

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování



Bakalářská práce

Vliv modelu zastínění na odhad solárního záření pro střešní
systémy

Autor práce: Šimon Rechner

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

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Šimon Rechner

Územní technická a správní služba

Název práce

Vliv modelu zastínění na odhad solárního záření pro střešní systémy

Název anglicky

Influence of shadowing on solar radiation estimates for rooftop solar systems

Cíle práce

- Výpočet solárního potenciálu modelových střech
- Zhodnocení vlivu parametru pro výpočet zastínění (tzv. počet směrů) na odhad solárního potenciálu

Metodika

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

Doporučený rozsah práce

30 – 40 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.
- 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.
- Fu, P. and Rich, P., M. 1999. 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, San Diego, USA*, <http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>
- 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.
-

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 17. 4. 2017

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 18. 4. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 18. 04. 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Vliv modelu zastínění na odhad solárního záření pro střešní systémy“ vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Vítězslava Moudrého, Ph.D., a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 21. 4. 2017

.....

Poděkování

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D., za jeho podporu, rady a čas, který mi věnoval při psaní této práce. V neposlední řadě také děkuji mé rodině, za podporu a motivaci.

Abstrakt

Střešní fotovoltaické systémy jsou ideálním zdrojem „čisté“ energie z obnovitelných zdrojů, především v urbanizovaném prostředí. Solární elektrárny zde nezabírají úrodnou půdu, ale dávají smysl nevyužitým střešním systémům. Vyrobená elektřina také neputuje daleko ke spotřebišti, tudíž nepodléhá výrazným ztrátám. Ne všechny střechy jsou ale pro solární využití vhodné, jejich solární potenciál je třeba znát. Proto jsou vytvářeny mapy solárního potenciálu, které umožňují najít místa s nejlepšími podmínkami k instalaci solárních systémů. Řada faktorů ovlivňuje přesnost odhadů. Mezi ně patří i parametr Calculation directions, který definuje zkoumaný počet směrů zastínění. Cílem práce je analýza solárního potenciálu vybraných střech v Peci pod Sněžkou z dostupných dat leteckého laserového skenování (LiDAR), s následným zhodnocením vlivu parametru Calculation directions a velikosti bufferu (uvažovaného okolí střechy) na přesnost odhadu solárního potenciálu. Výsledky ukazují, že ideální poměr mezi časovou náročností a přesností odhadu pro zkoumané střechy přináší výpočet s 32 zkoumanými směry zastínění. Vliv parametru na výsledky výpočtů se však neukázal být příliš výrazný. Rozdíl, mezi nejpřesnějším a nejméně přesným použitým modelem se u průměrného záření na 1 m² pohyboval mezi 0,9 % - 4,4 %. Zato vliv velikosti bufferu se ukázal jako výrazný. Rozdíly výsledků počítaných s bufferem (100 m) a bez něho byly u průměrného záření na 1 m² 39,0 % resp. 21,4 %.

Klíčová slova: solární potenciál, Calculation directions, zastínění, DEM, LiDAR

Abstract

Rooftop photovoltaic systems are ideal sources of "clean" energy from renewable sources, especially in urban areas. Solar power systems do not occupy fertile soil, and give purpose to unused roof space. Moreover, the produced energy does not travel too far to the point of consumption, and hence it is not subjected to serious losses. However, not all roofs are suitable for use of photovoltaic; it is necessary to know their solar potential. This is why maps of solar potential are created to find places with the best conditions for photovoltaic system installation. The estimation precision is affected by several factors, among them a parameter called Calculation Directions, which defines the investigated number of shadowing directions. The goal of the presented thesis is to analyze the solar potential of selected roofs in Pec pod Snezkou from available LiDAR data and to evaluate the influence of the value of Calculated Directions and buffer size (surrounding area of the roof) on the accuracy of solar potential estimations. The results show that the ideal trade-off between the time complexity and estimation accuracy for considered roofs is obtained for computations with 32 shadowing directions. However, the effect of the parameter on the results of the calculations did not appear to be too pronounced. Difference between the most accurate and the least accurate type of used model ranged between 0.9 % - 4.4 % for the mean radiation per square meter. But the size of the buffer has proven to be significant. The differences in results calculated with buffer (100 m) and without it were 39.0 % respectively 21.4 % for mean radiation per square meter.

Keywords: solar potential, Calculation directions, shading, DEM, LiDAR

Obsah

1	Úvod	10
1.1	Cíle práce	11
2	Literární rešerše	12
2.1	Solární záření	12
2.1.1	Fotovoltaické systémy	13
2.2	Potřeba určení solárního potenciálu	13
2.3	Prostorová data	15
2.3.1	Rastr a vektor	15
2.3.2	Rozlišení	15
2.3.3	LiDAR	16
2.3.4	DEM.....	18
2.4	Nástroj Solar analyst.....	20
2.4.1	Výpočet mapy viditelnosti	20
2.4.2	Výpočet mapy sluneční oblohy.....	22
2.4.3	Výpočet mapy oblohy	22
2.4.4	Výpočet solární mapy	23
2.5	Solární potenciál měst – mapování solárního potenciálu	24
2.6	Vliv vstupních dat.....	27
2.6.1	Rozlišení velikosti oblohy	27
2.6.2	DEM	28

2.7 Přesnost dat DEM	29
3 Metodika	31
3.1 Charakteristika území	31
3.2 Vstupní data	32
3.3 Metodika	33
4 Výsledky	34
4.1 Klasifikace DEM	34
4.2 Area solar radiation	35
4.2.1 Vliv parametru Calculation directions bez vnějšího zastínění.....	35
4.2.2 Vliv Calculation directions s vnějším zastíněním.....	37
4.2.3 Vliv velikosti bufferu	39
4.2.4 Měsíční průběh	40
4.3 Čas výpočtu	41
5 Diskuze	42
6 Závěr	45
7 Použitá literatura	46
8 Přílohy.....	50

1 Úvod

Během několika posledních let jsme svědky neustálého zvyšování spotřeby energie, které výrazně ovlivňuje životní prostředí naší planety. Vzhledem k rychlému technologickému pokroku, zvyšování lidské populace a globálním změnám klimatu v důsledku antropogenních emisí jsou udržitelné zdroje energie jednou z nejdůležitějších otázek 21. století. Vzhledem k tomu, že technologie fotovoltaických systémů v průběhu let velmi pokročila, stává se solární energie zcela životaschopnou alternativou „čisté“ a teoreticky nevyčerpatelné energie (Lukač et al. 2016). V budoucnu se očekává stálý vývoj solárních systémů, které se neustále stávají levnějšími, přístupnějšími i výkonnějšími.

Určení solárního potenciálu není vhodné pouze pro velké plochy určené pro velkoplošné solární elektrárny. V dnešní době roste potřeba znát tento potenciál také v městských oblastech. Zde mohou solární systémy pomoci snížit náklady na elektrickou energii, ale především také odlehčit od vypouštění skleníkových plynů. Efektivní využívání solární energie v městském prostředí však vyžaduje znalosti geografického rozložení budov a charakteristiky nejlepších míst k realizaci solárních systémů (ne všechny plochy jsou vhodné k umístění solárních panelů). Díky údajům z leteckého skenování lze modelovat městský povrch a v každém místě určit solární potenciál (Feritas et al. 2015).

