

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

VLIV ROZLIŠENÍ NA VÝPOČET SOLÁRNÍHO
POTENCIÁLU: PŘÍPADOVÁ STUDIE
VE ŠPINDLEROVÉ MLÝNĚ
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Bakalant: Miroslav Píchal

2015

zadání BP (kvůli správnému číslování stránek)

zadání BP (kvůli správnému číslování stránek)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D., a že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Praze 15. 4. 2015

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D., za ochotu, trpělivost a cenné rady, které mi byly při zpracovávání této práce velmi nápomocny. Rovněž děkuji své rodině za trvalou podporu při studiu.

Abstrakt

Malé fotovoltaické elektrárny (FVE) umístované na střechy budov jsou významným prvkem v úsilí o racionální využívání primárních zdrojů energie a současně způsobem, jak zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie. Vhodnost lokality k umístění FVE je zpravidla posuzována výpočtem solárního potenciálu, který je usnadněn existencí GIS. Přesnost výpočtu závisí na úplnosti popisu lokality, na hodnotách vstupních parametrů. Výpočetní nástroje GIS umožňují jejich široké nastavení, avšak dopad změny jednoho či více parametrů na hodnoty solárního potenciálu popsán není. Cílem této bakalářské práce je zhodnocení vlivu rozdílné volby hodnoty parametru Sky size na přesnost výpočtu solárního potenciálu a rozřídění střech budov v zájmovém území dle jejich vhodnosti ke stavbě FVE. Podkladem práce jsou data z Dálkového Průzkumu Země pro zájmové území Špindlerův Mlýn a dostupná meteorologická data. Z výsledků je zřejmé, že přednastavené (defaultní) hodnoty použitého nástroje programu ArcGIS jsou dostatečné a změny nastavení nejsou přiměřené zvýšení přesnosti a nárokům na strojový čas. Z výsledků vznikly mapy solárního potenciálu a vhodnosti jednotlivých budov k instalaci FVE.

Klíčová slova: časová náročnost, GIS, rozlišení, solární potenciál, výpočet

Abstract

Small photovoltaic power (PVP) that are placed on the roofs of buildings are an important element in efforts to rational use of primary energy sources, way to increase the share of renewable energy sources. The suitability of the site for placement PVP is usually assessed by calculating solar potential, which is facilitated by the existence of GIS. The accuracy of the calculation depends on the completeness of the description of the location, on the values of input parameters. GIS computational tools enable wide settings, but the impact of changes in one or more parameters to the values of the solar potential is not described. The aim of this thesis is to evaluate the impact of different options parameter values of Sky size calculation accuracy of the solar potential and sorting roofs of buildings in the area of interest according to their suitability for the construction of PVP. The basis of work are data from remote sensing for the area in Spindleruv Mlyn and available meteorological data. The results show that the default values used by ArcGIS tool are adequate and setting changes are not proportional to the additional demands on accuracy and machine time. From the results originated maps of the solar potential and suitability of individual buildings to install solar panels.

Key words: calculation, GIS, resolution, solar potential, time demandingness

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Literární rešerše.....	10
2.1. Sluneční záření a sluneční konstanta.....	10
2.2. Mapa solárního potenciálu	11
2.2.1 Modely terénu	11
2.2.2 Poloha FVE a určení solárního potenciálu.....	14
2.3. Výpočet solárního potenciálu.....	15
2.4. ArcGIS, nástroj Area Solar radiation	15
2.4.1 Výpočet mapy zastínění	16
2.4.2 Výpočet mapy pohybu Slunce	17
2.4.3 Výpočet mapy oblohy	18
2.4.4 Výpočet slunečního záření	18
3. Materiál a metodika.....	22
3.1. Charakteristika území	22
3.2. Vstupní data a volba počátečních podmínek.....	22
3.3. Mapa solárního potenciálu zájmového území.....	23
3.4. Vliv počátečních podmínek na přesnost výsledků	26
4. Výsledky	27
5. Diskuse.....	31
6. Závěr	34
7. Přehled literatury a použitých zdrojů	35
8. Přílohy.....	38

1. Úvod

Výroba energie z obnovitelných zdrojů je již delší dobu v popředí zájmu nejen vyspělých států. Patří sem i fotovoltaické elektrárny (FVE) přeměňující sluneční záření dopadající na zemský povrch v elektrickou energii.

FVE jsou zpravidla budovány v místech s předpokládaným maximálním slunečním osvitem, tj. s pravidelnou vysokou intenzitou dopadajícího záření a dlouhotrvající expozicí. Umístění FVE ovlivňuje například nadmořská výška lokality, míra znečištění ovzduší či možný úhel dopadu slunečních paprsků. Vhodnost umístění FVE lze mj. posoudit výpočtem tzv. solárního potenciálu uvažované lokality. Solární potenciál se obvykle vyjadřuje jako hodnota průměrné intenzity [W/m^2] nebo energie [Wh/m^2] slunečního záření dopadajícího na jednotkovou plochu zkoumané oblasti. K výpočtu solárního potenciálu existuje mnoho přístupů. Mezi v poslední době oblíbené patří nástroj Area Solar radiation, který je součástí ArcGIS (KODYSH et al., 2013; FU et RICH, 1999). V Lisabonu, hlavním městě Portugalska vznikla studie posuzující poptávku elektrické energie s množstvím možné generované el. energie z FVE (SANTOS et al., 2014). Podobná studie byla provedena pro Londýn, kde byly zjišťovány vztahy mezi nahloučenou městskou zástavbou a možnostmi využití solární energie ve městě (SARRALDE et al., 2015). Nicméně autoři těchto studií často neuvádějí jednotlivé parametry nastavení.

Určením solárního potenciálu se zabývá i tato bakalářská práce. Zájmovým územím byla pro svou rozmanitost terénu a dostupnost dat zvolena oblast Špindlerova Mlýna v okrese Trutnov, Královéhradecký kraj.

Cíle práce lze shrnout takto:

- Studie existujících studií – shrnutí, zda autoři uvádějí rozlišení a další parametry modelu
- Klasifikace LIDARových dat
- tvorba půdorysů budov (footprint)
- Výpočet solárního potenciálu střech ve Špindlerově mlýně s různým rozlišením
- Zhodnocení vlivu použitého rozlišení na výsledné solární mapy

2. Literární rešerše

2.1. Sluneční záření a sluneční konstanta

Zdrojem slunečního záření dopadajícího na Zemi je Slunce, v němž probíhá nepřetržitá termojaderná štěpná reakce, při níž se mění vodík na hélium a současně se uvolňuje množství energie (elektromagnetického záření různých vlnových délek). Na Zemi toto záření dopadá převážně jako viditelné, ultrafialové a infračervené světlo. Maximum energie nesené dopadajícím slunečním zářením je ve viditelném oboru. Viditelné záření [světlo o vlnové délce (390÷790) nm, resp. s frekvencí $(3,9\div7,9)\times 10^{14}$ Hz] je i jedním z nejdůležitějších činitelů ovlivňujících existenci života na Zemi (SLAVÍČEK et WAGNER, 1971).

Záření dopadající na zemský povrch lze dělit na přímé, rozptýlené a odražené. Přímé záření (tvořeno paprsky, které při průchodu atmosférou nemění směr) není ovlivněno žádným atmosférickým procesem. Oproti tomu rozptýlené (difúzní) záření je průchodem atmosférou ovlivněno. Velká část dopadajícího světelného záření se při průchodu atmosférou odráží zpět do vesmíru. Na zemském povrchu odraz vyvolávají zejména zasněžená území (LEPIL et KUPKA., 1996).

Intenzita slunečního záření dopadajícího na povrch Země závisí zejména na tloušťce ozónové vrstvy, oblačnosti a míře znečištění ovzduší. Se stavem ovzduší souvisí i tzv. atmosférické procesy, rozptyl, absorpce a odraz slunečních paprsků.

Vzájemné působení dopadajícího záření (zejména srážky) s molekulami plynu a částicemi v atmosféře (prach, sníh, led ap.) snižuje energii dopadajících fotonů (záření). Rozptýlené záření má v okamžiku dopadu na povrch Země menší intenzitu (energii), než záření přímé. Odrazy při srážkách způsobují, že rozptýlené záření dopadá na povrch Země ze všech směrů (a vytváří stejnoměrné osvětlení). Je zajímavé, že právě díky rozptýlenému záření vidíme oblohu modře. Kdyby k rozptylům nedocházelo, vnímali bychom ji černě (HORÁLEK, 2010).

Sluneční intenzita se v průběhu roku mírně mění. Jedním ze způsobů, jak popsat průměrné množství zářivé energie Slunce přijaté zemskou atmosférou je užít tzv. solární konstantu, její hodnota byla stanovena na $I_{SC}=1367 \text{ Wm}^{-2}$, která je definována jako tok sluneční energie procházející plochou 1 m^2 , kolmou na směr paprsků, za 1 s ve střední vzdálenosti Země od Slunce (1 AU) měřený

mimo zemskou atmosféru. Konstanta zahrnuje celé spektrum slunečního záření, nejen viditelné světlo (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2015).

2.2. Mapa solárního potenciálu

K posouzení vhodnosti lokality uvažované ke stavbě FVE lze užít mj. mapu solárního potenciálu posuzovaného území. Její sestavení je podmíněno především znalostí podrobné topografie zkoumaného území a místních klimatických a atmosférických poměrů.

Například ve Spolkové republice Německo je sestaveno množství map slunečního potenciálu příměstských a městských oblastí (SOLARKATASTER M-K, 2015), (SOLARATLAS, 2015).

Solární potenciál je podrobně zmapován i v dalších oblastech, např. města v USA a Chile (MAPDWELL, 2014), Holandsko (ZONATLAS, 2015), ve Švýcarsku (SOLARKATASTER, 2015).

Topografická data jsou k dispozici vektorová a rastrová. Většinou jsou pořízena leteckým laserovým skenování povrchu, zpravidla metodou LIDAR. (DOLANSKÝ, 2004) Údaje o znečištění ovzduší, oblačnosti a dalších meteorologických jevech lze získat z volně dostupných databází nebo z Českého hydrometeorologického ústavu.

2.2.1 Modely terénu

LIDAR (Light Detection and Ranging) je jednou z metod Dálkového průzkumu Země použitelných k vytvoření velmi přesného digitálního modelu Země. (DOLANSKÝ, 2004)

LIDARové systémy dělíme na topografické (mapování povrchu) a batymetrické (mapování dna moří a sklonu říčních koryt) a vždy obsahují laser jako zdroj záření. K mapování povrchu (obr. 1) je nejčastěji užít laser vyzařující světelný svazek o vlnové délce odpovídající blízkému infračervenému záření [(1100÷1200) nm], zatímco batymetrické systémy užívají vodou s malou ztrátou intenzity dobře procházející záření zelené barvy. LIDARové systémy jsou obvykle pevně spojeny s letadlem, nebo vrtulníkem.

LIDARové systémy obsahují:

- Globální Navigační Satelitový Systém (GNSS) k určení přesné polohy letadla.
- Inerciální měřicí jednotka (IMU) měřící úhlové zrychlení letadla (tj. jeho sklon, rychlost a výšku).
- Laserový scanner vysílající směrem k povrchu Země krátké kolimované infračervené světelné pulsy a zaznamenávající dobu mezi okamžiky jejich vyslání a návratu po odrazu od povrchu Země a intenzitu záření (pulsu) v okamžiku návratu.

