

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta životního prostředí**

**Katedra aplikované geoinformatiky a územního  
plánování**



**Vliv rozlišení na odhad množství solárního záření  
pro střešní systémy**

**Bakalářská práce**

**Autor práce: Jan Malý**

**Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.**

© 2016 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Malý

Krajinářství

Název práce

**Vliv rozlišení na odhad množství solárního záření pro střešní systémy**

Název anglicky

**Influence of resolution on solar radiation estimation for rooftop solar systems**

---

### Cíle práce

- Výpočet solárního potenciálu modelových střech
- Zhodnocení vlivu použitého rozlišení na odhad solárního potenciálu

### Metodika

Solární energie je považována za jeden z nejuvhodnějších obnovitelných zdrojů, který má minimální negativní dopady na životní prostředí. Stanovení solárního potenciálu střech v urbanizovaném území je v posledních letech předmětem studia mnoha vědeckých prací. Zejména díky rostoucí dostupnosti dat leteckého laserového skenování a vhodných nástrojů GIS. Řešitel zpracuje literární rešerši z oblasti modelování solárního potenciálu, přičemž se zaměří na vliv rozlišení vstupních dat a na existující mapy solárního potenciálu. Řešitel vypočítá solární potenciál několika modelových střech a volbou různého rozlišení vstupních dat posoudí jeho vliv na odhadovaný potenciál.

## Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

## Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem řešitele.

---

## Doporučené zdroje informací

- Brito, M. C., Gomes, N., Santos, T., and Tenedório, J. A. , 2012. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy*, 86(1), 283-288.
- Hofierka, J. and Kanuk, J., 2009. Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open source solar radiation tools. *Renewable Energy* 34, 2206-2214.
- Hofierka, J., Kaňuk, J., and Gallay, M., 2014. Spatial distribution of photovoltaic power plants in relation to a solar resource potential. *Moravian Geographical Reports*, 22(2), 26-33.
- Kodysh, J. B., Omitaomu, O. A., Bhaduri, B. L., and Neish B. S., 2013. Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society* 8, 31-41.
- Sivek, M., Kavina, P., Jirásek, J. and Malečková, V., 2012. Czech Republic and indicative targets of the European Union for electricity generation from renewable sources. *Energy Policy* 44, 469-475.
- Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A. and Fayaz, H. , 2011. A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(4), 2149-2163.

---

## Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – FŽP

## Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 29. 2. 2016

**doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 7. 3. 2016

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 08. 04. 2016

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Vliv rozlišení na odhad množství solárního záření pro střešní systémy“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 12.4.2016

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za vedení práce a za projevenou ochotu a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat svojí rodině za podporu po celou dobu studia.

# Vliv rozlišení na odhad množství solárního záření pro střešní systémy

## Abstrakt

Solární energie je v posledních letech stále více diskutovaný alternativní zdroj pro výrobu elektřiny. Současné městské zástavby představují ideální prostory pro získávání ekologicky čisté energie pomocí instalace fotovoltaických systémů. Střešní plochy jsou skvělé alternativy pro velké fotovoltaické elektrárny, protože nezabírají místo na úrodných půdách a elektřina nemusí putovat nijak daleko. Tyto systémy mohou výrazně pomoci k energetické soběstačnosti měst, a proto jsou modelovány mapy solárního potenciálu, které pomáhají najít vhodná místa s nejlepšími podmínkami. Důležitým faktorem ovlivňujícím přesnost odhadů je použité rozlišení vstupních dat. S hrubým rozlišením může docházet ke ztrátě informací a naopak s příliš podrobným může být informací zbytečně moc. Cílem práce je analyzovat vybrané střechy v Peci pod Sněžkou a modelovat množství na ně dopadajícího slunečního záření. Dále zhodnotit vliv rozlišení vstupních dat na odhad solárního potenciálu. Z výsledků se jako ideální ukázalo rozlišení 0,25 m<sup>2</sup>, které podává dostatečně přesné odhady a zároveň je časově i finančně ekonomické.

**Klíčová slova:** solární potenciál, rozlišení, DEM, LiDAR, výpočet

# **Influence of resolution on solar radiation estimation for rooftop solar systems**

## **Abstract**

In recent years, solar energy has been increasingly discussed as an alternative source for electricity production. Contemporary urban areas are ideal for obtaining clean energy by installing photovoltaic systems. Roof areas are great alternatives for large photovoltaic power plants, because they do not take place on the fertile soils and electricity does not have to travel very far. These systems can contribute significantly to energy self-sufficiency of towns and therefore are modelled the solar potential maps to help finding suitable places with the best conditions. An important factor, affecting the accuracy of the estimates, is the used resolution of the input data. The coarse resolution may lose information and vice versa too detailed resolution may contain a bit too much information. The aim of this paper is to analyse selected roofs in Pec pod Sněžkou and model the amount of solar radiation which reaches them. Further to assess the effect of resolution of the input data for estimates of the solar potential. The results proved, that ideal resolution is 0,25 m<sup>2</sup>, which gives a sufficiently accurate estimates and is time consuming and financially economical.

**Keywords:** solar potential, resolution, DEM, LiDAR, calculation

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Literární rešerše.....	11
2.1	Sluneční záření .....	11
2.2	Potřeba určení solárního potenciálu .....	12
2.3	DEM .....	13
2.3.1	LiDAR.....	14
2.4	Solar analyst .....	16
2.4.1	Výpočet mapy viditelnosti .....	16
2.4.2	Výpočet sluneční mapy .....	17
2.4.3	Výpočet mapy oblohy .....	18
2.4.4	Výpočet solární mapy .....	19
2.5	Solární potenciál ve městech – Mapy solárního potenciálu .....	20
2.6	Rozlišení.....	23
2.7	Rastr a vektor.....	23
2.8	Vliv vstupních parametrů .....	24
2.8.1	Sky size rozlišení.....	24
2.8.2	DEM.....	25
2.9	Přesnější data pro DEM.....	25
3	Charakteristika území a metodika.....	27
3.1	Charakteristika území.....	27
3.2	Vstupní data.....	28



3.3	Metodika.....	28
4	Výsledky .....	29
4.1.1	DEM.....	29
4.1.2	Slope.....	30
4.1.3	Aspekt .....	32
4.1.4	Area radiation.....	33
4.2	Čas výpočtu .....	35
5	Diskuze.....	36
6	Závěr .....	39
7	Použitá literatura .....	40
8	Přílohy.....	43

# 1 Úvod

Sluneční záření jako alternativní zdroj energie je v posledních letech čím dál víc diskutované téma. Jako čistý a teoreticky nevyčerpatelný zdroj energie se společně se silou větru a vody zdá jako ideální náhrada za elektrárny používající k výrobě elektřiny fosilní paliva. Solární elektrárny v posledních letech zažily rychlý vývoj a ten se nezastaví ani v budoucnu (Dusonhet et al. 2015). Solární systémy se budou stále zdokonalovat a budou se stávat přístupnějšími a levnějšími.

Solární potenciál je obvykle studován pro velké plochy, ale realizace je často žádoucí v místním měřítku a zejména střešní plochy uvnitř městských oblastí přitahují zájem, pokud jde o instalaci solárních systémů (Santos et al. 2014). Tyto systémy mohou zlepšit soběstačnost dodávek elektřiny a mohou pomoci snížit emise skleníkových plynů v celých městských oblastech. Bohužel, některé střešní plochy jsou nevhodné pro instalaci solárních systémů. Pro stanovení vhodnosti k instalaci solárních systémů je třeba vzít v úvahu fyzické vlastnosti sledovaných ploch a zjistit jejich solární potenciál. Toho se dá dosáhnout různými způsoby. V poslední době je populární modelování pomocí Geografických informačních systémů.

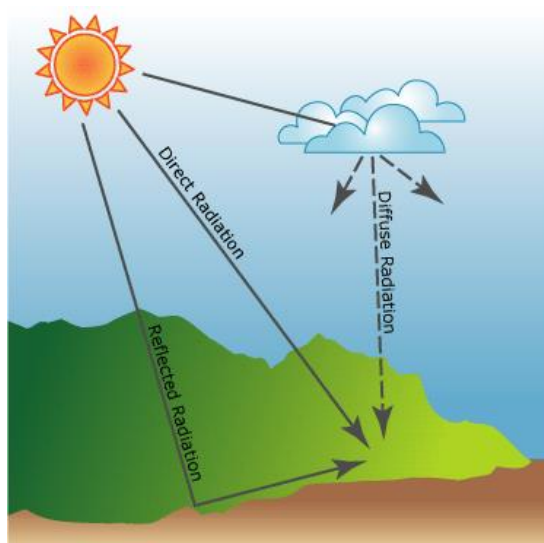
Vzniká stále víc map solárního potenciálu pro různá města světa s cílem informovat obyvatele a získat povědomí o možnostech využití sluneční energie (Feritas et al. 2015). Důležitým faktorem při tomto modelování je použité měřítko a rozlišení výsledných map, které může mít velký vliv na přesnost odhadů a tím pádem na správné zhodnocení instalace solárních systémů v dané situaci (Goodchild 2010).

Cílem této práce je modelovat sluneční záření dopadající na vybrané střešní systémy v několika rozlišeních, určit výsledný solární potenciál a zhodnotit jak se mění v závislosti na rozlišení.

## 2 Literární rešerše

### 2.1 Sluneční záření

Sluneční energie je proud elektromagnetického záření neboli sluneční záření vysílané z povrchu Slunce na osvětlenou stranu Země. Velikost sluneční energie dopadající na Zemi lze určit ze sluneční konstanty a průměru Země. Zářivý výkon Slunce směrem k Zemi je přibližně 170 miliard megawattů (Fu et Rich 1999). Sluneční záření dopadající na zemský povrch je výsledkem složitých interakcí energie mezi atmosférou a povrchem a je hlavním faktorem fyzikálních a biologických procesů na naší planetě. Skládá se z přímého, rozptýleného a odraženého záření (Obr. 1). Přímé tvoří, vzhledem k velké vzdálenosti Země od Slunce, svazek prakticky rovnoběžných paprsků. Rozptýlené (difúzní) vzniká rozptylem přímých slunečních paprsků na molekulách vzduchu, vodních kapkách a ledových krystalcích a na různých aerosolových částicích (Dubayah et Rich 1996). Díky rozptýlenému záření se jeví obloha jako modrá. Kdyby neexistovalo, jevila by se obloha i během dne jako černá s ostře zářícím slunečním kotoučem. Obecně platí, že přímé záření je největší složkou celkového záření a rozptýlené záření druhou. Záření odražené od okolní topografie obecně tvoří malou část celkového dopadajícího záření a v mnoha směrech ho lze zanedbat (Fu et Rich 1999).



Obr. 1 Znáornění přímého, rozptýleného a odraženého záření. (ArcGis hlelp 10 2016a)

Po dopadu na zemský povrch se záření přeměňuje buď na teplo, na kinetickou energii (energie větru a vody) nebo může být zpracováno při fotosyntéze. Hlavním faktorem, který na povrchu určuje prostorovou variabilitu slunečního záření, je topografie. Kombinace nadmořské výšky, orientace, sklonu a stínů vrhaných okolní topografií ovlivňuje množství přijatého slunečního záření. Tato variabilita se mění s časem během dne a ročního období a přispívá k variabilitě mikroklimatu, včetně faktorů, jako jsou teplota vzduchu a půdních režimů, evapotranspirace, tání sněhu, půdní vlhkosti a množství světla použitelného pro fotosyntézu (ArcGis help 10 2016a).

## **2.2 Potřeba určení solárního potenciálu**

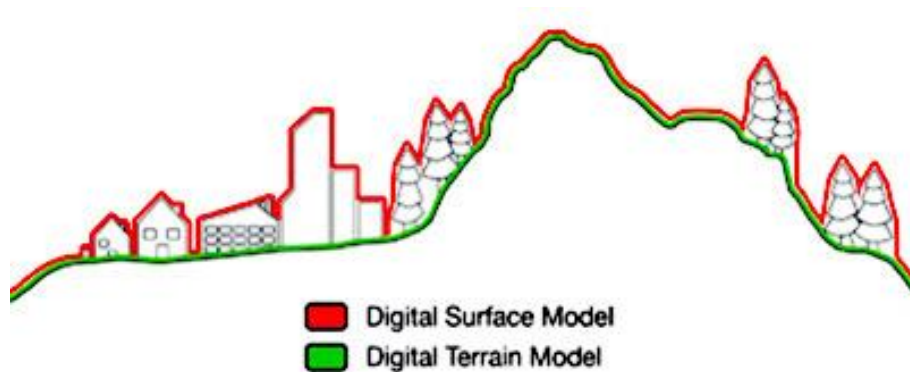
V posledních letech se stále zvyšuje zájem o využívání solární energie. Slunce jako obnovitelný, snadno dostupný a v porovnání s délkou života člověka nekonečný zdroj energie, se zdá jako ideální řešení pro náhradu fosilních paliv, které jsou vyčerpateľné. Právě proto zažila v poslední době fotovoltaika velký rozvoj a i díky státním podporám zelené energie, dotacím a snižováním nákladů na fotovoltaické elektrárny došlo k rozšíření solárních systémů mezi velké podniky i jednotlivé občany (Dusonhet et al. 2015). V letech 2009-2011 bylo v České republice postaveno více než 20 000 nových fotovoltaických elektráren s celkovou jmenovitou kapacitou 2100 MWp (Gallay et al. 2015). Znalost množství slunečního záření je žádoucí pro použití i v odlišných oblastech, jako je stavebnictví, zemědělství, lesnictví, meteorologie nebo ekologie.