Místní vlády jsou zodpovědné za zvyšování míry uplatnění obnovitelných zdrojů. Plánování energetických investic do solárních systémů vyžaduje informace o poptávce po elektřině, ale také důvěryhodné informace o místních schopnostech generace elektřiny solárními systémy. Vzniká rostoucí počet map solárního potenciálu s cílem informovat vlády i obyvatele a šířit povědomí o dnešních možnostech využití solární energie (Santos et al. 2014). Na přesnost odhadů má však vliv hned několik faktorů. Mezi ně patří jak rozlišení výsledných map, tak také přesnost vyhodnocení zastínění zkoumaného bodu. Ta je ovlivněna počtem směrů, ze kterého je zastínění počítáno. Velký vliv však může mít také velikost bufferu, tedy rozloha území kolem zkoumané plochy, která vstupuje do výpočtů (Kodysh et al. 2013).

V rámci této práce je řešena problematika modelování dopadajícího slunečního záření a zhodnocení míry ovlivnění výsledných dat modelem zastínění. Analýza bude provedena výpočtem solárního potenciálu pro vybrané střešní systémy s různou volbou parametru pro výpočet zastínění Calculation directions (tzv. počet směrů) a následným porovnáním získaných výsledků.

1.1 Cíle práce

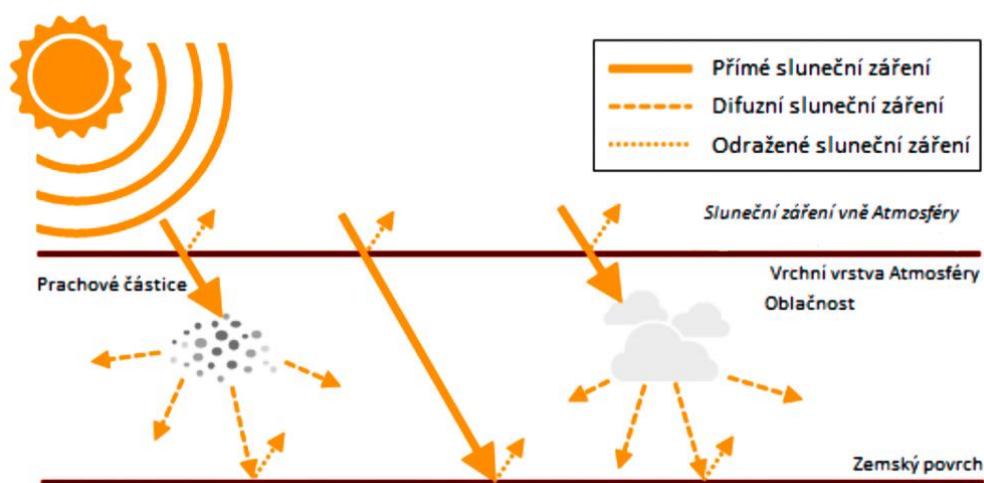
- 1) Zpracování literární rešerše z oblasti modelování solárního potenciálu
- 2) Výpočet solárního potenciálu vybraných modelových střech
- 3) Zhodnocení vlivu parametru pro výpočet zastínění Calculation directions a velikosti bufferu (zastínění okolní vegetací) na odhad solárního potenciálu

2 Literární rešerše

2.1 Solární záření

Příchozí sluneční záření, dopadající na povrch naší planety, je výsledkem interakcí energie atmosféry s povrchem a je hlavní hnací silou fyzikálních, biologických i průmyslových systémů na Zemi. Po dopadu na povrch se přeměňuje na tepelnou energii, kinetickou energii, nebo se zpracovává při fotosyntéze. Kontinuálně na Zemi od Slunce přichází zhruba 170 miliard megawattů. Znalost množství dopadajícího slunečního záření v různých geografických oblastech je vhodné využít v tak odlišných oborech jako jsou solární využití energie, stavebnictví (orientace a design budov), zemědělství, lesnictví, meteorologii a ekologii (Fu et Rich 1999).

Obrázek 1: Znázornění složek solárního záření



Zdroj: Bambulová 2013, upraveno

Celkové dopadající sluneční záření (Obr. 1) se skládá z přímého, odraženého a rozptýleného záření (Dubayah et Rich 1996). Přímé sluneční záření je tvořeno rovnoběžnými paprsky letícími od slunečního povrchu a dopadajícími přímo na zemský povrch. Jeho množství je globálně závislé na vzdálenosti Země od Slunce (mění se kvůli excentrické dráze obíhající Země). Odražené záření je malou částí záření, které se odrazí od zemského povrchu na jiné šikmé místo, kde je pohlceno. Přispívá však jen několika procenty z celkového množství a pouze u šikmých ploch, proto bývá někdy ignorováno. Paprsky, které jsou rozptýleny atmosférou, ale dosáhnou zemského povrchu, se nazývají difuzní záření. Díky těmto odrazům se zemská obloha jeví jako modrá. Difuzní záření je však závislé na klimatických

a terénních podmínkách, kvůli čemuž je v Evropě často největším zdrojem chyb odhadu (Hofierka et Šúri 2002).

2.1.1 Fotovoltaické systémy

Fotovoltaické systémy jsou spolu s termálními solárními systémy nejčastějším způsobem aktivního využití solární energie a slouží k výrobě elektřiny. Systém může být zapojen do rozvodné elektrické sítě („grid-connected system“). V tom případě se elektřina, která není spotřebována v místě výroby energie, odvádí do veřejné sítě. Tento způsob je obvyklý u velkých solárních elektráren, nebo u střešních systémů v městských oblastech. V odlehlejších místech, kam nesahá veřejná elektrická síť, se používá ostrovní systém („off grid system“), který přebytečnou energii ukládá pro pozdější využití do akumulátorů (Zhang et al. 2017).

2.1.2 Fotovoltaický článek

Fotovoltaické články generují elektřinu z přímého dopadajícího slunečního záření do fotovoltaického systému. Solární panel obsahuje řadu takových článků, ať už zapojených sériově, nebo paralelně. Jednotlivé články absorbují dopadající fotony a vytváří volné elektrony prostřednictvím fotovoltaického jevu. Fotony s dostatečnou energií mohou uvolnit elektron v polovodičovém materiálu. Na místě uvolněného elektronu vzniká kladný náboj. V buňce je vestavěná bariéra (dioda), která pomáhá produkovat napětí usměrněním směru toku elektronů do elektrického obvodu. Množství vyprodukované energie závisí na délce a intenzitě dopadajícího slunečního záření, na typu a kvalitě fotovoltaických článků a kvalitě použitých materiálů článků i celého solárního modulu. Podle výrobního postupu se vyrábí dva hlavní typy křemíkových solárních článků: tlusto-vrstvé a tenko-vrstvé (Rahim et al. 2015).

2.2 Potřeba určení solárního potenciálu

Nahrazování vyčerpatelných zdrojů energie, jako jsou fosilní paliva, nevyčerpatelnými zdroji, je v posledních letech velmi diskutované téma. Jednou z hlavních možností náhrady je právě využití solárního záření, což je silný a prakticky nevyčerpatelný zdroj energie. To je důvodem velkého rozvoje fotovoltaiky v posledních letech. Mnoho zemí v Evropě zažívá prudký vývoj výroby elektřiny ze

slunečního záření. Ten je spojen s vládní podporou zelené energie a se snižováním nákladů na fotovoltaické elektrárny. Už v letech 2001 – 2005 byla pomocí modelu slunečního záření a klimatických údajů, začleněných do fotovoltaického geografického informačního systému (PVGIS), vyvinuta evropská databáze slunečního záření s rozlišením 1 km x 1 km (Šúri et al. 2007). Mezi lety 2009 – 2011 přibylo České republice více než 20 000 nových solárních elektráren s celkovou nominální kapacitou 2 100 MWp (Gallay et al. 2015). Znalost množství dopadajícího slunečního záření je však potřebná nejen pro uvážené umístování solárních elektráren, ale také v mnoha odlišných oblastech, jako je ekologie, lesnictví, meteorologie atp.