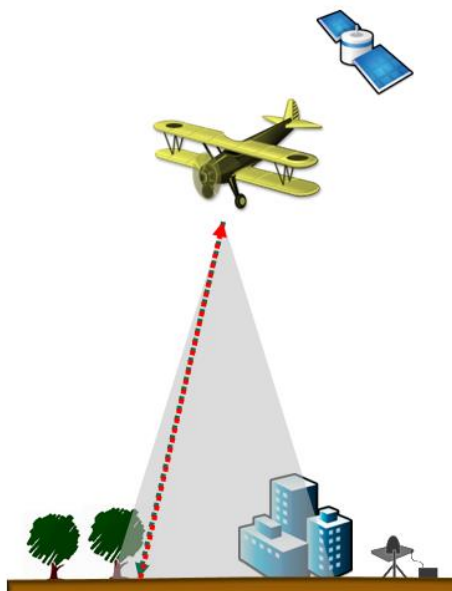
Souřadnice místa odrazu na Zemi lze s velkou přesností určit díky záznamům GNSS/IMU a znalosti doby letu paprsku. Takto získaná geometrická data jsou uložena ve 3D bodovém poli, přičemž každý bod nese informaci o intenzitě paprsku a o snímaném úhlu.

V oblastech s velkým zákrytem vegetací je většina paprsků dopadajících na povrch rozptýlena a část paprsků prochází mezerami ve vegetačním a následně se odráží od objektů pod vegetací, (stavby, zemský povrch) (WEHR et LOHR, 1999).

LIDARové skenování zemského povrchu umožňuje vytvořit velké soubory přesných dat vhodných např. k urbanistickému plánování, katastrálnímu mapování a pro projekty životního prostředí. Databanky těchto dat jsou zpravidla ve státním nebo soukromém vlastnictví (KODYSH et al., 2013).

V mnoha státech je v současnosti vedena diskuze, zda tato data poskytovat zdarma, nebo volný přístup omezit a přístup částečně zpoplatnit a získané prostředky užít k financování dalšího průzkumu. V Evropě v současné době poskytují data zdarma tyto státy: Dánsko, Finsko a Holandsko (RAPIDLASSO, 2015a). V České republice lze topografická data zakoupit od Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního (ČÚZK).

Rozlišujeme digitální model terénu a povrchu (obr. 2). Digitální model terénu (DTM) (GIS.VSB, 2015) je obecný pojem zahrnující různé reprezentace a koncepce reliéfu a povrchů. Digitální model povrchu (DSM) zachycuje průběh topografické plochy georeliéfu, který je doplněn o prvky tvořící jak jeho přírodní, tak jeho antropogenní pokryv (například stromy, budovy, mosty apod.), zobrazuje tedy terén i se všemi objekty (budovy, infrastrukturu, vegetaci aj.) na povrchu Země, kdežto DTM nese informaci pouze o povrchu Země bez objektů. DSM se užívá mj. i jako podklad pro odhad solárního potenciálu (KODYSH et al., 2013).

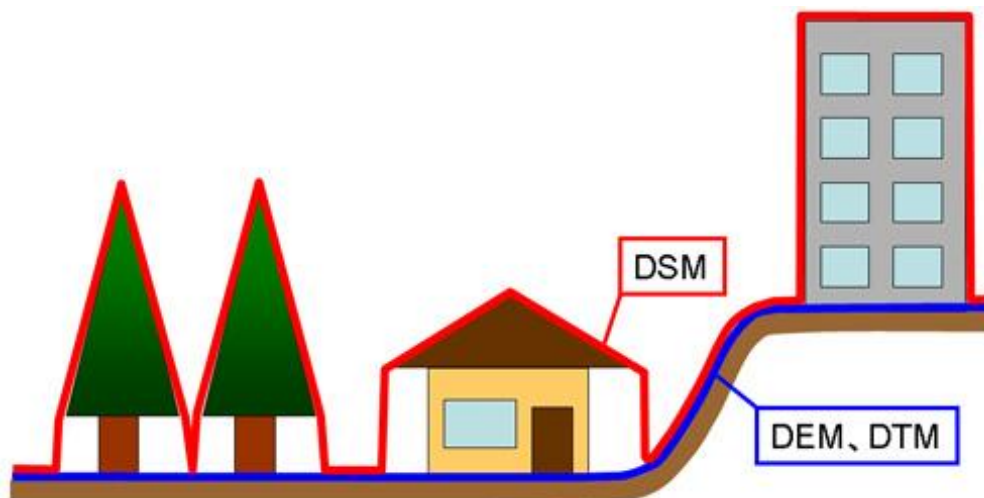


Obr. 1: Princip LIDARového snímání (ARCGIS HELP 10.1, 2015c)

Letecká fotogrammetrie vytváří model terénu oblasti vzájemným překryvem snímků. V hustě zalesněných oblastech vygenerovaný model terénu však bude mít spíše vlastnosti DSM. Ke tvorbě DSM tudíž letecká fotogrammetrie není vhodná. Jako vhodnější se jeví radar a radargrammetrie (ORŠULÁK et PACINA., 2010), avšak výsledná přesnost prostorového snímání je pro potřeby modelování solárního potenciálu stále nedostatečná.

Zdá se, že nejvhodnější technologií pro vytvoření DSM je LIDAR (JOCHEM et al., 2012). Pro vytváření podvodních DSM lze použít SONAR (SOund, NAvigation and Ranging; radaru podobný způsob zaměřování a zvukové navigace, místo elektromagnetických vln jsou užívány zvukové vlny (LE CHEVALIER, 2002)), tak i LIDAR. U sonarových systémů je vodorovné

rozlišení a svislé přesnost menší jak u systémů operujících na souši (ArcGIS Help 10.1, 2015b).



Obr. 2: Srovnání digitálního modelu terénu (DTM) a povrchu (DSM). DTM znázorněn modře, DSM červeně (GSI, 2015)

2.2.2 Poloha FVE a určení solárního potenciálu

Mnohé FVE jsou v České republice umístěny mimo zastavěná území, zpravidla na zemědělské půdě, čímž brání jejímu smysluplnějšímu využití. FVE na střechách domů, či brownfieldech, zemědělskou půdu nezabírají a proto se umístění FVE v těchto místech jeví jako vhodnější (ROULOVÁ, 2011).

Při výpočtu solárního potenciálu zastavěného území je nezbytné zahrnout vliv zastínění okolní vegetací, budovami nebo dokonce samotnými střešními prvky (vikýř, komín, satelit). Výpočet solárního potenciálu urbanisticky využívaných oblastí tak však naráží na malou přesnost existujících map slunečního osvit, které jsou pro užití v zastavěných územích vytvořeny v příliš hrubém měřítku. Jediným v České republice, volně přístupným systémem pro běžného uživatele je Fotovoltaický geografický informační systém (PVGIS, 2015), který je přístupný z adresy <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>. PVGIS je rozsáhlá databáze obsahující mj. údaje o množství energie nesené dopadajícím slunečním zářením na evropský a africký kontinent. Tyto údaje jsou založeny na základě měření 566 pozemních meteorologických stanic z let 1981 – 1990. PVGIS má prostorové rozlišení DEMu (1x1) km a je pro přesný odhad naprosto nedostačující (HOFIERKA et KAŇUK, 2009).

V České republice byl 1. 11. 2011 zahájen projekt RESTEP – Interaktivní mapa obnovitelných zdrojů pro regionální udržitelné plánování v energetice. V projektu vytvářené mapě je uživateli k dispozici mnoho vrstev, popisujících např. předpokládaný výnos plodin, odpadové hospodářství, až po vítr, slunce, degradaci půdy a jiné.

Vrstva Slunce\Sluneční iradiace užívá data PVGISu a uživateli poskytuje odhad elektrického výkonu FVE v závislosti na typu instalovaného fotovoltaického článku. RESTEP jen vhodný pro odhad v rámci regionu, avšak pro přesnější vymezení „v rámci“ střech domů zcela nevhodný (RESTEP, 2015).

2.3. Výpočet solárního potenciálu

Intenzita slunečního záření dopadajícího na každé místo na Zemi závisí nejen na denní době a ročním období, ale i na nadmořské výšce zájmové lokality, její světové orientaci, sklonu terénu a zástinu vyvolanému případnou existencí okolní zástavby či jiných objektů. V optimálním případě by výpočet solárního potenciálu měl všechny tyto vlivy zohlednit.

Pravděpodobně nejsnadnější výpočet solárního potenciálu vychází ze znalosti slunečního osvětlení, resp. intenzity slunečního záření dopadajícího na zájmovou lokalitu. Bohužel pro většinu míst na Zemi nejsou přesné mapy slunečního osvětlení/intenzity slunečního záření k dispozici, neboť vybudování dostatečně husté sítě měřicích stanic je pro vysoké pořizovací náklady nemožné. Interpolace již existujících dat je též nereálná, či dokonce nedává smysl, neboť osvětlení většiny lokalit je významně ovlivněno i podobou krajiny (reliéfu), kterou nelze do interpolace zahrnout. Vliv na přesnost výpočtu má i postup výpočtů, tedy volba vhodného numerického modelu (FU et RICH, 1999).

V praxi se nedostatek informací/dat o slunečním osvětlení částečně nahrazuje užitím modelů původně vyvinutých pro potřeby geografických informačních systémů.

2.4. ArcGIS, nástroj Area Solar radiation

Solar Radiation toolset, resp. nástroj Area Solar radiation; oba jsou součástí systému ArcGIS společnosti ESRI (FU et RICH, 1999). Nástroj Area Solar radiation je určen k výpočtu slunečního záření dopadajícího na zájmové území.

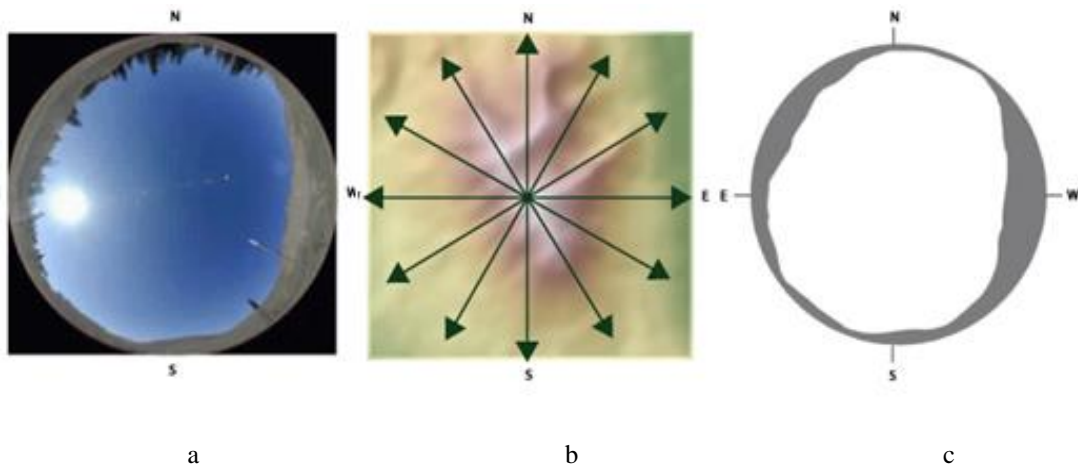
Výpočet probíhá pro každý jednotlivý pixel/buňku vstupního rastru digitálního modelu povrchu zvlášť, prostorové rozlišení rastru tedy určuje přesnost výpočtu. Výpočet je založen na hemisférickém algoritmu zastínění (RICH et al., 1994) a lze ho rozdělit do tří částí:

1. Výpočet mapy zastínění oblohy směrem k zenitu; výpočet využívá topografie (reliéfu) území
2. Výpočet mapy pohybu Slunce pro zvolené období
3. Výpočet mapy oblohy

2.4.1 Výpočet mapy zastínění

Jak již bylo zmíněno, osvětlení určitého místa je závislé na topografii okolního terénu. Tvorba hemisférické mapy (tj. „zahrnující jen jednu polokouli“) zastínění oblohy určující viditelnost či zastíněnost jednotlivých částí oblohy při pozorování oblohy ze zájmové lokality je proto významnou částí celého výpočtu modelu solárního záření (ARCGIS HELP 10.2, 2015).

