

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY  
A ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ



Solární potenciál střech v různých zeměpisných  
šířkách: Vliv vegetace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Vítězslav Moudrý

Diplomant: Michal Fogl

2015

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Michal Fogl

Krajinné inženýrství

Název práce

**Solární potenciál střech v různých zeměpisných šířkách: Vliv vegetace**

Název anglicky

**Rooftop solar potential in different latitudes: Tree structure influence**

---

### Cíle práce

- Výpočet solárního potenciálu střech několika urbanizovaných území s rozdílnou zeměpisnou šířkou.
- Posouzení vlivu vegetace na solární potenciál střech v těchto územích

### Metodika

1. Solární energie je považována za jeden z nejvýhodnějších 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 leteckého laserového skenování, se zaměřením na využití při modelování solárního potenciálu. S využitím volně dostupných dat leteckého laserového skenování stanoví řešitel solární potenciál několika menších obcí v různých zeměpisných šířkách a posoudí vliv zastínění stávající vegetací na tento potenciál.

**Doporučený rozsah práce**

40 – 60 stran

**Klíčová slova**

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

---

**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**

2015/06 (červen)

**Vedoucí práce**

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 23. 3. 2015

**Ing. Petra Šímová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2015

**prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.**

Děkan

V Praze dne 02. 04. 2015

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Solární potenciál střech v různých zeměpisných šířkách: Vliv vegetace* vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D., a že jsem uvedl veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 22. 4. 2015

.....



## **Poděkování**

Děkuji Vítězslavu Moudrému za vedení mé diplomové práce a za veškeré poskytnuté rady a připomínky týkající se jejího obsahu. Dále děkuji pracovišti informatiky Správy Krkonošského národního parku za poskytnutí části LiDARových dat. A též všem ostatním, kteří k tomuto skromnému dílu nějakou měrou přispěli.

## Abstrakt

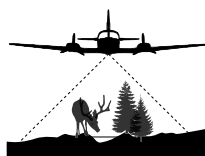
Modelování slunečního záření v urbánním prostředí je z hlediska potenciálního umístování zařízení sloužících k získání solární energie nesmírně důležité. Vzhledem k tomu, že sluneční záření je považováno za nejvýhodnější obnovitelný zdroj, zabývalo se tímto tématem již mnoho studií. Nicméně ve většině případů, nebyla řešena problematika vlivu okolní vegetace. Práce tedy poskytuje ucelený náhled na danou oblast, jež byla ve většině obdobných studií opomíjena. Cílem diplomové práce je řešení problematiky modelovaného dopadajícího slunečního záření a jeho možnosti ovlivnění vegetací v urbánním prostředí. Vyhodnocení této studie je demonstrováno na čtyřech rozdílných lokalitách v Evropě. Množství potenciální solární radiace je řešeno výpočtovým modelem, jenž je součástí nástrojů produktu ArcGIS. Zdrojem přesných výškových dat, nezbytných pro potřeby výpočtu, byla ve většině případů volně dostupná LiDARová data z národních geodatabází příslušných států. Samotné zpracování LiDARových dat bylo provedeno pomocí sady nástrojů LAStools. Průměrný pokles solárního potenciálu způsobený vegetací se na studovaných lokalitách pohyboval v rozmezí 4–11 % za rok. Nicméně v zimních měsících docházelo ke snížení solárního potenciálu až o 20 %. Tyto poznatky lze v budoucnu aplikovat například v rámci urbanistického plánování sídel.

**Klíčová slova:** digitální model, LiDAR, solární radiace, zastínění

## Abstract

Modelling of solar radiation in the urban environment in terms of the potential placement of equipment used to gain solar energy extremely important. The solar radiation was topic of many studies, because sunlight is considered the best renewable resource. However, in most cases, has not solved the problems of the influence of the surrounding vegetation. The aim of this thesis is a study that deals with the issue of the modeled solar radiation and its possibilities of influencing by vegetation in the urban environment. For the purposes of this study were chosen four different locations in Europe. The amount of potential solar radiation is solved by computational model, which is part of the ArcGIS toolbox. Source of accurate elevation data needed for model in most cases was free lidar data from national geodatabases of competent states. Processing itself LiDAR data was done using the LAStools. The mean decrease of solar potential influenced by tree shading at studied locations is in range of 4–11 % per year. However, in winter, causing a reduction of the solar potential of up to 20 %. This knowledge can be applied in the future, for example in the context of urban planning of settlements.

**Keywords:** digital model, LiDAR, shading, solar radiation



# Obsah

<b>Seznam použitých zkratek a akronymů</b>	<b>9</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2 Cíle práce</b>	<b>10</b>
<b>3 Literární rešerše</b>	<b>11</b>
3.1 Teorie slunečního záření . . . . .	11
3.2 Modelování slunečního záření . . . . .	12
3.2.1 Modely solární radiace . . . . .	12
3.2.2 Výpočet v prostředí ArcGIS . . . . .	13
3.3 Letecký LiDAR . . . . .	16
3.3.1 Funkce a popis . . . . .	16
3.3.2 Datové formáty . . . . .	16
3.3.3 Dostupnost dat . . . . .	17
3.3.4 LAStools . . . . .	17
3.4 Stávající studie . . . . .	18
<b>4 Charakteristika studijních území</b>	<b>19</b>
4.1 Umístění a výběr lokalit . . . . .	19
4.2 Popis zájmových lokalit . . . . .	19
<b>5 Metodika</b>	<b>23</b>
5.1 Metodologie výzkumu . . . . .	23
5.2 Zpracování podkladových dat . . . . .	24
5.2.1 LiDARová data . . . . .	24
5.2.2 Polygony střešních ploch . . . . .	24
5.2.3 Digitální model povrchu . . . . .	24
5.2.4 Popisná statistika lokalit . . . . .	25
5.2.5 Atmosférické parametry . . . . .	26
5.3 Výpočet solárního potenciálu . . . . .	27
5.3.1 Roční sluneční záření . . . . .	27
5.3.2 Denní sluneční záření . . . . .	27
5.3.3 Validace modelovaných dat . . . . .	28
5.4 Energetický zisk . . . . .	28
<b>6 Výsledky práce</b>	<b>29</b>
<b>7 Diskuze</b>	<b>32</b>
<b>8 Závěr</b>	<b>33</b>
<b>Přehled literatury a použitých zdrojů</b>	<b>34</b>

Seznam obrázků	36
Seznam tabulek	37
Seznam příloh	38

## Seznam použitých zkratk a akronymů

DMP	Digitální model povrchu
DMR	Digitální model reliéfu
FV	fotovoltaický
GNSS	Globální navigační satelitní systémy
LiDAR	Light Detection And Ranging (viz LLS)
LLS	Letecké laserové skenování

# 1 Úvod

Poptávka po energii je neustále se zvyšující požadavek, což zároveň způsobuje potřebu budování nových či rekonstrukci stávajících zařízení pro získání energetických zdrojů, zejména s ohledem na trvale udržitelný rozvoj. V posledních letech se tak dostávají do popředí obnovitelné energetické zdroje, a zároveň narůstá snaha o potlačení konvenčních druhů výroby energie (Solangi et al., 2011). Jedním z významných obnovitelných zdrojů je sluneční záření dopadající na Zemský povrch. Slunce je z hlediska lidského měřítka nevyčerpatelným zdrojem energie.

V následujících kapitolách je uvedena základní teorie slunečního záření, vzhledem k rozsahu práce, však nebude v následujícím textu rozebírána více, neboť by přesahovala její rámec. Jedná se o beztak obecně známé souvislosti a proto je zde raději věnován prostor popisu užitého modelu sluneční radiace a leteckých LiDARových systémů, jakožto zdroje podkladových dat pro získání topografické informace.

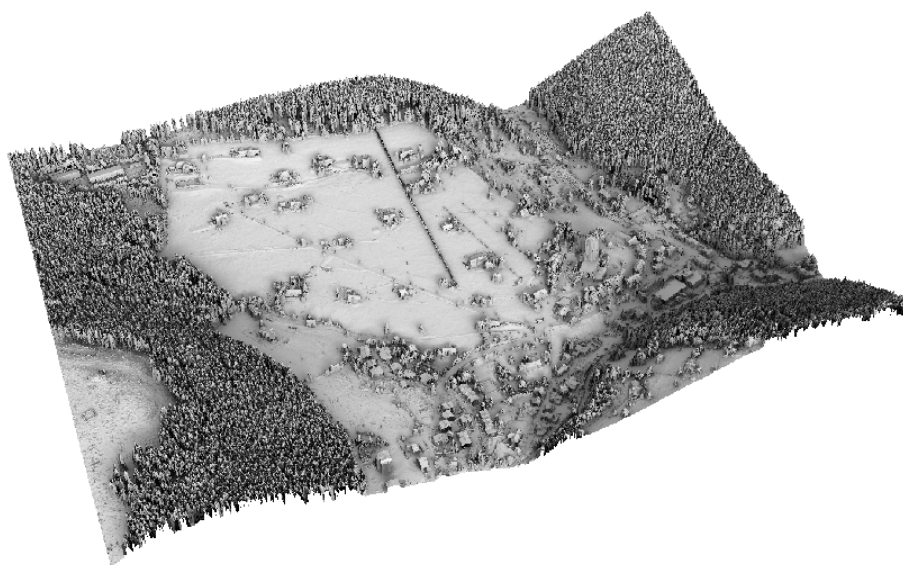
Modelování slunečního záření je nutné zejména pro posouzení vhodnosti umístění fotovoltaických panelů či solárních kolektorů na střešní plochy budov. Pro instalaci těchto systémů je nutno znát hodnoty dopadajícího slunečního záření. Užitím modelů solární radiace tak odpadá nutnost lokálního měření dat, jelikož nám jsou schopny s určitou přesností poskytnout, na základě zadaných parametrů, hodnoty přibližného slunečního záření pro libovolný časový úsek a lokalitu.

Problematika okolní vegetace je, však často v modelování zjednodušeně zahrnuta, či naprosto vyloučena a ignorována (Freitas et al., 2015). Jen několik studií se přímo zabývá vlivem zastínění okolní vegetací na střešní solární potenciál, Tooke et al. (2011) a Levinson et al. (2009). Nicméně, Tooke et al. (2011) se ve své studii omezují při výpočtu pouze na jednotlivé dny (slunovraty a rovnodennosti). Zatímco, Levinson et al. (2009) odvozují tvary korun stromů ručně z ortofotosnímků, což je pro větší plochy z časového hlediska vysoce náročné. V této práci je naopak využito jednoduché metodiky s využitím výhod LiDARových dat, s odhadem měsíčního a denního vlivu zastínění okolní vegetací na solární potenciál střešních ploch ve čtyřech městech Evropy.

V této práci je řešena problematika modelovaného dopadajícího slunečního záření a zhodnocení míry ovlivnění okolní vegetací v urbánním prostředí. Množství potenciální solární radiace je řešeno výpočtním modelem, jenž je součástí geoinformačních nástrojů produktu ArcGIS. Zdrojem přesných výškových dat, potřebných pro tvorbu digitálního modelu povrchu, potřebného pro výpočet, byla ve většině případů volně dostupná LiDARová data z národních geodatabází příslušných států. Zpracování získaných LiDARových dat je řešeno za pomoci open-source sady nástrojů LAStools.

## 2 Cíle práce

Předkládaná práce si klade následující cíle. Zpracování literární rešerše z oblasti leteckého laserového skenování, se zaměřením na využití při modelování solárního potenciálu. S využitím volně dostupných dat leteckého laserového skenování provést stanovení solárního potenciálu několika menších obcí v různých zeměpisných šířkách a posouzení vlivu zastínění stávající vegetací na tento potenciál.



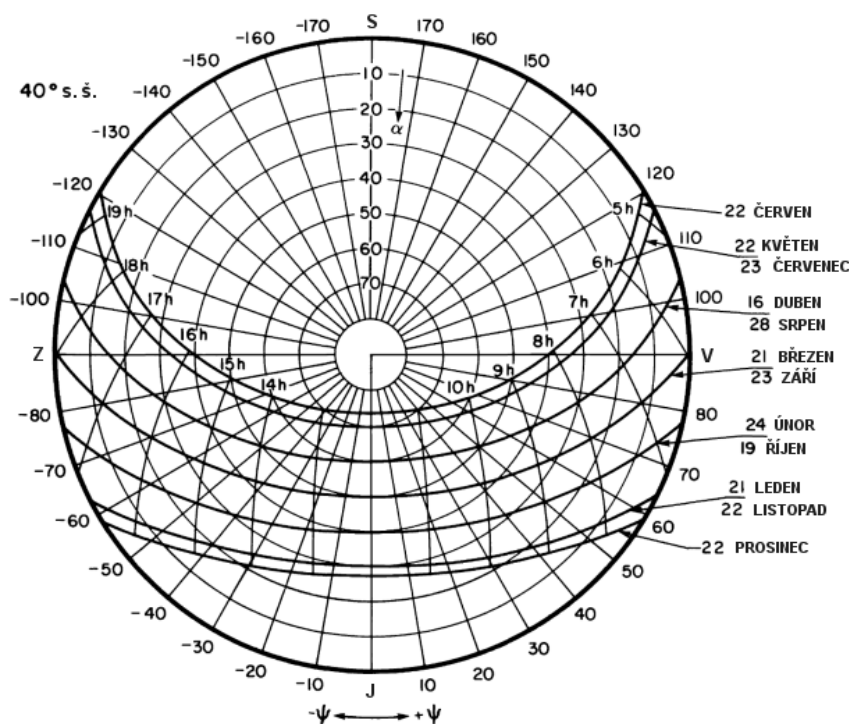
*Digitální model povrchu, Pec pod Sněžkou*

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Teorie slunečního záření

Poloha Slunce na obloze se pro pozorovatele na zemském povrchu mění v závislosti na čase, vlivem rotace Země a jejím pohybem po oběžné dráze. Tento zdánlivý pohyb Slunce je předvídatelný a lze jej pro jakékoliv místo na Zemi graficky vyjádřit pomocí slunečního diagramu (viz obr. 3.1). Při zdánlivém pohybu Slunce, se vlivem rotace Země, vyskytují v průběhu roku z hlediska slunečního záření významné dny, a to jarní a podzimní rovnodennost a zimní a letní slunovrat (obr. 3.2 na následující straně). Při jarní a podzimní rovnodennosti je Země v takové pozici, že dochází k dopadání slunečních paprsků kolmo na oblast rovníku. Trvání dne i noci v tomto období dosahuje ekvilibria. Naopak, v průběhu letního a zimního slunovratu je Země v takové pozici vůči Slunci, při níž dochází k dopadání slunečních paprsků kolmo na obratník Raka, respektive Kozorooha. Délka dne a noci je ve své největší nevyváženosti a v oblasti zemských pólů kulminuje polární noc, respektive den.

