízení strojů, které se liší především úrovní uživatelského ovládání a cenou. První typ, kdy řidič ovládá svůj stroj na základě definovaných linií na obrazovce svého palubního počítače (obr. 10), tzv. manuální navigace. Využívá se především pro systémy dGPS s nižší garantovanou přesností. U asistovaného řízení je stroj vybaven krokovým elektromotorem, který drží volant v požadované dráze. Systém asistovaného řízení je tak schopen udržet rovnou linii dráhy pojezdu za předpokladu, že řidič vytvoří první linii. Podle ní se celý systém bude řídit. Systém tak zcela řídí stroj. Při zásahu řidiče se systém odpojí a řízení je v rukou řidiče, ten může např. nadefinovat novou dráhu pojezdu. Třetím typem je systém, který je zcela implementován do hydrauliky řízení, jedná se o tzv. autopilota. Ten obsahuje i kontrolní systémy, jako jsou čidla natočení kol nebo čidlo náklonu stroje. Autopilota lze využít při všech typech polních prací, kde je v dostatečně kvalitní a přesné míře přijímán signál dGPS (Trimble, 2014).

V případě tradičního konvenčního způsobu hospodaření dochází k uniformní aplikaci látek. Dávkovače vstupů (hnojiv, pesticidů apod.) jsou nakalibrovány před začátkem práce stroje a za využití jednoduchých elektronických systémů dochází ke kontrole rovnoměrné aplikace látek. Pokud není tohoto systému využito, dochází k ovlivnění úrovně aplikace látek např. vlivem rychlosti zemědělského stroje. Hospodaření v režimu precizního zemědělství umožňuje dávkování látek v různé míře v závislosti na lokálně specifických podmínkách půdního bloku (obr. 11) v reálném čase. Lze dávkovat nejenom různou potřebnou míru látek v rámci jednoho pole, ale dokonce lze dávkovat i různé poměry látek (N, P, K) v závislosti na chybějících živinách v případě dávkování hnojiv. Podkladem pro správnou a vhodnou aplikaci látek je vytvoření tzv. aplikační mapy. Pomocí globálních pozičních systémů na základě dat aplikačních map je určována poloha, kde dochází k aplikaci látky, resp. kde dochází k otevření nebo zavírání aplikačních ventilů postřikovačů (Studničková et al., 2011; Blackmore, 2003).



Obr. 11: Vizualizace heterogenních ploch pozemku (SCEE, 2011).

2.7 Budoucí vývoj

Hospodaření precizním zemědělstvím zaznamenává celosvětový rozvoj, a to především v agrárně vyspělých zemích, jako jsou Spojené státy, kde tento systém vznikl. Státy USA vynikají oproti světu mimo svojí agrární struktury i svojí technologickou vyspělostí. Česká republika by také měla vhodnou agrární strukturu pro systém precizního zemědělství. Převládají u nás velké zemědělské podniky, rozlehlé, často členité orné bloky i rozmanité pedologické, hydrologické a klimatické podmínky. Důvodem, proč v současné době nelze systém precizního zemědělství v ČR příliš uplatit, jsou nepříliš pozitivní ekonomické ukazatele většiny zemědělských podniků. Se změnou dotační politiky Evropské unie došlo v ČR k navýšení žádostí o zemědělské informační technologie. Proto jsou nové zemědělské stroje přímo vybavovány palubními počítači, GNSS anténou, senzory a záznamovými zařízeními, kam se všechna data ukládají. To dává podmínky k rychlému rozvoji systému precizního zemědělství v kontextu evropského kontinentu. O systém precizního hospodaření je mezi českými farmáři zájem a dodavatelé zemědělské techniky, hnojících nebo pesticidních látek s tímto trendem

počítají. Tento způsob hospodaření se neuplatňuje pouze na orné půdě, ale funguje nanejvýš efektivně i pro obhospodařování trvalých kultur, trvalých travních porostů, dokonce i pro živočišnou výrobu. Princip precizního hospodaření, hodnocení stavu a následnou variabilní aplikaci potřebných látek a zásahů lze uplatnit dokonce i pro sportovní trávníky nebo veřejnou zeleň (Lukas et al., 2010; Gnip et al., 2003). Kroulík et al. (2006) konstatuje, že základní limitující faktor, který brání komerčnímu rozšíření precizního zemědělství, je cena půdních vzorků, které by musely být odebrány v takovém rozsahu, aby umožnily vytvoření půdních map. Pro nahrazení současných pracných a časově náročných metod analyzujících půdu, musejí být vyvinuty efektivní přesné senzorické metody. Výrobci se proto snaží vyvíjet nové snímací technologie s cílem na vysokou přesnost měření za minimální cenu. Šance, jak ze začátku snížit tyto fixní náklady, je využití služeb velkých specializovaných společností, které se precizním zemědělstvím zabývají. Náklady, které by musel farmář na systém precizního zemědělství vynaložit, by se tak mohly rozprostřít mezi vyšší počet uživatelů. Vitharana (2008) ex. Van Meirvenne (2006) se ale obává, že s rostoucí dostupností a efektivností různých informačních zdrojů a jejich derivátů, by mohlo dojít až ke stavu tzv. přeinformovanosti. Vitharana dodává, že různé pomocné zdroje informací budou odrážet územní různorodost na odlišných úrovních.

2.8 Porovnání běžných systémů hospodaření

Farmáři a zemědělci se stali producenty v agroekonomice pravděpodobně proto, že mají rádi aktivní život na venkově, který práce v zemědělství nabízí, a ne proto, že chtějí trávit čas analýzami dat před obrazovkami svých počítačů. Lowenberg-DeBoer (2003) říká, že tak možná nedobrovolně tráví čas managementem, který systém precizního hospodaření vyžaduje. Tato nedobrovolnost zavázat se trávením času organizací a správou systému precizního hospodaření tak dává příležitost externím zdrojům, subjektům, které by analyzovaly potřebná data a dělaly žádoucí doporučení k pěstebním zásahům a opatřením.

Alternativní, nebo také ekologické, zemědělství je v dnešní době již legislativně uznávaný systém hospodaření. Omezuje používání konkrétních aplikačních látek nebo postupů, které by zbytečně zatěžovaly životní prostředí nebo způsobovaly neúměrný stres hospodářských zvířat. Ekologické zemědělství je moderní způsob hospodaření půdou, který se začíná stávat nedílnou součástí politiky většiny vyspělých zemí Evropy. Cílem ekologického zemědělství je produkce vysoce nutričních potravin, navyšování přirozené úrodyschopnosti půdy, odstranění znečištění prostředí způsobené zemědělstvím a nastavení přírodních podmínek pro zvířata. Ekologické zemědělství vznikalo již po první světové válce, v období industrializace a urbanizace, kdy farmáři a sedláci začali ztrácet svoji nezávislost a samostatnost. Z této doby jsou také první údaje o poškozování půdní úrodnosti, výrazných změnách půdního pH a snižování kvality potravin zvýšenou potřebou konzervantů a dalších chemických látek. Systém ekologické zemědělství chápe přírodu jako jeden celek s jeho vnitřní hodnotou a usiluje o maximální vztah mezi zemědělcem a finálním konzumentem. Ekologické zemědělství se ale většinou jen velmi malou část podílí na zemědělské výrobě státu. A tak i se vzrůstajícím podílem jak ekologického tak i precizního způsobu hospodaření zaujímá největší podíl konvenční systém hospodaření (z latinského *conventio*, neboli shromáždění, dohoda), který se z pravidla soustřeďuje pouze na ekonomickou stránku zemědělství a má tedy za cíl především maximalizaci výnosu – zisku. Konvenční zemědělství aplikuje uniformní dávky hnojiv, herbicidů, insekticidů, fungicidů a závlah bez úvahy nad aktuálními potřebami těchto složek jednotlivých rostlin. Systém konvenčního zemědělství je závislý na neobnovitelných zdrojích a fosilní energii. Problém tohoto systému hospodaření může být ve výrazném snižování biodiverzity krajiny, znečišťování pitné vody vyplavováním živin, snižování úrodnosti půdy a vytváření eroze, v živočišné výrobě pak v užívání chemoterapeutik atd. Dochází tak běžným neekologickým lokálně necíleným systémem hospodaření k ohrožování zdraví a kvality života spotřebitelů (Dvorský et al., 2011; Mandal et al., 2000).

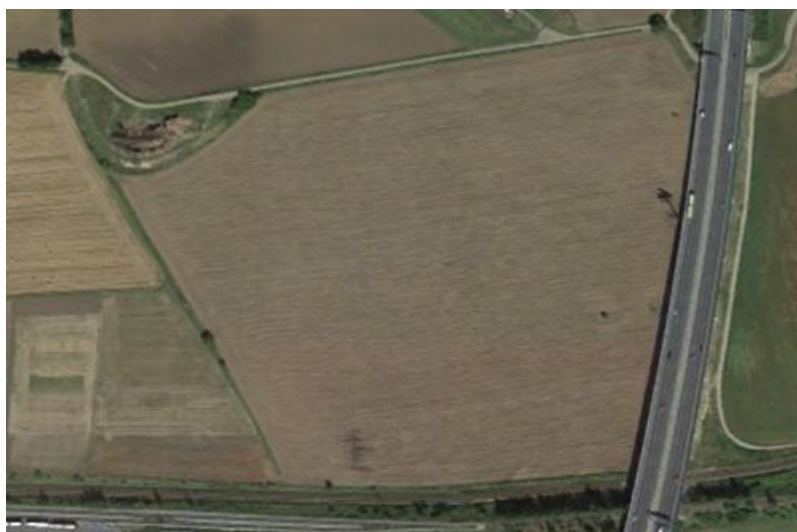
3. Metodika

Kapitola se zabývá zpracováním výškových dat, jejich porovnáním a vyhodnocením nej přesnějších digitálních modelů terénu, resp. modelů s nejnižší hodnotou RMSE. Poté je zde popsána tvorba modelů odvozených a zpracování dat o výnosovosti plodin konkrétního osevního postupu na daném experimentálním pozemku. Poslední část této kapitoly se zabývá hledáním souvislostí mezi vzniklými topografickými charakteristikami a konkrétní výnosovostí plodin v letech 2004 – 2012 (mimo 2009).

3.1 Zájmové území

Všechna zpracovávaná data zastupují hodnoty konkrétního pozemku (obr. 12), situovaného v areálu Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v. v. i. (veřejné výzkumné instituce). Pozemek se nachází na SZ okraji hl. m. Prahy v městské části Praha Ruzyně (N50° 05.00' E14° 17.50'). Plocha je ohraničena ze S strany pozemkem letiště, z V pozemek vymezuje silniční městský okruh a z jihu je pozemek vymezen železničním koridorem.

Zájmová plocha, o celkové rozloze 11.5ha, se nachází v řepařské výrobní oblasti. Pozemek je situován na mírném svahu s převážně S-J orientací, průměrná nadmořská výška dosahuje 345m, průměrný sklon je relativně malý – přibližně 3,5°.



Obr. 12: Snímek konkrétního pozemku (Google Maps, 2014).

3.2 Typy zpracovávaných dat

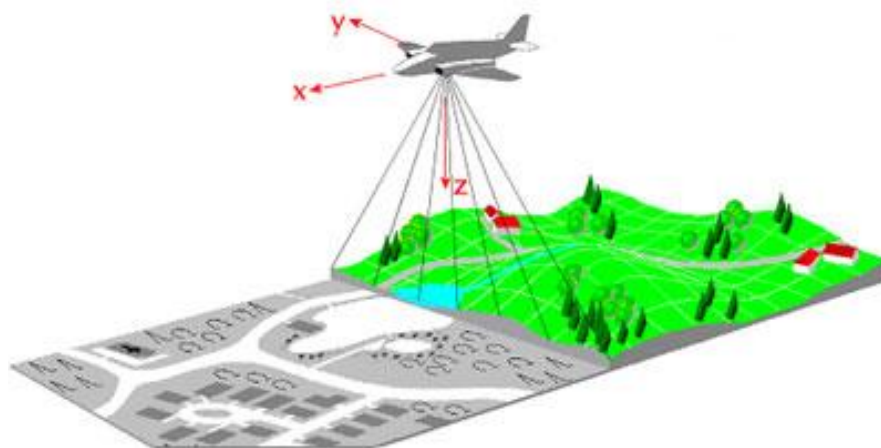
Práce zpracovává tři sady výškopisných dat získaných různými způsoby. První sadou, kterou pro účely této práce zapůjčil Zeměměřičský úřad (ČÚZK), jsou data ze Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED). ČÚZK, na základě objednávky konkrétních mapových listů v eshopu (<http://geoportal.cuzk.cz>) a žádosti potvrzené vedoucím práce a sekretariátem katedry, poskytl data v elektronické podobě na svém serveru a umožnil tak jejich stažení a následné zpracování. Druhá sada výškopisných dat byla získána pomocí technologie LiDAR (Light Detection and Ranging) jako metody dálkového průzkumu Země. Poslední skupinu dat tvoří data, získaná ručním měřením technologií RTK GPS (viz kapitola 2.2.1). Níže jsou ve třech odstavcích popsány 3 zmíněné zdroje výškových dat.

ZABAGED

Základní báze geografických dat České republiky tvoří digitální geografický model České republiky. Je to informační systém veřejné správy a je součástí informačního systému zeměměřičství, často využíván jako základní vrstva v geografických informačních systémech. Báze je tvořena 123 typy geografických objektů spadajících do polohopisné nebo výškopisné části. Polohopisná část je tvořena dvojrozměrnými prostorovými informacemi a informacemi popisnými, resp. informacemi o sídlech, komunikacích, rozvodných sítích, produktovodech, vodstvu, územních jednotkách a chráněných územích, vegetaci, povrchu a terénním reliéfu. Výškopisnou část tvoří trojrozměrné prvky terénu. Jeho reprezentace je v podobě souboru vrstevnic nebo odvozeném digitálním modelu terénu v podobě pravidelné mřížky 10x10m trojrozměrných bodů (tedy bodů, u nichž je známa jejich zeměpisná délka, šířka i výška). Tvorba ZABAGEDu se datuje 1995 – 2004. Nejdříve se započalo s vektorizací tiskových podkladů ZM10 (Základní mapa ČR 1:10000), které probíhalo po výše zmíněný časový úsek, poté došlo ještě k několika dlouhodobým aktualizacím (ČÚZK, 2014).