V Evropě se nachází několik stovek pozemních meteorologických stanic přímo nebo nepřímo měřících sluneční záření. Chceme-li z těchto pozemních měření získat znalost o dopadajícím záření v každém místě zemského povrchu, používají se různé interpolační techniky. Prostorově kontinuální záření lze také odvodit přímo z meteorologických geostacionárních družic (např. METEOSAT). Zpracování družicových dat ale poskytuje méně přesné hodnoty, než pozemní měření. Výhodou je ale pokrytí na rozsáhlém území s časovým rozlišením 0,5 až 12 hodin (Hofierka et al. 2002). Využití geografických dat pro odhad solárního záření je prvním krokem k přesnému odhadu solárního potenciálu. Byly proto vyvinuty různé nástroje a rozšířeny do geografických informačních systémů (GIS), které modelují množství dopadajícího slunečního záření. Jako příklad můžeme

uvést PVForm, Radiance/Daylism, r.sun, SUN-AREA nebo Solar Analyst (Feritas et al. 2015). Každý nástroj používá rozdílné metody a výsledky se mohou v malé míře lišit. (Ruiz-Arias et al. 2009). Základem pro výpočty v těchto rozšířeních je digitální model převýšení (DEM).

### 2.3 DEM

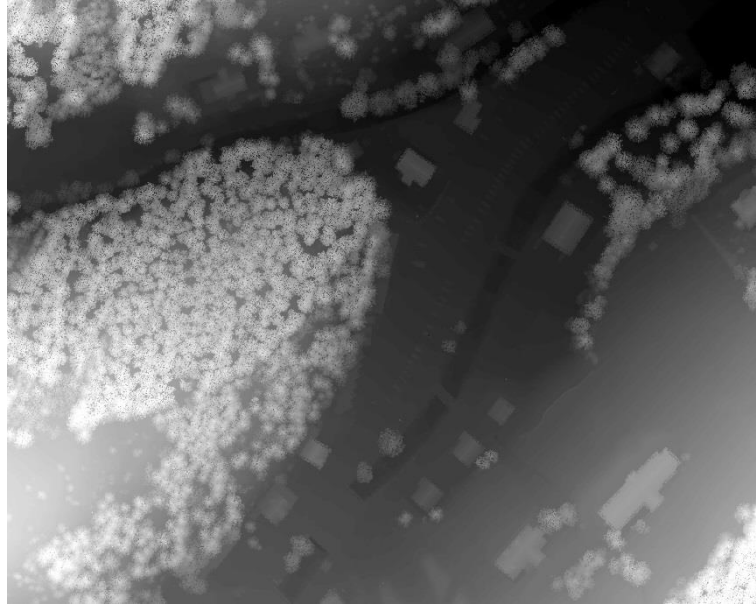
Je reprezentací souvislého zemského povrchu. Můžeme se setkat s dalšími dvěma označeními a to digitálním modelem terénu (DTM) a digitálním modelem povrchu (DSM). Zatímco DTM je modelem pouze terénu bez budov a vegetace, DSM zobrazuje vše nacházející se na povrchu (Obr. 2). Přitom oba patří do skupiny DEM a často se místo DTM používá jen DEM. (ArcGis help 10 2016b)



Obr. 2 Rozdíl mezi DSM a DTM (Geoimage, 2016)

Můžeme ho zobrazit nepravidelnou triangulační sítí (TIN), pomocí vektorových vrstevnic nebo jako rastr. Při modelování solárních map se jako vstupní data nejčastěji používá rastrová reprezentace terénu (Obr. 3). Je to 2D zobrazení plochy z leteckého pohledu rozdělené na čtvercovou síť buněk s předem definovanou velikostí. K jeho tvorbě se používá jedna z nejrozšířenějších funkcí v GIS a to prostorová interpolace. Jejím úkolem je odhad hodnoty určité proměnné v místech, která nebyla měřena, na základě naměřených hodnot. Jde vlastně o umělé zpřesnění prostoru mezi body datového souboru, které nahradí konečný počet pozorovaných bodů na potenciálně nekonečný počet (v rámci měřítka) (Goodchild 2010).

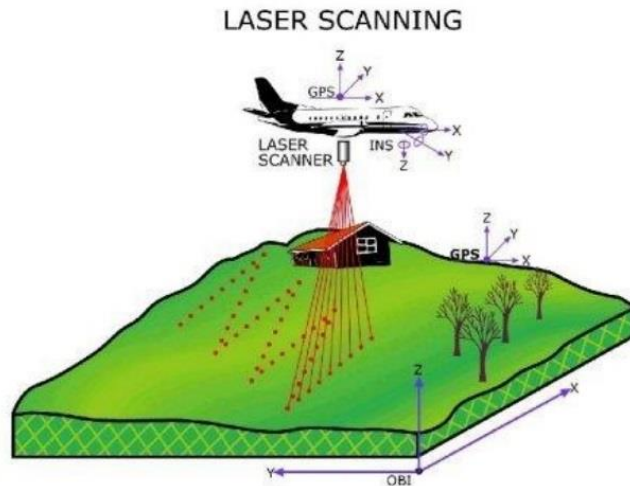
Každé prázdné rastrové buňce je tedy přidělena informace o nadmořské výšce. Přesnost dat určuje především rozlišení neboli velikost rastrové buňky. Podkladem pro tvorbu DEM jsou vektorové sady dat obsahující informace o poloze a nadmořské výšce jednotlivých bodů.



Obr. 3 Ukázka rastrového DEM (vlastní)

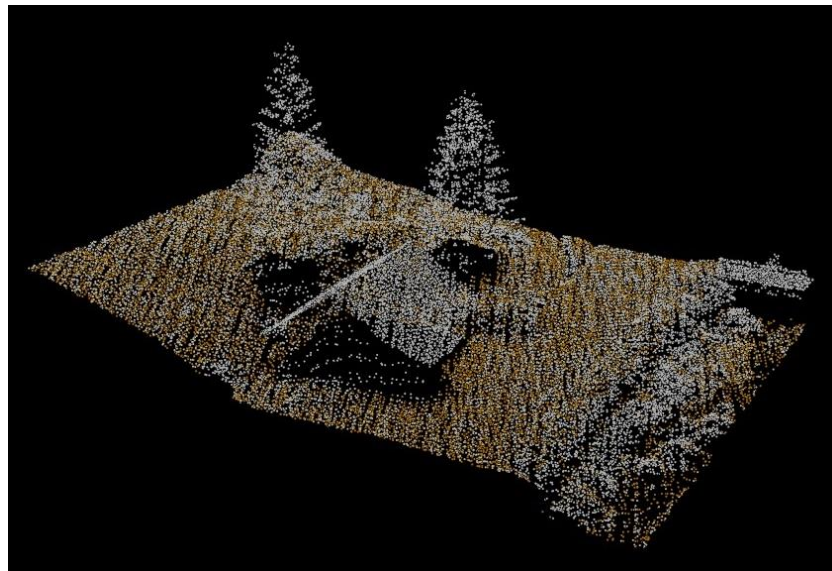
### 2.3.1 LiDAR

Jednou z možných metod jak získat data je letecké laserové skenování neboli Light Detection and Ranging. Pomocí emitoru, umístěného na letadle, je vysílána řada laserových paprsků, jejichž následné odrazy od snímaného povrchu přijímá detektor (Obr. 4). Obvykle se využívají spektra 1064 - 1540 nm, pro batymetrická měření cca 530 nm (měření hloubky moře) (Hippenstiel et Brownson 2012). Z rychlosti navrácení paprsku světla lze určit vzdálenost letadla od měřeného objektu, a ze znalosti směru vyslaného svazku paprsků a odvozené vzdálenosti lze určit polohu každého měřeného bodu. Letadla jsou také vybavena přijímačem GPS, který lokalizuje jejich polohu a inerciální měřicí jednotkou (IMU), která zaznamenává pohyb letadla během letu. Ta obsahuje záznam stoupání, otáčení a další informace, které v kombinaci s GPS určí přesnou polohu snímače v daném okamžiku (Wehr et Lohr 1999).



Obr. 4 – Letecké skenování (Hippenstiel et Brownson 2012)

Přesnost měření se liší na základě specifikace metody, letových podmínek, a povrchu měřeného území. Získaná data potom vytvoří "mračno bodů", které reprezentuje povrch měřeného území (Obr. 5). Primární data můžeme zpracovat pomocí automatizovaných funkcí. Metody se rozdělují na filtraci, která vyhledá pouze body ležící na jednom druhu povrchu (zpravidla terénu) a odstraní nežádoucí body a chyby, a na klasifikaci, která postupně všechny body rozdělí do předdefinovaných tříd (vegetace, střechy domů, atd.).



Obr. 5 Příklad LiDARového mračna bodů. (vlastní)

## 2.4 Solar analyst

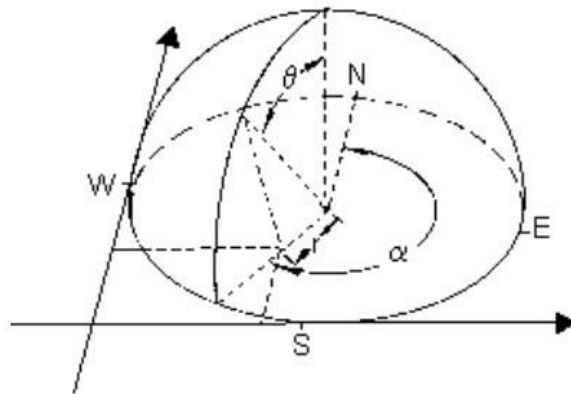
Jedním z rozšířených nástrojů pro určení solárního potenciálu je Solar Analyst, který je rozšířením ArcGIS. Umožňuje mapovat a analyzovat sluneční záření nad geografickými oblastmi v určitých časových obdobích. Poskytuje informace o přímém a rozptýleném záření, době přímého záření, sluneční mapu (sunmap), mapu oblohy (skymap) a mapu viditelnosti (viewshed) (Kodysh et al. 2013). Při výpočtech je zohledňována zeměpisná šířka, nadmořská výška, topografie, zastínění okolní topografií, atmosférické podmínky a zdánlivá poloha slunce. Výsledné výstupy lze snadno integrovat s dalšími prostorovými daty a například modelovat fyzikální a biologické procesy a jejich ovlivnění slunečním zářením (Fu et Rich 2000). Nástroje Solar Analyst mohou provádět výpočty pro bodové umístění nebo pro celou geografickou oblast za jakékoli časové období. Celý proces zahrnuje čtyři kroky (ArcGis help, 2016c).

### 2.4.1 Výpočet mapy viditelnosti

Protože záření může být výrazně ovlivněno topografií, vyžaduje klíčová součást výpočtu algoritmu generaci polokulové plochy reprezentující pohled na oblohu (Fu et Rich 1999). Poskytuje výhled na oblohu do všech směrů, její stínění okolní topografií a ukazuje viditelnou plochu oblohy. Oblast viditelného nebe hraje důležitou roli pro množství slunečního záření. Senzor umístěný na otevřeném poli má logicky vyšší oslunění než senzor umístěný v hlubokém kaňonu.