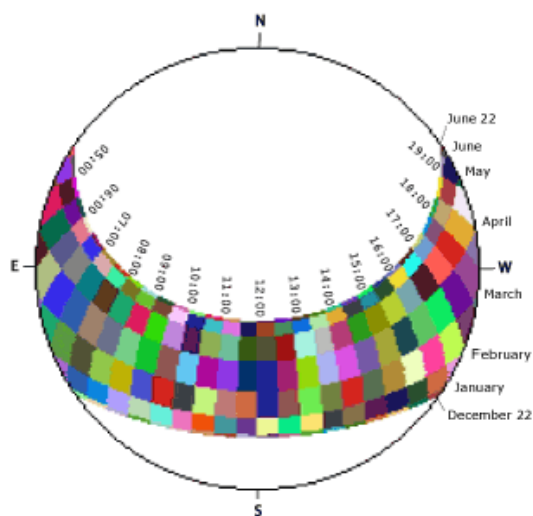
Mapu zastínění oblohy si lze představit jako širokoúhlou fotografii oblohy (obr 3 a). Celková viditelnost (obr. 3 c) je výsledkem hodnocení viditelnosti ve zvolených směrech vedoucích k zájmovému místu (obr. 3 b) a pro každý směr zjištěním maximálního úhlu zastínění oblohy (tzv. úhel horizontu). Úhly horizontu příslušející nezahrnutým směrům jsou odhadnuty interpolací. Poté jsou úhly horizontu převedeny z 3D zobrazení do 2D prostorové sítě. Rozlišení 2D prostorové sítě (tj. mapy) (sky size) v závislosti k velikosti buněk vstupního rastru a k počtu směrů zahrnutých do výpočtů úhlů horizontu, jsou základními vstupními parametry tohoto nástroje (RICH et al., 1994; FU et RICH, 1999). Přesnost výsledků je mj. úměrná zvolenému rozlišení rastru, tj. velikosti buněk.



Obr. 3: Příklad výsledků výpočtu zastínění (ARCGIS HELP 10.1, 2015d)
 a. hemisférická fotografie oblohy
 b. hodnocení viditelnosti ve zvolených směrech
 c. výsledné zastínění

2.4.2 Výpočet mapy pohybu Slunce

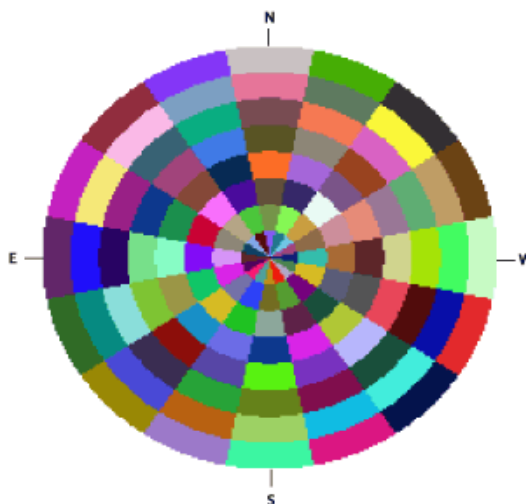
Množství slunečního záření pocházející z jednotlivých směrů k zájmovému místu je znázorněno sluneční mapou (Obr. 4). Sluneční mapa je vytvářena podobnou transformací mapa zastínění. Mapa stanovuje sluneční trasu, tj. přesnou polohu Slunce v závislosti na čase. Pozice Slunce (azimutové a zenitové úhly) je určena zeměpisnou šířkou, dnem v roce a časem. Zenitové a azimutové úhly jsou z 3D zobrazení převedeny do 2D prostorové sítě, která má stejné rozlišení jako mapa zastínění (KODYSH et al., 2013).



Obr. 4: Příklad mapy pohybu Slunce, každý sektor má svoji jedinečnou hodnotu. (ARCGIS HELP 10.1, 2015d)

2.4.3 Výpočet mapy oblohy

Oproti přímému slunečnímu záření, které pochází pouze ze směrů sluneční trasy, rozptýlené záření může pocházet z jakéhokoliv směru. Rozdíl souvisí s rozptylem slunečních paprsků při průchodu atmosférou. Mapa oblohy (Obr. 5) zahrnuje celou oblohu, rozdělenou do sektorů, jejichž velikost a poloha závisejí na velikosti zenitových a azimutových úhlů (KODYSH et al., 2013).



Obr. 5: Příklad mapy rozdělení oblohy do sektorů s vlastní jedinečnou hodnotou (ARCGIS HELP 10.1, 2015d)

2.4.4 Výpočet slunečního záření

Po sestavení mapy zastínění oblohy, mapy pohybu Slunce a mapy oblohy lze vypočítat poměr přímého a nepřímého záření dopadajícího na zájmové místo. Výpočet probíhá postupně po jednotlivých sektorech, do nichž je v 2D zobrazení rozčleněna obloha. Hlavní kroky výpočtů jsou popsány v (FU et RICH, 1999; KODYSH et al., 2013).

Nejprve se zjišťuje „velikost“ volné, „nezastíněné“ oblohy v mapě pohybu Slunce a mapě oblohy. „Velikost“ je pro každý sektor mapy vyjádřena poměrem počtu v něm nezastíněných buněk k celkovému počtu buněk. Současně získáváme i velikosti „zastíněné“ oblohy v jednotlivých sektorech. Po odlišení nezastíněných a zastíněných částí oblohy již lze přikročit k výpočtu slunečního záření; nezbytná je znalost polohy Slunce, propustnosti atmosféry (vyjadřující její znečištění a oblačnost) a sklon terénu na zájmovém místě. Výpočet slunečního záření je

prováděn po jednotlivých buňkách z rastru DSM. Dílčí výsledky jsou užity k sestavení mapy slunečního záření).

Výsledné sluneční záření G_R dopadající na zájmové místo je výslednicí přímého D_R a rozptýleného D_F záření dopadající na zájmové místo z celé oblohy, tj., ze všech sektorů 2D mapy

$$G_R = D_R + D_F, \quad (1)$$

přičemž

$$D_R = \Sigma DR_{\theta,\alpha} \quad (2)$$

$$D_F = \Sigma DF_{\theta,\alpha} \quad (3)$$

Výsledné přímé sluneční záření D_R , resp. výsledné rozptýlené záření D_F je součtem dílčích záření $DR_{\theta,\alpha}$, resp. $DF_{\theta,\alpha}$ dopadajících ze všech sektorů, na něž je obloha rozdělena.

Přímé sluneční záření $DR_{\theta\alpha}$ ze sektoru popsaného zenitovým úhlem θ a azimutovým úhlem α je

$$DR_{\theta\alpha} = S_{\text{Const}} \times \tau^{m(\theta)} \times SD_{\theta,\alpha} \times SG_{\theta,\alpha} \times \cos(\beta_{\theta,\alpha}) \quad (4)$$

S_{Const} je solární konstanta,

τ je průměrná hodnota (platná pro všechny vlnové délky) propustnosti atmosféry po nejkratší dráze směrem k zenitu,

$m(\theta)$ je relativní délka dráhy slunečního paprsku (viz rovnice (5)),

$SD_{\theta,\alpha}$ je doba odpovídající poloze sektoru. Pro daný sektor je rovna součinu uživatelem zvoleného denního intervalu (např. 1 den) a hodinového intervalu (např. 0,5 hodiny). Pro sektory částečně zakryté mapou viditelnosti je vztah složitější, užívá se sférické geometrie;

$SG_{\theta,\alpha}$ je podíl viditelné plochy sektoru sluneční mapy a jeho celkové plochy (je-li sektor zcela zakryt, podíl je roven 0. Je-li celý viditelná, podíl je roven 1),

$\beta_{\theta,\alpha}$ je úhel dopadu paprsku vycházejícího ze středu počítaného sektoru oblohy (popsaného zenitovým úhlem θ a azimutovým úhlem α) a povrchem Země. (jeho normálovou osou).

Relativní délka dráhy slunečního paprsku $m(\theta)$ je určena výrazem

$$m(\theta) = \frac{e^{-0,000188 \times V - 1,668 \times 10^{-9} \times V^2}}{\cos \theta} \quad (5)$$

V je nadmořská výška v metrech, θ je zenitový úhel.

Rovnice (5) platí pro hodnoty úhlu $\theta < 80^\circ$, v opačném případě nutno do výpočtu zahrnout vliv lomu světla.

Úhel $\beta_{\theta,\alpha}$ je definován jako

$$\beta_{\theta,\alpha} = \cos^{-1}[\cos \theta \times \cos P_z + \sin \theta \times \sin P_z \times \cos(\alpha - P_a)], \quad (6)$$

kde P_z , resp. P_a jsou zenitový, resp. azimutový úhel povrchu, na který paprsek dopadá.

Rozptýlené sluneční záření $DF_{\theta\alpha}$ ze sektoru určeného zenitovým úhlem θ a azimutovým úhlem α lze vyjádřit

$$DF_{\theta\alpha} = R_{celk} \times P_{rozpt} \times T \times SG_{\theta,\alpha}^{rozpt} \times P_{\theta,\alpha} \times \cos(\beta_{\theta,\alpha}), \quad (7)$$

kde R_{celk} je výsledné sluneční záření,

P_{rozpt} je podíl rozptýleného záření ve výsledném slunečním záření (viz rovnice (8)).

Pro jasnou oblohu je obvykle roven 0,2; pro velmi zataženou oblohu je roven 0,6 až 0,7 (FU et RICH, 1999). Hodnotu tohoto atmosférického parametru se zásadním vlivem na výsledek výpočtů zadává sám uživatel,

T je doba, pro kterou je výpočet prováděn,

$SG_{\theta,\alpha}^{rozpt}$ je podíl viditelné plochy sektoru v mapě oblohy a jeho celkové plochy (je-li sektor zcela zakryt, podíl je roven 0. Je-li celý viditelný, podíl je roven 1);

$P_{\theta,\alpha}$ je podíl záření vznikajícího v daném sektoru oblohy (úhly θ,α) a záření z celé oblohy, viz též rovnice (9) a (10),

$\beta_{\theta,\alpha}$ je úhel dopadu paprsku vycházejícího ze středu sektoru oblohy (popsaného zenitovým úhlem θ a azimutovým úhlem α) a povrchem Země (jeho normálovou osou).

Výsledné přímé sluneční záření R_{celk} (nebere se v úvahu orientace/sklon povrchu je výslednicí celkového záření ze všech sektorů mapy pohybu Slunce (včetně sektorů zakrytých mapou viditelnosti) s opravou na obsah rozptýleného záření $(1 - P_{rozpt})$

$$R_{celk} = S_{const} \sum \tau^{m(\theta)} / (1 - P_{rozpt}) \quad (8)$$

V případě rovnoměrně rozptylující oblohy („uniform sky“) lze hodnotu parametru $P_{\theta,\alpha}$ vypočítat (FU et RICH, 1999) jako

$$P_{\theta\alpha} = (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) / N, \quad (9)$$

θ_2 a θ_1 jsou (ohraničující) zenitové úhly v sektoru oblohy, N je počet azimutových sektorů v mapě oblohy.

Je-li obloha průměrně zatažena („standard overcast“) je parametr $P_{\theta,\alpha}$ popsán (FU et RICH, 1999) výrazem

$$P_{\theta\alpha} = (2 \cos \theta_2 + \cos 2\theta_2 - 2 \cos \theta_1 - \cos 2\theta_1) / 4N. \quad (10)$$

3. Materiál a metodika

3.1. Charakteristika území

Pro výpočty v této práci posloužilo jako zájmové místo Špindlerův Mlýn ležící u soutoku Labe a Svatopetrského potoka a sevřený mezi vrchy Medvědin (1235 m.n.m) a Přední Planina (1198 m.n.m.). Špindlerův Mlýn se nachází v Královéhradeckém kraji, v Krkonošském národním parku. Město je vystavěno od severu k jihu, s větší částí vystavěnou na jihovýchodním svahu Medvědina v údolí řeky Labe.