ALS

Airborne Laser Scanning nebo Airborne LiDAR System je metoda LiDARu, který je metodou dálkového průzkumu Země. ALS neboli Letecké laserové skenování povrchu (obr. 13), je rychlá přesná a efektivní metoda získávání trojrozměrných dat rozlehlých ploch, jako jsou zemědělské oblasti, lesy a urbanizovaná nebo průmyslová území. Letecké snímání terénu dosahuje podobné přesnosti jako ruční měření metodou RTK GPS. LiDAR pracuje s viditelným nebo blízkým infračerveným spektrem a jeho základním principem je měření vzdálenosti snímače a aktuálně měřeného bodu. Rozlišení nasnímané plochy, resp. její rozlišení, závisí na konkrétní zvolené technologii snímače (různí výrobci), výšce a rychlosti přeletu nad snímaným územím, ale také na hustotě vegetace. Ta redukuje počet bodů odražených od země a tím i celkový počet nasnímaných bodů. Skenování terénu metodou ALS je používáno také pro tvorbu digitálních modelů terénu (DEM) nebo aktualizaci jinak získaných geografických dat. Schumann et al. (2007) říká, že sběr dat pomocí leteckého průzkumu poskytuje vysoce přesné hodnoty terénu skrze diskretní povrch nadmořských výšek (neposkytuje souvislé pokrytí, ale mračno výškových bodů), ale vzhledem k pořizovací ceně produktu lze takto přesná data použít pouze pro konkrétní pole nebo pro studie lokálních měřítek.



Obr. 13: Letecké skenování povrchu metodou LIDAR (GEO Informatics, 2014).

RTG GPS

Třetí sada dat byla získána ručním pozemním měřením za pomoci technologie satelitních navigačních systémů. Trojdimenzionální data byla naměřena dvoufrekvenční geodetickou aparaturou Leica GPS1200 s anténou Leica ATX1230 v režimu SmartRover. Ke zpřesnění naměřených hodnot bylo využito přijímání korekcí (RTK) ze služby CZEPOS. Data RTK GPS byla poskytnuta vedoucím práce.

3.3 Formáty získaných dat

Data poskytnutá Zeměměřičským úřadem byla ve formátu polygonové vrstvy ESRI ArcGIS (.dbf, .shp, .shx). Hlavní soubor .shp obsahuje seznam lomových bodů v určených souřadnicích, indexový soubor .shx propojuje jednotlivé body se záznamem v atributové tabulce a databázový soubor .dbf obsahuje právě atributy jednotlivých bodů, přičemž právě jeden atribut odpovídá jednomu bodu. Polygonová vrstva ZABAGED obsahuje mřížku bodů (grid) 10x10m. Vrstva byla oříznuta na požadovanou hodnotu odpovídající zájmovému území. Počet trojdimenzionálních bodů na ploše tak je 1201.

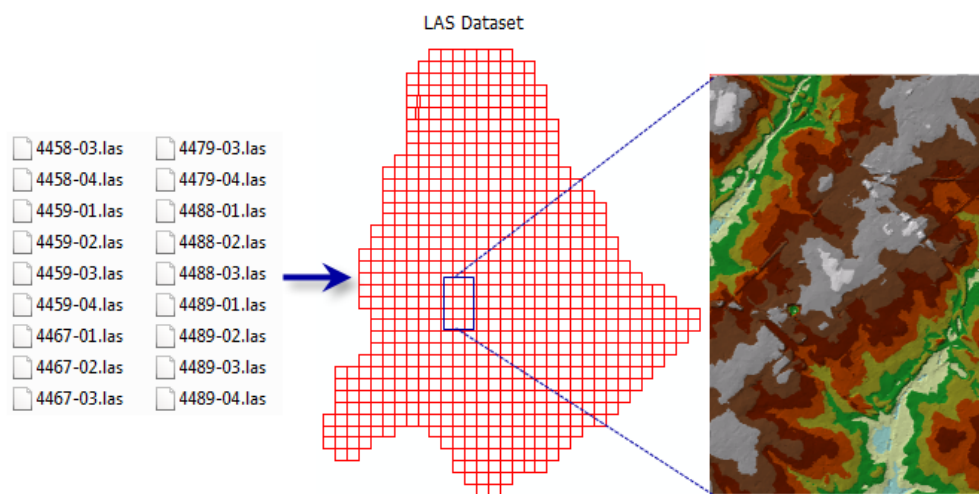
Body z leteckého laserového skenování jsou ve formátu .las. Souborový formát .las je primárně určen pro uložení trojrozměrných dat ze systému LiDAR. Jedná se o binární souborový systém, který uchovává data specifická pro LiDAR tak, aby nebyla příliš složitá. Každý .las soubor obsahuje také metadata o LiDARovém průzkumu, resp. rozsah dat, datum a čas záznamu dat, počet odražených bodů a další. Každý laserový puls pak obsahuje další sérii dat jako xyz souřadnice, družicový čas, intenzitu, snímací směr a úhel a spoustu dalších (ESRI, 2014). Počet takto získaných bodů pro zájmové území je 317303.

Surová data získaná pomocí geodetické aparatury Leica musela být nejdříve zpracována softwarem LeicaGeoOffice. Počet bodů získaných ručním měřením je 1189. Jejich prostorové rozložení po pozemku je v porovnání s výše zmíněnými sadami dat značně nerovnoměrné.

3.4 Import dat

Všechna získaná dat byla zpracována v desktopovém geografickém informačním softwaru ESRI ArcGIS 10.1. Statistické analýzy byly provedeny v tabulkovém procesoru MS Excel 2013, LibreOffice 4.1.4.2 a analytickém softwaru Statistica 12 společnosti StatSoft.

Prvním krokem při zpracovávání dat byl import tří sad dat do prostředí ArcGIS. Data ze sady ZABAGED byla poskytnuta ve standardním formátu ESRI. Import dat získaných pomocí ALS do ArcGIS musí být proveden pomocí funkce *Create LAS Dataset*, kde vybereme požadované .las soubory a konkrétní souřadnicový systém. LAS Dataset má v prostředí ArcGIS specifické chování (obr. 14) umožňující ukládání, zobrazení a správu LiDARových dat. Při práci s takovýmto objemem dat je nutnost použít tento specifický nástroj, který má určitou ředící schopnost, čímž výrazně urychluje vykreslení dat v malých měřítkách. GPS data uložená v MS Excel lze snadno naimportovat do prostředí ArcGIS a vytvořit ESRI shapefile, který umožňuje provádění analýz.



Obr. 14: LAS Dataset v prostředí ArcGIS (ESRI, 2014).

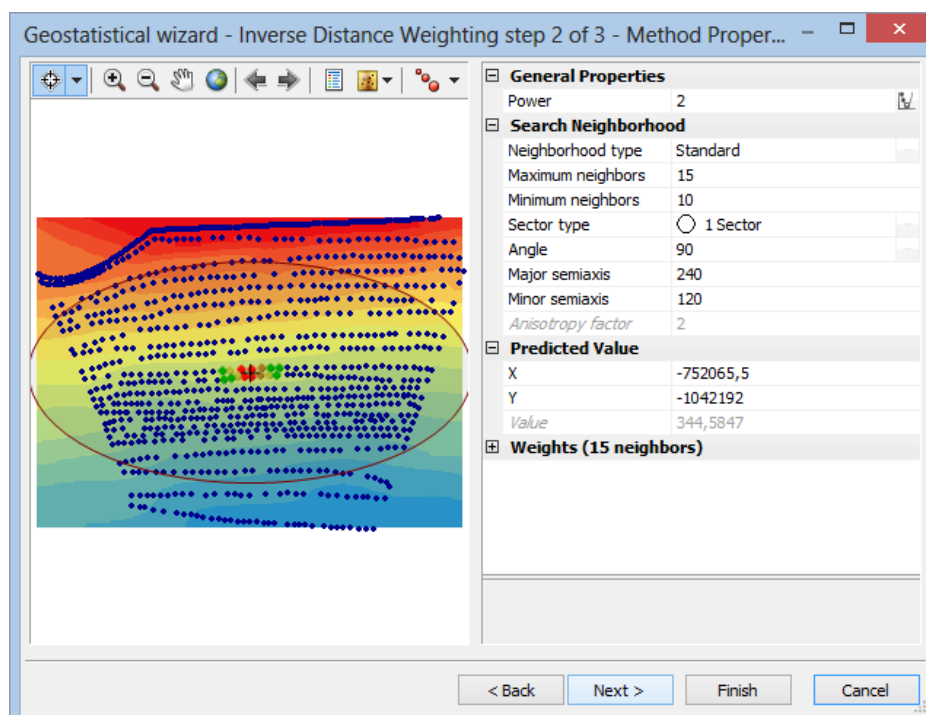
3.5 Tvorba DEM v ArcGIS

Pro zpracování získaných dat byly použity dva typy interpolačních metod pro vytvoření digitálních modelů terénu. Jedná se o metody Inverse Distance Weighting (IDW) a Spline. Vybraným interpolačním metodám odpovídají v ArcGIS stejnojmenné funkce, a sice *IDW* a *Spline*. Obě metody mají povinné a volitelné vstupní parametry. Povinnými vstupními parametry pro obě metody jsou: vstupní bodová vrstva, pole hodnoty Z, ze které se bude počítat výška povrchu, a kam bude umístěn výstupní rastr. Společným volitelným parametrem je velikost výstupní buňky, resp. rozlišení rastru.

U metody IDW lze volitelně definovat hodnotu *Power* neboli mocninu faktoru, který ovlivní váhu blízkých nebo vzdálených bodů. Nižší mocnina klade větší důraz na vzdálenější body, naopak vyšší číslo zdůrazňuje váhu bližších bodů. *Power* může nabývat hodnot 0.5 – 3, hodnota 2 je defaultní.

Dalším volitelným polem je *Search radius* – poloměr. Ten omezuje počet bodů, které budou vstupovat do výpočtu aktuální hodnoty. Poloměr může být pevný *Fixed* nebo proměnlivý *Variable*. Při pevném poloměru lze nastavit jeho velikost nebo minimální počet bodů (nastavení velikosti poloměru není nezbytné, protože ArcGIS počítá s pětinásobkem velikosti pixelu výstupního rastru). Při nastavení proměnlivého poloměru lze pak definovat hodnoty počtu bodů nebo maximální vzdálenost. Defaultní hodnoty funkce IDW jsou proměnlivý poloměr o 12 bodech. Posledním volitelným parametrem je stanovení bariéry – Input barriere polyline features, což by byla liniová vrstva, která vymezuje prostor, v němž funkce hledá body pro výpočet (ESRI, 2014).

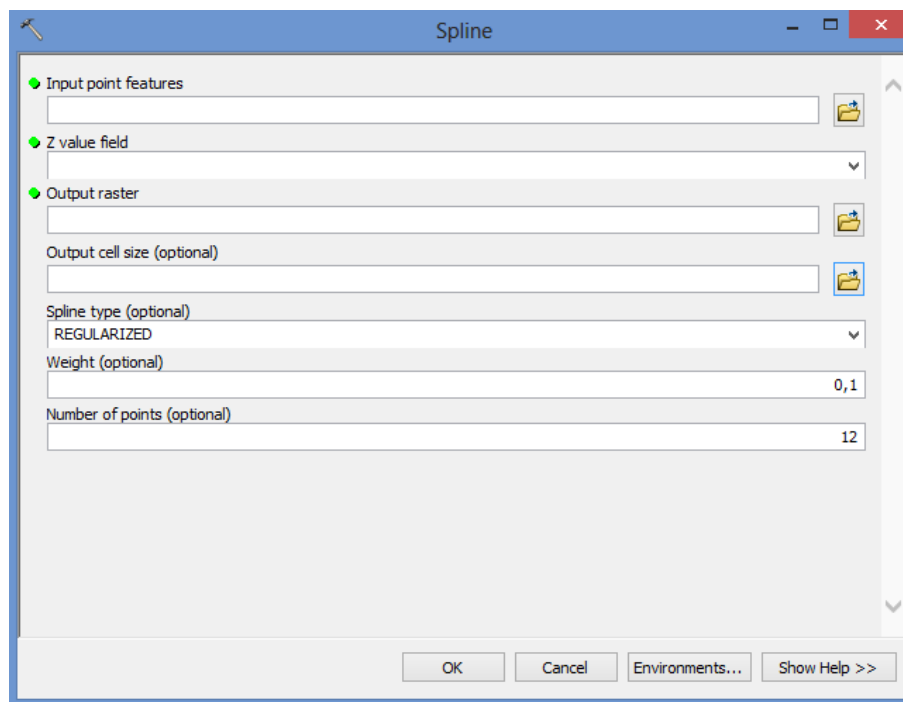
Pro účely této práce bylo ale zvoleno vytváření IDW modelů pomocí ArcGIS extenze Geostatistical Analyst, která umožňuje zohlednit V - Z anizotropii pozemku. Pomocí funkce *Geostatistical Wizard* je nastaven poměr poloos X:Y na 2:1 (viz obrázek 15 pod tímto textem).



Obr. 15: Možnosti nastavení funkce IDW pomocí Geostatistical Wizard.

U funkce *Spline* (obr. 16) lze vybrat *Spline type*. *Regularized* představuje váhu třetí derivace povrchu při minimalizaci křivosti. Hodnota váhy *Weight* tedy ovlivňuje výslednou křivost povrchu – čím vyšší váha, tím hladší povrch. Typ *Tension* představuje pak první derivaci povrchu při minimalizaci povrchu. Hodnota váhy zde představuje tenzi – čím vyšší váha, tím hrubší povrch s tím, že počítané hodnoty se více blíží hodnotám vstupním. Defaultní nastavení váhy pro obě možnosti je 0,1; v obou případech musí pole nabývat hodnot větších 0 (ESRI, 2014).

Posledním volitelným parametrem u funkce *Spline* je *Number of points*, tedy počet bodů, který bude vstupovat do výpočtu aktuální hodnoty. S narůstající hodnotou počtu bodů roste i délka času nutná pro výpočet.