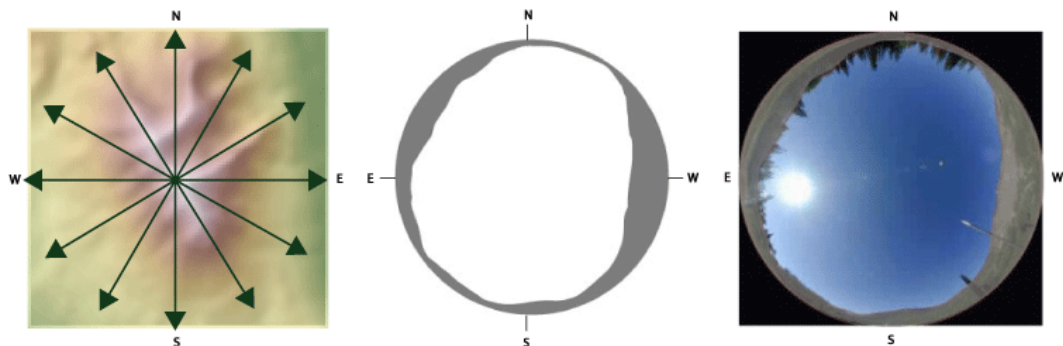
Mapa viditelnosti je rastrová reprezentace celé oblohy, která je viditelná nebo neviditelná z určitého místa. Viditelná oblast se vypočítá vyhledáváním ve specifikovaném počtu směrů kolem oblasti zájmu a stanovením maximálního úhlu překážky ve výhledu nebo úhlu horizontu. U všech ostatních nepropátraných směrů, jsou horizontální úhly interpolovány (ArcGis help, 2016a). Horizontální úhly jsou pak převedeny do polokulovitého systému souřadnic, čímž se převede trojrozměrný prostor na dvojrozměrný rastrový obraz. Každé buňce rastru viditelné oblasti je přiřazena hodnota, která má informaci o tom, zda je viditelná nebo stíněná ve směru k obloze. Umístění výstupních buněk (řádků a sloupců) odpovídá vstupnímu zenitovému úhlu a azimutálnímu úhlu na polokouli směrů. (Fu et Rich 1999)(Obr. 6).





Obr. 6 Horizontální úhly jsou převedeny na systém souřadnic pro polokouli (Fu et. Rich 1999)

Níže uvedený obrázek (Obr. 7) znázorňuje výpočet viditelné oblasti pro jednu buňku DEM. Horizontální úhly se počítají podél zadaného počtu směrů a slouží k vytvoření polokulové plochy reprezentující pohled na oblohu. Výsledná viditelná oblast charakterizuje, které směry nebe jsou viditelné (zobrazí se bíle), nebo zakryté (zobrazeny šedě) (ArcGis help, 2016a).

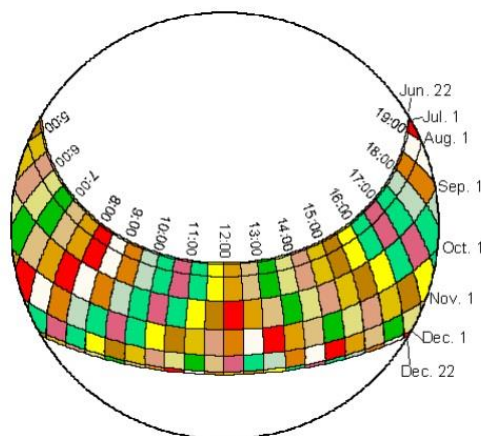


Obr. 7 Ilustrace horizontálních úhlů, výsledné viditelné oblasti, a viditelné oblasti z pohledu na oblohu (ArcGis help 2016a)

#### 2.4.2 Výpočet sluneční mapy

Množství přímého slunečního záření pocházející z každého směru je reprezentováno na vytvořené sluneční mapě ve stejné polokulové projekci jako pro mapu viditelnosti. Sluneční mapa je rastrová reprezentace, která zaznamenává zdánlivou pozici slunce, jak se mění během hodin dne a dnů roku. Je to podobné jako dívat se z místa na nebe a sledovat jak se časem pohybuje (Kodysh et al. 2013).

Sluneční mapa se skládá z oddělených sektorů, definovaných polohou slunce v konkrétních intervalech během dne (v hodinách) a ročním období (ve dnech nebo měsících). (Obr. 8) Sluneční dráha se vypočítá na základě zeměpisné šířky zkoumané oblasti a konfigurace času, který definuje jednotlivé sektory. Každému sektoru je přidělena jedinečná identifikační hodnota, společně s jeho zenitovým a azimutálním úhlem. Sluneční záření z každého sektoru se počítá zvlášť, a sluneční mapa je překryta viditelnou oblastí pro výpočet přímého záření (Fu et Rich 1999).

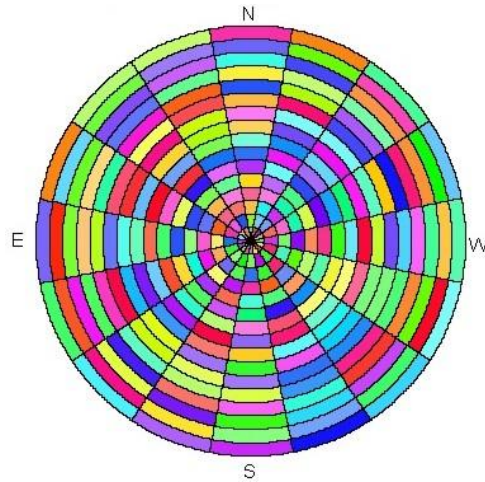


Obr. 8 Příklad sluneční mapy (Fu et Rich 1999)

### 2.4.3 Výpočet mapy oblohy

Na rozdíl od přímého záření, difuzní záření může pocházet z jakéhokoli směru v důsledku rozptylu atmosférickými komponenty (mraky, částice atd.) (ArcGis help, 2016a). Mapy oblohy jsou konstruovány tak, aby reprezentovaly polokulovitý výhled na oblohu, rozdělený do řady sektorů definovaných zenitovým a azimutálním úhlem. Každému sektoru je opět přiděleno jedinečné identifikační číslo podle schématu oblohy. Jednotlivé sektory musí být dostatečně malé, aby těžiště zenitových a azimutálních úhlů přiměřeně představovali směr sektoru pro následující výpočty.

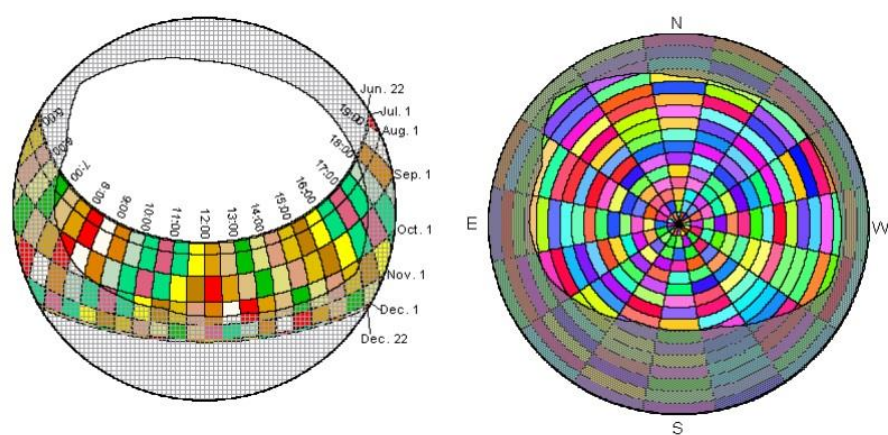
Výsledkem je rastrová mapa oblohy známá jako Skymap neboli mapa oblohy (Obr. 9). Celkové difuzní záření je sumou záření ze všech sektorů, nezakrytých nebo částečně zakrytých mapou viditelnosti (Kodysh et al. 2013).



Obr. 9 Mapa oblohy definovaná 16 zenitovými směry a 16 azimutálními směry. (Fu et Rich 1999)

#### 2.4.4 Výpočet solární mapy

Při výpočtu slunečního záření jsou rastry sluneční mapy a mapy oblohy překryty rastrem viditelné oblasti pro výpočet přímého a difuzního záření ze všech směrů oblohy (Obr. 10). Podíl viditelné oblasti v každém sektoru se vypočítá jako podíl počtu nepřekrytých buněk z celkového počtu buněk v každém sektoru. Opravná položka je určena pro částečně zastíněné sektory. Sluneční záření se vypočítá jako součet přímého a difuzního slunečního záření pocházející z nezastíněných směrů oblohy (Fu et Rich 1999).



Obr. 10 Sluneční mapa a mapa oblohy překrytá viditelnou oblastí. Šedivé oblasti představují zastíněné směry. (Fu et Rich 1999)

## 2.5 Solární potenciál ve městech – Mapy solárního potenciálu

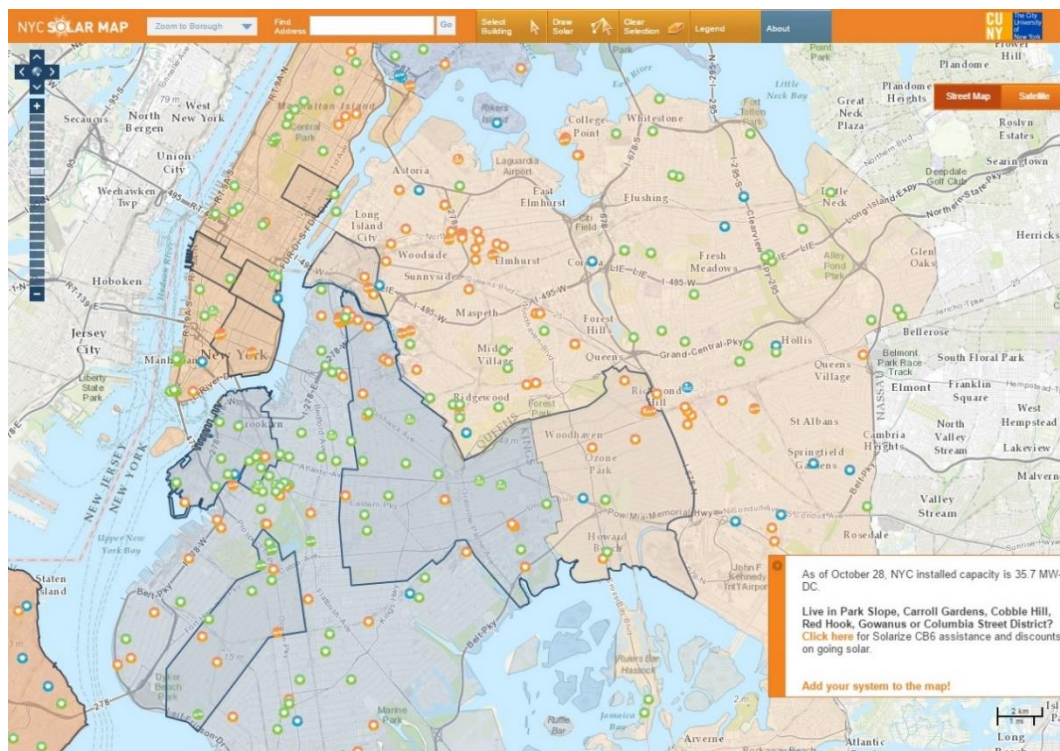
Stávající městská prostředí mají značný potenciál zvýšit využívání obnovitelných zdrojů energie, a to především solárního záření. Začlenění solárních systémů do budov nabízí prostředek pro vytváření místní elektrické energie a tím potenciální energetickou soběstačnost (Santos et al. 2014). V současnosti městským prostředím dominuje velké množství malých elektráren, zatímco velké elektrárny (nad 1 MWp) se obvykle nachází v zemědělských oblastech (Gallay et al. 2015). Kvantifikace solárního potenciálu prostřednictvím map solárního potenciálu je prvním krokem k rychlejšímu zpracování dat k využití většího množství sluneční energie (Kanters et al. 2014).

Stále více měst má k dispozici LiDARová data, takže jsou teoreticky schopná mít vlastní mapu solárního potenciálu. Mapy poskytují většinou informace o ročním solárním záření na povrchy budov (střechy/fasády), kolik elektrické energie by mohlo být vyrobeno prostřednictvím solárních systémů nebo kolik emisí CO<sub>2</sub> by mohlo být ušetřeno (Ludwig et al. 2009). Obvykle mají dva významy a to jako nástroj pro městskou správu pro energetická rozhodnutí a informativní pro občany o potenciálu jejich vlastních střech (Agugiario et al. 2012). Protože jsou k dispozici online, může každý uživatel internetu jednoduše pomocí několika málo kliknutí myší na příslušných webových serverech zkoumat, zda je jeho vlastní střešní plocha vhodná.

Při tvorbě map solárního potenciálu jsou ale vždy použity různé postupy a mapy jsou na různých úrovních kvality s různým rozlišením (Kanters et al. 2014). Nejdůležitější součástí je použitá metoda výpočtu. Pomocí různých nástrojů na modelování solárního záření byly vytvořeny relativně rozsáhlé mapy solárního potenciálu na různých místech světa. Konkrétně pomocí Solar Analyst byla zpracována data například pro města Anaheim, Boston a New York City (Obr. 11) v Americe nebo Salt Lake City v Austrálii (Feritas et al. 2015).

