

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta životního prostředí**

**Katedra aplikované geoinformatiky a územního  
plánování**



**Bakalářská práce**

**Odhad střešního solárního potenciálu s využitím  
r.sun algoritmu (GRASS GIS)**

**Tomáš Svárovský**

© 2014 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Svárovský

Krajinářství

Název práce

**Odhad střešního solárního potenciálu s využitím r.sun algoritmu (GRASS)**

Název anglicky

**Estimation of roof-top solar potential using r.sun algorithm (GRASS)**

---

### Cíle práce

- Literární rešerše studií, které použily r.sun algoritmus pro odhad solárního potenciálu
- Odhad solárního potenciálu Pece pod Sněžkou

### Metodika

Solární energie je považována za jeden z nejvýhodnějších obnovitelných zdrojů, který má minimální negativní dopady na životní prostředí. Stanovení solárního potenciálu střech v urbanizovaném prostředí je v posledních letech předmětem studia mnoha vědeckých prací. Zejména díky rostoucí dostupnosti dat leteckého laserového skenování a vhodných nástrojů GIS. V současnosti jsou nejčastěji používanými algoritmy Area solar radiation (ArcGIS) a r.sun (GRASS). Řešitel zpracuje literární rešerši z oblasti modelování solárního potenciálu, přičemž se zaměří na použité nástroje, data a úplnost s jakou autoři uvádějí informace o použitých modelech. S využitím dat leteckého laserového skenování a r.sun algoritmu určí autor solární potenciál Pece pod Sněžkou.

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci " Odhad střešního solárního potenciálu s využitím r.sun algoritmu (GRASS GIS)" jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D. 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 15. 4. 2015

---

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za vedení a podporu.

## **Abstract**

Probíhající rychlý vývoj FV (fotovoltaických) zařízení přináší zvyšování jejich efektivity a snižování pořizovací ceny. Možnost využití dotačních programů a vysoké ceny energií ještě více přispívají k nárůstu zájmu o tento způsob výroby elektrické energie. Zejména se jedná o instalace FV panelů na střešní konstrukce. Aby bylo možné adekvátně posoudit vhodnost konkrétní lokality, je nutné provést výpočet solárního potenciálu. K tomu mohou být využity různé volně dostupné nástroje (např. PVGIS), které však nejsou v řadě případů dostačující, neboť pracují v hrubém rozlišení a nezohledňují tedy všechny aspekty ovlivňující množství dopadajícího slunečního záření. Nicméně rostoucí dostupnost dat v podrobném rozlišení přináší možnost tvorby stále přesnějších modelů. Algoritmus *r.sun* (Open Source GRASS GIS) je jednou z možností, jak modelovat množství dopadajícího záření a zároveň díky licenčním podmínkám finančně nezatěžuje zájemce o instalaci FV zařízení. V této práci jsou popsány běžné postupy používané při výpočtech pomocí modelu *r.sun* a zároveň postup, který byl použitý k výpočtu solárního potenciálu střešních konstrukcí v Peci pod Sněžkou. Celkové množství záření dopadajícího na tyto konstrukce činí 875 kWh/m<sup>2</sup>/rok. Nejvyšších hodnot (4,3 kWh/m<sup>2</sup>/den), je dosahováno v měsíci červnu, nejnižší hodnoty (0,3 kWh/m<sup>2</sup>/den) byly vypočteny pro měsíc prosinec.

**Klíčová slova:** Střešní konstrukce, LiDAR, DSM

## **Abstract**

The ongoing rapid development of PV (photovoltaic) equipment will increase the efficiency and reduce the acquisition cost of energy. The possibility of using grant programs and the high price of energy further contribute to the increased interest in this method of generating electricity, particularly relating to installation of the PV modules to the roof planes. In order to adequately assess the suitability of a particular location, it is necessary to calculate the solar potential. For this a variety of freely available tools (eg. PVGIS) can be used. However, they are not sufficient in many cases as they work in a rough resolution and thus do not reflect all aspects influencing the amount of solar radiation. On the other hand, the increasing availability of data in a detailed resolution provides the opportunity to create even more precise models. Algorithm *r.sun* (Open Source GRASS GIS) is one of the possibilities which can be used to model the amount of incident radiation and, also due to licensing conditions, it does not financially burden those who are interested in installing a PV system. This thesis describes common procedures used in the calculations using the model *r.sun* as well as the procedure that was used to calculate the solar potential of roof planes in Pec pod Sněžkou. The total amount of radiation incident in these roof planes is 875 kWh/m<sup>2</sup>/year. The highest values (4,3 kWh/m<sup>2</sup>/day) are achieved during June, the lowest values (0,3 kWh/m<sup>2</sup>/den) were calculated for the month of December.

**Keywords:** Roof planes, LiDAR, DSM

## Obsah

1	Úvod.....	4
2	Cíle práce .....	5
3	Literární řešerše.....	5
3.1	Sluneční záření.....	5
3.1.1	Sluneční deklinace .....	6
3.1.2	Sluneční konstanta .....	7
3.1.3	Albedo.....	7
3.2	Atmosféra.....	8
3.2.1	Rayleighova atmosféra.....	8
3.2.2	Atmosférická hmota.....	8
3.2.3	Linkeho koeficient .....	9
3.2.4	Clear sky index.....	10
3.3	Data a software.....	10
3.3.1	LiDAR.....	11
3.3.2	Digitální rastrové vrstvy.....	12
3.3.3	LASTools .....	13
3.4	Model <i>r.sun</i> GRASS GIS.....	14
3.4.1	Vstupní údaje .....	16
3.4.2	Výstupní údaje .....	18
4	Metodika .....	19
4.1	Data a software.....	19
4.2	Postup.....	20
5	Výsledky .....	23
5.1	Validace .....	25
6	Diskuze.....	25
7	Závěr .....	27
8	Literatura.....	27
9	Přílohy.....	29
9.1	Roční mapa slunečního záření .....	29

# 1 Úvod

Život člověka je od nepaměti úzce spjat s využíváním dostupných zdrojů energie na Zemi. Lidská populace neustále roste a zároveň se zvyšují i její potřeby a nároky, zvyšuje se spotřeba neobnovitelných energetických zdrojů, což má ve většině případů negativní vliv na životní prostředí. Rostoucí uvědomění vedlo v posledních letech k velkému rozvoji technologií, umožňujících využívání zdrojů obnovitelných. Jednou z hlavních technologií, u které v současné době dochází k rapidnímu vývoji (LIBRA at POULEK, 2006), je fotovoltaika, tedy přeměna sluneční energie na elektrickou.

Z globálního celosvětového hlediska je výroba energie z obnovitelných zdrojů nejčastěji podporována formou výkupních tarifů (SOLANGI et al, 2011). V České republice je tato podpora stanovena zákonem (Zákon č. 180/2005 Sb. a 165/2012 Sb.) a umožňuje volbu mezi garantovanou výkupní cenou a zeleným bonusem. Finanční podpora, společně se stále rostoucí účinností FV (fotovoltaických) zařízení, jsou hlavní důvody vedoucí v současnosti k nárůstu zájmu o tento způsob výroby elektrické energie. Pomineme-li různé negativní aspekty rozvoje fotovoltaiky v České republice, způsobené v minulosti špatnou legislativou, jeví se investice do této technologie jako velmi výhodná pro velké i malé investory.

Současným trendem, je umístování fotovoltaických panelů na střešní konstrukce, kterých je v naší urbanizované krajině dostatek. Tento způsob je výhodný zejména pro malé investory, neboť jim dovoluje využít k instalaci vlastní nemovitost.

V souvislosti s umístěním fotovoltaických panelů, je vhodné vypočítat takzvaný solární potenciál, což se ne vždy děje. V České Republice byla převážná většina FV elektráren, jejichž celkový výkon je 2100 MWp (GALLAY et al. 2015), vybudována na základě rozhodnutí, v nichž výpočet slunečního záření nebyl brán v potaz. (HOFIERKA et al. 2014). Důvodem může být skutečnost, že se jedná složitý proces obnášející posouzení mnoha faktorů, které intenzitu slunečního záření ovlivňují. Je to zejména orientace ke světovým stranám, nadmořská výška, zastínění okolním reliéfem, ale i měnící se klimatické podmínky a čistota atmosféry v průběhu roku.

K tomuto posouzení mohou být využity volně dostupné nástroje jako je např. PVGIS (Fotovoltaický geografický informační systém), což je volně dostupná databáze slunečního záření, která však v případech instalací na střešní konstrukce není příliš



vhodným řešením, neboť pracuje v hrubém rozlišení a nemůže tak obsáhnout všechny potřebné aspekty. Vhodným řešením je díky stále se zvyšující dostupnosti a přesnosti vstupních dat, využití specializovaných algoritmů implementovaných v GIS (geografický informační systém), které jsou schopny pracovat v podrobném rozlišení a poskytovat tak daleko přesnější výsledky. Porovnání většiny těchto algoritmů bylo popsáno v práci (RUIZ-ARIAS et al. 2009). V dnešní době je často používán ArcGIS, který pro tyto účely obsahuje zvláštní sadu nástrojů (FU et RICH, 1999, KODYSH et al. 2013). U takového softwaru (ArcGIS, ENVI apod.) však může být pro většinu zájemců o instalaci FV zařízení limitujícím faktorem jeho cena. Alternativou je algoritmus *r.sun* (Open Source GRASS GIS), jehož velkou výhodou je způsob nabytí licence, která je zdarma a nezpůsobuje tak další nežádoucí výdaje.