Obr. 16: Možnosti nastavení funkce Spline.

3.5.1 Vstupní hodnoty do tvorby DEM

Aby bylo možné vyhodnotit přesnost nově vzniklých modelů, používám hodnocení tzv. střední polohové chyby (RMSE - viz kapitola dále). Pro účely výpočtu této chyby před vlastním vytvářením modelů odebírám konkrétní procento vstupních bodů z každé bodové sady. Vzhledem k počtu vstupních bodů je odebráno 10% z celkového počtu u sad RTK GPS a ZABAGED. U sady dat vzniklé metodou ALS, kde počet celkových bodů přesahuje tři sta tisíc, je odebráno 1‰ vstupních bodů.

Zvolené body, které byly odstraněny z dat vstupujících do tvorby DEM a které budou sloužit pro kontrolu nově vzniklých modelů, byly vybrány náhodně. K tomuto účelu byla zvolena sada analytických nástrojů, která byla volně stažena jako neoficiální rozšíření do software ArcGIS. Hawth's Analysis Tools for ArcGIS svojí funkcí *Create Random Selection* zajistila náhodný výběr konkrétního procenta bodů. Tabulka 1 vyjadřuje konkrétní hodnoty vstupující do výpočtů modelů a střední polohové chyby.

	Σ bodů	DEM	RMSE
ALS	317303	316986	317
RTK GPS	1189	1070	119
ZABAGED	1201	1081	120

Tab. 1: Počet vstupujících do bodů konkrétních výpočtů.

Dalším důležitým údajem mimo počtu bodů je jejich hustota (tab. 2). Pro zjištění hustoty bodů u ALS dat bylo zapotřebí sady nástrojů LAStools, která pracuje právě s LiDARovými soubory .las. Pomocí toolboxového rozšíření v ArcGIS nebo pomocí dílčích miniaplikací, do kterých se požadovaný soubor nahraje, je možné zjistit řadu informací o konkrétním leteckém skenování. Mimo jiné je získána informace o hustotě bodů na 1m². U dat vzniklých měření RTK GPS nebo poskytnutých Zeměměřičským údajem lze zjistit hustotu bodů na 1m² pomocí funkce *Point Density*, jež je součástí extenze Spatial Analyst v ArcGIS. Konkrétní hodnoty hustoty bodů jednotlivých sad dat obsahuje tabulka pod tímto textem, rozloha zájmového území je již zmíněných 11,5ha.

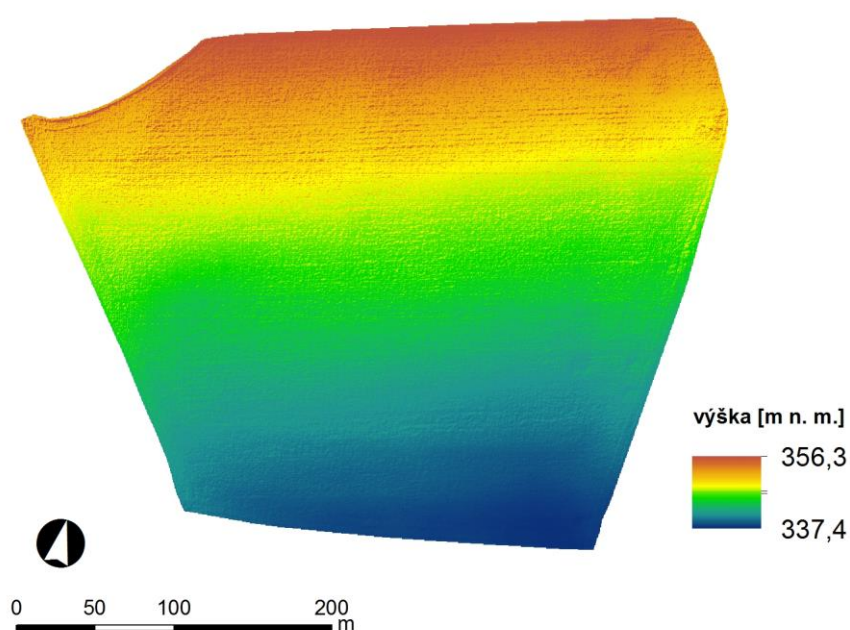
	Σ bodů	hustota na 1m ²
ALS	317303	2,74
RTK GPS	1189	0,0068
ZABAGED	1201	0,0092

Tab. 2: Hustota bodů vstupujících do výpočtu DEM.

3.5.2 Vytváření konkrétních DEM

Do výpočtu digitálních modelů terénů (obr. 17) vstupují hodnoty ochuzené o body, které slouží k následné kontrole vzniklého modelu (tab. 3). Všechny ArcGIS operace potřebné k vytvoření modelu a jeho kontrole jsou vytvářeny v prostředí ModelBuilderu, který zajišťuje vyšší přehlednost a kontrolovatelnost dílčích procesů při tvorbě DEM. ModelBuilder je subaplikací ArcGIS, ve které lze vytvářet, editovat a spravovat modely,

resp. diagramy postupu práce. Jedná se o jakýsi grafický programovací jazyk, ve kterém se uspořádává sekvence nástrojů geoprocesingu tak, aby byl jedním spuštěním vyřešen celý úkol, resp. proběhl celý diagram pracovního postupu. V ModelBuilderu se pracuje s tzv. plovoucím pracovním prostředím, do kterého se vkládají bubliny, znázorňující vstupní data (tmavě modrá), funkce (žluto oranžová), parametry funkce (světle modrá), cyklické iterátory (sytě oranžová), výstupní vrstvy (zelená), a propojující čáry, které určují směr a postup práce.

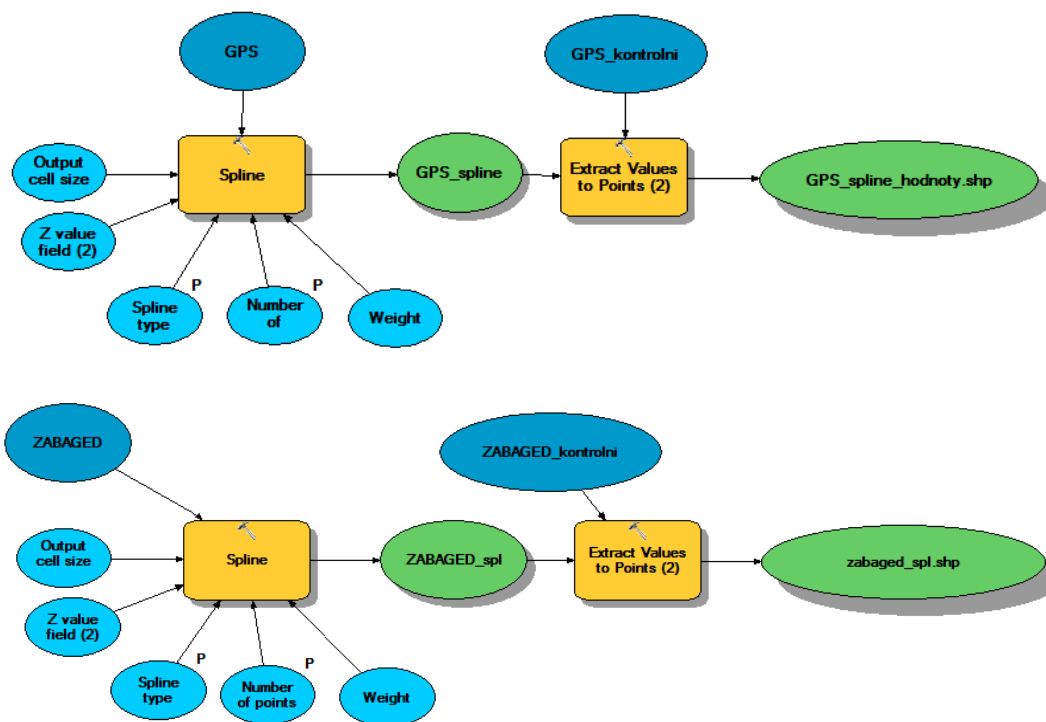


Obr. 17: Vzorový model terénu zájmového území.

	ALS	RTK GPS	ZABAGED
počet bodů	316986	1070	1081
minimum	337,43	337,52	338,52
maximum	356,42	355,86	356,96
průměr	345,35	346,94	346,09
standardní odchylka	5,1317	5,5334	4,8243

Tab. 3: Statistika bodů vstupujících do výpočtu DEM.

Následující diagram (obr. 18) popisuje proces vytváření digitálního modelu terénu z dat ZABAGED a RTK GPS pomocí ModelBuilderu, zároveň popisuje vytváření nové vrstvy, která bude vstupovat do výpočtu střední polohové chyby.



Obr. 18: Diagram zpracování procesů při vytváření DEM z dat ZABAGEDu a RTK GPS.

Na začátku (vlevo) modelu je vidět tmavě modrá vstupní vrstva GPS, která určuje typ použitých dat pro další výpočet. Ze vstupní vrstvy směřují dvě šipky k funkcím *IDW* a *Spline* (jejich princip je popsán v předešlých kapitolách). Funkce *IDW* má tři světle modré parametry, které jsem funkcí *Make Variable* graficky znázornil do diagramu. Dvojklikem na parametr ho lze definovat. Index P (funkce *Model Parametr*) u parametru *Search radius* funkce *IDW* značí, že uživatel má možnost po spuštění celého modelu zadat konkrétní hodnotu. Ostatní hodnoty, tj. ty bez indexu P, musejí být definovány ještě před spuštěním modelu. Ze žluto-oranžové funkce *IDW* směřuje šipka k zelené bublině *GPS_IDW*. To značí výslednou vrstvu – nový DEM, který se vytvoří na základě zadaných parametrů. Vrstva vstupuje spolu s další vstupní vrstvou *GPS_kontrolni* (dříve odebraných 10% bodů) do funkce *Extract Values to Points*. Tato funkce definuje hodnotu nadmořské výšky v nově vzniklém

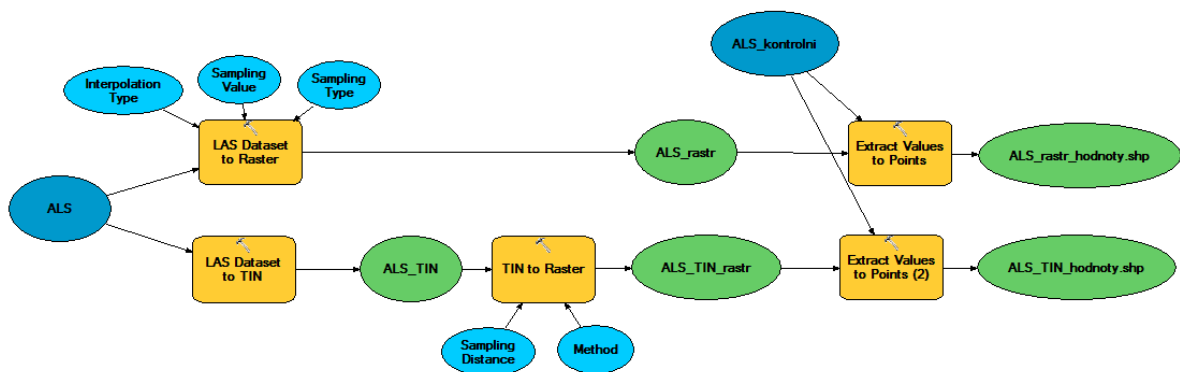
DEM v bodech, které mají identickou polohu s body kontrolními. Výstupní vrstva GPS_IDW_hodnoty.shp bude použita k výpočtu RMSE. Analogický postup je aplikován i pro interpolaci typu Spline. Předem specifikovanými parametry jsou *Output cell size* a *Z value field*. Cell size zastupuje rozlišení výsledného rastru, resp. definuje velikost jednoho pixelu. Mnou nastavená hodnota pro všechny typy výsledných rastrů je 0,5; tzn., že velikost jednoho pixelu v rastru bude 0,5 x 0,5 m; což je vzhledem k velikosti pozemku relativně vysoké rozlišení. U parametru Z value field je třeba nadefinovat, odkud se má pro výpočet brát hodnota Z souřadnice pro výpočet DEM. Digitální model terénu nemusí být vypočítáván pouze pro nadmořské výšky, ale také pro další kvantitativní parametry jako jsou např. teplota, srážky, výnos apod. Stejný postup práce byl zvolen i při zpracování dat ze série ZABAGED.

Tabulka níže (tab. 4) informuje o konkrétním nastavení interpolační metody SPLINE při tvorbě jednotlivých digitálních modelů terénu podle uvedených diagramů (obr. 18 a 19).

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

Tab. 4: Nastavení interpolační metody SPLINE jednotlivých modelů terénu.

Diagram (obr. 19) vytváří digitální model terénu z dat leteckého skenování opět pomocí aplikace ModelBuilder. ALS data jsou zpracována dvěma metodami. Jednou jsou převedena funkcí *LAS Dataset to Raster* na rastrový model. Druhý DEM je vytvořen funkcí *LAS Dataset to TIN* a následně pomocí *TIN to Raster* také na rastrový model terénu. V obou případech jsou, stejně jako u vytváření DEM z ostatních typů dat, extrahovány hodnoty bodů pro ověření přesnosti – kvality vzniklého modelu.



Obr. 19: Diagram zpracování procesů při vytváření DEM z dat LiDARu.

3.5.3 Vyhodnocení kvality vzniklých DEM

Každá prostorová data obsahují chyby nebo nepřesnosti, které mohou více nebo méně ovlivnit kvalitu výsledku analýz. Chyby se mohou vyskytnout v různých stádiích zpracovávání dat nebo již při jejich sbírání. Při vytváření jakéhokoli DEM je třeba nějakým způsobem kvantifikovat jeho kvalitu. V případě digitálních modelů terénů závisí jejich kvalita především na zdroji dat a způsobu jejich interpolace. Pokud eliminuje hrubé chyby, které vznikají chybami člověka nebo jeho techniky, zbývají ještě chyby systematické a nahodilé. Systematické chyby jsou způsobeny většinou nedostatkem vstupních dat nebo jejich zpracováním. Nahodilé chyby existují v mnoha měřeních a nelze je vhodně modelovat (Kadlčíková, 2007).