Podle rozmístění obytných prostor a informací ze sčítání lidu může být zjištěno přibližné rozmístění obyvatelstva a tak odhadnuta poptávka po elektrině v bytových prostorech. Obytné budovy jsou hlavními objekty zájmu, protože

elektřina vytvořená pomocí panelů na jejich střeších zásobuje byty nacházející se v nich a neputuje nijak daleko (Santos et al. 2014).



Obr. 11 Výřez ze solární mapy New York City (NYC Solar map, 2016)

Pro posouzení vhodnosti instalace solárních panelů je třeba zobrazit množství dopadajícího záření pouze na plochy střech. Toho se dá docílit interakcí vektorizovaných polygonů se solární mapou pro celou uvažovanou oblast (Ludwig et al. 2009). Ty se dají vytvářet buď automatickým generováním a jemu předcházející klasifikací nebo ručním vektorizováním. Automatická generace je výhodná při použití v rozsáhlých oblastech, ruční vektorizace je výhodná u malých oblastí nebo jednotlivých střech, kdy je potřeba vyšší přesnosti. Při automatické generaci často dochází k nepřesnostem způsobeným chybami v lidarových datech nebo jejich klasifikaci, a proto je třeba data předem zkontrolovat a popřípadě upravit (Lukač et al. 2013). Také můžeme zadat, aby program zobrazil jen střechy s přípustnou velikostí, tak aby se dal systém o určité velikosti instalovat. Většinou se jako ideální podmínky pro instalaci udávají sklon cca. 30 až 40 stupňů, orientace směrem na jih a plocha minimálně 15 metrů čtverečních (Ludwig et al. 2009).

Pro každou vhodnou plochu jsou pak vypočítány parametry solárního energetického potenciálu. Mezi ty patří velikost střechy, potenciál pro výrobu

elektřiny, potenciální úspory CO<sub>2</sub> nebo výkon instalovaného systému v kW. To umožňuje vypočítat potenciál solární energie. Podle průměrného záření dopadajícího na jednotlivé střechy lze vypočítat přibližnou vyprodukovanou energii při instalaci panelů (Obr. 12) a porovnat ji s poptávkou pro jednotlivé budovy.



Obr. 12 Střešní plochy rozdělené podle množství potenciálně produkované elektřiny v části Lisabonu (Santos et al. 2014)

Při rozmyšlení o instalaci střešních elektráren je důležitým faktorem také výška budovy. U obytných domů může být více či méně praktické použití solárních systémů na stejné plochy, ale s jinou výškou. Jedno nebo dvoupodlažní domy s jedním vlastníkem mají solární potenciál mnohem vyšší než spotřebu, zatímco vyšší budovy s více majiteli mají naopak nedostatek. (Santos et al. 2014) To se ale dá předpokládat, protože ve vysokých několikapatrových budovách je logicky více bytových jednotek, více lidí a tím pádem má i vyšší spotřebu elektřiny. Instalace solárních systémů má tedy teoreticky větší výhodu v rodinných domech, které by se tím pádem staly soběstačnými, zatím co ve vysokých bytových budovách s mnoha obyvateli nepokryjí systémy spotřebu. Přesto mohou výrazně ovlivnit příjem elektřiny ze sítě a nejsou zbytečné.

V centrech velkých měst, kde má většina domů více vlastníků, se často vyskytují administrativní nebo organizační problémy a jednotliví vlastníci často nechtějí investovat nebo se nemohou domluvit. Proto je důležité, aby se vedení měst aktivně

zapojovalo do hledání řešení na těchto typech staveb a navrhování dostupných technických i finančních řešení k využití solárního potenciálu města.

## 2.6 Rozlišení

Zemský povrch je značně složitý, a v zásadě může být rozložen až na molekulární úroveň. V praxi je však, vzhledem k naší omezené schopnosti vnímat, zachytit, a zpracovávat velké objemy dat, nezbytné snížit detail a zachycovat pouze největší a pravděpodobně nejdůležitější rysy jakéhokoli prostorově distribuovaného jevu. Smysl mnoha geografických skutečností je závislý na rozlišení. Jako příklad můžeme vzít krajinný pokryv (land cover), který při hrubém rozlišení může ukazovat kategorie půdního pokryvu, ale při podrobnějším rozlišení můžeme vnímat jednotlivé zahrady, střechy nebo třeba jednotlivé střešní tašky (Goodchild 2010).

Zatímco reálný svět je spojitý, při řešení otázek pomocí GIS je realita nevyhnutelně reprezentována v určitém měřítku, které je dáno použitými prostorovými daty. Zavedením měřítka vznikají informační ztráty, které je obtížné kvantifikovat. Pokud použijeme menší než ideální rozlišení, nemůžeme si být potom jisti tím, jestli případné chyby vznikly kvůli účinkům použitého rozlišení, v důsledku nedokonalostí nástroje, nebo obojím. V případě, že je proces významně ovlivněn detailem menším, než je použité rozlišení, budou výsledky analýzy jistě zavádějící.

V praxi je maximální použité rozlišení výsledkem poměru mezi přínosem detailů a pořizovacími náklady. Získat podrobnější data logicky trvá delší dobu nebo vyžaduje lepší techniku. Rozlišení je základním parametrem jakéhokoliv souboru dat a náklady na pořízení, manipulaci, skladování, a zpracování údajů jsou na něm závislé. Je důležité zamyslet se, jaké by byly výhody sběru dat při podrobnějším rozlišením, jak ospravedlnit zvýšené náklady, kolik informací se ztratí v důsledku použití hrubšího rozlišení a jak to ovlivní výsledky analýz.

## 2.7 Rastr a vektor

V praxi digitální reprezentace skutečnosti vždy zahrnuje rozlišení do určité míry. Diskrétní objekty nebo spojitě pole mohou být reprezentovány buď jako rastrová nebo vektorová data. V případě rastru je rozlišení úměrné velikosti rastrových

buněk, které jsou téměř vždy dvourozměrné čtverce. Výsledné odhady jsou závislé na velikosti buněk a obecně větší buňky přinesou horší odhad. Z toho důvodu nemůžou být data definována nebo měřena nezávisle na měřítku.

V případě vektorové reprezentace je rozlišení obtížně definovatelné. Vektorové zobrazení nemá teoreticky vliv na rozlišení a jeho prvky nepodléhají rozmazání při podrobnějším měřítku. Bohužel to často vytváří mylný dojem, že vektorové datové sady mají nekonečně jemné rozlišení. Navíc je obtížné, ne-li nemožné, odvodit rozlišení z obsahu vektorových dat.

Volba mezi vektorem a rastrem musí být vedena vzhledem k povaze stávajících údajů, které má software k dispozici pro zpracování dat a podle typů analýz a modelování, které mají být prováděny. V zásadě je špatná definice rozlišení pro vektorová data silným argumentem proč využívat ve vědeckých výzkumech více rastrová data (Goodchild 2010).

## **2.8 Vliv vstupních parametrů**

### **2.8.1 Sky size rozlišení**

Je rozlišení pro mapu oblohy, sluneční mapu a mapu viditelnosti. V Solar Analyst je nastavitelné uživatelem s výchozí hodnotou 200x200 buněk, která je uváděna jako dostatečná pro většinu výpočtů. Maximální hodnota rozlišení je 10 000x10 000 buněk.

Fu et Rich (1999) řešili vliv nastavení rozlišení na výsledná data. Získali velmi podobné výsledky při použití rozlišení 400 x 400 a 200 x 200. Průměrná hodnota výsledného solárního potenciálu se lišila o méně než 1%. S rostoucím rozlišením nedošlo k podstatnému zlepšení přesnosti modelu, ale výrazně zvyšoval výpočetní čas. Zdvojnásobení rozlišení z 200 x 200 na 400 x 400 čtyřnásobně zvýší výpočetní čas. Považovali tedy rozlišení 200 x 200 za dostačující pro většinu účelů, nicméně, připouští že, další výzkum může odhalit případy, kdy může být požadována vyšší citlivost na rozlišení.



## 2.8.2 DEM

Ruiz-Arias et al. (2009) porovnávali hodnoty pro rozlišení 20 m<sup>2</sup> a 100 m<sup>2</sup>. Ty byly dále porovnávány s daty naměřenými ve 14 radiometrických stanicích. Tato analýza byla provedena pro různé atmosférické podmínky pomocí čtyř modelů a to Solar Analyst, r.sun, Solei-32 a SRAD. Solar Analyst vždy vykazoval nejmenší střední kvadratickou odchylku oproti ostatním, které měli odchylku srovnatelnou. Z toho by se dalo usuzovat, že Solar Analyst má nižší citlivost na rozlišení DEM, ale je spíše méně závislý na topografii. Analýza byla provedena pro všechny čtyři modely s rozlišením 100 m<sup>2</sup> a získané výsledky byly velmi podobné jako výsledky získané při použití 20 m<sup>2</sup>. Výsledky analýzy také ukázaly, že pokud je větší zastínění, zvýšení rozlišení DEM zlepšuje odhad záření. Podle Ruiz-Arias et al. (2009) lze tedy očekávat zlepšení odhadu v solárních modelech zvýšením rozlišení DEM. Nicméně v některých případech může být obtížné rozlišit vliv rozlišení a chyb způsobených zjednodušeným modelem atmosféry.

## 2.9 Přesnější data pro DEM

V současnosti je identifikace stromů v zástavbě nebo drobných předmětů jako jsou komíny a jejich vliv na zastínění solárních systémů velmi důležitým faktorem, který nelze zcela získat z dostupných LiDARových dat. Kolísavé výkony solárních elektráren jsou velkým problémem, a proto se uvažuje nad používáním vyššího rozlišení DEM. Ty mohou být generovány také z fotogrammetrických mračen bodů získaných pomocí bezpilotních vzdušných systémů (UAS) na základě fotografických letů s velkým měřítkem (Obr. 13).



Obr. 13 Detail mračna bodů vytvořeného pomocí UAS s rozlišením 0,6 mm<sup>2</sup> (Zink et al. 2015)

UAS jsou malé několika metrové drony různých tvarů. Fungují na elektrický pohon a na jedno nabití vydrží letět až 20 minut, rychlostí přibližně 20 m/s podle typu. Jejich nevýhodou je relativně malá, většinou několikakilová hmotnost, díky které mohou létat jen za slabého větru, na rozdíl od letadel a helikoptér používaných u LiDARu. Nesou vysoce kvalitní digitální fotoaparáty a jsou předem naprogramovány, aby svým letem pokryly určitou plochu (Obr. 14). V konfiguraci na 0,25 m<sup>2</sup> může UAS pokrýt až 100 ha během jednoho letu trvajícího přibližně 20 minut. (Haala et al. 2013)



Obr. 14 Jeden z možných typů UAS (Haala et al. 2013)

Zink et al. (2015) srovnávali data získaná standardně pomocí LiDARu a data získaná pomocí UAS. Rozlišení DEM získaných pomocí UAS bylo několikanásobně vyšší než u LiDARu, nicméně, náklady na sběr dat byly mnohem vyšší, stejně jako potřebný čas. Pro snížení nákladů se dají se použít i levnější běžně používané fotoaparáty, ale to má za následek omezení radiometrické kvality a snížení stability geometrie obrazu. Přesto i tyto nízkonákladové lety mohou přinést informace v dostačující kvalitě. (Haala et al. 2013). UAS se uplatní hlavně na relativně malých oblastech, které je třeba zmapovat ve velmi vysokém rozlišení.