## 2 Cíle práce

Cílem práce je posouzení a porovnání postupů v oblasti výpočtu solárního potenciálu, při nichž byl použit algoritmus *r.sun* (ŠŮRI at HORIERKA, 2004), implementovaný do Open Source prostředí GRASS GIS.

Předmětem posouzení je použití algoritmu při výpočtech aplikovaných zejména na malá území a střešní konstrukce budov, se zaměřením na použitá vstupní data a specifická nastavení algoritmu

Součástí práce je také vlastní výpočet solárního potenciálu města Pece pod Sněžkou za použití výše zmiňovaného algoritmu a vstupních dat pořízených technologií LiDAR (Laser detection and ranging)

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Sluneční záření

Sluneční záření je všudypřítomným, obnovitelným a čistým zdrojem energie, který má zcela zásadní význam pro všechny procesy probíhající na Zemi. Jedná se o elektromagnetické vlnění s různými vlnovými délkami, jejichž spektrum se mění v závislosti na prostředí, kterým prochází. Výkon záření dopadajícího na povrch planety je obrovský –  $1,8 \cdot 10^{17}$  W (POULEK, 1994) a v globálním měřítku relativně konstantní, s minimálními výkyvy způsobenými kolísající aktivitou Slunce a eliptickou dráhou Země.

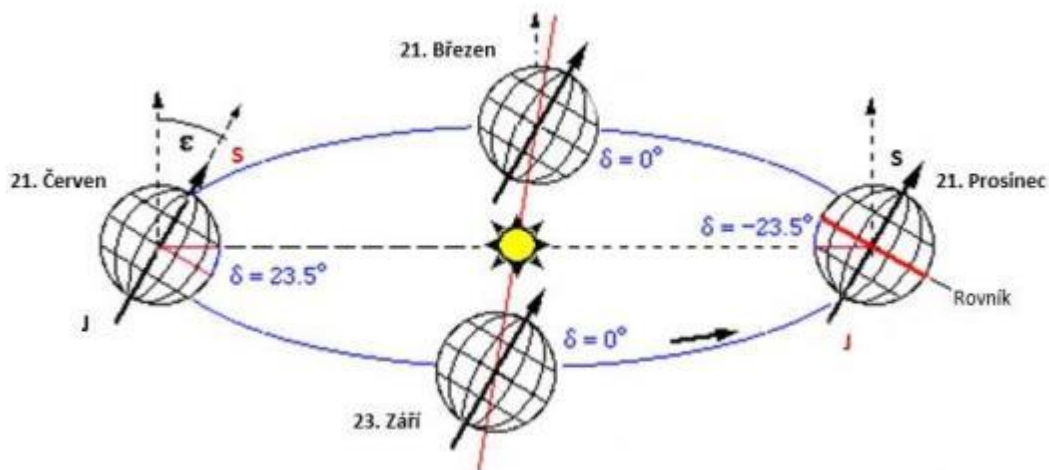
Z lokálního pohledu, což je i výroba elektrické energie pomocí FV zařízení, je však množství dopadajícího záření velmi proměnlivé, jelikož je ovlivněno mnoha faktory. Je to zejména zeměpisná šířka, sluneční deklinace a stav atmosféry. Dalším důležitým faktorem je rovněž tvar zemského reliéfu, který může v mnoha případech způsobovat zastínění a snižovat tak množství dopadajícího přímého záření.

Celkové, tzv. globální sluneční záření tvoří 3 složky – přímá, difuzní a odražená. Detailním matematickým popisem těchto složek se zabývalo mnoho autorů (KITTLER et MIKLER, 1986, JENČO, 1992) a jejich postupy jsou uplatňovány při výpočtech v modelech používaných GIS, při posuzování vhodnosti konkrétní lokality

1. Přímé záření - záření dopadající na povrch Země bez ovlivnění atmosférou, jehož množství výrazně závisí na jejím stavu – čistotě a oblačnosti. Využití tohoto záření můžeme na rozdíl od difuzního a odraženého záření zefektivnit pomocí vhodných koncentrátorů (LIBRA at POULEK, 2006). Základním parametrem pro výpočet intenzity přímého záření je sluneční konstanta, popsána níže.
2. Difuzní záření – záření, které je přímo ovlivněno stavem atmosféry. Jeho množství je nejvyšší při nepříznivých meteorologických podmínkách, jejichž vlivem je většina přímého záření rozptýlena na difuzní záření.
3. Odražené záření – záření, které se díky odrazové schopnosti povrchu na který dopadá (viz. kapitola albedo), odráží zpět do prostoru.

### **3.1.1 Sluneční deklinace**

Sluneční deklinace je úhel, pod nímž dopadají sluneční paprsky na střed zemského rovníku. Během ročního oběhu Slunce kolem Země se velikost tohoto úhlu mění. Interval je přibližně od  $-23,5^\circ$  do  $23,5^\circ$ . Deklinace je nulová v období jarní a podzimní rovnodennosti. Nejvyšší hodnotu má při letním slunovratu, nejnižší naopak při zimním.



**3.1 Sluneční deklinace (Juergen Giesen, online, 2014:  
<http://www.jgiesen.de/ErdeSonne/projekte/jahreszeiten.html>)**

Hodnota sluneční deklinace je velmi důležitým parametrem při výpočtu solárního záření. Její přesné hodnoty pro jakoukoliv lokalitu na Zemi je možné zjistit například na webových stránkách NOAA (Nacionál Oceanid & Atmospheric Administration) <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>. Nicméně většina dnešních modelů pro výpočet solárního záření (*r.sun*, *solar area radiation*), je schopna tuto hodnotu spočítat na základě vstupních údajů, což může být např. mapa s určeným SRS (souřadnicový referenční systém).

**3.1.2 Sluneční konstanta**

Pomocí sluneční konstanty můžeme charakterizovat extraterestrické sluneční záření, což je záření vně zemské atmosféry. Konstanta vyjadřuje množství slunečního záření, procházející kolmo plochou o velikosti  $1\text{m}^2$  (vně zemské atmosféry), ve střední vzdálenosti Země od Slunce, za 1 vteřinu. (KALOGIROU, 2009). Hodnota sluneční konstanty se v průběhu roku mírně mění, což je dáno excentricitou oběžné dráhy Země a velikostí sluneční aktivity. Hodnota této konstanty byla již mnohokrát revidována, nicméně pro výpočet solárního potenciálu je Světovým radiometrickým centrem (WRC) doporučena a vesměs přijímána hodnota  $1367\text{ [Wm}^{-2}\text{]}$ . S touto hodnotou je počítáno i v modelu *r.sun*

**3.1.3 Albedo**

Odrazová schopnost povrchu je popisována jako Albedo (latinsky albus = bílý). Vyjadřuje poměr mezi dopadajícím a odraženým zářením a často se udává v procentech. Závisí na charakteru povrchu a na úhlu dopadajícího záření. Typickým

příkladem závislosti na úhlu dopadu slunečního záření je voda. Albedo vody je při malých úhlech dopadu téměř 100%, oproti tomu při kolmo dopadajícím záření jsou to pouze cca 2%. Globálně jsou hodnoty albeda nejvyšší pro čerstvý sníh a nejnižší pro hlubokou vodu – oceány.

## 3.2 Atmosféra

Atmosféra (řecky atmos – pára), je plynný obal Země, který je k ní vázán gravitační silou. Je tvořena směsí plynů a aerosolů (voda, prach, imise apod.), jejichž množství je proměnlivé.

Mezi faktory ovlivňující množství dopadajícího záření, patří zejména přítomnost výše zmíněných aerosolů a dále potom vzdálenost, kterou musí paprsky v atmosféře urazit před dopadem na Zemi.

### 3.2.1 Rayleighova atmosféra

Rayleighovou atmosférou rozumíme dokonale suchou a čistou atmosféru, ve které je pronikající elektromagnetické vlnění ovlivněno pouze rozptylem na molekulách plynů, tzn. bez vlivu aerosolů. Tato „modelová atmosféra“ se využívá např. při výpočtu Linkeho koeficientu (viz. Linkeho koeficient)

### 3.2.2 Atmosférická hmota

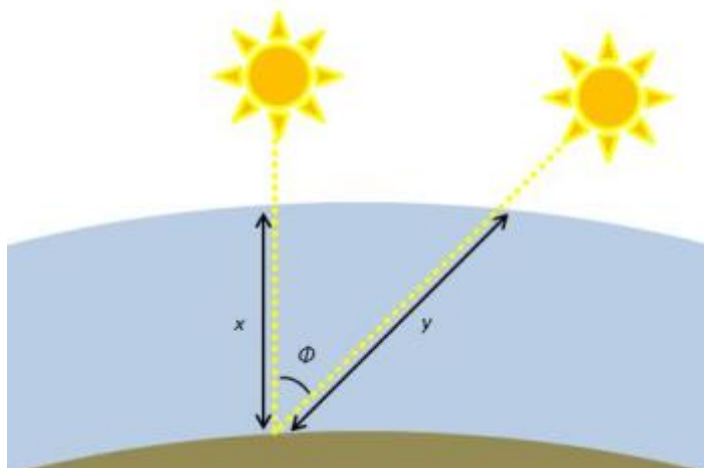
Atmosférickou hmotou (air mass), rozumíme podíl skutečné a nejkratší vzdálenosti, kterou musí světlo urazit skrze atmosféru. Je to tedy podíl vzdálenosti, kdy Sluneční paprsky dopadají na Zemi pod jakýmkoliv zenitovým úhlem a vzdálenosti, kdy na Zemi dopadají pod nulovým zenitovým úhlem (když je slunce v zenitu – nadhlavníku).