Root Mean Square Error nebo pouze Mean Square Error (obr. 20a), do češtiny překládáno jako střední polohová chyba, je nejčastěji používaná metoda pro kvantifikaci systematických a nahodilých chyb. RMSE vyjadřuje kvadratický průměr neboli druhou odmocninu aritmetického průměru druhých mocnin série čísel. V případě digitálních modelů terénu RMSE určuje rozptyl odchylek mezi hodnoty z DEM a hodnotami kontrolními. Vyšší číslo RMSE tedy vyjadřuje vyšší odchylku mezi dvěma sadami výškových hodnot.

Oršulák et al. (2010) tvrdí, že běžnou metodou kontroly kvality modelů terénu je vynechání konkrétního procenta vstupních bodů, z nichž pak lze vypočítat chybu DEM. Kapitola 3.5.1 poskytuje konkrétní čísla vynechaných bodů, které budou vstupovat do výpočtu RMSE.

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

Obr. 20a: Vztah výpočtu střední polohové chyby.

Aby bylo možné získat konkrétní hodnoty RMSE pro vytvořené modely, je nutné znát přesnou hodnotu výšky terénu DEM v kontrolních bodech, tedy v bodech, které byly předem odstraněny z výpočtu DEM. Potřebné hodnoty byly získány pomocí funkce *Extract Values to Points* (viz obr. 18 a 19). Rozdíl výšek vypočítaných a kontrolních vstupuje do výpočtu jako Δh . Jejich kvadratický průměr dává konkrétní hodnotu střední polohové chyby. Příloha 1 v závěru práce je členěna do dvou částí. První část RMSE 0,5 naznačuje; že pro výpočet modelů bylo zvolené prostorové rozlišení jedné buňky, resp. jednoho pixelu; 0,5m. Analogicky druhá část tabulky je počítaná pro prostorové rozlišení 1m. Počet bodů v tabulce odpovídá bodům, které byly do výpočtu modelu terénu vynechány, viz tab. 1. Výsledky RMSE nabývají hodnot od 0,09 do 0,75 v závislosti na typu vstupních dat a zvolené interpolační metodě a jejím konkrétním nastavení. Všechny konkrétní hodnoty střední polohové chyby všech vzniklých modelů terénu jsou obsahem Přílohy 1.

$$\text{MAE} = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n |e_i| \right]$$

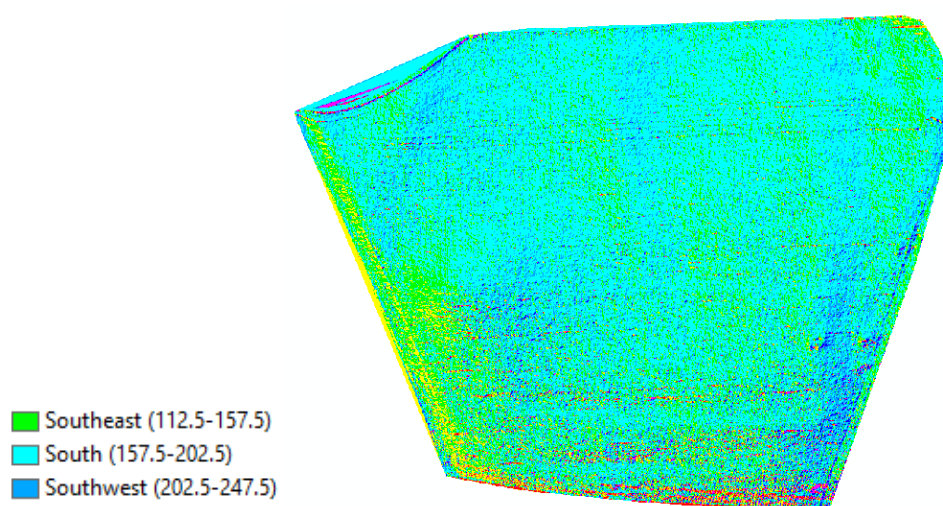
Obr. 20b: Vztah výpočtu střední absolutní chyby.

Willmott et al. (2005) říká, že střední polohová chyba (RMSE) je pouze funkcí chyby absolutní (MAE, obr. 20b). Mean Absolute Error udává průměrnou hodnotu absolutních rozdílů mezi hodnotou skutečnou a interpolovanou. Tvrdí také, že distribuce rozsahu chyb nepopisuje průměrnou chybu jako takovou. Hodnoty RMSE, oproti MAE, mají tendenci stále více narůstat, jak se rozsah chyb stává více proměnlivý. Dodává, že obliba RMSE tak nemá logické opodstatnění a mělo by být nahrazeno výpočtem absolutní chyby, které interpretuje rozsah chyb přirozeněji. Z tohoto důvodu je do práce zařazen také výpočet střední absolutní chyby (Příloha 2).

3.6 Tvorba odvozených modelů – SM, FAM

Mimo digitální model terénu bylo třeba vytvořit další modely jako svažítost (SM, Slope Model) a model akumulace odtoku vody po pozemku (FAM, Flow Accumulation Model).

Dalším z odvozených modelů, který by vstupoval do regresní analýzy za účelem stanovení závislosti topografie na výnosovosti plodin, by mohl být model orientace (AM, Aspect Model, obr. 21). Jak naznačuje obrázek níže, zpracovávaný pozemek má JV-JZ expozici (převážně čistě J), proto lze předpokládat, že by parametr orientace ke světovým stranám v tomto případě výsledky regrese příliš neovlivnil. Modely orientace ke světovým stranám pro vzniklé DEM proto nejsou vytvořeny.

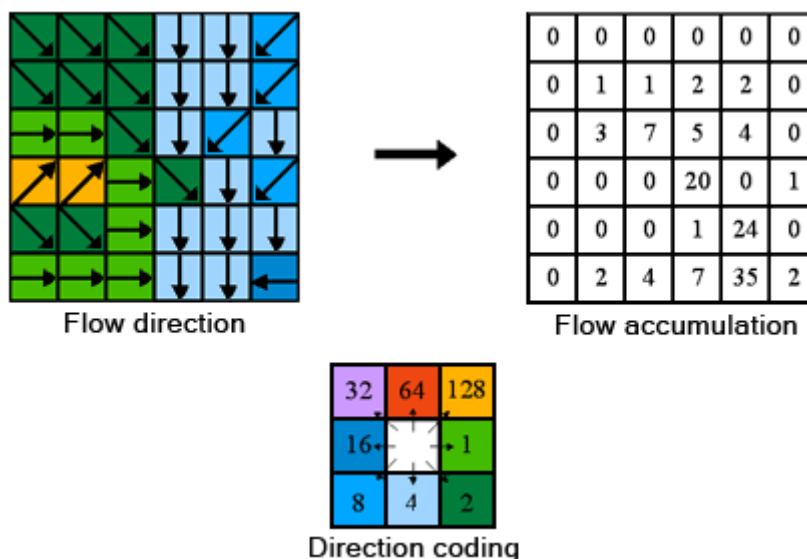


Obr. 21: Model orientace pozemku ke světovým stranám.

Pro vytváření dalších modelů jsou nezbytné již vytvořené modely terénu, protože svažítost i odtok je závislý na hodnotách výšky terénu daného území. Pro další práci byly vybrány modely s nejnižší hodnotou střední polohové chyby z každé kategorie. To znamená, že bylo vybráno celkem 6 DEMs. Konkrétně ze sady dat GPS po jednom modelu vytvořeném metodou IDW a Spline, stejně tak pro data ze série ZABAGED. U dat získaných metodou ALS byly vybrány všechny vytvořené modely, resp. rastrový terén a rastrový terén vytvořený z TINu (Triangular Irregular Networks – reprezentace terénu pomocí nepravidelné trojúhelníkové sítě).

Model svažitosti terénu byl vytvořen funkcí *Slope*, která reprezentuje úroveň změny nadmořské výšky pro každou buňku digitálního modelu terénu. Funkce dává na výběr vytvořit svažitostní model v procentech nebo ve stupních. Pro relevanci nově vzniklého modelu byla opět použita funkce *Extract Values to Points*, která extrahuje hodnoty svahu v kontrolních bodech. Vizualizaci modelů svažitosti lze nalézt v Příloze 4.

Funkce *Flow Accumulation*, pomocí které jsou vytvářeny modely akumulace odtoku vody, je nástroj, který počítá akumulovaný tok, jako akumulovanou váhu všech buněk vtékajících po svahu do každé buňky nového rastru. Funkce v prostředí ArcGIS pracuje s relativně jednoduchým principem výpočtu směru toku vody, tzv. D8 (obr. 22). Algoritmus D8 aproximuje směr odtoku skrze nejstrmější klesání v 3x3 okolí buňky. Z toho vyplývá, že směr toku vody z buňky do další buňky bude násobkem 45°, jak naznačuje také obrázek pod tímto textem. Vstupním rastrem do funkce *Flow Accumulation* je výstupní rastr funkce *Flow Direction* (ESRI, 2014).

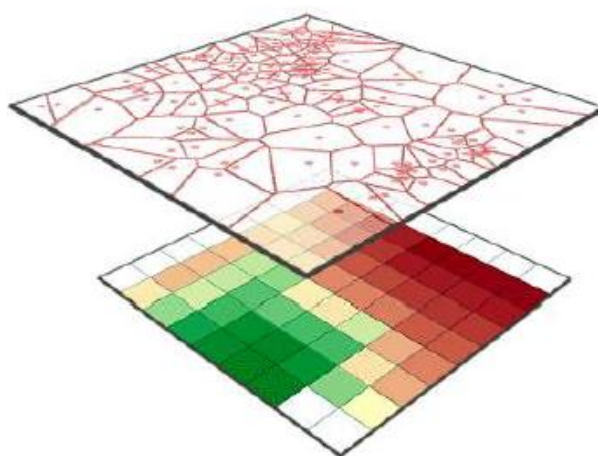


Obr. 22: Princip algoritmu D8 funkce Flow Accumulation (ESRI, 2014).

Za účelem získání relevantních hodnot vytvořených FAMs byla aplikována kruhová fokální statistika – funkce *Focal Statistics*, ve velikosti 15 buněk pro data GPS a ZABGED, a 150 buněk pro ALS (vzhledem k množství vstupních dat). Vizualizace FAM modelů (bez aplikace fokální statistiky) je obsahem Přílohy 5.

3.7 Analýza výnosových dat

Pro interpolaci hodnot výnosu za jednotlivé roky byla využita další z deterministický interpolačních metod, a sice metoda tzv. přirozeného souseda (v originále Natural Neighbor). Metoda vkládá interpolované body do sítě tzv. Thiessnových polygonů, čímž tak existují dvě sítě polygonů. Polygon nově vzniklého bodu se částečně překrývá se sítí polygonů vstupních bodů. Body polygonů, které se překrývají s právě interpolovanými body polygonů, se označují přirozenými sousedy. A právě tyto body vstupují do výpočtu interpolace bodu nového. Interpolace bodu je ovlivněna váhou přirozených sousedů, která se vypočítává v závislosti na velikosti překrývajících se polygonů. Backes et al. (2009) uvádí, že interpolační metoda Natural Neighbor je spolu se stochastickou metodou Kriging běžným způsobem analýzy výnosových a jim podobných dat (Křikavková, 2009; Mitas et al., 1999).



Obr. 23: Princip interpolační metody Natural Neighbor (ESRI, 2014).

Výnosová data za roky 2004 – 2012, mimo 2009, byla pro účely studie poskytnuta Výzkumným ústavem rostlinné výroby, v. v. i. Údaje o výši výnosu byly získány pomocí kombajnového monitoru výnosu LH500. Prostorová přesnost byla zajištěna technologií dGPS korigovanou systémem EGNOS (viz kapitola 2.2.1). Data o výnosu byla společně s aktuální polohou zaznamenávána na palubní počítač každé 3 sekundy. Měřena byla také

vlhkost zrna, proto mohl být výnos přepočítán na 14% vlhkost. Data za jednotlivé roky byla, celkem 8, zinterpolována metodou přirozeného souseda. Obdobně jako u předešlých modelů byly funkcí *Extract Values to Points* extrahovány hodnoty výnosu v kontrolních bodech. Funkce byla použita celkem 24krát (3 sady kontrolních bodů po 8 letech mapování výnosu). Hodnoty dále vstupují do vícenásobné regresní analýzy.

3.8 Stanovení závislosti – regresní analýza

Regresní analýza popisuje závislost dvou a více číselných hodnot, resp. proměnných, utváří matematický model, tj. regresní funkci $y=f(x)$. Vícenásobná regrese pak popisuje závislost jedné proměnné na skupině jiných, tj. regresní funkce $y=f(x_1, x_2 \dots x_p)$. Tato analýza tak vyjadřuje charakter závislosti a zobrazuje co možná nejpřesněji průběh změn podmíněných průměru závisle a nezávisle proměnných. Cílem vícenásobné regresní analýzy je vysvětlení rozptylu proměnné y , odhadnutí vlivů nezávisle proměnných x na závisle proměnnou y , predikovat hodnoty y pro jednotlivé případy na základě sestavené rovnice. Výsledkem analýzy mimo jiné je koeficient determinace R^2 , který kvantifikuje míru vztahu závisle proměnné a proměnných vysvětlujících (Biskup, 2008; Rabušič 2004).

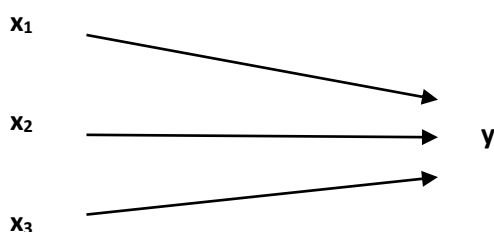
Funkci použitou pro výpočet vícenásobné lineární regresní analýzy vyjadřuje tento vztah: $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$. Jednotlivé členy vztahu jsou definovány následovně:

y ... závisle proměnná,

β ... regresní koeficienty,

x ... nezávislé proměnné.