Zink et al. (2015) vytvořili DEM s rozlišením 1 m<sup>2</sup> až 0,01 m<sup>2</sup>. Při rozlišení 0,01 m<sup>2</sup> bylo možné rozpoznat každý jednotlivý prvek střechy. Okraje střech byly ostré, bylo možné rozpoznat komíny, solární systémy, dokonce i jednotlivé střešní tašky. Nicméně nemusí znamenat, že vysoká úroveň detailu přinese přesnější výsledky

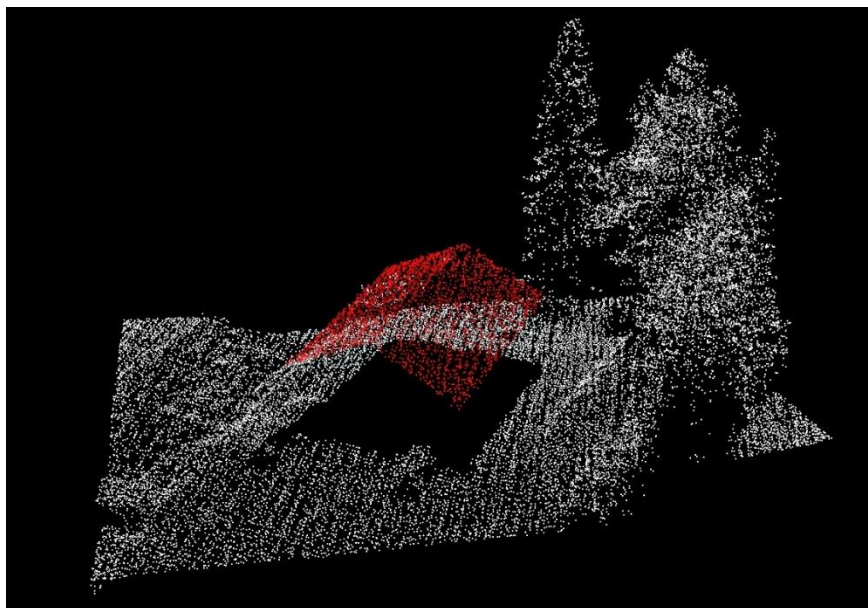
při výpočtu algoritmu. Standardní FV panely jsou ploché a povrch modulu bude zastoupený jediným sklonem, proto je předpoklad, že se dá stejného výsledku dosáhnout i při použití menšího rozlišení. Vzhledem k podobnostem mezi mapami s rozlišením 0,01 m<sup>2</sup>, 0,25 m<sup>2</sup>, 0,5 m<sup>2</sup> a 1 m<sup>2</sup>, představovalo rozlišení 0,25 m<sup>2</sup> nejlepší rovnováhu mezi detailem a výpočetními požadavky pro diskutované účely. Čas výpočtu byl navíc opět mnohem nižší oproti podrobnějším rozlišením

### 3 Charakteristika území a metodika

#### 3.1 Charakteristika území

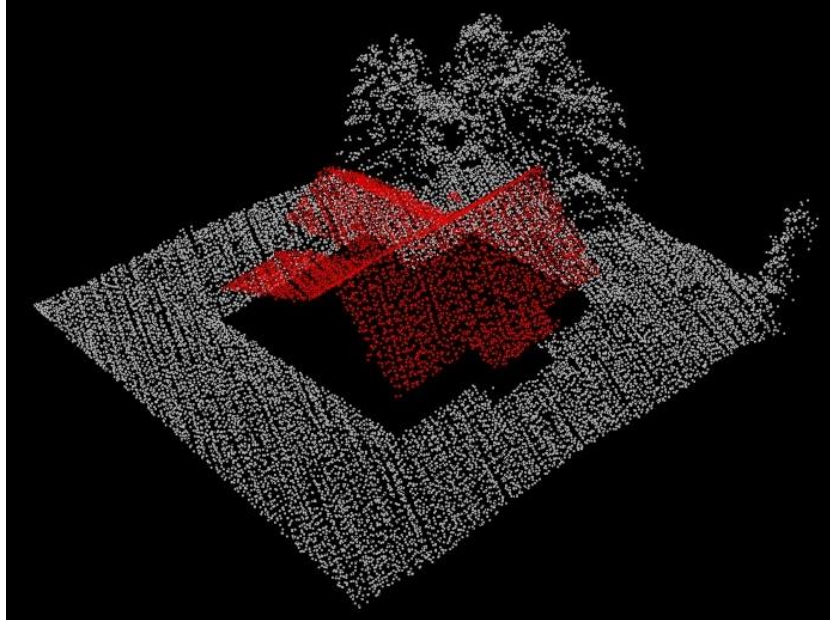
Jako zájmové území pro tuto práci bylo vybráno horské město Pec pod Sněžkou, které spadá do Královéhradeckého kraje na severovýchodě Čech. Město leží v Krkonoších na řece Úpě a Zeleném potoku a celé území patří pod Krkonošský národní park. V blízkosti se nachází četná lyžařská střediska, a proto zde stojí mnoho horských chat, sloužících jako penziony. V práci bude analyzován solární potenciál dvou střech (Příloha č. 1).

Jako první byla vybrána střecha horské služby v jižní části města. Je to větší budova s klasickou sedlovou střechou z vlnitého plechu, která leží na okraji lesa a je svou přední částí a hřbetem orientovaná na jihozápad (Obr. 15).



Obr. 15 Detail první střechy zobrazen LiDARovým mračenem bodů

Jako druhá byla vybrána střecha jedné z chat v severozápadní části města. Nachází se na louce, daleko od lesa na nezastíněném území, proto by měla vykazovat rozdílné výsledky. Střecha je z rovného plechu, má složitější tvar a chata je orientovaná západním směrem (Obr. 16).



Obr. 16 Detail druhé střechy

### 3.2 Vstupní data

Jako vstupní data byly použity LAS soubory leteckého skenování. Jednotlivé soubory pokrývaly oblasti o velikosti přibližně 300 m<sup>2</sup>, všechny soubory dohromady potom pokrývaly oblast celé Peci pod Sněžkou.

### 3.3 Metodika

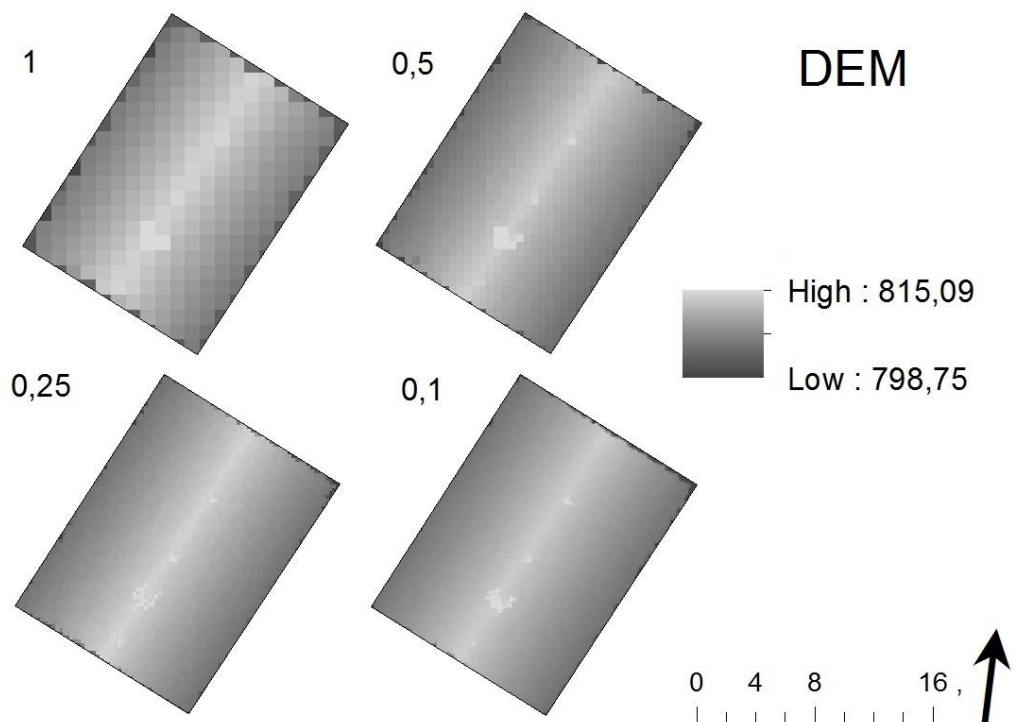
Pro modelování a výpočty byl použit program ArcGIS Desktop 10.2. Po výběru vhodných míst k posouzení byly z jednotlivých LAS souborů vytvořeny datasety (nástroj Create LASdataset), z kterých byly následně vytvořeny DEM ve čtyřech různých rozlišeních a to 1m<sup>2</sup>, 0,5m<sup>2</sup>, 0,25m<sup>2</sup> a 0,1m<sup>2</sup> (LASdataset to raster). Tyto rastry byly použity jako vstupní vrstvy pro nástroje Slope, Aspect a Area solar radiation. Mapy solárního potenciálu byly modelovány pro roční průměrné dopadající záření ve 14 denních intervalech podle algoritmu popsaného v kapitole 2.4. Sky size rozlišení bylo nastaveno na 200x200 buněk. Ostatní vstupní parametry

byly ponechány na původních hodnotách a tedy popisující podmínky jasného nebe. Následně byly oříznuty jednotlivé střechy podle polygonů vytvořených ruční vektorizací nad DEM. Pro tyto oblasti byly vypočteny statistiky maximálního, minimálního a průměrného záření a jeho celkového množství na danou střechu (Zonal statistics).

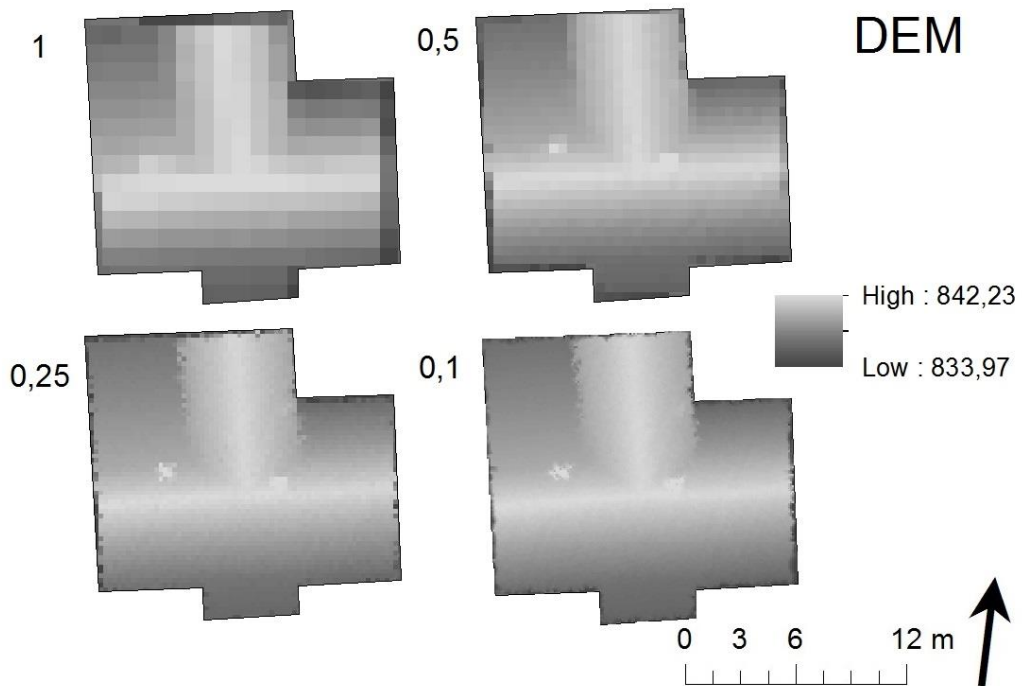
## 4 Výsledky

### 4.1.1 DEM

Při rozlišení 1 m<sup>2</sup> nejsou okraje střech příliš přesné, to je vidět hlavně v případě druhé střechy na obr. 18. První střecha je relativně přesnější díky jednoduššímu tvaru (Obr. 17). Jsou znatelné jednotlivé buňky a DEM bez kontextu okolí nepodává mnoho informací. Při rozlišení 0,5 m<sup>2</sup> začínají být na střechách vidět náznaky komínů, začíná být zřetelná orientace jednotlivých ploch a dochází k zpřesnění okrajů střech. Stále jsou ale znatelné jednotlivé buňky. Při rozlišení 0,25 m<sup>2</sup> došlo k výraznému zlepšení. Jednotlivé buňky nejsou rozeznatelné, jsou jednoznačně určitelné komíny a antény a detaily jsou stále jemnější. Při rozlišení 0,1 m<sup>2</sup> došlo opět ke zlepšení, ale DEM není nijak výrazně podrobnější než při rozlišení 0,25 m<sup>2</sup>.