Představuje vyčíslení redukce slunečního záření procházejícího atmosférou vlivem absorpce aerosoly. Kde má, představuje atmosférickou hmotu a  $\theta$ , zenitový úhel.

$$am = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

nebo

$$am = \frac{y}{x} \quad (2)$$



Obrázek 3.2 Atmosférická hmota - air mass

Vzhledem k tomu, že výpočet (1 a 2) nebral v úvahu vliv zakřivení Země a atmosféry, byl změněn následujícím způsobem (KASTEN at YOUNG, 1989).

$$am = \frac{\frac{p}{p_0}}{\cos \theta + 0,50572 * (96,07995^\circ - \theta)^{-1,6364}} \quad (3)$$

Použitím členu  $p/p_0$  je rovněž zohledněn vliv atmosférického tlaku. Kde  $p$  vyjadřuje reálný atmosférický tlak,  $p_0$  je normální atmosférický tlak, jehož hodnota činí 101,325 kPa. Takto vypočtená mocnost atmosférické hmoty je využívána v různých modelech pro výpočet slunečního záření, včetně modelu *r.sun*.

### 3.2.3 Linkeho koeficient

V reálné atmosféře se vždy vyskytuje určité množství aerosolů a plynů, které negativně ovlivňují prostupnost slunečního záření. Čím je jejich množství vyšší, tím je prostupnost atmosféry nižší, což je způsobeno zvýšením rozptylu a absorpce záření. (KASTEN, 1996). Velikost tohoto „zakalení“ atmosféry a sníženou prostupnost pro přímé sluneční záření vyjadřuje Linkeho koeficient  $T_L$ .

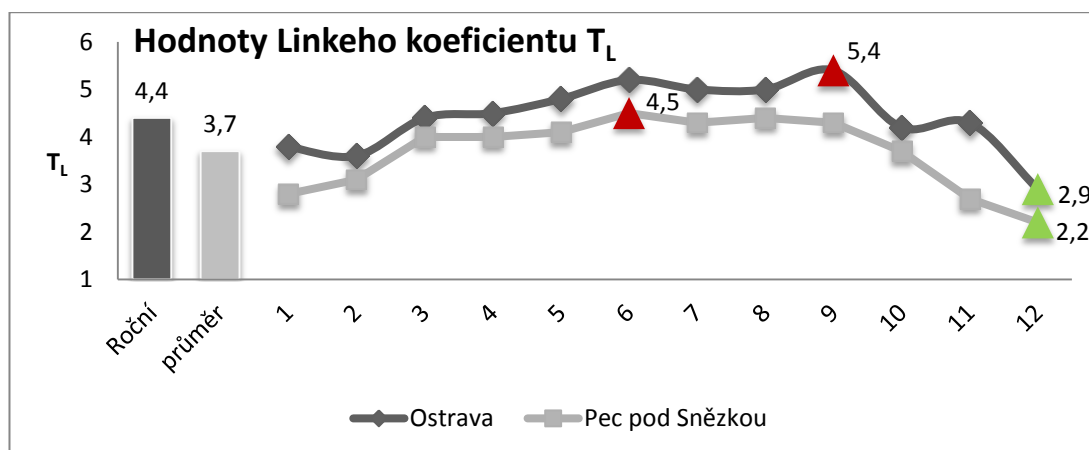
$$T_L = \frac{\delta}{\delta_{Rayleigh}} \quad (4)$$

Kde  $\delta$  představuje optickou tloušťku atmosféry, tvořenou součtem optických tloušťek Rayleighovy atmosféry, plynů, ozónu, aerosolů a vodních par.

$$\delta = \delta_{Rayleigh} + \delta_{gas} + \delta_{ozone} + \delta_{aerosols} + \delta_{water} \quad (5)$$

Hodnoty a mapy Linkeho koeficientu pro celý svět, byly zpracovány do databáze (REMUND et al., 2003) a jsou volně dostupné na adrese <http://www.soda.is.com>

Hodnoty Linkeho koeficientu jsou v průběhu roku proměnlivé a mohou se i v rámci relativně malých území jako je Česká republika, značně lišit.



Obrázek 3.3 Hodnoty Linkeho koeficientu v průběhu roku (zdroj dat: <http://www.soda-is.com>)

### 3.2.4 Clear sky index

Clear sky index  $k_c$  se využívá při výpočtech slunečního záření jako aspekt zohledňující reálné podmínky (oblačnost). Představuje propustnost atmosféry pro záření dopadající na Zemi. Je vyjádřen jako poměr mezi množstvím reálně změřeného (real sky) záření  $G_{hs}$  a množstvím vypočítaného záření při bezoblačné (clear sky) obloze  $G_{hc}$ , které dopadá na vodorovné povrchy (ŠŮRI et HOFIERKA, 2004)

$$k_c = \frac{G_{hs}}{G_{hc}} \quad (6)$$

### 3.3 Data a software

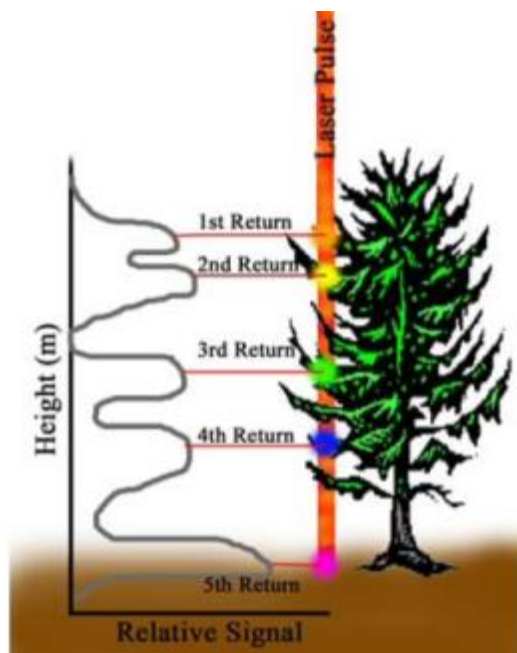
Základem pro výpočet solárního potenciálu v GIS obecně, jsou především vhodná, prostorově orientovaná data, která mohou být pořizována různými metodami. Mezi nejčastější patří takzvané bezkontaktní metody, jako je fotogrammetrie, radarové snímání a laserové letecké skenování - LiDAR. (viz. Kapitola LiDAR)

V dnešní době jsou zřejmě nejvíce využívána data pořízená metodou laserového leteckého skenování a to zejména ve studiích, zabývajících se výpočty pro malá nebo střední území (BRITO et al., 2012), nebo (BODE et al., 2014).

Aby bylo možné data použít k dalším operacím, je nutné je následně zpracovat do vhodného formátu používaného v GIS. Všechny současné modely pro výpočet solárního potenciálu dosud pracují pouze s daty v rastrovém formátu. Zpracování může probíhat přímo v GIS, nebo je možné použít software specializovaný na práci s LiDAR daty, jako je např. LASTools, nebo Fusion

### **3.3.1 LiDAR**

Metoda laserového leteckého skenování se uplatňuje při tvorbě různých digitálních modelů terénu., které jsou dále využívány při výpočtu solárního potenciálu. Mohou to být výpočty záření dopadajícího na střešní konstrukce, koruny stromů apod. (MALLET et BRETAR, 2009, TOOKE et al. 2011, NGUYEN et al. 2012). Princip spočívá v odrazu svazku paprsků vysílaných v přesně definovaných časových intervalech a pod různými úhly z letícího letadla směrem k zemi, kde se postupně odráží od jednotlivých vrstev objektů na povrchu a vrací se zpět do snímače v letadle. V případě návratu více odrazů, obsahuje první odraz informace o povrchu, což mohou být koruny stromů, budovy a další vysoké objekty. Poslední odraz obsahuje informace o terénu. Získaná data jsou ve formě tzv. bodových mračen (point clouds). Podle počtu odrazů/návratů paprsku, který závisí na charakteru objektu, od něhož se odráží, je možné jednotlivé zaznamenané body vyhodnotit a zařadit do kategorií, tzv. klasifikovat. Nejčastěji používané jsou kategorie: země, vysoká vegetace, budovy. Georeferencování dat je zajištěno pomocí GPS (Global position systém), času potřebného k návratu paprsku do snímače a úhlu pod kterým byl paprsek vyslán. Detailní popis je možné najít např. v práci (WEHR et LOHR, 1999). Pořizování dat touto technologií není závislé na denním světle, lze tedy provádět i v noci. Nelze ho naopak provádět při špatných atmosférických podmínkách, jako je vysoká oblačnost a srážky, protože jimi laserový paprsek neproniká.