3.2. Vstupní data a volba počátečních podmínek

Data z LIDARového snímkování poskytla správa Krkonošského národního parku (KRNAP) v datovém formátu LAS. Data byla pořízena 15. 3. 2013. Průměrná hustota v řešené oblasti je 15,15 bodu/m².

Dalšími parametry, které přímo vstupují do výpočtu solárního potenciálu v ASR, jsou rozptýlené záření a propustnost přímého záření. Podíl rozptýleného a výsledného záření (diffuse proportion) nabývá hodnot (0÷1). Tato hodnota by při výpočtech měla být nastavena tak, aby co nejlépe vystihovala místní atmosférické podmínky. Výchozí (defaultní) nastavení podílu v modelu přísluší jasné obloze a je rovno 0,3 (ARCGIS HELP 10.1, 2015a).

Míru slunečního záření po průchodu atmosférou vyjadřuje parametr propustnost (transmittivity). K výpočtům se užívá průměrná hodnota propustnosti (průměr pro všechny vlnové délky), která nabývá hodnot 0 – (atmosféra nepropustí žádné záření) – 1 (veškeré záření projde). V modelu je přednastavena hodnota 0,5, jež přísluší jasné obloze (ARCGIS HELP 10.1, 2015a).

Charakteristiku propustnosti přímého záření pro dané místo na Zemi a jednotlivá roční období lze najít na webové adrese Gaisma.com. (GAISMA, 2015) Charakteristiky vycházejí z podkladů NASA Langley Reserch Center Atmospheric Science Data Center. Pro výpočet přímého záření byla použita veličinu „Clearness“, jež v modelu ArcGIS odpovídá parametru „Transmittivity“. Údaje ze serveru Gaisma.com pokrývají jen vybraná světová města. Byly použity hodnoty pro město Vrchlabí, které je z nabídky nejbližze řešenému území. Údaje pro rozptýlené záření

byly získány z PVGIS, který má prostorové rozlišení (1×1) km. Byla použita střední hodnota všech buněk nacházejících se na území Š. M. (PVGIS, 2015).

Hodnoty parametru „Sky Size“, základní proměnnou nástroje ASR, lze zadávat z intervalu hodnot 200-10 000. Protože úměrně s narůstající hodnotou narůstá i délka výpočtů, byly „Sky Size“ a další parametry s ohledem na strojový čas zvoleny takto:

Parametr	Hodnota
Rozlišení (Sky size)	200, 500, 1500
Day interval	1
Hour interval	0,5
Diffuse proportion	viz Tab.2
Transmittivity	viz Tab.2

Tabulka 1: Hodnoty vybraných parametrů užitých při výpočtech ASR

Hodnoty ostatních parametrů byly při výpočtech ponechány v přednastaveném (defaultním) stavu.

Parametr												
Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Diffuse proportion	0,81	0,66	0,63	0,59	0,59	0,64	0,60	0,60	0,62	0,60	0,78	0,90
Transmittivity	0,35	0,39	0,41	0,45	0,47	0,42	0,45	0,47	0,41	0,36	0,32	0,34

Tabulka 2: Hodnoty propustnosti atmosféry a podílu rozptýleného záření v závislosti na ročním období (GAISMA, 2015; PVGIS, 2015)

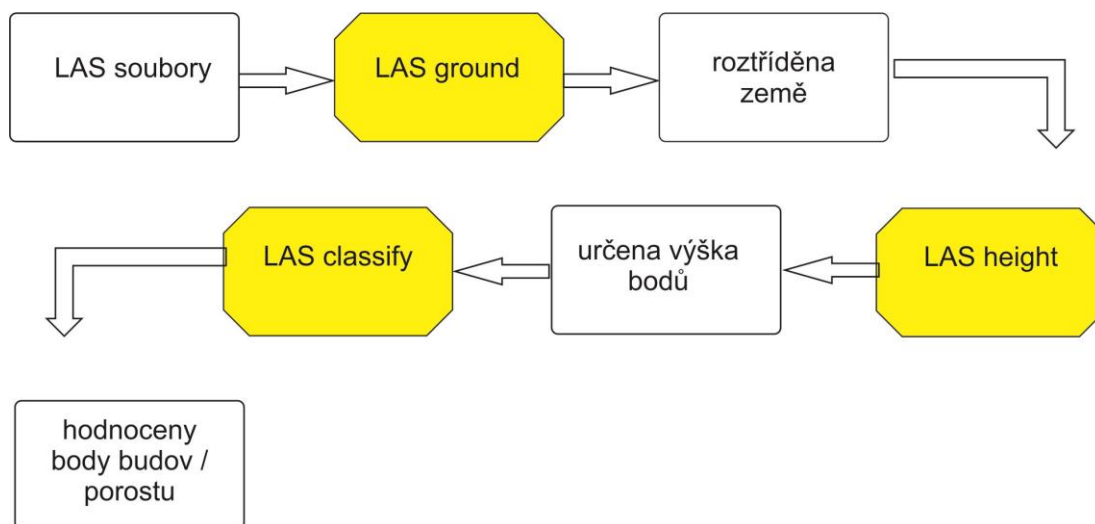
3.3. Mapa solárního potenciálu zájmového území

Vstupní data byla nejprve klasifikována programem LAStools (RAPIDLASSO, 2015b).

Nástrojem LASground byla originální LIDARová data rozříděna do „povrchových“ bodů (class = 2) a do „nepovrchových bodů“ (class = 1). Zájmové území zvolené pro výpočet se nachází v horách, a proto byl v modelu při výpočtech nastaven „typ povrchu“ jako „forest or hills, zrnitost (charakteristika míry členitosti povrchu) byla nastavena jako „extra fine“. Pro urychlení zpracování byla data uložena v kompresním formátu *.laz.

Při výpočtech je nejprve nástrojem LASheight určena výška objektů nad terénem. Ke zmenšení velikosti souborů jsou současně odstraněny všechny body nacházející se níže než -2 m pod úroveň terénu nebo které jsou vyšší než 50 m (obr. 6).

Nástroj LASclassify poté klasifikuje budovy a vysokou vegetaci (stromy). Klasifikace bodů vychází ze znalosti výšky povrchu terénu a v předchozích krocích určených bodů nástrojem již identifikovanou zemi a výšku bodů. Nástroj klasifikuje body o výšce vyšší jak 2 metry nad terénem. Zároveň jsou data uložena do bezztrátového formátu *.las.



Obr. 6: Postup klasifikace LIDARových dat pomocí programu LAStools

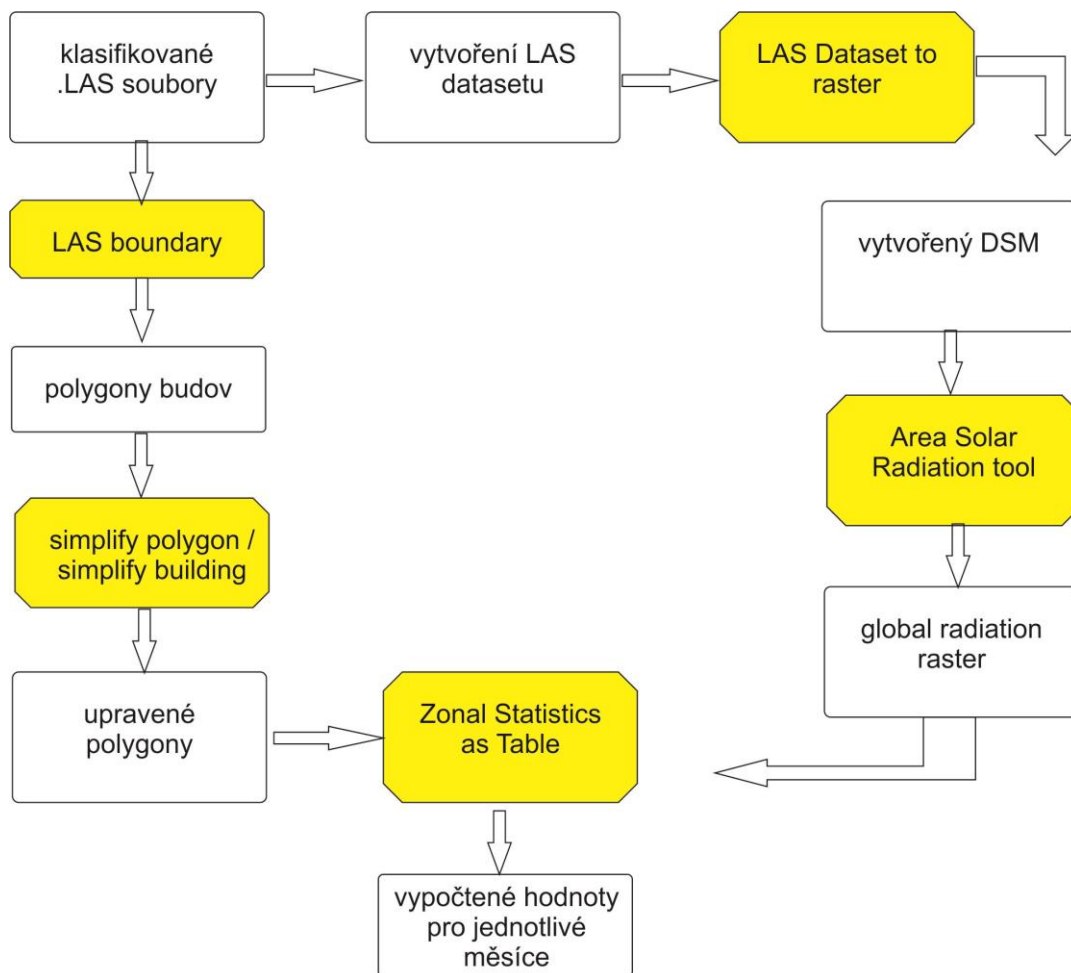
V předchozích krocích klasifikované .las soubory jsem nahrál do LAS datasetu a posléze pomocí nástroje LASdataset to raster jsem vytvořil digitální model povrchu (DSM) s rozlišením 0,25m², který byl užit i jako vstupní rastr v nástroji Area Solar Radiation (ASR) programu ArcGIS Desktop 10.2.2.

Katastrální území Špindlerův Mlýn není v digitální podobě k dispozici (ČÚZK, 2015). Půdorys („footprint“) budov jsem vytvořil nástrojem LASboundary („concavity = 1,5“), který ohraničí pole bodů vybrané třídy klasifikace. Tvar takto vytvořených polygonů byl zjednodušen nástrojem Simplify polygons a následně Simplify buildings Obr. 7).

Tvorba polygonů (půdorysů budov) závisí na správné klasifikaci bodů naměřených LIDARem, takže některé hodnocené budovy nemají vytvořeny správný půdorys. Tomu lze zabránit ruční opravou klasifikace bodů v souborech LIDARem získaných dat.

Výsledný výpočet plošné hustoty energie záření dopadajícího za jednotku času [kWh/m²] byl proveden nástrojem „Zonal Statistics as Table“ přepočítávajícím plošnou hustotu energie výsledného záření (určenou v „rastru celkového slunečního

záření“) (viz rovnice (1)) na plošnou hustotu energie záření dopadajícího za jednotku času na střechu nacházející se v zájmovém území. K ohraničení střech byla použita „polygonová vrstva střech budov“.