Základem vícenásobné lineární regrese je model. Deskriptivní model (případ této práce, obr. 24) nepředpokládá vztahy mezi nezávisle proměnnými, ale stanovuje sílu vlivu jednotlivých nezávisle proměnných na závislou proměnnou. Vyjadřuje také velikost podílu rozptylu závisle proměnné vysvětleného nezávisle proměnnými. Kauzální model předpokládá také vliv nezávisle proměnných mezi sebou (Rabušič, 2004). Regrese je počítána v jednom kroku – metodou *Enter*, kdy jsou do výpočtu vloženy všechny proměnné najednou.



Obr. 24: Deskriptivní model vícenásobné regresní analýzy.

Do rovnice regresní analýzy počítané metodou *Enter* musejí být zaváděny pouze relevantní proměnné. Závisle proměnná je pro účel práce hodnota výnosu, nezávislé nebo také vysvětlující proměnné jsou hodnoty z digitálních modelů terénu, modelů svažitosti a modelů odtoku – akumulace vody. Do výpočtu konkrétního koeficientu determinace, jako jednoho z výsledků regresní analýzy, vstupují tedy vždy 4 hodnoty, resp. hodnoty výnosu za určitý rok a hodnoty výšky a sklonu terénu a hodnoty odtoku vody. Všechny vstupní hodnoty, jejichž počet odpovídá počtu kontrolních bodů pro konkrétní sadu výškových dat, jsou vztaženy ke konkrétnímu prostorovému zaměření, tzn., že jednotlivé sady vstupních bodů do regresní analýzy musejí mít identické souřadnice.

4. Výsledky

Výsledkem práce je 48 hodnot koeficientů determinace vícenásobné lineární regresní analýzy R^2 , které určují míru vlivu vytvořených topografických charakteristik na výnos zemědělských plodin konkrétního pozemku. Výsledky jsou členěny do 8 let po 6 digitálních modelech terénu. DEM vznikly ze 3 zdrojů výškových dat. U každého zdroje bylo provedeno několik interpolačních metod s různými nastaveními, z čehož byly následně vybrány 2 nejpřesnější modely z každé skupiny, tj. celkem 6.

Dílčím výsledkem práce je vyhodnocení kvality, resp. přesnosti modelů vzniklých různými interpolacemi metodou RMSE a MAE. Interpolovaný digitální model terénu je tím kvalitnější, resp. přesnější, čím menší je u něho vypočítána hodnota chyby. Konkrétní hodnoty střední polohové a střední absolutní chyby (tab. 5) pro všechny vytvořené modely terénu jsou také obsahem Přílohy 1 a 2.

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

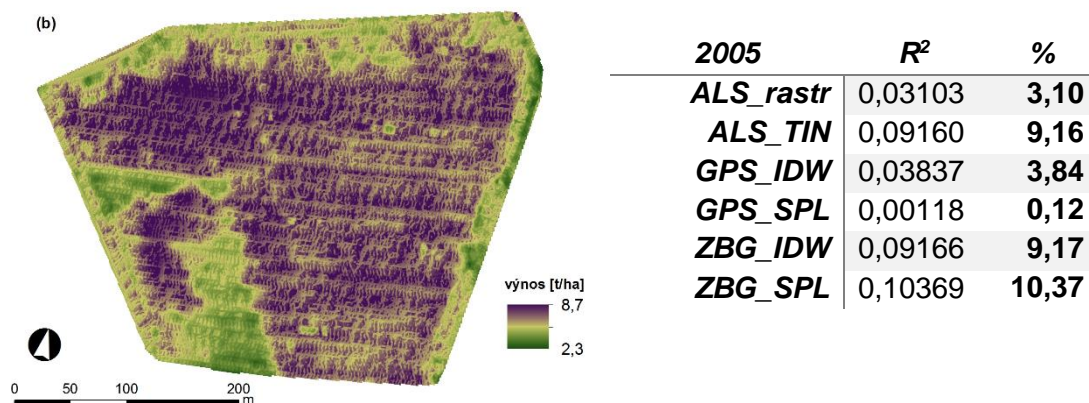
Tab. 5: Hodnoty RMSE a MAE pro jednotlivé vytvořené modely terénu.

Tabulka 6 představuje hodnoty koeficientů determinace vícenásobné lineární regrese (Statistica 12) za sledované období 2004 – 2012 (mimo roku 2009) pro 6 vybraných digitálních modelů terénu. Pro transparentnost výsledků je zde tučně zvýrazněn sloupec s procentuálním vyjádřením determinačních koeficientů R^2 .

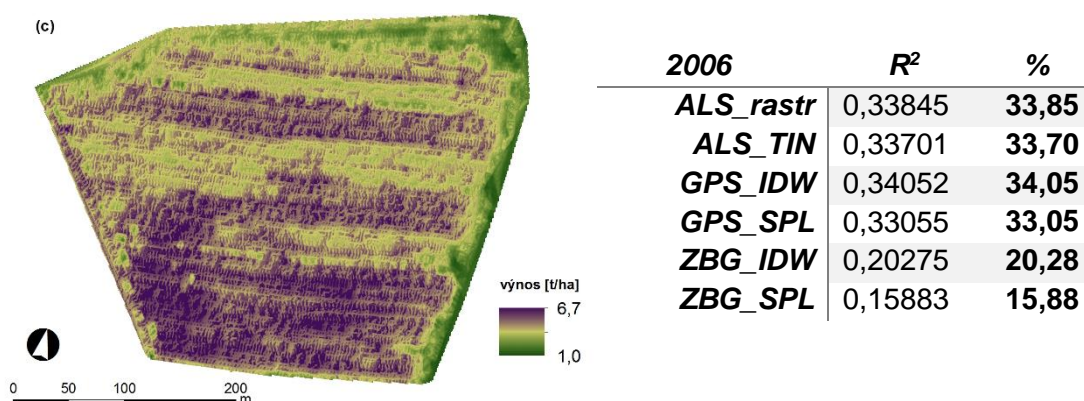
2004	R²	%	2008	R²	%
ALS_rastr	0,01209	1,21	ALS_rastr	0,38160	38,16
ALS_TIN	0,03786	3,79	ALS_TIN	0,49379	49,38
GPS_IDW	0,00490	0,49	GPS_IDW	0,15368	15,37
GPS_SPL	0,04646	4,65	GPS_SPL	0,19040	19,04
ZBG_IDW	0,09539	9,54	ZBG_IDW	0,46073	46,07
ZBG_SPL	0,10669	10,67	ZBG_SPL	0,44724	44,72
2005	R²	%	2010	R²	%
ALS_rastr	0,03103	3,10	ALS_rastr	0,09920	9,92
ALS_TIN	0,09160	9,16	ALS_TIN	0,16314	16,31
GPS_IDW	0,03837	3,84	GPS_IDW	0,10781	10,78
GPS_SPL	0,00118	0,12	GPS_SPL	0,16165	16,16
ZBG_IDW	0,09166	9,17	ZBG_IDW	0,05468	5,47
ZBG_SPL	0,10369	10,37	ZBG_SPL	0,09884	9,88
2006	R²	%	2011	R²	%
ALS_rastr	0,33845	33,85	ALS_rastr	0,25778	25,78
ALS_TIN	0,33701	33,70	ALS_TIN	0,27341	27,34
GPS_IDW	0,34052	34,05	GPS_IDW	0,36000	36,00
GPS_SPL	0,33055	33,05	GPS_SPL	0,34734	34,73
ZBG_IDW	0,20275	20,28	ZBG_IDW	0,16838	16,84
ZBG_SPL	0,15883	15,88	ZBG_SPL	0,17167	17,17
2007	R²	%	2012	R²	%
ALS_rastr	0,51313	51,31	ALS_rastr	0,05315	5,32
ALS_TIN	0,51456	51,46	ALS_TIN	0,22294	22,29
GPS_IDW	0,50663	50,66	GPS_IDW	0,03253	3,25
GPS_SPL	0,50578	50,58	GPS_SPL	0,09266	9,27
ZBG_IDW	0,49299	49,30	ZBG_IDW	0,02338	2,34
ZBG_SPL	0,49285	49,28	ZBG_SPL	0,03593	3,59

Tab. 6: Procentuální vyjádření koeficientů determinace R^2 regrese analýzy.

Níže uvádím dílčí výsledky regresní analýzy včetně vizualizací výnosu pro roky 2005 a 2006. Kompletní hodnoty koeficientů determinace pro celé sledované období a všechny vstupní výškové modely terénu lze nalézt v Příloze 7. Vizualizace výnosových dat jsou obsahem Přílohy 6.



Obr. 24: Vizualizace výnosu s výsledky regresní analýzy za rok 2005.



Obr. 25: Vizualizace výnosu s výsledky regresní analýzy za rok 2006.

Vizualizace výnosu naznačuje, že v roce 2005 (obr. 24) byl výnos situován převážně do horních partií pozemku. Oproti tomu v roce 2006 (obr. 25) byl vyšší výnos zcela v nižších polohách zájmového území. Tabulky v pravé části obrázků poskytují hodnoty koeficientů determinace pro jednotlivé digitální modely terénu. Z výše uvedených hodnot je patrné, že výrazně vyšší koeficienty determinace jsou v roce 2006, což znamená, že v daný rok je vyšší vztah mezi topografickými charakteristikami terénu a údaji o výnosu plodin.

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

Tab. 7: Standardizované korelační koeficienty b^* a koeficienty determinace R^2 regresní analýzy.

Tabulka 7 zobrazuje koeficienty korelace jednotlivých topografických charakteristik a procentuálně vyjádřené koeficienty determinace ve všech sledovaných obdobích. Signifikantní koeficienty (tučně) jsou vázány k hladině významnosti $p = 0,05$. Tabulka 8 poté ukazuje aritmetické průměry absolutních hodnot koeficientů korelace a determinace šesti vstupních sad výškových dat pro jednotlivé roky sledovaného období (sloučené hodnoty tabulky 7).

	2004	2005	2006	2007	2008	2010	2011	2012
DEM	0,185	0,194	0,542	0,725	0,458	0,372	0,557	0,214
SM	0,083	0,126	0,105	0,070	0,101	0,123	0,030	0,102
FA	0,191	0,186	0,105	0,094	0,157	0,169	0,095	0,269
R ² [%]	5,05	5,96	28,47	42,11	35,46	11,42	26,31	7,68

Tab. 8: Průměrné koeficienty korelace a determinace vstupních sad dat za jednotlivé roky.

5. Diskuze

Ve 2. polovině 20. století zaznamenalo zemědělství významné změny. Toto období je známo také jako tzv. zelená revoluce. Ta v zemědělství přinesla významný skok, který pomohl udržet krok s rychlým populačním nárůstem. Vznikla moderní technika a technologie, začala se významně používat anorganická hnojiva a pesticidy a byly vyšlechtěny nové odrůdy plodin. To mělo za následek nejenom výrazné zvýšení produkce plodin ale bohužel i obrovský negativní ekologický dopad – vyčerpání půdy, snížení půdní úrodnosti, zasolení půd, významné půdní eroze, značná zdravotní rizika, degradaci biodiverzity ... přineslo to s sebou významné snížení ekologické stability krajiny. Proto se dnes moderní postupy a techniky snaží najít rovnováhu mezi potřebami produkce a stavem přírody (Mandal et al., 2000). Hospodaření v režimu precizního zemědělství má potenciál k vylepšení zemědělské prvovýroby s cílem zvýšit efektivitu hospodaření a snížit dopady na životní prostředí. Přijetí technologií a technik precizního hospodaření je v praxi evoluční proces, kdy budou zemědělci postupně navyšovat jejich informační schopnosti a možnosti. V precizním zemědělství dochází díky moderním technologiím k úspoře pohonných hmot, snížení množství aplikovaných chemických látek, menšímu utužování půdy a sníženému riziku eroze půdy. Na druhou stranu, jak tvrdí Ing. Perla Kuchtová, Ph.D. (2013, in verb.), systém precizního hospodaření vzhledem k použitým technologiím a know-how nelze považovat za ekologický způsob hospodaření. Proto je nutné vyvíjet efektivní „eco-friendly“ technologie.

Precizní hospodaření je vázáno především na využití GNSS. Celá řada faktorů může ovlivnit kvalitu lokalizace a navigace, jako kvalita antény v přijímači, přijímání vícecestného – odraženého signálu, zástin výhledu na družice a především počet „viditelných“ družic. Je zde třeba vysoké přesnosti na centimetrové úrovni. Toho lze dosáhnout s využitím dGPS přijímačů, které budou mimo běžný signál družicového systému přijímat také korekční signál systému EGNOS, pozemních lokálních stanic nebo trvalých referenčních stanic. Vzhledem k faktu, že precizní zemědělství podléhá moderním technologiím, lze tedy očekávat jeho zdokonalování a rozšiřování právě s nezadržitelným vývojem podpůrných technologií.

S odkazem na výsledky regresní analýzy (tab. 6 a 7) lze konstatovat, že hodnoty koeficientů determinace jsou velice různorodé. Pro jednotlivé roky, dokonce i v rámci jednoho roku pro různá vstupní výšková data, jsou koeficienty velmi nevyrovnané. Z tohoto důvodu nelze stanovit obecnou míru závislosti topografie terénu na výnosovosti zemědělských plodin.

	2004	2005	2006	2007	2008	2010	2011	2012
SRÁŽKY	102,4	127,2	84,9	90,5	105,8	106,8	133,8	160,3
TEPLOTA	13,0	12,1	17,6	12,6	11,9	16,6	12,0	10,5

Tab. 9: Průměrné hodnoty srážek a teplot v růstovém období plodin.