Obrázek 3.4 Princip vícenásobných návratů (e-education 2015, online: <https://www.e-education.psu.edu>)

Největší výhodou LiDAR dat je jejich přesnost, která se pohybuje v řádech centimetrů a rovněž skutečnost, že z nich lze relativně snadným způsobem odvodit vstupní rastrové vrstvy, vyžadované nejen modelem *r.sun*, ale i ostatními modely pro výpočet solárního potenciálu, jako je např. Solar area radiation - ArcGIS.

### 3.3.2 Digitální rastrové vrstvy

Mezi nejdůležitější data používaná při výpočtech slunečního záření patří vrstvy, které obsahují výškové informace ohledně konkrétní lokality. Těmito vrstvami v závislosti na požadovaných výstupních datech jsou DTM (digital terrain model) nebo DSM (Digital surface model).

- DTM (digital terrain model) – digitální model terénu/georeliéfu, bez všech antropogenních prvků (budovy, mosty apod.) a prvků vegetačního pokryvu (stromy, keře), obsahující informace o nadmořské výšce a zeměpisných souřadnicích.
- DSM (Digital surface model) – digitální model povrchu (včetně antropogenních prvků a vegetačního pokryvu), obsahující informace o nadmořské výšce a zeměpisných souřadnicích.



Digitální model terénu DTM, se používá při výpočtech, kdy je požadovaným výstupem množství záření dopadající na zemský povrch, např. (HOFIERKA et CEBECAUER , 2007). Využití digitálního modelu povrchu DSM, je vhodné v případech, kdy je výstupem množství záření dopadající například na střešní konstrukce, např. (BRITO et al., 2011). Důležitým parametrem těchto modelů je zejména jejich rozlišení, které významně ovlivňuje přesnost dalších výsledků (RUIZ-ARIAS et al. 2009).

### 3.3.3 LASTools

LASTools je software specializovaný na práci s LiDAR daty ve formátu LAS/LAZ. Formát LAS (ASPRS, 2014) je veřejným binárním souborovým formátem, sloužícím k výměně 3D (troj-rozměrných) dat mezi uživateli. Primárně byl vytvořen k výměně dat získaných laserovým leteckým skenováním. Poslední verze je ASPRS LAS 1.4 Formát LAZ (rapidlasso GmbH, 2015) je soubor vzniklý komprimací souboru LAS LASTools obsahuje sadu nástrojů umožňujících prohlížení, editaci a klasifikaci dat, získaných z laserového leteckého skenování. Lze jím vytvořit různé druhy digitálních modelů povrchu. Software se vyznačuje vysokou rychlostí a nízkými nároky na paměť, k čemuž přispívá možnost provádění výpočtů volitelným počtem jader procesoru. Všechny nástroje je možné ovládat pomocí GUI nebo příkazové řádky a je rovněž možná jejich integrace do ArcGIS a QGIS, kde jsou dostupné pomocí „Toolboxu“ (rapidlasso GmbH, 2015)

Mezi nejpoužívanější nástroje při úpravě dat sloužících k následnému výpočtu solárního potenciálu patří:

- **lasground** – slouží k rozlišení bodů představujících povrch Země od ostatních bodů.
- **lashight** – nástroj, který vypočítá výšku bodů nad povrchem.
- **lasclasisify** – nástroj pro klasifikaci budov a vysoké vegetace, předpokladem pro jeho použití je dřívější klasifikace bodů představujících povrch Země, což může být provedeno pomocí *lasground* a provedení výpočtu výšky všech bodů nad povrchem nástrojem *lasheight*.
- **las2dem** – nástroj, který za pomoci triangulace bodů vytvoří rastrovou vrstvu povrchu. V závislosti na konkrétním nastavení to může být DSM nebo DTM apod.

- **lasboundary** – na základě klasifikace je tímto nástrojem možné vytvářet polygony, ohraničující určité skupiny bodů. Využití je možné např. při výpočtu solárního potenciálu pro střešní konstrukce, kdy lze tímto způsobem automaticky vytvořit tzv. „footprints“ představující plochy střech, čímž odpadá časově náročné ruční vytváření polygonů.

Kromě výše uvedených nástrojů, které pro komerční využití vyžadují zakoupení licence pro používání, nabízí software rovněž Open Source nástroj **laszip**, který slouží ke kompresi souborů z běžně používaného, avšak velmi objemného formátu LAS do formátu LAZ. Tato komprese je velmi rychlá a nezpůsobuje ztrátu informací. Všechny nástroje LASTools umožňují přímo zpracovávat oba standardy - není tudíž nutný převod do „las“, jako je tomu např. u ArcGIS.



**Obrázek 3.5** Klasifikovaný LiDAR, Pec pod Sněžkou (zobrazeno pomocí LASTools - lasview)

### 3.4 Model *r.sun* GRASS GIS

Model *r.sun* je volně dostupný model, sloužící k výpočtu solárního záření dopadajícího na Zemi. Primárně je začleněn do GRASS GIS, je ho ale možné používat i v dalších Open source GIS, jako je např. QGIS. Díky začlenění do těchto geografických informačních systémů je použitelný pro uživatele MS Windows i Linux.

První verze *r.sun* (HOFIERKA, 1997), sloužila pouze k výpočtu přímého slunečního záření a byla použitelná pouze v rámci malých území. Současná verze *r.sun* (ŠŮRI et

HORIERKA, 2004) je mnohem komplexnější a není nijak omezena velikostí ani členitostí území, pro které jsou výpočty prováděny. To je patrné ze studií, v nichž byl model doposud používán. Zřejmě nejznámější a z hlediska velikosti nejrozsáhlejší, je jeho použití při tvorbě celoevropské databáze slunečního záření PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), (ŠÚRI et al., 2005).

Model *r.sun* využívá rovnice šíření slunečního záření (SCHARMER et GREIF, 2000) obsažené v ESRA (European Solar radiation Atlas). Počítá se zeslabením extraterestrického záření atmosférickou tloušťkou (air mass) a znečištěním atmosféry, které je reprezentováno Linkeho indexem.

Pokud nejsou zadány hodnoty představující vliv oblačnosti, je vždy vypočítáno množství záření pro ideální podmínky bez oblačnosti (clear-sky). Množství záření dopadajícího na povrch Země při reálné obloze (real sky), je možné odvodit pomocí Clear sky indexu  $k_c$ , který zohledňuje zeslabení záření vlivem oblačnosti. Jeho použití je mírně odlišné pro vodorovné a nakloněné plochy.

Pro vodorovné plochy platí, že celkové množství záření při reálných podmínkách (real sky) -  $G_h$ , se rovná násobku záření vypočítané pro ideální podmínky (clear sky) -  $G_{hc}$  a clear sky indexu -  $k_c$ . (BEYER et al. 1996, HAMMER et al. 1998, RIGOLLIER et al. 2001).

$$G_h = G_{hc} * k_c \quad (7)$$

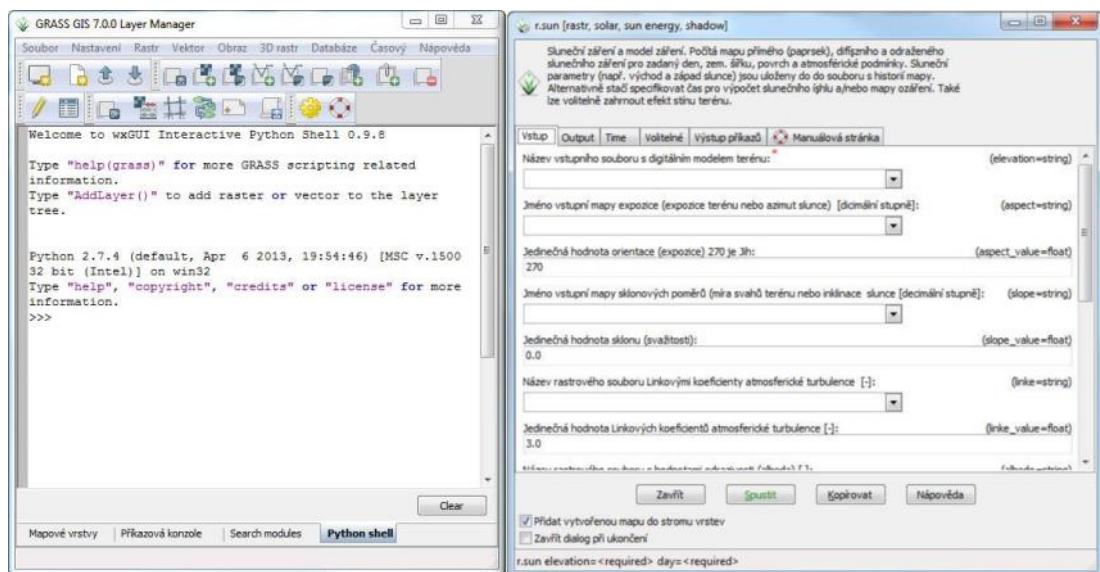
Pro nakloněné plochy je nutné provést výpočet poměru přímého a difuzního záření pro vodorovné plochy, který v Evropě většinou nabývá hodnot od 0,3 – 1,0 (KASTEN et CZEPLAK 1980) a poté odvodit hodnoty přímé a difuzní složky clear sky indexu. Podrobný postup je uveden v práci (ŠÚRI et HOFIERKA, 2004).