Obr. 7: Blokové schéma výpočtu plošné hustoty energie dopadajícího záření

3.4. Vliv počátečních podmínek na přesnost výsledků

Posouzení vlivu rozlišení na přesnost výpočtů bylo provedeno následovně:

hodnoty solárního potenciálu odečtené v „měsíčních“ mapách zájmového území z jednotlivých střech jsou „hodnotami energie slunečního záření dopadajícího na jednotkovou plochu“; na velikosti jednotlivých střech tedy nezáleží. Odečtené hodnoty solárního potenciálu lze průměrovat – vypočítat jejich střední hodnotu a směrodatnou odchylku a poté výsledky hodnotit (viz kapitola 5). Změny solárního potenciálu v jednotlivých měsících průměrného roku byly v závislosti na rozlišení zkoumány na vzorku všech 403 střech, které se v zájmovém území nacházely.

Střední hodnota \bar{x} je definována jako

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n},$$

kde x_i je solární potenciál i -té střechy, n je počet hodnocených střech, tj. pro tuto práci $n=403$.

Směrodatná odchylka je definována jako

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (11)$$

Dále jsem určil relativní chybu

$$d_x = \left(\frac{u_A}{\bar{x}}\right) * 100. \quad (12)$$

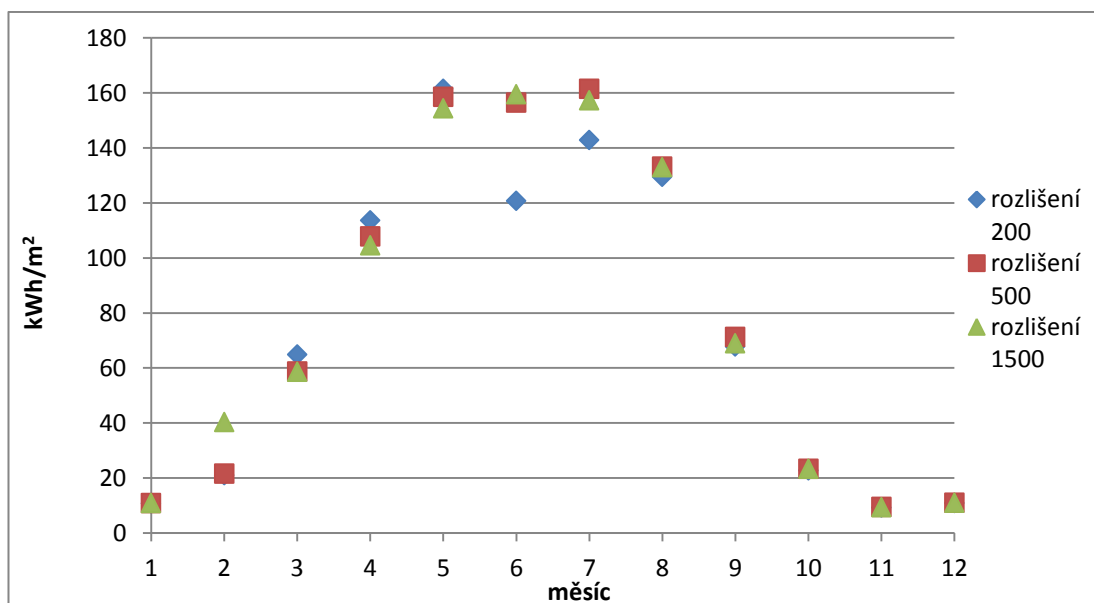
4. Výsledky

Výpočty, jejichž principy jsou popsány v předchozích kapitolách, vyústily v sestavení mapy solárního potenciálu zájmového území Špindlerův Mlýn, příklad sestavené mapy viz Příloha č. 1. V mapách jsou barevně odlišeny oblasti s rozdílnými hodnotami solárního potenciálu. Oblasti s nejvyšší hodnotou solárního potenciálu jsou značeny červeně, oblasti s velmi nízkou hodnotou jsou značeny modře.

Graf závislosti solárního potenciálu v jednotlivých měsících v závislosti na volbě rozlišení (200, 500 a 1500) naznačuje, že hodnoty solárního potenciálu nejvíce kolísaly v období květen až červenec pro hodnoty vypočtené při rozlišení 200 (Obr. 8).

Grafy vývoje hodnot solárního potenciálu v jednotlivých měsících včetně standardních odchylek jsou v Přílohách č. 4,5,6. Je z nich patrné, že výsledky získané při vyšších rozlišeních (500 a 1500) mají větší rozptyl, než hodnoty vypočtené při rozlišení 200. Relativní chyba, viz rovnice (12), přitom ani v jednom případě nepřekročila 5,2 % (viz Tab. 3). Nejnížší je pro hodnoty získané při rozlišení 200, maximálních hodnot dosahuje nejčastěji při rozlišení 1500.

Současně se při podrobném zkoumání hodnocených vzorků všech střech ukazuje, že při změně rozlišení 200, 500, resp. 1500 dochází v některých případech (jednotlivé střechy) i ke změnám rozřídění.



Obr. 8: Srovnání vývoje solárního potenciálu v jednotlivých měsících při různých rozlišeních

Solární potenciál									
rozlišení	200			500			1500		
měsíc	$G_R [\frac{kWh}{m^2}]$	$u_A [\frac{kWh}{m^2}]$	d_x [%]	$G_R [\frac{kWh}{m^2}]$	$u_A [\frac{kWh}{m^2}]$	d_x [%]	$G_R [\frac{kWh}{m^2}]$	$u_A [\frac{kWh}{m^2}]$	d_x [%]
I	10,7	0,1	1	10,9	0,1	1	10,9	0,1	1
II	21	0,2	1,1	21,6	0,2	1,1	40,3	0,6	1,4
III	64,9	0,6	1	58,7	0,6	1	58,6	0,6	1
IV	113,7	1	0,9	107,8	1	0,9	104,6	1	1
V	161,5	1,4	0,8	158,6	1,4	0,7	154,4	1,4	0,9
VI	120,8	1,1	0,9	156,5	0,8	5,1	159,6	1,4	0,9
VII	142,9	1,2	0,9	161,4	1,4	0,8	157,3	8	5,1
VIII	129,5	1,2	0,9	133,2	6,7	5,1	133	6,7	5,1
IX	67,8	0,7	1	71,3	0,7	1	68,9	3,5	5,1
X	22,8	0,3	11	23,4	0,3	1,1	23,3	1,2	5,1
XI	9,3	0,1	1	9,4	0,1	1	9,4	0,5	5,1
XII	10,8	0,1	0,9	11	0,1	0,9	11	0,6	5,1
Roční součet	875,7			923,8			931,3		

Tab. 3: Solární potenciál G_R v jednotlivých měsících a pro různá rozlišení, u_A je směrodatná odchylka a d_x je relativní chyba

hodnocený měsíc	rozlišení 200		rozlišení 500		rozlišení 1500	
	délka výpočtu [hod]					
leden	18,45	a ₁	18,42	a	36,13	b
únor	18,65	a ₁	18,48	a	40,85	b
březen	12,75	a ₁	19,18	a	116,07	a
duben	12,60	a ₁	19,80	a	56,43	b
květen	11,92	a ₁	19,93	a	44,30	c
červen	8,62	a	21,37	a	111,42	c
červenec	8,90	a	20,65	a	56,37	d
srpen	8,82	a	19,63	a	56,55	d
září	8,83	a	19,78	a	56,48	d
říjen	8,80	a	18,42	a	52,18	d
listopad	8,20	a	17,82	a	50,48	d
prosinec	7,93	a	17,85	a	50,03	d

Tab. 4: Strojový čas potřebný k výpočtu solárního potenciálu

Použité konfigurace počítačů:

- a₁ – PC – 12 GB RAM, 64 bit CPU, počítáno pro území s dvojnásobnou rozlohou;
- a – PC – 12 GB RAM, 64 bit CPU, oříznuté území kvůli chybějícím LIDAR datům;
- b – PC – 36 GB RAM, 64 bit CPU
- c – PC – 8 GB RAM, 64 bit CPU
- d – PC – 8 GB RAM, 64 bit CPU

Hodnota ročního solárního potenciálu	Vhodnost střechy ke stavbě FVE	Hodnota ročního solárního potenciálu
	vhodné	> 792 kWh/m ²
792 kWh/m ² >	středně vhodné	> 652 kWh/m ²
652 kWh/m ² >	nevhodné	>0 kWh/m ²

Tab. 5: Posuzování vhodnosti střech k instalaci FVE v zájmovém území Špindlerův Mlýn dle (MAREŠOVÁ, 2014); přepočtení vychází z výsledků získaných při rozlišení („sky size“) 1500

Vytvořené mapy solárního potenciálu (příklad viz Příloha č. 1) lze užít i k rozřídění střech budov do tří tříd dle jejich vhodnosti k instalaci FVE. Vhodnost střechy k instalaci FVE posuzují dle metodiky uvedené v (MAREŠOVÁ, 2014). Podkladem k přepočtu byly hodnoty solárního potenciálu vypočtené při rozlišení („sky size“) 1500, mají ale obecnou platnost. Jako „vhodné ke stavbě FVE“ jsou zvoleny střechy s ročním solárním potenciálem ve výši minimálně 85 % ročního solárního potenciálu celé zájmové oblasti, střechy „středně vhodné ke stavbě FVE“ mají minimální solární potenciál 70 %; střechy „nevhodné“ mají solární potenciál nižší než 70 % (Tab. 5).

V Příloze č. 3 je porovnání zatřídění budov pro solární potenciál vypočtený při rozlišení 200 a 1500. Je vidět, že vyjma jednoho objektu je zatřídění v obou případech stejné.

Průměrování přes hodnoty za celé období může vyvolat kolísání.

Při přípravě této BP byla provedena i studie mající za úkol zjistit, jaké údaje udávají jiní autoři při popisu výsledků získaných užitím GIS systémů. Studie zahrnuje 14 prací, výsledky jsou uvedeny v (Tab. 6). Z rešerše vyplynulo, že většina autorů uvádí rozlišení DSM/DEM, v případě užití ASR občas uvádějí rozlišení „sky size“, mezi uvedenými převažuje rozlišení 200. Půdorys („footprint“) budov autoři zmiňují obvykle jen v případech výpočtu solárního potenciálu pro střechy budov.

