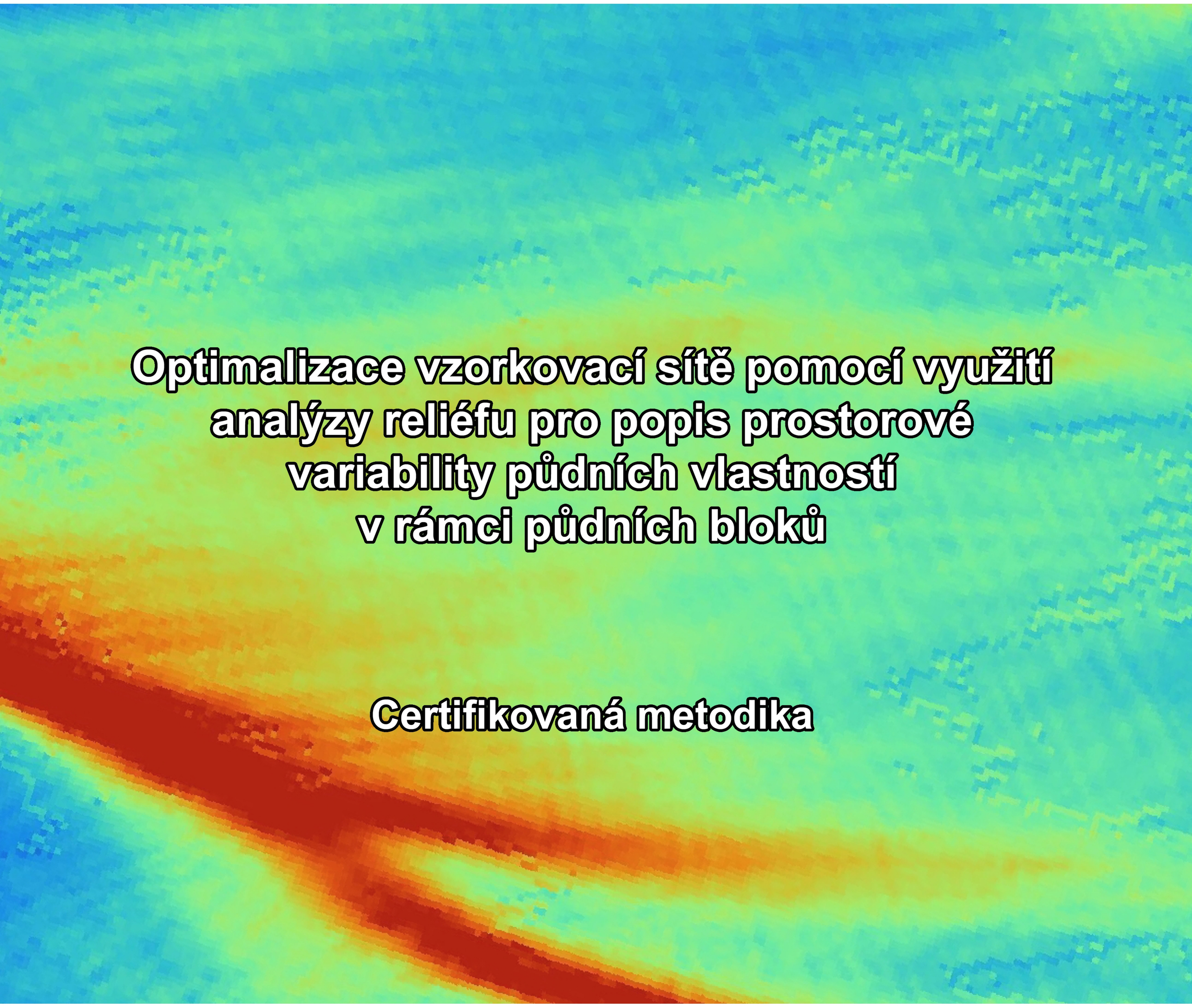
Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů
Katedra pedologie a ochrany půd



Optimalizace vzorkovací sítě pomocí využití analýzy reliéfu pro popis prostorové variability půdních vlastností v rámci půdních bloků

Certifikovaná metodika

Ing. Vít Penížek, Ph.D.
RNDr. Tereza Zádorová, Ph.D.
prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.
Ing. Aleš Klement, Ph.D.

Praha 2014

Optimalizace vzorkovací sítě pomocí využití analýzy reliéfu pro popis prostorové variability půdních vlastností v rámci půdních bloků

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Vít Penížek, Tereza Zádorová, Radka Kodešová, Aleš Klement

Česká zemědělská univerzita v Praze

Praha, 2014

Adresa autorů:

Česká zemědělská univerzita v Praze,
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů,
Katedra pedologie a ochrany půd
Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 – Suchdol

Ing. Vít Penížek, Ph.D.
RNDr. Tereza Zádorová, Ph.D.
prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.
Ing. Aleš Klement, Ph.D.

ISBN: 978-80-213-2533-3

Abstrakt

Cílem metodiky je vytvoření uživatelsky uchopitelného postupu pro plánování vzorkovací sítě na pozemcích s výraznou variabilitou reliéfu. Metodika uvádí uplatnění jednotlivých kroků, které je třeba použít při tvorbě takové sítě. Jedná se o problematiku podmíněnosti variability půdních vlastností v rámci pozemku, dostupnosti, vhodnosti a postupu předzpracování pomocných dat, tedy modelu reliéfu, vlastní aplikaci metod a zhodnocení vhodnosti použitých metod při použití standardního softwaru.

Popis variability půdních vlastností v rámci zemědělsky využívaných pozemků je důležitým aspektem pro lepší hospodářské využití pozemků. Pro popis heterogenity půd a variability půdních vlastností v rámci pozemku lze využít reliéf jako pomocnou vlastnost. To platí za předpokladu, že je pozemek s ohledem na další půdotvorné faktory homogenní. Tradičním postupem popisu variability půd je půdní průzkum. Půdní vlastnosti jsou popsány bodově v rámci odběrové (vzorkovací) sítě. Často je u pozemků předpoklad nevyrovnanosti variability, tedy předpoklad výskytu různých hodnot a trendů v různých částech pozemku. V tomto případě je vhodné rozdělení pozemku na podoblasti a umístění vzorků rozdělit tak, aby v každé z podoblastí byla popsána variabilita. V takovém případě se jedná o využití tzv. stratifikované vzorkovací sítě.

Tato metodika popisuje výhodnost stratifikace vzorkovací sítě pomocí analýzy digitálního modelu reliéfu. Byly porovnány čtyři typy vzorkovacích sítí lišících se uspořádáním vzorkovací sítě a schémat lišících se množstvím odběrových bodů. Stratifikovaná vzorkovací síť, navržená popsaným metodickým postupem, umožňuje snížení počtu vzorků o 25%, aniž by došlo ke snížení přesnosti prostorové predikce sledované vlastnosti.

Klíčová slova: půdní variabilita, vzorkovací síť, digitální model reliéfu

Oponenti

doc. Ing. Milan Kroulík, Ph.D., Katedra zemědělských strojů, Technická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze

Ing. Karel Jacko, Ph.D., Státní pozemkový úřad, Praha

OBSAH

1. ÚVOD 6
2. CÍL 6
3. VARIABILITA PŮDNÍCH VLASTNOSTÍ 7
3.1. PŘÍČINY VARIABILITY PŮD 7
3.2. POPIS VARIABILITY PŮD V RÁMCI POZEMKU 8
3.3. ODHAD VARIABILITY POZEMKU NA ZÁKLADĚ POMOCNÝCH DAT 9
4. DIGITÁLNÍ MODEL RELIÉFU 10
4.1. TYPY REPREZENTACE POVRCHU ZEMĚ 10
4.2. POSTUPY ZÍSKÁVÁNÍ DMR 12
4.3. VYBRANÉ VÝZNAMNÉ ZDROJE DMR PRO ÚZEMÍ ČR 13
4.4. ANALÝZA DMR 17
5. VZORKOVANÍ PŮD 22
5.1. VZORKOVACÍ SCHÉMATA 22
5.2. HUSTOTA VZORKOVACÍ SÍTĚ 23
6. MODELY PRO POPIS VZTAHU PŮDNÍCH VLASTNOSTÍ A RELIÉFU 24
7. APLIKACE 27
7.1. POPIS ÚZEMÍ 27
7.2. DOSTUPNÉ DMR A VOLBA ROZLIŠENÍ DMR 28
7.3. VZORKOVACÍ SCHÉMATA 29
7.4. SHRNUTÍ 36
8. DOPLŇKOVÉ INFORMACE 37
8.1. PŘÍNOS METODIKY 37
8.2. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ 37
8.3. POPIS UPLATŇOVANÉ METODIKY 37
8.4. EKONOMICKÉ ASPEKTY 38
8.5. DEDIKACE 38
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 39
SEZNAM PŘEDCHÁZEJÍCÍCH PUBLIKACÍ AUTORŮ 40
SUMMARY 41

1. Úvod

Popis variability půdních vlastností v rámci zemědělsky využívaných pozemků je důležitým aspektem pro lepší hospodářské využití pozemků nebo popis aktuálního stavu s ohledem na jejich degradaci. Variabilita půdních vlastností je výsledkem působení půdotvorných faktorů. Jejich odlišné působení v rámci sledovaného pozemku pak vede k prostorové diferenciaci půd a jejich vlastností.

Tradičním postupem popisu variability půd je půdní průzkum. Půdní vlastnosti jsou popsány bodově v rámci vzorkovací sítě. Popis variability půdních vlastností v rámci celého sledovaného území je pak interpolací vlastností.

Chceme-li popsat variabilitu půdních vlastností, je základním předpokladem odhad míry jejich variability a s tím související hustoty odběrové sítě. Pro popis variability půdních vlastností je používána celá řada vzorkovacích schémat. Jejich volba je řízena účelem a charakterem území. U řady pozemků se setkáváme s předpokladem nevyrovnanosti variability, tedy předpoklad výskytu různých hodnot a trendů v různých částech pozemku z důvodu velké heterogenity z pohledu reliéfu. Vlastnosti reliéfu mohou v takovém případě sloužit jako pomocná data pro zlepšení prostorové predikce sledovaných půdních vlastností a také už pro vlastní optimalizaci vzorkovací sítě, tedy k snížení bodů ve vzorkovací síti, aniž by došlo k poklesu přesnosti predikce půdních vlastností. To může být využito při snižování nákladů, jak finančních tak pracovních při plánování půdního průzkumu, sledování variability půdních vlastností pro potřeby např. precizního zemědělství.

2. Cíl

Cílem metodiky je poskytnout uživatelsky uchopitelný postup pro plánování vzorkovací sítě na pozemcích s výraznou variabilitou reliéfu formou detailního popisu jednotlivých kroků, tedy podmíněnosti variability půdních vlastností v rámci pozemku, dostupnosti, vhodnosti a postupu předzpracování digitálního modelu reliéfu, vlastní aplikaci metod a zhodnocení vhodnosti použitých metod při použití standardního softwaru.

Metodika si klade za cíl zachytit inovační postup snížení množství bodů ve vzorkovací síti a snížení finančních nákladů bez snížení přesnosti prostorové predikce půdních vlastností.

3. Variabilita půdních vlastností

Popis variability půdních vlastností v rámci zemědělsky využívaných pozemků je důležitým aspektem pro lepší hospodářské využití pozemků nebo popis aktuálního stavu s ohledem na jejich degradaci. Popis variability v rámci jednotlivých pozemků je často úzce spjat s oblastí precizního zemědělství, kdy poznání variability půdních vlastností slouží jako základ k optimalizaci aplikace hnojiv.

3.1. Příčiny variability půd

Variabilita půdních vlastností je výsledkem působení půdotvorných faktorů. Jejich odlišné působení v rámci sledovaného pozemku pak vede k prostorové diferenciaci půd a jejich vlastností. Půdotvorné faktory mají odlišný vliv s ohledem na jejich prostorové působení. Některé faktory vedou k diferenciaci půd na velké vzdálenosti, příkladem je klimatický faktor, který vede k diferenciaci půd v regionálním měřítku. Naopak jiné půdotvorné faktory způsobují půdní heterogenitu na střední nebo malé vzdálenosti, které se intenzivně projevují v rámci pozemků. Příkladem takových faktorů je například geologie. Velmi často je pak tímto faktorem reliéf, který diferencuje půdní pokryv velmi intenzivně na malé vzdálenosti. Reliéf hraje výraznou roli především díky pohybu vody a půdního materiálu (Florinsky et al., 2002). Pohyb vody ovlivňuje mnoho půdních vlastností, jako jsou půdní vlhkost, hydromorfnost půd daná stagnací srážkové nebo podzemní vody, obsah živin, který se mění s ohledem na vyluhování půdního profilu a naopak akumulaci látek v jiných částech krajiny.