V případě potřeby je možné do výpočtu dopadajícího záření zahrnout i vliv okolního terénu. Tyto výpočty mohou probíhat interně, tedy přímo pomocí modelu *r.sun*, nebo odděleně pomocí dalšího modelu obsaženého v GRASS GIS – *r.horizon*. Zahrnutí vlivu okolního terénu je značně náročné na výkon použitého hardwaru a proto je použití *r.horizon* vhodné zejména pro rozlehlá území a v případě opakovaných výpočtů, neboť jej stačí použít pouze jednou.

Model pracuje ve dvou režimech, které jsou voleny automaticky na základě použitých vstupních údajů.

1. Výpočet okamžitých hodnot přímého, difuzního a odraženého záření [ $W \cdot m^{-2}$ ] pro nastavený místní čas a úhel dopadu slunečních paprsků ve stupních
2. Výpočet celkových hodnot přímého, difuzního a odraženého záření [ $Wh \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ ] pro nastavený celkovou dobu ozáření [min]

Ovládání *r.sun* v GRASS GIS je řešeno pomocí GUI (Graphic User Interface). V případě potřeby má uživatel možnost využívat příkazové konzole nebo skriptů v jazyce Python. Tato možnost je vhodná zejména v případě komplikovaných a časově náročných výpočtů. (OSGEO, 2015).



Obrázek 3.6 Uživatelské rozhraní (GUI) - GRASS GIS 7

### 3.4.1 Vstupní údaje

V závislosti na použitých vstupních datech je automaticky zvolen režim, ve kterém model pracuje. Mezi povinná vstupní data/parametry patří:

- Digitální model povrchu ve formě rastrové mapy
- Časové určení výpočtu

Ostatní vstupní parametry mají buďto přednastavenou hodnotu, nebo je jejich výpočet prováděn vlastním modelem. Jejich zahrnutím do výpočtu je možné zohlednit mnoho faktorů ovlivňujících intenzitu slunečního záření a dosáhnout tak větší věrohodnosti výsledků.

Většinu parametrů je možné zadat jako rastrovou mapu (string), nebo číselnou hodnotu (float, integer). Veškeré vstupní rastrové mapy (*aspect*, *slope*, *linke* apod.) musejí být typu FCELL (single-precision floating-point).

Pokud mají vstupní rastrové mapy určený SRS - souřadnicový referenční systém, není nutné dále zadávat zeměpisnou délku a šířku.

***elevation=string***

Rastrová mapa obsahující údaje o převýšení, v závislosti na výpočtu DSM nebo DTM. [m]

***aspect=string*** [stupně]

Rastrová mapa obsahující informace o orientaci povrchu (terénu, střechy apod.) vůči světovým stranám.

***aspect\_value=float*** [stupně]

Číselná hodnota orientace ke světovým stranám, 270 je jih, pokud je zadána rastrová mapa *aspect*, výchozí hodnota je přepsána  
*výchozí hodnota: 270*

***slope=string*** [stupně]

Rastrová mapa obsahující informace o sklonu povrchu (terénu, střechy apod.)

***slope\_value=float*** [stupně]

Číselná hodnota sklonu, pokud je zadána rastrová mapa *slope*, výchozí hodnota je přepsána.  
*Výchozí hodnota: 0.0*

***linke=string***

Rastrová mapa obsahující hodnoty Linkeho koeficientu.

***linke\_value=float***

Číselná hodnota Linkeho koeficientu, pokud je zadána rastrová mapa *linke*, výchozí hodnota je přepsána.  
*Výchozí hodnota: 3.0*

***albedo=string***

Rastrová mapa obsahující hodnoty albeda

***albedo\_value=float***

Číselná hodnota albeda, pokud je zadána rastrová mapa *albedo*, výchozí hodnota je přepsána.  
*Výchozí hodnota: 0.2*

***lat=string***

Rastrová mapa obsahující informace o zeměpisné délce, vyžadována pouze pokud nemá vstupní mapa *elevation* určený SRS.

***long=string***

Rastrová mapa obsahující informace o zeměpisné šířce, vyžadována pouze pokud nemá vstupní mapa *elevation* určený SRS.

***coeff\_bh=string*** [0 - 1]

Rastrová mapa obsahující hodnoty přímé složky clear sky indexu.

***coeff\_dh=string*** [0 - 1]

Rastrová mapa obsahující hodnoty difuzní složky clear sky indexu.

**horizon\_basename=basename** (basename=název adresáře)  
název adresáře s mapami vytvořenými modelem r.horizon, pokud byl použit.

**horizon\_step=float** [stupně]  
Velikost úhlového kroku pro mnoho směrů horizont.

**day=integer**  
Pořadové číslo dne v roce. (1-365)

**step=float** [desetinný zápis]  
Časový krok, ve kterém budou prováděny v průběhu zvoleného dne.  
Výchozí hodnota: 0.5

**declination=float** [rad]  
Hodnota deklinace, přepíše vnitřní výpočet modelu.

**time=float**  
místní sluneční čas. (nastavení pouze pro režim 1) [desetinný zápis]

**distance\_step=float**  
Vzorkování – koeficient vzdálenosti kroku (0.5-1.5) Určuje, s jakou hustotou budou prováděny výpočty zastínění. Výchozí hodnota je z hlediska přesnosti pro většinu případů dostačující. Nižší hodnoty výpočty zpřesňují, za cenu nárůstu výpočetního času.  
Výchozí hodnota: 1.0

**civil\_time=float**  
Časové pásmo, pokud není zadáno, použije se místní sluneční čas.

### 3.4.2 Výstupní údaje

Veškerá spočítaná data mají formu rastrových map, které obsahují příslušné informace, závisující na druhu výpočtu.

**incidunt=string**  
Rastrová mapa úhlu dopadu záření. (pouze pro režim výpočtu 1)

**beam\_rad=string**  
Rastrová mapa obsahující hodnoty přímého záření. Pro režim 1 [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] nebo pro režim 2 [ $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ]

**diff\_rad=string**  
Rastrová mapa obsahující hodnoty difuzního záření. Pro režim 1 [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] nebo pro režim 2 [ $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ]

**refl\_rad=string**  
Rastrová mapa obsahující hodnoty odraženého záření. Pro režim 1 [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] nebo pro režim 2 [ $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ]

**glob\_rad=string**  
Rastrová mapa obsahující hodnoty celkového (globálního) záření. Pro režim 1 [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] nebo pro režim 2 [ $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ]

**insol\_time=string**  
Rastrová mapa obsahující údaje o času ozáření [h]  
(pouze pro režim výpočtu 1)

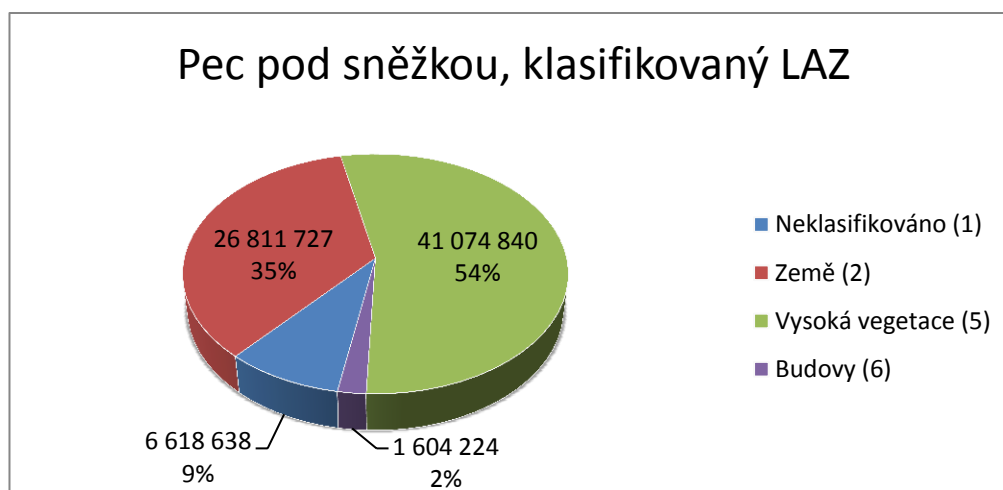
(OSGEO, 2015), (HOFIERKA, 2004)

## 4 Metodika

Pro výpočet solárního potenciálu bylo zvoleno horské městečko pec pod Sněžkou, nacházející se v údolí řeky Úpy v Krkonoších, jeho rozloha činí přibližně 52 km<sup>2</sup>. V oblasti pro kterou byl solární potenciál počítán, se nachází cca 300 střešních konstrukcí, což představuje přibližně 60000 m<sup>2</sup> plochy, která by teoreticky mohla být využita pro instalaci solárních panelů.

### 4.1 Data a software

Jako hlavní zdroj, z něhož byly odvozeny další potřebné vstupní vrstvy, byla použita klasifikovaná data z leteckého laserového skenování – LiDAR, v komprimovaném souborovém formátu LAZ. Data byla poskytnuta katedrou aplikované geoinformatiky a územního plánování z Fakulty životního prostředí na České zemědělské univerzitě v Praze. Byla pořízena 15. 3. 2013 a soubor obsahuje celkem 76,1 mil bodů.