Obrázek 3.1: Diagram pohybu slunce pro oblast severní polokoule



Zdroj: An Introduction to Solar Radiation (Iqbal, 1984), (upraveno)

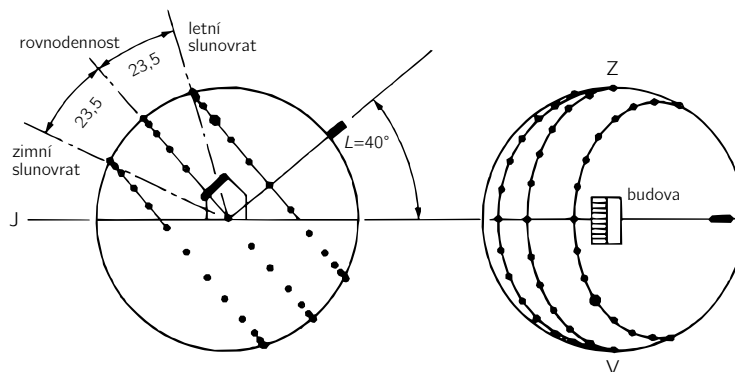
Jedním z výchozích údajů pro stanovování využitelnosti sluneční energie je tzv. solární konstanta. Jedná se o parametr udávající množství extraterestrické sluneční energie, které dopadne během jedné sekundy na plochu  $1\text{ m}^2$ , kolmou na směr slunečních paprsků, umístěnou ve střední vzdálenosti Země od Slunce. Tento parametr je definován hodnotou  $1367\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , přičemž v průběhu roku dochází k její kolísání vlivem eliptické trajektorie pohybu Země (WRC, 2015).



Při průchodu slunečního záření zemskou atmosférou dochází k tvorbě dvou druhů radiace. Difúzního slunečního záření, které je rozptýlené všemi směry a záření přímého, které emituje v určitých směrech. Další složkou spadající do radiace difúzní je záření odražené, např. od nejrůznějších prvků v okolí povrchu. Celkové dopadající nebo-li globální záření je součtem přímé a difúzní radiace. Velikost dopadajícího slunečního záření je ovlivňována několika faktory. Kromě polohy, tedy zejména zeměpisné šířky a časovém období, závisí velikost radiace, též na míře propustnosti atmosféry a sklonu dopadového povrchu.

Nejčastěji užívanou formou udávající dopadající sluneční radiace, je množství úhrnu záření v kilowattech dopadlého během jedné hodiny na povrch  $1 \text{ m}^2$ , tj.  $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$ . Intenzita slunečního záření je definována jako množství energie ve wattech působící na povrch  $1 \text{ m}^2$ , tedy  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Obrázek 3.2: Výkyvy trajektorie pohybu slunce v průběhu roku



Zdroj: Goswami et al. (2000), (upraveno)

## 3.2 Modelování slunečního záření

### 3.2.1 Modely solární radiace

V městském prostředí se, při modelování energeticky potenciálně využitelných střešních ploch, musíme potýkat s výrazně větší problematikou zastínění okolními prvky (budovami či vegetací), než je tomu u volné krajiny mimo městskou zástavbu. Abychom byly schopni docílit kvalitního určení veškerých okolních struktur je nutno mít k dispozici dostatečně podrobná data (Freitas et al., 2015).

Modely využívané pro stanovení solární radiace lze rozdělit na empirické a výpočetní. Výpočetní modely oproti modelům empirickým zahrnují komplexní topografii povrchu s možností volby rozsahu prostorových a časových měřítek. V současné době se při modelování solární radiace v rámci větších měřítek využívá kombinace těchto modelů s geografickými informačními systémy. Implementací do GIS bylo docíleno schopnosti provádět jednoduše jakékoliv prostorové analýzy z oblasti slunečního modelování, nicméně zatím není plně postihnuta problematika výpočtu v čistě trojrozměrném prostředí. Většina nástrojů udává výstupy ve formě 2D či 2,5D rastrů reprezentující jednotlivé složky dopadající radiace. Různé druhy modelů pracují s rozličnými vstupními parametry a též podávají rozdílné výstupy. Souhrn v současné době dostupných modelů uvádí ve své práci Freitas et al. (2015).

V této práci bude věnován prostor zejména modelu *Solar Analyst*, jenž je součástí prostředí produktu ArcGIS. Za další zmínku však stojí jeden z řady volně dostupných solárních modelů, model solární radiace *r.sun*. Za vývojem tohoto výpočetního algoritmu stojí autoři Hofierka – Šúri (2002). Jedná se o open-source modul, který je implementován do aplikace GRASS GIS. Model pracuje ve dvou výpočetních režimech. Prvním režimem je výpočet úhlů dopadu slunečních paprsků ve stupních a výpočet hodnot intenzity záření ve  $W \cdot m^{-2}$ . Druhým režimem je výpočet denního úhrnu intenzity slunečního záření ve  $Wh \cdot m^{-2} \cdot den^{-1}$  a doba ozáření. Kombinací uvedených režimů je docíleno odhadu solární radiace pro libovolný časový krok či interval (Hofierka – Šúri, 2002). Model vyžaduje několik povinných vstupních parametrů, digitální výškový model, rastr sklonu, rastr aspektu a číslo dne v roce, či případně lokální sluneční čas, v závislosti na užitém režimu výpočtu. Kompletní seznam parametrů a podrobný popis modelu uvádí Hofierka – Šúri (2002). Výstupem z modelu jsou jednotlivé rastry složek slunečního záření. Tento model byl též využit při stanovování sluneční radiace v rámci projektu PVGIS.

### 3.2.2 Výpočet v prostředí ArcGIS

Model pro výpočet potenciálního slunečního záření *Solar Analyst* je implementován do sady analytických nástrojů *Solar Radiation* v komerčním software ArcGIS. Sada obsahuje tři nástroje pro modelování slunečního záření a to *Area Solar Radiation*, *Point Solar Radiation* a *Solar Radiation Graphics*. Nástroj *Area Solar Radiation* provádí výpočet slunečního záření pro celou určenou část krajiny na základě topografického podkladu. Naopak, nástroj *Point Solar Radiation* provádí výpočet množství slunečního záření pouze v určitých místech, definovaných zadanými bodovými prvky či souřadnicemi. Specifickým nástrojem je *Solar Radiation Graphics*, který vytváří rastry sluneční mapy, mapy oblohy a viditelnosti, použité při výpočtu solární radiace jmenovanými nástroji. Následující text bude věnován pouze popisu nástroje *Area Solar Radiation*.

Nástroj vyžaduje pro potřeby výpočtu zadání několika parametrů. Vstupními parametry jsou: digitální výškový model, zeměpisná šířka, rozlišení mapy oblohy, časová konfigurace (denní či hodinové intervaly, určitý den nebo rok), denní a hodinový interval pro výpočet sluneční mapy a mapy oblohy, počet výpočetních směrů, počet zenitových a azimutových oddílů, typ difúzního modelu a atmosférické parametry transmisivity a difúzního podílu. Samotný postup výpočtu modelu pomocí nástroje *Area Solar Radiation* tvoří několik hlavních částí.

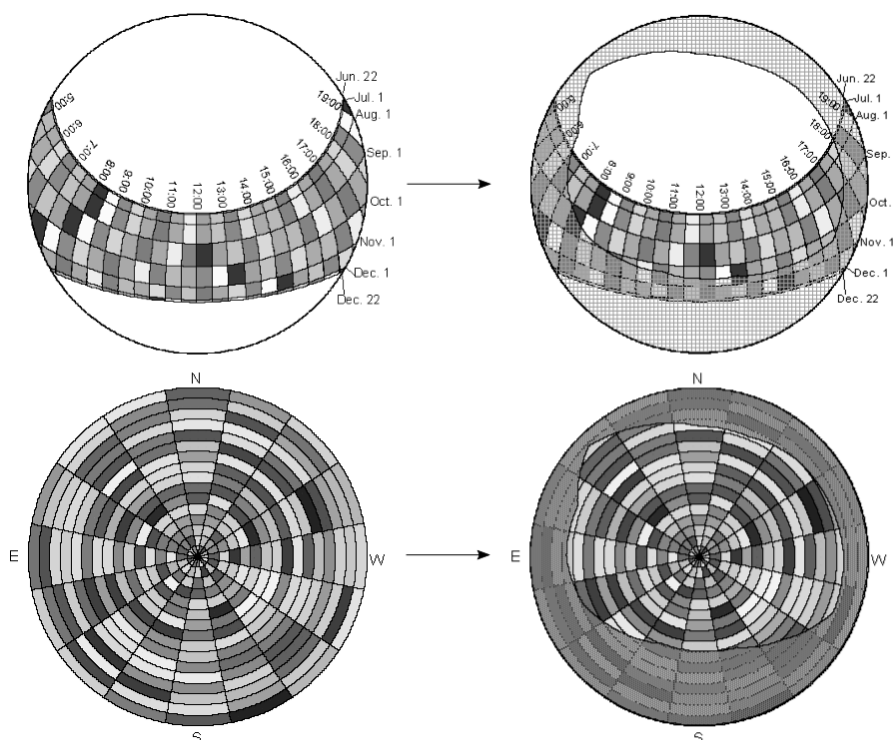
První část modelu spočívá v aplikaci hemisférického algoritmu viditelnosti, který je základní výpočetní složkou. V prvotní fázi výpočtu je nad rastrem digitálního výškového modelu, v místě každé jeho buňky, proveden výpočet viditelnosti oblohy. Podrobnost rozhledu je definována zadaným počtem směrů. Pro každý směr jsou následně určeny hemisférické souřadnice, reprezentované zenitovým a azimutovým úhlem. Podrobnost záznamu závisí, též na rozlišení mapy oblohy, kde každá její buňka nese informaci o hemisférických souřadnicích (Fu – Rich, 2000).

Následně aplikovaným krokem je výpočet sluneční mapy. Rastr sluneční mapy reprezentuje zdánlivý pohyb slunce po obloze, viditelný z dané buňky výškového rastru. Tento rastr odpovídá diagramu pohybu slunce, kde jsou pro jednotlivé časové intervaly vytvořeny sektory oblohy.

Pozice slunce je určena výpočtem na základě zeměpisné šířky, dnu v roce a denního času (Fu – Rich, 2000).

Posledním krokem před aplikací výpočtu slunečního záření je tvorba mapy oblohy. Mapa je tvořena rastrem, který představuje oblohu rozdělenou do oddílů definovanými zenitovými a azimutovými sektory. Ve finální fázi je nad vypočteným rastrem mapy oblohy a sluneční mapou proveden překryt rastrem viditelnosti, čímž dochází k definování, těch částí rastru, které budou následně vstupovat do výpočtu slunečního záření na dané buňce vstupního rastru (Fu – Rich, 2000) (viz obr. 3.3).

Obrázek 3.3: Postup výpočtu modelu solární radiace v programu ArcGIS



Zdroj: Fu – Rich (1999), (upraveno)

Druhou částí modulu je již samotný výpočet dopadajícího slunečního záření, na základě hodnot získaných předchozími kroky. Celkové přímé sluneční záření je rovno sumě všech viditelných dílů sluneční mapy. Hodnota přímého záření je pak výpočetním modelem pro každou buňku rastru počítána užitím následujícího vztahu

$$Dir_{\theta, \alpha} = S_{Const} \cdot \tau^{m(\theta)} \cdot SunDur_{\theta, \alpha} \cdot SunGap_{\theta, \alpha} \cdot \cos(AngIn_{\theta, \alpha}) \quad (3.1)$$

kde je

$S_{Const}$  – solární konstanta (model využívá hodnotu  $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  dle WRC (2015)),

$\tau$  – transmisivita atmosféry,

$m(\theta)$  – relativní optická vzdálenost,

$SunDur_{\theta, \alpha}$  – čas vyjádřený sektorem oblohy,

$SunGap_{\theta, \alpha}$  – propustná část sektoru sluneční mapy,

$AngIn_{\theta, \alpha}$  – úhel dopadu mezi centroidem sektoru oblohy a osovou normálou k povrchu.

Celkové difúzní záření je rovno součtu všech viditelných sektorů mapy oblohy. Samotná hodnota difúzního záření je pro každou buňku rastru počítána dle vztahu

$$Dif_{\theta, \alpha} = R_{glb} \cdot P_{dif} \cdot Dur \cdot SkyGap_{\theta, \alpha} \cdot Weight_{\theta, \alpha} \cdot \cos(AngIn_{\theta, \alpha}) \quad (3.2)$$

kde je

$R_{glb}$  – globální záření,

$P_{dif}$  – podíl rozptýleného globálního záření,

$Dur$  – definovaný časový interval,

$SkyGap_{\theta, \alpha}$  – propustná část sektoru mapy oblohy,

$Weight_{\theta, \alpha}$  – podíl difúzního záření procházející určitým sektorem mapy oblohy ku ostatním sektorům,

$AngIn_{\theta, \alpha}$  – úhel dopadu mezi centroidem sektoru oblohy a osovou normálou k povrchu.

Celkové přímé sluneční záření v určitém místě je definováno jako součet přímého záření veškerých jednotlivých viditelných sektorů solární mapy pohybu slunce

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta, \alpha} \quad (3.3)$$

a celkové difuzní sluneční záření jako součet difuzního záření pro všechny viditelné sektory mapy oblohy

$$Dif_{tot} = \sum Dif_{\theta, \alpha} \quad (3.4)$$

Celkové globální sluneční záření je pak součtem přímého a difuzního záření.

$$Glo_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot} \quad (3.5)$$

Výstupy z nástroje *Area Solar Radiation* jsou reprezentovány rastry udávajícími hodnoty potenciálního difúzního, přímého a globálního záření v jednotkách  $Wh \cdot m^{-2}$ . Další volitelnou možností výstupu z modelu je rastr doby přímého osvětlení v hodinách. Nástroj umožňuje mimo jiné časovou konfiguraci pro vymezení období výpočtu. Z nabízených možností je zde výpočet radiace pro celý rok (*Whole year with monthly interval*), dále umožňuje zadání intervalu dnů v určitém roce (*Multiple days in a year*), či pouze omezení výpočtu na jediný den v roce s časovým vymezením (*Within a day*). Speciálním volbou je metoda výpočtu ve dnech zimního a letního slunovratu a rovnodennosti (*Special days*).