K měření solárního potenciálu lze použít řadu prostředků. V Evropě se například nachází stovky meteorologických stanic měřících sluneční záření, ať už přímo, nebo nepřímo. Pro získávání dat o dopadajícím záření na konkrétní místa zemského povrchu se používá řada interpolačních metod, které se liší např. podle terénních podmínek. Další možností je určení pomocí meteorologických geostacionárních družic. Jejich výhodou je pokrytí velmi rozsáhlého území s časovým rozlišením 0,5 – 12 hodin. Nevýhodou je ale nižší přesnost naměřených hodnot v porovnání s pozemním měřením (Hofierka et Šúri 2002). Jako nejpřesnější metoda pro odhad solárního potenciálu se jeví využití geografických dat. Za tím účelem vzniklo několik rozšíření standardních geografických informačních systémů (GIS), využívajících geografická data k vytváření trojrozměrných modelů a následně modelování množství dopadajícího slunečního záření. Příkladem jsou například PVForm, CUNY, nebo rozšíření programu ArcGIS: Solar Analyst (Feritas et al. 2015). Nástroje se od sebe liší v použití a v metodách, kterými počítají solární potenciál. Z toho důvodu se mohou také jejich výsledky mírně lišit. Odlišnostmi v algoritmu výpočtu a ve výsledných hodnotách rozdílných nástrojů se zabývají např. (Ruiz-Arias et al. 2009). Základním stavebním kamenem pro výpočty ve jmenovaných rozšíření GIS je digitální model povrchu (DMP).

2.3 Prostorová data

2.3.1 Rastr a vektor

Veškerá reprezentace skutečnosti pomocí počítačové grafiky a digitální zpracování grafických informací obecně jsou vždy do určité míry omezeny použitým rozlišením. Dnešní počítače umí ukládat (geo)grafické informace pomocí dvou hlavních způsobů, a to rastru a vektoru. Rastrové zpracování se skládá z jednotlivých buněk. Každá buňka může uchovávat různé informace, jako jsou poloha buňky (souřadnice), velikost, nebo barva. Rozlišení je tedy úměrné velikosti buněk a jeho nevýhodou je velká datová náročnost při požadovaném vysokém rozlišení. Výsledné odhady nelze definovat nezávisle na měřítku. Vektorové zpracování je pro lidské chápání o něco náročnější. Informace jsou zde uchovávány pomocí matematicky definovatelných křivek (vektorů). Matematický zápis je poté uchováván s potřebnými atributy, jako jsou tvar, barva, nebo tloušťka. Výhodou vektoru je, že ani při větším přiblížení nedochází k „rozmazání“ objektu, čímž je méně náročný na velikost potřebných dat. Bohužel ale nelze říci, že vektorová data mají nekonečně jemné rozlišení a je velmi obtížné odvodit rozlišení z vektorových dat. Rastrová data jsou tedy pro vědecký výzkum prokazatelně výhodnější než data vektorová, protože jejich prostorové rozlišení je explicitní (Goodchild 2011).

2.3.2 Rozlišení

Zemský povrch je velmi členitý. Každé jeho místo by mohlo být detailně zkoumáno až na úroveň molekul. Bohužel ale naše schopnosti zachycení, uchování ani zpracování dat nejsou neomezené. Z toho důvodu je nutné omezit detaily každého zkoumaného prostorového jevu na ty nejdůležitější rysy a zanedbat detaily, které je možné opomenout. Přesnost výzkumu je tedy více či méně závislá na použitém rozlišení. Například pokud se zajímáme o krajinný pokryv (land cover), bude dostačující i hrubé rozlišení. Pro detailní zkoumání lze použít podrobnější rozlišení, díky kterému rozeznáme nejen jednotlivé pozemky, ale i jednotlivé střešní tašky (Goodchild 2010).

Přes to, že je povrch Země spojitý, při práci v GIS je nevyhnutelně reprezentován v určitém měřítku daného rastru použitých prostorových dat. Jakékoliv zavedení

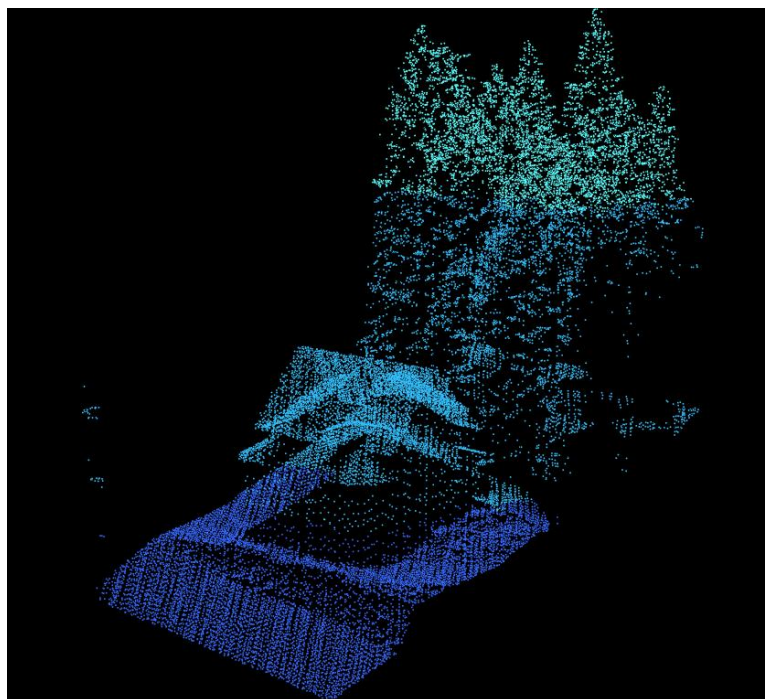
rozlišení však s sebou nevyhnutelně přináší informační ztráty. Ty však nelze snadno kvantifikovat. Při použití příliš nízkého měřítka je vysoká pravděpodobnost výpočetních chyb, při čemž nelze s jistotou určit, zda tyto chyby vznikly právě nízkým rozlišením, chybou ve výpočtu, nebo v důsledku nedokonalostí nástroje. Není tedy vhodné použít rozlišení s menším detailem, než jaký výrazně ovlivňuje zkoumaný proces. V takovém případě budou výsledky zkoumání zavádějící.

Reálně je použité rozlišení vždy kompromisem, mezi přínosem detailů a pořizovací cenou. Ta při získávání podrobnějších dat stoupá – jejich získání trvá delší dobu a je také náročnější na použitý hardware. V praxi je použité rozlišení základním parametrem každého souboru dat a je nutné se vždy zamyslet, jaké výhody podrobnější data přinesou, jak velká bude investice a zda přinese adekvátní přínos.

2.3.3. LiDAR

Pro výpočet solárního potenciálu jsou důležitá přesná geografická data s vysokým rozlišením. V současné době lze tyto údaje poměrně snadno získat díky leteckému laserovému skenování (LiDAR).