Významný vliv má reliéf také na pohyb půdní masy. Půdní masa je redistribuována v důsledku eroze, v našich podmínkách především vodní. V jejím důsledku dochází k výrazné prostorové diferenciaci půdního pokryvu a tím i půdních vlastností. Původně relativně homogenní půdní kryt se diferencuje s ohledem na jeho pozici v krajině. V exponovaných místech dochází k degradaci půd, snižování hloubky půdního profilu, snižování obsahu humusu v důsledku jeho odnosu a přiorávání podorničí. Naopak v akumulačních částech dochází k hromadění erodovaného materiálu a nanášení na humus relativně bohatého sedimentu (Zádorová et al., 2011). V důsledku tohoto procesu dochází k tvorbě půdní mozaiky přímo podmíněné reliéfem. Jestliže je pozemek s ohledem na další půdotvorné faktory

homogenní, lze využít reliéf jako pomocnou vlastnost pro popis heterogenity půd a variability půdních vlastností. Popis vztahu půd (a půdních vlastností) vyjádřil Jenny a později popsal v kvantifikované podobě McBratney et al. (2003) rovnicí:

$$S = f\,(scorpan) \qquad (1)$$

kde je *S* – půdní vlastnost/jednotka (která je modelována), *s* – půdní vlastnost v místě měření, *c* – klima, *o* – organismy, včetně vegetace a člověka, *r* – reliéf, *p* – půdotvorný substrát, *a* – čas, *n* – geografická pozice. V případě zemědělského pozemku, který má stejný půdotvorný substrát a je stejně obděláván lze rovnici zjednodušit na:

$$S = f\,(sr) \qquad (2)$$

Takový vztah lze potom použít jak pro prostorovou předpověď rozložení půdních jednotek i variability půdních vlastností. Popis zachycení vztahu mezi variabilitou půdních vlastností a reliéfem je možný pomocí celé řady metod. V současné době se uplatňují především kvantitativní metody prostorové statistiky. Aplikace těchto metod je jednou ze skupin metod v rámci širšího pojmu digitálního mapování půd (DMP). Tyto metody, jejich podstata a postup jejich aplikace je podrobně popsána v kapitole 6.

3.2. Popis variability půd v rámci pozemku

Popis variability půdních vlastností je možné zachytit pomocí řady metod. V současné době se často uplatňují moderní metody, které využívají nepřímé pozorování. Příkladem takových metod je dálkový průzkum Země nebo geofyzikální metody. U metod DPZ je využito celoplošné snímání povrchu půd. Naměřené hodnoty el. mag. záření, ať ve viditelné části spektra, nebo v širších spektrálních pásmech jsou využity pro popis půdní variability. Dalším zástupcem metod nepřímého měření jsou geofyzikální metody. V případě využití těchto metod, dochází k intenzivnímu screeningu plochy pozemku, v tomto případě ale už ne celoplošného.

Tradičním postupem popisu variability půd je půdní průzkum. Půdní vlastnosti jsou popsány bodově v rámci odběrové (vzorkovací) sítě. Popis variability půdních

vlastností v rámci celého sledovaného území je pak interpolací vlastností právě z těchto bodů využitím metod DMP. Prostorová predikce půdních vlastností může zahrnovat jednodušší přístupy bez využití pomocných dat. Mezi takové metody řadíme *inverse distance weightening* nebo *kriging*. Předpověď půdních vlastností v místech, kde neproběhlo jejich měření, je založena na okolních měřených bodech. Princip těchto metod je detailně popsán mnoha autory a není předmětem této metodiky. Pokročilejší metody DMP do popisu variability půdních vlastností zahrnují pomocná data, která zlepšují předpověď prostorové variability. Jako pomocná data mohou být využity jakékoli vlastnosti půdotvorných faktorů, které mají vliv na vývoj půd v daném území. Jestliže budeme uvažovat, že sledované území je homogenní s ohledem na půdotvorné faktory mimo reliéf, stává se právě on hlavní faktorem pro predikci variability půdních vlastností v daném území. Kromě využití reliéfu pro přímý popis půdní variability ho lze využít i k optimalizaci odběrové sítě. Reliéf je pro takový popis třeba kvantitativně charakterizovat. To se děje pomocí vlastností reliéfu, které jsou vypočítány na základě digitálního modelu reliéfu (DMR). Možnost využití DMR je podmíněno několika faktory, mezi které patří i kvalita DMR, která je podmíněna zdrojem DMR, jeho zpracováním, rozlišením a charakteristikami, které jsou detailně popsány v kapitole 4.

3.3. Odhad variability pozemku na základě pomocných dat

Chceme-li popsat variabilitu půdních vlastností, je základním předpokladem odhad míry jejich variability a s tím související hustoty odběrové sítě. Jednou z možností určení potřebné hustoty sítě může být analýza prostorové variability pomocných dat, jako je letecký/družicový snímek nebo digitální model reliéfu. Alternativou mohou být obecně doporučované hodnoty počtu vzorkovacích bodů na jednotku plochy např. pro oblast precizního zemědělství. Blíže je samotný postup odhadu popsán v kapitole 5.2.

4. Digitální model reliéfu

DMR je hojně využívanou doprovodnou veličinou pro zlepšení popisu variability půdních vlastností v rámci pozemku i širších oblastí. Hojné vyžívání DMR pro predikci půdních vlastností je dáno jeho snadnou dostupností. DMR jsou používány nejen v pedologii. Vznikají za různými účely, a proto ne všechny dostupné DMR jsou vhodné pro modelování prostorové variability půd. Digitální model reliéfu představuje kontinuální reprezentaci zemského povrchu, popřípadě povrchu Země včetně objektů na jejich povrchu. Z tohoto hlediska je možné mluvit o tzv. digitálním výškovém modelu Země (DVM), kde je popsán povrch včetně přítomných objektů (např. staveb) či vegetace a takový model není pro DMP vhodný. Pojem digitální model reliéfu (synonymem je digitální model terénu - DMT) je vázán na výškový model, který popisuje skutečný povrch Země bez vegetace a objektů. DMR je možné rozdělit podle několika kritérií, která jsou popsána dále v textu.

4.1. Typy reprezentace povrchu Země

Obecně lze povrch Země v digitální podobě popsat pomocí tří typů modelů. Tradičním modelem je vrstevnicový model tvořený izoliniemi reprezentujícími nadmořskou výšku (*obr. 1*). Druhým typem vyjádření je nepravidelná trojúhelníková síť - *triangulated irregular network* (TIN). Pro využití reliéfu pro analýzu vztahu půd a vlastností reliéfu je nejčastěji používána reprezentace v podobě rastru. Je to reprezentace, na kterou jsou proto převáděny i ostatní datové modely, jako jsou vrstevnicové modely nebo bodová pole získávána pomocí *laserscanningu*. Rastrová reprezentace má výhodu ve snadnosti modelování vlastností reliéfu a popisu pohybu vody. To je dáno možností modelování návaznosti sousedních buněk popř. širších vztahů.

Vrstevnicový model

Vrstevnicový model je tradičním popisem reliéfu. Nadmořská výška je reprezentována pomocí isolinií s pravidelnou stupnicí nadmořských výšek. Vrstevnicové modely mohou vznikat na základě různých postupů měření. Původně byly získávány pomocí geodetických měření, později často interpretací leteckých

stereoskopických snímků. Zpětně mohou být vrstevnicové modely získány z rastrových modelů.

TIN

Tento model je reprezentován nepravidelnou trojúhelníkovou sítí. Tyto trojúhelníky představují terénně homogenní plochy, přičemž nadmořská výška je zachycena ve vrcholech trojúhelníků. V současné době se uplatňují i bodové reprezentace, což je svým způsobem obdoba TIN, kdy je výškopis popsán hustou množinou bodových měření. Tento popis výškopisu úzce souvisí s novými metodami získávání DMR pomocí metod využívající laserová měření, nebo měření pomocí GPS.

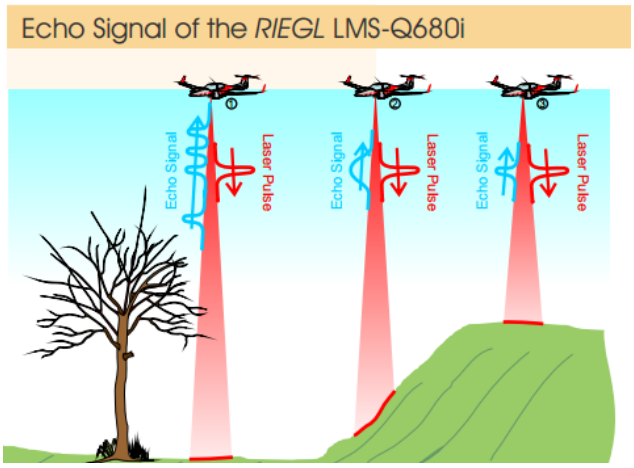
Obr. 1: Model reliéfu ve formě vrstevnic, rastru a TIN.

Rastrový model

Základním stavebním prvkem je u rastrové struktury tzv. pixel (buňka). Pixely jsou uspořádány do tzv. mozaiky – rastru (pravidelné sítě). Jednotlivé buňky obsahují hodnoty zastupující zkoumané místo. Teoreticky mohou mít pixely podobu trojúhelníku, hexagonu nebo čtverce. Poslední jmenovaný je obvyklým modelem. Jednotlivé rastry jsou charakterizovány velikostí pixelu, která udává detailnost modelu a je na ní závislá i správnost zachycení skutečného tvaru reliéfu a výrazně ovlivňuje přesnost prováděných analýz. Výhodou rastrů jsou jednoduché algoritmy, které jsou používány při jeho výpočtu a analýzách, nevýhodou je velká objemnost dat. Rastrový model je v současné době nejrozšířenější reprezentací reliéfu využívaný pro analýzu reliéfu.

4.2. Postupy získávání DMR

Základem modelů výškopisu jsou různé typy měření povrchu Země. Tradičním postupem jsou **geodetická měření**, jejichž produktem byly tradičně vrstevnicové reprezentace reliéfu. Ty vznikají interpolací z naměřených bodů. Byly často používány pro tvorbu topografických map, jak vojenského, tak i civilního mapování. Dalším z přístupů je využití **stereoskopických snímků**. Území je snímáno z dvou různých úhlů a získaný výškopisný vjem je převeden do jedné z datových struktur. V minulosti to byla vrstevnicová reprezentace, v současné době je to obvykle podoba rastru. Stereoskopické snímky mohou být získávány buď pomocí leteckého snímkování či družicového snímkování. Příkladem využití družicového pořizování stereoskopických snímků pro tvorbu modelu reliéfu je družice Aster. Výhodou stereoskopických snímků je relativně snadné získání informací na velké ploše. Rozlišení a přesnost snímků jsou dány výškou, z jaké je území snímáno, a rozlišením snímacího zařízení. Obecně lze říci, že pomocí letecké stereoskopie jsou v současné době získávány rastry o rozlišení v řádu decimetrů až metrů, z družicových snímků v řádu metrů až desítek metrů. Přesnost DMR je dána právě rozlišením rastru, ale je třeba si uvědomit, že u těchto metod se jedná o získávání digitálního výškového modelu, tedy modelu, kde se projevují i vegetace a budovy. V případě získávání modelu pro specifická území lze tento problém eliminovat vhodnou dobou snímkování, kdy jsou zemědělské plochy bez vegetace (jaro, podzim) u ostatních ploch (lesy) je možné použít některé metody předzpracování snímků a eliminovat vegetaci. Letecká stereoskopie se v ČR uplatňovala na celém území a vznikal tak ucelený výškový model v rámci ZABAGED. Tvorbou lokálních modelů se v ČR zabývají i některé soukromé firmy.



Obr. 2: Princip získávání DMR pomocí laserscanningu.

V posledním období se stále více uplatňuje využívání **laserového měření** povrchu Země známé pod pojmem LIDAR (Light Detection And Ranging). Základem takových měření je aktivní dálkový průzkum. Z měřící jednotky

jsou vyslány laserové paprsky, které se po odrazu vrací. Je zaznamenám čas mezi vysláním paprsku a jeho návratem po odrazu a tímto způsobem je měřena vzdálenost daného dobu od snímače. Obvykle se využívá spektra 1 064 – 1 540 nm (Florintski, 2012). Oproti stereoskopickým snímkům má využití laseru několik výhod. Snímání může být prováděno i za podmínek, kdy to neumožňují pasivní metody DPZ – např. při oblačnosti. Měření dosahuje často vyšší přesnosti. Laserové skenování může být prováděno ze země (pozemní *laserscanning*), z letedla nebo družic. Vzniklý datový model je primárně bodové pole. Velmi často je ale toto bodové pole převedeno do podoby rastru a v této podobě je distribuováno koncovým uživatelům.

4.3. Vybrané významné zdroje DMR pro území ČR

DMR lze rozlišovat, jak bylo uvedeno výše, podle způsobu jejich získávání, ale také podle dostupnosti těchto dat. Pro území České republiky existují jednak datové modely vznikající přímo pro území ČR, modely které mohou být pořízeny na objednávku pro jednotlivá území, ale naopak i modely vznikající jako globální produkty (tab. 1).

4.3.1. Světové modely DMR

Aster GDEM

První verze výškového modelu Aster GDEM byla zveřejněna v roce 2009. Základem modelu jsou stereoskopické satelitní snímky ze satelitu Aster neseném na družici Terra. Model byl vytvořen pro oblast mezi 83° severní šířky a 83° jižní šířky. Pokrývá tak 99 % souše. Poslední aktualizovaná verze je vylepšena o využití dalších 250 000 stereosnímků, což vedlo k omezení chyb modelu. Model je produkován v rozlišení 30 metrů a je poskytován v dílcích 1 x 1 stupeň. Přestože došlo ke zpřesnění modelu, stále je zde problém artefaktů a nepřesností v modelu (Fleming et al., 2010). Je třeba si uvědomit, že tento model je výškovým modelem a je tedy ovlivněn i přítomnou vegetací a budovami.