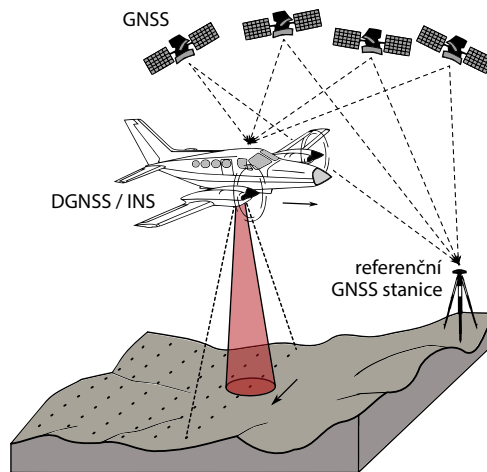
### 3.3 Letecký LiDAR

#### 3.3.1 Funkce a popis

Jelikož je pro potřeby výpočtu slunečního záření nutno znát poměrně přesnou výškovou strukturu řešeného povrchu, případně okolních stínících prvků (Kodysh et al., 2013; Freitas et al., 2015), bylo přistoupeno k volbě výškových dat pořízených metodou leteckého laserového skenování nebo-li LiDARu. Využití LiDARových dat pro potřeby modelování slunečního záření, je výhodné nejen pro svou podrobnost a přesnost zachycení střešních ploch a okolních stínících prvků a zejména pro možnost automatizovaného zpracování dat (Tereci et al., 2009).

Letecký LiDAR je jedna z aktivních technik dálkového průzkumu Země (DPZ) a v dnešní době nejpřesnější distanční metoda pro získávání výškových dat (Wei – Bartels, 2012). Tato technika je definována jako komplexní multi-senzorový systém, obsahující tyto základní prvky: polohovou jednotku GNSS, inerciální navigační systém a laserové skenovací zařízení (May – Toth, 2007) (obr. 3.4). Běžná celková absolutní výšková přesnost dostupných systémů dosahuje  $\pm 0,15$  m (Charlton et al., 2009). LiDARové systémy mohou být osazovány, v závislosti na potenciálním využití, na nejrůznější typy nosičů, kterými mohou být letouny, helikoptéry, či v současné době rozšiřovaná bezpilotní letadla (UAV). K určování polohy využívá LiDARový systém měření vzdáleností za pomoci laserového světla. Samotné vzdálenosti k objektům jsou zjišťovány za pomoci zpracování odrazů světelného vlnění laserového paprsku.

Obrázek 3.4: Struktura leteckého LiDARu



Zdroj: autor

#### 3.3.2 Datové formáty

Surovým výstupem z LiDARového skenování je nepravidelné rozmístění bodů v trojrozměrném prostoru, nazývané mračno bodů (Straub et al., 2009). Takto získaná data následně procházejí procesy klasifikace, filtrace a vizualizace až do podoby požadovaných finálních produktů. Naměřená data jsou uchovávána v nejrůznějších datových formátech, přičemž nejčastěji využívány jsou formáty LAS a ASCII (XYZ). LAS je univerzální výměnný formát sloužící k zápisu a editaci bodových dat z LiDARových systémů, bez ohledu na užitý hardware či software, kterým

byl vytvořen nebo zpracován. Data jsou v LAS souboru uchovávána v binárním formátu. Každý datový soubor obsahuje základní informace o použitém LiDARovém systému, souřadnicovém systému, celkovém rozsahu dat a následně vlastní bodová data. Mimo polohových souřadnic  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , mohou být také ke každému bodu zaznamenány informace o intenzitě, pořadí odrazu, počtu odrazů, klasifikaci, skenovacím úhlu, času GPS, případně další data z nejrůznějších senzorů. Také je možné se setkat s formátem LAZ, jedná se o standardní formát LAS, který prošel bezztrátovou kompresí dat. Dalším formátem, ve kterém mohou být data zaznamenána je formát ASCII. Jedná se o podobu textového souboru, který obsahuje záznamy o jednotlivých bodech, obdobně, jak je tomu u formátu LAS. Nejčastěji se však jedná pouze o záznam polohy a výšky, případně i hodnoty intenzity.

### 3.3.3 Dostupnost dat

Některé evropské státy disponují uvolněnými národními datovými sadami leteckého laserového skenování. V Evropě lze tato data bezplatně získat, ať již z části či celého území několika zemí. Jedná se v současné době o Finsko, Dánsko, Nizozemsko, Španělsko a Švýcarsko. Jednotlivé datové sady dosahují rozličných stavů pokrytí, aktuálnosti či míry přesnosti a rozlišení. Data jsou již dostupná i pro území České republiky, nicméně nedosahují výrazného rozlišení a jsou poskytována pouze za úplaty (ČÚZK, 2014).

LiDARová data využitá pro tvorbu digitálního modelu povrchu, včetně vybraných parametrů, jsou uvedena v tab. 3.1. Zde udávaná hodnota rozlišení dat je pouze minimální deklarovaná, reálné rozlišení bodového mračna dosahuje vyšších hodnot.

Tabulka 3.1: Dostupné datové sady LiDARu

Země	Název datasetu	Rok	Rozlišení [ $b./m^2$ ]	Přesn. [cm]
Česká republika	<sup>1</sup>	2012	5,0	15
Nizozemsko	Actueel Hoogtebestand Nederland 2	2011	9,0	5
Finsko	MML Laserkeilaukset	2010	0,5	15
Dánsko	Danmarks Højdemodel	2014	4,5	5

<sup>1</sup> data byla poskytnuta správou KRNAP

Zdroj: autor

### 3.3.4 LAStools

Jako softwarové řešení pro zpracování bodového mračna byl vybrán LAStools. Jedná se o komplexní sadu nástrojů pro hromadné zpracování velkého množství LiDARových dat. Pro spouštění nástrojů je využíváno dávkového skriptování pomocí příkazové řádky. Lze také využít implementace ve formě sady nástrojů ArcGIS či QGIS. LAStools je poskytován k nekomerčnímu užití zdarma, nicméně, některé nástroje jsou z tohoto důvodu omezeny částečnou funkčností, či je zanášeno do zpracovávaných dat záměrné zkreslení (rapidlasso, 2014).

LAStools poskytuje komplexní škálu nástrojů pro editaci a zpracování LiDARových dat. Jedná se zejména o konverzi formátů (*las2las*), tvorbu digitálních výškových modelů (*las2dem*),

tvorbu vrstevnic (*las2iso*), kontrolu překrytu letových pásů (*lasoverlap*), kolorování bodového mračna hodnotami RGB z leteckých snímků (*lascolor*), identifikaci vzájemného překrytu letových pásů (*lasoverage*), výpočet základních statistických metrik vegetace (*lascanopy*), tvorbu hraničních polygonů na základě definovaných bodů (*lasboundary*) a zejména klasifikaci (*lasclassify*). Pro potřeby korektní klasifikace je potřeba užití následujících tří nástrojů: *lasground*, *lasheight* a *lasclassify*.

Nástroj *lasground* slouží pro odlišení dat Zemského reliéfu a povrchu. Princip funkce spočívá v klasifikaci LiDARových bodů na základě algoritmu definovaného vstupními parametry do dvou tříd, kterým je přiřazena hodnota 2 pro body ležící na terénu a hodnota 1 pro body nacházející se mimo klasifikovaný terén (rapidlasso, 2014).

Nástroj *lasheight* provádí výpočet výšek jednotlivých bodů nad klasifikovaným terénem. Vstupními daty jsou tudíž body klasifikované nástrojem *lasground*, případně jiný soubor obsahující příslušná klasifikovaná data (rapidlasso, 2014).

Nástroj *lasclassify* slouží ke klasifikaci bodů na budovy a vyšší vegetaci. Pro korektní výpočet jsou požadována vstupní data, již klasifikována na třídy čistý reliéf a body mimo terén s přiřazenými výškami bodů nad terénem (rapidlasso, 2014).

### 3.4 Stávající studie

Na téma potenciální solární radiace bylo již zpracováno značné množství studií a nadále se těší vysoké popularitě. Avšak, velká část autorů při modelování naprosto opomíjí či zjednodušuje vliv okolní vegetace (Freitas et al., 2015). Někteří autoři však naopak problematiku okolní vegetace zmiňují např. Kodysh et al. (2013), či se jí přímo zabývají Levinson et al. (2009), Tooke et al. (2011).

Ve své studii autoři Levinson et al. (2009) řešili vliv vegetace na solární potenciál střech v rámci čtyř měst. Samotná identifikace střešních ploch a okolní vegetace probíhala pomocí ručního trasování dle dostupných ortofotosnímků. Výškový rastr byl vytvořen z dat leteckého laserového skenování, přičemž byly vytvořeny digitální modely porostu v různých výškových úrovních v závislosti na stáří porostu. Výpočet zastínění byl prováděn pomocí analytických nástrojů ArcGIS. Ve výsledku byla zjištěna roční ztráta dopadajícího slunečního záření až 8 % vlivem zastínění vegetací a až 14 % po 30 letech růstu vegetace.

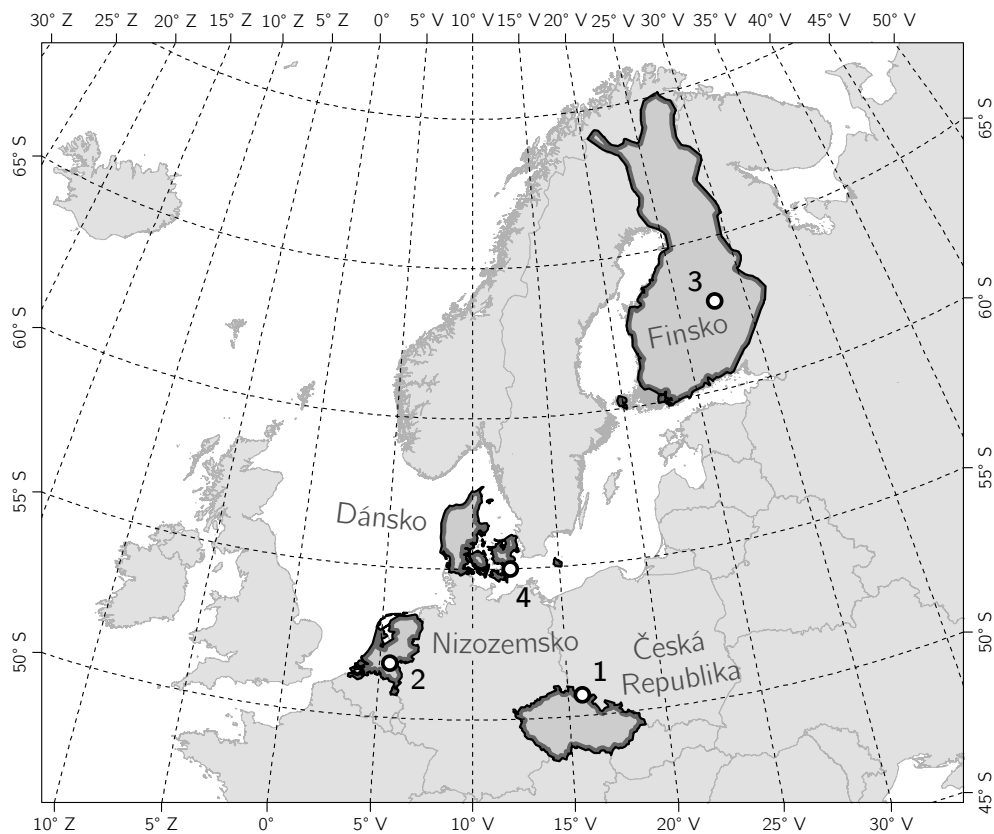
Naopak Tooke et al. (2011) využili ke stanovení vegetačních struktur a střešních ploch LiDARová data pomocí klasifikace a extrakce. Samotný výpočet solární radiace byl prováděn nástrojem ArcGIS *Solar Analyst*. Výsledky studie poukazují na snížení globálního slunečního záření dopadajícího na střešní plochy v průměru o 38 % vlivem stínění okolní vegetací. Dále byla zjištěna silná korelace mezi strukturou vegetace a složkou přímého záření v letním období, naopak vztah s difúzním zářením byl neměnný v průběhu celého roku. Autoři dále udávají snížení přímého záření v důsledku zastínění okolní vegetací o 23 % a 74 % v období letního a zimního slunovratu.

## 4 Charakteristika studijních území

### 4.1 Umístění a výběr lokalit

Výběr lokality byl limitován, zejména kvalitou a dostupností LiDARových dat, zeměpisnou polohou a strukturou místního prostředí. Následná konkrétní volba urbánního prostředí, pro potřeby zpracování studie, byla provedena náhodným způsobem. Jediným měřítkem výběru bylo docílení, alespoň přibližně stejného počtu obyvatel žijících ve vybraných oblastech. Po tomto zhodnocení dostupných údajů byla provedena volba celkem čtyř zájmových lokalit. Lokalita č. 1 se nachází v České republice, lokalita č. 2 v Nizozemsku, lokalita č. 3 ve Finsku a lokalita č. 4 na území Dánska. Podrobnější popis konkrétních studijních lokalit je uveden v následující podkapitole. Přehled vzájemné polohy jednotlivých lokalit znázorňuje mapa na obr. 4.1.

