

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA

V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE



ODHAD VLIVU STÍNÍCÍ VEGETACE NA SOLÁRNÍ  
POTENCIÁL STŘECH  
DIPLOMOVÁ PRÁCE

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

DIPLOMANT: Bc. Lucie Brzková

Praha, 2022

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Lucie Brzková

Regionální environmentální správa

Název práce

**Odhad vlivu stínící vegetace na solární potenciál střech**

Název anglicky

**Estimation of the effect of shading vegetation on the solar potential of roofs**

---

### Cíle práce

Cílem práce je výpočet solárního potenciálu střech několika urbanizovaných území s rozdílnou zeměpisnou šířkou a posouzení vlivu vegetace na solární potenciál střech v těchto územích. Formulace dílčích cílů je úkolem autorky.

### Metodika

Solární energie je považována za jeden z nejuhodnějších obnovitelných zdrojů, který má minimální negativní dopady na životní prostředí. Solární potenciál střech v urbanizovaném území je díky rostoucí dostupnosti dat leteckého laserového skenování stále častěji dostupným produktem, který je účinným nástrojem v rozhodovacích procesech zodpovědných orgánů územní správy, ale i užitečným pomocníkem pro uživatele z řad laické veřejnosti. Řešitelka zpracuje literární rešerši z oblasti leteckého laserového skenování, se zaměřením na využití při modelování solárního potenciálu. Dále se zaměří na podporu výstavby střešních fotovoltaických elektráren v České Republice. S využitím volně dostupných dat leteckého laserového skenování stanoví řešitelka solární potenciál několika menších obcí v různých zeměpisných šířkách a posoudí vliv zastínění stávající vegetací na tento potenciál.

**Doporučený rozsah práce**

40 stran

**Klíčová slova**

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

---

**Doporučené zdroje informací**

- Fogl, M., & Moudrý, V. (2016). Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. *Applied Geography*, 66, 73-80.
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., & Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 915-931.
- Kodysh, J. B., 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*, 8, 31-41.
- Moudrý, V., Beková, A., & Lagner, O. (2019). Evaluation of a high resolution UAV imagery model for rooftop solar irradiation estimates. *Remote Sensing Letters*, 10(11), 1077-1085.
- Santos, T., Gomes, N., Freire, S., Brito, M. C., Santos, L., & Tenedório, J. A. (2014). Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography*, 51, 48-57.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2021/22 LS – FZP

**Vedoucí práce**

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

**doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 2. 2022

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 03. 03. 2022

---

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: "Odhad vlivu stínící vegetace na solární potenciál střech" vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze, dne 28. 3. 2022

Podpis: .....

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěla poděkovat doc. Ing. Vítězslavovi Moudrému, Ph. D. za veškeré cenné rady a připomínky, pomoc při zpracování dat, a především za trpělivost a vstřícný přístup.

## ABSTRAKT

Solární energie je bezemisním čistým zdrojem energie a ideální způsob, jak tuto energii využít v urbanizovaných oblastech je umístění fotovoltaických elektráren na střechy budov. K umístění FVE na střechy stávajících či plánovaných budov je třeba znát jejich solární potenciál. Jedním z nástrojů pro geometrické modelování slunečního záření je Solar Analyst, který využívá digitálních modelů povrchu jako vstupních dat. Digitální modely povrchu s vysokým rozlišením jsou zde získávány z bodových mračen pocházejících z leteckého laserového skenování Země.

Tato práce se zabývá vlivem vegetace na solární potenciál střešních ploch v urbanizovaném prostředí a vlivem oblačnosti na jednotlivé složky přicházejícího záření. Studie byla provedena na čtyřech lokalitách ve Španělsku, Lotyšsku, Švýcarsku a Spojeném království, mající různou zeměpisnou šířku a rozdílnou strukturou zástavby. Pro každou lokalitu byl nástrojem Solar Analyst odhadnut roční celkový solární potenciál střešních ploch. Rastry bez vegetace měly hodnoty dopadené solární radiace vyšší a byl tak prokázán významný vliv vegetace na solární potenciál střech. Výsledné roční ztráty způsobené vegetací se pohybují v rozmezí 2-12 %, kdy k největšímu poklesu docházelo v zimních měsících. Z výsledků je patrné, že zahrnutí vegetace do výpočtu solárního potenciálu je velice důležité pro správné umístění fotovoltaických systémů na střechy budov.

## KLÍČOVÁ SLOVA

solární potenciál, solární radiace, LiDAR, Solar Analyst, fotovoltaické systémy, zastínění

## ABSTRACT

Solar energy is an emission-free, clean energy source and the ideal way to harness this energy in urbanized areas is by placing photovoltaic power systems on the roofs of buildings. To place PV on the roofs of existing or planned buildings, it is necessary to know their solar potential. One tool for geometric solar modelling is Solar Analyst, which uses digital surface models as input data. Here, high-resolution digital surface models are obtained from point clouds originating from airborne laser scanning of the Earth.

This paper examines the effect of vegetation on the solar potential of roof surfaces in urbanized environments and the effect of cloud cover on the different components of incoming radiation. The study was carried out at four sites in Spain, Latvia, Switzerland and the United Kingdom, having different latitudes and different built-up structures. For each site, the annual total solar potential of the roof areas was estimated using the Solar Analyst tool. Rasters without vegetation had higher values of incident solar radiation and thus a significant effect of vegetation on the solar potential of rooftops was demonstrated. The resulting annual losses due to vegetation ranged from 2-12 %, with the largest decrease occurring in the winter months. The results show that the inclusion of vegetation in the calculation of solar potential is very important for the correct placement of PV systems on building roofs.

## KEY WORDS

solar potential, solar radiation, LiDAR, Solar Analyst, photovoltaic systems, shading

## OBSAH

1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE.....	10
2. LITERÁRNÍ REŠERŠE .....	12
2.1. Slunce .....	12
2.2. Sluneční záření.....	12
2.2.1. Měření slunečního záření .....	13
2.2.2. Odhad dopadajícího záření .....	14
2.3. Modelování v prostředí ArcGIS.....	14
2.3.1. Solar Analyst .....	15
2.4. LiDAR.....	15
2.5. Fotovoltaické elektrárny.....	16
2.5.1. Fyzikální princip fotovoltaického článku .....	16
2.5.2. Typy fotovoltaických článků .....	17
2.5.3. Solární fotovoltaické panely .....	18
2.5.4. Rozdělení fotovoltaických systémů.....	18
2.5.5. Projektování fotovoltaické elektrárny .....	18
3. METODIKA.....	20
3.1. Charakteristika studijního území .....	20
3.1.1. Popis vybraných lokalit .....	21
<i>Hünikon</i> .....	21
<i>Tingere</i> .....	22
<i>Zarratón</i> .....	23
<i>Alnmouth</i> .....	24
3.2. Vstupní data .....	25
3.3. Zpracování dat.....	26
3.3.1. LiDARová data .....	26
3.3.2. Digitální model povrchu .....	26
3.3.3. Polygony střešních ploch.....	27
3.4. Výpočet solárního potenciálu.....	27
3.4.1. Scénář 1 – Jasná obloha .....	28
3.4.2. Scénář 2 - Oblačnost.....	28
3.5. Statistické vyhodnocení .....	29
4. VÝSLEDKY.....	30
5. DISKUSE.....	35
6. ZÁVĚR .....	37



7. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	38
---	----

## 1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Trvale udržitelný rozvoj je v současnosti velmi diskutovaným tématem. Se zvyšujícím se nárůstem lidské populace dochází k růstu poptávky po energiích. Neobnovitelné zdroje energie jsou postupně vyčerpávány a jejich využívání představuje vysokou zátěž pro životní prostředí. Problémem není jen samotná spotřeba těchto zdrojů, ale také látky, které při této výrobě vznikají. Jedná se například o emise skleníkových plynů, které brání průchodu infračerveného záření odraženého z povrchu země, z nichž nejvíce zastoupeným skleníkovým plynem vypouštěným do atmosféry je oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) (Libra; Poulek, 2009).

Hlavním zdrojem elektřiny jsou v České republice uhelné a jaderné elektrárny. Zásoby hnědého uhlí jsou v oblastech, ve kterých není možné těžít. U stávajících jaderných elektráren plánováno jejich uzavření nejdéle do poloviny tohoto století (Beran et al., 2018). Tento problém má zdánlivě jednoduché řešení, kterým je využívání obnovitelných zdrojů energie. Mezi ně patří sluneční energie, energie větru, vodních toků, biomasy či geotermální energii. Sluneční energie může být přeměněna přímo na elektrickou energii pomocí fotovoltaických článků. Dalšími projevy sluneční energie na Zemi je větrná energie, vodní energie či energie biomasy (Šulc, 2015). Česká republika ovšem nemůže plně využívat všechny výše uvedené obnovitelné zdroje, jelikož pro ně nemá vhodné podmínky. V porovnání s jižními státy Evropy je množství dopadajícího slunečního záření nižší, povětrnostní podmínky narozdíl od států severní Evropy nejsou příznivé z důvodu absence pobřežních oblastí. Potenciál větru je omezen dle lokalit s jeho dostatečnou rychlostí (Beran et al., 2018).

Potenciál nevyčerpatelných zdrojů je omezený. Nemůžeme využívat zemědělskou půdu a lesy pro účely výroby energie, jelikož tuto půdu potřebujeme pro pěstování potravin. Potenciál sluneční energie je takřka neomezený, nevýhodou získávání energie tímto způsobem je ale relativně omezená životnost a vysoké pořizovací náklady (Srdečný, 2009).

Využívání energie z obnovitelných zdrojů je jedním z cílů energetické politiky Evropské unie. Mnoho měst po celém světě se zavazuje k dekarbonizaci a zásadní úlohu v této snaze budou hrát fotovoltaiky umístované na budovy (Panagiotidou et al., 2021). Mezi mnoha zdroji obnovitelné energie je solární energie bezpochyby perspektivní možností, přičemž trh s ní dosáhl za posledních pár let velkého rozmachu.

V České republice byl tento rychlý rozvoj zapříčiněn podporou vlády a souvisí také se snížením nákladů, které jsou spojeny se zřízením fotovoltaických elektráren. Došlo k výstavbě mnoha fotovoltaických elektráren, tzv. solárních farem, které mají vysokou ekonomickou návratnost, u nichž se ale nebere na zřetel jejich vliv na životní prostředí (Gallay et al., 2015).