SRTM

SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) DEM představuje jedinečný produkt z oblasti digitálních modelů terénu, který byl vytvořen v rámci amerického projektu vedeného organizacemi NASA a NGA s přispěním německé a italské kosmické agentury. V průběhu 11 dní roku 2000 bylo nasnímáno prakticky území celého světa. (více jak 90 % bylo nasnímáno dvakrát a téměř 50 % území třikrát). Dostupný je pro území mezi 56°j.š. a 60°s.š. (pokrývá 80 % pevninského území celého světa) v prostorovém rozlišení 3" (přibližně 90 m na rovníku). Následným zpracováním vznikl dosud nevídaný produkt – celosvětový digitální model terénu s vysokým prostorovým rozlišením a výškovou přesností (GISAT, 2014). V roce 2014 došlo k uvolnění celosvětové verze v rozlišení 1", které odpovídá 30 metrům (NASA, 2014). SRTM DEM je distribuován po čtvercích o velikosti 1°z.d. x 1°z.š. SRTM3 je k dispozici ve dvou podobách, které se liší metodou převzorkování z původních podrobnějších dat (subsampling nebo průměrování). SRTM DEM je k dispozici zdarma (FTP přístup).

4.3.2. Národní datové modely

DMR-1

Rastrový model s rozlišením 1 x 1 km, výšková přesnost není oficiálně stanovena. Odhad je přibližně 15-30 metrů v závislosti na členitosti terénu. Odvozen je z vrstevnic topografické mapy 1 : 200 000.

DMR-2

DMR-2 obsahuje nadmořské výšky ve stometrové síti systému S-42. výškopisná data jsou ve formě pravidelně rozložených bodů v síti 100 x 100 metrů. Udávaná chyba v určení výšky bodu je závislá na členitosti terénu a pohybuje se v rozmezí mezi 3 a 15 metry. Pokrývá celé území České republiky, Slovenské republiky a dále i pruh za státní hranicí o průměrné šířce 50 kilometrů.

ArcČR© 500

Digitální vektorová geografická databáze České republiky ArcČR® 500 je vytvořena v podrobnosti měřítka 1 : 500 000. Jejím obsahem jsou přehledné geografické

informace o České republice. Data vznikla ve spolupráci ARCDATA PRAHA, s.r.o., Zeměměřického úřadu a Českého statistického úřadu. Výškopis je zachycen v podobě vrstevnic. Pro tvorbu rastrové podoby DMR je možné využít i topografická data (vodní plochy a toky a výškové kóty). Data jsou poskytována zdarma.

ZABAGED

ZABAGED je digitální topografický model území ČR odvozený z mapového obrazu Základní mapy České republiky 1 : 10 000. Proces tvorby ZABAGED započal v roce 1995 vektorizací tiskových podkladů ZM 10. Od roku 2001 probíhá první celoplošná aktualizace s využitím fotogrammetrických metod i terénního šetření. Výškopisnou část ZABAGED® tvoří 3 typy objektů vrstevnic se základním intervalem 5, 2, nebo 1 m v závislosti na charakteru terénu. Vrstevnice jsou dále doplněny dalšími vybranými výškopisnými prvky – klasifikovanými hranami a body, které byly vyhodnoceny stereofotogrammetrickou metodou při zpřesňování vrstevnicového výškopisu. Nevýhodou je, že digitalizovány jsou vrstevnice bez makroreliéfu (tj. vrstevnice jsou přerušované). Formát dat je DGN, ale lze ho získat i v podobě SHP. V současné době nabízí ČÚZK výškopisnou část ZABAGED® v podobě pravidelné mříže (10 x 10 m) (ČÚZK, 2014).

DMR 4. generace

Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G) představuje zobrazení zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v pravidelné síti (5 x 5 m). Vertikální přesnost s úplnou střední chybou výšky je 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu. Model vznikl z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování výškopisu území České republiky v letech 2009 až 2013. DMR 4G je určen k analýzám terénních poměrů regionálního charakteru a rozsahu, např. při projektování rozsáhlých dopravních a vodohospodářských záměrů, modelování přírodních jevů, apod. DMR 4G je Zeměměřickým úřadem od roku 2013 průběžně aktualizován v návaznosti na aktualizaci a verifikaci dat Základní báze geografických dat České republiky, a to

metodami digitální stereofotogrammetrie a na vybraných územích i metodou leteckého laserového skenování (ČÚZK, 2014).

DMR 5. generace

Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) představuje zobrazení zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Model vznikl stejným způsobem jako DMR 4. generace. DMR 5G je určen k analýzám terénních poměrů lokálního charakteru a rozsahu, např. při projektování pozemkových úprav, plánování a projektování dopravních, vodohospodářských a pozemních staveb nebo modelování přírodních jevů lokálního charakteru. DMR 5G je základní zdrojovou databází pro tvorbu vrstevnic určených pro mapy velkých měřítek a počítačové vizualizace výškopisu v územně orientovaných informačních systémech vysoké úrovně podrobnosti. DMR 5G má být vytvořen z celého území České republiky do konce roku 2015 (ČÚZK, 2014).

Tab. 1: Přehled dostupných DMR na území ČR.

Název	vznik	nosič	formát	rozlišení (m)	Přesnost (m)	dostupnost	rozsah	Cena (Kč/km^2)
GDEM	laser	Aster	rastr	30	20	volný	globál.	0
SRTM	laser	SRTM	rastr	90	20	volný	globál.	0
DMR-1	vrstevnice	mapa	rastr	1000	15-30	placený	ČR	?
DMR-2	vrstevnice	mapa	rastr	100	3-15	placený	ČR	?
ArcČR500	vrstevnice	mapa	vektor	1:500000	-	volný	ČR	0
ZABAGED	vrstevnice	mapa	vektor	1:10 000	-	placený	ČR	13
ZABAGED	stereogr.	letecký	rastr	10	-	placený	ČR	13
DMR 4G	LIDAR	letecký	rastr	5	0,3-1	placený	ČR	25-100[1]
DMR 5G	LIDAR	letecký	TIN	-	0,2-0,3	placený	ČR	31-124[1]
lokální	LIDAR	letecký	rastr	1	0,1	placený	lokální	100 000[2]
lokální	stereogr.	letecký	rastr	1	0,1	placený	lokální	100 000[2]
lokální	LIDAR	pozemní	rastr	1	0,05	placený	lokální	700 000[2]

[1])podle množství dat, [2]) hrubý odhad, cena výrazně kolísá s ohledem na velikost plochy v rámci jedné zakázky

4.3.3. Lokální modely DMR

Tvorbou DMR pro specifické účely a vymezená menší území je v ČR zabývá několik komerčních firem. Ty zajišťují pořízení DMR různými metodami, obvykle na základě stereoskopických snímků, nebo *laserscanningu*. *Laserscanning* je pořizován buď pozemní metodou, nebo letecky. Výhodou těchto modelů je možnost nasnímání pozemku v období bez vegetace, nebo v okamžiku agrotechnické úpravy pozemku s nízkou variabilitou jeho povrchu. Tyto modely jsou obvykle pořizovány z důvodu velmi přesného zachycení tvaru povrchu půdy, kde se již výrazně projevují např. jednotlivé brázdy, nebo řádky plodin. Nevýhodou těchto modelů je jejich vysoká cena daná individuálním plánováním přeletů letadla. Vysoká cena na plošnou jednotku je i u pozemního skenovaní, z důvodu časové, materiální a personální náročnosti.

4.4. Analýza DMR

Analýza DMR je v současné době prováděna prakticky pouze v rastrové podobě pomocí několika typů funkcí: matematická algebra, fokální funkce, analýza sítí.

Z DMR jsou vypočítávány vlastnosti reliéfu, které ho charakterizují. Tyto vlastnosti lze rozdělit na základní (primární) a odvozené (sekundární). Výpočet těchto vlastností (např. sklonu svahu) je založen na fokálních funkcích, které zahrnují sousední pixely. Jde o matici 3 x 3 pixely. V některých případech mohou být takové vlastnosti počítány i z větší matice. Další skupinou metod používaných pro výpočet vlastností reliéfu jsou hydrologické analýzy, které zahrnují spojitost buněk rastru s ohledem na pohyb vody.

4.4.1. Primární vlastnosti DMR

Sklon (*Slope*) je ukazatelem toho, jak se mění výška reliéfu ve směru jeho největšího spádu. Sklon je prostředkem, kterým gravitace řídí pohyb vody a jiných materiálů. Je tak jednou z nejvýznamnějších vlastností reliéfu ovlivňujících hydrologii a geomorfologii.

Expozice (*Aspect*) charakterizuje orientaci svahu ke světovým stranám. Jedná se o orientaci svahu podle jeho největšího spádu a je obvykle měřen od severu ve směru hodinových ručiček. Orientace svahů má především význam pro určování

množství dopadajícího slunečního záření. Je také využíván pro vizualizaci reliéfu. Význam orientace svahu je větší v oblastech s větší svažitostí, v rovinných oblastech jeho význam upadá.

Zakřivení (*Curvature*) svahu je derivací sklonitosti. Podle směru (roviny), pro který je tvar svahu počítán, se zakřivení svahů dělí na horizontální (vrstevnicové) a vertikální (příčné). Horizontální zakřivení (*Horizontal Curvature*) se určuje jako velikost změny expozice podél horizontální roviny (vrstevnice). Je měřítkem sbíhání (konvergence) nebo naopak rozbíhání svahů (divergence) a určuje tak směr a sbíhání toku vody v krajině. V případě rovinatého reliéfu je lepší stanovit tzv. tangenciální horizontální zakřivení (vypočítá se jako horizontální zakřivení vydělené sinem úhlu sklonitosti). Vertikální zakřivení (*Vertical Curvature*) se počítá jako velikost změny sklonu svahu podél vertikální roviny. Příčné zakřivení má vliv na změnu rychlosti proudění a sedimentačních procesů. Kombinací obou zmiňovaných zakřivení je možné získat tzv. celkové zakřivení, které nevyjadřuje zakřivení snahu k vertikální nebo horizontální rovině, ale vyjadřuje zakřivení samotného povrchu (Wilson a Gallant, 2000).

Sběrná plocha (*Catchment Area*) je plocha nad daným pixelem, ze které směřuje tok přes tento pixel. Konkrétní výpočetní metody se liší a tyto odlišnosti jsou dány jejich vývojem a jinými výpočetními přístupy, které se snaží odstranit problémy, jako je např. paralelní uspořádání toku vody.

4.4.2. Sekundární vlastnosti reliéfu

Topografický index (TI), v anglické literatuře nazývaný jako *topographic index, topographic wetness index, wetness index, compound topographic index* je nejrozšířenější sekundární vlastností používanou pro modelování vztahu reliéfu a půdních vlastností. TI se vyjadřuje jako:

$$TI = \ln\left(\frac{A_c}{\tan\beta}\right) \tag{3}$$

kde A_c je sběrná plocha (*contributing area*) a β je svažitost (McKenzie a Ryan, 1999).

LS-factor je kombinací délky svahu a jeho sklonu. Často je používá pro modelování eroze a je součástí známého erozního modelu USLE.
Vertical distance to Channel network udává relativní polohu nad pomyslným tokem, lépe řečeno odtokovými liniemi. Pomocí tohoto indexu je například možné rozlišit plochá údolí řek od náhorních plošin.
Convergence index je vlastnost reliéfu popisující směr odtoku vody. Rozděluje reliéf na místa s koncentrováním vícesměrným nebo paralelním odtokem. Hodnota 100 ukazuje na bezodtokový bod v krajině.
Topographic Positioning Index je index určující polohu daného bodu v rámci svahu, tedy jeho relativní pozici mezi vrcholem svahu a údolnicí. Udává potenciál možného převlhčení v různých částech reliéfu. Často se používá pro klasifikaci reliéfu do geomorfologických jednotek.

4.4.3. Software pro práci s DMR

Práci s DMR umožňují různé GIS programy. Různé softwary se zaměřují na rastrové zpracování dat různou měrou. Odlišnost jednotlivých programů je v uživatelské přívětivosti, ale také v typu algoritmů používaných pro výpočet některých vlastností reliéfu. Dalším důležitým aspektem je jejich cenová dostupnost: zde se rozlišují komeršní (placené) a OpenSource (volně dostupné) programy.

ARCGIS

Celosvětově nejrozšířenějším programem je ArcMAP od firmy Esri. Pro práci s rastry je třeba používat nadstavbu Spatial analyst, pro 3D vizualizaci i nadstavbu 3D analyst. Jedná se o komerční software. Je uživatelsky příjemný po zpracování vektorových i rastrových dat. Stejně tak je vhodný pro tvorbu mapových výstupů.

SAGA GIS

Volně dostupný software velice vhodný pro zpracování rastrových dat. Výhodou tohoto softwaru je, že se specializuje přímo na analýzu DMR. Má v sobě mnohé funkce důležité pro předzpracování dat DMR, tak i následný výpočet velké škály vlastností reliéfu, jak lokálních tak hydrologických. Algoritmy jsou založeny na vědeckých pracích a jsou začleňovány do projektu. Nevýhodou softwaru je

omezený popis jednotlivých metod a je tedy třeba popis dohledávat v odkazech na dané publikace.