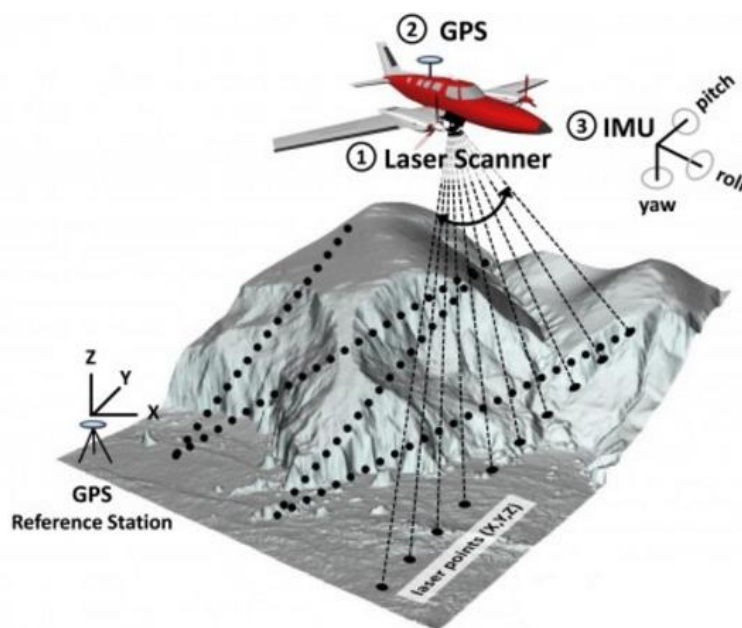
Obrázek 2: Lidarové mračno bodů



Zdroj: autor

LiDAR je aktivní technologie dálkového průzkumu pro snímání trojrozměrného povrchu, která vypočítává polohu jednotlivých bodů na základě vzdálenosti, kterou urazí vyslaný laserový impulz od emitoru umístěném na letadle k povrchu (Lukač et al. 2016). Letecký LiDAR (Obr. 3) je komplexní multi-senzorový systém, jehož základní zařízení jsou polohovatelná jednotka GNSS, inerciální navigační systém (INS) a laserové skenovací zařízení (May et Toth 2007). Moderní systémy mohou být ještě doplněny o fotogrammetrickou komoru, videosystém, nebo hyperspektrální senzory (Baltsavias 1999). Emitor umístěný na letounu, resp. helikoptéře či bezpilotním letadle (UAV), vysílá řadu laserových paprsků. Jejich následné odrazy od zemského povrchu jsou přijímány detektorem. Z času, za který paprsek urazí cestu od emitoru k detektoru, je možné určit výšku (vzdálenost) letadla nad měřeným objektem, a díky znalosti směru vyslaných paprsků a zjištěné vzdálenosti lze určit polohu pro každý měřený bod. Díky přijímači signálu GPS je lokalizována přesná poloha letadla a inerciální měřicí jednotka sleduje pohyb letadla během letu a zaznamenává například údaje o stoupání a otáčení. Díky tomu je určena přesná poloha snímače v daném okamžiku. Obvykle se využívá světelného spektra mezi 1 064 – 1 540 nm a pro měření hloubky moře (batymetrická měření) zhruba 530 nm (Hippenstiel et Brownson 2012). Časový rozdíl impulzu typicky dosahuje hodnot mezi 5 – 10 ns (Wagner et al. 2004).

Obrázek 3: Letecké skenování



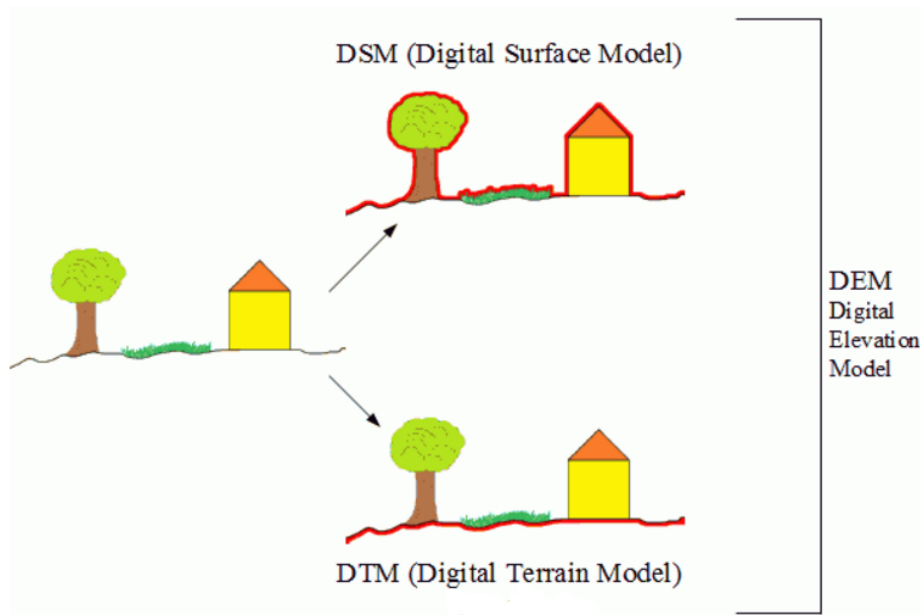
Zdroj: (Hoefle 2010)

Termín LiDAR je odvozen z anglického Light Detection And Ranging, což lze přeložit jako detekce a měření vzdáleností pomocí světla. Z důvodu využití laserového paprsku je tento systém v některé literatuře také označován pojmem LADAR (Laser Detection and Ranging) (Wehr et Lohr 1999). Dále se můžeme setkat s pojmy laserové skenování, laserové mapování, nebo laserová altimetrie.

2.3.4 DEM

Nejčastějším produktem získaným z LiDARových dat je tvorba digitálních modelů terénu, resp. povrchu (Flood 2001). Termín DEM je odvozen z anglického digital elevation model a je reprezentací souvislého statického zemského povrchu. Pod tuto skupinu spadají digitální model terénu (DTM) a digitální model povrchu (DSM) (Obr. 4). DTM je digitální reprezentace zemského povrchu složená z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje mimo jiné odvozovat výšky mezilehlých bodů a reprezentuje pouze model terénu bez budov a vegetace. Oproti tomu DSM zobrazuje povrch terénu a vrchní plochy všech objektů na něm, včetně budov i vegetace (ArcGis help 2013).

Obrázek 4: Rozdíl DSM a DTM (zobrazený červenou linkou)

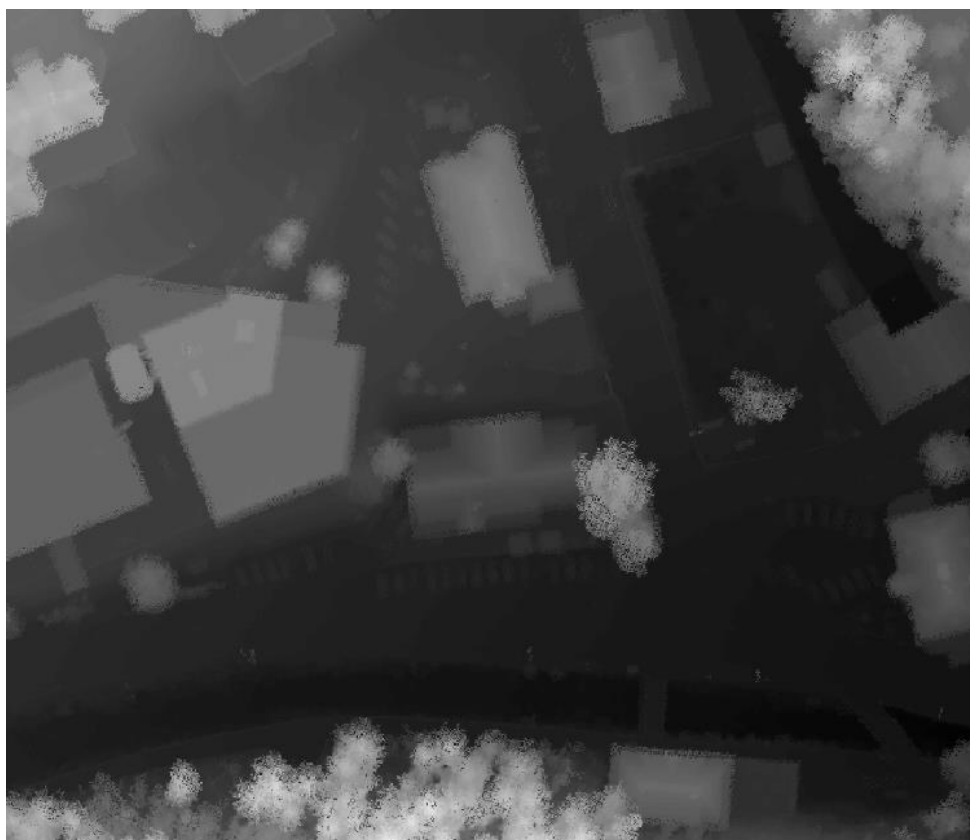


Zdroj: (Bambulová 2013)