Aby byla solární energie efektivně využita, nezabírala zemědělskou půdu a neměla zásadní negativní vliv na životní prostředí, vhodnou variantou se jeví fotovoltaické panely umístěné na střechách budov urbanizovaných území (Santos et al., 2014). Tyto solární panely či kolektory umístěvané na střešní plochy budov nejsou tak náročné prostorově, ani počáteční investicí a zároveň jsou vyloučeny ztráty při přenosu energie, jelikož je energie využita přímo v místě, kde je vyrobena.

Solární potenciál byl také předložen jako parametr návrhu při plánování měst. Bylo prokázáno, že úbytek sluneční energie může klesnout až o 75 % vlivem sklonu a geometrie budovy (Kanters; Horvat, 2012). Pro umístění fotovoltaických panelů či solárních kolektorů je nutné znát množství dopadajícího slunečního záření. Problémem hustě osídleného urbanizovaného území může být okolní vegetace, která zastíňuje plochy střech a tím dochází ke snížení množství záření, které dopadne na plochu panelu či kolektoru. Touto problematikou se již zabývalo mnoho studií, například Tooke et al. (2011), kteří zkoumali jen vybrané dny v roce, došli k závěru, že okolní vegetace snižuje množství dopadeného záření až o 38 %, Fogl (2015) ve své práci provedl výpočty v průběhu celého roku a prokázal 4-11 % úbytek záření v přítomnosti vegetace. Fogl, Moudrý (2016) potvrdili myšlenku, že vlivem stínící vegetace dochází ke značným ztrátám dopadající solární radiace na střechy budov. Ztráty se v tomto případě pohybovaly mezi 3-11 %. Tato problematika je jedním z hlavních cílů této práce.

Cílem této diplomové práce je vypočtení solárního potenciálu v určitých menších zastavěných územích v rámci Evropy, a vyhodnocení vlivu stínící vegetace na množství dopadajícího záření. Navíc bude vliv stínící vegetace posouzen s ohledem na množství dopadajícího přímého slunečního záření (tj. analýza bude provedena v různých zeměpisných šířkách a v několika scénářích zohledňujících různé stupně oblačnosti).

## 2. LITERÁRNÍ REŠERŠE

### 2.1. Slunce

Slunce má 109x větší průměr než Země a je od ní vzdáleno přibližně 150 milionů kilometrů. Slunce je tvořeno z 91 % vodíkem, 9 % heliem (podíl počtu atomů) a z nepatrného množství dalšími prvky, které jsou zastoupeny ve formě plazmy. Energie ze Slunce vzniká při termonukleární reakci, která probíhá ve středu Slunce a dochází zde za vysoké teploty a vysokého tlaku k přeměně jader vodíku na jádra helia. Při této reakci dochází ke snížení hmotnosti a přeměně na energii dle rovnice  $E=mc^2$ , která prochází tzv. radiační zónou směrem k povrchu Slunce ve formě fotonů. Tyto fotony mění své vlastnosti, jsou energeticky chudší, mají větší vlnovou délku a výsledné záření je z převážně většiny ultrafialové, infračervené a světelné. Předpokládaná doba trvání termonukleární reakce neboli jaderné fúze je 5–10 miliard let, tudíž je Slunce z pohledu člověka permanentním a nevyčerpatelným zdrojem energie (Matuška, 2013).

### 2.2. Sluneční záření

Záření přicházející ze Slunce je základním zdrojem energie pro všechny biologické a fyzikální procesy na Zemi. Pro využití tohoto slunečního záření člověkem je nutné znát potenciál tohoto zdroje, tj. množství energie, které můžeme získat a tyto údaje následně využívat v různých odvětvích, např. v zemědělství, lesnictví, ekologii či stavebnictví (Fu; Rich, 1999).

Sluneční záření je při průchodu atmosférou částečně pohlcováno plyny, parou, aerosoly a jeho podstatná část je využita při koloběhu vody. Dochází také k jeho odrazu ve formě krátkovlnného a dlouhovlnného záření zpět do vesmíru. Záření, které se dostává na povrch Země tedy přímo závisí na složení atmosféry a můžeme ho rozlišovat na přímé a difúzní. Přímé záření je téměř netransformované, difúzní neboli rozptýlené má znatelně rozdílný obsah energie a řadíme sem i tzv. terestrické (odražené) záření (Cenek, 2001).

Velmi významné jsou rozdíly v množství dopadajícího slunečního záření způsobené oběhem Země okolo Slunce a rotací kolem své vlastní osy. Zásadním faktorem, který mění rozložení slunečního záření je reliéf. Různá nadmořská výška, orientace či stíny vrhané okolním prostředím způsobují heterogenitu energetické a vodní bilance a ovlivňují místní poměry (množství sněhu, evapotranspiraci, půdní podmínky apod.) (Fu; Rich, 1999).

Na vodorovnou rovinu v České republice dopadne zhruba 1000–1200 kWh\*(m<sup>2</sup>\*rok) a tyto hodnoty jsou srovnatelné i pro plochy s optimálním sklonem orientované na jižní stranu. Sklon plochy a orientace slunečních paprsků neboli azimut, úzce souvisí s množstvím sluneční energie, která dopadne na povrch za určitý čas. Nejpriznivější orientace plochy je jižní, s odchylkou do 45 % (JV, JZ). Úhrn energie se v tomto případě nemění více než o 10 %. Při změně orientace na východ či západ dochází k menším ziskům způsobeným nižším množstvím dopadající energie, a to až o 20 % (Matuška, 2013).

### 2.2.1. Měření slunečního záření

V meteorologických stanicích se měří celkové sluneční ozáření na vodorovnou rovinu a doba trvání slunečního svitu. K měření slunečního ozáření se používají tzv. pyranometry. Nejčastějšími druhy pyranometrů jsou segmentový a terčíkový. Segmentový pyranometr je složen z černých a bílých segmentů, přičemž černé články téměř dokonale pohlcují sluneční záření, zatímco bílé ho odrážejí. Sluneční ozáření je přímo úměrné teplotnímu rozdílu mezi černými a bílými úseky pyranometru bez vlivu okolní teploty. Terčíkový pyranometr zkoumá teplotní rozdíl mezi stíněným tělem přístroje a černým povrchem čidla. K měření přímého slunečního ozáření se používá pyrliometr (aktinometr), jehož čidlo je vázáno na automatické polohovací zařízení sledující pohyb Slunce po obloze. K měření samotného difúzního záření se používají pyranometry, které jsou zastíněné tak, aby na čidlo nedopadalo přímé sluneční záření, ale jen difúzní složka globálního (celkového) záření. Pro měření odraženého záření slouží albedometry, které fungují pomocí dvou pyranometrů natočených opačným směrem a výsledné ozáření se vypočítá poměrem dopadajícího záření ku odraženému. Důležitým hodnoceným klimatickým prvkem je doba trvání slunečního osvitu a závisí na astronomické délce dne a oblačnosti. Pro určení doby trvání slunečního osvitu je používán heliograf (Matuška, 2013).

Hustota stanic je v některých oblastech světa nízká, nejčastěji se nacházejí v blízkosti urbanizovaných oblastí, kde bývá terén převážně homogenní. Čím složitější krajina je, tím méně se těchto stanic vyskytuje. Další možností, jak získat data o množství dopadajícího záření jsou meteorologické geostacionární družice, jejichž nevýhodou je ale jejich nízké rozlišení a nepřesnost. Interpolací a extrapolací hodnot získaných z meteorologických stanic lze dopočítat hodnoty i na nedostupných místech (Ruiz-Arias et al., 2009).

### 2.2.2. Odhad dopadajícího záření

Efektivním způsobem pro přesnější odhad solárního potenciálu se zdá být modelování. V posledních letech bylo vyvinuto několik modelů, mezi které se řadí SolarFlux, Solei-32, Solar Analyst, SRAD, či r.sun. Ty našly uplatnění v hydrologii, klimatologii nebo v oblasti obnovitelných zdrojů energie.

Zmíněné modely využívají informace obsažené v každém bodu digitálního modelu terénu (DEM) k odhadu množství dopadajícího slunečního záření. Tyto modely pracují s rastrovou vrstvou geografických informací, což umožňuje zohlednit v radiačním modelu prostorově se měnící atributy jako sklon, orientaci a zeměpisnou šířku. Důležitým aspektem je také stín, který vrhají okolní budovy či vegetace (Hofierka, 2002). Je ale důležité zmínit, že každý DEM má různé rozlišení, poskytuje výsledky s jinou přesností, a tudíž odhaduje rozdílné množství dopadajícího záření (Ruiz-Arias et al., 2009).

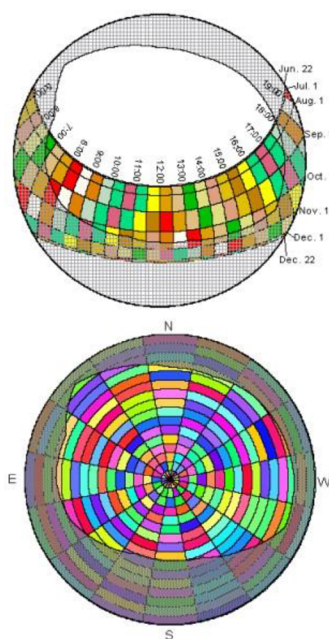
### 2.3. Modelování v prostředí ArcGIS

Cílem modelů slunečního záření je odhadnout, kolik slunečního záření dopadá na určité místo zemského povrchu buď přímo, nebo nepřímo. Modely v místním měřítku se používají například při plánování umístění fotovoltaických zařízení, při plánování měst, kde jsou obnovitelné zdroje prioritou, nebo při určování potenciální energetické účinnosti budov. Ideální model slunečního záření musí zohledňovat globální, místní, časové a meteorologické faktory. Tyto modely pracují s rastrovou vrstvou geografických informací, což umožňuje zohlednit v radiačním modelu prostorově se měnící atributy jako sklon, orientaci a zeměpisnou šířku. Důležitým aspektem je také stín, který vrhají okolní budovy či vegetace (Hofierka, 2002).

Modely slunečního záření poskytují efektivní prostředky pro prostorové a časové rozložení slunečního záření. Tyto modely jsou nejlépe přístupné na platformách geografických informačních systémů (GIS), kde se dají mapy slunečního osvitů propojovat s dalšími digitálními mapovými vrstvami. Můžeme je rozdělit na bodové a plošné, přičemž bodové využívají geometrii orientace povrchu v daném místě, naopak plošné modely počítají s osluněním celé oblasti a z digitálního modelu terénu dopočítávají orientaci povrchu a osvit. Modely založené na jednotlivých bodech jsou přesné, ale nelze vytvořit model pro každou lokalitu za dané období. (Fu; Rich, 1999).