Obr. 17 DEM první střechy

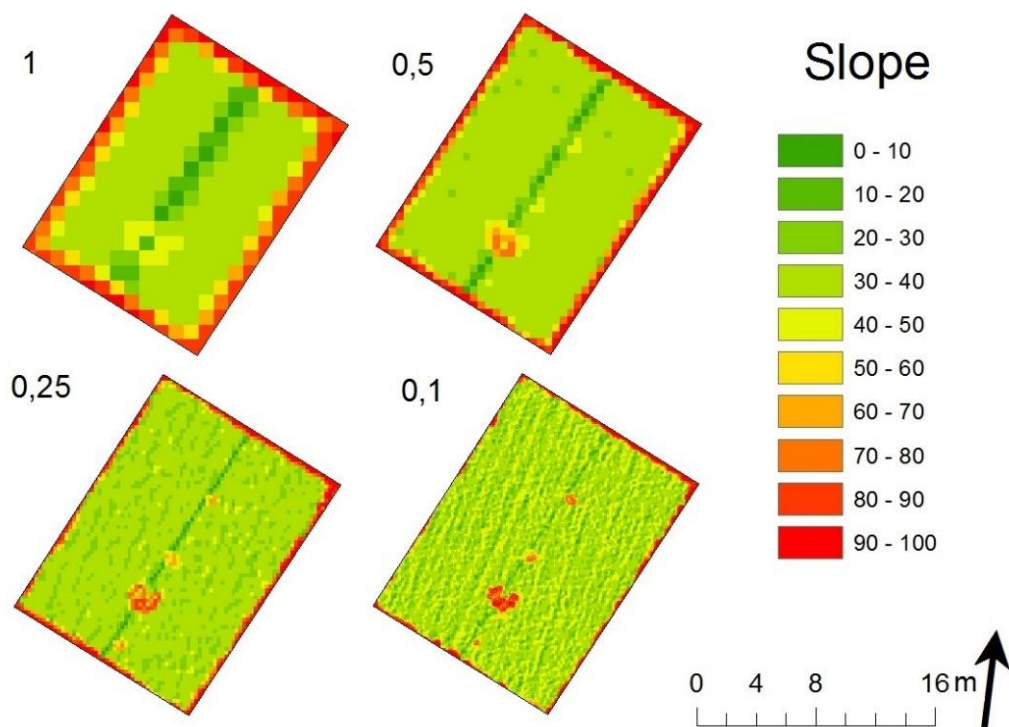


Obr. 18 DEM druhé střechy

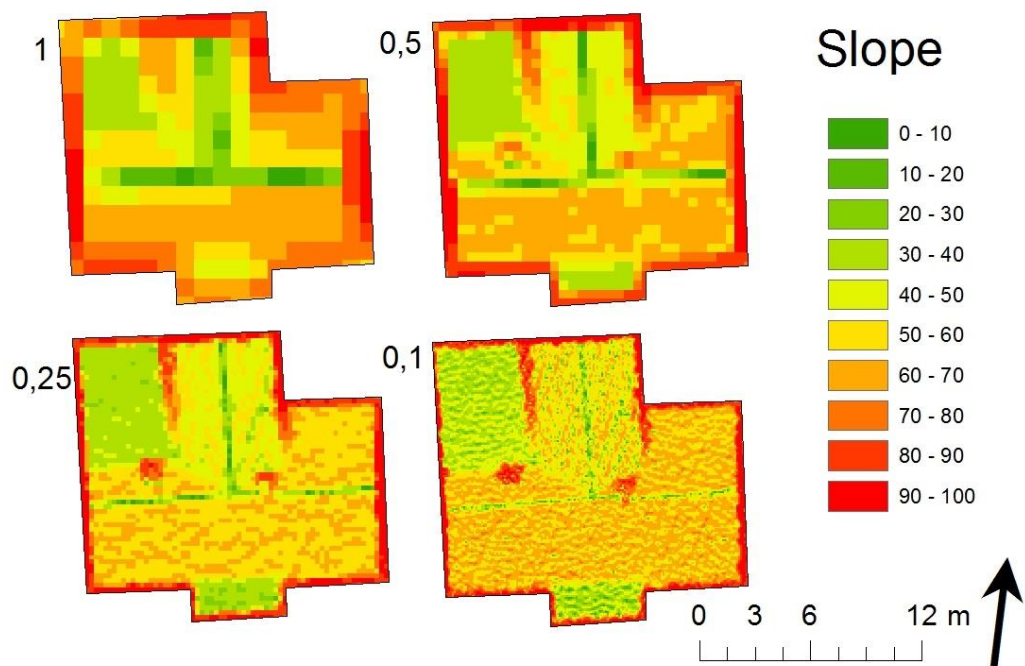
#### 4.1.2 Slope

Slope představuje míru svažitosti jednotlivých ploch a ta je důležitým faktorem při výběru vhodných střech k instalaci solárních systémů. V této práci je hodnocena na základě svažitosti v úhlových stupních.

První střecha má relativně malý sklon a obě její poloviny jsou pod úhlem přibližně 30 stupňů (Obr. 19). Druhá střecha je mírně svažitější a většina jejích ploch se pohybuje kolem sklonu 50 stupňů. Zbylé plochy mají přibližně 30 stupňů (Obr. 20). Přesnost se s podrobnějším rozlišením opět zvyšuje. Při hrubém rozlišení 0,1 m<sup>2</sup> jsou okraje střech opět velmi rozostřené a nepřesné a ve srovnání s podrobnějším rozlišením je výrazné chybné určení sklonu okrajových částí. Druhá střecha se složitějším a členitějším tvarem je docela nepřehledná. Při rozlišení 0,5 m<sup>2</sup> jsou střechy už přehlednější a můžeme opět vidět náznaky komínů a antén. Chybová složka okrajů je ale stále docela velká. S narůstajícím rozlišením klesá a při rozlišení 0,1 m<sup>2</sup> je už minimální. Mezi rozlišeními 0,25 m<sup>2</sup> a 0,1m<sup>2</sup> je opět nevýrazný rozdíl.



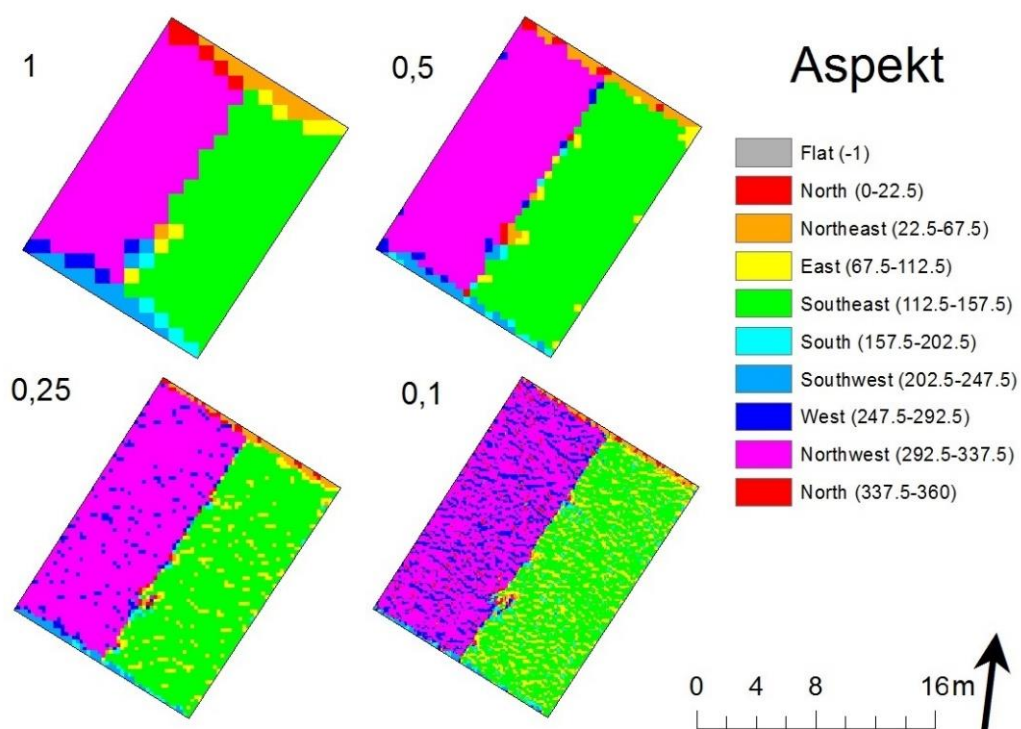
Obr. 19 Svažitost první střechy



Obr. 20 Svažitost druhé střechy

### 4.1.3 Aspekt

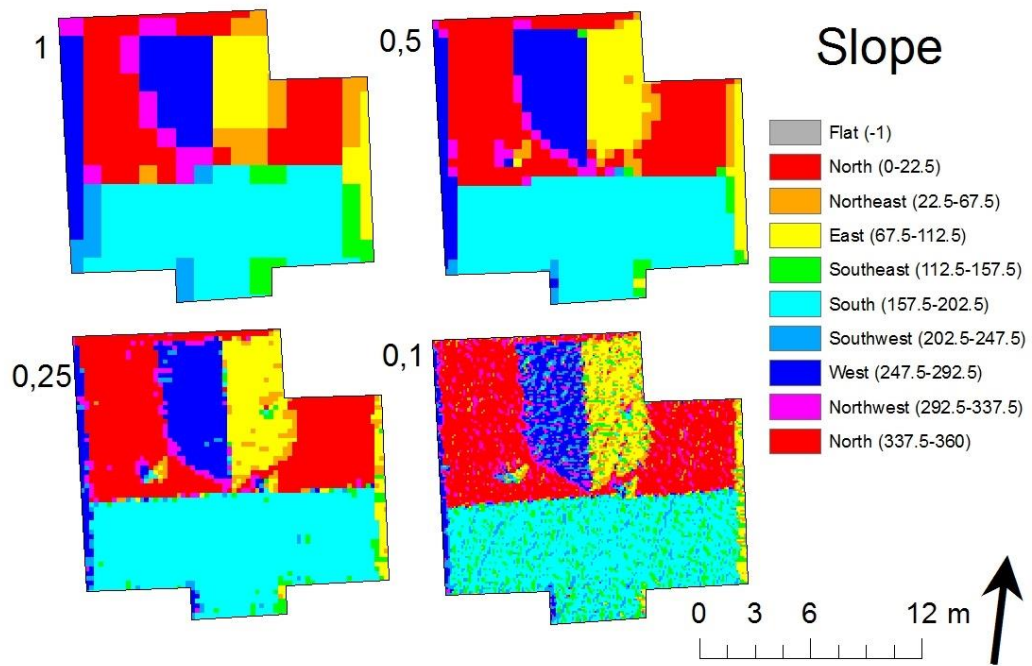
Aspekt značí orientaci povrchů ke světovým stranám. Orientace pro 360 stupňů je rozložena do 10 směrů (9 klasických světových směrů a 1 úplná rovina). První střecha má dva základní směry a to severozápadní na horní polovině a jihovýchodní na spodní (Obr. 21)



Obr. 21 Orientace první střechy

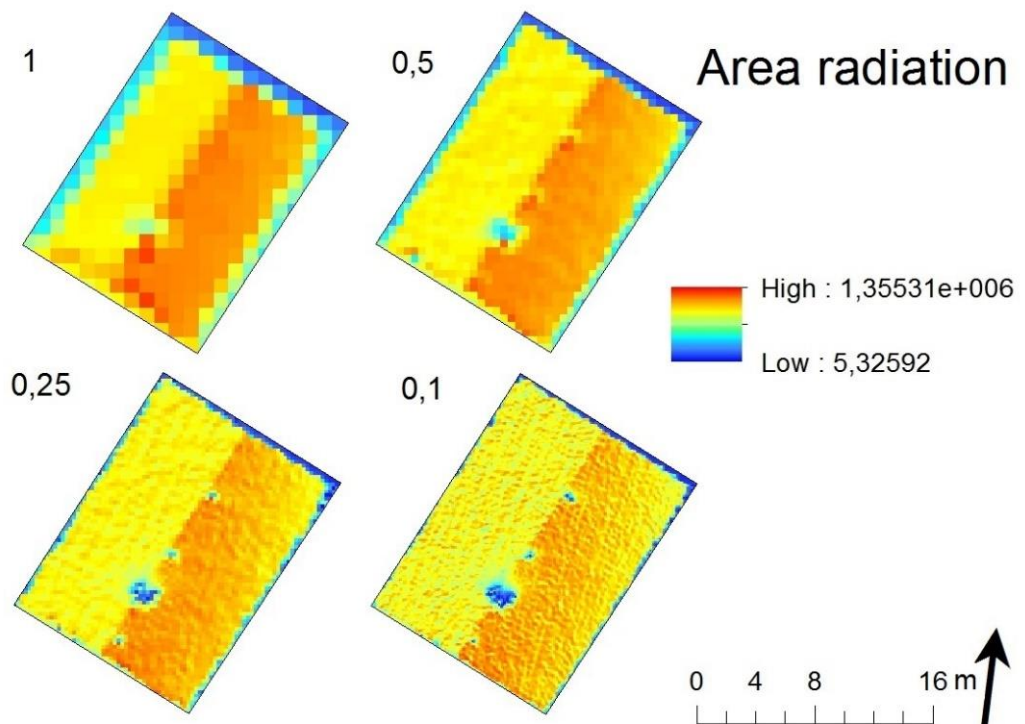
Při rozlišení  $1 \text{ m}^2$  a  $0,5 \text{ m}^2$  jsou odhady na obou polovinách relativně souvislé plochy, zatímco při podrobnějším rozlišení se začnou zobrazovat značné nerovnosti. To je způsobeno pravděpodobně použitým typem krytiny a to vlnitým plechem. Druhá střecha má čtyři hlavní orientace a to ve čtyřech hlavních světových směrech (Obr. 22). Dolní polovina s největší plochou je orientovaná na jih, horní na sever. Stříška nacházející se na Horní polovině zastupuje zbylé dva směry. Zde je opět vidět zlepšení s přibývajícím rozlišením, ale relativně souvislé plochy jsou vytvořeny i v podrobnějších rozlišeních, pravděpodobně protože je střecha z rovného plechu, zatímco první je z plechu vlnitého.