Výsledný rastr nástroje ASR je citlivý na správné nastavení vstupních parametrů, je proto důležité uvádět jejich hodnoty, je významné např. rozlišení rastru DSM/DEM, tj. vstupní vrstvy nástroje ASR. Přesnost prostorového rozlišení modelu terénu přímo ovlivňuje přesnost výsledného rastru. Objekty na střeše, např. satelity, komíny ap., jsou často nižší než 1m, vhodné prostorové měřítko rastru by mělo být alespoň 1m² (CHOW et al., 2014). Lze doporučit, aby práce obsahovaly přesné hodnoty nastavení vstupních parametrů (např. různá volba rozlišení DSM/DEM může změnit solární potenciál budovy).

autor	Rozlišení DEM / DSM	zdroj dat	sky size	půdorys budov	nástroj
Kodysh et al., 2013	1 m ²	LIDAR	200	LIDAR	ASR
Redweik et al., 2013	1 m ²	LIDAR	Neuvádí	Neuvádí	Matlab SOL
Santos et al., 2014	1 m ²	LIDAR	Neuvádí	Mapa Lisabonu z roku 1998 (1:1000) aktualizovaná pro rok vzniku LIDARových dat	ASR
Sarralde et al., 2015	Neuvádí	LSAO (Lower Layer Super Output Area)	Neuvádí	Neuvádí	ASR pro střechy a Solar Acces Analysis (autodesk) pro fasády
Agugiaro et al., 2012	1 m ² , resp. 4 m ²	LIDAR	Neuvádí	Katastrální vektorová mapa (1:1000) topografická mapa (1:10 000) s půdorysy budov	r-sun GRASS GIS
Brito et al., 2012	1 bod/m ²	Neuvádí	Neuvádí	tvorba DTM a DSM z LIDARu	ASR
Leitelt, 2010	8 ft ²	LIDAR	Neuvádí	Vektorový půdorys	ASR
Gastli et al., 2010	3 km ²	Neuvádí	Neuvádí	neprováděli	ASR
Aguayo, 2013	Neuvádí	LIDAR	200	LIDAR	ASR
Chow et al., 2014	0,25 m ²	CAD data (.skp)	Neuvádí	neprováděli	ASR
Carl, 2014	4 m ²	LIDAR	200	TMK parcel a letecké snímkování	ASR
Brand, 2013	1 m ²	LIDAR	512	LIDAR	ASR
Nakanishi, 2010	4 m ²	LIDAR	1024	polygony	ASR
Hofierka et al., 2009	1m ²	topographic map	Neuvádí	orthofotomapa	r-sun GRASS GIS

Tab. 6: Přehled způsobů popisu užitých různými autory k zápisu výsledků získaných užitím GIS systémů

5. Diskuse

Prostorová přesnost půdorysů (polygonů) budov závisí na správné klasifikaci bodů z LIDARových dat; nepřesnosti způsobují, že některé budovy nemají v mapách zakreslen správný půdorys. Tvar půdorysů lze ručně opravit změnou klasifikace těchto bodů. Ruční oprava jednotlivých objektů v rozsáhlých územích („bod po bodu“) je však velmi zdlouhavá a stěží uskutečnitelná, proto nebyla provedena.

Hodnoty propustnosti atmosféry v jednotlivých měsících užití ve výpočtech byly vzaty z databáze GAISMA. Tyto hodnoty jsou průměrnými hodnotami měsíčních propustností z období mezi červencem 1983 a červnem 2005. Jiné hodnoty propustnosti k dispozici nebyly. Provedené výpočty solárního potenciálu i na jejich základě sestavené mapy se tudíž týkají výhradně průměrných hodnot solárního potenciálu za celé období 1983-2005. Na velikost a průběh hodnot solárního potenciálu v jednotlivých letech z nich proto usuzovat nelze. Zpřesnění vypočtených hodnot solárního potenciálu pro jednotlivé roky/měsíce by zřejmě bylo možné s přihlédnutím k stavu atmosféry a počasí v daném období, bližší údaje o meteorologických a atmosférických jevech však k dispozici nebyly. Výsledek, dle zadání BP „vliv rozlišení na výpočet solárního potenciálu“ tato skutečnost však neovlivní.

Vysoké hodnoty relativní chyby v některých měsících mohou souviset se změnami počasí v období let 1983-2005 a s nimi souvisejícími změnami slunečního osvětlení. Srovnáme-li hodnoty solárního potenciálu získané při různých rozlišeních (200, 500 a 1500) v jednotlivých měsících navzájem (Tab. 3), je vidět, že hodnoty solárního potenciálu nejvíce kolísají v období květen-červenec. Nejvyšší kolísání vykazují hodnoty slunečního potenciálu pro rozlišení 200.

Je zajímavé, že autoři ASR v článku (FU et RICH, 1999) uvádějí „Zvyšování hodnoty rozlišení („sky size“) nad výchozí hodnotu 200 nezlepšuje významně přesnost, ale velice zvyšuje výpočetní čas“, kdežto v manuálu (ARCGIS HELP 10.1, 2015a) se upozorňuje, že se zvyšující se hodnotou rozlišení („sky size“) se přesnost modelu zvyšuje a narůstá potřebný strojový čas. Tentýž zdroj tvrdí, že při nastaveném denním intervalu menším než 14 dní by měla být užitá vyšší hodnota rozlišení. (Při výpočtu složky solárního potenciálu odpovídajícího přímému záření je mapa pohybu Slunce užitá k určení polohy Slunce na obloze v určitém časovém

intervalu. Při nízkém rozlišení může mapa pohybu Slunce přesahovat plochu přiřazenou rozlišením. Výsledkem může být nižší, či nulová hodnota složky solárního potenciálu. K zpřesnění výsledku má být zvýšeno rozlišení. Popsaná situace mohla nastat při výpočtech při rozlišení 200 a 500 pro měsíc únor (Tab. 3), neboť Slunce se v tuto dobu nachází nízko nad obzorem terénu.)

Při výpočtech jsem se potýkal s jejich časovou náročností. Proto vyvstala potřeba použít k výpočtu více počítačů. Rychlost výpočtu byla na počítačích o různých konfiguracích rozdílná. Všechny použité počítače měly 64 bitovou architekturu procesoru, lišily se pouze velikostí paměti RAM. Výpočet byl prováděn i v prostředí nového programu ArcGIS Pro, ale pro mechanickou závadu počítače byl nedokončen. Rychlost tohoto výpočtu byla zřejmě srovnatelná s rychlostí výpočtu v prostředí ArcGIS Desktop 10.2.2, ve kterém byla všechna data na všech počítačích zpracovávána.

Výpočet solárního potenciálu při rozlišení 200 byl zpočátku prováděn pro větší území. Toto území však bylo jen částečně pokryto „LIDARovými“ daty, výpočet byl navíc velmi zdlouhavý. Zájmové území bylo proto zmenšeno a již sestavené mapy „oříznuty“ (zredukovány). Zbývající výpočty při rozlišení 200 a všechny výpočty při rozlišení 500 a 1500 již byly provedeny pro „oříznuté“ (zredukované) území. Podrobněji viz údaje v (Tab. 4). Náročnost na strojový čas lze nejnázat srovnávat pro výpočty v PC s 12 GB RAM a 64 bit CPU, v (Tab. 4) značené jako „a“. Ukázalo se, že současně se zvyšováním rozlišení z 200 na 500 násobně roste výpočetní doba. Časová tíseň při provádění výpočtů způsobila, že výpočty solárního potenciálu při rozlišení 1500 byly prováděny na jiném počítači a přímé porovnání je nemožné.

Během výpočtů byly namátkově sledovány hodnoty využití CPU a paměti RAM, jejich využití bylo vždy pod 60%. Nízké využití CPU a paměti RAM i dlouhé výpočetní doby by mohly souviset s „background processingem u 64 – bitové architektury procesorů a nemožnosti jejich plného vytížení programem.

Veškeré mnou získané roční hodnoty solárního potenciálu pro Špindlerův Mlýn při různých rozlišeních nepřesahují 1000 kWh/m². (HOFIERKA et al., 2014) uvádí průměrnou roční hodnotu celkového dopadajícího záření pro oblast Krkonoš pod 1200 kWh/m². (PVGIS, 2015) udává hodnotu 1120 kWh/m². Mnou vypočtené

hodnoty (Tab. 3) jsou nižší než výše jmenované zdroje. To by mohlo být způsobeno jemnějším měřítkem DSM užitého ve výpočtu celkového slunečního záření.

Rozdíly solárních potenciálů			
[kWh/m ²]	$G_{R_{1500}} - G_{R_{500}}$	$G_{R_{500}} - G_{R_{200}}$	$G_{R_{1500}} - G_{R_{500}}$
Δ [kWh/m ²]	55,781	4,8276	7,505
%	6,0	5,2	0,8

Tab. 7: Srovnání rozdílů ročních solárních potenciálů vypočtených při různých rozlišeních

Ke zjištění rozdílů jednotlivých rozlišení byly určeny roční solární potenciály (Tab. 3) a následně určeny rozdíly hodnot solárních potenciálů vypočtených při různých rozlišeních (Tab. 7). Ukazuje se, že hodnoty ročních solárních potenciálů jsou prakticky shodné, liší se max. o 6%, což je ve shodě se závěry práce (FU et RICH, 1999) a v rozporu s doporučením manuálu (ARCGIS HELP 10.1, 2015a), neboť zpřesnění výpočtu zjištěno nebylo.

6. Závěr

Hlavním cílem práce byl výpočet solárního potenciálu Špindlerova Mlýna a následné zhodnocení vlivu rozlišení „sky size“ na přesnost výpočtu solárního potenciálu.

Výpočty „měsíčních“ hodnot solárního potenciálu byly provedeny pro tři různé hodnoty rozlišení („sky size“).

Přesnost získaných hodnot a její vliv na rozdílnost výsledků je porovnávána výpočty střední hodnoty, směrodatné odchylky a relativní chyby. Hodnocený vzorek zájmového území obsahuje 403 střech, tudíž hodnocený soubor obsahuje 403 nezávislých hodnot. Relativní chyba ani v jednom případě nepřekročila 5,2 %. Vliv volby rozlišení („sky size“) byl hodnocen srovnáním ročních hodnot solárního potenciálu zájmového území (vypočtených při rozlišení („sky size“) 200; 500 a 1500), mezi kterými nebyl zjištěn výrazný rozdíl, liší se maximálně o 6%.

Mnou vypočtené roční hodnoty solárního potenciálu jsou srovnatelné s hodnotami uváděnými jinými autory. (HOFIERKA et al., 2014; PVGIS, 2015)

Byla porovnávána i časová náročnost výpočtů. Ukázalo se, že se zvyšováním rozlišení násobně roste výpočetní doba, nicméně vzhledem k užití různých počítačů nelze vyslovit jednoznačný závěr.

Součástí práce je i studie zjišťující, jaké údaje udávají jiní autoři při popisu výsledků získaných užitím GIS systémů. Studie zahrnuje 14 prací. Jejich porovnání vede k závěru, že uvádění přesných hodnot nastavení vstupních parametrů je velmi důležité (např. různá volba rozlišení DSM/DEM může změnit solární potenciál budovy).

Mé výsledky jsou v souladu se závěry práce (FU et RICH, 1999) a překvapivě v rozporu s manuálem (ARCGIS HELP 10.1, 2015a). Zdá se, že při výpočtech solárního potenciálu je nejvhodnější užít základní („defaultní“) nastavení hodnoty rozlišení („sky size“). Přesnost výsledků bude srovnatelná s výsledky, které bychom obdrželi při výpočtech s vyšším rozlišením a přitom výrazně ušetříme strojový čas.