Obrázek 4.1: Přehled rozmístění řešených lokalit



Zdroj: autor

### 4.2 Popis zájmových lokalit

Jednotlivé lokality byly voleny, tak aby se lišily strukturou místního prostředí a nacházely se svým umístěním v rozdílných zeměpisných šířkách. Prvním řešeným územím (v mapě 4.1 označeno číslem 1), je obec Pec pod Sněžkou (50,70° s.š., 15,73° v. d.), nacházející se na území České republiky v Královéhradeckém kraji. Tato lokalita byla vybrána z důvodu dostupnosti přesných LiDARových dat, která byla poskytnuta správou Krkonošského národního parku, kde je uvedená lokalita umístěna. Charakterem reliéfu a krajiny spadá tato oblast do údolního horského



prostředí. Průměrná nadmořská výška lokality dosahuje přibližně 827 m. Převažuje zde vyšší vegetace, zejména v okolních lesích. Zástavba je zde spíše rozptýleného charakteru, s budovy vyskytujícími se na exponovaném jižním svahu. Je zde 136 střešních ploch, o celkové ploše 39 259,82 m<sup>2</sup>. Jedná se též o nejjižněji položené místo, ze všech studovaných lokalit. Struktura zástavby a rozložení vegetace ve studované oblasti je znázorněno na obr. 4.2.

Tabulka 4.1: Statistický přehled zájmových lokalit

	Lokalita	Země	Šíř.	Dél.	Populace <sup>1</sup>	Budovy	Střešní plocha [m <sup>2</sup> ]
1	Pec pod Sněžkou	Česká republika	50,70	15,73	630	136	39 259,82
2	Macharen	Nizozemsko	51,80	5,54	615	355	55 757,65
3	Pellesmäki	Finsko	62,76	27,56	516	142	21 655,63
4	Kalvehave	Dánsko	55,00	12,16	617	625	74 228,90

<sup>1</sup> za rok 2013 (Český statistický úřad, Statistics Netherlands, Statistics Finland, Statistics Denmark)

Zdroj: autor

Obrázek 4.2: Lokalita č. 1 | Pec pod Sněžkou, Česká republika



Zdrojová data: Správa KRMAP

Zdroj: autor

Další zájmovou lokalitou (č. 2) je město Macharen (51,80° s. š., 5,54° v. d.), ležící v Nizozemské provincii Severní Brabantsko. Krajina je zde bezlesého rovinatého charakteru. Průměrná nadmořská výška lokality dosahuje přibližně 6 m. Rozložení zástavby je zde souvislé s více-méně pravidelnou stromovou výsadbou v uliční linii. Celkem je zde 355 střešních ploch, o ploše

55 757,65 m<sup>2</sup>. Strukturu zástavby a rozložení vegetace lze vidět na obr. 4.3 na následující straně.

Obrázek 4.3: Lokalita č. 2 | Macharen, Nizozemsko



Zdrojová data: Dutch National Spatial Data Infrastructure (PDOK)

Zdroj: autor

Třetí lokalitou je urbanizovaná oblast Pellesmäki (62,76° s. š., 27,56° v. d.), nacházející se ve Finsku, v provincii Severní Savo. Průměrná nadmořská výška lokality dosahuje přibližně 149 m. Celá oblast je protnuta lesními celky do nichž je vmíšena roztroušená zástavba. Je zde 142 střešních ploch, o celkové ploše 21 655,63 m<sup>2</sup>. Z hlediska střešní plochy se jedná o nejméně zastavěnou oblast, což lze vidět na obr. 4.4 na následující straně.

Poslední lokalitou zahrnutou do této studie je Dánské město Kalvehave (55,00° s. š., 12,16° v. d.) z regionu Sjælland (obr. 4.5 na následující straně). Jedná se o přístavní město s rovinným reliéfem, s průměrnou nadmořskou výškou 10 m. Vegetace se zde vyskytuje zejména v rámci zástavby. Celkem je zde 625 střešních ploch, s rozlohou 74 228,90 m<sup>2</sup>. Jedná se tedy o lokalitu s nejhustěji rozloženou zástavbou.



Obrázek 4.4: Lokalita č. 3 | Pellesmäki, Finsko



Zdrojová data: National Land Survey of Finland (MML)

Zdroj: autor

Obrázek 4.5: Lokalita č. 4 | Kalvehave, Dánsko



Zdrojová data: Danish Geodata Agency (GST)

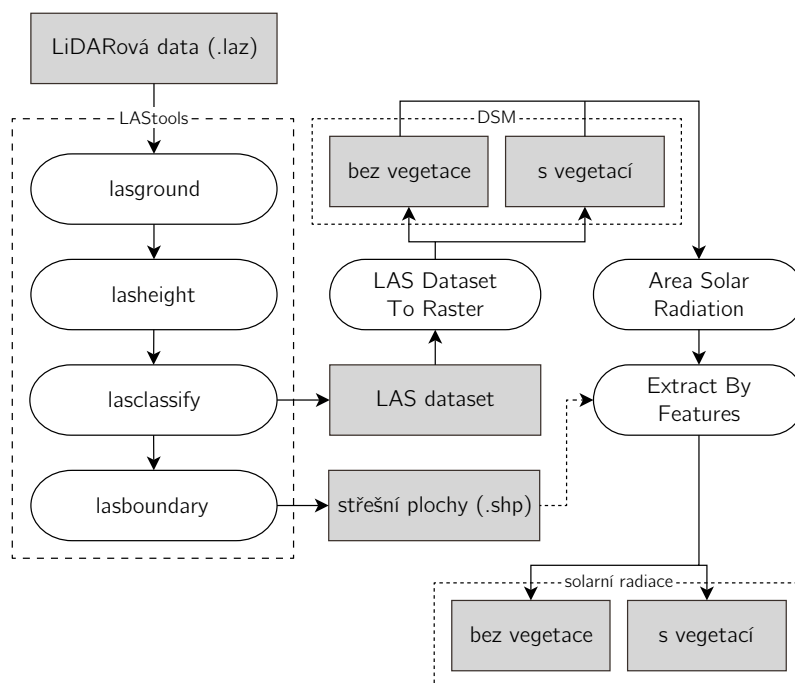
Zdroj: autor

## 5 Metodika

### 5.1 Metodologie výzkumu

Rámec postupu zpracování dat je graficky znázorněn diagramem na obr. 5.1. Tento proces byl aplikován na jednotlivé zvolené lokality. Vstupními daty bylo předzpracované mračno LiDARových bodů, pocházející z leteckého laserového skenování. Pro další práci byla data LLS z každé lokality oříznuta obdélníkem o přibližné rozloze 1 km<sup>2</sup>. Zpracování dat LLS bylo provedeno nástroji z programu LAStools. Postupnými kroky byla vstupní LiDARová data vhodně klasifikována a automatickým procesem definovány půdorysné tvary střešních ploch ve formě polygonů. Těmito polygony byla v poslední fázi procesu oříznuta rastrová data z výstupu modelu potenciální solární radiace.

Obrázek 5.1: Proces zpracování dat



Zdroj: autor

Klasifikovaná LiDARová data byla načtena, do vytvořeného LAS Datasetu, pro potřeby následného zpracování v prostředí programu ArcMap. Důvodem, proč nebyla původní vstupní data zpracovávána přímo, již v prvotní fázi procesu, je minimální podpora a nedostupnost nástrojů pro zpracování bodových mračen v prostředí ArcGIS. Dalším krokem bylo převedení LiDARových dat na rastrový digitální model povrchu, pomocí nástroje *LAS Dataset to Raster*. Tímto způsobem byly vyhotoveny dva typy povrchu, kdy v jednom z případů vstupovala kompletní struktura dat, ve druhém případě byly u vstupních dat odfiltrovány body LiDARu klasifikované jako vegetace. Nad těmito modely byl poté proveden samotný výpočet potenciální solární radiace, reprezentovaný rastrovými vrstvami s hodnotami měsíční solární radiace v místech střešních ploch.

## 5.2 Zpracování podkladových dat

### 5.2.1 LiDARová data

Bodová mračna leteckého laserového skenování, bylo nutno pro potřeby následného využití, upravit pomocí specializovaného softwaru. K tomuto účelu bylo užito nástrojů LAStools, které byly blíže popsány v podkapitole 3.3.4 na straně 17. Automatická klasifikace dat byla provedena pomocí *lasclassify* s rozřazením na třídu terén, budovy, vysoká vegetace a neklasifikované. Výřez dat získaných klasifikací lze vidět na obr. 5.2 na následující straně. Takto upravená klasifikovaná data byla pomocí *LAS Dataset* načtena do prostředí ArcMap pro další zpracování. V ArcMap byla provedena kontrola kvality a správnosti automatického procesu klasifikace a případné nesrovnalosti byly upraveny ruční reklasifikací pomocí vestavěných funkcí ArcGIS.

Příklad užitého příkazu pro hromadné zpracování LiDARových dat nástroji LAStools

---

```

1 @echo off
2 set PATH=%PATH%;C:\LAStools\bin;
3 lasground -v -i "E:\...\Macharen.laz" -town -fine -odir "E:\...\Klasifikace" -odix _g
   -olaz
4 lasheight -v -i "E:\...\Klasifikace\Macharen_g.laz" -drop_below -2 -drop_above 60 -
   odir "E:\...\Klasifikace" -odix _h -olaz
5 lasclassify -v -i "E:\...\Klasifikace\Macharen_g_h.laz" -step 2 -planar 0.15 -rugged
   0.4 -ground_offset 2 -odir "E:\...\Klasifikace" -odix _c -olas

```

---

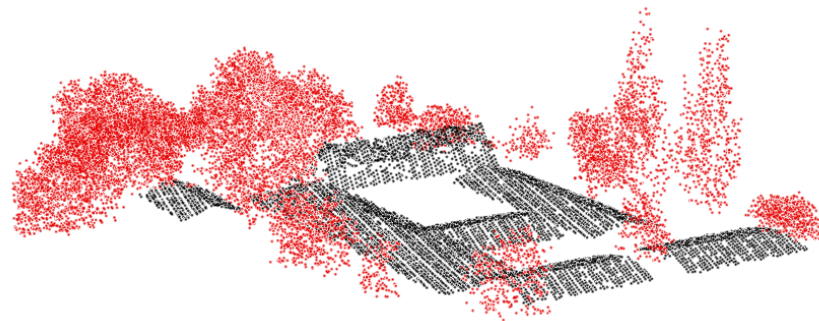
### 5.2.2 Polygony střešních ploch

Obrysy střešních ploch byly získány ze zpracovaných LiDARových dat pomocí nástroje *LAS boundary* a následně upraveny kartografickými nástroji a částečnou ruční editací v prostředí ArcMap. Nastavení nástroje *LAS boundary* spočívalo v zadání hodnoty konkávitity (*concavity*) a ve stanovení varianty vygenerovaných polygonů pouze v dvourozměrném prostředí (*only\_2d*). Hodnota konkávitity, byla stanovena poloautomatickou postupnou iterací, dokud nebylo dosaženo požadované kvality. Velikost této hodnoty se odvíjí od prostorové distribuce bodového mračna a má vliv na tvar a členitost výsledných polygonů představující střešní plochy. Pro oblast Pece pod Sněžkou byla hodnota konkávitity zvolena 2,1 m; pro Macharen 0,505 m; pro lokalitu Pellesmäki 3,736 m a pro Kalvehave 1,295 m. Finální úprava střešních polygonů pomocí ArcGIS, spočívala v aplikaci nástrojů *Simplify Polygon* a *Simplify Building*, případné výrazné nedostatky byly v editačním režimu upraveny ručně, či pomocí funkce *Generalize*. Příklad finálního tvaru detekovaných střešních ploch v porovnání s bodovým mračnem je viditelný na obr. 5.3 na následující straně.

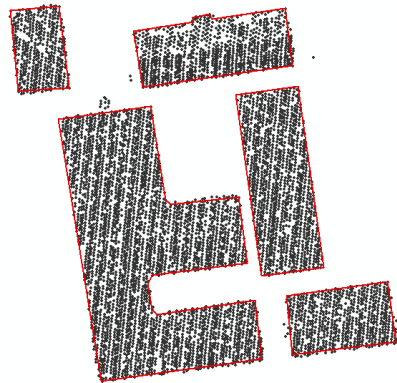
### 5.2.3 Digitální model povrchu

Digitální model povrchu pro oblast každé lokality byl vytvořen z dat leteckého laserového skenování v programu ArcMap, pomocí nástroje *LAS Dataset to Raster*. Přičemž, byly užity následující parametry a nastavení; velikost buňky rastru byla zvolena pro všechny lokality 0,5 m. K této hodnotě bylo přistoupeno z důvodu potřeby vyšší přesnosti, potřebné pro následné

Obrázek 5.2: Data klasifikovaná pomocí LAStools (červeně - vegetace; černě - střešní plochy)



Zdroj: autor

Obrázek 5.3: Střešní polygony určené pomocí *lasboundary*

Zdroj: autor

rozlišení prvků střešních ploch a vegetace. Volba ještě nižší hodnoty, by znamenala navýšení výpočetního času, následně aplikovaných analýz. Jako interpolační algoritmus tvorby výškového rastru byl zvolen typ *Binning* s výpočetní metodou maximální hodnoty buňky rastru. Pro výpočet míst rastru s absencí naměřených hodnot byla užita interpolační metoda *Natural Neighbor*.

Tvorba DMP z LiDARu byla provedena ve dvou scénářích. V prvním případě se jednalo o vytvoření digitálního modelu povrchu z kompletního bodového mračka včetně vegetace, naopak ve druhém případě se jednalo o vytvoření modelu povrchu s odfiltrovanými vegetačními strukturami.

#### 5.2.4 Popisná statistika lokalit

Statistické vyhodnocení vegetace a střešních ploch jednotlivých lokalit spočívalo v získání hodnot, za pomoci metod zonální statistiky z normalizovaného digitálního modelu povrchu. Normalizovaný digitální model vegetace a budov byl vytvořen odečtením digitálního modelu reliéfu od digitálního modelu povrchu obsahujícího terén včetně vegetace (rov. 5.1). Analogickým postupem byl vytvořen normalizovaný digitální model povrchu zástavby.

$$nDMP = DMP - DMR \quad (5.1)$$

Aplikováním nástroje *Zonal Statistics as Table* byla provedena sumarizace statistických hodnot budov na základě definovaných zón. Vrstvou představující zonální data vstupující do nástroje, byla polygonová vrstva střešních ploch získaná předchozí extrakcí z LiDARových dat. Statistické informace o vertikální struktuře okolní vegetace byla získána obdobným způsobem. Aby nedocházelo ke zkreslení statistických dat, vlivem vzdálenějších rozsáhlých lesních ploch, které se na některých lokalitách vyskytují, bylo přistoupeno k vytvoření pásma do vzdálenosti 30 m od okrajů střešních ploch. Takto stanovené pásmo posloužilo jako řešená oblast vstupující do zonální statistiky vegetace. Statistické charakteristiky lokalit jsou uvedeny v tab. 6.3 na straně 31.