### 2.3.1. Solar Analyst

Tento model je rozšířením *Spatial Analyst* v ArcGIS a využívá výhod bodových i plošných modelů. Dokáže generovat hemisférický pohled směřující vzhůru, čímž v podstatě vytváří obdobu tzv. rybiho oka v každém bodě digitálního modelu terénu. *Solar Analyst* zohledňuje zeměpisnou šířku, nadmořskou výšku, orientaci svahu, stíny z okolní topografie i denní a sezónní úhly dopadu slunečního záření. Počítá přímé, difúzní i globální záření, dobu trvání přímého záření a generuje tzv. sluneční mapy. Výhodou je také jeho široká dostupnost a uživatelsky přívětivé rozhraní (Fu; Rich, 2000).



Obrázek 1 - Překrytí pohledového pole na sluneční mapu (nahore) a mapu oblohy (dole). Stínované oblasti jsou směry oblohy, které jsou zastíněny.  
Zdroj: Fu; Rich, 1999

### 2.4. LiDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging) je zařízení sloužící k dálkovému průzkumu Země a poskytuje přesný, rychlý a snadný způsob sběru dat. Toto zařízení je složeno ze tří částí. Prvním je laserový skener, který vysílá laserový paprsek, následně ho přijímá a vyhodnocuje celkovou dobu jeho trvání. Další částí je inerciální měřicí jednotka (IMU), která vyhodnocuje změny náklonu, sklonu a odklonu. Třetí je globální polohový systém (GPS). Pomocí přesné polohy snímače a doby trvání laserového

impulsu vzniká trojrozměrný soubor dat uložený jako bodové mračno (Wehr; Lohr, 1999).

Data získaná z LiDARu jsou základem pro úspěšný vývoj fotovoltaických systémů v městském prostředí. Díky nim je možné vytvořit solární mapy, které podporují rozhodovací proces a slouží k určení vhodných míst pro instalaci fotovoltaických zařízení. Soupis existujících solárních map můžeme nalézt viz Kanters, Wall a Kjellsson (2014). Množství dopadajícího slunečního záření je ovlivněno mnoha faktory. Jedním z nejdůležitějších faktorů v urbanizovaném prostředí je vliv stínu jak okolních budov, tak vegetace. V souvislosti s tím byl prokázán až 9% nárůst solárního potenciálu při správné optimalizaci (Sarralde et al., 2015).

## 2.5. Fotovoltaické elektrárny

Jak již bylo řečeno, solární potenciál je považován za důležitý návrhový parametr při plánování měst. Odhad tohoto potenciálu se v posledních letech těší značnému zájmu. Solární potenciál fotovoltaické elektrárny integrované do budov v členských státech Evropské Unie má představovat více než 22% očekávané roční poptávky po elektřině na území Evropy v roce 2030 (Defaix et al., 2012).

Výskyt fotovoltaických zařízení se stále zvyšuje a solární elektrárny se spolupodílejí na vzhledu střech a fasád. Ceny za tato zařízení klesají, a to jak díky nižším nákladům na výrobu, tak z důvodu existující konkurence asijských výrobců (Haselhuhn, 2011).

Při tradičním navrhování fotovoltaických zařízení se za optimální orientaci fotovoltaických modulů považuje taková, která přináší maximální roční produkci energie. Na základě celoročního souboru dat pro instalaci v obytných domech byly simulovány různé alternativy, zahrnující moduly umístěné na střechách a moduly připevněné na fasády. Bylo zjištěno, že při správné instalaci dojde ke zvýšení produkce energie až o 9 % v případě fasád a o 5 % při využití střešních modulů (Sánchez et al., 2021).

### 2.5.1. Fyzikální princip fotovoltaického článku

K přeměně slunečního záření na elektrický proud jsou zapotřebí dvě věci. Jednou z nich jsou volné elektrony, druhou je elektrický potenciál (pole), který fotony uvede do pohybu ze zdroje do spotřebiče. Volné elektrony jsou součástí každého kovu



a záření se za určitých podmínek chová jako proud částic. Částice proudění se nazývají právě fotony a jsou schopné předat svoji energii kovu nebo polovodiči (PV). Při ozáření kovu dochází k nežádoucímu jevu, uvolnění záporně nabitě částice – elektronu, nazývanému fotoelektrický jev. Proto se více než kovy vyplatí využívat polovodiče, jež mají z části vlastnosti kovu a z části izolantu, který v sobě neobsahuje volné elektrony. Elektron, který vylétne z kovu po sobě zanechá tzv. díru, do které je následně přitahován, ale než se do ní vrátí, je žádoucí jeho průchod přes spotřebič. V principu je tedy nutné od sebe oddělit volné elektrony a “díry” a vytvořit p-n přechod, který je základem moderní elektroniky a je podstatný pro pochopení funkce fotovoltaického článku (Murtinger, 2008). Mezi páry elektron-díra je elektrické pole, díry jsou urychleny ve směru pole, elektrony směrem opačným. Mezi opačnými póly polovodičového článku vzniká elektrické napětí a zapojením do elektrického obvodu protéká obvodem stejnosměrný elektrický proud. V tuto chvíli se PV článek stává zdrojem elektrické energie (Libra; Poulek, 2006).

#### 2.5.2. Typy fotovoltaických článků

Fotovoltaické články se rozlišují podle materiálu, z jakého jsou vyrobeny. Nejběžnějším PV článkem je článek na bázi krystalického křemíku.

Monokrystalické články mají většinou čtvercový tvar a povrch je z důvodu přítomnosti jediného krystalu homogenně tmavomodrý až černý. Dosahují účinnosti až 21 %. Polykrystalické články jsou od monokrystalických rozeznatelné na první pohled, a to díky své modře se třpytící krystalické struktuře. Jsou méně účinné než monokrystalické, průměrně se uvádí 13–16 %. Výroba je jednodušší, méně nákladná a vzniká znatelně méně odpadu.

Díky velké spotřebě materiálu a energie začala v 90. letech 20. století výroba tzv. tenkovrstvých článků, které jsou méně citlivé na teplotu a zastínění. Dokážou využívat větší spektrum záření a jsou integrovatelné. Materiál se v tomto případě nanáší přímo na sklo, umělou hmotu, nebo kovové folie, a to za výrazně nižší teploty (200-500 °C) než u krystalických článků. Nevýhodou tenkovrstvých článků je jejich menší účinnost, která dosahuje zhruba poloviny účinnosti krystalických článků.

Mezi další používané materiály se řadí amorfni křemík, mikromorfni křemík, dvojselenid mědi-india nebo telur kademnatý. Rozdílné materiály mají rozdílnou spektrální citlivost. Je-li Slunce kolmo k zemskému povrchu, záření má vyšší intenzitu a jiné spektrální složení, než když je na obloze nízko nad horizontem. (Haselhuhn, 2011).

### 2.5.3. Solární fotovoltaické panely

Základem FV panelu je solární článek, který má v současnosti výkon až 4 W a napětím 0,5 V. Obvyklé solární moduly jsou zapojeny sériově a skládají se z 36, 48, 54, 60 či 72 článků. Přední strana článku by měla co nejlépe propouštět světlo. Na povrchu je umístěna tzv. antireflexní vrstva, která zajišťuje co nejmenší odraz a co největší absorpci fotonů. Na zadní straně bývá umělohmotná folie (tedlar) a následně dochází k zapuštění do etylen-vinyl-acetátu (EVA), což zajišťuje mechanickou ochranu. Zapojené moduly jsou chráněny sklem z jedné, či obou stran (Haselhuhn, 2011).

### 2.5.4. Rozdělení fotovoltaických systémů

Z hlediska aplikace můžeme rozdělit FV systémy na autonomní, hybridní a přímo spojené se sítí. Autonomní systém vyžaduje pro svou funkci akumulátory a jeho použití je preferováno v místech, kde je veřejná elektrorozvodná síť nedostupná. Využívá se například při čerpání vody či v telekomunikacích. Hybridní systémy obsahují FV pole, pomocné generátory a baterie. Prvky hybridních systémů jsou velmi spolehlivé. Jedním z generátorů může být např. větrná elektrárna. Systémy spojené přímo se sítí nemusí obsahovat akumulátory. Jejich měniče musí pracovat v celém rozsahu napětí, poskytovaného polem propojených fotovoltaických panelů (Cenek, 2001).

### 2.5.5. Projektování fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaiku je možné instalovat na stávající stavby, či zahrnout do návrhu nových staveb. V případě novostaveb je důležitá spolupráce architekta stavby a projektanta FVE. Architekt má za úkol definovat polohu a orientaci budovy, orientaci a sklon střechy, dále navrhnout solární zařízení včetně materiálu a druhu modulů, určit statiku, napojení na střechu, umístění vedení, spotřebu proudu ve dne, investice a hospodárnost. Projektant FVE, případně instalatér, nese zodpovědnost za uspořádání modulů, zapojení, montáž, vedení, ochranu před blesky a přepětím, volbu materiálu, elektroměry a optimalizaci systému – transportu energie (Haselhuhn, 2011).

Prvek, který vyrábí elektrický proud, je označován jako generátor. Pro umístění tohoto prvku je zásadní orientace ke Slunci a míra zastíněnosti. U stávajících budov připadá v úvahu umístění na fasádu či střechu. Z důvodu rozdílného postavení

Slunce v průběhu dne i roku se mění i úhel, pod kterým sluneční záření dopadá. K vyhodnocení vhodnosti střešních ploch je nutné vycházet z hodnot ozáření v průběhu celého roku, které je znázorněno v tzv. slunečních diagramech.

Dalším předpokladem energetického výnosu je co nejmenší zastínění budovy. Čím blíže se stínící objekt nachází, tím jeho efekt roste. Mezi objekty můžeme řadit okolní budovy, vegetaci (stromy), VVN, komíny, antény či střešní nástavby (Haselhuhn, 2011). Přestože tyto objekty působí jako rušivé struktury, při odhadu solárního potenciálu je ale vliv těchto objektů zanedbatelný (Moudrý et al., 2019).