GRASS

Jde o OpenSource program mimo jiné pro operační systém Linux. Je volně dostupný. Pro práci se používá především příkazového řádku, i když existuje i grafické rozhraní. Tím je program vhodný především pro pokročilé uživatele. Je vhodný pro rastrová, tak i vektorová data. V současné době se také program zaměřuje na zpracování 3D dat.

ILWIS

Software je volně dostupný. Specializuje se na zpracování DMR a leteckých snímků, částečně i vektorových dat. Vznikl v akademickém prostředí a byl určený především pro studenty. V současné době zahrnuje celou řadu funkcionalit. Jde o méně rozšířený program.

QUANTUM GIS

Volně dostupný software. QGIS umožňuje zejména prohlížení, tvorbu a editaci rastrových a vektorových geodat, zpracování GPS dat a tvorbu mapových výstupů. Funkčnost rozšiřují zásuvné moduly, z pohledu analýz geografických dat je významný modul zpřístupňující funkce GRASS GIS – QGIS tak může sloužit jako jeho nadstavba.

4.4.4. Zpracování DMR

Zpracování DMR vždy vyžaduje několik návazných kroků, aby bylo možné vlastnosti DMR využít pro požadovanou analýzu. Prvním krokem je předzpracování DMR. Tento postup může zahrnovat různé kroky s ohledem na typ dostupných dat, jejich rozlišení a jejich zdroj. U vektorových dat je zaprvé nutný převod do rastrové podoby pomocí interpolace vrstevnic, popř. dalších údajů spojených s výškopisem, jako jsou výškové body nebo toky a vodní plochy (fce TopoToRaster v programu ArcMap). Jiným příkladem může být interpolace bodového pole (např. model DMR 5. gen.).

Dalším standardním krokem v pre-processingu DMR je použití všesměrných vyhlazovacích filtrů. Následným krokem je použití funkce, která slouží k vyplnění umělých neodtokových míst v rastru daných nepřesnostmi. To je důležité pro vytvoření hydrologicky správného rastru. Ten je zásadním předpokladem pro správný výpočet hydrologických funkcí jako je TWI a jiné. Základní kroky v zpracování dat jsou uvedeny na obrázku 4.

4.4.5. Určení rozlišení rastru

Každá analýza DMR může být provedena v různém rozlišení rastru, které je definováno velikostí pixelů/buněk daného rastru. Jejich velikost je v případě rastrových dat primárně dána již rozlišením dostupného produktu. Taková data lze převzorkovat do jiného rozlišení. U vrstevnicových a bodových dat je situace odlišná. Již při konverzi na rastrový model je třeba určit jeho rozlišení.

Rozlišení je možné stanovit dvěma přístupy. Jeden je založen na požadovaném rozlišení dané analýzy, která souvisí s měřítkem detailu, jakého chceme dosáhnout. Druhý přístup je založen na zhodnocení kvality vstupních dat. Obě možnosti popisuje ve své práci Hengl (2006). V některých případech je třeba ustoupit z příliš velkého rozlišení i z důvodu výpočetní náročnosti. U vrstevnicových dat je velikost pixelu dána délkou vrstevnic v rámci daného území, u bodových měření je rozlišení dáno hustotou bodů, respektive jejich vzájemnou vzdáleností. Jiným způsobem je určení pixelu na základě požadovaného měřítka mapy, např. pro měřítko mapy 1 : 2 000 je velikost pixelu 1 metr.

Rozlišení (*P*-velikost pixelu) může být odvozeno na základě:

- požadovaného měřítka mapy (MM)

$$P = MM * 0{,}0005 \tag{4}$$

- minimální mapovací jednotky (MMJ)

$$P = \frac{\sqrt{\mathrm{MMJ}}}{4} \tag{5}$$

- hustotou vrstevnic – jde o poměr celkové délky vrstevnic (l) na ploše sledovaného území (a)

$$P = \frac{a}{2*l} \tag{6}$$

- hustotou bodové sítě – množství bodů (s) s měřenou nadmořskou výškou na jednotku plochy (a)

$$P = 0{,}0791 * \sqrt{\frac{s}{a}} \tag{7}$$

5. Vzorkovaní půd

Pro popis variability půdních vlastností je používána celá řada vzorkovacích schémat. Jejich volba je řízena účelem a charakterem území (Vašát et al., 2010).

5.1. Vzorkovací schémata

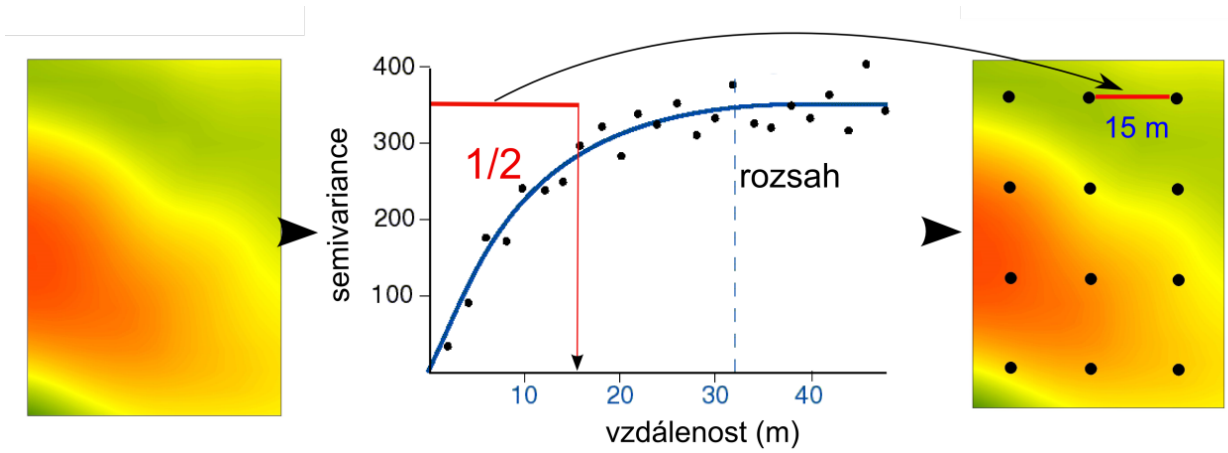
Existuje celá řada vzorkovacích sítí, které se liší uspořádáním odběrových bodů. Jestliže není předpoklad nějakého trendu ve variabilitě sledovaného pozemku a variabilita je náhodná, tak se uplatňují schémata jako je pravidelná síť, náhodná síť nebo *space filling sampling*. Pravidelná síť je uspořádána do čtverců, popřípadě trojúhelníků. V některých případech může takové uspořádání způsobit zachycení nechtěného trendu, kdy jde vzorkování např. ve směru kolejových meziřádků a výrazně tak ovlivňuje popis skutečného stavu pozemku. Z tohoto důvodu jsou používány tzv. nevyrovnané pravidelné sítě, kde je pozemek rozdělený do pravidelné sítě podoblastí a v rámci daných podoblastí jsou vzorky umístěny náhodně. *Space filling sampling* je obdobou pravidelného vzorkování, ale uplatňuje se u pozemků s nepravidelným tvarem. Pozemek je rozdělen na stejně velké plochy, v nichž je určeno místo odběru (těžiště). Náhodné vzorkovací sítě pak reprezentují neuspořádané rozmístění daného počtu bodů náhodně v prostoru sledovaného území (EPA, 2002).

U řady pozemků se setkáváme s předpokladem nevyrovnanosti variability, tedy předpoklad výskytu různých hodnot a trendů v různých částech pozemku. V tomto

případě se používá rozdělení pozemku na vybraná podúzemí a vzorky jsou rozděleny tak, aby byla popsána variabilita v každém z těchto území. Příkladem důvodu rozdělení může být odlišné využití částí v současné době sceleného pozemku, nebo právě velká heterogenita z pohledu vlastností reliéfu. Jestliže mají vlastnosti reliéfu zároveň sloužit jako doprovodná data pro zlepšení prostorové predikce sledovaných půdních vlastností, je potřeba co nejlépe zachytit vzorkovací sítí rozsah vlastností reliéfu. V takovém případě se uplatňují stratifikované vzorkovací sítě (např. *Latin HyperCube sampling*) (Worsham et al., 2012). Pomocí matematických modelů je pak možné co nejlépe vystihnout distribuci vzorků dle tvaru histogramu jednotlivých vlastností reliéfu na daném pozemku. Dalším přístupem může být klasifikace reliéfu na jednotlivé třídy, u nichž lze potom předpokládat homogenitu půdních vlastností a rozložit příslušný počet vzorků do takových tříd, aby byly ovzorkovány všechny jednotky reliéfu.

5.2. Hustota vzorkovací sítě

Množství vzorkovacích bodů na sledovaném pozemku je možné určit dvěma způsoby. Prvním z nich je analýza variability pomocných vlastností pozemku. Pro tento účel lze využít dat DMR, ale případně i leteckých, či družicových snímků. Jejich variabilita se popíše pomocí variogramu. Hodnota rozsahu variogramu je určujícím ukazatele vzdálenosti na kterou existuje na území prostorová závislost. Rozsah variogramu je určující pro velikost rozestupu vzorkovacích míst. Rozestup se vypočítá jako polovina rozsahu semivariance (obr. 3) (Oliver, 2010).



Obr. 3: Určení vzdálenosti bodů ve vzorkovací síti pomocí analýzy variability pomocných dat.

Druhým přístupem je použít obecně danou hustotu vzorkování, která odpovídá měřítku mapy a účelu mapování. Sledování vlastností v rámci pozemku je často spjato s precizním hospodařením a je tedy potřeba zachytit detailní informaci lokalitě. V literatuře se pro tento případ vyskytují různé číselné údaje. Obvykle se pohybují v rozpětí 0,2 – 4 vzorky/ha.

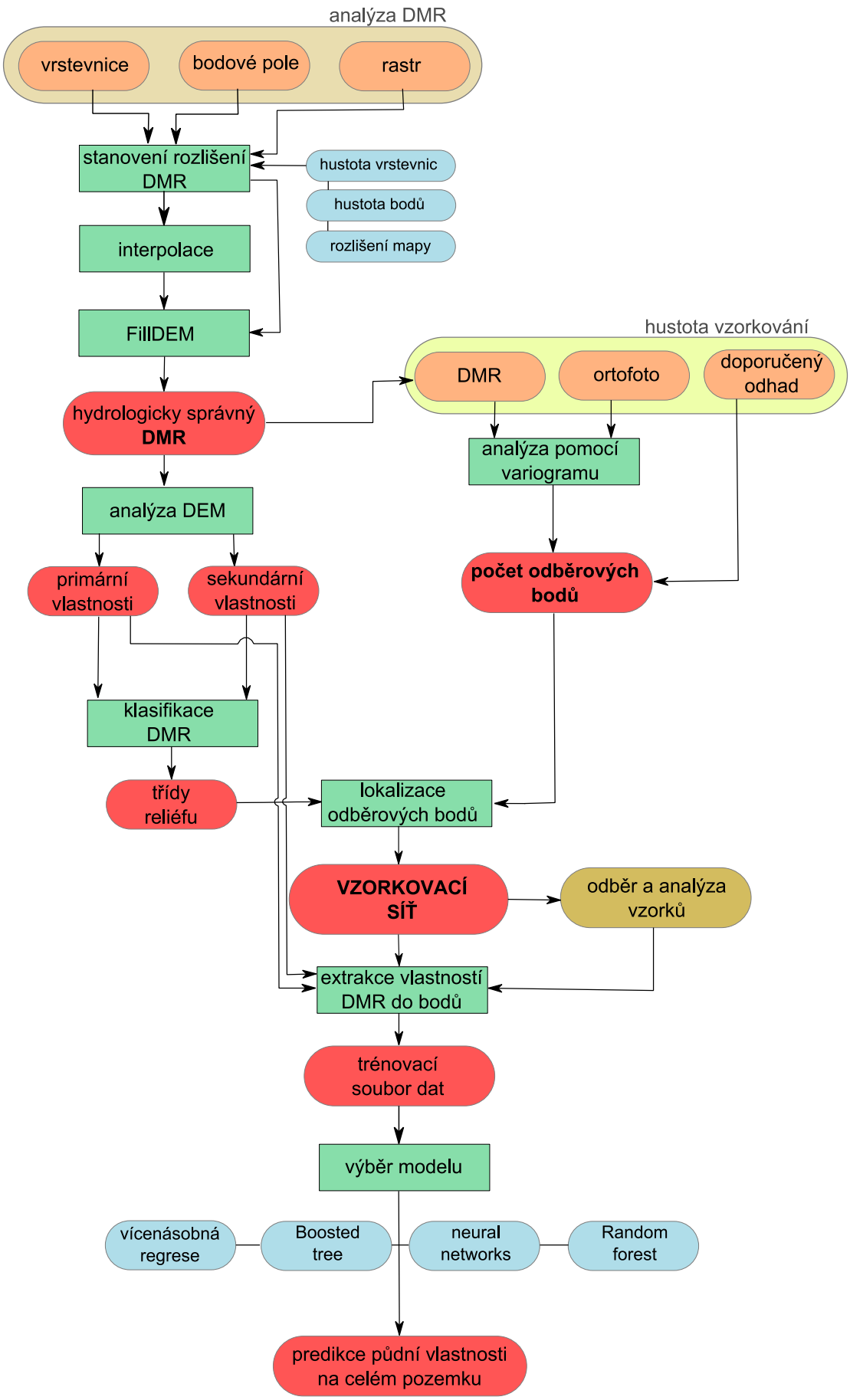
6. Modely pro popis vztahu půdních vlastností a reliéfu

Vytvoření vzorkovacího schématu má za účel co možná nejlepší popis variability pomocných vlastností v rámci pozemku a současně z toho vyplývající zachycení variability půdních vlastností. Půdní vlastnosti jsou určeny na pozemku jen v místě odběrů a je třeba najít matematicky definovaný vztah mezi nimi a doprovodnými vlastnostmi. Tyto matematicky definované vztahy pak slouží pro predikci půdních vlastností na ploše celého území.