### 5.2.5 Atmosférické parametry

Jelikož v řešených lokalitách je absence lokálních meteorologických měřených dat a do modelu vstupují nám neznámé atmosférické parametry, bylo přistoupeno k jejich stanovení z externích databází. Zdrojem dat pro měsíční průměrných hodnot *transmittivity* byla online databáze atmosférického dat Langleyho výzkumného centra (NASA, 2014). Databáze uchovává měřená data od roku 1983 do roku 2005, pro potřeby výpočtu byly užity průměrné hodnoty pro jednotlivé měsíce za posledních 15 let. Pro stanovení proměnné *diffuse proportion* byla využita databáze PVGIS (JRC, 2014). Konkrétní hodnoty použité pro jednotlivé lokality jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Atmosférické parametry vstupující do modelu

Lokalita	Typ*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pec pod Sněžkou	DP	0,73	0,65	0,62	0,59	0,58	0,63	0,60	0,59	0,61	0,59	0,74	0,78
	T	0,38	0,42	0,41	0,44	0,45	0,43	0,44	0,48	0,42	0,36	0,31	0,35
Macharen	DP	0,74	0,62	0,65	0,56	0,55	0,61	0,57	0,57	0,58	0,61	0,69	0,77
	T	0,35	0,37	0,40	0,43	0,46	0,43	0,44	0,46	0,42	0,38	0,34	0,32
Pellesmäki	DP	0,74	0,58	0,56	0,49	0,49	0,53	0,51	0,60	0,64	0,70	0,80	0,81
	T	0,37	0,45	0,50	0,52	0,51	0,49	0,50	0,49	0,45	0,38	0,39	0,30
Kalvehave	DP	0,74	0,65	0,63	0,51	0,48	0,55	0,51	0,52	0,55	0,60	0,68	0,75
	T	0,38	0,39	0,45	0,48	0,50	0,48	0,49	0,50	0,46	0,41	0,36	0,41

\* DP – *diffuse proportion*, T – *transmittivity*

Zdroj: autor

### 5.3 Výpočet solárního potenciálu

#### 5.3.1 Roční sluneční záření

Výpočet potenciálního slunečního záření byl proveden ArcGIS nástrojem *Area Solar Analyst*. Hodnoty atmosférických parametrů potřebné pro korektní výpočet solárního záření byly voleny, dle jednotlivých měsíců pro celý rok (tab. 5.1 na předchozí straně). Volba těchto hodnot má výrazný vliv na výsledně získané hodnoty radiace (ESRI, 2014). Parametr rozlišení oblohy *Sky Size* byl nastaven na hodnotu 350. Metoda časová konfigurace byla zvolena pro více dní v roce (*Multiple days in a year*), z důvodu nutnosti zadávání rozdílných hodnot atmosférických parametrů. Denní interval byl nastaven na hodnotu 14 dní, hodinový interval na hodnotu 0,5. Pro dostatečné zachycení okolních stínících prvků bylo zvoleno 104 směrů. Počet zenitových a azimutových oddílů byl nastaven na hodnotu 24. Model difúzního záření byl počítán pomocí metody *uniform sky*. Vstupními výškovými daty byl digitální model povrchu, získaný z dat leteckého laserového skenování.

Spuštění nástrojů bylo provedeno na PC s CPU Intel Core i5-4670 3,8 GHz, RAM 16 GB 1 600 MHz, GPU GeForce GTX 660 2 GB, ve verzi software ArcGIS Background Geoprocessing (64-bit) 10.2.2. Průběh celého výpočtu vyžadoval z časového hlediska vyšší nároky (tab. 5.2). Ve výsledku bylo vytvořeno celkem 384 rastrů, tj. 96 rastrů na lokalitu. Pro každou lokalitu a scénář byl získán výsledný rastr potenciální dopadající globální radiace, dílčí rastry difúzního i přímého záření ve  $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$  a rastr doby přímého osvětlení v hodinách. Takto získané rastry byly nástrojem *Extract by Mask* oříznuty dle polygonů střešních ploch.

Výsledné hodnoty radiace byly ze všech rastrů získány pomocí nástroje *Zonal Statistics as Table*. Pro vyhodnocení byly užity průměrné hodnoty záření dopadajícího na veškeré střešní plochy, vždy za celou studovanou lokalitu. Samotné statistické zpracování modelovaných dat probíhalo ve statistickém software R. Tento proces, byl aplikován na každý měsíc. Průměrné měsíční hodnoty radiace z obou scénářů byly promítnuty do spojnicového grafu, se zvýrazněním vzájemného rozdílu scénářů. Dále byly spočítány procentuální změny mezi oběma scénáři pro veškeré složky slunečního záření.

Tabulka 5.2: Výpočetní čas pro jednotlivé lokality

Pec pod Sněžkou	33 h 26 min
Macharen	34 h 10 min
Pellesmäki	32 h 35 min
Kalvehave	33 h 18 min

*Zdroj: autor*

#### 5.3.2 Denní sluneční záření

Pro ověření vlivu zastínění v průběhu dne byl proveden výpočet potenciální solární radiace, omezený pouze na dny letního i zimního slunovratu a jarní i podzimní rovnodennosti. Výpočet byl proveden pomocí nástroje *Area Solar Radiation*, nicméně do časové konfigurace vstupovaly



pouze jmenované dny (*Within a day*). K tomuto řešení, na místo užití vestavěné volby *Special Days*, bylo přistoupeno z důvodu zadání korektních atmosférických parametrů. Proces byl uskutečněn opět v definovaných scénářích. Získané rastry byly oříznuty nástrojem *Extract by Mask* dle střešních ploch.

Radiační hodnoty byly získány nástrojem *Zonal Statistics as Table*, stejným postupem jako při vyhodnocování ročního slunečního záření. Pro vyhodnocení byly použity průměrné hodnoty záření dopadajícího na veškeré střešní plochy, vždy za celou studovanou lokalitu. Získané hodnoty byly znázorněny pomocí radiálního grafu pouze pro letní i zimní slunovrat a podzimní rovnodennost.

### 5.3.3 Validace modelovaných dat

Pro ověření správnosti výpočtu bylo provedeno porovnání modelovaných dat s daty, které poskytuje databáze PVGIS. Ověření bylo pro všechny lokality provedeno metodou lineární regrese. Grafy pro každou lokalitu jsou uvedeny v příloze D na straně 47.

## 5.4 Energetický zisk

V poslední fázi byl provedeno zhodnocení poklesu energetického výnosu způsobeného zastíněním vlivem okolní vegetace. Pro výpočet bylo použito 15% účinnosti systému s 70% využitelností celkové střešní plochy. Změna hodnot potenciálního zisku energie je uvedena na obr. 6.3. Celkový potenciální energetický výnos fotovoltaických systémů umístěných na střešních plochách je dán vztahem

$$E_y = R_{Glo} \cdot A \cdot \eta \quad (5.2)$$

kde je

$R_{Glo}$  – úhrn globálního slunečního záření za dané období [ $\text{MWh} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$A$  – využitelná střešní plocha [ $\text{m}^2$ ],

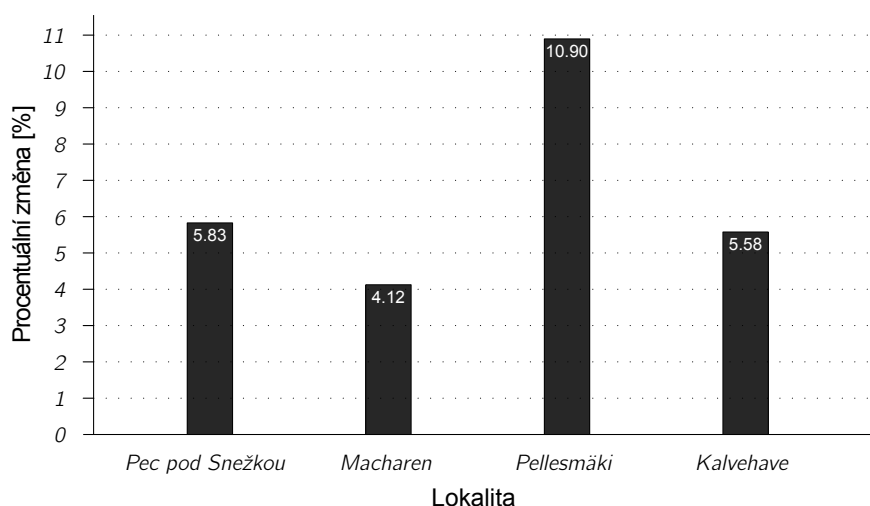
$\eta$  – účinnost panelu [-].

V průběhu celého zpracování bylo použito, jak dávkového zpracování LiDARových dat, tak skriptování analytických nástrojů pomocí jazyka Python implementovaného do ArcGIS a statistického vyhodnocení v jazyce R. Metodický postup tedy poskytoval vysokou míru automatizace hromadného zpracování dat.

## 6 Výsledky práce

Pomocí uvedeného metodického postupu byl proveden výpočet potenciální globální radiace v průběhu roku za jednotlivé měsíce, přičemž bylo dosaženo následujících výsledků. Získaná data průměrných hodnot jsou graficky znázorněna v příloze A na straně 39 a C na straně 43. Z grafu ročního poklesu záření na obr. 6.1 je patrné, že největšího procentuálního rozdílu v globálním složce záření mezi oběma scénáři je dosaženo na lokalitě Pellesmäki 10,90 %, dále následuje Pec pod Sněžkou 5,83 %, Kalvehave 5,58 % a Macharen 4,12 %. Složka přímého záření dosahuje největšího procentuálního rozdílu 9,36 % (Pellesmäki), poté následuje 4,15 % (Kalvehave), 3,84 % (Pec pod Sněžkou) a 3,06 % (Macharen). A záření difúzní dosahuje hodnot 12,35 % (Pellesmäki), poté 7,45 % (Pec pod Sněžkou), 7,05 % (Kalvehave) a 5,06 % (Macharen). Hodnoty ročních procentuálních rozdílu jednotlivých složek záření uvádí tabulka 6.1. Vyhodnocením změny solárního potenciálu v průběhu roku byl zjištěn výrazný pokles zejména v období zimních měsíců (leden, únor, prosinec, listopad) pohybující se v rozsahu zhruba 6–19 %. Naopak nejnižších rozdílu bylo dosaženo v průběhu letních měsíců (květen, červen, červenec) s hodnotami v rozsahu 3–10 % v závislosti na lokalitě. Vyhodnocená data obsahuje příloha B na straně 41.

Obrázek 6.1: Roční pokles globálního slunečního záření vlivem vegetace



Zdroj: autor

Tabulka 6.1: Procentuální rozdíly ročních hodnot složek solární radiace mezi scénáři

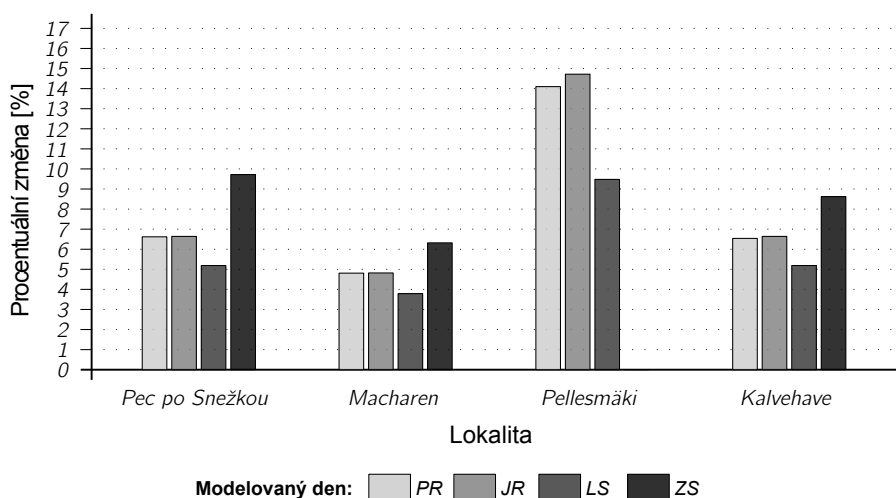
Lokalita	GloR <sub>dif</sub> [%]	DifR <sub>dif</sub> [%]	DirR <sub>dif</sub> [%]
Pec pod Sněžkou	5,83	7,45	3,84
Macharen	4,12	5,06	3,06
Pellesmäki	10,90	12,35	9,36
Kalvehave	5,58	7,05	4,15

*GloR* – globální záření, *DifR* – difúzní záření, *DirR* – přímé záření

Zdroj: autor

Z hlediska změny v průběhu dne bylo dosaženo největšího poklesu v období zimního slunovratu na lokalitě Pec pod Sněžkou (9,72 %), dále Kalvehave (8,62 %), Macharen (6,32 %) a Pellesmäki (0,00 %). Nulové hodnoty ve dni zimního slunovratu na lokalitě Pellesmäki (NL) jsou způsobeny vysokou zeměpisnou šířkou. Jarní rovnodennost s hodnotami 14,72 % (Pellesmäki), 6,64 % (Pec pod Sněžkou), 6,64 % (Kalvehave) a 4,82 % (Macharen). V den podzimní rovnodennosti dosahují hodnoty rozdílu 14,10 % (Pellesmäki), 7,45 % (Pec pod Sněžkou), 7,05 % (Kalvehave) a 5,06 % (Macharen). A pro den letního slunovratu jsou hodnoty rozdílu následující: 9,48 % (Pellesmäki), 5,19 % (Pec pod Sněžkou), 5,19 % (Kalvehave) a 3,79 % (Macharen). Procentuální rozdíly v průběhu dne uvádí graf 6.2 a tabulka 6.2.