Tabulka 9 výše zobrazuje průměrné hodnoty srážek a teplot ve sledovaném období 2004 – 2012 (mimo rok 2009, pro který nejsou dostupná výnosová data). Informace byly získány agrometeorologickou stanicí Výzkumného ústavu rostlinné výroby, v. v. i. Z hodnot koeficientů determinace je patrné, že vliv topografie na výnos souvisí s teplotou a především s množstvím poskytnutých srážek v daném roce. V letech 2004, 2005, 2010 a 2012 jsou průměrné hodnoty koeficientů determinace nižší. Pro zmíněné roky se interval průměrných hodnot z jednotlivých modelů terénu pohybuje od 0,051 do 0,114 (průměrně 0,075), tzn., že by topografie terénu vysvětlovala konkrétní výnosovost pouze 7,5%. Zbylé roky vysvětlují vztah terénu a výnosu výrazně vyššími hodnotami. Interval průměrných hodnot z jednotlivých modelů terénu je 0,285 – 0,504 (průměrně 0,35), což by znamenalo, že by byl výnos z 35% vysvětlen topografickými charakteristikami. Jedná se ale pouze o průměrné hodnoty. Tabulka 10 slučuje hodnoty koeficientů determinace za roky 2004, kdy jsou výsledky regresní analýzy nejnižší (průměrně 5,1%), a 2007, kdy jsou naopak výsledky nejvyšší (průměrně 50%). Zároveň tabulka vyjadřuje vyrovnanost hodnot determinace. Ve výsledkově špatném roce 2004 jsou hodnoty koeficientů determinace velmi rozkolísané – hodnoty mají rozpětí od 0,49 do 10,69. Nejvyšší hodnota tak vyjadřuje téměř 22-ti násobek hodnoty nejnižší. V roce 2007, kdy jsou výsledky regresní analýzy nejpozitivnější, jsou jednotlivé koeficienty determinace velmi vyrovnané, všechny kolísají kolem průměrné hodnoty 50%. Lze tak konstatovat, že nižší koeficienty determinace

R² indikují další významné faktory, které ovlivňují výnosovost zemědělských plodin.

	2004	2007
ALS_rastr	1,21	51,31
ALS_TIN	3,79	51,46
GPS_IDW	0,49	50,66
GPS_SPL	4,65	50,58
ZBG_IDW	9,54	49,30
ZBG_SPL	10,67	49,28

Tab. 10: Porovnání procentuálních koeficientů determinace za 2 odlišná období.

Obecně lze říci, že korelace mezi topografií a výnosem je vyšší v letech s nižší průměrnou srážkou, zároveň jsou v těchto obdobích koeficienty determinace pro různé výškové modely z různých zdrojů dat výrazně vyrovnanější (zjednodušeně lze říci, že mezi vstupními výškovými daty není pro stanovení vztahu terénu na výnosu rozdíl). Z výše uvedených výsledků lze usuzovat, že topografická data ovlivňují výnosovost plodin lépe v teplejších, ale především sušších letech. K faktu, že závislost mezi výnosem a topografií je obecně vyšší v sušších letech, došla také Kumhálová et al. (2011).

Marques da Silva et al. (2008) a Kravchenko et al. (2000) konstatují, že vyšší výnosy jsou situovány v nižších polohách pozemku. Koeficienty korelace jednotlivých charakteristik jsou zde velmi různorodé. Z výsledků (tab. 7) zjistíme velké množství negativních signifikantních hodnot, především u modelů terénu (roky 2006, 2007, 2010, 2011). To indikuje vyšší výnos právě v nižších polohách, což potvrzuje také vizualizace výnosu (Příloha 6). Zatímco v roce 2008 (spíše podprůměrné množství srážek i teploty) jsou hodnoty koeficientů korelace DEM čistě pozitivní a, až na jeden případ, signifikantní pro všechny sady vstupních výškových dat. Vizualizovaný výnos indikuje vyšší výnos striktně v horních polohách území. Koeficienty korelace u modelů sklonitosti jsou nevyrovnané a nemají, mimo jediné, signifikantní hodnoty. Pozitivní koeficienty má sklon v letech 2011 a 2012. To lze vysvětlit vysoce nadprůměrnými srážkami ve zmíněných letech. Nejvyšší koeficienty vycházejí u sad dat interpolovaných metodou Spline. Pro modely akumulace vody jsou hodnoty koeficientů korelace opět různorodé. Nejvyšší hodnoty lze nalézt u dat

ze sady ALS. Koeficienty jsou pro 6 z 8 sledovaných let signifikantní. Roky 2006 a 2007 (2 nesignifikantní) jsou období s vysoce podprůměrnými srážkami. Z výsledků lze usuzovat, že model akumulace vody má jako topografická charakteristika vyšší význam v letech s vyššími srážkami.

Mimo meteorologických aspektů mohou být výsledné koeficienty determinace ovlivněny také konkrétními pěstovanými plodinami v jednotlivých letech. Na daném pozemku byl aplikován následující osevní postup:

- 2004 řepka ozimá,
- 2005 pšenice ozimá,
- 2006 oves,
- 2007 ječmen ozimý,
- 2008 řepka ozimá,
- 2010 oves,
- 2011 pšenice ozimá,
- 2012 řepka ozimá.

V roce 2004 bylo podprůměrné množství srážek, v roce 2012 bylo množství srážek naopak velice nadprůměrné. V obou zmíněných obdobích byly průměrné koeficienty determinace R^2 velmi nízké – 5,06 a 7,67. V obou obdobích byla pěstována ozimá řepka. Lze tedy usuzovat, že topografické charakteristiky obecně lépe popisují výnos obilovin.

Vysvětlení vztahu mezi klimatickými podmínkami a závislostí výnosu na topografii není jednotné. Kravchenko et al. (2000) ex. Halvorson et al. (1991) našel nižší závislost topografických charakteristik na výnosovost plodin v sušších letech. Jeho zjištění je v rozporu s výsledky této práce. Rozdílnost výsledků by mohla být vysvětlena rozdílnými pedologickými i klimatickými podmínkami. Marques da Silva et al. (2008) dodává, že topografie ovlivňuje fyzikální i chemické vlastnosti půdy, obsah organické hmoty a nejvíce pak dostupnost vody, čímž je samozřejmě ovlivněna i výnosovost plodin.

Hodnocení kvality digitálních modelů terénu bylo provedeno pomocí střední polohové a střední absolutní chyby. Wu et al. (2013) ale tvrdí, že by hodnocení interpolačních metod nemělo být stanoveno pouze na základě kvantitativních validací. Říká, že vizualizace interpolačních metod poskytuje informace, které nelze vyčíst z validačních hodnot, jako například nadhodnocení nebo podhodnocení povrchu podél okrajů interpolovaného území. Wu et al. zároveň potvrzuje, že s množstvím rozmanitých výsledků tak nelze stanovit obecně nejlepší interpolační metodu. Tvrdí ale také, že interpolace typu IDW má nejlepší výsledky, pokud se soustředíme na plochu jako celek.

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

6. Závěr

Výsledky střední polohové chyby, střední absolutní chyby i koeficienty determinace regresní analýzy dokazují vhodnost použitých sad dat k modelování topografických charakteristik. Vstupní výšková data z leteckého skenování povrchu (ALS), data získaná ručním měřením RTK GPS i data ČÚZK ZABAGED lze použít pro vytváření digitálních modelů terénu a z nich odvozených modelů – modelů svažitosti a akumulace vody. Vytvořené topografické modely v jednotlivých letech pomocí jednotlivých sad dat zachovávají i přes různorodost výsledků stejný trend. Nalezení vztahu a stanovení závislosti mezi variabilitou výnosovosti zemědělských plodin a konkrétní terénní topografií pozemku bylo docíleno výše zmíněnou statistickou metodou regresní analýzy. Výsledky analýzy ukazují, že topografické charakteristiky často významně ovlivňují výnosovost plodin a nelze je proto zanedbávat. Vzhledem k různorodosti výsledků ovšem nejde stanovit obecnou univerzální míru závislosti. Výnosovost zemědělských plodin je mimo topografie terénu ovlivněna rostlinnými a půdními faktory a samozřejmě klimatickými a meteorologickými vlivy. Nicméně dostupnost vody lze označit jako jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňující výnos, obzvláště pak v sušších obdobích. Výsledky regresní analýzy mohou být dále zpřesněny využitím sofistikovanějšího algoritmu pro modelování akumulace vody nebo navýšením počtu vysvětlujících proměnných. Koeficienty mohou být porovnány a vyhodnoceny s výsledky analýz dalších statistických softwarů.

Práce popisuje historii precizního zemědělství, nabízí dostupné technologie sběru potřebných dat a vysvětluje principy precizního hospodaření. Podává přehled družicových systémů a možnosti zpřesnění jejich signálů. Zabývá se sběrem dat pomocí dálkového průzkumu, měřením půdních vlastností a výnosu, jako nezbytného prvku systému. Poskytuje přehled geografických informačních systémů jako nástroje správy, analýzy a interpretace získaných dat. Studie potvrzuje vztah mezi topografickými charakteristikami a výnosovostí zemědělských plodin. Výsledky lze využít pro porovnání s dalšími výzkumy zabývajícími se charakteristikami, které ovlivňují výnosovost zemědělských plodin. Mohou také sloužit jako podklad pro podrobnější analýzy zahrnující další charakteristiky daného zájmového území.

7. Přehled literatury a použitých zdrojů

- [1] BACKES M., PLÜMER L., 2003: On the adequacy of GIS-generated weed maps for Precision Farming. 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science, Espoo: pp 261-268.
- [2] DVORKIN V. V., FINKEL'SHTEIN A. M., NOSENKO Yu. I., URLICHICH Yu. M., 2009: The Russian Global Navigation Satellite Program. Herald of the Russian Academy of Science, Vol. 79, No. 1: pp 7-13.
- [3] DVORSKÝ J., URBAN J., 2011: Základy ekologického zemědělství: podle Nařízení Rady (ES) č. 834/2007, Nařízení Komise (ES) č. 889/2008 s příklady. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno, 109 pp.
- [4] GNIP P., CHARVÁT K., 2003: Management of zones in precision farming. Agricultural Economics, Vol. 43, No. 9: pp 416-418.
- [5] KADLČÍKOVÁ J., 2007: Testování a výběr interpolačních metod DMR v závislosti na typu georeliéfu. Geomorphologia Slovaca et Bohemica, Vol. 2007, No. 2: pp 14-18.
- [6] KAVKA M., POŠAR B., RYBKA A., NOZDROVICKÝ L., 1998: Možnosti využití systému precizního zemědělství v podmínkách ČR. Zamyšlení nad rostlinnou výrobou 1998, Česká zemědělská společnost: pp 37-43.
- [7] KODAIRA M., SHIBUSAWA S., 2013: Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping. Geoderma, Vol. 199: pp 64-79.
- [8] KRAVCHENKO N. A., BULLOCK D. G., 2000: Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. Agronomy Journal, Vol. 92, No. 1: pp 75-83.
- [9] KROULÍK M., MIMRA M., KUMHÁLA F., PROŠEK V., 2006: Mapping spatial variability of soil properties and yield by using geostatic method. Research in Agricultural Engineering, Vol. 52, No. 1: pp 17-24.
- [10] KUMHÁLOVÁ J., KUMHÁLA F., KROULÍK M., MATĚJKOVÁ Š., 2011: The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. Precision Agriculture, Vol. 12, No. 6: pp 813-830.

- [11] KUMHÁLOVÁ J., KUMHÁLA F., NOVÁK P., MATĚJKOVÁ Š., 2013: Airborne laser scanning data as a source of field topographical characteristics. *Plant Soil Environ*, Vol. 59, No. 9: pp 423-431.
- [12] LI Z., ZHU Q., GOLD CH., 2004: *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. CRC Press, 318 pp. ISBN 0-415-32462-9.
- [13] LOWENBER-DEBOER J. M., 2003: Precision Farming or Convenience Agriculture. 11th Australian Agronomy Conference, Geelong.
- [14] MANDAL G., GHOSH S. K., 2000: Precision farming - The emerging concept of agriculture for today and tomorrow. *Current Science*, Vol. 79, No. 12: pp 1644-1947.
- [15] MAŠEK J., HEŘMÁNEK P., PROCHÁZKA P., 2008: Sklizeč cukrové řepy a možnosti mapování výnosu při sklizni. *Listy cukrovarnické a řepařské*, Vol. 124, No. 9/10: pp 252-255.
- [16] MARQUES DA SILVA J. R., SILVA L. L., 2008: Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosystem Engineering*, Vol. 101, No. 2: pp 183-190.
- [17] MITAS L., MITASOVÁ H., 1999: Spatial interpolation. *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*, Vol. 1: pp 481-492.
- [18] EMÉNYI M., MESTERHÁZI P. Á., PECZE ZS., STÉPÁN ZS., 2003: The role of GIS and GPS in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 40, No. 1-3: pp 45-55.
- [19] RAPANT P., 2006: Globální družicové navigační systémy. In: *Geoinformatika a geoinformační technologie*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava: pp 347-376. ISBN 80-248-1264-9.
- [20] REYNS P., MISSOTTEN B., RAMON H., BAERDMAEKER DE J., 2002: A Review of Combine Sensors for Precision Farming. *Precision Agriculture*, Vol. 3, No. 2: pp 169-182.
- [21] ŘEZNÍČEK J., 2006: Česká síť permanentních stanic pro určování polohy CZEPOS. 1st International Trade Fair of Geodesy, Cartography, Navigation and Geoinformatics, Praha.

- [22] SCHUMAN G., MATGEN P., CULTER M. E. J., BLACK A., HOFFMANN L., PFISTER L., 2008: Comparison of remotely sensed water stages from LIDAR, topographic contours and SRTM. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 63, No. 3: pp 283-296.
- [23] STUDNIČKOVÁ T., WINKLER J., 2011: Heterogeneity of weed infestation in spring barley. *International Ph.D. Students Conference MendelNet 2011*, Brno.
- [24] ŠAFÁŘ V., ŽDÍMAL V., 2006: Letecké digitální snímkování pro podporu zemědělského hospodaření. *Informační systémy v zemědělství a lesnictví*, Česká zemědělská univerzita v Praze: pp 1-6.
- [25] ŠAŘEC O., ŠAŘEC P., PROŠEK V., 2002: Measuring of soil electrical conductivity for mapping of special variability of soil properties within field. *Research in Agricultural Engineering*, Vol. 48, No. 4: pp 131-136.
- [26] VITHARANA W. A. U., VAN MEIRVENNE M., SIMPSON D., COCKX L., DE BAERDEMEAKER J., 2008: Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in European loess area. *Geoderma*, Vol. 143, No. 1-2: pp 206-215.
- [27] WILLMONT C. J., MATSUURA K., 2005: Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, Vol. 30: pp 79-82.
- [28] WHITNEY J. D., MILLER W. M., WHEATON T. A., SALYANI M., SCHULLER J. K., 1999: Precision Farming Applications in Florida Citrus. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 15, No. 5: pp 399-403.
- [29] WU YI-HWA, HUNG MING-CHIH, PATTON J., 2013: Assessment and visualization of spatial interpolation of soil pH values in farmland. *Precision Agriculture*, Vol. 14: pp 465-585.
- [30] ŽDÍMAL V., POSPÍŠIL J., ŠAFÁŘ V., 2011: Remote sensing and yield maps (DPZ a výnosové mapy). *Symposium GIS Ostrava 2011*, Ostrava.