Obrázek 4.1 Klasifikovaný soubor LAZ - zastoupení jednotlivých kategorií

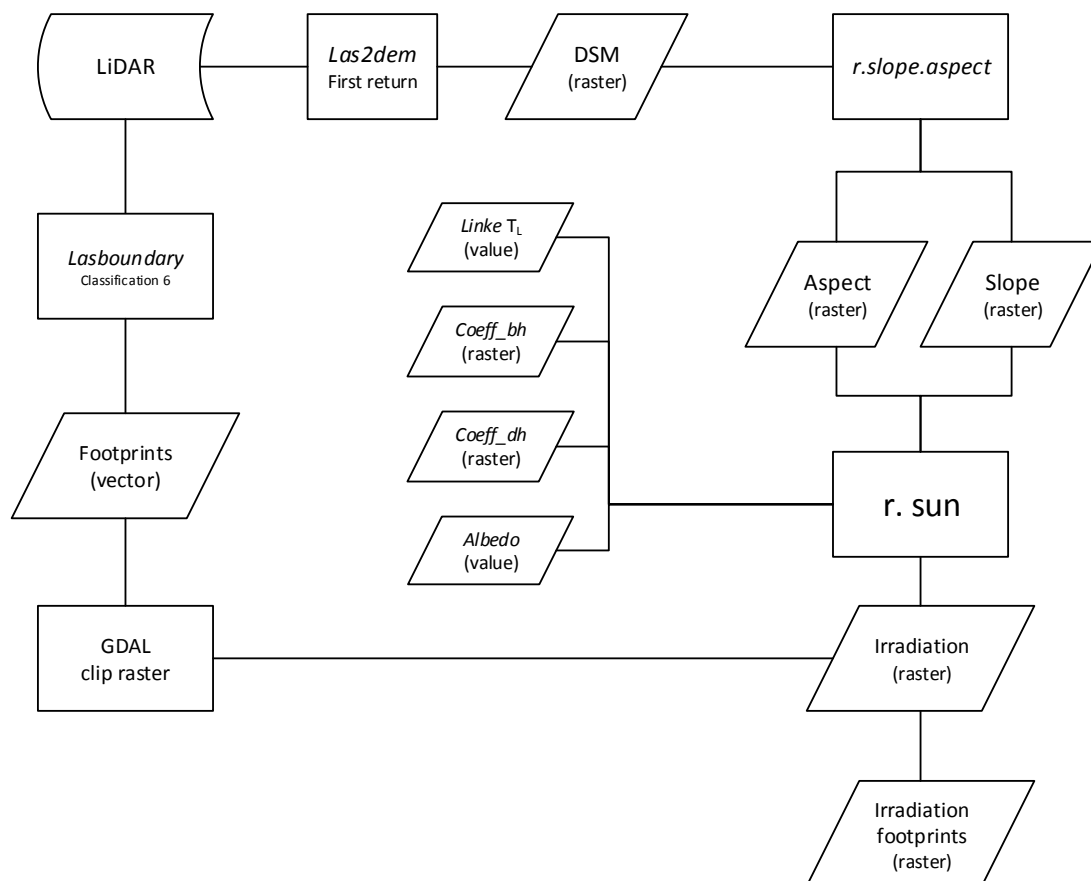
K výpočtu solárního potenciálu modelem *r. sun*, je vyžadováno pouze několik základních vstupních údajů, nicméně kvůli zpřesnění výsledků byly použity další údaje – Linkeho koeficient  $T_L$  a koeficienty zohledňující stav oblačnosti – *coeff\_bh* a *coeff\_dh*. Bylo vypočítáno celkové využitelné množství slunečního záření, které dopadá na střešní konstrukce v průběhu celého roku i v jeho jednotlivých měsících.

Pro práci s LiDAR daty byl primárně používán software LASTools, případně jeho moduly integrované do QGIS. Ke zpracování dalších rastrových a vektorových vrstev byl použit QGIS a GRASS GIS. Vlastní výpočet solárního potenciálu byl

proveden pomocí modelu *r.sun* v GRASS GIS verze 7.0. Pro porovnání dosažených výsledků byly použity hodnoty vygenerované nástrojem PVGIS.

## 4.2 Postup

Postup výpočtu je zobrazen v následujícím schématu, detaily jednotlivých kroků a nastavení, jsou popsány níže v textu.



**Obrázek 4.2** Postup při výpočtu solárního potenciálu

Nejdůležitější vstupní vrstvou, která musela být vytvořena je *elevation*. Což je vrstva obsahující výškové informace o lokalitě. V případě výpočtu solárního potenciálu pro střešní konstrukce se jedná o rastrovou vrstvu DSM, která kromě informací o terénu obsahuje i informace o antropogenních prvcích a vegetačním pokryvu. K získání této vrstvy byl použit LAZ soubor s LiDAR daty. Zpracování proběhlo pomocí nástroje *last2dem* – LASTools. Pro vytvoření vrstvy bylo využito principu odrazu laserového paprsku od určitých objektů. V případě DSM se jedná o první odraz/návrat. Jako velikost rozlišení DSM byla zvolena hodnota 0,5 m. která je pro daný účel



dostatečná. Volba podrobnějšího rozlišení by pouze navyšovala potřebný výpočetní čas, ovšem bez viditelné přidané hodnoty, což bylo prakticky ověřeno.

- Nastavení *las2dem* pro vytvoření DSM

```
> -first_only -step 0.5
```

Dalším krokem bylo vytvoření vrstev obsahujících informace o orientaci ke světovým stranám a sklonu – *aspect a slope*. Tyto vrstvy je nutné vytvořit z již získaného DSM. Možností jak toho dosáhnout, se nabízelo více. Jednou z nich bylo použití QGIS a modulů GDAL – *aspect a slope*. Nakonec se jako výhodnější ukázalo vytvořit je přímo v GRASS GIS pomocí nástroje *r.slope.aspect*. V nastavení byl zvolen sklon svahu ve stupních, formát rastrových map FCELL, faktor pro převod jednotek 1.0 a minimální hodnota sklonu 0

- Nastavení *r.slope.aspect*

```
> r.slope.aspect elevation="DSM05@PERMANENT" slope="slope"
aspect="aspect" format="degrees" precision="FCELL" zscale=1.0
min_slope=0.0
```

K zadání hodnot Linkeho koeficientu *linke*, nebyly použity rastrové mapy, ale byla využita možnost zadání číselných hodnot (*float*)

Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červen	Srpen	Září	říjen	Listopa	prosine
2,8	3,1	4,0	4,0	4,1	4,5	4,3	4,4	4,3	3,7	2,7	2,2

**Tabulka 4-1 Hodnoty Linkeho koeficientu, Pec pod Sněžkou**  
(zdroj dat: <http://www.soda-is.com>)

Pro hodnoty odrazivosti *albedo*, bylo ponecháno výchozí nastavení modelu *r.sun* – hodnota 0,2 (*float*)

Vstupní údaje pro zadání zeměpisné šířky a délky *lat a long* nebyly použity, jelikož hlavní vstupní vrstvy *elevation, aspect a slope* byly georeferencovány.

Hodnoty zohledňující vliv oblačnosti *coeff\_bh a coeff\_dh* musely být nejdříve vypočteny. Způsob výpočtu a použité vzorce jsou podrobně popsány v práci (ŠŮRI et HOFIERKA, 2004). V ideálním případě, by pro jejich výpočet měly být použity hodnoty pocházející z reálného pozemního měření. Tato data bohužel nebyla dostupná, a proto byly použity hodnoty získané ze satelitních měření (SURFACE

METEOROLOGY AND SOLAR ENERGY, 2015 ) a (SOLAR ENERGY SERVICES FOR PROFESSIONALS, 2015). Jako vstupní vrstvy s těmito hodnotami jsou akceptovány pouze rastrové mapy. Vzhledem k tomu, že oblast pro kterou je solární potenciál počítán má relativně malou rozlohu, bylo možné předpokládat, že tyto hodnoty budou v celé uvažované oblasti konstantní. Proto byla vytvořena polygonová vrstva s atributy *coeff\_bh* a *coeff\_dh*, kterým byly přiřazeny vypočítané hodnoty. Na základě těchto atributů byly potom vytvořeny rastrové mapy s hodnotami pro jednotlivé měsíce.

Pro vlastní výpočet solárního záření pomocí modelu *r.sun* byly použity výše popsané vstupní vrstvy, které jsou rovněž zobrazeny ve schématu výše (Obrázek 4.2Obrázek 3.3). Model *r.sun* počítá v režimu 2 množství záření vždy pouze pro jeden zadaný den v roce. K výpočtu celkového záření pro jednotlivé měsíce a následně pro celý rok, bylo postupováno následovně:

- Byly zvoleny tzv. reprezentativní dny pro jednotlivé měsíce (každý 15. den v měsíci), pro které byly za pomoci příslušných vstupních údajů (*linke*, *albedo*, *coeff\_bh*, *coeff\_dh*) vypočítány mapy záření.
- Pomocí rastrového kalkulátoru byly vynásobením příslušným počtem dní, spočítány mapy záření pro jednotlivé měsíce a poté pro celý rok.

Takto vytvořené mapy záření však obsahovaly informace o celé oblasti a proto musely být upraveny tak, aby zahrnovaly pouze střešní konstrukce. Toho bylo dosaženo pomocí oříznutí rastrových map vektorovou vrstvou reprezentující střešní konstrukce, tzv. footprints.