### 3. METODIKA

#### 3.1. Charakteristika studijního území

Při výběru lokalit bylo zapotřebí ověřit dostupnost a kvalitu dat. Potřebná LiDARová data nejsou vždy přístupná veřejnosti. Při výběru byl kladen důraz na rozdílnou zeměpisnou polohu (rozdílnou zeměpisnou šířku) a strukturu místního prostředí. Konkrétní oblasti byly vybrány náhodně tak, aby se nacházely v různých zeměpisných šířkách a měly tak rozdílné podmínky podnebí. Vybrané 4 lokality jsou situovány ve Švýcarsku, Lotyšsku, Spojeném království a Španělsku. Jednotlivé oblasti jsou znázorněny v mapě na obrázku č. 2, která zobrazuje jejich vzájemnou polohu. Popisné údaje jednotlivých oblastí jsou znázorněny v tabulce č. 1.



Obrázek 2 - Rozmístění zkoumaných lokalit

Zdroj: autor

lokality	Země	zeměpisná šířka	zeměpisná délka	nadmořská výška (m)	populace	budovy	střešní plocha (m <sup>2</sup> )
Hünikon	Švýcarsko	47,55° s.š.	8,67° v.d.	488	153	88	27626
Tingere	Lotyšsko	57,45° s.š.	22,53° v.d.	65	203	73	23791
Zarratón	Španělsko	42,52 s.š.	2,88° z.d.	562	256	108	61312
Alnmouth	UK	55,39° s.š.	1,61° z.d.	10,35	445	188	42201

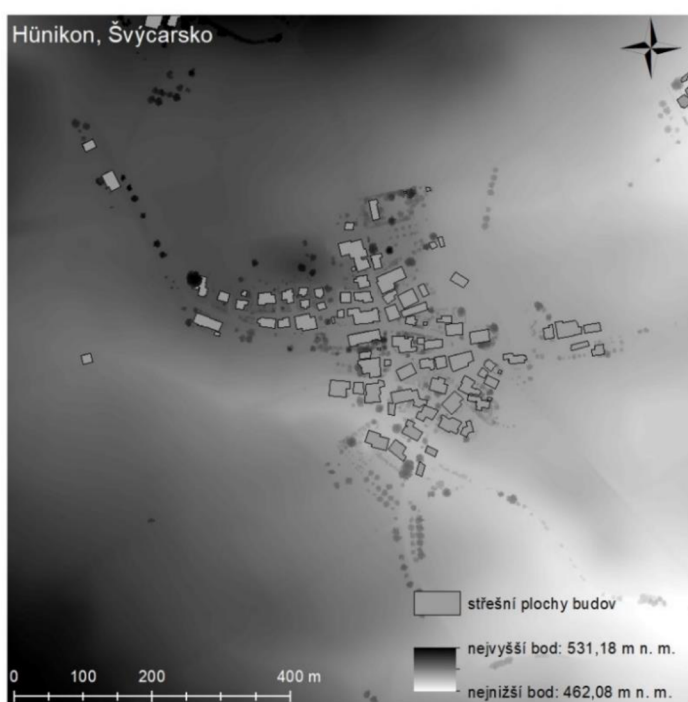
Tabulka 1 - Statistické údaje vybraných lokalit

Zdroj: autor

### 3.1.1. Popis vybraných lokalit

#### *Hünikon*

Prvním vybraným územím je osada Hünikon, která je součástí obce Neftenbach nacházející se v okrese Winterthur v kantonu Curych ve Švýcarsku, severovýchodně od města Bern. Tato lokalita byla zvolena z důvodu volné dostupnosti vysoce přesných dat s vysokou prostorovou hustotou. Osada spadá do údolní oblasti Töss, průměrná nadmořská výška dosahuje 488 m. Nachází se zde 88 střešních ploch o celkové výměře 27 626 m<sup>2</sup>. Žije zde 153 obyvatel. Na obrázcích č. 3 a č. 4 je znázorněno rozložení zástavby a vegetace.



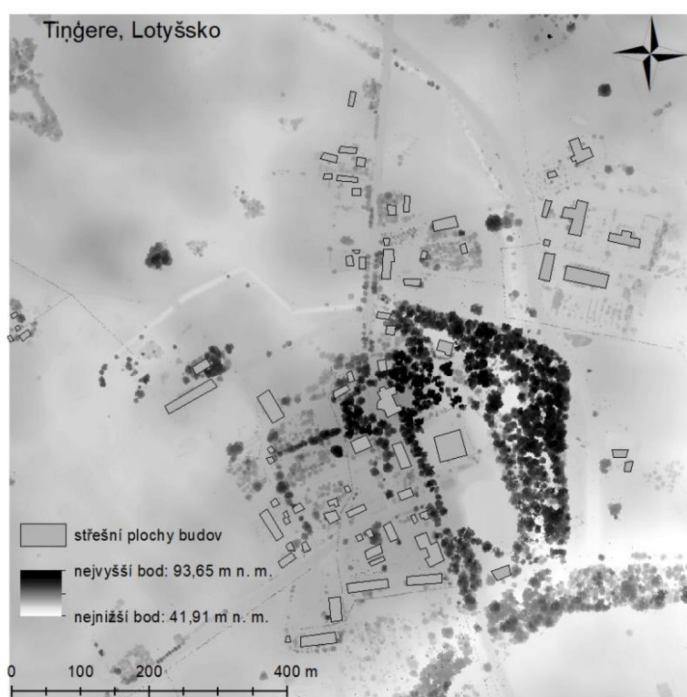
Obrázek 3 - Rozložení zástavby a vegetace, oblast Hünikon, Švýcarsko  
Zdroj: autor



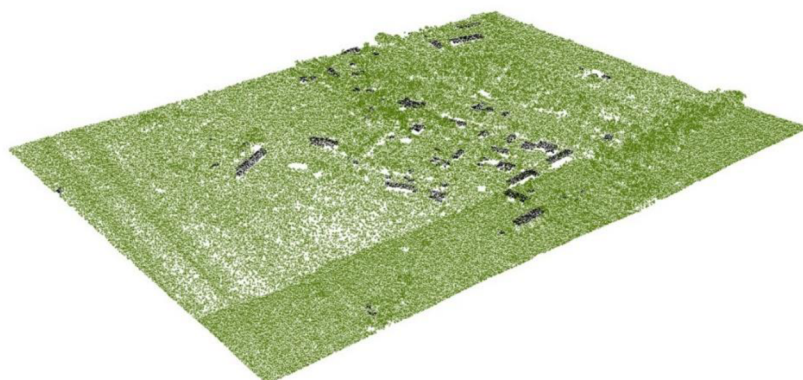
Obrázek 4 - Zobrazení zástavby a vegetace, LiDARová data, Hünikon, Švýcarsko  
Zdroj: autor

## Tingere

Druhou lokalitou je obec Tingere v bývalém okrese Talsi, nynějším regionu Courland, severozápadně od hlavního města Rigy. V této oblasti jsou, stejně jako v předchozím případě, volně dostupná kvalitní data s dostatečnou hustotou bodů. Obec je obklopena zemědělskými plochami a lesními porosty. Nachází se zde 73 budov se střešní plochou 23 791 m<sup>2</sup>, počet obyvatel je 203. Průměrná nadmořská výška činí 65 m. Obrázky č. 5 a č. 6 ukazují, že se jedná o nejméně zastavěnou oblast s hustým vegetačním pokryvem.



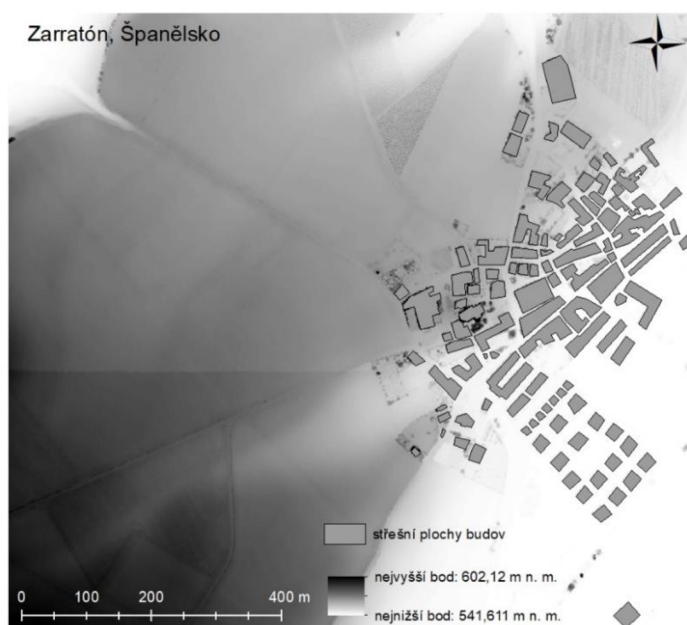
Obrázek 5 - Rozložení zástavby a vegetace, oblast Tingere, Lotyšsko  
Zdroj: autor



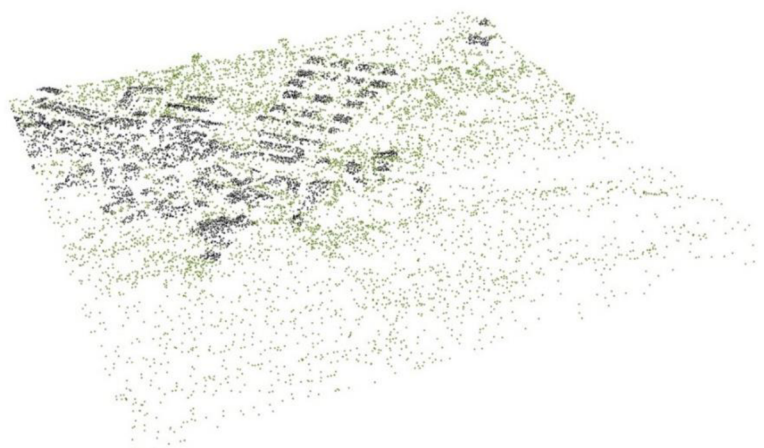
Obrázek 6 - Zobrazení zástavby a vegetace, LiDARová data, Tingere, Lotyšsko  
Zdroj: autor

## Zarratón

Jako třetí oblast byla zvolena vesnice Zarratón v provincii a autonomním společenství La Rioja ve Španělsku nacházející se v severní části vnitrozemí Pyrenejského poloostrova. Zkoumaná lokalita zahrnuje zastavěnou oblast, ornou půdu a ze všech vybraných lokalit nejmenší zastoupení vegetace, což je zřejmé z obrázku č. 7 a č. 8. Průměrná nadmořská výška je zde 562 m, počet budov 108 se střešní plochou 61 312 m<sup>2</sup>.