Další použité zdroje:

- [31] BHATTA B., 2010: Global Navigation Satellite System (GNSS) and its Definitions. Online, cit. 11. 2. 2014. Dostupné z: <http://basudebbhatta.blogspot.cz/2010/10/global-navigation-satellite-system-gnss.html>.
- [32] BISKUP R., 2008: Statistika. Regresní a korelační analýza. Studijní materiál, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- [33] BLACKMORE S., 2003: The role of yield maps in Precision Farming. A PhD thesis, Cranfield University at Silsoe.
- [34] KŘEN J., NEUDERT L., LUKAS V., 2007: Možnosti využití precizního zemědělství v podmínkách ČR. Prezentace, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- [35] KŘIKAVKOVÁ L., 2009: Interpolace bodových dat v GIS. Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze.
- [36] LUKAS V., NEUDERT L., KŘEN J., 2010: Precizní zemědělství a jeho přínosy. Online, cit: 21. 10. 2013. Dostupné z: <http://zemedelec.cz/precizni-zemedelstvi-a-jeho-prinosy>.
- [37] ORŠULÁK T., PACINA J., 2010: 3D modelování a virtuální realita. Studijní materiál, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem.
- [38] RABUŠIČ, L., 2004: Mnohonásobná lineární regrese. Studijní materiál, Masarykova univerzita.
- [39] RÜSCH P. C., 2001: Precision farming in South Africa. A Master of Engineering thesis, University of Pretoria.
- [40] RYANT P., 2001: Precizní zemědělství. Prezentace, Masarykova univerzita.
- [41] SKALICKÝ V., 2004: Využití systémů určování polohy. Mechanizace zemědělství. Online, cit. 22. 10. 2013. Dostupné z: <http://mechanizaceweb.cz/vyuziti-systemu-urcovani-polohy>.
- [42] SOBOTA L., 2009: Využití geodetického sběru dat v precizním zemědělství. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni.

Ostatní použité elektronické zdroje:

- [43] AGROTEC. Zemědělská a stavební technika. PLM – precizní zemědělství. Online, cit. 11. 2. 2014. Dostupné z: <http://www.eagrotec.cz/plm-precizni-zemedelstvi>.
- [44] ArcGIS Resources (ESRI). Online, cit. 27. 2. 2014. Dostupné z: <http://resources.arcgis.com>.
- [45] Český úřad zeměměřičský a katastrální (ČÚZK). Online, cit. 20. 2. 2014. Dostupné z: <http://geoportal.cuzk.cz>.
- [46] European Space Agency (ESA). Online, cit. 20. 2. 2014. Dostupné z: <http://esa.int>.
- [47] GEO Informatics. Knowledge of Surveying, Mapping & GIS Professionals. Online, cit. 27. 2. 2014. Dostupné z: <http://www.geoinformatics.com>.
- [48] GIS Resources. A Knowledge Archive. Online, cit. 3. 4. 2014. Dostupné z: <http://gisresources.com>.
- [49] Google Maps. Online, cit. 13. 3. 2014. Dostupné z: <https://maps.google.cz>.
- [50] Ministerstvo dopravy České republiky (MDČR). Odbor kosmických technologií a družicových systémů. Online, cit. 11. 2. 2014. Dostupné z: <http://www.spacedepartment.cz>.
- [51] Ministerstvo zemědělství České republiky (MZeČR). Portál farmáře. Online, cit. 19. 2. 2014. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/farmar>.
- [52] School of Civil and Environmental Engineering (SCEE). University of New South Wales. Online, cit. 19. 3. 2014. Dostupné z: <http://www.engineering.unsw.edu.au/civil-engineering>.
- [53] Trimble. Online, cit. 20. 2. 2014. Dostupné z: <http://www.trimble.com/Agriculture>.

PŘÍLOHA 1

Výsledky hodnocení kvality jednotlivých digitálních modelů terénu s využitím různých interpolačních metod a jejich nastavení, metoda střední polohové chyby. Tabulka je dělená na výsledky RMSE pro prostorové rozlišení 0,5m a 1,0m.

RMSE 0,5m	suma Δh	bodů	RMSE
GPS_IDW	12,90314	119	0,741
GPS_SPLINE_1	3,63820	119	0,334
GPS_SPLINE_2	3,97011	119	0,364
GPS_SPLINE_3	3,75441	119	0,344
ZABAGED_IDW	11,17163	120	0,438
ZABAGED_SPLINE_1	1,07095	120	0,098
ZABAGED_SPLINE_2	0,99386	120	0,091
ZABAGED_SPLINE_3	1,01044	120	0,092
ALS_TIN_RASTER	8,69238	317	0,488
ALS_RASTER	9,09573	317	0,511
RMSE 1,0m	suma Δh	bodů	RMSE
GPS_IDW	12,52250	119	0,742
GPS_SPLINE_1	3,95318	119	0,362
GPS_SPLINE_2	4,27859	119	0,392
GPS_SPLINE_3	4,04652	119	0,371
ZABAGED_IDW	11,17163	120	0,438
ZABAGED_SPLINE_1	1,00900	120	0,092
ZABAGED_SPLINE_2	1,27051	120	0,116
ZABAGED_SPLINE_3	1,01905	120	0,093
ALS_TIN_RASTER	10,06912	317	0,566
ALS_RASTER	10,58310	317	0,594

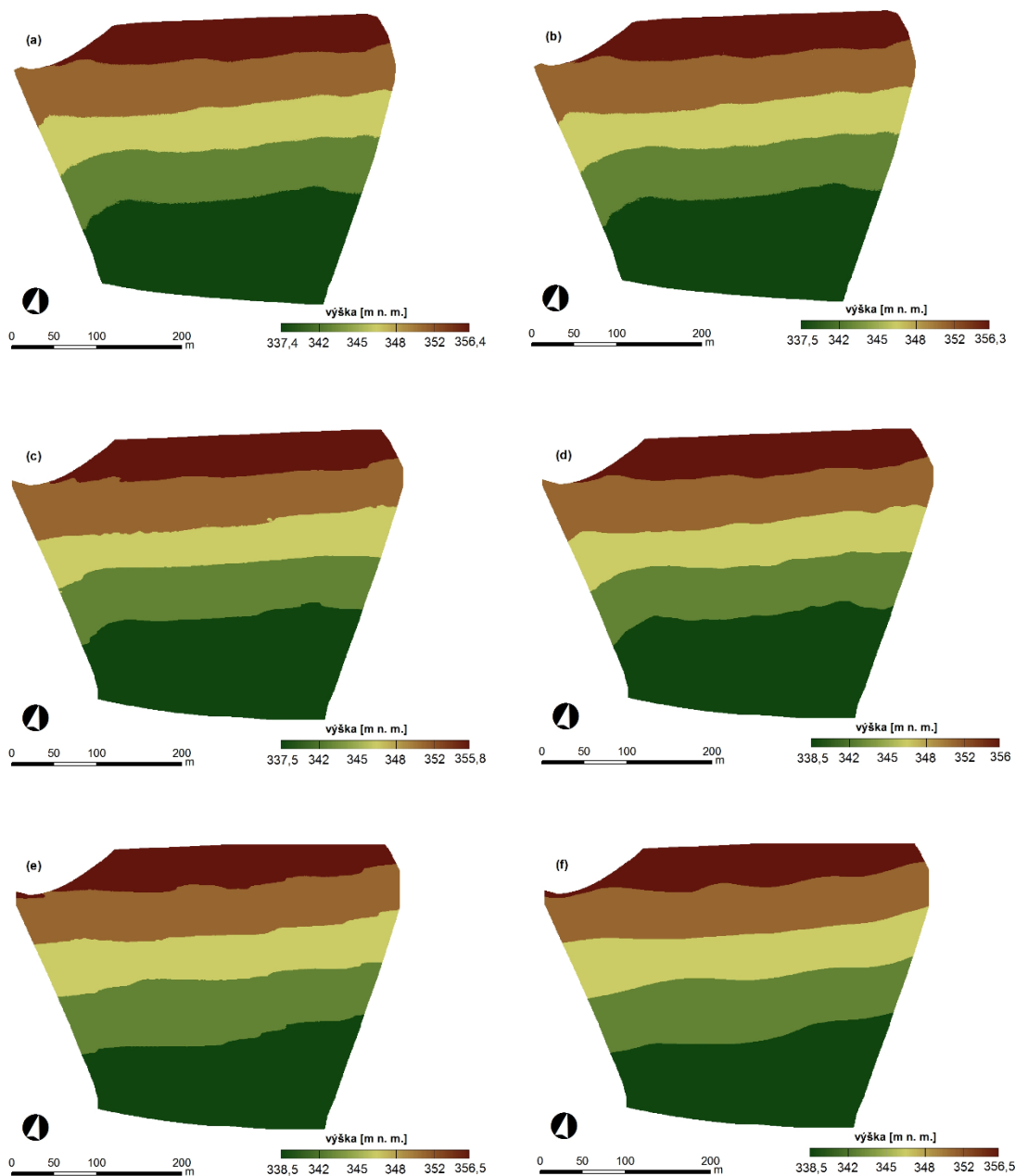
PŘÍLOHA 2

Výsledky hodnocení kvality jednotlivých digitálních modelů terénu s využitím různých interpolačních metod a jejich nastavení, metoda střední absolutní chyby. Tabulka je dělená na výsledky MAE pro prostorové rozlišení 0,5m a 1,0m.

MAE 0,5m	suma Δh	bodů	MAE
GPS_IDW	12,90314	119	0,068
GPS_SPLINE_1	3,63820	119	0,031
GPS_SPLINE_2	3,97011	119	0,033
GPS_SPLINE_3	3,75441	119	0,032
ZABAGED_IDW	11,17163	120	0,040
ZABAGED_SPLINE_1	1,07095	120	0,009
ZABAGED_SPLINE_2	0,99386	120	0,008
ZABAGED_SPLINE_3	1,01044	120	0,008
ALS_TIN_RASTER	8,69238	317	0,027
ALS_RASTER	9,09573	317	0,029
MAE 1,0m	suma Δh	bodů	MAE
GPS_IDW	12,52250	119	0,068
GPS_SPLINE_1	3,95318	119	0,033
GPS_SPLINE_2	4,27859	119	0,036
GPS_SPLINE_3	4,04652	119	0,034
ZABAGED_IDW	11,17163	120	0,040
ZABAGED_SPLINE_1	1,00900	120	0,008
ZABAGED_SPLINE_2	1,27051	120	0,011
ZABAGED_SPLINE_3	1,01905	120	0,008
ALS_TIN_RASTER	10,06912	317	0,032
ALS_RASTER	10,58310	317	0,033

PŘÍLOHA 3

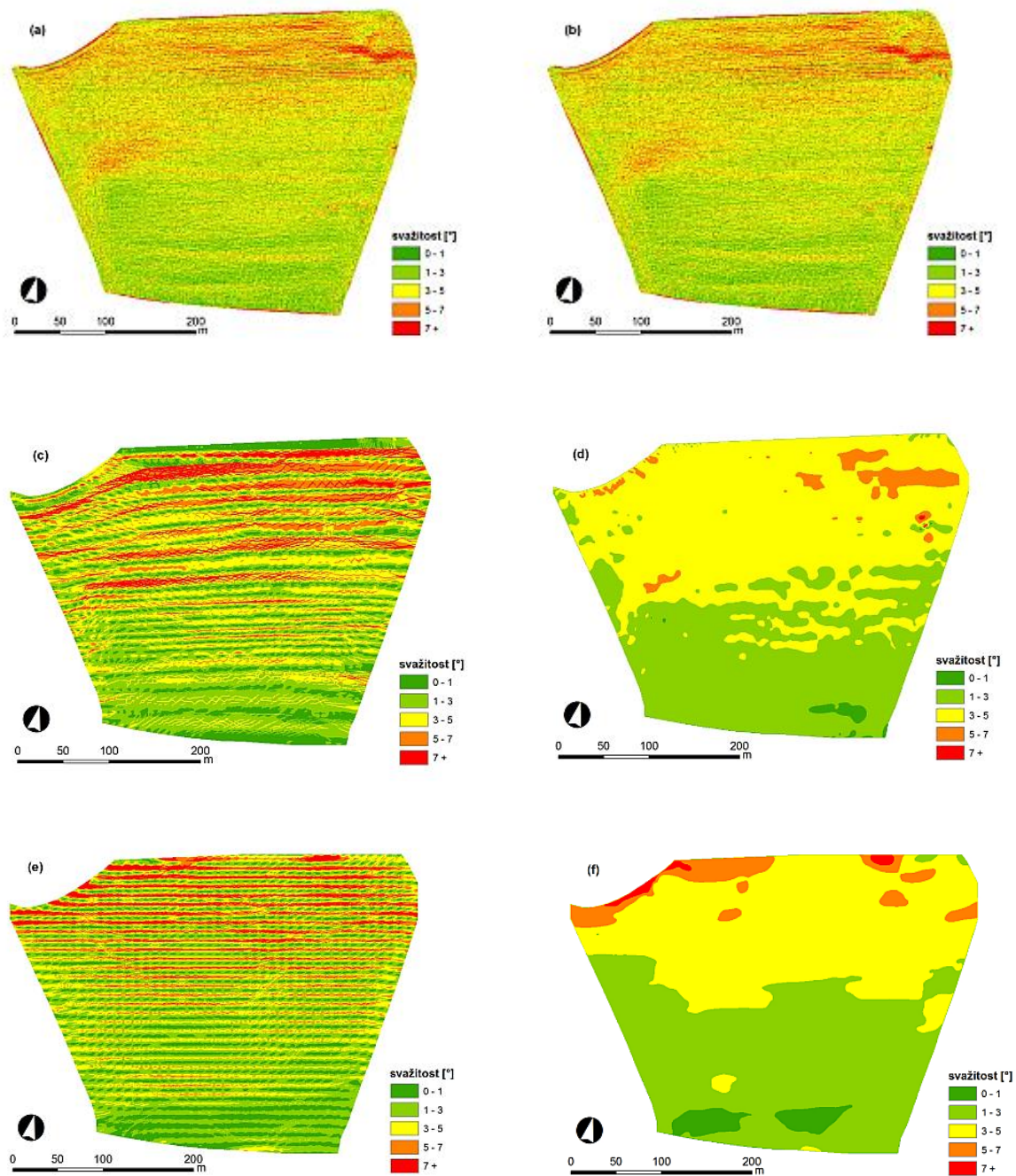
Vizualizace 6 vybraných digitálních modelů terénu s nejnižší hodnotou RMSE v konkrétním typu zdrojových výškových dat.