Pro vytvoření těchto footprints byla použita klasifikovaná LiDAR data – soubor LAZ a nástroj *lasboundary* – LASTools. Bylo využito klasifikace bodů, představujících budovy, což je klasifikační třída 6. Z těchto bodů byla vytvořena požadovaná vektorová vrstva

Nastavení *lasboundary* pro vytvoření footprints

```
> -keep_class 6 -concavity 1.5 -disjoint
```

Vytvořené rastrové mapy slunečního záření byly poté oříznuty vzniklou vektorovou vrstvou, čímž byly získány finální vrstvy reprezentujících množství slunečního záření dopadajícího pouze na střešní konstrukce. Tento krok byl proveden v QGIS pomocí nástroje GDAL *clip raster by polygon*

Příslušné hodnoty slunečního záření byly získány z metadat jednotlivých map.

## 5 Výsledky

Pomocí zmiňované metodiky byly vytvořeny rastrové mapy obsahující průměrné hodnoty globálního slunečního záření, dopadajícího na střešní konstrukce v lokalitě Pec pod Sněžkou. Mapy obsahují hodnoty za jednotlivé měsíce a celkový roční úhrn záření. Při výpočtu byly zohledněny vlivy oblačnosti a znečištění atmosféry.

Průměrný roční úhrn záření, dopadajícího na střešní konstrukce v posuzované lokalitě, je 875 kWh/m<sup>2</sup>/rok (Obrázek 5.1). Pro roční úhrn záření byla vytvořena velká mapa ve formátu A3 (příloha 9.1). Jako nejvhodnější z hlediska zisku záření se jeví sedlové střechy orientované jižním směrem, kde hodnoty dosahují až 1100 kWh/m<sup>2</sup>/rok. Nejméně vhodné jsou severně orientované části sedlových střech, na nichž mohou být v průběhu roku dosaženy hodnoty pouhých 570 kWh/m<sup>2</sup>/rok.

Celkový roční úhrn záření [kWh/m <sup>2</sup> /rok]	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Průměr</i>
		570	1100

Tabulka 5-1 Pec pod Sněžkou - roční úhrn slunečního záření [kWh/m<sup>2</sup>/rok]

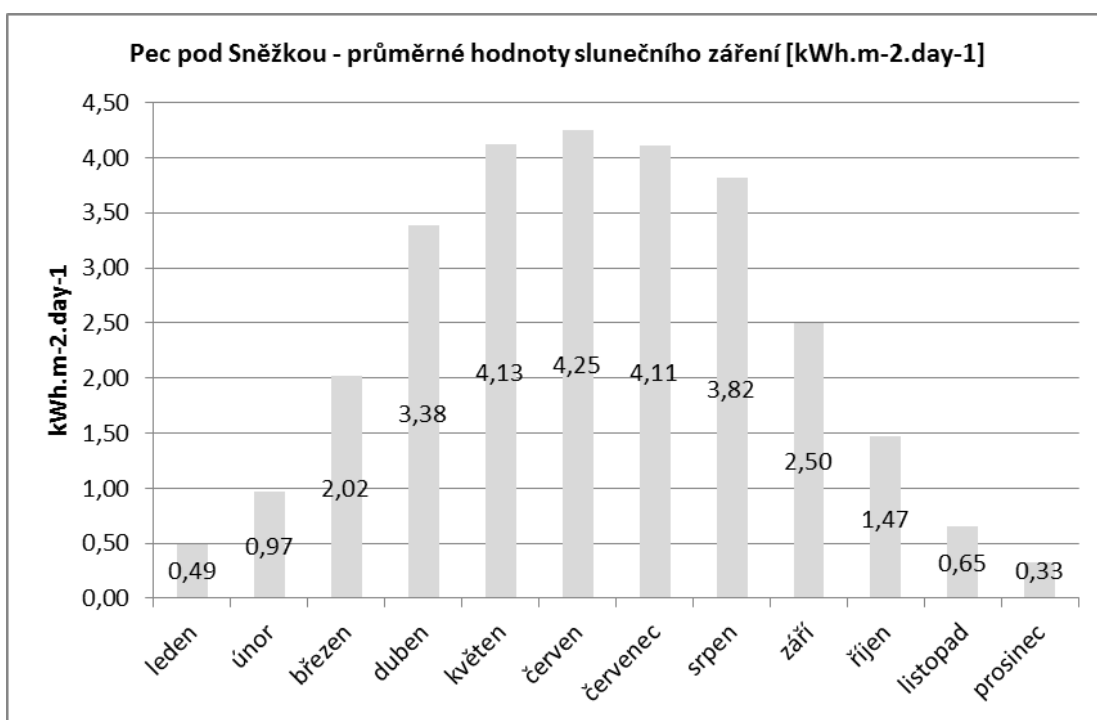


Obrázek 5.1 Pec pod Sněžkou - celkový roční úhrn slunečního záření dopadajícího na střešní konstrukce v kWh/m<sup>2</sup>/rok (mapa ve formátu A3 v příloze 9.1)



**Obrázek 5.2 Pec pod Sněžkou - celkový roční úhrn slunečního záření - detail z mapy v příloze č. 1**

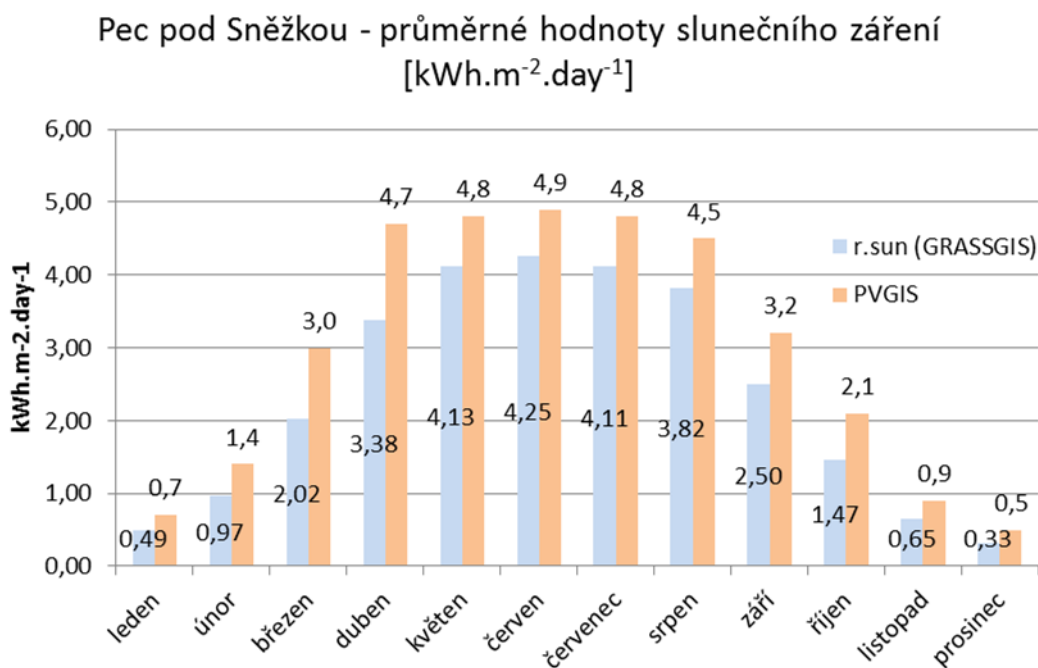
Nejvyšších průměrných denních hodnot záření je dosahováno v červnu, kdy činí 4,3 kWh/m<sup>2</sup>/den, nejnižších potom v prosinci, kdy dosahují pouze 0,3 kWh/m<sup>2</sup>/den. Celkové roční průměrné množství záření za den, činí 2,4 kWh/m<sup>2</sup>/den.



**Obrázek 5.3 Pec pod Sněžkou - průměrné hodnoty slunečního záření [kWh/m<sup>2</sup>/den]**

## 5.1 Validace

Pro hrubé ověření správnosti výpočtu byly hodnoty vypočítané modelem *r.sun* porovnány s hodnotami poskytovanými PVGIS.(Obrázek 5.4)



Obrázek 5.4 Porovnání výsledků: *r.sun* / PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>)

## 6 Diskuze

V dosud provedených výzkumech zabývajících se výpočtem solárního potenciálu v České Republice (HOFIERKA et al. 2014), se celá oblast Krkonoš jeví jako nejméně vhodná pro instalace PV zařízení. Nasvědčují tomu i hodnoty záření zjištěné modelem *r.sun* pro střešní konstrukce v Peci pod Sněžkou. Vypočtené hodnoty jsou ještě nižší, než pro stejnou oblast poskytuje nástroj PVGIS (Obrázek 5.4), to však může být způsobeno skutečností, že PVGIS pracuje se vstupní rastrovou vrstvou v hrubém rozlišení (ŠŮRI et al. 2005) a nemůže tak dostatečně zohlednit všechny okolnosti, mající vliv na množství dopadajícího záření.

Jak již bylo zmíněno výše, přesnost dosažených výsledků při výpočtu solárního potenciálu vždy závisí na parametrech vstupních dat. Zvláště se jedná o rozlišení rastrové vrstvy DTM nebo DSM. V případě střešních konstrukcí je běžně používáno rozlišení 1,0 m (BRITO et al. 2012, KODYSH et al. 2013), v této práci bylo použito rozlišení 0,5 m. Podrobnější rozlišení výrazně zvyšuje výpočetní čas a v mnoha

případech není nutností (HOFIERKA et CEBECAUER 2007, HOFIERKA J, 2004). Jeho volba by proto měla brát v úvahu konkrétní podmínky a očekávané využití.