Obrázek 6.2: Pokles globálního slunečního záření v průběhu dne



Zdroj: autor

Tabulka 6.2: Procentuální rozdíly denních hodnot globální radiace mezi scénáři

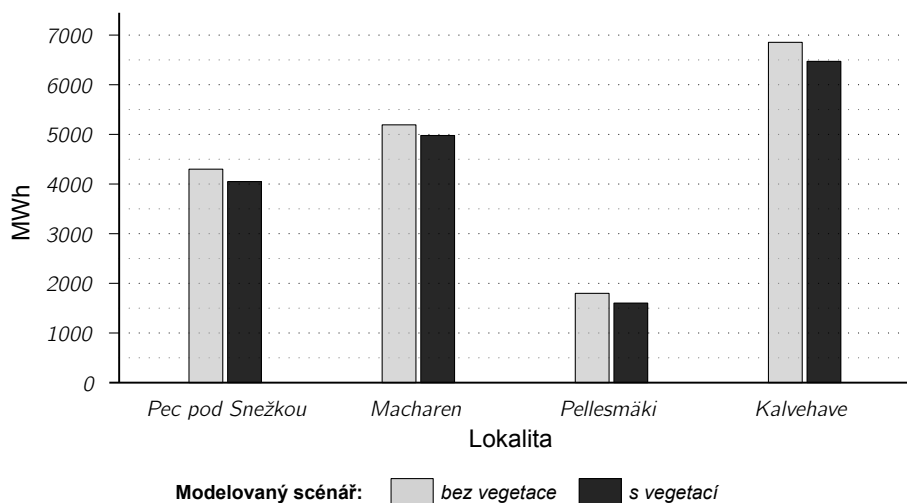
Lokalita	GloJR <sub>dif</sub> [%]	GloLS <sub>dif</sub> [%]	GloPR <sub>dif</sub> [%]	GloZS <sub>dif</sub> [%]
Pec pod Sněžkou	6,64	5,19	6,62	9,72
Macharen	4,82	3,79	4,81	6,32
Pellesmäki	14,72	9,48	14,10	0,00
Kalvehave	6,64	5,19	6,54	8,62

JR – jarní rov., LS – letní sl., PR – podzimní rov., ZS – zimní sl.

Zdroj: autor

Z hlediska přepočtu na hodnoty potenciálního energetického výnosu, získaného dle vztahu 5.2, vykazují lokality při 15% účinnosti systému s 70% využitím střešní plochy následující roční poklesy: 250,62 MWh (Pec pod Sněžkou), 214,18 MWh (Macharen), 196,02 MWh (Pellesmäki) a 382,81 MWh (Kalvehave).

Obrázek 6.3: Pokles potenciálního ročního energetického zisku vlivem vegetace



Zdroj: autor

Ze statistických hodnot jednotlivých lokalit je patrné, že ve všech případech převažuje vyšší průměrná výška okolní vegetace (v pásu 30 m od střešních ploch) nad průměrnou výškou budov. Největší rozloha střešních ploch se vyskytuje na lokalitě Kalvehave (DK), která dosahuje 74 228,90 m<sup>2</sup>. Nejnižší rozloha střešní plochy 21 655,63 m<sup>2</sup> je naopak na lokalitě Pellesmäki (viz tab. 6.3).

Tabulka 6.3: Sumarizace charakteristik studijních území

Parametr	Pecpod Sněžkou	Macharen	Pellesmäki	Kalvehave
Plocha střech [m <sup>2</sup> ]	39 259,82	55 757,65	21 655,63	74 228,90
Max. výška budovy [m]	52,97	45,81	9,70	43,77
Průměrná výška budov [m]	7,53	4,91	4,29	3,86
Směr. odch. výšek budov [m]	4,81	2,08	1,30	1,64
Plocha vegetace [m <sup>2</sup> ]	60 292,81	38 847,07	43 970,00	72 827,89
Max. výška vegetace [m]	37,54	27,51	28,40	41,82
Průměrná výška vegetace [m]	11,98	6,79	9,55	6,25
Směr. odch. výšek vegetace [m]	7,10	3,70	6,09	3,80

(vegetace v pásmu do 30 m od okraje střešních ploch)

Zdroj: autor

Z ověření správnosti výpočtu s hodnotami, které poskytuje volně přístupná online databáze PVGIS vychází hodnota koeficientu determinace ( $r^2$ ) pro lokalitu Pec pod Sněžkou 0,9747 (97,47 %), Kalvehave 0,9782 (97,82 %), Pellesmäki 0,9722 (97,22 %) a pro Macharen 0,9811 (98,11 %). Hodnoty tedy vykazují vysokou míru regrese. Nicméně z grafů lineární regrese v příloze D na straně 47 je viditelné nadhodnocení respektive, podhodnocení modelu solární radiace, ve většině případů zejména v měsíci říjen a červen.

## 7 Diskuze

Pro výpočet solárního potenciálu byly aplikovány dva scénáře následujícího charakteru. První metoda spočívala ve výpočtu všech složek slunečního záření nad digitálním modelem povrchu, obsahujícím kompletní strukturu vegetačního krytu, druhý scénář se lišil absencí vegetace. Vypočtená data vykazují rozdíl globální složky záření mezi jednotlivými scénáři, pohybující se v rozmezí 4–11 %. V porovnání mezi jednotlivými lokalitami bylo dosaženo nejvyššího procentuálního rozdílu 10,90 % na lokalitě Pellesmäki (FI). Tento jev je způsoben zejména výrazně rozdílnou zeměpisnou šířkou (62,76° s. š.), oproti ostatním oblastem, v kombinaci s lesnatým prostředím vyskytující se na lokalitě. Hodnoty slunečního záření, zde vlivem své polohy, dosahují minimálních hodnot. V období zimních měsíců, jsou dokonce téměř nulové. Naopak nejnižšího procentuálního rozdílu 4,12 % bylo dosaženo v oblasti Macharen (NL) (62,76° s. š.). Nízká hodnota změny je způsobena mimo svým umístěním také strukturou okolního rovinného reliéfu, bez jakékoli vegetace mimo zástavbu.

Zjištěné výsledky korespondují s již provedenými studiemi. Levinson et al. (2009) zjistili roční ztrátu slunečního záření způsobenou zastíněním vegetace až o 8 % a až o 14 % po 30 letech růstu okolní vegetace. Podobnou studii modelování slunečního záření ve dnech letního slunovratu, zimního slunovratu a rovnodennosti provedli Tooke et al. (2011). Jejich výsledky však dosahují mnohem vyšších hodnot poklesu záření způsobeného okolní vegetací, než výsledky zjištěné v této práci. Jedná se konkrétně o snížení 23 % a 74 % v rámci dopadajícího přímého záření, respektive snížení 29 % a 26 % pro záření difúzní ve dnech letního a zimního slunovratu.

Na základě zjištěného lze konstatovat, že pro různé struktury městské zástavby se pohybuje roční změna slunečního záření od 4 % do 11 %. V rámci jednotlivých měsíců bylo nejvyšších hodnot změny dosaženo v zimním období. Avšak jedním z výrazných nedostatků této metodiky je absence řešení propustnosti záření strukturou vegetace. Na což poukazují ve své práci i Tooke et al. (2011). Vegetace prochází v průběhu roku dynamickými procesy, které v tomto postupu nelze plně postihnout. U opadavých dřevin lze v zimních měsících předpokládat ztrátu olistění, čímž samozřejmě dojde k nárůstu dopadajícího slunečního záření. K vyřešení této problematiky, by bylo nutno mít data o druhové skladbě řešené vegetace a užít odlišný postup tvorby DMP. Případně provést odhad propustnosti vegetace pro sluneční záření z vlastností LiDARových dat (Bode et al., 2014; Tooke et al., 2012).

Dalším prvkem, jenž vnáší určitou míru nepřesnosti, při stanovení potenciálního dopadajícího slunečního záření na střešní plochy, je nemožnost přesného stanovení specifických střešních prvků. Jedná se zejména o komíny, vikýře, případně jiné konstrukce bránící využití celého rozsahu střešní plochy pro umístění FV systému. Tento nedostatek byl nicméně při stanovování energetického zisku částečně kompenzován užitím 75% využitelností těchto ploch.

Tato práce potvrzuje, že stromy hrají důležitou roli při určování solárního potenciálu střešních ploch v městských oblastech, a že je důležité brát ohled na zastínění okolní vegetací v rámci modelování solární energie.

## 8 Závěr

V práci bylo provedeno zhodnocení vlivu zastínění střešních ploch vegetací na jejich solární potenciál, tedy vhodnost pro instalaci FV či kolektorových solárních systémů. Studie byla zpracována na čtyřech lokalitách o rozdílné zeměpisné šířce a charakteru prostředí. Výpočet potenciální solární radiace byl proveden modelem solární radiace implementovaném v sadě analytických nástrojů prostředí ArcGIS. Podkladová topografická data byla získána zpracováním volně dostupných LiDARových dat pomocí sady nástrojů LAStools. Výpočet solárního potenciálu byl prováděn ve dvou stanovených scénářích (s vegetací a bez vegetace). Následně byly zjištěné rozdílné hodnoty mezi oběma scénáři vyhodnoceny s ohledem na polohu jednotlivých lokalit a strukturu zástavby.

Studie prokázala rozdíly jak v ročním, tak denním množství dopadajícího slunečního záření v případě nezahrnutí městské vegetace do modelů. Z hlediska rostoucího využívání solární energie je tak v oblasti urbanismu žádoucí při návrhu městské vegetace brát ohled na potenciální využívání střešních ploch, nebo se touto problematikou zabývat již ve stávajících urbánních prostředích. Nicméně průměrný roční pokles solárního potenciálu způsobený okolní vegetací dosahoval hodnot maximálně 11 %, což je výrazně méně než zavádějící hodnota 38 % (Tooke et al., 2011) založená pouze na základě významných dnů (slunovraty, rovnodennosti).

## Přehled literatury a použitých zdrojů

- BODE, C. A. et al. Subcanopy Solar Radiation model: Predicting solar radiation across a heavily vegetated landscape using LiDAR and GIS solar radiation models. *Remote Sensing of Environment*. November 2014, vol. 154, s. 387–397. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.028>>. ISSN 0034-4257.
- CHARLTON, M. E. – COVENEY, S. J. – MCCARTHY, T. Issues in Laser Scanning. In HERITAGE, G. L. – LARGE, A. R. (Ed.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Blackwell, 2009. s. 35–48. ISBN 978-1-4051-5717-9.
- ČÚZK. Geoportál ČÚZK - Výškopisná data území České republiky. Český úřad zeměměřický a katastrální. [online], 2014. Dostupné z: <<http://geoportal.cuzk.cz>>. [cit. 2014-20-03].
- ESRI. An overview of the Solar Radiation tools. Environmental Systems Research Institute, Inc. [online], 2014. Dostupné z: <<http://resources.arcgis.com>>. [cit. 2014-11-28].
- FREITAS, S. et al. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. January 2015, vol. 41, s. 915–9311. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.060>>. ISSN 1364-0321.
- FU, P. – RICH, P. M. Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. In *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference*, San Diego, USA, 1999. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- FU, P. – RICH, P. M. *The Solar Analyst 1.0: User Manual*. Helios Environmental Modeling Institute, LLC, Lawrence, USA, 2000.
- GOSWAMI, D. Y. – KREITH, F. – KREIDER, J. F. *Principles of Solar Engineering*, Fundamentals of solar radiation, s. 13–80. Taylor & Francis, Philadelphia, USA, 2000. ISBN 978-1560327141.
- HOFIERKA, J. – ŠŮRI, M. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In *Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference 2002*, Trento, Italy, September 2002.
- JRC. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport [online], 2014. Dostupné z: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>. [cit. 2014-11-30].
- KODYSH, J. B. et al. Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society*. October 2013, vol. 8, s. 31–41. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.002>>. ISSN 2210-6707.
- LEVINSON, R. – AKBARI, H. – POMERANTZ, M. Solar access of residential rooftops in four California cities. *Solar Energy*. May 2009, vol. 83, iss. 12, s. 2120–2135. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.07.016>>. ISSN 0038-092X.
- MAY, N. C. – TOTH, C. K. Point Positioning Accuracy of Airborne LIDAR Systems: A Rigorous Analysis. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*. September 2007, vol. 36, iss. 3/W49B, s. 107–112. ISSN 1682-1750.
- NASA. Surface meteorology and Solar Energy: Interannual Variability. Atmospheric Science Data Center, NASA Langley Research Center [online], 2014. Dostupné z: <<https://eosweb.larc.nasa.gov>>. [cit. 2014-09-08].

- RAPIDLASSO. LAStools. rapidlasso GmbH [online], 2014. Dostupné z: <<http://rapidlasso.com/lastools/>>. [cit. 2014-12-03].
- SOLANGI, K. H. et al. A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. May 2011, vol. 15, iss. 4, s. 2149–2163. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.007>>. ISSN 1364-0321.
- STRAUB, C. – WANG, Y. – IERCAN, O. Airborne Laser Scanning: Methods for Processing and Automatic Feature Extraction for Natural and Artificial Objects. In HERITAGE, G. L. – LARGE, A. R. (Ed.) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Blackwell, 2009. s. 115–132. ISBN 978-1-4051-5717-9.
- TERECI, A. et al. Energy saving potential and economical analysis of solar systems in the urban quarter Scharnhauser Park. In *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2009*, s. 1814–1822, Johannesburg, South Africa, October 2009. International Solar Energy Society.
- TOOKE, T. R. et al. Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. *Landscape and Urban Planning*. August 2011, vol. 102, iss. 2, s. 73–81. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.011>>. ISSN 0169-2046.
- TOOKE, T. R. et al. Integrated irradiance modelling in the urban environment based on remotely sensed data. *Solar Energy*. October 2012, vol. 86, iss. 10, s. 2923–2934. Dostupné z: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.028>>. ISSN 0038-092X.
- WEI, H. – BARTELS, M. *3D Imaging, Analysis and Applications*, 3D Digital Elevation Model Generation, s. 367–415. Springer, London, 2012. ISBN 978-1-4471-4063-4.
- WRC. Solar constant. World Radiation Center [online], 2015. Dostupné z: <<http://www.pmodwrc.ch>>. [cit. 2015-3-15].