DTM lze zobrazovat buď nepravidelnou triangulační sítí (TIN), prostřednictvím vektorových vrstevnic, či jako rastr, který je nejvhodnější pro modelování solárních

map. Je to dvojrozměrné zobrazení terénu z leteckého pohledu, rozdělené na čtvercové sítě buněk (obsahujících informace o poloze a nadmořské výšce) o předem definované velikosti. K jeho tvorbě se využívá prostorové interpolace, jedné ze zásadních funkcí GIS. Díky prostorové interpolaci získáme odhad hodnot určité proměnné v neměřeném místě, na základě naměřených hodnot. Dochází tedy k umělému zpřesnění dat v prostoru mezi změřenými body datového souboru, které nahrazují konečné množství pozorovaných bodů až na teoreticky nekonečné (v rámci měřítka) (Goodchild 2011). Každé takto nově vzniklé rastrové buňce je přidělena dopočítaná hodnota o nadmořské výšce. Přesnost dat je určena především velikostí původně naměřených rastrových buněk.

Obrázek 5: Příklad rastrového DEM



Zdroj: autor

2.4 Nástroj Solar analyst

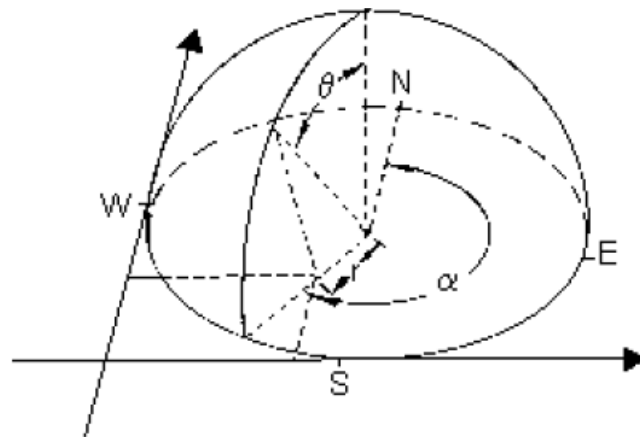
Jedním z nástrojů pro výpočet solárního potenciálu je Solar Analyst. Tento model je implementovaný jako rozšíření programu ArcGis, jako extenze v rámci Spatial Analyst. Umožňuje analyzovat sluneční záření pro určité body, nebo pro celou plochu zkoumaného území za jakékoliv časové období. Dále je možné také generovat mezivýsledky výpočtu. Poskytuje údaje o přímém a rozptýleném slunečním záření, zatímco odražené záření pro jeho nízký podíl do výpočtu nezahrnuje.

Proces výpočtu je rozdělen na dvě hlavní části algoritmu. První část postihuje vzájemné astronomické pohyby Země a Slunce a fyzikální podstatu záření při průchodu atmosférou a dopadu na povrch Země pomocí matematických vzorců. Tento krok je opakovaně aplikován pro všechny zkoumané směry, ze kterých přichází sluneční záření vzhledem ke všem okolním místům povrchu území, obsažených v použitých datech v každém časovém kroku výpočtu (Fu et Rich 2000). Druhá část (hemisférický algoritmus viditelnosti) je jádrem prostorové analýzy. Umožňuje do výpočtu zahrnout vliv okolní topografie tak, že prvnímu kroku algoritmu poskytuje informace o poloze a tvaru veškerých objektů v okolí zkoumaného bodu (Rich et al 1999). Toho je dosaženo generováním několika schémat hemisférické projekce, definujících místa, ze kterých se přicházející záření uplatňuje či nikoliv. Celý proces je tvořen čtyřmi kroky: výpočtem mapy viditelnosti, mapy sluneční oblohy, mapy oblohy a solární mapy (ArcGis help 2012).

2.4.1 Výpočet mapy viditelnosti

Vzhledem k tomu, že dopadající radiace je výrazně ovlivňována okolními objekty a topografií, je tvorba hemisférické mapy viditelnosti oblohy klíčovým krokem celého výpočtu. Ta je generována pro každou buňku vstupního rastru a určuje, jaká část oblohy je z daného místa viditelná, resp. zakrytá okolními objekty (Obr. 6). Takovou mapu si lze jednoduše představit jako fotografii, pořízenou širokoúhlým fotoaparátem typu „rybí oko“ s rozsahem 180° směrem k zenitu.

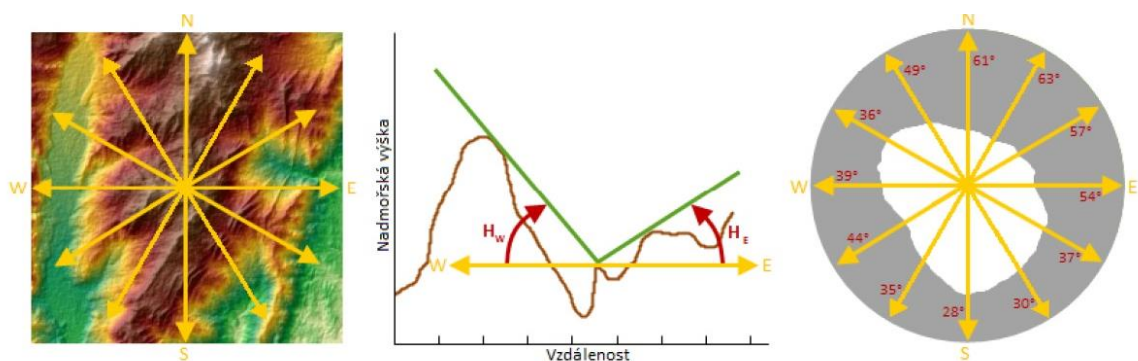
Obrázek 6: Převedení horizontálních úhlů na souřadnice pro polokouli



Zdroj: (Fu et Rich 1999)

Pro stanovený počet zkoumaných směrů (parametr Calculation directions) je výsledkem úhel horizontu, znázorňující maximální úhel zakrytí oblohy od bodu zájmu. Pro všechny ostatní směry, které přímo nebyly zadány do výpočtu, jsou následně úhly horizontu dopočítány interpolací. Vypočtené směry s maximálními úhly zakrytí oblohy jsou nakonec z prostorové hemisféry stereograficky projektovány na plochu, čímž vznikne kruhová mapa viditelnosti oblohy (Obr. 7). Pro každou buňku této rastrové reprezentace je podle viditelnosti daného úhlu uložena hodnota 1, pokud je zde obloha viditelná, nebo -1, pokud viditelná není. Umístění výstupních buněk v řádcích a sloupcích je odvozeno ze zenitového a azimutálního úhlu na polokouli směrů (Fu et Rich 1999).