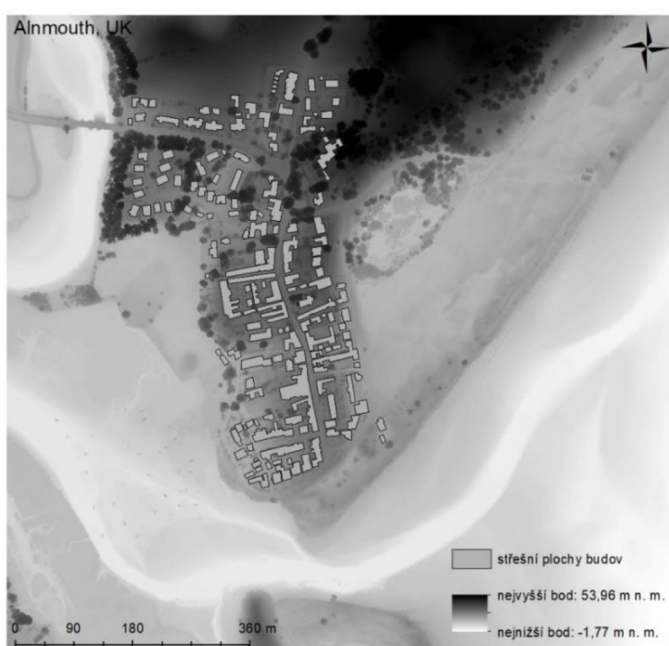
Obrázek 7 - Rozložení zástavby a vegetace, oblast Zarratón, Španělsko  
Zdroj: autor



Obrázek 8 - Zobrazení zástavby a vegetace, LiDARová data, Zarratón, Španělsko  
Zdroj: autor

## Alnmouth

Poslední studovanou lokalitou je pobřežní vesnice Alnmouth v Anglii, rozprostírající se u ústí řeky Aln s velkým množstvím listnatých lesů, zemědělských ploch a pastvin. Obec je položena zhruba 10 m n. m. a žije zde 445 obyvatel. V současné době je Alnmouth pobřežním letoviskem a turistickou atrakcí, z toho důvodu byly v průběhu let vystaveny pobřežní chatky a vily. Množství budov je zde nejvyšší ze všech zkoumaných lokalit, 188, s plochou 42 201 m<sup>2</sup>.



Obrázek 9 - Rozložení zástavby a vegetace, oblast Alnmouth, UK  
Zdroj: autor



Obrázek 10 - Zobrazení zástavby a vegetace, LiDARová data, Alnmouth, UK  
Zdroj: autor



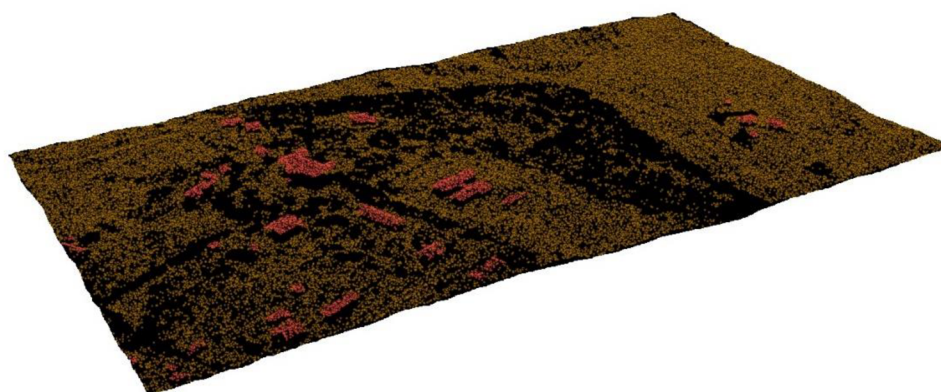
### 3.2. Vstupní data

Vstupními daty v případě všech čtyř zkoumaných lokalit bylo předzpracované mračno LiDARových bodů, získané leteckým laserovým skenováním, klasifikované, kdy každému bodu byla přiřazena třída, která definuje typ objektu. Různé třídy měly celočíselné kódy podle předdefinovaného klasifikačního systému.

Zpracování bodových mračen z leteckého laserového skenování proběhlo pomocí nástrojů programu LAStools, jednotlivé lokality byly oříznuty na přibližnou rozlohu 1km<sup>2</sup>, z vektorového formátu byly vytvořeny dva typy rastru digitálního modelu povrchu. V prvním případě byla při tvorbě rastru zahrnuta vegetace, v případě druhém byla vegetace odfiltrována. V dalším kroku byl nad těmito modely proveden výpočet potenciálního slunečního záření, a to ve dvou scénářích. První scénář se od druhého lišil absencí mraků na obloze. Následně proběhlo statistické vyhodnocení s využitím vytvořené polygonové vrstvy střešních ploch.



Obrázek 11 - Klasifikovaná LiDARová data (terén, vegetace, budovy)  
Zdroj: autor



Obrázek 12 - Klasifikovaná LiDARová data (terén, budovy) s odfiltrovanou vegetací  
Zdroj: autor

### 3.3. Zpracování dat

#### 3.3.1. LiDARová data

Prostřednictvím leteckého laserového skenování jsou získána data v podobě bodového mračka, kde jednotlivé body jsou nerovnoměrně rozmístěny a každý bod má dané rovinné souřadnice X, Y a nadmořskou výšku Z. Naměřená data jsou v jednotném souřadnicovém systému pro každou zemi.

Pro zpracování LiDARových dat byla v této práci užitá sada nástrojů LAStools, konkrétně *las2las* ke konverzi formátu LAZ do formátu LAS. Modelová data volně dostupná pro Švýcarsko a Lotyšsko byla získána ve formátu LAS a načtena do prostředí ArcMap, kde následně došlo k jejich dalšímu zpracování. Data pro Španělsko a Anglii byla ve formátu LAZ, komprimovaném datovém formátu, který je objemově mnohonásobně menší než formát LAS. Program ArcMap neumí s tímto typem souboru pracovat, proto pomocí nástroje *las2las* z programu LAStools byla data dekomprimována do formátu LAS.

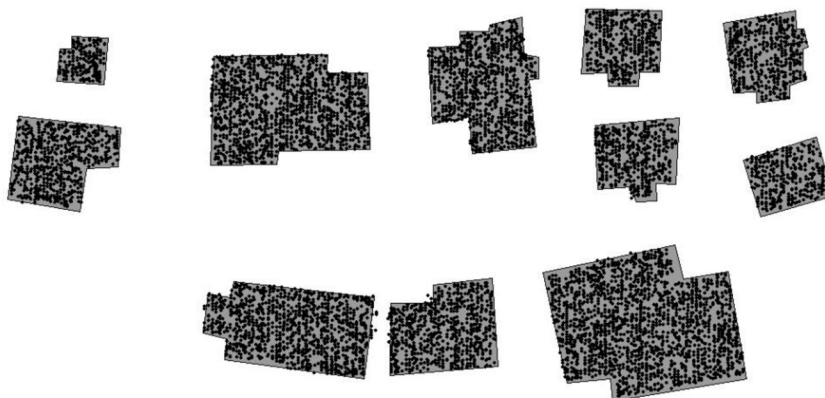
Další z nástrojů LAStools jako *lasclassify*, *lasground* nebo *lasheight*, obvykle sloužící ke klasifikaci bodových mraček do konkrétních tříd nebylo zapotřebí využít, jelikož získaná bodová mračka již byla klasifikována.

#### 3.3.2. Digitální model povrchu

Pro každou z lokalit byly z bodových mraček vytvořeny dva digitální modely povrchu, přičemž jeden vegetaci obsahoval a druhý ne. Modely byly vytvořeny prostřednictvím funkce LAS Dataset to Raster. Nastavení a parametry této funkce byly následující. Jako datový typ byl zvolen *Elevation*, jako typ interpolace byl zvolen *Binning* s výpočetní metodou maximální nalezené hodnoty buňky rastru. Jako metoda pro vyplnění hodnot prázdných buněk rastru byla použita interpolace *Natural Neighbor*. Velikost buňky rastru byla ve všech případech nastavena na 1 m. Čím nižší tato hodnota je, tím vyšší je rozlišení vzniklých rastrů, zároveň jsou ale následující analýzy časově náročnější.

### 3.3.3. Polygony střešních ploch

Polygonová vrstva střešních ploch byla tvořena z důvodu finálního výpočtu dopadeného slunečního záření a tím bylo umožněno stanovení solárního potenciálu střech v daných oblastech. Obrysy střešních ploch byly získány z LiDARových dat a editovány ručně v prostředí ArcMap.



Obrázek 13 - Polygonová vrstva střešních ploch  
Zdroj: autor

### 3.4. Výpočet solárního potenciálu

Výpočet potenciální solární radiace byl proveden nástrojem Area Solar Analyst z rozšíření ArcGIS Spatial Analyst. Pro konkrétní výpočty záření v jednotlivých měsících byly voleny stejné parametry v případě scénáře jasné oblohy, naopak ve scénáři, který zahrnuje oblačnost se tyto parametry nastavovaly pro každý měsíc zvlášť. Jako základní vstupní rastry se použily rastry vytvořené z LiDARových dat. Jako první byly použity rastry nezahrnující vegetaci, následně byly do modelu užity rastry vegetaci zahrnující. Ve výsledku byly od sebe hodnoty z těchto rastrů odečteny.

Mezi základní nastavované parametry se řadí zeměpisná šířka (*Latitude*), která je v případě malého území vkládána jedna společná (střed území) pro celou oblast. Není proto možné tento model využívat pro území velké rozlohy. Zeměpisné šířky byly vypočteny automaticky díky nastaveným prostorovým referencím ve vstupních rastroch.

Dalším parametrem je velikost oblohy neboli *Sky Size*. Tato hodnota definuje rozlišení rastru překrytím mapy viditelnosti, sluneční mapy a mapy oblohy. Čím větší je nastavená hodnota *Sky Size*, tím vyšší je rozlišení oblohy a tím i přesnost výpočtu.

Parametr byl nastaven na hodnotu 200, která je uváděna jako dostatečná pro denní interval 14 dní.

*Time configuration* (konfigurace času) udává délku období, pro které je výpočet prováděn. V našem případě byly tvořeny rastry solární radiace pro 12 měsíců v roce, konkrétně pro rok 2021. Typ byl nastaven *Multiple days in a year*, s denním interval 14 dní a hodinovým intervalem 0,5.

Zenitové a azimutové rozdělení náleží mezi radiační parametry. Bylo defaultně nastaveno na hodnotu 8 u obou a tato hodnota byla ponechána.