Existuje široká škála statistických metod, pomocí nichž je možné takový vztah popsat a použít je k následné predikci půdních vlastností. Volba jednotlivých metod vychází z mnoha faktorů a neexistují přesně definované podmínky, kterou z metod využít. Obvykle se volí postup použití a porovnání více metod, je-li to možné. Významným faktorem výběru některé z metod je i charakter dat (např. normalita dat, kterou vyžadují lineární modely, a to nejen dat vstupních (půdních) ale i dat pomocných (vlastnosti DMR). Kromě často používané metody vícenásobné regrese se v poslední době často používají pokročilé metody spadající do kategorie *machine learning*. Hojně se využívají metody neuronových sítí (*atifitial neural network*), *booster trees*, náhodný les (*random forest*) nebo *suport vector machine*. Neuronové sítě jsou založeny na principu „neuronů“, do kterých vstupuje velké množství vstupů, ale má jen jeden výstup. Jednotlivé „neurony“ se spojují do složitějších struktur, které se přizpůsobují konkrétním vstupním datům. Náhodný les (*random forest*) je kombinovaná učící metoda jak pro klasifikaci tak i regresi. V rámci této metody jsou vytvářeny sady rozhodovacích stromů při učení a následně je použit modus (nejčastější hodnota) tříd vrácených jednotlivými stromy. Výhodou výše zmiňovaných metod je, že se jedná o neparametrické metody. Není tu tudíž kladen požadavek na normalitu rozdělení dat, který často nastává. Nevýhodou těchto metod může být jejich nižší robustnost.

V současné době nabízejí statistické programy celou škálu jak parametrických, tak neparametrických metod a závisí na uživateli, který z postupů zvolí. Volba metody pro predikci půdních vlastností se může opírat o několik ukazatelů, které lze použít k vyhodnocení úspěšnosti modelu. Volba metody je v ideálním případě založena na validaci výsledné predikční mapy. Z hlediska využití dat pro validaci ji lze rozdělit na tzv. cross-validaci a validaci založenou na nezávislém souboru dat. Cross-validace spočívá ve využití vždy jednoho (nebo menší podskupiny) bodu navržené odběrové sítě pro validaci, a jeho odnětí pro účel predikce. Tento postup se děje opakovaně a výsledek je počítán jako průměr chyb. Druhý přístup je založený na využití trénovacího souboru dat a nezávislého validačního souboru dat. Jde o přístup, který je z hlediska validace koncepčně lepší, ale jeho zřejmou nevýhodou je nutnost použití dalšího vzorkování pro vytvoření nezávislé sítě, nebo potřeba odběru většího množství vzorků na daném území, aby mohlo dojít k rozdělení odběrové sítě na trénovací a validační část.

Celý metodický postup, který zahrnuje jednotlivé kroky nutné pro vytvoření stratifikované sítě na základě analýzy reliéfu je zachycen jako schéma na obr. 4.



Obr. 4: Schéma jednotlivých kroků tvorby stratifikované vzorkovací sítě.

7. Aplikace

Metodika optimalizace vzorkovací sítě a její podrobný návrh se opírá o studii predikce hloubky půdy na geomorfologicky členitém pozemku. V rámci této studie byla provedena analýza využití různých vzorkovacích schéma s ohledem na uspořádání sítě a počtu odběrových bodů. V první fázi bylo provedeno porovnání náhodné, pravidelné a stratifikované sítě o stejném počtu odběrových míst. Druhá část studie srovnává pravidelnou a stratifikovanou odběrovou síť při různém počtu odběrových bodů a jejich úspěšnost v následné predikci hloubky půdy pro daný pozemek. Popis studie je koncipován tak, aby mohl běžný uživatel použít jednotlivých kroků a volil správné postupy při aplikaci na svá data a sledované území.

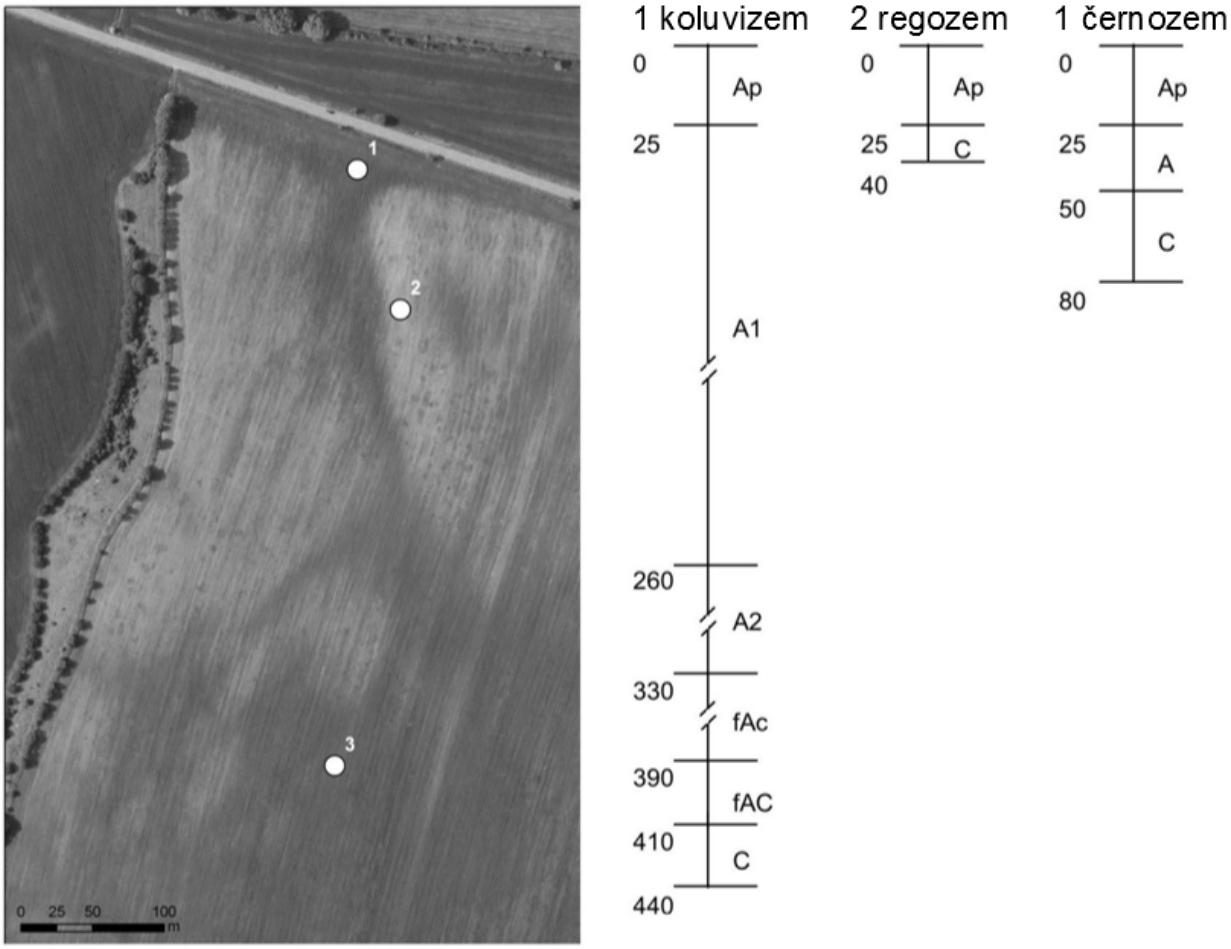
7.1. Popis území

Studie byla provedena na geomorfologicky členitém pozemku o velikosti 6 ha. Pozemek je geomorfologicky rozdělen na mírně ukloněnou náhorní plošinu v jižní části pozemku, která pokračuje bočním svahem do ploché části vytvořené na rozhraní úpatí svahu a nivy v severní části pozemku. Ve střední části je tento celý komplex protnutý průlehem-suchým bočním údolím. Celý pozemek je dlouhodobě zemědělsky obdělávaný. Jedná se o ornou půdu.

Z půdního hlediska je pozemek tvořen mozaikou několika půd, která je podmíněna především redistribucí materiálu v důsledku eroze. Hlavním důsledkem odnosu a akumulace půdní masy je velmi odlišná hloubka humusového horizontu. V jižní části se na plošině nacházejí původní nedegradované černozemě modální, s přibývající svažitostí přecházejí do černozemí degradovaných (smytých). V nejvíce exponovaných částech svahu, kde je degradace půdního profilu nejintenzivnější, se vyskytují regozemě. Jde prakticky jen o proorávanou spraš. V konkávních částech území – průlehu a úpatní části, kde se snižuje unášecí schopnost vody, dochází k sedimentaci půdního materiálu a tvoří se zde koluvizemě, které tvoří různě mocný na humus bohatý půdní sediment (obr. 5). Jeho hloubka kolísá mezi 60 cm a 4 metry. Na území byl proveden půdní průzkum sondážní tyčí. Ve vzorkovacích sítích byla popsána hloubka humusového horizontu.

S ohledem na ostatní půdotvorné činitele je území homogenní. Podloží tvoří sprašové nánosy, vzhledem k velikosti pozemku je uvažováno i stejné klima. Využití pozemku je v posledních několika desetiletých také homogenní.

Díky této kombinaci heterogenity geomorfologických podmínek a homogenity ostatních půdotvorných faktorů je tento pozemek ideální pro využití dat DMR jako doprovodných dat pro určení odběrové sítě a následné predikce půdních vlastností na základě DMR.



Obr. 5: Letecký snímek zájmového území se schématem tří typických půdních představitelů dané lokality. Převzato a upraveno od Zádorová et al. (2011).

7.2. Dostupné DMR a volba rozlišení DMR

Volba vhodného DMR byla podmíněna požadovaným detailem výsledného produktu, která byla uvažována v měřítku 1 : 1 000 – 1 : 2 000. S ohledem na toto měřítko je dle výpočtu optimální velikost pixelu 1 metr.

Pro sledované území bylo dostupných několik DMR:

- SRTM, GDEM – globální produkty o rozlišení pixelu 90, respektive 30 metrů – s ohledem na požadovanou studii jsou tedy nevhodné
- ZABAGED – vrstevnicový model pro ČR. Podle hustoty vrstevnic je tento model vhodný pro interpolaci o velikosti pixelu cca 10 metrů a pro účely studie je tedy nevhodný
- Rastrový DMR – letecký LIDAR o daném rozlišení pixelu 1 metr – vhodný díky svému rozlišení
- Rastrový DMR – pozemní LIDAR o daném rozlišení pixelu 1 metr – teoreticky vhodný díky svému rozlišení, ale cenově náročný

Zpracování DMR

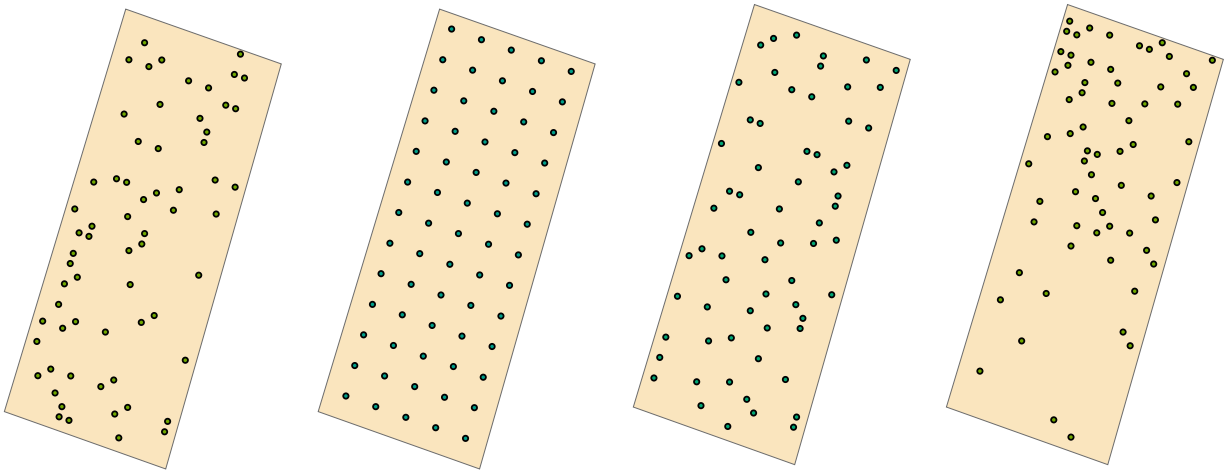
DMR byl zpracován v programu SAGA GIS. Prvním krokem bylo použití všesměrného filtru pro vyhlazení extrémů a následně byl vytvořen hydrologicky korektní DMR pomocí funkce *Fill Sinks* (v kategorii funkcí *Preprocessing*). Takto předzpracovaný model byl následně využit pro výpočet charakteristik reliéfu. Protože byla ve studii sledována hloubka humusového horizontu, která je na daném pozemku podmíněna pohybem vody a půdní masy, byly do analýzy vybrány deriváty DEM z balíku funkcí *Compound Analyses*, které zahrnují celý set základních charakteristik reliéfu. Pro vlastní analýzu bylo použito sedm vlastností: *Slope, Plan Curvature, Profile Curvature, Convergence Index, Wetness index, LS-factor, Vertical Distance To ChanelNetwork*.