Obrázek 7: Ilustrace tvorby mapy viditelnosti pro každý pixel rastru

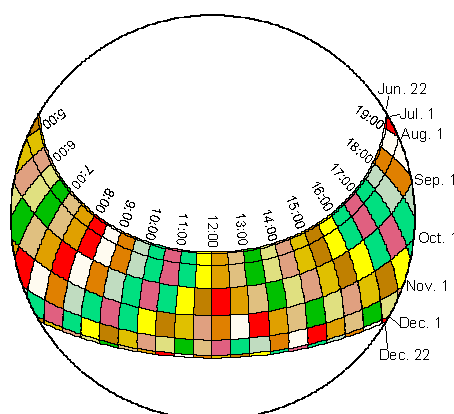


Zdroj: (Bambulová 2013), upraveno

2.4.2 Výpočet mapy sluneční oblohy

Mapa sluneční oblohy, nebo také sluneční mapa, prezentuje přímé sluneční záření ve stejné polokulové projekci jako předešlá mapa viditelnosti. Je zde prezentováno množství přímého slunečního záření z každého směru. Toto množství se mění v čase během hodin, dne i roků podle zdánlivého pohybu Slunce po obloze (Kodysh et al. 2013). Skládá se z oddělených sektorů, definovaných podle polohy Slunce v zadaném časovém intervalu (hodiny, dny, či roční období) (Obr. 8). Sluneční dráha je vypočítána také na základě zeměpisné šířky daného bodu. Každý sektor sluneční mapy má přidělenou jedinečnou identifikační hodnotu, zenitový i azimutální úhel. Pro každý sektor se počítá sluneční záření zvlášť a výsledná mapa je poté pro výpočet přímého záření překryta viditelnou oblastí mapy viditelnosti (Fu et Rich 1999).

Obrázek 8: Příklad mapy sluneční oblohy

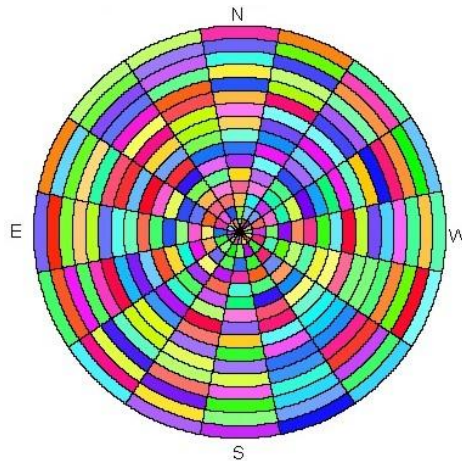


Zdroj: (Fu et Rich 1999)

2.4.3 Výpočet mapy oblohy

Mapa oblohy znázorňuje (stejně jako mapa sluneční) celou oblohu v polokulové projekci, rozdělenou do zvoleného počtu sektorů, které jsou definovány zenitovým a azimutovým úhlem s přiděleným identifikačním číslem podle schématu oblohy (Obr. 9). Na rozdíl od mapy sluneční ale pracuje s difúzním zářením. To, na rozdíl od přímého záření, nepřichází pouze ze směrů dráhy Slunce, ale přichází ze všech směrů oblohy. Je to způsobeno atmosférickým rozptylem paprsků při cestě na zemský povrch (viz kapitola 2.1). Výsledná mapa oblohy, nebo také Skymap, se musí stejně jako sluneční mapa porovnat s mapou viditelnosti. Celkové difúzní záření se počítá jako souhrn záření z těch sektorů, které nejsou zakryté (nebo jen částečně) mapou viditelnosti (Kodysh et al. 2013)

Obrázek 9: Mapa oblohy tvořena 16 zenitovými a 16 azimutálními směry

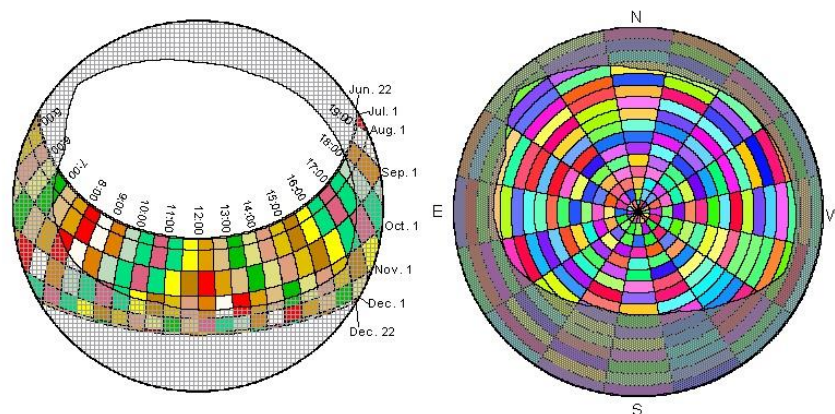


Zdroj: (Fu et Rich 1999)

2.4.4 Výpočet solární mapy

Výsledkem závěrečného výpočtu solární mapy je množství dopadajícího globálního záření určené pro každou požadovanou buňku DEM. To je dáno součtem přímého slunečního záření a záření difuzního (Obr. 10). Odražené záření v tomto modelu není započítáno. Přímé záření i difuzní záření jsou počítány jako podíl počtu všech nepřekrytých buněk z celkového množství buněk každého sektoru. Pro částečně překryté sektory je viditelná velikost vypočítána jako podíl množství nezakrytých buněk a celkové množství buněk sektoru (Fu et Rich 1999).

Obrázek 10: Sluneční mapa s mapou oblohy, překryté viditelnou oblastí. Zastíněné směry představují šedivé oblasti



Zdroj: (Fu et Rich 1999)

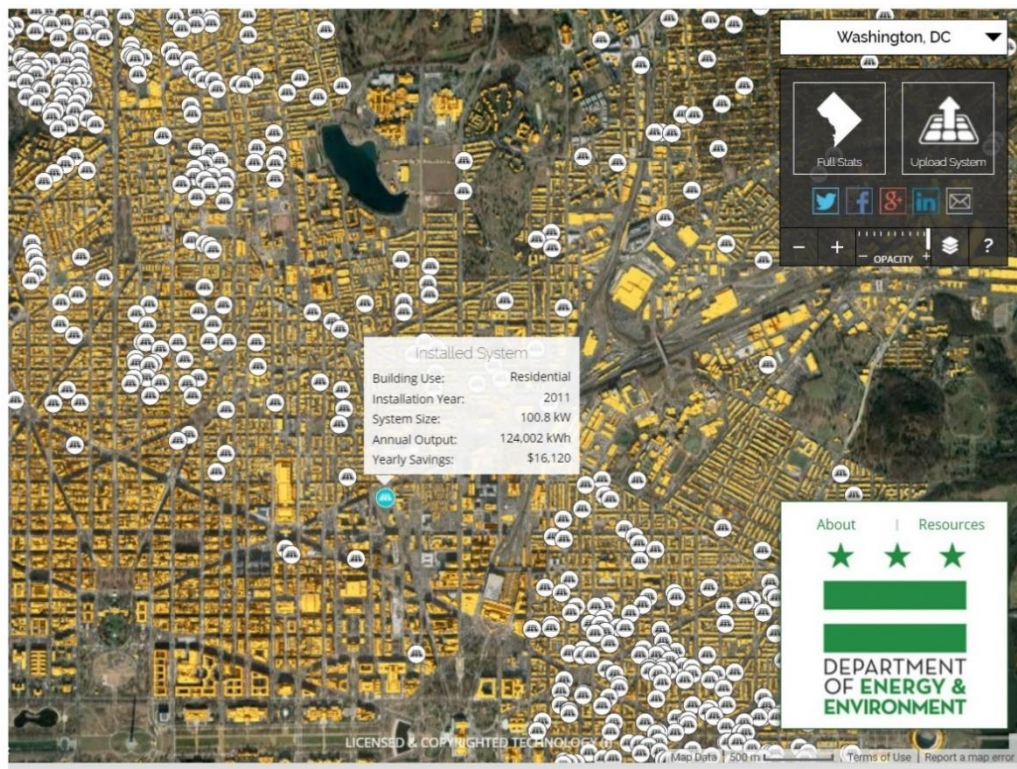
2.5 Solární potenciál měst – mapování solárního potenciálu