Jako další parametr byl nastavován typ difúzního modelu, který se lišil pro scénář 1 (Jasná obloha) a scénář 2 (Oblačnost).

Nedílnou součástí je zadání názvů výsledných rastrů globálního, přímého a difúzního záření.

#### 3.4.1. Scénář 1 – Jasná obloha

V případě tohoto scénáře byl zvolen uniformní model (*Uniform diffuse model*) a defaultně nastavené parametry byly ponechány pro všechny měsíce v roce. Poměr difúzního záření má typickou hodnotu pro jasnou oblohu 0,3. Propustnost, která vyjadřuje množství přímého záření, které projde atmosférou beze změny, má typickou hodnotu pro jasnou oblohu 0,5.

#### 3.4.2. Scénář 2 - Oblačnost

Model pro tento scénář byl zvolen *Standard overcast diffuse model*, parametry propustnosti i difúzní parametry byly získány ze studie vlivu vegetace na solární potenciál (Fogl, 2015). Hodnoty obsažené v tabulce č. 2 byly vypočteny jako průměr hodnot používaných ve zmíněné práci a pro všechny 4 lokality byly použité parametry stejné.

	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
Diffuse Proportion	0,7375	0,625	0,615	0,5375	0,525	0,58	0,5475	0,57	0,595	0,625	0,7275	0,7775
Transmittivity	0,37	0,4075	0,44	0,4675	0,48	0,4575	0,4675	0,4825	0,4375	0,3825	0,35	0,345

Tabulka 2 - Hodnoty radiačních parametrů vstupující do modelu  
Zdroj: autor

### 3.5. Statistické vyhodnocení

Hodnoty solární radiace byly z výsledných rastrů získány prostřednictvím nástroje *Zonal statistics as Table*. Při vyhodnocování byly použity průměrné měsíční hodnoty solární radiace dopadající na střešní plochy konkrétní studované lokality.

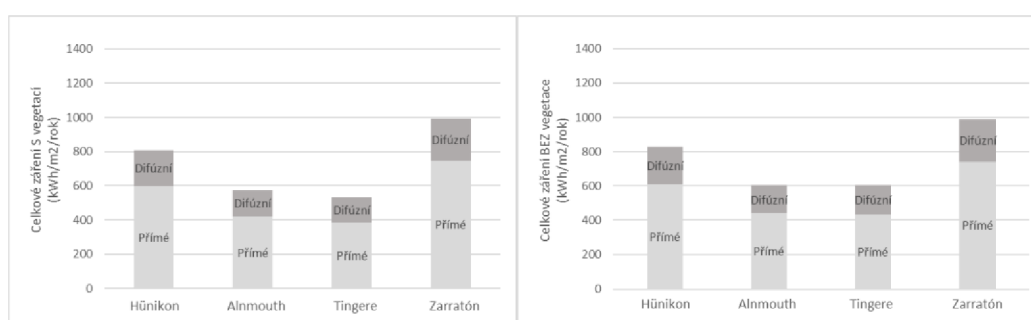
#### 4. VÝSLEDKY

Pomocí uvedené metodiky byly získány průměrné hodnoty potenciálního globálního, přímého a difúzního záření pro jednotlivé měsíce roku 2021. Výzkum byl proveden na čtyřech lokalitách, pro každou z nich ve dvou scénářích. V obou scénářích byly vypočítány hodnoty solární radiace pomocí rastrů s vegetací a bez vegetace a byly zjištěny roční ztráty záření zapříčiněné přítomností vegetace. Tímto způsobem byly získány následující výsledky.

Pro scénář 1, tedy s předpokladem jasné oblohy bez oblačnosti, byl zjištěn největší roční pokles globálního (celkového) záření zapříčiněný vegetací na lokalitě Tingere, a to o 11,94 %. Následuje Alnmouth 4,67 %, Hünikon 2,34 % a na posledním místě Zarratón ve Španělsku, kde z důvodu absence stínící vegetace nebyl pokles prokázán (-0,26 %). Pokles složek přímého a difúzního záření jsou znázorněny v tabulce č. 3. Hodnoty záření a jednotlivé složky znázorněny v grafech na obrázku č. 14.

	ztráta celkové záření (%)	ztráta přímé záření (%)	ztráta difúzní záření (%)
Hünikon	<b>2,34</b>	1,92	3,51
Alnmouth	<b>4,67</b>	3,97	6,53
Tingere	<b>11,94</b>	11,11	14,05
Zarratón	<b>-0,26</b>	-0,47	0,38

Tabulka 3 - Pokles globálního, přímého a difúzního záření na zkoumaných lokalitách – scénář 1  
Zdroj: autor

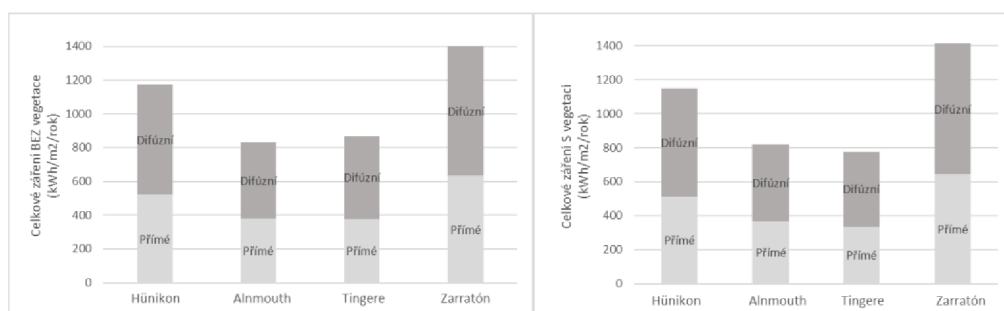


Obrázek 14 - Hodnoty globálního, přímého a difúzního záření s vegetací (vlevo) a bez vegetace (vpravo) – scénář 1  
Zdroj: autor

Ve scénáři 2, kdy do výpočtů oblačnost zahrnuta byla, jsou výsledky následující. Pořadí zůstalo, na prvním místě Tingere s největším ročním poklesem 10,86 %, dále Alnmouth (4,12 %), Hünikon (2,09 %) a Zarratón (-1,02 %). Pokles jednotlivých složek záření znázorněny v tabulce č. 4 a hodnoty potenciální solární radiace na obrázku č.

	ztráta celkové záření (%)	ztráta přímé záření (%)	ztráta difúzní záření (%)
Hünikon	<b>2,09</b>	1,65	2,43
Alnmouth	<b>4,12</b>	3,72	2,78
Tingere	<b>10,86</b>	10,56	11,09
Zarratón	<b>-1,02</b>	-1,82	-0,36

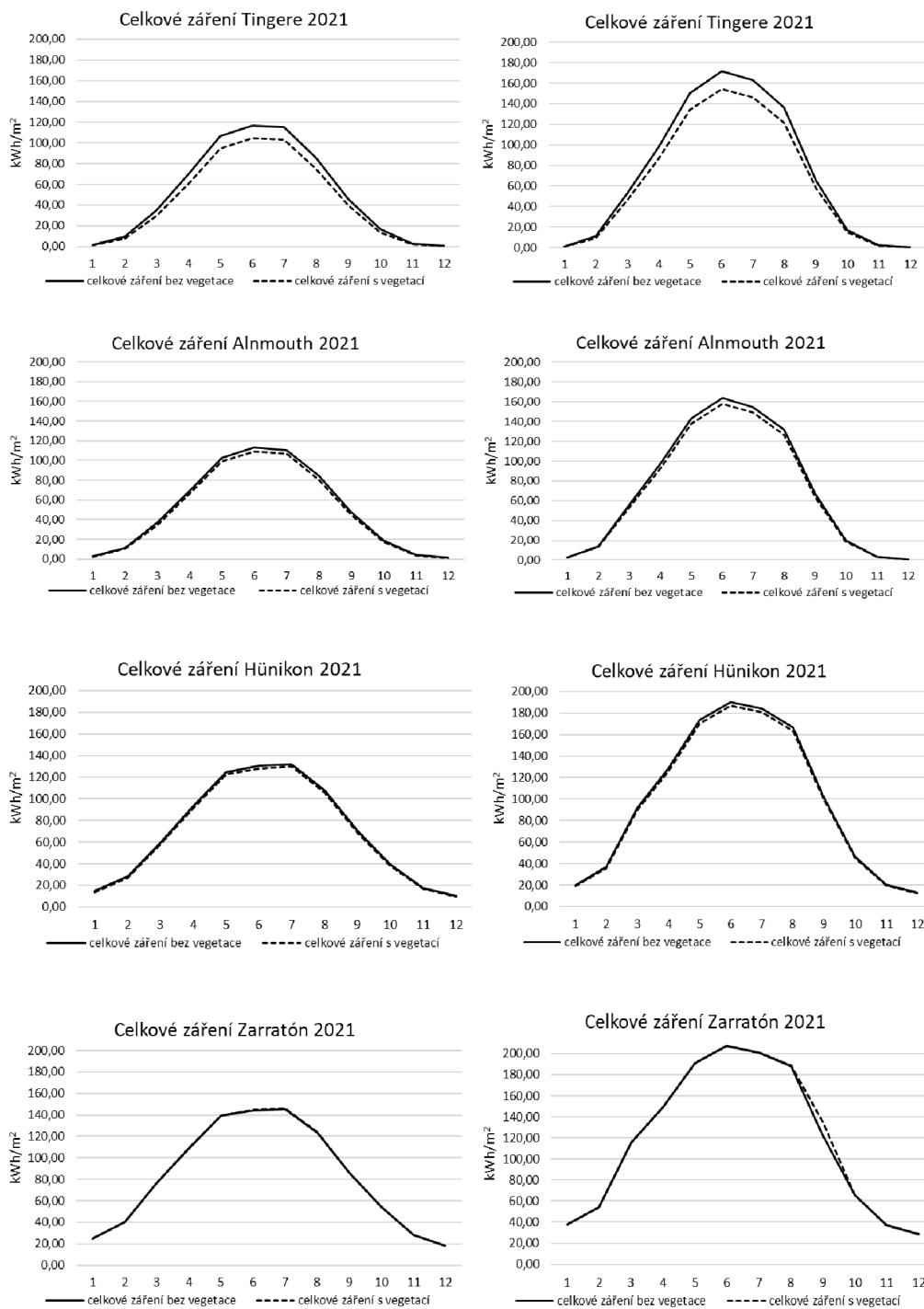
Tabulka 4 - Pokles globálního, přímého a difúzního záření na zkoumaných lokalitách – scénář 2  
Zdroj: autor



Obrázek 15 - Hodnoty globálního, přímého a difúzního záření s vegetací (vlevo) a bez vegetace (vpravo) – scénář 2  
Zdroj: autor

Při porovnání scénáře 1 a scénáře 2 vidíme, že největší rozdíl hodnot je v difúzní složce radiace, jejíž hodnoty se násobně zvýšily při zahrnutí oblačnosti.