## Seznam obrázků

3.1	Diagram pohybu slunce pro oblast severní polokoule . . . . .	11
3.2	Výkyvy trajektorie pohybu slunce v průběhu roku . . . . .	12
3.3	Postup výpočtu modelu solární radiace v programu ArcGIS . . . . .	14
3.4	Struktura leteckého LiDARu . . . . .	16
4.1	Přehled rozmístění řešených lokalit . . . . .	19
4.2	Lokalita č. 1   Pec pod Sněžkou, Česká republika . . . . .	20
4.3	Lokalita č. 2   Macharen, Nizozemsko . . . . .	21
4.4	Lokalita č. 3   Pellesmäki, Finsko . . . . .	22
4.5	Lokalita č. 4   Kalvehave, Dánsko . . . . .	22
5.1	Proces zpracování dat . . . . .	23
5.2	Data klasifikovaná pomocí LAsTools (červeně - vegetace; černě - střešní plochy) .	25
5.3	Střešní polygony určené pomocí <i>lasboundary</i> . . . . .	25
6.1	Roční pokles globálního slunečního záření vlivem vegetace . . . . .	29
6.2	Pokles globálního slunečního záření v průběhu dne . . . . .	30
6.3	Pokles potenciálního ročního energetického zisku vlivem vegetace . . . . .	31

## Seznam tabulek

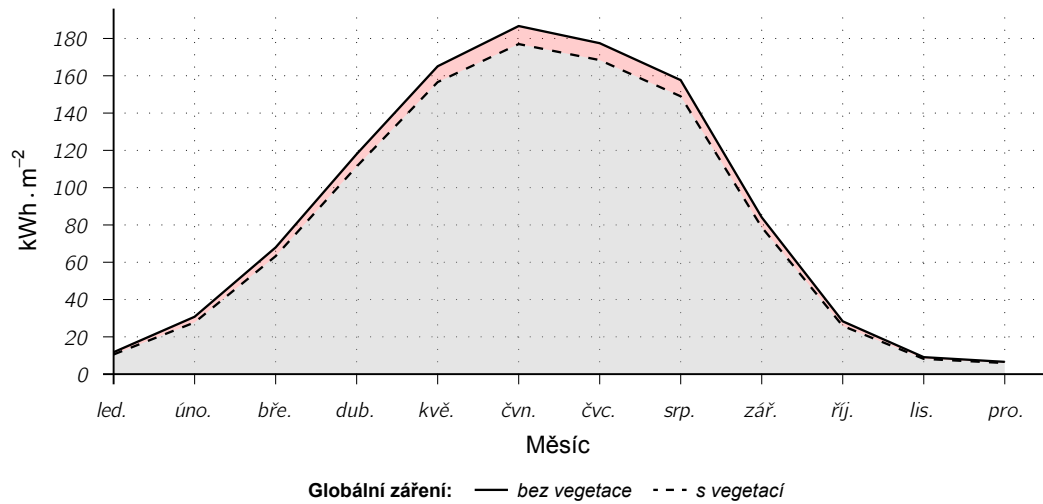
3.1	Dostupné datové sady LiDARu . . . . .	17
4.1	Statistický přehled zájmových lokalit . . . . .	20
5.1	Atmosférické parametry vstupující do modelu . . . . .	26
5.2	Výpočetní čas pro jednotlivé lokality . . . . .	27
6.1	Procentuální rozdíly ročních hodnot složek solární radiace mezi scénáři . . . . .	29
6.2	Procentuální rozdíly denních hodnot globální radiace mezi scénáři . . . . .	30
6.3	Sumarizace charakteristik studijních území . . . . .	31

## Seznam příloh

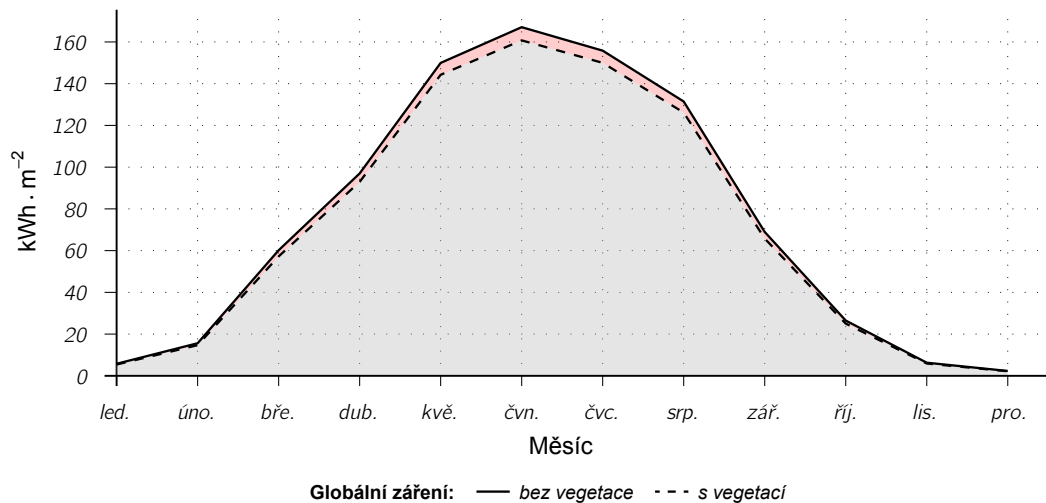
Příloha A: Vliv zastínění v průběhu roku . . . . .	39
Příloha B: Změna v průběhu roku . . . . .	41
Příloha C: Vliv zastínění v průběhu dne . . . . .	43
Příloha D: Validace modelovaných dat . . . . .	47

## Příloha A: Vliv zastínění v průběhu roku

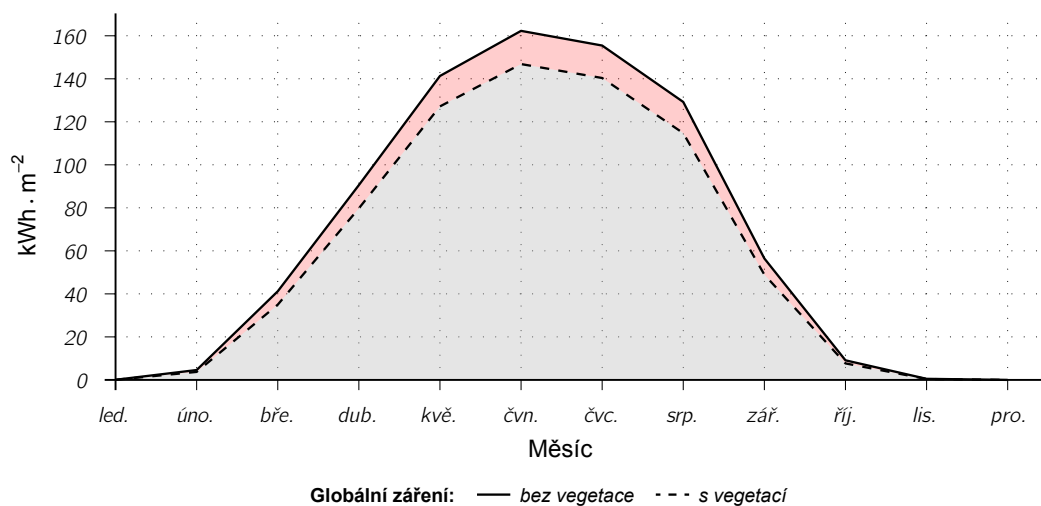
Česká republika, Pec pod Sněžkou [š. 50,70° | d. 15,73°]



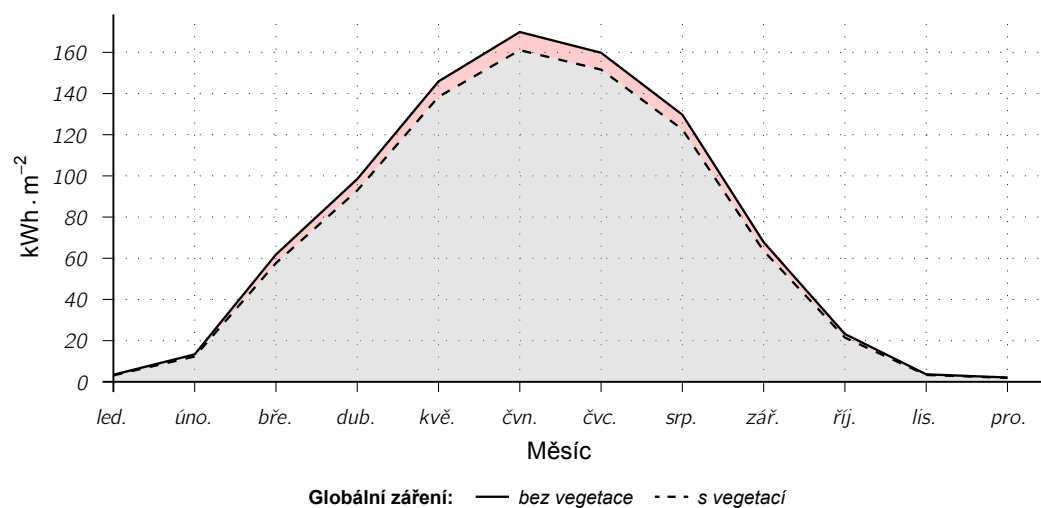
Nizozemsko, Macharen [š. 51,80° | š. 5,54°]



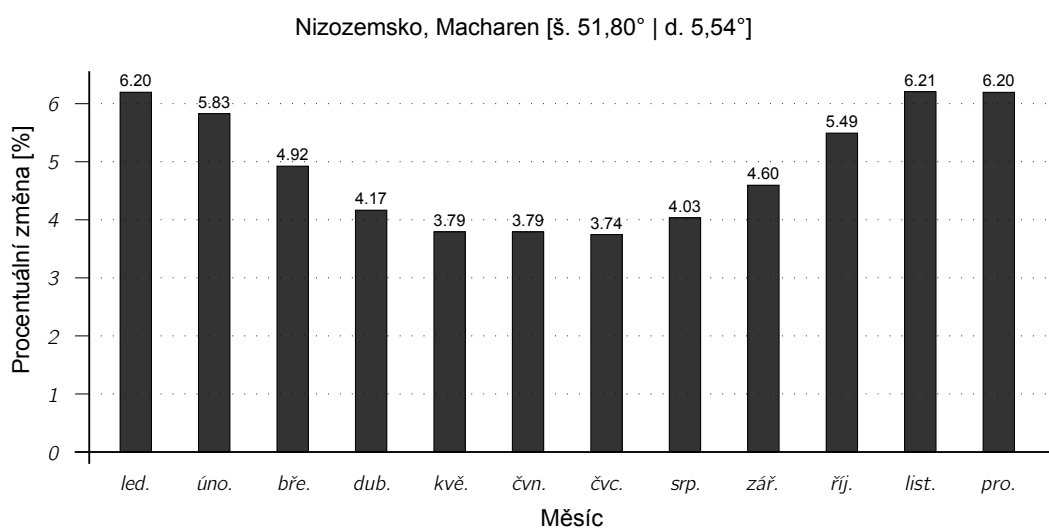
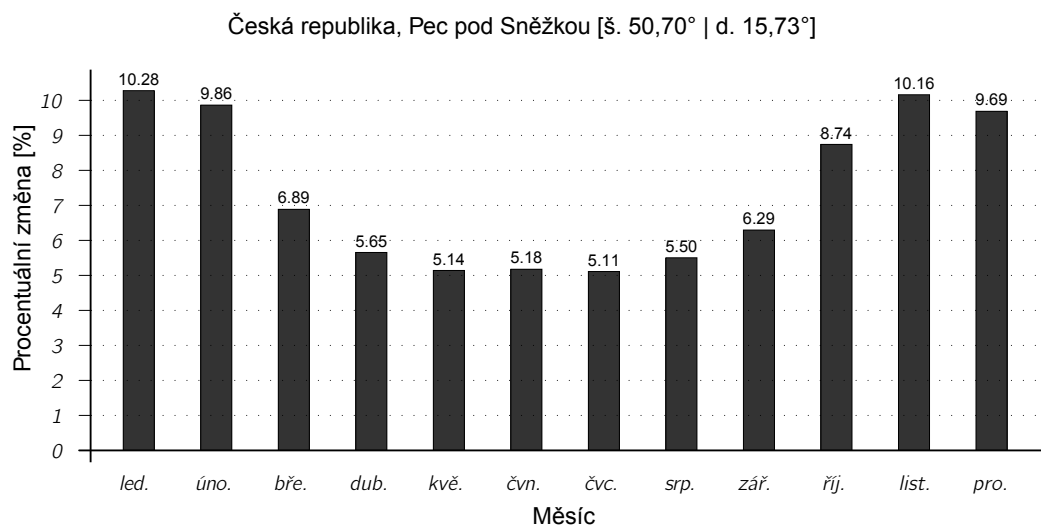
## Finsko, Pellesmäki [š. 62,76° | d. 27,56°]



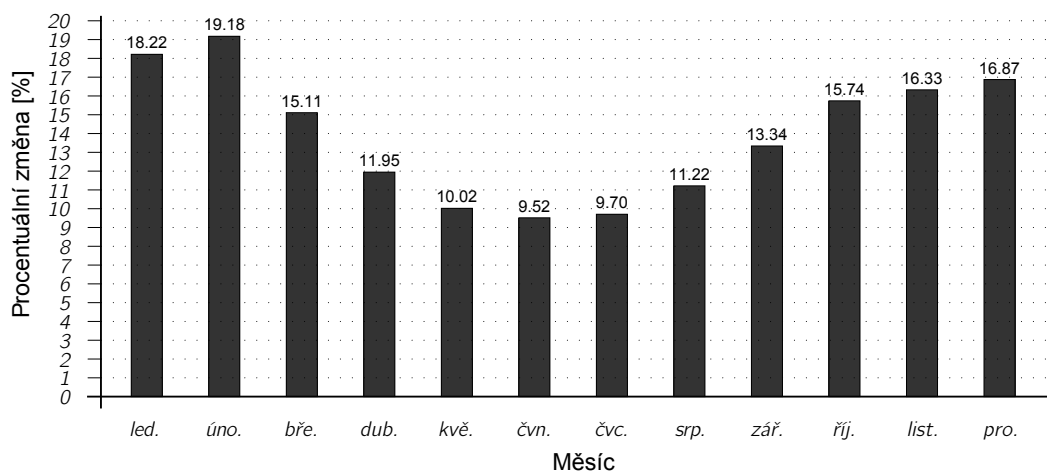
## Dánsko, Kalvehave [š. 55,00° | d. 12,16°]