Předpokládá se, že masivní použití fotovoltaických systémů se bude především týkat právě městských zastavěných oblastí. V nejvyspělejších zemích světa žije ve městech více než 80 % obyvatel, je zde velká spotřeba energie a zároveň se produkuje velké množství skleníkových plynů (Hofierka et Kaňuk 2009). Díky solárnímu záření mají však možnost navýšit využívání obnovitelných energetických zdrojů. Prostředkem pro vytváření místní elektrické energie, která nemusí putovat daleko ke spotřebišti, čímž může docházet ke ztrátám, je začlenění solárních systémů na vhodná místa. Lze tak potenciálně dosáhnout energetické soběstačnosti (Santos et al. 2014).

Lidarová data se v poslední době stávají dostupnější a přibývá měst, která je již mají k dispozici. Mají tedy možnost vytvořit zde vlastní mapu solárního potenciálu. Ty většinou poskytují informace o průměrném ročním slunečním záření na povrchy budov. To je převáděno buď na množství potenciálně vyrobené elektrické energie pomocí solárních systémů, nebo na množství emisí oxidu uhličitého (CO₂), který by byl při jejich použití ušetřen (Ludwig et al. 2009). Jejich význam bývá informativní, a to pro pomoc při energetickém rozhodování městské správy, nebo přímo pro veřejnost, aby měli občané přehled o solárním potenciálu vlastních střech. Často bývají k dispozici online (Obr. 11), obyvatelé si tedy mohou pomocí internetu poměrně snadno ověřit solární potenciál svých střech či fasád (Agugiario et al. 2012).

Bohužel většina domů v centrech velkých měst má více vlastníků. Fasády i střešní systémy jsou tedy jejich společným majetkem. Proto se vyskytují problémy se zavedením fotovoltaických systémů i přes dostupnost informací o jejich potenciálu. Ty bývají jak organizačního rázu (spolumajitelé např. nechtějí investovat, nebo v domech nebydlí a nechtějí se zabývat chodem domu), administrativní, nebo vznikají spojením obou předchozích. Proto je potřeba, aby vedení města vlastníky podporovalo, ať už finančně, nebo navrhováním dostupných řešení pro využití solárního potenciálu těchto budov. Přes to je však kvantifikace solárního potenciálu prostřednictvím speciálních map důležitým prvním krokem k využití většího množství přicházející sluneční energie (Kanters et al. 2013).

Obrázek 11: Výřez online solární mapy Washington, DC



Zdroj: (Solar System 2017)

Obytné domy jsou hlavními objekty zájmu pro použití fotovoltaických systémů. Takto vyrobená elektrická energie totiž nemusí putovat do vzdáleného spotřebiče, ale zásobuje přímo objekty, na kterých vzniká. Přibližnou poptávku po elektřině lze zjistit z mapy rozmístění obyvatelstva. Ta může být zajištěna díky informacím ze sčítání lidu a odhadu jejich rozmístění v dostupných obytných prostorech (Santos et al. 2014).

Dostupné mapy solárního potenciálu jsou bohužel různé kvality. Je to způsobeno odlišnými postupy při tvorbě těchto map a použitým rozlišením (Kanters et al. 2013). Asi největší vliv na výslednou kvalitu má použitá metoda výpočtu. Ta může být určena např. použitým nástrojem. Relativně obsáhlé mapy solárního potenciálu jsou tvořeny odlišnými nástroji na modelování slunečního záření pro mnoho měst. Např. nástroj Solar Analyst byl použit ke zpracování dat pro města Anaheim, Boston, New York a Salt Lake City. Zato solární mapy pro města jako Berlín, Bristol, Osnabrück, Braunschweig, nebo Gelsenkirchen byly zpracovány pomocí nástroje SUN-AREA (Feritas et al. 2015).

Při vytváření slunečních map pro určení vhodnosti zavedení solárních panelů je potřeba omezit sluneční záření pouze na cílené plochy střech. Toho lze docílit pomocí interakce vektorizovaných polygonů a solární mapy pro celou požadovanou oblast (Ludwig et al. 2009). Ty se vytvářejí klasifikací s následujícím automatickým generováním, nebo ručním vektorizováním. Automatické generování je výrazně rychlejší, proto je vhodné při použití pro rozsáhlé oblasti. Bohužel při ní ale často dochází k nepřesnostem, které mohou být způsobeny špatnou klasifikací, nebo chybami v LiDARových datech. Proto je třeba při použití automatického generování data předem zkontrolovat a v případě chyby ručně upravit. Ruční vektorizace je časově mnohem náročnější, za to ale přesnější, je tedy vhodná pro malé plochy, nebo dokonce jednotlivé střechy, kde je třeba dosáhnout co nejvyšší přesnosti (Lukač et al. 2013). Také lze omezit zobrazení programem tak, aby byly zobrazovány pouze střechy dostatečné velikosti, aby se na ně dal vybraný solární systém instalovat.

Obrázek 12: Výřez střešních ploch Lisabonu, rozdělených podle množství potenciálně vyprodukované elektřiny



Zdroj: (Santos et al. 2014)

Jako ideální podmínky pro instalaci takových systémů v Evropě se většinou udávají plochy se sklonem mezi $30^\circ - 40^\circ$, jeho orientace k jihu a celková plocha alespoň 15 m^2 (Ludwig et al. 2009). Pro každou plochu, která se zdá být vhodná pro solární využití, jsou počítány parametry solárního energetického potenciálu. Jsou to velikost střechy, její potenciál pro výrobu elektrické energie, potenciální úspory vypouštěného CO_2 , nebo výkon potenciálně instalovaného solárního systému počítaný v kW.

To umožňuje dále vypočítat potenciál solární energie. Z vypočítaného průměrného záření lze pro jednotlivé střechy budov odvodit přibližnou vyprodukovanou energii při použití solárních panelů a tu následně porovnat s poptávkou po elektrické energii v těchto budovách.

Při rozmyšlení instalace střešních solárních elektráren hraje kromě potenciálně vyrobené energie svou roli i výška budovy. Střechy nízkých domů s jedním majitelem mají solární potenciál výrazně vyšší než stejně velké střechy patrových bytových domů. Nízké budovy mají totiž výrazně nižší spotřebu, kterou může potenciální solární energie snadno převyšovat. Zato vyšší budovy mají i vyšší spotřebu, kterou potenciálně vyrobená energie nepokryje (Santos et al. 2014). Logicky to vyplývá z vyššího počtu žijících lidí, spotřebovávajících elektřinu. Instalace solárních systémů je tedy výhodnější u nízkých rodinných domů, kterým mohou přinést energetickou soběstačnost. Má ale smysl i u vyšších budov, kde sice poptávku po energii nepokryje, může ale výrazně snížit příjem elektřiny z veřejné sítě a tím snížit náklady.