Tři řady vizualizovaných digitálních modelů terénu pozemku lišící se zdrojem výškových dat vstupujících do výpočtu modelu. Označení modelu se skládá z typu výškových dat a typu interpolační metody: (a) ALS_TIN, (b) ALS_rastr, (c) GPS_IDW, (d) GPS_SPL, (e) ZBG_IDW, (f) ZBG_SPL.

PŘÍLOHA 4

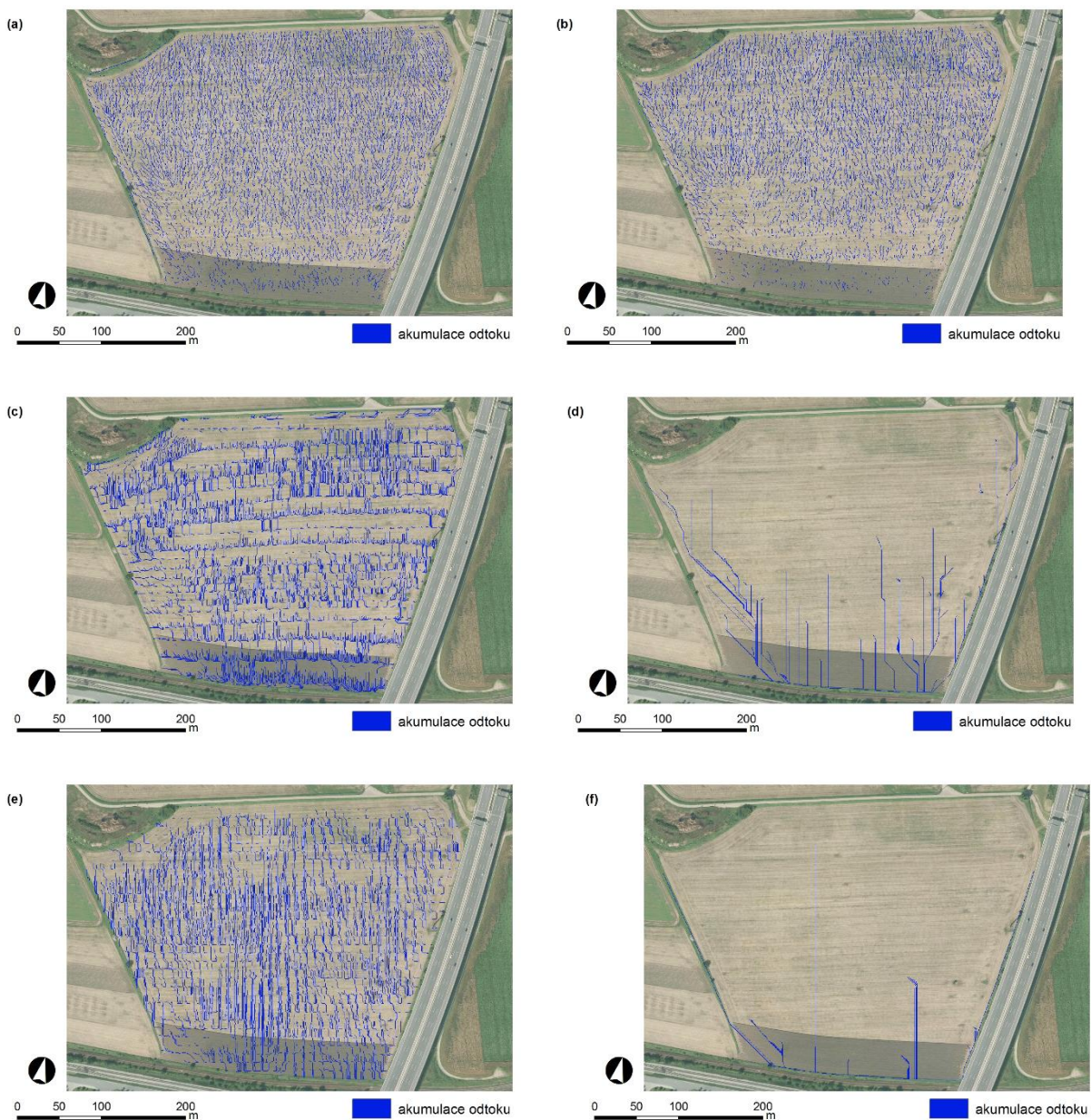
Vizualizace jednotlivých modelů svažitosti na základě 6 vybraných DEMs.



Tři řady vizualizovaných modelů sklonitosti pozemku lišící se zdrojem výškových dat vstupujících do výpočtu modelu. Označení modelu se skládá z typu výškových dat a typu interpolační metody: (a) ALS_TIN, (b) ALS_rastr, (c) GPS_IDW, (d) GPS_SPL, (e) ZBG_IDW, (f) ZBG_SPL.

PŘÍLOHA 5

Vizualizace jednotlivých modelů akumulace vody na základě 6 vybraných digitálních modelů terénu.



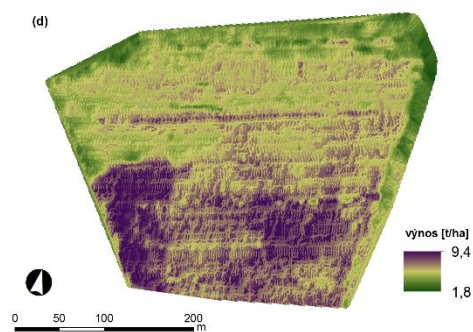
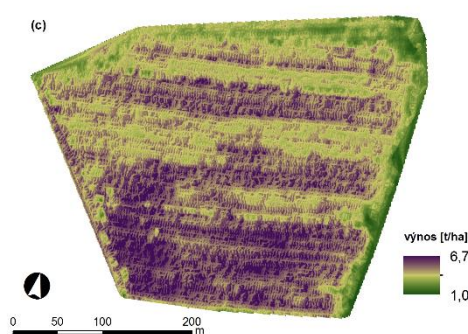
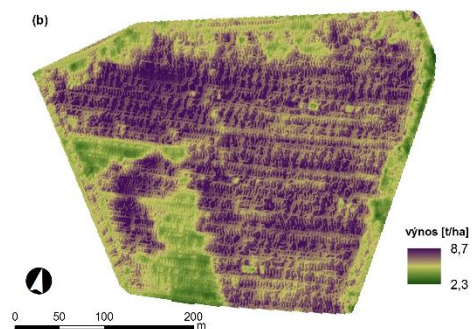
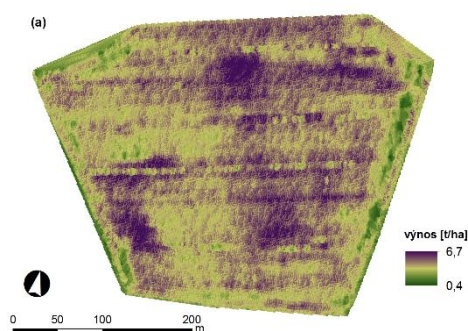
Tři řady vizualizovaných odtokových modelů pozemku lišící se zdrojem výškových dat vstupujících do výpočtu modelu. Označení modelu se skládá z typu výškových dat a typu interpolační metody: (a) ALS_TIN, (b) ALS_rastr, (c) GPS_IDW, (d) GPS_SPL, (e) ZBG_IDW, (f) ZBG_SPL.

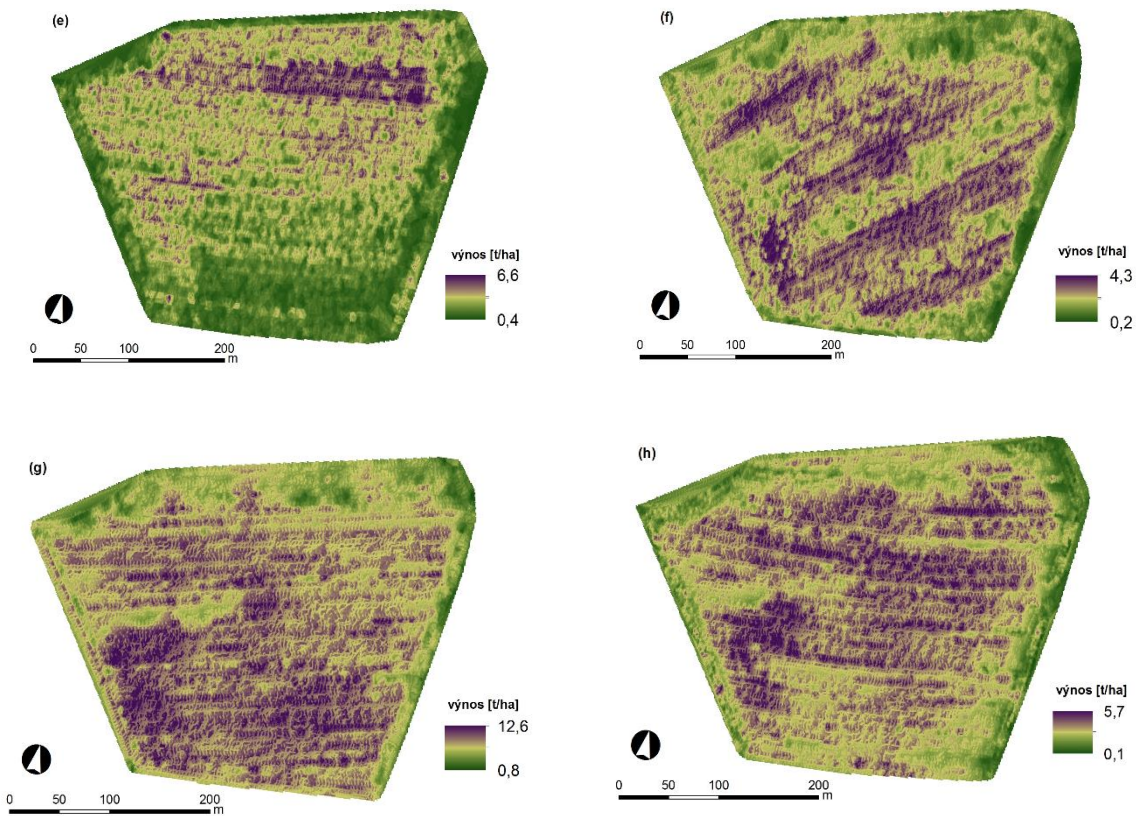
Zdroj podkladové mapy: Prohlížeč služba WMS - Ortofoto on geoportal.cuzk.cz.

PŘÍLOHA 6

Vizualizace interpolovaných výnosových dat za roky 2004 – 2012 (mimo rok 2009, pro který nejsou data k dispozici). Značení výnosových map je chronologické. Osevní postupy na pozemku jsou následující:

- 2004 řepka ozimá,
- 2005 pšenice ozimá,
- 2006 oves,
- 2007 ječmen ozimý,
- 2008 řepka ozimá,
- 2010 oves,
- 2011 pšenice ozimá,
- 2012 řepka ozimá.





PŘÍLOHA 7

Výsledky vícenásobné lineární regresní analýzy – koeficienty determinace pro jednotlivé roky sledovaného období a různá vstupní výšková data, resp. různé digitální modely terénu a z něho odvozené charakteristiky.

2004	R²	%	2005	R²	%
ALS_rastr	0,01209	1,21	ALS_rastr	0,03103	3,10
ALS_TIN	0,03786	3,79	ALS_TIN	0,09160	9,16
GPS_IDW	0,00490	0,49	GPS_IDW	0,03837	3,84
GPS_SPL	0,04646	4,65	GPS_SPL	0,00118	0,12
ZBG_IDW	0,09539	9,54	ZBG_IDW	0,09166	9,17
ZBG_SPL	0,10669	10,67	ZBG_SPL	0,10369	10,37
2006	R²	%	2007	R²	%
ALS_rastr	0,33845	33,85	ALS_rastr	0,51313	51,31
ALS_TIN	0,33701	33,70	ALS_TIN	0,51456	51,46
GPS_IDW	0,34052	34,05	GPS_IDW	0,50663	50,66
GPS_SPL	0,33055	33,05	GPS_SPL	0,50578	50,58
ZBG_IDW	0,20275	20,28	ZBG_IDW	0,49299	49,30
ZBG_SPL	0,15883	15,88	ZBG_SPL	0,49285	49,28
2008	R²	%	2010	R²	%
ALS_rastr	0,38160	38,16	ALS_rastr	0,09920	9,92
ALS_TIN	0,49379	49,38	ALS_TIN	0,16314	16,31
GPS_IDW	0,15368	15,37	GPS_IDW	0,10781	10,78
GPS_SPL	0,19040	19,04	GPS_SPL	0,16165	16,16
ZBG_IDW	0,46073	46,07	ZBG_IDW	0,05468	5,47
ZBG_SPL	0,44724	44,72	ZBG_SPL	0,09884	9,88
2011	R²	%	2012	R²	%
ALS_rastr	0,25778	25,78	ALS_rastr	0,05315	5,32
ALS_TIN	0,27341	27,34	ALS_TIN	0,22294	22,29
GPS_IDW	0,36000	36,00	GPS_IDW	0,03253	3,25
GPS_SPL	0,34734	34,73	GPS_SPL	0,09266	9,27
ZBG_IDW	0,16838	16,84	ZBG_IDW	0,02338	2,34
ZBG_SPL	0,17167	17,17	ZBG_SPL	0,03593	3,59