7.3. Vzorkovací schémata

7.3.1. Typ vzorkovací sítě

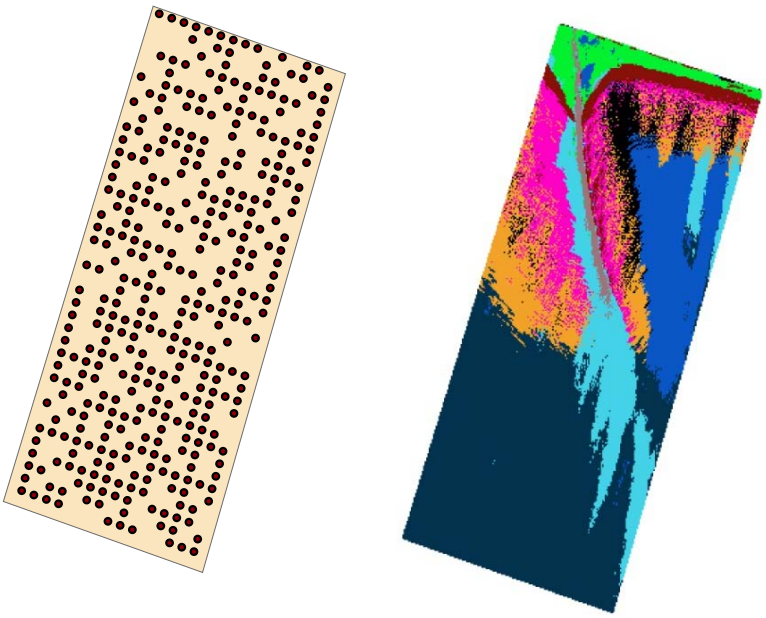
Tato studie přináší porovnání čtyř odběrových schémat lišících se uspořádáním vzorkovací sítě a schémat lišících se množstvím odběrových bodů. V první fázi studie byla volena maximálně hustá vzorkovací síť, počet vzorků byl odvozen z doporučení v literatuře (celkem 65 vzorků). Pro posouzení výhodnosti vzorkovací sítě uspořádané na podkladě analýzy DMR byly použity jako srovnávací sítě: náhodná, pravidelná, nevyrovnaná (obr. 6). Posouzení správnosti predikce hloubky

A horizontu pro celé území pak bylo založeno na použití validačních bodů tvořící nezávislou odběrovou síť.



Obr. 6: Vzorkovací sítě: a) náhodná, b) pravidelná, c) nevyrovnaná, d) stratifikovaná podle analýzy reliéfu.

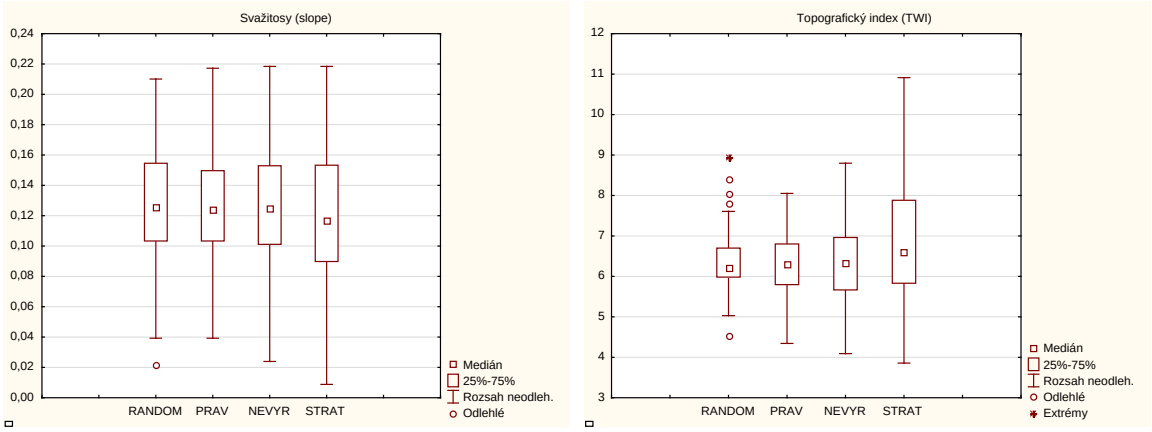
V druhé fázi studie byla sledována úspěšnost predikce hloubky půdy založená na pravidelné odběrové síti a síti vytvořené analýzou DMR s nižším počtem odběrových míst. Původní počet 65 bodů byl snížen na 40, respektive 24 bodů.



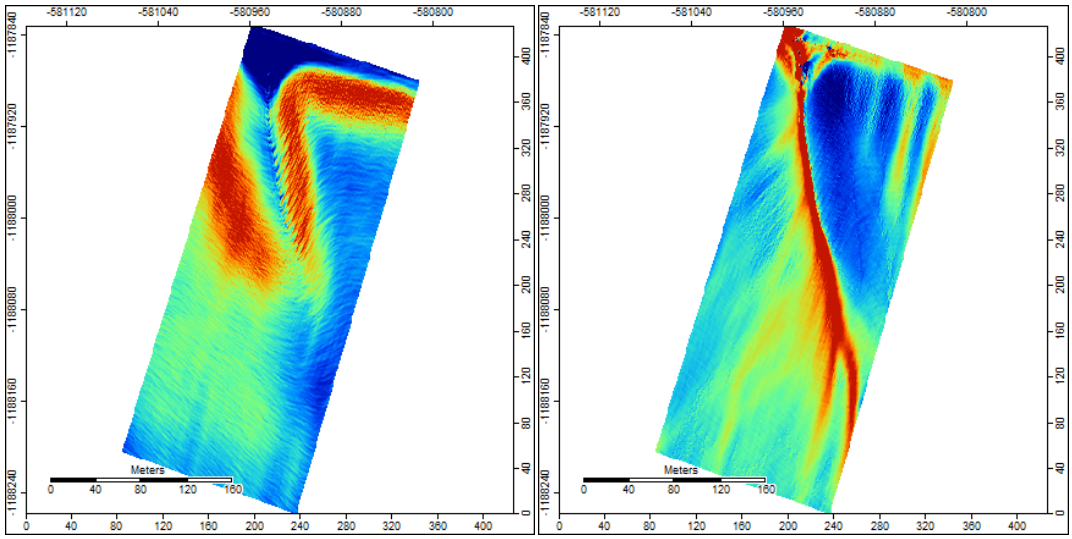
Obr. 7: Nezávislá validační síť (vlevo) a třídy reliéfu na základě neřízené klasifikace DMR (vpravo).

7.3.2. Tvorba stratifikované vzorkovací sítě

Rozmístění odběrových míst bylo provedeno na základě klasifikace reliéfu do deseti tříd. U každé třídy lze předpokládat homogenní vlastnosti reliéfu a tedy i výrazně nižší variabilitu půdních vlastností. V rámci každé třídy pak byl příslušný počet bodů náhodně rozmístěn. Takovýto postup zajistí ovzorkování celého rozsahu vlastností reliéfu a je tak zajištěna predikce sledované půdní vlastnosti. V případě využití pravidelné sítě je možné, že některé části reliéfu zůstanou neovzorkovány a naopak je zbytečně velké množství vzorků v terénně homogenních plochách. Z toho důvodu pak může dojít k snižování rozsahu hodnot vlastností reliéfu a následnému zkreslení predikce půdních vlastností na celém pozemku, protože není zachycen veškerý rozsah hodnot DMR. Vliv může být odlišný u různých vlastností (obr. 9, 10).



Obr. 9. Ukázka postihnutí rozsahu hodnot svažitosti (vlevo) a topografického indexu (vpravo) při použití různých odběrových schémat.



Obr. 10: Prostorové rozložení svažitosti (vlevo) a topografického indexu (vpravo) na sledovaném pozemku.

Obr. 9 ukazuje relativně dobře zachycený rozsah hodnot všemi vzorkovacími schématy u svažitosti, ale u topografického indexu dochází k výraznému zkreslení rozsahu hodnot u náhodné, pravidelné a nevyrovnané sítě oproti síti navržené podle DMR. Je to dáno tím, že vysoké hodnoty TWI jsou vázány na dno průlehu a spodní část území a tvoří užší pás, který vzorkovací síť, není-li tomu uzpůsobena, nedokáže zachytit. Klasifikace reliéfu byla provedena jako neřízená klasifikace na základě sedmi výše popsaných vlastností reliéfu. Na vytvořené stratifikované síti je dobře patrné, že oblast s intenzivním reliéfem nacházející se v severní části pozemku je výrazně více ovzorkovaná, než půdně homogenní jen mírně sklonitá část vyplňující jižní polovinu území.

Vytvořená vzorkovací síť (obr. 6d) byla společně s ostatními vzorkovacími sítěmi použita pro predikci hloubky půdy na celém sledovaném pozemku. Predikce hloubky humusového horizontu byla zpracována v programu Statistica 12. Pro predikci byla použita jednotně metoda umělých neuronových sítí, která byla programem vyhodnocena jako nejúspěšnější v porovnání s dalšími neparametrickými metodami. Prostorová predikce byla vytvořena jako rastr o rozlišení 1 metr. Vlastní vyhodnocení úspěšnosti modelu bylo provedeno na základě porovnání naměřených a predikovaných hodnot ve validační síti pomocí hodnoty RMSE (*root mean square error*). Výsledek ukazuje, že u sítí existují výrazné rozdíly (tab. 2). Náhodná síť vykazovala nejhorší hodnoty, lepšího výsledku dosáhla pravidelná a nevyrovnaně pravidelná síť a vůbec nejlepší předpovědi bylo dosaženo pomocí stratifikované sítě. V případě stratifikované sítě dochází ke snížení RMSE o více než polovinu (57%). Tento výsledek navazuje na zmiňovaný předpoklad, že ne u všech sítí dochází k dostatečnému zachycení celého rozsahu vlastností DMR a následný predikční model je tímto nedostatkem negativně ovlivněn.

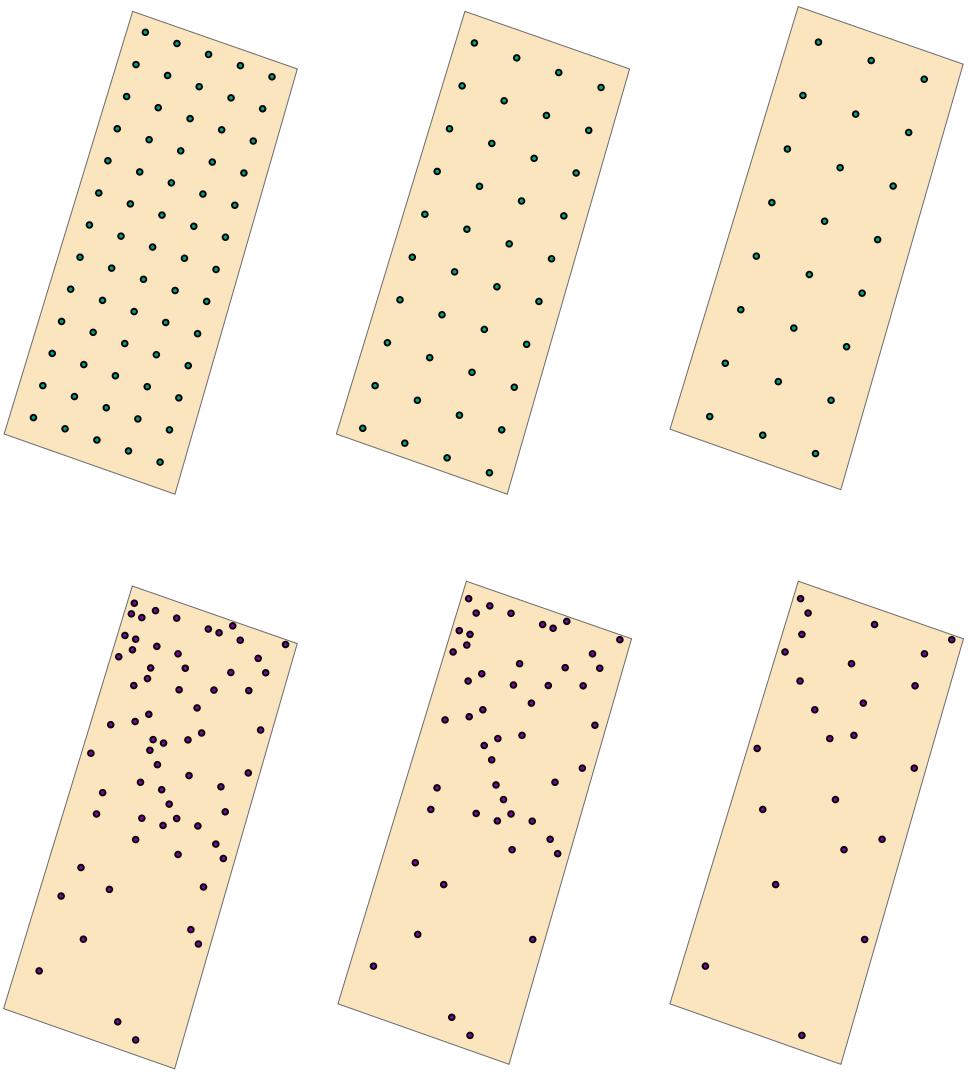
Tab. 2: Velikost chyby predikce hloubky půdy (v cm) na základě použití odlišných vzorkovacích schémat.

síť	RMSE	RMSErel.
RANDOM	17,7	1,00
PRAV	10,8	0,72
NEVYR	11,2	0,69
STRAT	**7,5**	**0,43**

RANDOM- náhodná, PRAV-pravidelná, NEVYR-nevyrovnaná pravidelná, STRAT-stratifikovaná dle DMR

7.3.3. Hustota vzorkovací sítě

V další fázi byl zkoumán vliv typu vzorkovací sítě a snižujícího se počtu odběrových bodů na kvalitu predikce půdních vlastností na pozemku. Pro tuto studii byla vytvořena stratifikovaná vzorkovací síť totožným postupem jako v předcházející části studie. Vzorkovací síť byla testována pro počet odběrových bodů: 65, 40 a 24. Dolní limit počtu bodů (24) byl zvolen na základě analýzy rozsahu variogramu pro svažitost sledovaného pozemku. Pro porovnání byla zvolena pravidelná vzorkovací síť se stejným počtem bodů (obr. 11). Zastoupení počtu bodů bylo rovnoměrné pro každou třídu reliéfu. Jak je z obrázku patrné i zde došlo k nahuštění bodů do severní, geomorfologicky členité, části pozemku.