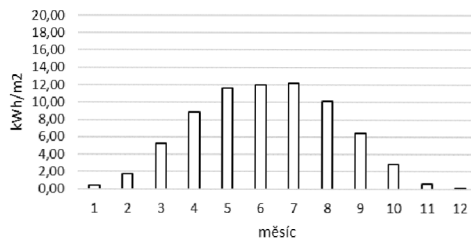
Z celkového vyhodnocení vychází, že k největším ročním ztrátám a tím k největšímu snížení solárního potenciálu dochází na lokalitě Tingere v Lotyšsku, kde je také největší zastoupení vegetace, což je graficky znázorněno na obrázku č. 6. Největší změny byly pozorovány v zimních měsících (prosinec, leden), kdy hodnoty dosahovaly ve scénáři 1 až ke 25 %, ve scénáři 2 ke 14 %. Naopak nejmenších rozdílů bylo dosahováno v letních měsících (červen, červenec, srpen), kde hodnoty dosáhly zhruba 2 % v případě scénáře 1 i scénáře 2, pokud do vyhodnocení nezahrneme lokalitu Zarratón ve Španělsku, kde ke snížení potenciálu v důsledku přítomnosti minimálního množství vegetace nedošlo.



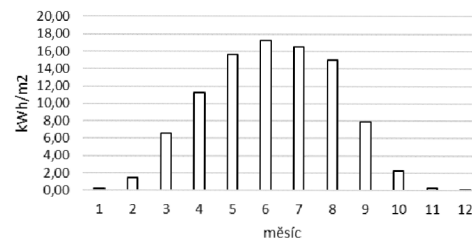
Obrázek 16 - Odhady měsíční solární radiace v roce 2021, scénář 1 (levý sloupec), scénář 2 (pravý sloupec)  
Zdroj: autor



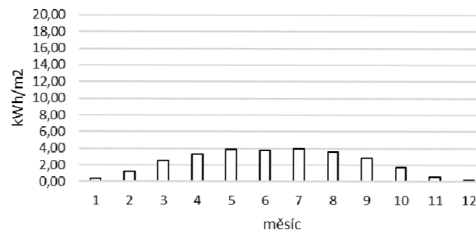
Roční ztráta CELKOVÉ záření Tingere 2021



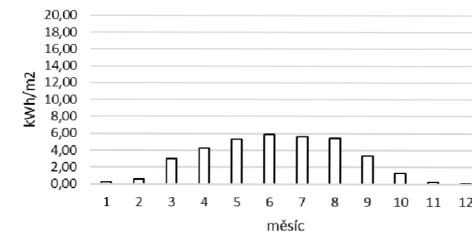
Roční ztráta CELKOVÉ záření Tingere 2021



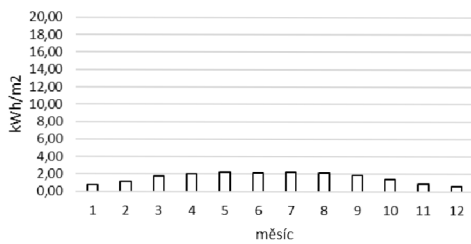
Roční ztráta CELKOVÉ záření Alnmouth 2021



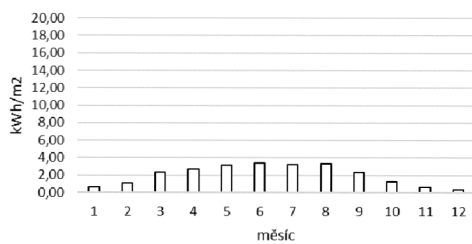
Roční ztráta CELKOVÉ záření Alnmouth 2021



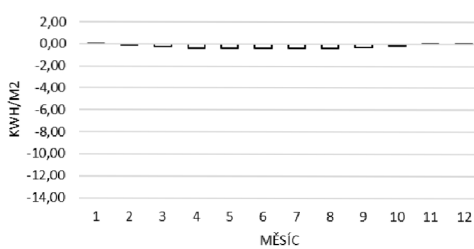
Roční ztráta CELKOVÉ záření Hünikon 2021



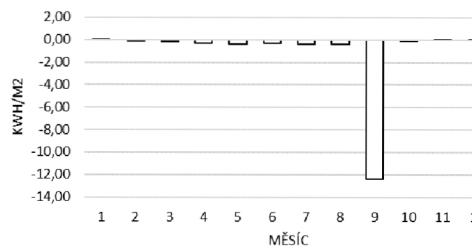
Roční ztráta CELKOVÉ záření Hünikon 2021



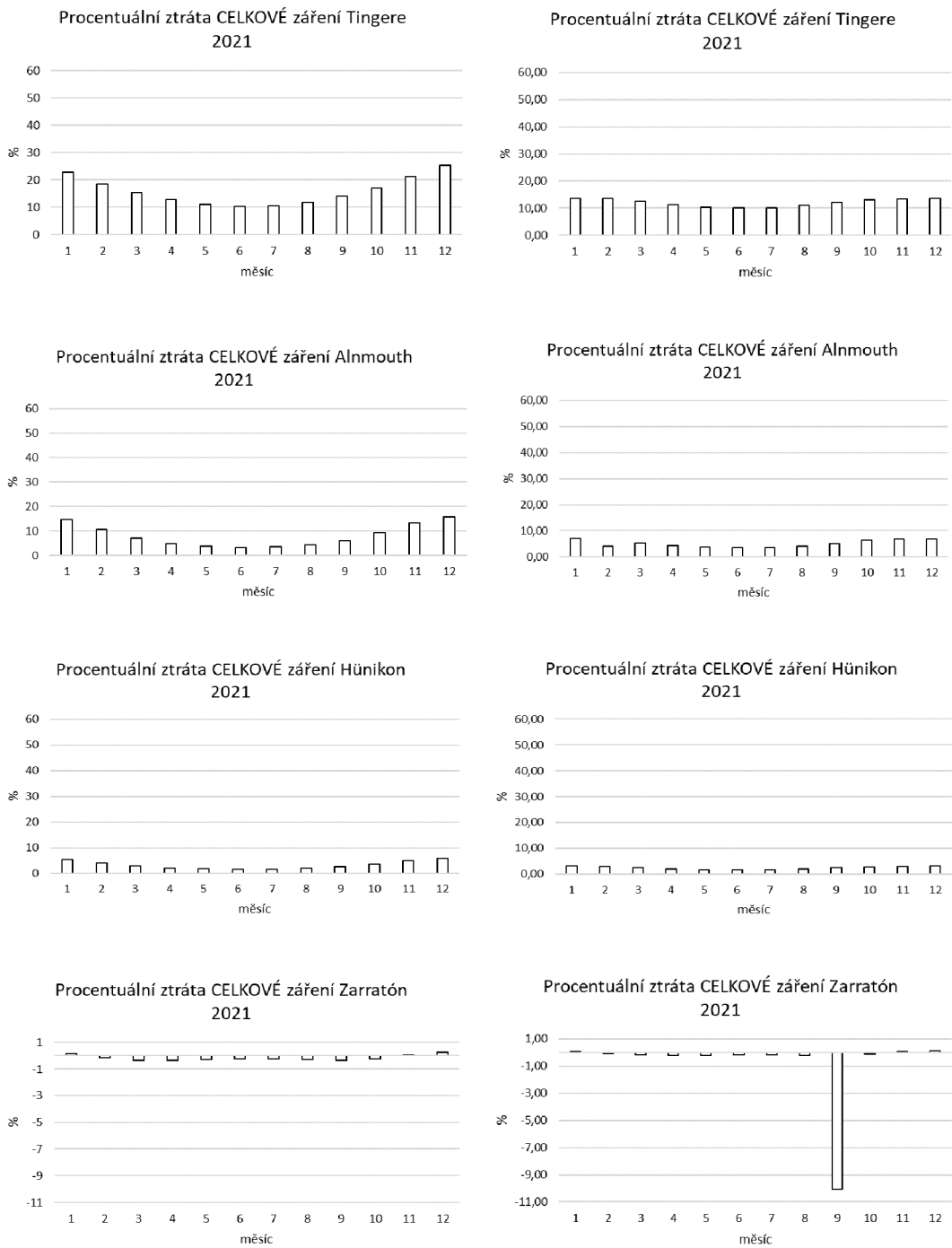
Roční ztráta CELKOVÉ záření Zarratón 2021



Roční ztráta CELKOVÉ záření Zarratón 2021



Obrázek 17 - ztráty solární radiace v jednotlivých měsících roku 2021, scénář 1 (levý sloupec), scénář 2 (pravý sloupec)  
Zdroj: autor



Obrázek 18 - Procentuální pokles solární radiace v jednotlivých měsících roku 2021, scénář 1 (levý sloupec), scénář 2 (pravý sloupec)  
Zdroj: autor

## 5. DISKUSE

Využití dat dálkového průzkumu Země jako alternativního zdroje geoprostorových informací pro mapování solární energie představuje rychlý a účinný přístup k podpoře a pomoci při navrhování politik v oblasti obnovitelných zdrojů energie. Využití LiDARových dat může hrát důležitou roli při analýze schopnosti budov přijímat energii ze solárních systémů (Santos et al., 2014). Vhodné umístění fotovoltaických zařízení v urbanizovaném prostředí vyžaduje přesné údaje o terénu, vegetaci a rozmístění a struktuře budov, aby bylo možné správně odhadnout prostorové rozložení fotovoltaického potenciálu (Redweik et al., 2013).

Výsledky této práce odpovídají již provedeným studiím a potvrzují, že stíny vrhané vegetací hrají důležitou roli při stanovování dopadajícího slunečního záření na střechy budov urbanizovaných oblastí. Tooke et al. (2011) odhadli, že okolní vegetace snižuje celkové dopadající záření až od 38 %, ovšem tohoto výsledku dosáhli při zkoumání pouze dnů zimního a letního slunovratu a jarní a podzimní rovnodennosti. Fogl (2015) zjistil roční ztrátu solární radiace 4-11 % vlivem vegetace. Podobných výsledků dosáhli také Fogl, Moudrý (2016), kteří provedli výzkum jednotlivých měsíců v průběhu roku a potvrdili snížení insolace o 3-11 %, kde k vyšším ztrátám docházelo v zimních a nižším v letních měsících. Autoři Levinson et al. (2019) porovnali vliv vegetace s 30letým odstupem a zjistili, že ztráta celkového záření se zvýšila ze 7-8 % na 11-14 %.