Obr. 22 Orientace druhé střechy

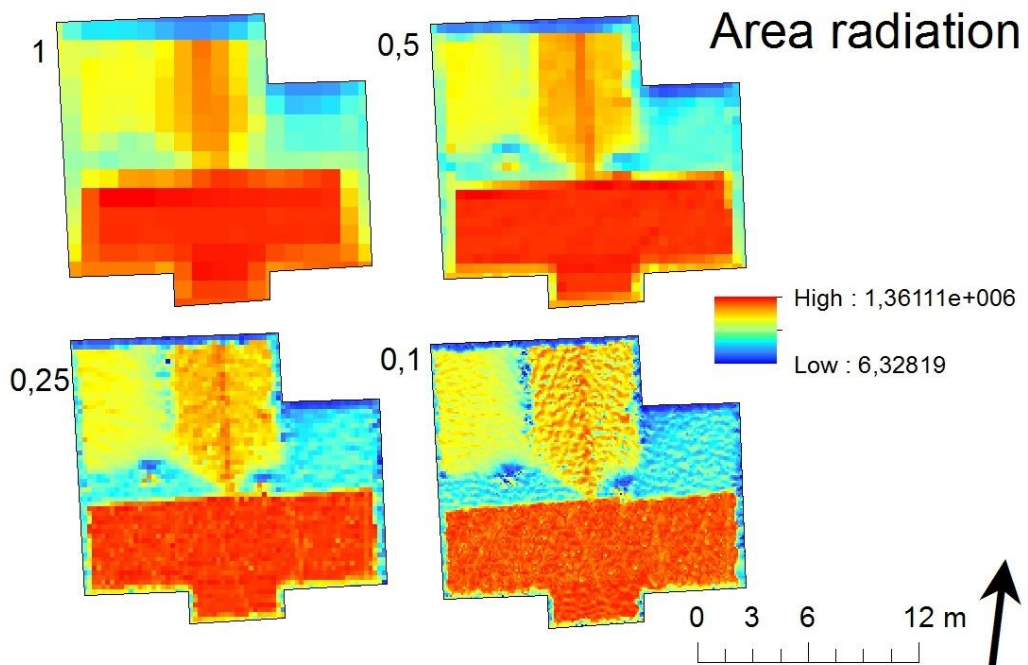
#### 4.1.4 Area radiation



Obr. 23 Sluneční mapa první střechy

Jihovýchodní polovina první střechy by měla vykazovat vyšší potenciál, nicméně ne nijak výrazně (Obr. 23). Obě poloviny se přesto pohybují v nadprůměrných hodnotách.

Druhá střecha má ve smyslu orientace svou jižní polovinu ideální pro instalaci solárních panelů. Je zde nejvyšší průměrný solární potenciál a plocha je jednotná a celkem veliká. Na protější polovině je naopak potenciál nízký a střední hodnota se objevuje jen na plochách stříšky (Obr. 24). Navzdory vyššímu průměrnému potenciálu má druhá střecha nižší sumu záření než první, což je dáno jejími menšími rozměry.



Obr. 24 Sluneční mapa druhé střechy

Přesnosti odhadů solárního potenciálu za rok v závislosti na rozlišení zobrazuje následující tabulka (Obr. 25). Při výpočtu minimálního dopadajícího záření na metr čtvereční bylo v obou případech zlepšení při podrobnějším rozlišení radikální a to z řádu desítek až na desetiny a směrodatná odchylka byla vysoká a to 5,34 resp. 10,9. Naopak při odhadu maximálního záření byly hodnoty hodně podobné a lišily v prvním případě o jednotky, v druhém případě dokonce jen o desetiny a směrodatná odchylka dosahovala hodnot 1,48 resp. 0,29. Podobné přesnosti bylo dosaženo i v případě průměrného záření. To se pohybuje v rozmezí od 90 do 97 kWh/m<sup>2</sup> a směrodatná odchylka dosahovala hodnoty 0,76 resp. 2,86. Podle PV GIS

je průměrná roční hodnota v zájmové oblasti 96,1 kWh/m<sup>2</sup>, proto můžeme odhad označit za relevantní. Suma záření dopadajícího na plochu celé střechy se v prvním případě pohybovala okolo 23 MWh a směrodatná odchylka byla 0,24. U druhé střechy byla suma nižší a pohybovala se kolem 20 MWh na plochu se směrodatnou odchylkou 0,7.

1	min (kWh/m <sup>2</sup> )	max (kWh/m <sup>2</sup> )	mean (kWh/m <sup>2</sup> )	sum (MWh na střechu)
0,1	0,01	129,26	90,80	23,60
0,25	0,04	127,54	91,52	23,78
0,5	5,23	125,52	92,19	23,99
1	13,06	128,98	90,15	23,35
2				
0,1	0,01	135,71	90,44	19,67
0,25	1,11	135,21	91,48	19,87
0,5	12,56	135,98	95,83	20,99
1	27,03	135,82	97,26	21,30

Obr. 25 Tabulka hodnot modelovaného slunečního záření za rok

## 4.2 Čas výpočtu

Doba výpočtu závisela na rozlišení vstupního rastru DEM. Při rozlišení 1m<sup>2</sup> byl čas výpočtu 35.56 resp. 51.24 vteřin a rozlišení bylo velmi hrubé. Při o polovinu podrobnějším rozlišení 0,5m<sup>2</sup> se čas zvýšil na pouhé 2 minuty 17 vteřin resp./ 3 minuty 6 vteřin, ale zlepšení odhadu bylo hodně zřetelné. Při použití rozlišení 0,25m<sup>2</sup> se čas výpočtu prodloužil na 9 minut 26 vteřin resp. 12 minut 39 vteřin a zlepšení bylo přibližně stejně výrazné. Ne moc výrazně lepší odhady poskytlo rozlišení 0,1m<sup>2</sup>, ale čas výpočtu se vyšplhal až na 1 hodinu 44 minut resp. 2 hodiny 14 minut (Obr. 26).

	1	2
0,1	1 h 44 min	2 h 14 min
0,25	9,26 min	12,39 min
0,5	2,17 min	3,6 min
1	35,56 s	51,24 s

Obr. 26 Tabulka zobrazující čas výpočtu solárních map.

## 5 Diskuze

Na všech výstupech, vytvořených programem ArcGis pro jednotlivé střešní plochy, je zřejmý vliv použitého rozlišení. S podrobnějším vstupním rozlišením docházelo vždy ke zjemnění grafických výstupů a k zobrazování vyšších a vyšších detailů střešních ploch. Postupně se začaly objevovat náznaky antén a komínů, které v nejhrubším rozlišení nebyly vůbec znatelné. Nejvíce viditelné to bylo v případě orientace ke světovým stranám, kdy na první střeše (Obr. 17) při rozlišení  $0,25 \text{ m}^2$  a  $0,1 \text{ m}^2$  byly docela rozpoznatelné jednotlivé záhyby vlnitého plechu, kterým je střecha pokryta. Na rozdíl od hrubších rozlišení, kde nebyly tyto záhyby viditelné vůbec, celou plochu zobrazovaly jako souvislou. Je otázka, jestli zrovna v tomto případě není v rámci lepších odhadů výhodné použít odhady právě z hrubších rozlišení. Solární panel je plochý bez záhybů a v podrobnějších odhadech je zahrnuta složka, která zohledňuje tvar krytiny, ale tím pádem zneprěsňuje odhad pro rovnou plochu. To je zřetelné při pohledu na číselné výsledky solární mapy (Obr. 21), kdy se s podrobnějším rozlišením průměrná roční hodnota solárního záření snižuje. Kdyby byla plocha naprosto rovná, mělo by docházet naopak k zpřesnění odhadů. V případě první střechy má ale rozlišení  $0,5 \text{ m}^2$  odhad nejvyšší a podle Aspektu vypočtený pro souvislou plochu. To je pravděpodobně způsobeno právě typem střešní krytiny a tato vlastnost by se měla zohledňovat při hodnocení střešních ploch. Stejnou otázku řešili i Zink et al. (2015), kteří sice získali skvělé DEM z fotogrammetrických letů UAS, ale ve výsledném odhadu pro fotovoltaické systémy nebyly přínosem a dostatečné odhady se daly získat z LiDARových dat, které byly úspornější jak časově tak cenově. Je tedy diskutabilní, zda má použití takto detailních DEM v případě určování solárního potenciálu smysl.

Průměrná hodnota pro rozlišení  $1 \text{ m}^2$  první střechy je nejnižší, což je pravděpodobně způsobeno chybovou složkou okrajů střechy, která je v jejím případě výrazná i na pohled. Naopak u druhé střechy je tato hodnota nejvyšší. Pravděpodobně proto, že se chybová složka okrajů střechy kompenzovala nepřesným určením plochy s maximálním zářením a jejím rozšířením.

K výraznému zlepšování číselných odhadů došlo v případě minimálního záření dopadajícího na střechy. Při rozlišení  $1 \text{ m}^2$  je  $13,06$  resp.  $27,03 \text{ kWh/m}^2$  a při rozlišení  $0,1 \text{ m}^2$  je  $0,01 \text{ kWh/m}^2$  na obou střechách. To je způsobeno velikostí buněk

původního rastru DEM. Při nejhrubším rozlišení  $1 \text{ m}^2$  pokrývá právě jedna buňka tento prostor, a tak dochází k zprůměrování informací s menším měřítkem, které jsou podmnožinou této buňky. Okrajové části střechy nesoucí nejvíce minimálních hodnot jsou tak průměrovány s okolními, které mají hodnoty naopak průměrně vysoké, a tak se minimální hodnota buňky zvyšuje. To mizí s podrobnějším měřítkem, kdy je buňka postupně nahrazována několika menšími. Při použití rozlišení  $0,1 \text{ m}^2$  je vlastně buňka v rozlišení  $1 \text{ m}^2$  rozdělena na 100 menších obsahujících vlastní průměrované informace, a tím pádem je logicky více buněk obsahující minimální hodnoty okrajů střech (Obr. 19, resp. Obr. 20). Z těch je potom vybrána nejnižší hodnota, proto dosahují hodnoty minimálního záření tak nízkých hodnot při nejpodrobnějším rozlišení. Vlivem měřítka na ztráty informací se značně filozoficky zabývá Goodchild (2010) a právě v tomto případě je vidět důležitost použitého rozlišení a jeho vliv na výsledek. Při maximálním záření na střechu se naopak hodnoty u všech rozlišení příliš neliší, protože maximální hodnota není poblíž okraje střechy a nedochází tak k ovlivnění buňky průměrováním s okrajovými buňkami střechy při nižších rozlišeních.

Při posouzení času potřebného pro modelování jednotlivých solárních map je vidět jeho postupné prodlužování (Obr. 22). Když byly modelovány mapy pro nejhrubší rozlišení, byl potřebný čas v rozmezí několika sekund. Pro podrobnější rozlišení  $0,5 \text{ m}^2$  a  $0,25 \text{ m}^2$  se pokaždé přibližně čtyřnásobil, ale v případě nejpodrobnějšího rozlišení se téměř zduanásobil oproti času pro předchozí rozlišení a dosáhl až na hranici dvou hodin. To už je hodně výrazný nárůst pro oblast velkou přibližně  $300 \text{ m}^2$ . Ruiz-Arias et al. (2009) prováděli analýzu pro území o rozloze  $10 \times 5 \text{ km}^2$  pro DEM s rozlišením  $20 \text{ m}^2$  a  $100 \text{ m}^2$ . První rozlišení mělo výpočetní čas jen 50 sekund, ale podrobnější ho mělo už 25 minut. Pokud by byly výpočty prováděny pro ještě větší oblast nebo by bylo použito podrobnější rozlišení, dá se předpokládat, že se výpočetní čas zvýší až na desítky hodin nebo několik dnů.