7. Přehled literatury a použitých zdrojů

AGUAYO P., 2013: Solar Energy Potential Analysis at Building Scale Using LIDAR, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada

AGUGIARO G., NEX F., REMONDINO F., DE FILIPPI R., DROGHETTI S. et FURLANELLO C., 2012: Solar Radiation Estimation on Building Roofs and Web-based Solar Cadastre, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I-2: 177 - 182

ARCGIS HELP 10.1, 2015a: Area Solar Radiation (Spatial Analyst), ArcGIS Resources, online: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Area_Solar_Radiation/009z000000t5000000/, cit. 6. 2. 2015

ARCGIS HELP 10.1, 2015b: Managing elevation data: Part 1: About elevation data, ArcGIS Resources, online: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/009t0000023w000000>, cit. 26. 2. 2015

ARCGIS HELP 10.1, 2015c: What is lidar data?, ArcGIS Resources, online: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/015w00000041000000>, cit. 26. 2. 2015

ARCGIS HELP 10.1, 2015d: Modeling solar radiation, ArcGIS Resources, online: http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Modeling_solar_radiation/009z000000t9000000/, cit. 26. 2. 2015

ARCGIS HELP 10.2, 2015: How solar radiation is calculated, ArcGIS Resources, online: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#/009z000000tm000000>, cit. 20. 3. 2015

BRANDT D. C., 2013: Rooftop solar capacity modeling using GIS within the City of Stillwater, MN, University of Wisconsin, River Falls, USA

BRITO M. C., GOMES N., SANTOS T. et TENEDÓRIO J. A., 2012: Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data, Solar Energy 86: 283 - 288

CALR C., 2014: Calculating solar photovoltaic potential on residential rooftops in Kailua Kona, Hawaii, Faculty of the USC Graduate School, University of Southern California, USA

ČÚZK, 2015: Český úřad zeměměřický a katastrální, Digitalizace katastrálních map, online: <http://www.cuzk.cz/Katastr-nemovitosti/Digitalizace-a-vedeni-katastralnich-map/Digitalizace-katastralnich-map/Digitalizace-katastralnich-map.aspx>, cit. 20. 3. 2015

DOLANSKÝ T., 2004: Lidary a letecké laserové snímkování, Acta Universitatis Purkyniana n. 99, UJEP FŽP, Ústí nad Labem, 100 s.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2015: Solar Constant, online: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/552889/solar-constant>, cit. 8. 2. 2015

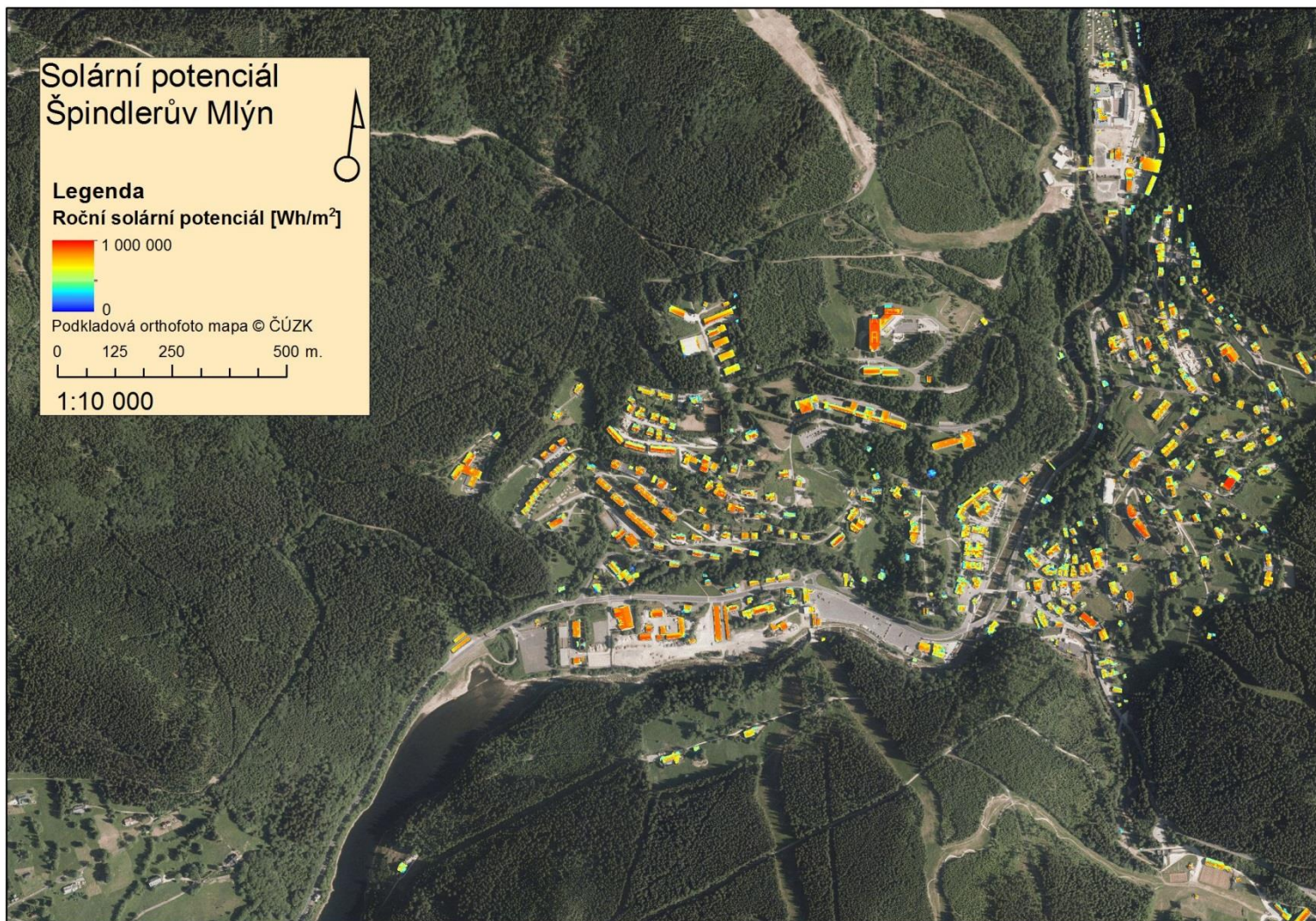
FU P. et RICH P. M., 1999: Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales, online: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>, cit. 31. 1. 2015

- GAISMA, 2015:** Sunrise, sunset, dawn and dusk times around the World!, online: www.gaisma.com/en/location/Vrchlabi.html, cit: 28. 1. 2015
- GASTLI A. et CHARABI Y., 2010:** Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 790 - 797
- GIS.VSB, 2015:** Studijní materiály, Institut geoinformatiky, VŠB - TUO, Ostrava, online: <http://gis.vsb.cz/vojtek/index.php?page=/dict/index#Rastrov%C3%BDDatovyModel>, cit. 20. 3. 2015
- GSI, 2015:** Geospatial Information Authority of Japan, online: <http://www.gsi.go.jp/WNEW/TEC-NEWS/2007-tec172.html>, cit. 1. 3. 2015
- HOFIERKA J. et KAŇUK J., 2009:** Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Renewable Energy* 34/10: 2206-2214
- HOFIERKA J., KAŇUK J. et GALLAY M., 2014:** Spatial distribution of photovoltaic power plants in relation to a solar resrce potential: a case study of the Czech Republic and Slovakia, *Moravian Geographical Reports* 22/2
- HORÁLEK Petr, 2010:** Studium jasu oblohy, Přírodovědecká fakulta, Masarykova Univerzita, Brno
- CHOW A., FUNG A. S. et LI S., 2014:** GIS Modeling of Solar Neighborhood Potential at a Fine Statiotemporal Resolution, *Buildings* 4: 195 - 206
- JOCHEM, A., HÖFLE B., WICHMANN V., RUTZINGER M. et ZIPF A., 2012:** Area-wide roof plane segmentation in airborne LiDAR point clouds, *Computers, Environment and Urban Systems* 36: 54–64
- KODYSH, J. B., OMITAOMU O. A., BHADURI B. L. et NEISH B.S., 2013:** Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society* 8: 31–41.
- LE CHEVALIER F., 2002:** Principles of Radar and Sonar Signal Processing, Principles of radar and sonar signal processing, Artech House, Norwood, USA.
- LEITELT R. L., 2010:** Developing a Solar Energy Potential Map for Chapel Hill, NC, University of North Carolina at Chapel Hill, USA
- LEPIL, O. et KUPKA Z., 1996:** Fyzika pro gymnázia: optika. 2. vyd. Praha: Prometheus, 167 s.
- MAPDWELL, 2014:** Mapdwell, online: <http://www.mapdwell.com/en>, cit. 1. 11. 2014.
- MAREŠOVÁ E, 2014:** LIDAR based estimation of roof-top photovoltaic potential of Wageningen, Laborator of Geo-Information Science and Remote Sensing, Wageninhen University and Research Centre, Wageningen, Nizozemí
- NAKANISHI T., 2010:** Identifying and Viewing Rooftop Solar Potential: A Case Study for the City of Redlands, California, University of Redlands, USA
- ORŠULÁK T. et PACINA J., 2010:** Digitální modely terénu, Centrum pro virtuální realitu a modelování krajiny, Ústí nad Labem, online: <http://gis.fzp.ujep.cz/DTM/3d.pdf>, cit. 25. 2. 2015

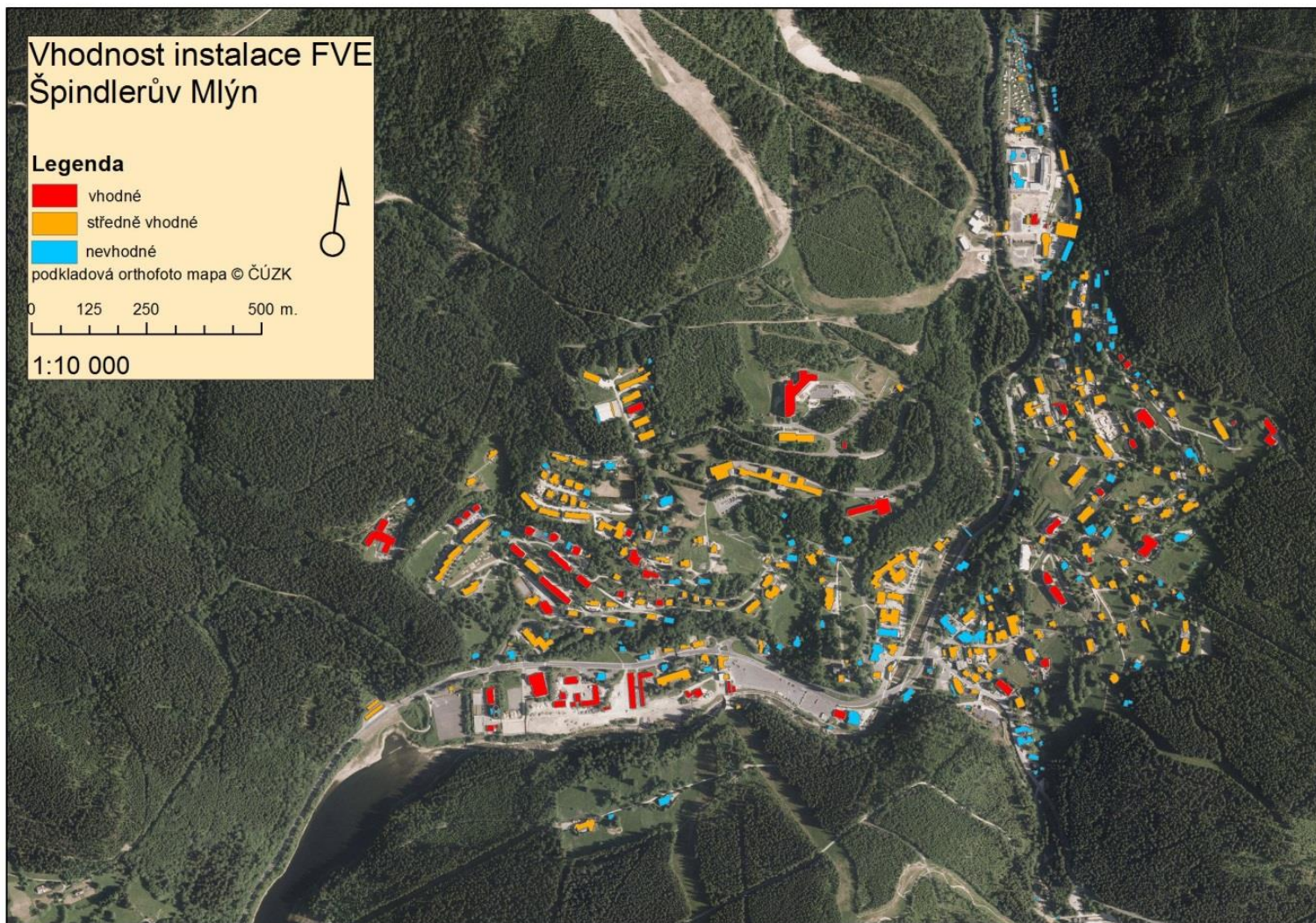
- PVGIS, 2015:** JRC's Institute For Energy and Transport – PVGIS – European Commission, JOINT Research Centre, online: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>, cit. 28. 1. 2015
- RAPIDLASSO, 2015a:** Restricting access to national lidar is it worth it, online: <http://rapidlasso.com/2014/11/30/restricting-access-to-national-lidar-is-it-worth-it/>, cit. 5. 2. 2015
- RAPIDLASSO, 2015b:** Discriminating vegetation from buildings, online: <http://rapidlasso.com/2014/10/23/discriminating-vegetation-from-buildings/>, cit. 25. 2. 2015
- REDWEIK P., CATITA C. et BRITO M., 2013:** Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape, *Solar Energy* 97: 332- 341
- RESTEP, 2015:** Regional Sustainable energy policy, online: <http://restep.vumop.cz>, cit. 25. 3. 2015
- RICH P. M., DUBAYAH R., HETRICK W. A. et SAVING S. C., 1994:** Using Viewshed models to calculate intercepted solar radiation: application in ekology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*: 524–529
- ROULOVÁ I., 2011:** Výstavba fotovoltaických elektráren ve vztahu k trvale udržitelnému hospodaření v krajině, Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta
- SANTOS T., GOMES N., FREIRE S., BRITO M. C., SANTOS L. et TENEDÓRIO J. A., 2014:** Applications of solar mapping in the urban environment, *Applied Geography* 51: 48 - 57
- SARRALDE J. J., QUINN D. J., WIESMANN D. et STEEMERS K., 2015:** Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London, *Renewable Energy* 73: 10 – 17
- SLAVÍČEK E. et WAGNER J., 1971:** Fyzika pro chemiky, Nakladatelství Technické Literatury, Praha, 699 s.
- SOLARATLAS, 2015:** Solaratlas Belin, online: <http://www.zonatlas.nl/home/>, cit. 25. 3. 2015
- SOLARKATASTER M-K, 2015:** Solarkataster Landkreis Mayen - Koblenz, online: <http://www.solarkataster-myk.de/> cit. 25. 3. 2015
- SOLARKATASTER, 2015:** Solarkataster, online: <http://www.solarkataster.ch/index.php>, cit. 25. 3. 2015
- WEHR A. et LOHR E., 1999:** Airborne laser scanning - and introduction and overview, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 68- 82,
- ZONATLAS, 2015:** Zonatlas home, online: <http://www.zonatlas.nl/home/>, cit. 25. 3. 2015