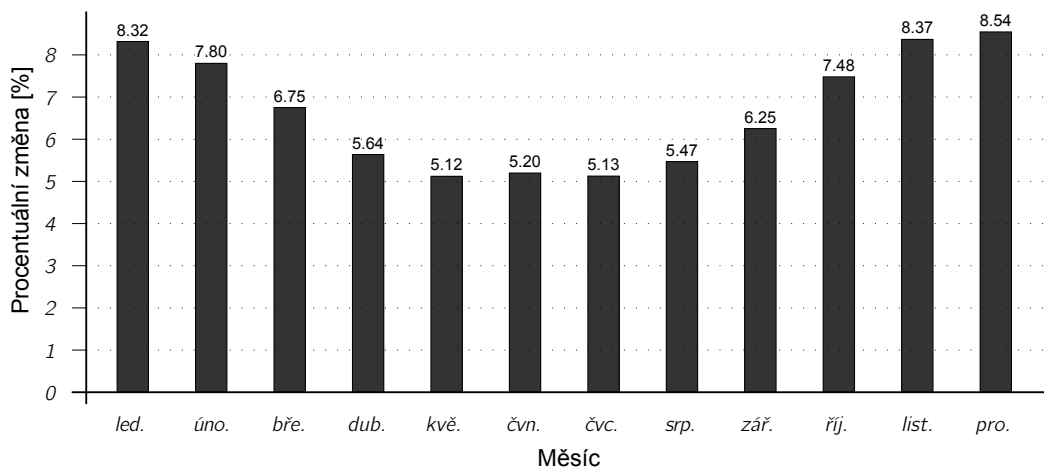
## Příloha B: Změna v průběhu roku



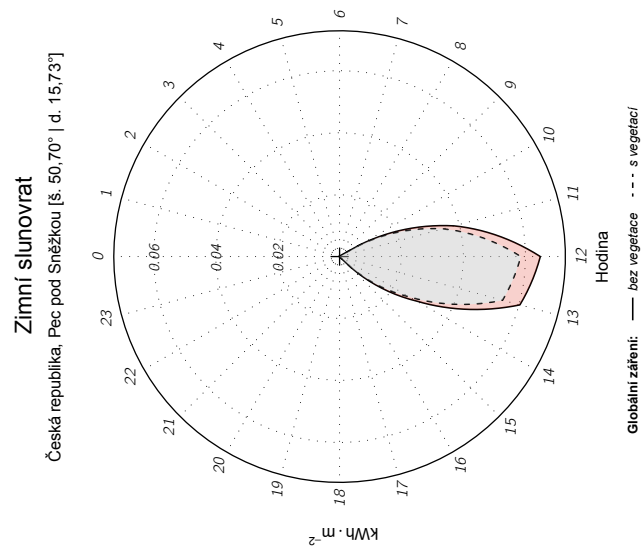
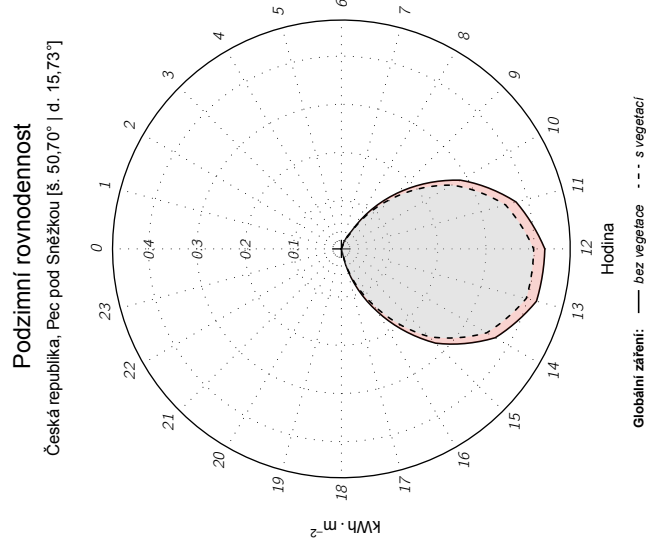
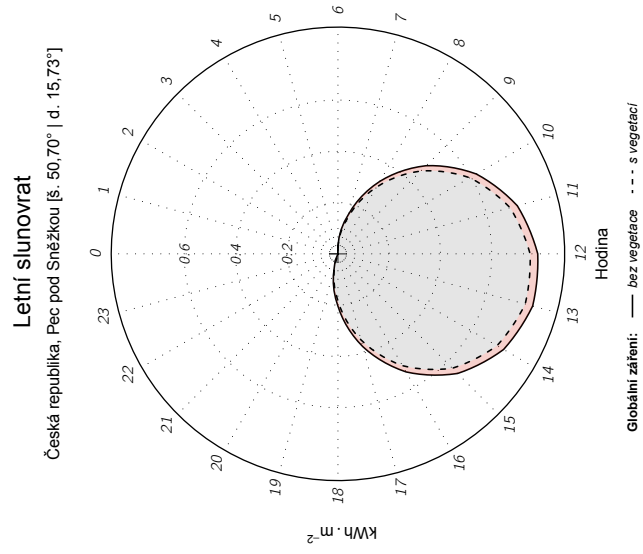
Finsko, Pellesmäki [š. 62,76° | d. 27,56°]



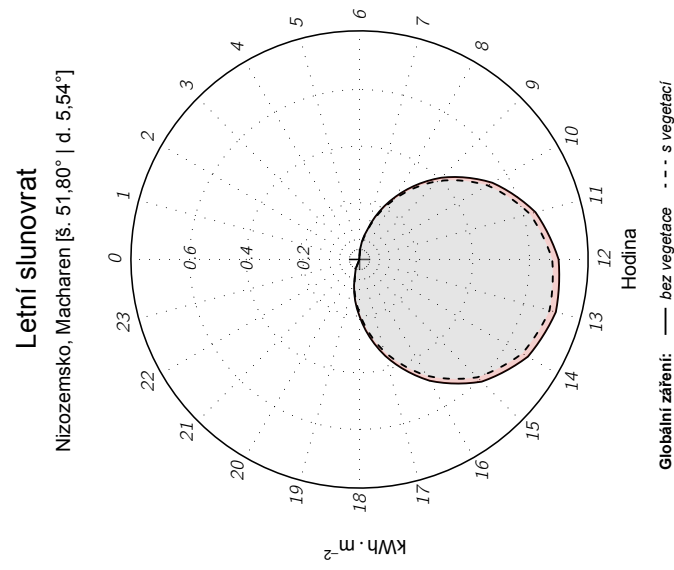
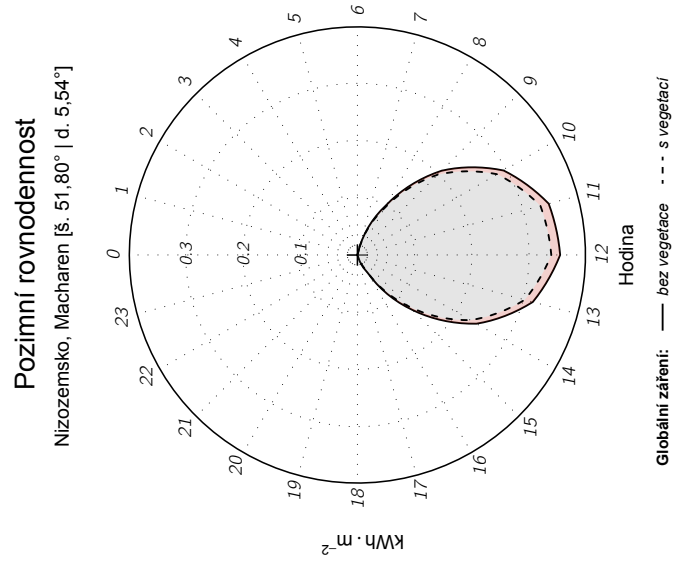
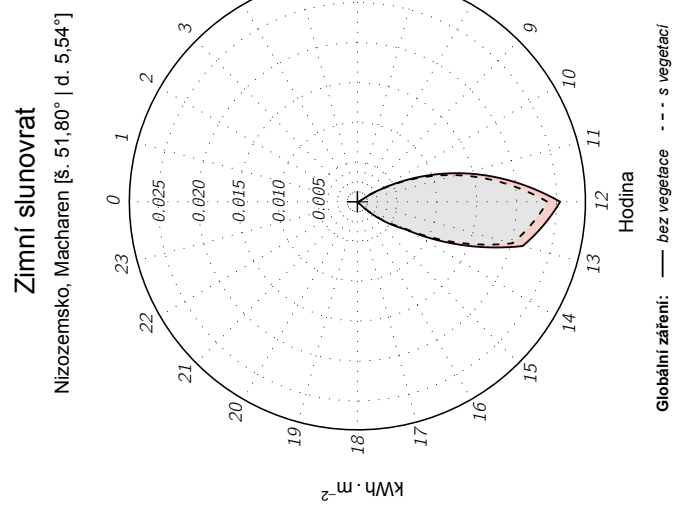
Dánsko, Kalvehave [š. 55,00° | d. 12,16°]



## Příloha C: Vliv zastínění v průběhu dne

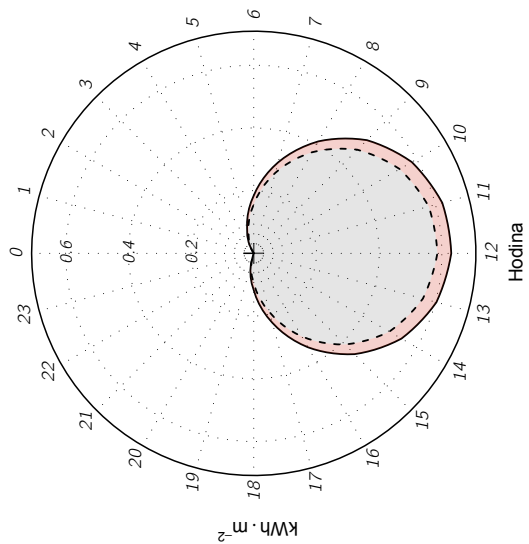






### Letní slunovrat

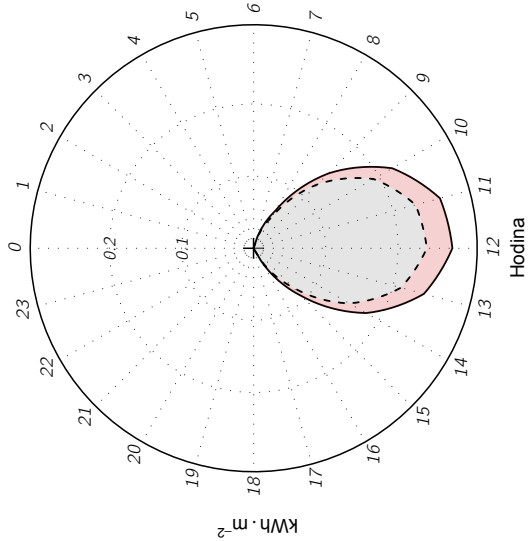
Finsko, Pellesmäki [š. 62,76° | d. 27,56°]



Globální záření: — bez vegetace - - - s vegetací

### Podzimní rovnodennost

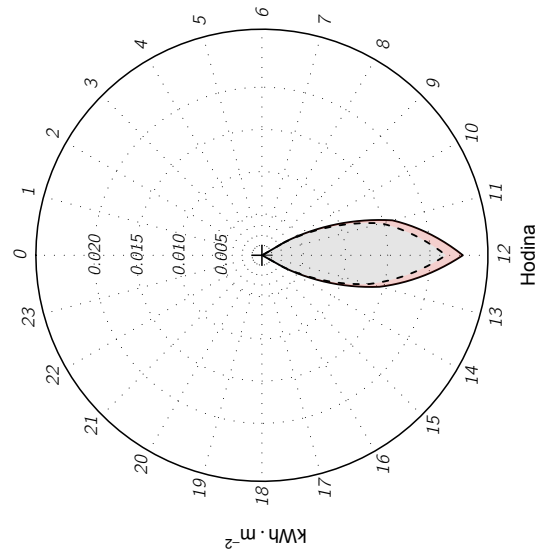
Finsko, Pellesmäki [š. 62,76° | d. 27,56°]



Globální záření: — bez vegetace - - - s vegetací

### Zimní slunovrat

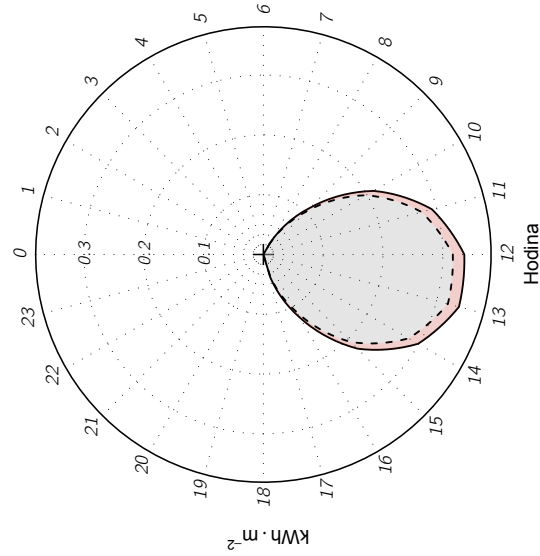
Dánsko, Kalvehave [š. 55,00° | d. 12,16°]



Globální záření: — bez vegetace - - - s vegetací

### Podzimní rovnodennost

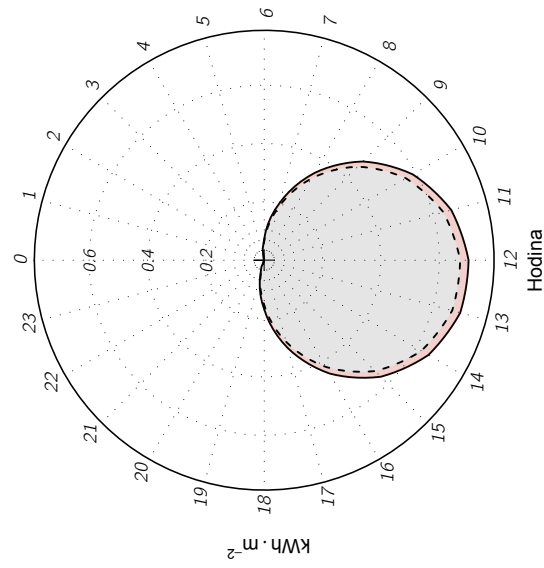
Dánsko, Kalvehave [š. 55,00° | d. 12,16°]



Globální záření: — bez vegetace - - - s vegetací

### Letní slunovrat

Dánsko, Kalvehave [š. 55,00° | d. 12,16°]



Globální záření: — bez vegetace - - - s vegetací

## Příloha D: Validace modelovaných dat