Zásadním nedostatkem těchto studií je nezohlednění propustnosti záření vegetací. Stromy jsou chápány jako objekty bez propustnosti, zmíněné práce neberou v potaz různou druhovou skladbu, což je hlavně v případě opadavých listnatých stromů v zimních měsících velký problém. LiDARová data nenesou informaci o druhovém složení vegetace a je proto vhodné jejich srovnání s leteckými snímky nebo satelitními daty (Tooke et al., 2011). Bode et al. (2014) se touto problematikou zabývali a LiDARová data používali k odhadu otevřenosti korun stromů a tvořili tzv. index proslunění porostu. V případě přímého záření se hodnoty blížily těm skutečně naměřeným na pyranometrech, u difúzního záření byly ale rozdíly značné kvůli horšímu přístupu do spodních vrstev koruny. Kvalitní modelování difúzního záření v nižších vrstvách korun stromů úzce souvisí s modelováním podmínek reálné oblohy. Ve dnech se zvýšenou oblačností se výrazně zvyšuje difúzní záření, i přes to, že celkové záření se může snížit.

Při výpočtu solárního potenciálu hraje důležitou roli mimo jiné kvalita, přesnost a dostupnost dat. Platí, že čím jsou data kvalitnější, s vysokou hustotou bodů

v případě LiDARových bodových mračen, nebo s vysokým rozlišením v případě digitálního modelu povrchu, tím přesnější je výsledný odhad solárního potenciálu. Analýzou s použitím dvou rastrů s různým rozlišením pomocí různých modelů se zabývali Ruiz-Arias et al. (2009) a potvrdili, že čím vyšší je rozlišení vrstvy digitálního modelu povrchu, tím vyšší je spolehlivost modelovaných odhadů. Toto tvrzení je pravdivé v jen případě jasné oblohy, v případě oblačnosti by chyby v difúzní složce mohly toto zlepšení zakrýt. Naopak Moudrý et al. (2019) ve své studii prokázali, že vliv modelu a rozlišení vstupního rastru je zanedbatelný ve srovnání s meziročními změnami meteorologických podmínek.

V této práci jsou vytvořeny dva scénáře a každý z nich má jiné atmosférické podmínky. V použitém modelu Solar Analyst byly nastaveny radiční parametry, přičemž jeden z nich, transmittivity, je velice citlivý na přítomnost oblačnosti a je velmi obtížné stanovit jeho hodnotu správně. Nejhorší jsou modelovány odhady pro podzimní a jarní měsíce, kdy kolísá propustnost atmosféry (Ruiz-Arias et al., 2009).

Při provádění urbanistických strategií v oblasti solární energie je nutné brát v potaz atmosférické podmínky. Stromy hrají zásadní roli při určování celkového záření dopadeného na střechy budov. Z výsledků této práce je patrné, že stromy snižují solární potenciál budov, konkrétně o 2–12 % v závislosti na zeměpisné šířce zkoumaného území. Je tedy důležité zohlednit jejich funkci snižování teploty (a tím snižování nároků na chlazení) v teplejších oblastech, naopak v chladnějších oblastech je zapotřebí zvětšovat nezastíněné plochy střech, a tak zvyšovat jejich solární potenciál a tím výrobu solární energie.

## 6. ZÁVĚR

V této práci byl zhodnocen vliv vegetace na solární potenciál střech v urbanizovaných prostředích z hlediska jejich zastínění a zároveň zkoumána vhodnost umístění fotovoltaických elektráren na tyto střechy. V rámci práce byly zkoumány čtyři lokality, v Lotyšsku, Švýcarsku, Spojeném království a Španělsku, vybrány náhodně tak, aby měly rozdílnou zeměpisnou šířku a rozdílný charakter zástavby i vegetace. Pro každou lokalitu byl nástrojem Solar Analyst odhadnut roční celkový solární potenciál střešních ploch pro rastry zahrnující vegetaci a pro rastry vegetaci nezahrnující. Následně byly hodnoty od sebe odečteny a vypočítány ztráty zapříčiněné stíněním vegetace. Rastry bez vegetace měly hodnoty dopadené solární radiace vyšší a byl tak prokázán významný vliv vegetace na solární potenciál střech. Odhad byl proveden ve dvou scénářích, za jasné oblohy a s oblačností. V případě scénáře zahrnující oblačnost byl výrazně vyšší podíl difúzní složky záření než v případě jasné oblohy. Výsledné roční ztráty se pohybovaly mezi 2-12 %. Z výsledků je patrné, že stromy hrají velice důležitou roli při určování solárního potenciálu střech a při umístování fotovoltaických systémů na střešní plochy budov.

## 7. PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

BERAN, Hynek, WAGNER Vladimír, PAČES Václav, ed. Česká energetika na křižovatce. V Praze: Management Press, 2018. ISBN 978-80-7261-560-5.

BODE, Collin A., LIMM Michael P., POWER Mary E. , FINLAY Jacques C.. Subcanopy Solar Radiation model: Predicting solar radiation across a heavily vegetated landscape using LiDAR and GIS solar radiation models. *Remote Sensing of Environment*. 2014, 154, 387-397. ISSN 00344257.

CENEK, Miroslav. Obnovitelné zdroje energie. 2. upr. a dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001. ISBN 80-901985-8-9.

DEFAIX, P.R., W.G.J.H.M. VAN SARK, E. WORRELL a E. DE VISSER. Technical potential for photovoltaics on buildings in the EU-27. *Solar Energy*. 2012, 86(9), 2644-2653. ISSN 0038092X.

FOGL, Michal. Solární potenciál střech v různých zeměpisných šířkách: Vliv vegetace. Praha, 2015. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta Životního prostředí. doc. Ing. Vítězslav MOUDRÝ, Ph.D.

FOGL, Michal, MOUDRÝ Vítězslav. Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. *Applied Geography* . 2016, 66, 73-80. ISSN 01436228.

FU, Pinde, RICH, Paul. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference. 1999

Fu, P., Rich, P.M., The solar analyst 1.0 user manual: Helios Environmental Modeling Institute, LLC, 2000, 53.

GALLAY, Michal, KAŇUK Ján, HOFIERKA Jaroslav. Capacity of photovoltaic power plants in the Czech Republic. *Journal of Maps*. 2015, 11(3), 480-486. ISSN 1744-5647.

HASELHUHN, Ralf. Fotovoltaika: budovy jako zdroj proudu. Ostrava: HEL, 2011. ISBN 978-80-86167-33-6.

HOFIERKA, Jaro, SURI, Marcel. The solar radiation model for Open source GIS: Implementation and applications. Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference. 2002

KANTERS, Jouri, HORVAT Miljana. Solar Energy as a Design Parameter in Urban Planning. *Energy Procedia*. 2012, 30, 1143-1152. ISSN 18766102.

KANTERS, Jouri, WALL Maria, KJELLSSON Elisabeth. The Solar Map as a Knowledge Base for Solar Energy Use. *Energy Procedia*. 2014, 48, 1597-1606. ISSN 18766102.

LIBRA, Martin, POULEK Vladislav. Fotovoltaika: teorie i praxe využití solární energie. Praha: Ilsa, 2009. ISBN 978-80-904311-0-2.

LIBRA, Martin, POULEK Vladislav. *Solární energie: fotovoltaika – perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. 2., dopl. vyd. V Praze: ČZU, 2006. ISBN 80-213-1488-5.

LEVINSON, Ronnen, AKBARI Hashem, POMERANTZ Melvin, GUPTA Smita. Solar access of residential rooftops in four California cities. *Solar Energy*. 2009, 83(12), 2120-2135. ISSN 0038092X

MATUŠKA, Tomáš. Solární zařízení v příkladech. Praha: Grada, 2013. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.

MOUDRÝ, Vítězslav, BEKOVÁ Anna, LAGNER Ondřej. Evaluation of a high resolution UAV imagery model for rooftop solar irradiation estimates. *Remote Sensing Letters*. 2019, 10(11), 1077-1085. ISSN 2150-704X.

MURTINGER, Karel, BERANOVSKÝ Jiří, TOMEŠ Milan. *Fotovoltaika: elektřina ze slunce*. 2. vyd. Praha: EkoWATT, 2008. 21. století. ISBN 978-80-7366-133-5.

PANAGIOTIDOU, Maria, BRITO Miguel C., HAMZA Kais, JASIENIAK Jacek J., ZHOU Jin. Prospects of photovoltaic rooftops, walls and windows at a city to building scale. *Solar Energy*. 2021, 230, 675-687. ISSN 0038092X.

REDWEIK, P., CATITA C. BRITO M.. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*. 2013, 97, 332-341. ISSN 0038092X.

RUIZ-ARIAS, J. A., TOVAR-PESCADOR J., POZO-VÁZQUEZ D., ALSAMAMRA H. A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*. 2009, 23(8), 1049-1076. ISSN 1365-8816.

SÁNCHEZ, Esteban, ORDÓÑEZ, Ángel, SÁNCHEZ, Alberto, GARCÍA OVEJERO Raúl, PARRA-DOMÍNGUEZ Javier. Exploring the Benefits of Photovoltaic Non-Optimal Orientations in Buildings. *Applied Sciences*. 2021, 11(21). ISSN 2076-3417.

SANTOS, T., GOMES N., FREIRE S., BRITO M.C., SANTOS L. , TENEDÓRIO J.A.. Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography*. 2014, 51, 48-57. ISSN 01436228.

SARRALDE, Juan José, QUINN David James, WIESMANN Daniel, STEEMERS Koen. Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. *Renewable Energy* . 2015, 73, 10-17. ISSN 09601481.

SRDEČNÝ, Karel. *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2009. ISBN 978-80-7212-518-0.

ŠULC, Jaroslav. *Obnovitelné zdroje energie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, KEZ, 2015. ISBN 978-80-7494-235-8.

TOOKE, Thoreau Rory, COOPS Nicholas C., VOOGT James A., MEITNER Michael J.. Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. *Landscape and Urban Planning* . 2011, 102(2), 73-81. ISSN 01692046.

WEHR, Aloysius, LOHR Uwe. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 1999, 54(2-3), 68-82. ISSN 09242716.