Obr. 11: Porovnání pravidelné a stratifikované vzorkovací sítě při použití 65, 40 a 24 bodů.

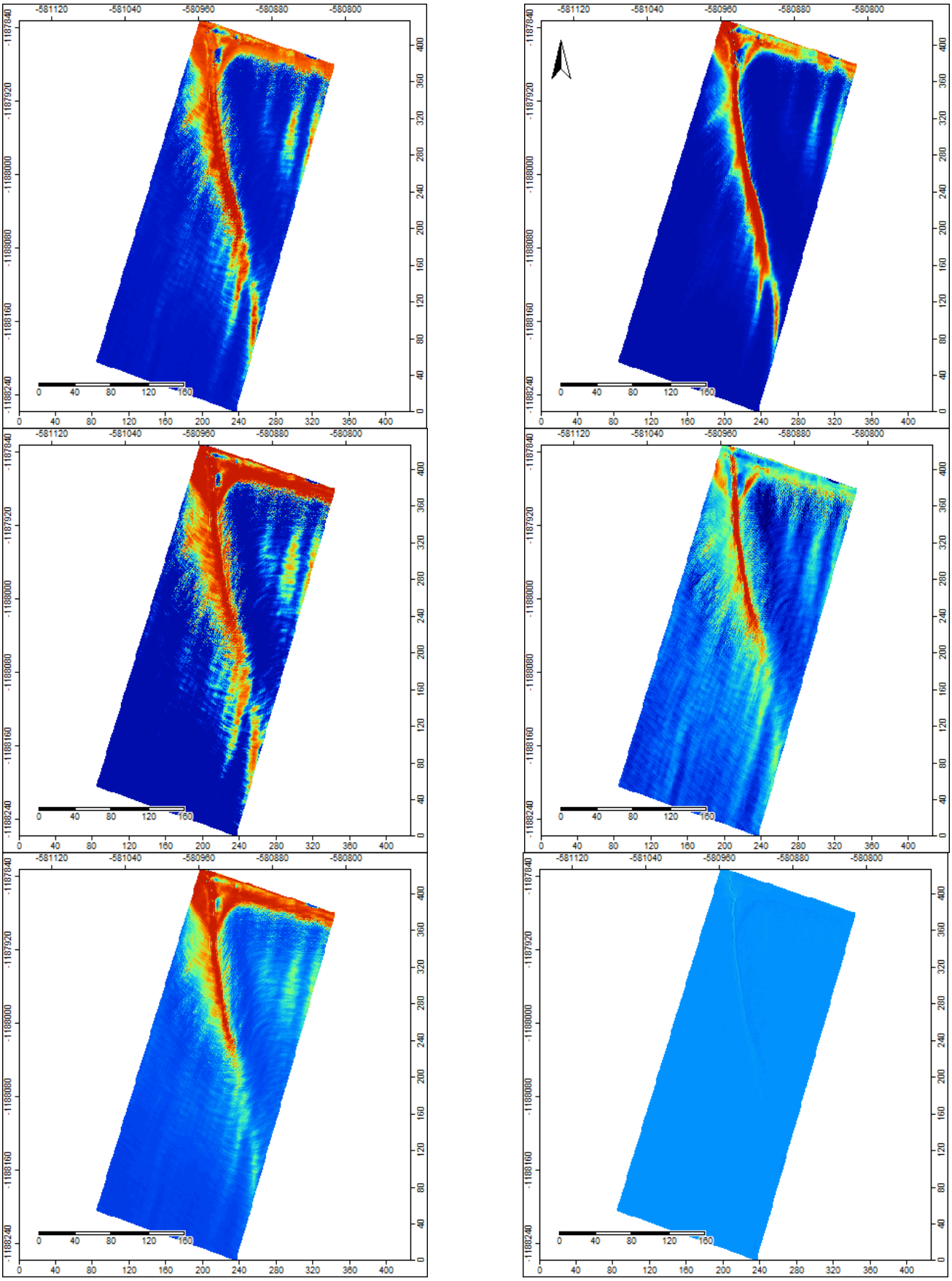
Predikovaná hloubka humusového horizontu pro celý pozemek vykazuje zřetelné odlišnosti při použití různého počtu vzorků (obr. 12). V případě stratifikované sítě dochází k vymezení hlubokých půd v průlehu a nejsevernější části pozemku i při použití malého počtu vzorkovacích bodů, i když je z mapy zřetelné, že výsledná hloubka je při použití různého počtu bodů odlišná. V případě pravidelné sítě je vymezení hloubky silně závislé na počtu vstupních bodů. Pravidelná síť s 65 body dokáže postihnout variabilitu hloubky půdy dobře, ale se snížením počtu vzorků na 40 je celková předpověď výrazně ovlivněna, což je dáno nedostatečným počtem vzorků v heterogenní části území. Tento fakt se ještě výrazněji projevuje v případě pravidelné sítě s 24 body, kdy je DMR nedostatečně ovzorkován do takové míry, že predikční model zcela selhává. Hodnocení úspěšnosti predikce hloubky půdy pro sledovaný pozemek je uveden v tabulce 3. V případě obou typů vzorkovacích sítí RMSE narůstá se snižujícím se počtem vzorkovacích bodů. U stratifikované sítě je trend nárůstu pomalejší než u pravidelné sítě.

Tab. 3: Velikost chyby predikce hloubky půdy na základě použití odlišných vzorkovacích schémat.

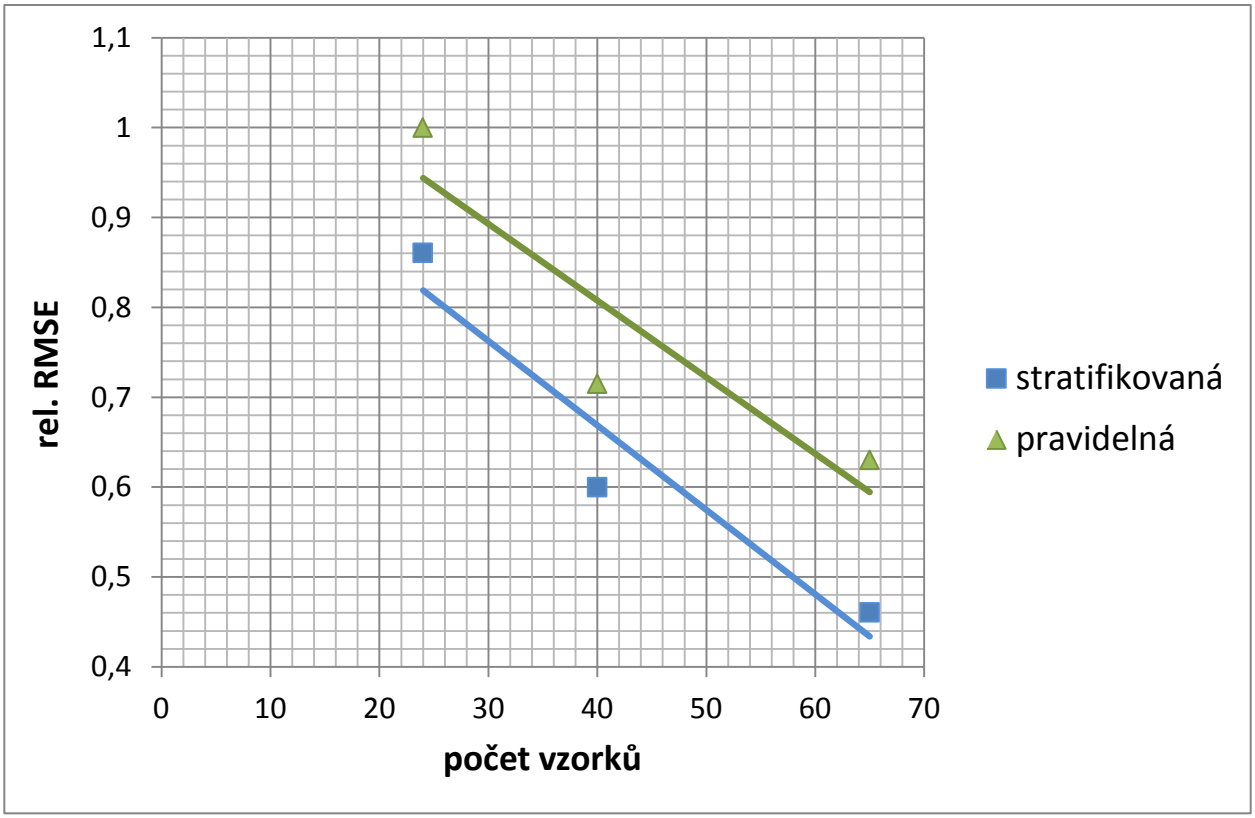
	RMSE		RMSErel	
počet bodů/síť	PRAV	**STRAT**	PRAV	**STRAT**
65	10,8	**7,5**	0,63	**0,46**
40	11,8	**9,8**	0,72	**0,60**
24	16,5	**14,1**	1,00	**0,86**

PRAV-pravidelná, STRAT-stratifikovaná dle DMR

Grafické znázornění vztahu RMSE a počtu vzorků (obr. 13) pro obě sítě ukazuje, že pro udržení stejné hladiny RMSE je zapotřebí menšího počtu vzorků u stratifikované sítě. No toto je možné nahlížet dvěma způsoby. Jednak lze využít stratifikovaného vzorkování pro zpřesnění predikce půdních vlastností při použití této metody a zachování počtu vzorkovacích bodů. Druhou možností je, že je akceptována určitá hladina chyby (RMSE) a v tomto případě je oproti pravidelné vzorkovací síti možné snížit počet vzorkovacích míst. Např. pravidelnou síť s počtem 65 vzorků je možné nahradit stratifikovanou sítí s počtem cca 40 vzorků, při zachování stejné úspěšnosti predikce.



Obr. 12: Predikovaná hloubka humusového horizontu na základě stratifikované (vlevo) a pravidelné sítě (vpravo). Počet vzorkovacích bodů 65 (nahoře), 40 (uprostřed) a 24 (dole).



Obr. 13: Závislost počtu bodů vzorkovací sítě a RMSE u predikované hloubky pro obě vzorkovací sítě.

7.4. Shrnutí

Studie popisuje postup využití modelu reliéfu a jeho analýzu k tvorbě stratifikované vzorkovací sítě. Postupy zahrnují jednotlivé kroky, které jsou uživatelem snadno aplikovatelné s použitím běžně dostupných programů a výpočetní techniky. Stratifikovaná vzorkovací síť vykazuje lepší hodnoty následné predikce hloubky půdy než ostatní metody vzorkování. Je to dáno vhodným rozmístěním vzorkovacích bodů, které jsou schopny zachytit celý rozsah vlastností reliéfu, které mají význam pro sledovanou půdní vlastnost a podmiňují její hodnoty.

8. Doplňkové informace

8.1. Přínos metodiky

Výsledek metodiky jasně ukazuje, že použití metody stratifikace vzorkovací sítě v rámci pozemku pro účely prostorové predikce půdních vlastností může vést k výraznému snížení bodů ve vzorkovací síti, aniž by došlo k poklesu přesnosti predikce půdních vlastností. To může být využito při snižování nákladů, jak finančních tak pracovních při plánování půdního průzkumu, sledování variability půdních vlastností pro potřeby např. precizního zemědělství. Metodika přináší snadno aplikovatelný návod, podle kterého je uživatel schopný postupovat a dělat příslušná rozhodnutí a aplikovat možné metody. Použití této metodiky je možné v široké škále institucí, jak veřejných, tak soukromých, které se zabývají popisem variability půd (půdní průzkum, bonitace půd, sledování obsahu živin, …).