Použití LiDAR dat přináší mnoho výhod při vytváření potřebných vstupních vrstev. Lze z nich snadno vytvořit DTM a DSM v patřičném rozlišení (BODE et al. 2014, KODYSH et al. 2013) a jednoduchým procesem získat i footprints budov. To je činí ideálním hlavním zdrojem dat při většině výpočtů týkajících se PV zařízení. Je však otázkou, jak dalece jsou tato data dostupná pro malé investory a to nejen fyzicky, ale i finančně.

Při výpočtu byly použity hodnoty Linkeho koeficientu  $T_L$ , získané z databáze Helioclim (REMUND et al. 2003), obsahující průměrné měsíční hodnoty. Vzhledem k výše zmíněnému postupu výpočtu byly tyto hodnoty dostačující. Nicméně pro zpřesnění je možné pomocí interpolace získat hodnoty pro kratší časové období (BODE et al. 2014), nebo rastrové mapy s hodnotami zahrnujícími rozlehlejší území (HOFIERKA et CEBECAUER, 2007).

Jako problematický se jeví způsob výpočtu koeficientů představujících vliv oblačnosti (ŠŮRI et HOFIERKA, 2004), neboť vyžaduje data z pozemních měření slunečního záření, která nejsou vždy dostupná. V případě výpočtu záření dopadajícího v oblasti Pece pod Sněžkou byla použita data ze satelitních měření (SURFACE METEOROLOGY AND SOLAR ENERGY, 2015), (SOLAR ENERGY SERVICES FOR PROFESSIONALS, 2015), která však nemusí zcela odpovídat realitě.

Vypočítané hodnoty slunečního záření není možné vzhledem k absenci dat z reálných pozemních měření porovnat a posoudit tak jejich přesnost. Tak tomu je i v případě většiny podobných prací. Výjimku tvoří (BODE et al. 2014), kde jsou vypočítané výsledky porovnány s měřením z pyranometrů, což však přesahuje možnosti této práce. K dosažení hodnot blízkých se co nejvíce reálnému stavu, by rovněž bylo vhodné zahrnout vliv okolního terénu a provést výpočet pro každý jednotlivý den v roce.



## 7 Závěr

V práci byly popsány a porovnány postupy používané při výpočtu solárního potenciálu modelem *r.sun* a byl vypočítán solární potenciál střešních konstrukcí v Peci pod Sněžkou. Celkové množství záření činí 875 kWh/m<sup>2</sup>/rok. Nejvyšší hodnoty jsou dosahovány v červnu - 4,3 kWh/m<sup>2</sup>/den, nejnižší v prosinci - 0,3 kWh/m<sup>2</sup>/den. Získané výsledky i přes výše zmiňované nedokonalosti mohou sloužit jako podklad pro zájemce o instalaci FV zařízení na střešní konstrukce v této lokalitě, neboť poskytují informace o množství slunečního záření, které jsou běžnými volně dostupnými nástroji nezjistitelné.

## 8 Literatura

- ASPRS, 2015, online: <http://www.asprs.org/Committee-General/LASer-LAS-File-Format-Exchange-Activities.html>, cit. 27. 2. 2015.
- BEYER H G, COSTANZO C, HEINEMANN D, 1996: *Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images*. *Solar Energy* 56: 207–212.
- BODE COLLIN A, FINLAY JACQUES C, LIMM MICHAEL P, POWER MARY E, 2014: *Subcanopy Solar radiation model: Predicting solar radiation across a heavily vegetated landscape using LiDAR and GIS solar radiation models*. 2014: *Remote Sensing of Environment*, 2014.
- BRITO M C, GOMES N, SANTOS T, TENEDÓRICO J A, 2012: *Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data*. *Solar energy*, 2012, 86: 283 – 288.
- DUNLOP E, HULD T, ŠŮRI M, 2005: *PVGIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe*. *International Journal of Sustainable Energy*, 2005, 24: 55-67.
- FU P, RICH P, 1999: *Design and implementation of the solar analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales*. *Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference*, 1999.
- GALLAY M, KAŇUK J, HOFIERKA J, 2015: *Capacity of photovoltaic power plants in the Czech Republic*, 2015, *Journal of Maps*, 2015, 11(3): 480 – 486.
- HAMMER A, HEINEMANN D, WESTRHELLWEG A, INEICHEN P, OLSETH J A, SKARTVEIT A, DUMORTIER D, FONTOYNONT M, WALD L, BEYER H G, REISE CH, ROCHE L, PAGE J, 1998: *Derivation of daylight and solar irradiance data from satellite observations*. In *Proceedings of the Ninth Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, Paris, May 1998: 747–750.
- HOFIERKA J, 1997: *Direct solar radiation modelling within an open GIS environment*. *Proceedings of the Joint European GI Conference*, 1997: 575-584.
- HOFIERKA J, 2004: *Modelovanie priestorovej distribúcie slnečného žiarenia na georeliéfe pomocou modelu r.sun a geografického informačného systému*. *Folia Geographica* 2004, (7): 157-166.

- HOFIERKA J, CEBECAUER T, 2007: *Spatially distributed assessment of solar resources for energy applications in Slovakia. Folia Geographica* 2008, (12): 97-114.
- HOFIERKA J, KAŇUK J, GALLAY M, 2014: *The Spatial distribution of photovoltaic power plants in relation to solar resource potential: the case of the Czech Republic and Slovakia. Moravian Geographical Reports*, 2014, 22 (2): 26–33.
- JENČO M, 1992: *Distribúcia priameho slnečného žiarenia na georeliéfe a jej modelovanie pomocou komplexného digitálneho modelu reliéfu. Geografický časopis*, 1992, (44): 342-355.
- JOINT RESEARCH CENTER, 2015, online: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solmod3.htm>, cit. 27. 2. 2015.
- KALOGIROU S, 2009: *Solar energy engineering: processes and systems. Elsevier*, 2009, London.
- KASTEN F, CZEPLAK G, 1980: *Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. Solar Energy*, 1980, (24): 177–189.
- KASTEN F, YOUNG A T, 1989: *Revised optical air mass tables and approximation formula. Applied Optics*, 1989, 28 (22): 4735 – 4738.
- KASTEN F, 1996: *The Linke turbidity factor based on improved values of the integral rayleigh optical thickness. Solar Energy*, 1996, 56(3): 239-244.
- KITTLER R, MIKLER J, 1986: *Základy využívania slnečného žiarenia. Veda*, 1986: 150
- KODYSH B J, OMITAOMU O A, BHADURI B L, NEISH B S, 2013: *Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. Sustainable Cities and Society*, 2013, (8): 31–41.
- LIBRA M, POULEK V, 2006: *Solární energie, fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.*
- LOHR U, WEHR A, 1999: *Airborne laser scanning - an introduction and overview, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, (54): 68–82.
- MALLET C, BRETAR F, 2009: *Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2009, (64): 1-16.
- NGUYEN H T, PEARCE J M, HARRAP R, BARBER G, 2012: *The Application of LiDAR to Assessment of Rooftop Solar Photovoltaic Deployment Potential in a Municipal District Unit. Sensors*, 2012, (12): 4534 – 4558.
- OSGEO, 2015, online: <http://grass.osgeo.org/grass70/manuals/r.sun.html>, cit. 27. 2. 2015.
- POULEK V, 1994: *New low cost tracker. Solar Energy Materials and Solar Cells* 1994: (33).
- RAPIDLASSO GmbH, 2015, online: <http://rapidlasso.com>, cit. 27. 2. 2015.
- REMUND J, WALD L, LEFEVRE M, RANCHIN T, PAGE J, 2003: *Worldwide Linke turbidity information. Proceedings of ISES Solar World Congress, 16-19 June 2003, Göteborg.*



RIGOLLIER CH, LEFÈVRE M, AND WALD L, 2001: *Heliosat Version 2: Integration and Exploitation of Networked Solar Radiation Databases for Environment Monitoring*, 1999: European Commission Project, 1999, (122245).

RUIZ-ARIAS J A, TOVAR-PESCADOR J, POZO-VA' ZQUEZ D, ALSAMAMRA H, 2009: *Atmospheric Modelling and Solar Radiation Group. International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23 (8): 1049–1076.

SCHARMER K, GREIF J, 2000: *European Solar Radiation Atlas: Fundamentals and Maps*. Presses des Mines, 2000

SOLANGI K H, ISLAM M R, SIDUR R, RAHIM N A, FAYAZ H, 2011: *A review on global solar energy policy. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, (15): 2149–2163.

SOLAR ENERGY SERVICES FOR PROFESSIONALS, 2015, online: <http://www.soda-is.com/eng/index.html>, cit. 7. 3. 2015.

SURFACE METEOROLOGY AND SOLAR ENERGY, 2015, online: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov>, cit. 7. 3. 2015.

ŠÚRI M, HOFIERKA J, 2004: *A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments. Transactions in GIS*, 2004, 8(2): 175–190.

TOOKE T R, COOPS N C, VOOGT J A, MEITNER M J, 2011: *Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. Landscape and Urban Planning*, 2011, (102): 73– 81.

WEHR A, et LOHR U, 1999: *Airborne laser scanning - An introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2–3): 68–82.

## **9 Přílohy**

### **9.1 Roční mapa slunečního záření**