8. Přílohy

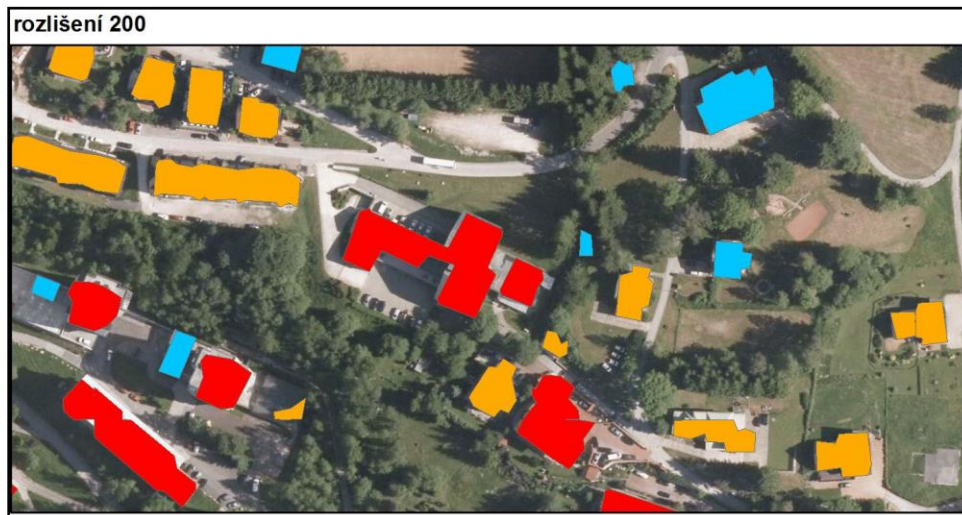
1. Mapa solárního potenciálu Špindlerova Mlýna, rozlišení 1500
2. Roztřídění objektů podle vhodnosti k instalaci FVE
3. Porovnání rozlišení 200 a 1500 u roztřídění vhodnosti instalace FVE
4. Graf vývoje hodnot solárního potenciálu v jednotlivých měsících pro rozlišení 200
5. Graf vývoje hodnot solárního potenciálu v jednotlivých měsících pro rozlišení 500
6. Graf vývoje hodnot solárního potenciálu v jednotlivých měsících pro rozlišení 1500



Příloha č. 1: Mapa solárního potenciálu Špindlerova Mlýna, rozlišení 1500



Příloha č. 2: Roztřídění objektů podle vhodnosti k instalaci FVE

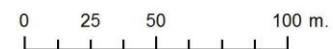


Vhodnost instalace FVE Porovnání rozlišení Špindlerův Mlýn

Legenda

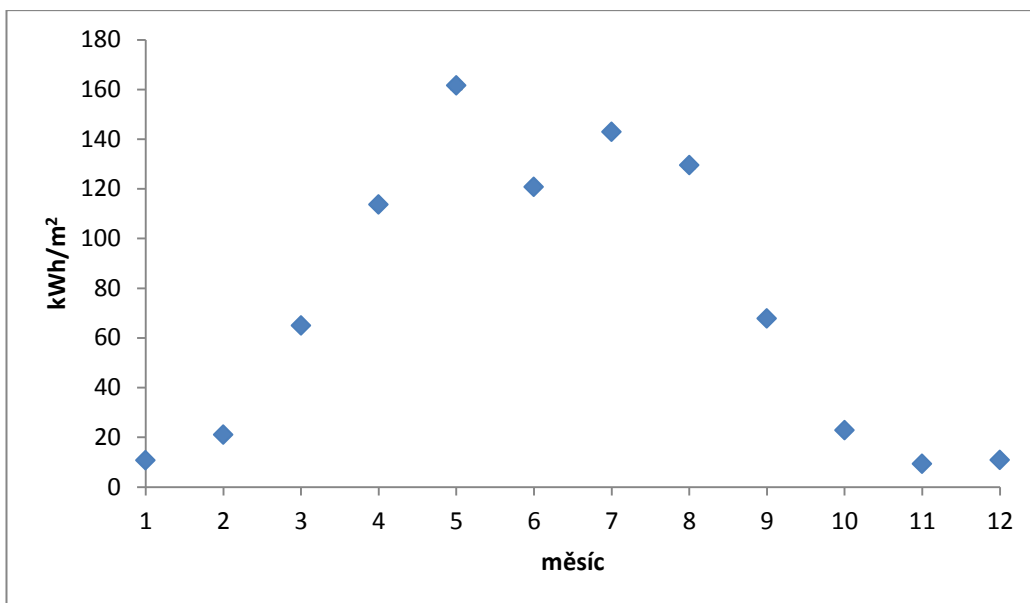
- vhodné
- středně vhodné
- nevhodné

podkladová orthofoto mapa © ČÚZK

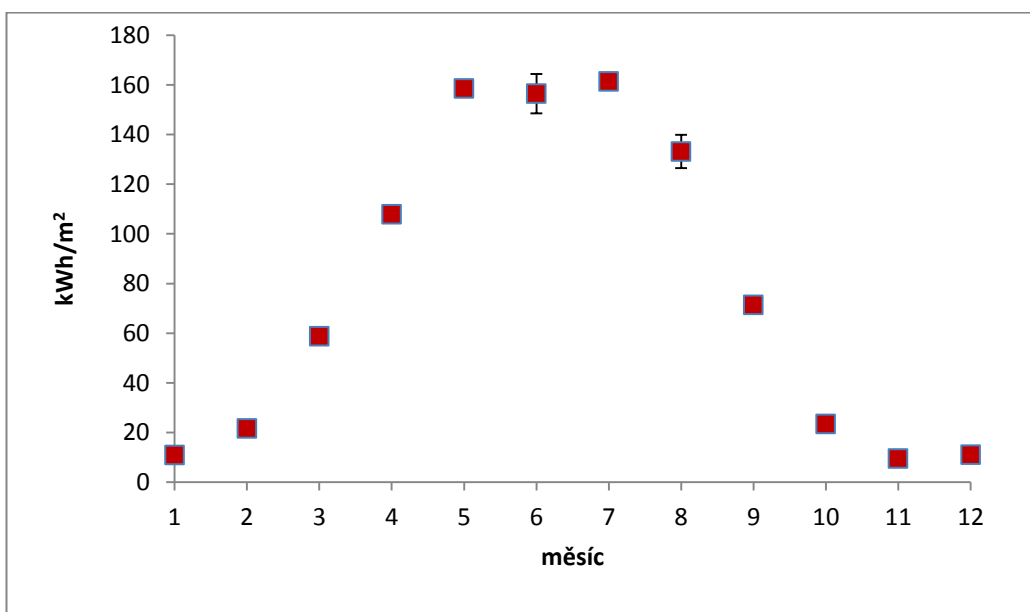


1:2 000

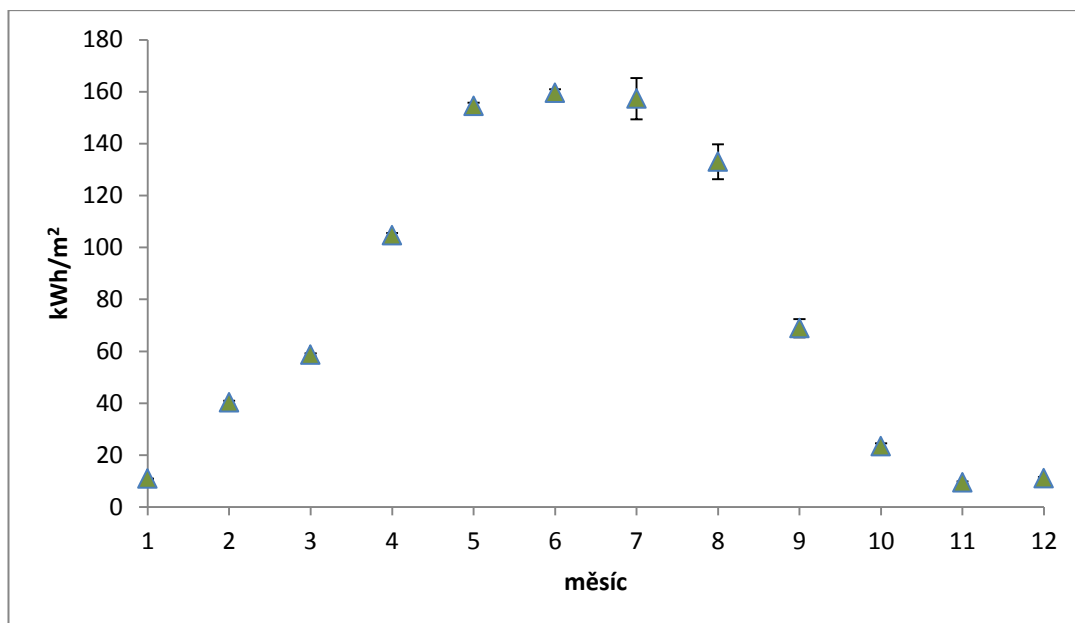
Příloha č. 3: Porovnání rozlišení 200 a 1500 u rozřídění vhodnosti instalace FVE



Příloha č. 4: Graf vývoje hodnot solárního potenciálu v jednotlivých měsících pro rozlišení 200



Příloha č. 5: Graf vývoje hodnot solárního potenciálu v jednotlivých měsících pro rozlišení 500



Příloha č. 6: Graf vývoje hodnot solárního potenciálu v jednotlivých měsících pro rozlišení 1500