8.2. Srovnání novosti postupů

Metodika přináší unikátní souhrnný pohled na praktickou tvorbu vzorkovací sítě za účelem zefektivnění popisu variability půdních vlastností v podmínkách geomorfologicky členitého a geologicky homogenního pozemku. Metodika přináší ucelený popis postupů a podmínek od analýzy potřebnosti a vhodnosti vstupních dat, jejich zpracování až po tvorbu vlastní vzorkovací sítě a případné možnosti validace jejího použití. Metodika je popsána tak, aby byl její uživatel schopný zhodnotit vhodnost dostupných vstupních dat, navrhl hustotu a uspořádání vzorkovací sítě podle potřeby detailu mapování a velikosti pozemku a samostatně vytvořil vzorkovací síť pro zvolené území.

8.3. Popis uplatňované metodiky

Metodika přináší uživatelsky uchopitelný postup pro plánování vzorkovací sítě na pozemcích s výraznou variabilitou reliéfu. Metodika přináší postup jednotlivých kroků, které je třeba brát v potaz při tvorbě takové sítě. Jedná se o problematiku podmíněnosti variability půdních vlastností v rámci pozemku, dostupnosti, vhodnosti a postupu předzpracování pomocných dat, tedy modelu reliéfu, vlastní aplikaci metod a zhodnocení vhodnosti použitých metod při použití standardního softwaru.

Metodika je návodem jak snížit počet vzorkovacích míst na pozemku pomocí využití modelu reliéfu, při zachování vysoké vypovídací síly modelu. Metodika popisuje postup využití modelu reliéfu a jeho analýzu k tvorbě stratifikované vzorkovací sítě. Postupy zahrnují jednotlivé kroky, které jsou uživatelem snadno aplikovatelné s použitím běžně dostupných programů a výpočetní techniky. Stratifikovaná vzorkovací síť vykazuje lepší hodnoty následné predikce hloubky půdy, než při použití ostatních metod. Je to dáno vhodným rozmístěním vzorkovacích bodů, které jsou schopny zachytit celý rozsah vlastností reliéfu, které mají význam pro sledovanou půdní vlastnost a podmiňují její hodnoty.

8.4. Ekonomické aspekty

Metodika přináší postup, jak snížit množství bodů ve vzorkovací síti a tím snížit náklady jak personální, tak finanční. Snížení počtu vzorků, aniž by došlo ke snížení přesnosti prostorové predikce sledované vlastnosti, je 25%. Tento poměr se na finanční úspoře projeví jak při samotném vzorkování, tak i snížením počtu vzorků potřebných pro analýzy. Skutečná finanční úspora je tedy závislá na typu půdní vlastnosti, která je stanovována.

8.5. Dedikace

Tato metodika vznikla za finanční podpory Ministerstva zemědělství, NAZV a programu „KUS“ PP3 – Podpora politiky agrárního sektoru, v rámci řešení projektu QJ1230319 „Vodní režim půd na svažitém zemědělsky využívaném území“.

Seznam použité literatury

ČÚZK (2014): Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED®). Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/(S(h4mzewczhf5ti2i0gjazsfmh))/Default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&head_tab=sekce-02-gp&menu=24 <16.10.2014>.

EPA (2002): Guidance on Choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection. U.S. Environmental Protection Agency Quality Staff, Washington D.C. 20460.

Fleming, C., Giles, J. R. A., Marsh, S. H. (2010): Elevation Models for Geoscience. Geological Society of London, 2010. ISBN 978-1-186239-313-4.

Florinsky, I. V., Eilers, R. G., Manning, G. R., Fuller, L. G. (2002): Prediction of soil properties by digital terrain modelling. Environmental Modelling and Software, 17: 295-311.

Florintski, I. V. (2012): Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12-385036-2.

GISAT (2014): SRTM DEM. Dostupné z: http://www.gisat.cz/content/cz/produkty/digitalni-model-terenu/srtm-dem <15.10.2014>.

Hengl, T. (2006): Finding the right pixel size. Computers and Geosciences, 32: 1 283-1 298.

McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., Minasny, B. (2003): On digital soil mapping. Geoderma, 117: 3-52.

NASA (2014): U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data. Dostupné z: http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/ <15.10.2014>.

Oliver, M. A. (2010): Geostatistical Applications for Precision Agriculture. Springer Science and Business Media. ISBN 978-90-481-9132-1.

Vašát, R., Heuvelink, G. B. M., Borůvka L. (2010): Sampling design optimization for multivariate soil mapping. Geoderma, 155: 147-153.

Wilson, J. P., Gallant, J. C. (2000): Terrain analysis: Principles and applications. John Wiley and Sons, New York. ISBN 0-471-32188-5.

Worsham, L., Markewitz, D., Nibbelink, N. P., West, L. T. (2002): A comparison of three field sampling methods to estimate soil carbon content. Forest Science, 58: 513-522.

Zádorová, T., Penížek, V., Šefrna, L., Rohošková, M., Borůvka L. (2011): Spatial delineation of organic carbon-rich Colluvial soils in Chernozem regions by Terrain analysis and fuzzy classification. Catena, 85: 22-33.

Seznam předcházejících publikací autorů

Brodský, L., Klement, A., Penížek, V., Kodešová, R., Borůvka, L. (2011): Building soil spectral library of the czech soils for quantitative digital soil mapping. Soil and Water Research, 6 (4): 165-172.

Brodský, L., Vašát, R., Klement, A., Zádorová, T., Jakšík, O. (2013): Uncertainty propagation in VNIR reflectance spectroscopy soil organic carbon mapping. Geoderma, 199: 54-63.

Jakšík, O., Kodešová, R., Kubiš, A., Stehlíková, I., Drábek, O., Kapička, A. (2015): Soil aggregate stability within morphologically diverse areas. Catena, 127: 287-299.

Kapička, A., Kodešová, R., Jakšík, O., Klement, A., Petrovský, E., Grison, H. (2014): Metodika pro hodnocení půdních vlastností pomocí magnetické susceptibility aplikovatelná pro posouzení degradace půd v důsledku vodní eroze. ČZU v Praze, ISBN: 978-80-213-2532-6.

Klement, A., Vašát, R., Kodešová, R., Borůvka, L., Brodský, L., Jakšík, O. (2014): Metodika pro hodnocení půdních vlastností pomocí půdních spekter aplikovatelná pro posouzení degradace půd v důsledku vodní eroze. ČZU v Praze, ISBN: 978-80-213-2531-9.

Penížek, V., Borůvka, L. (2004): Processing of conventional soil survey data using geostatistical methods. Plant, Soil and Environment, 50: 352-357.

Penížek, V., Borůvka, L. (2006): Soil depth prediction supported by primary terrain attributes: A comparison of methods. Plant, Soil and Environment, 52: 424-430.

Penížek, V., Borůvka, L. (2008): The digital terrain model as a tool for improved delineation of alluvial soils. Digital Soil Mapping with Limited Data, pp. 319-326.

Penížek, V., Zádorová, T. (2012): Soil toposequence under man-planted vegetation in the Krkonoše Mts., Czech Republic. Soil and Water Research, 7: 138-150.

Vašát, R., Kodešová, R., Borůvka, L., Klement, A., Jakšík, O., Gholizadeh, A. (2014): Consideration of peak parameters derived from continuum-removed spectra to predict extractable nutrients in soils with visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy (VNIR-DRS). Geoderma, 232-234: 208-218.

Zádorová, T., Jakšík, O., Kodešová, R., Penížek, V. (2011): Influence of terrain attributes and soil propertieson soil aggregate stability. Soil and Water Research, 6: 111-119.

Zádorová, T., Penížek, V., Šefrna, L., Rohošková, M., Borůvka, L. (2011): Spatial delineation of organic carbon-rich Colluvial soils in Chernozem regions by Terrain analysis and fuzzy classification. Catena, 85: 22-33.

Summary

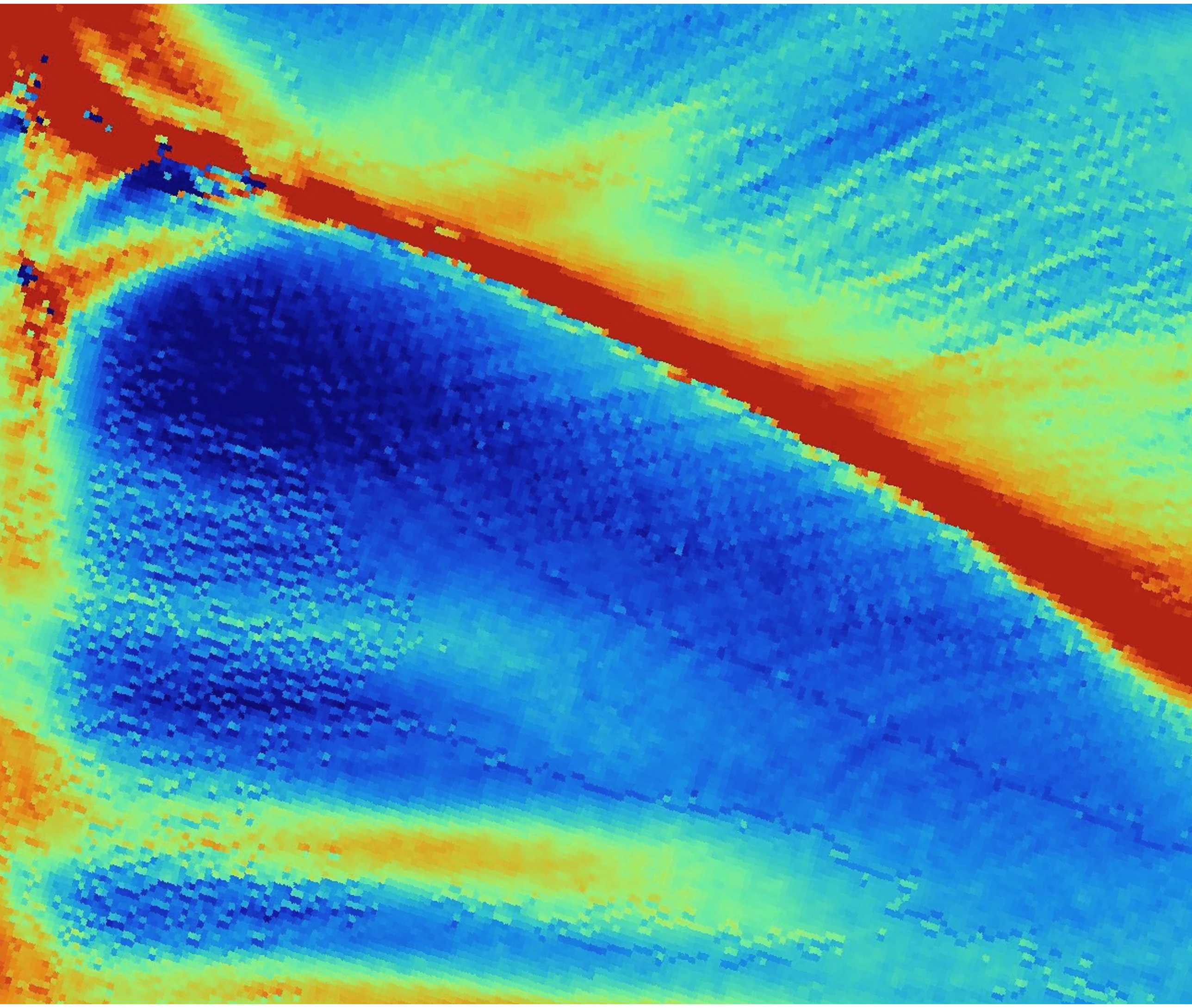
The soil properties variability description is important aspect in land management and food production at plot scale. The methodology describes new approach for design of sampling network on agricultural plots with relief variability. If the within-plot soil variability is driven by intensive relief, the terrain properties can be used for improved spatial prediction of soil properties including design of the sampling network. Application of stratified sampling network based on relief classification leads to better soil properties variability description.

The aim of the methodology is detail step by step description of sampling network design using terrain derivatives obtained from digital elevation models (DEMs). The methodology describes availability of DEMs, DEM processing, raster resolution setting and soil sampling density setting according demanded final map resolution.

Four sampling network schemes with three levels of sampling density were compared to prove the advantages of relief based stratified sampling networks. The methodology showed that, for soil properties variability description at certain accuracy level, relief-based stratified network can contain 25 % less sampling points comparing to regular network. This leads to potential financial and person cost reduction for the soil survey.

Key words: soil variability, sampling network, digital elevation model

Název	Optimalizace vzorkovací sítě pomocí využití analýzy reliéfu pro popis prostorové variability půdních vlastností v rámci půdních bloků
Autor	Ing. Vít Penížek, Ph.D., RNDr. Tereza Zádorová, Ph.D., prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., Ing. Aleš Klement, Ph.D.
Vydavatel	Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů, Katedra pedologie a ochrany půd
Vydání	2014
Náklad	50
Počet stran	41
Tiskárna	powerprint s.r.o., Brandejsovo nám. 1219/1, 165 00 Praha 6 – Suchdol
ISBN	978-80-213-2533-3



ISBN: 978-80-213-2533-3