Je třeba si uvědomit, že solární mapy byly modelovány pro ideální podmínky čistého nebe ve 14 denních intervalech a proto neodpovídají skutečnosti přesně. Podle mnohých ale byly tyto podmínky určeny jako nejlepší pro dlouhodobý odhad. Pokud budeme chtít získat opravdu přesný odhad, musíme zjistit a v nástroji Solar Analyst nastavit všechny potřebné parametry místo defaultních a snížit denní

intervaly. Atmosférické podmínky ale nikdy nebudeme schopni předpovědět ani přesně ani na dlouho dopředu.

Obě střechy můžeme zhodnotit z pohledu instalace fotovoltaických systémů a brát v úvahu ideální podmínky jejich použití, jak uvádí Ludwig et al. (2009). První střecha má ideální sklon mezi 30 - 40 stupni (pokud uvažujeme instalaci souběžně s plochou bez podpůrných prvků), ale její orientace není ideální a tak nedosahuje maximálního množství slunečního záření. Vliv na něj může mít i blízkost lesa a jím vrhaný stín. Záření je přesto nadprůměrné a použitelné. Plochy střechy jsou dostatečně velké a neobsahují žádné překážky, takže jsou teoreticky vhodné. V budově sídlí horská služba, a tak je využívána hlavně v zimě. Během té je ale sluneční záření minimální, a proto je na zvážení, zda by měla instalace fotovoltaického systému smysl, když by vytvořená elektřina nebyla v létě využita. Druhá střecha je o něco menší a v úvahu by připadala pouze její jižní strana. Ta má sice ideální orientaci a dosahuje maximálního množství slunečního záření, ale její sklon je příliš strmý a tak by se muselo zjistit, jaké účinnosti by solární panel dosahoval, nebo snížit sklon podpůrným systémem. Opět by se musela vzít v úvahu doba využívání chaty během roku, a jestli by se fotovoltaický systém vyplatil.

Z výsledků této práce se zdá jako ideální rozlišení 0,25 m<sup>2</sup>. Má relativně přesné grafické i číselné odhady a jeho výpočetní čas se pohybuje v přijatelných mezích. Ke stejnému závěru došli také Zink et al. (2015), kteří posuzovali rozlišení 0,01 m<sup>2</sup>, 0,25 m<sup>2</sup>, 0,5 m<sup>2</sup> a 1 m<sup>2</sup> a usoudili, že toto rozlišení je nejvhodnější pro řešení solárního potenciálu střech zastavěných území při poměru cena/kvalita/čas. Rozlišení 0,5 m<sup>2</sup> je rozhodně také použitelné. Pro ekologické otázky je naopak výhodnější hrubší rozlišení v řádu několika desítek metrů. Podle Fu et Rich (1999) a Ruiz-Arias et al. (2009) obecně vyhovují rozlišení v řádu několika desítek m<sup>2</sup>, které jsou běžně dostupné pro velké oblasti, pro které je i prováděno modelování, a právě proto není podrobnější rozlišení potřeba. Vždy záleží na lidském faktoru a na správném úsudku, kdy je třeba použít jak podrobné rozlišení.

## 6 Závěr

V práci byly zanalyzovány dvě střechy domů v obci Pec pod Sněžkou. Ze získaných LiDARových dat byly vytvořeny DEM ve čtyřech různých rozlišeních  $0,01 \text{ m}^2$ ,  $0,25 \text{ m}^2$ ,  $0,5 \text{ m}^2$  a  $1 \text{ m}^2$ . Pro tyto vrstvy byly vytvořeny výstupy informující o sklonu, prostorové orientaci a množství dopadajícího slunečního záření na střechy. Následně byl zhodnocen vliv rozlišení na odhad solárního potenciálu. Rozlišení  $1 \text{ m}^2$  se ukázalo jako moc hrubé, protože nepodává příliš přesné grafické i číselné odhady. Jeho výhodou je ale velmi krátký výpočetní čas a dá se proto použít pro rychlé získání přibližných odhadů a získání představy o potřebných vlastnostech střešních ploch. Rozlišení  $0,1 \text{ m}^2$  je naopak zbytečně podrobné. Zobrazí sice všechny nerovnosti povrchu a malé předměty jako komíny a antény, ale to není pro instalaci solárních systémů příliš potřebné. Důležité jsou informace o rovných a souvislých plochách, které jsou potenciálně vhodné. Navíc byl výpočetní čas hodně dlouhý. Toto rozlišení mělo výrazný vliv pouze na přesnost ve výsledcích minimálního dopadajícího záření, ale to není hlavním předmětem při instalaci solárních systémů a proto není tak důležité. Jako ideální se ukázalo rozlišení  $0,25 \text{ m}^2$ . Má relativně přesné grafické i číselné odhady a jeho výpočetní čas se pohybuje v přijatelných mezích. V případě grafických výstupů mělo téměř shodné odhady jako rozlišení  $0,1 \text{ m}^2$ , ale nesrovnatelně kratší čas výpočtu. Při volbě rozlišení je vždy potřeba posoudit správně danou situaci a k jakému účelu budou odhady použity, aby nedošlo ke ztrátě informací a aby ani náklady na pořízení dat nebyly zbytečně vysoké.

## 7 Použitá literatura

**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, 2016a:** Modeling solar radiation, ArcGIS Resources, online: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z000000t9000000>, cit. 5.3.2016

**ARCGIS HELP 10, 2016b:** Creating raster DEMs and DSMs from large lidar point collections, ArcGIS Resources, online: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//015w0000004q000000>, cit. 7.3.2016

**ARCGIS HELP 10, 2016c:** Area Solar Radiation (Spatial Analyst), ArcGIS Resources, online: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z000000t5000000>, cit. 11.3.2016

**DUBAYAH R. et RICH P. M., 1996:** GIS-based solar radiation modeling: 129–134.

**DUSONCHET L. et TELARETTI E., 2015:** Comparative economic analysis of support policies for solar PV in the most representative EU countries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42: 986–998.

**FERITAS S., CATITA C., REDWEIK P. et BRITO M.C., 2015:** Modelling solar potential in the urban environment: State of the art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41: 915-931.

**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://professorpaul.com/publications/fu\\_rich\\_1999\\_esri.pdf](http://professorpaul.com/publications/fu_rich_1999_esri.pdf), cit. 16.3.2016



**FU P. et RICH P. M., 2000:** A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry, Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry: 357-364.

**GALLAY M., KAŇUK J. et HOIFERKA J., 2015:** Capacity of photovoltaic power plants in the Czech Republic, Journal of Maps, 11,3: 480–486.

**GEOIMAGE, 2016:** Dems Overview, online:

<http://www.geoimage.com.au/DEMS/dems-overview>, cit. 20.3.2016

**GOODCHILD M. F., 2011:** Scale in GIS: An overview, Geomorphology 130: 5-9.

**HAALA N., CRAMER M. et ROTHERMEL M., 2013:** Quality of 3D point clouds from highly overlapping UAV imagery, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2: 183-188, online: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W2/183/2013/isprsarchives-XL-1-W2-183-2013.pdf>, cit. 8.4.2016

**HIPPENSTIEL R. et BROWNSON J. R. S., 2012:** Computing solar energy potential of urban areas using airborne LiDAR and orthoimagery, online: [https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012\\_0296\\_full%20paper.pdf](https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0296_full%20paper.pdf), cit. 15.3.2016

**KANTERS J., WALL M. et KJELLSSON E., 2013:** The solar map as a knowledge base for solar energy use, Energy Procedia 48: 1597–1606.

**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.

**LUDWIG D., LANIG S. et KLARKE M., 2009:** Location analysis for solar panels by LiDAR-Data with Geoprocessing - SUN-AREA, Environmental Informatics and Industrial Environmental Protection: Concepts, Methods and Tools: 83-89.

**LUKAČ N., ŽLAUS D., SEME S., ŽALIK B. et ŠTUMBERGER DG., 2013:** Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data, *Applied Energy* 102: 803-812.

**NYC SOLAR MAP, 2016:** NYC Solar map, online:  
<http://www.nycsolarmap.com>, cit. 22.3.2016

**PVGIS, 2016:** 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. 19.3.2016

**RUIZ-ARIAS J. A., TOVAR-PESCADOS J., POZO-VÁZQUEZ et ALSAMAMRA H., 2009:** A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain, *International Journal of Geographical Information Science* 23: 1049–1076.

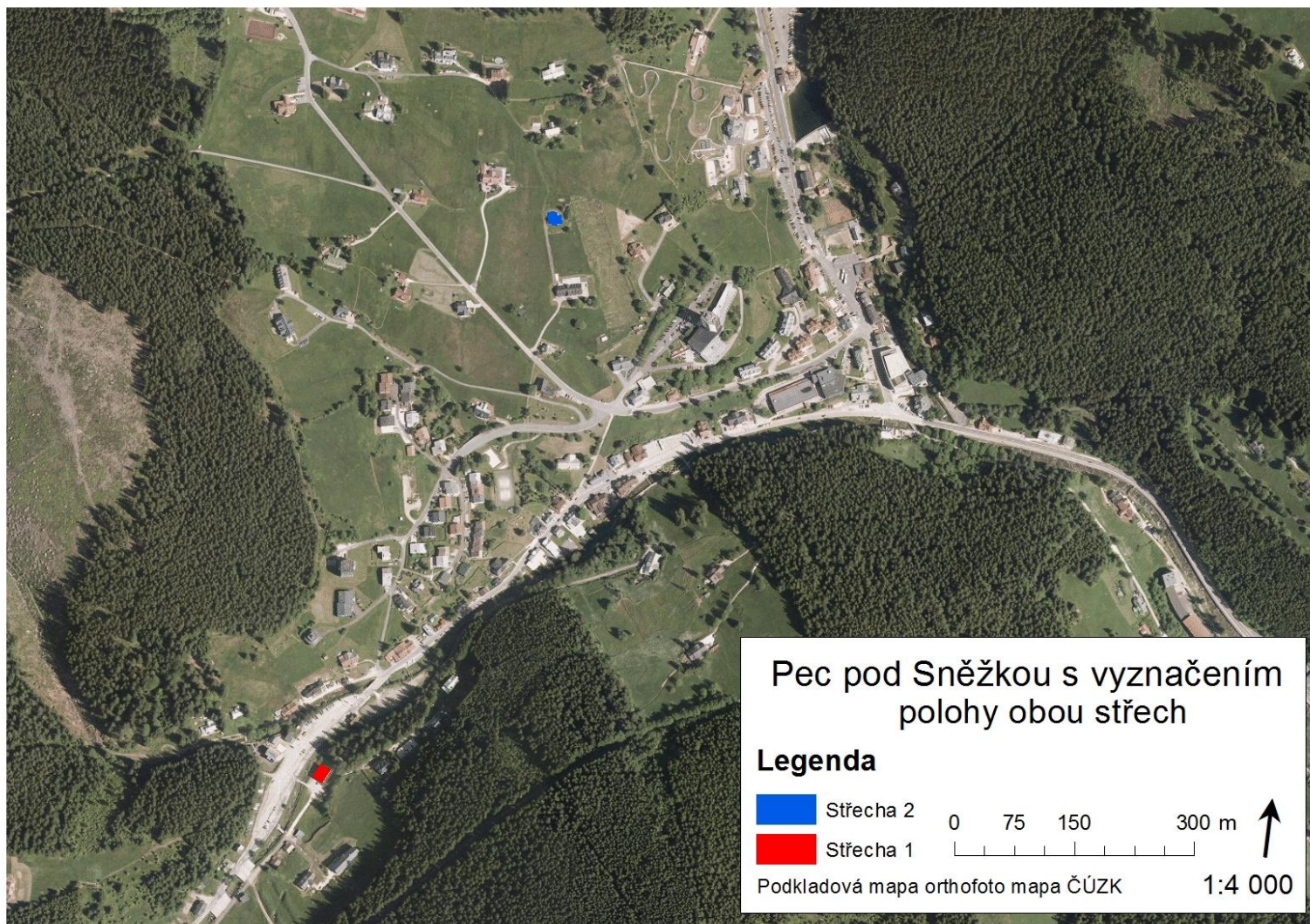
**SANTOS T., GOMES N., FREIRE S., BRITO M. C., SANTOS L. et TENEDÓRIO J. A., 2014:** Applications of solar mapping in the urban environment, *Applied Geography* 51: 48-57.

**WEHR A. et LOHR U., 1999:** Airborne laser scanning - and introduction and overview, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 68-82.

**ZINK R., CAMARGO L. R., REIDELSTURZ P. et DORNER W., 2015:** Photogrammetric Point Clouds for GIS-Based High-Resolution Estimation of Solar Radiation for Roof-Top Solar Systems, *Surface Models for Geosciences*, 293–305.

## **8 Přílohy**

1. Mapa umístění střech v zájmové oblasti



Příloha č. 1: Mapa umístění střech v zájmové oblasti