K dosažení vyššího solárního potenciálu mohou pomoci také cílené úpravy terénu. Dle (Sarralde et al. 2015) lze optimalizací terénu zvýšit sluneční záření dopadající na střechy o cca 9 %, zatímco u fasád se může zvýšit až o 45 %. Tyto úpravy jsou však v existujícím městském prostředí velmi náročné. Je proto třeba na solární potenciál myslet už při návrhu nové výstavby.

2.6 Vliv vstupních dat

2.6.1 Rozlišení velikosti oblohy

Hodnota rozlišení velikosti oblohy, nebo také sky size rozlišení, určuje rozlišení rastru vzniklého překrytím map viditelnosti, sluneční mapy a mapy oblohy. Zadaná hodnota výsledného rastru udává počet buněk při jedné straně oblohy. Buňky mají zpravidla čtvercový tvar, počet řádků je tedy ve výsledném rastru roven počtu sloupců. Pro každou buňku DEM se hodnota každé buňky rastru Sky size počítá zvlášť. Čím vyšší je zvolená hodnota rozlišení, tím vzniká jemnější rastr, je vyšší rozlišení oblohy, tedy i přesnost a podrobnost výpočtu. Na druhou stranu se s vyšší hodnotou prodlužuje výpočetní čas. Defaultně je v programu ArcGIS nastavena hodnota 200, udávaná jako dostatečná pro výpočty s denními intervaly delšími než dva týdny. Pro výpočty

komplexnějších území se doporučuje hodnota 512. Maximální možná hodnota, kterou lze nastavit, je však 10 000. Pro volbu hodnoty Sky size rozlišení je třeba brát ohled na vztah velikosti oblohy a časového intervalu výpočtu, který definuje podrobnost sluneční mapy. Nastavená velikost totiž určuje rozlišení sluneční mapy, a pokud je nastaven malý časový interval výpočtu a nedostatečná hodnota velikosti oblohy, mohou se sluneční dráhy překrývat. To vede k nulovým, nebo nižším hodnotám záření slunečního záření v rámci překryté dráhy (ArcGis help 2014).

Výzkum vlivu nastavení rozlišení velikosti oblohy na výsledná data (Fu et Rich 1999) ukázal, že průměrná výsledná hodnota solárního potenciálu při použitím rozlišení 400 a 200 se lišila o méně než 1 %. Nedošlo tedy k výraznému zlepšení přesnosti modelu, zato výpočetní čas se čtyřnásobně zvýšil. Uznali, že defaultní hodnota programu ArcGIS – 200 je dostatečná pro většinu účelů, ale je možné, že další výzkum odhalí případy, ve kterých může být požadováno vyšší rozlišení.

2.6.2 DEM

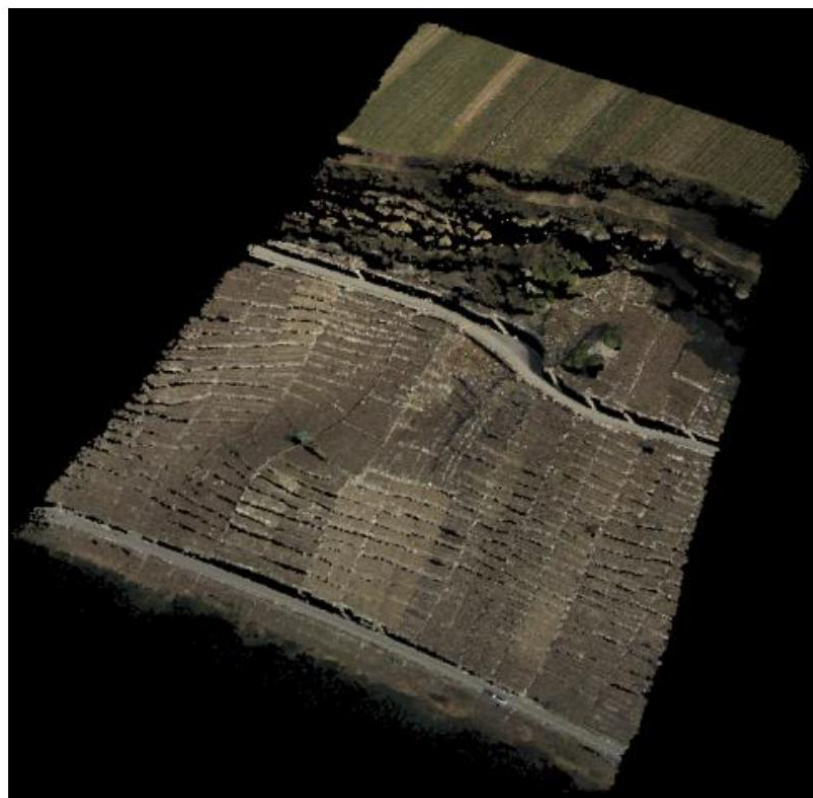
Vstupní rastr DEM reprezentuje pro každou z jeho buněk polohu a nadmořskou výšku. Počet buněk je zde přímo úměrný velikosti zkoumaného území a rozlišení rastru. Čím větší je počet buněk, tím logicky narůstá výpočetní čas, protože pro každou z nich se musí spočítat množství dopadajícího záření zvlášť. Pro dostatečně přesné výpočty je ale potřeba DEM s co nejvyšším možným rozlišením. Podle (Kodysh et al. 2013) není vhodné pro aplikace střešních solárních systémů použít rozlišení DEM nižší než 1m.

Výzkum vlivu rozlišení DEM na výslednou hodnotu provedli např. (Ruiz-Arias et al. 2009). Porovnávali výsledné hodnoty pro rozlišení 20 m a 100 m s výsledky naměřených dat ve čtrnácti radiometrických stanicích za dobu 40 dní. Tento výzkum byl proveden pomocí modelů Solar Analyst, Solei-32, r.sun a SRAD. Výpočet byl proveden ve všech čtyřech modelech s oběma rozlišeními. Výsledky pro rozlišení 20 m a 100 m se ani v jednom z modelů výrazně nelišily. Analýza dále ukázala, že zvýšení rozlišení DEM vylepšuje odhad záření, především pokud je větší zastínění. Z výsledků bylo usouzeno, že zvýšením rozlišení DEM lze předpokládat zlepšený odhad solárních modelů, nicméně v některých případech může být těžké odlišit vliv rozlišení od vlivu chyb, které způsobuje zjednodušený model atmosféry.

2.7 Přesnost dat DEM

Přesnost DEM je velmi zásadní otázkou pro zkoumání solárního potenciálu. Pro spolehlivé výsledky především na malých územích, jako jsou střechy budov, nelze vliv zastínění drobnějšími předměty, např. komíny, opominout. Také správná identifikace porostů je závislá na přesnosti DEM. Z výzkumu (Fogl et Moudrý 2016) se ukázalo, že část ročního slunečního záření, která se v urbanizovaném prostředí ztrácí vlivem vegetace, se pohybuje mezi 3 % a 11 %. Bohužel standardní LiDARová data se zdají být pro opravdu přesné určení těchto objektů nedostatečná. Z toho důvodu se řeší možnosti získání, resp. použití vyššího rozlišení DEM. To lze mimo LiDARu získat z fotogrammetrických mračen bodů získaných bezpilotními vzdušnými systémy (UAS), získávajících data na základě fotografií s vysokým měřítkem (Obr. 13).

Obrázek 13: Mračno bodů vytvořené pomocí UAS



Zdroj: (Haala et al. 2013)

UAS (z anglického Unmanned Aerial System) jsou drony různých tvarů s maximální velikostí několik metrů. Můžeme se setkat s klasickou konstrukcí, kdy mají drony křídla podobně jako letadla, nebo s drony létajícími pomocí několika vrtulí. To jsou

nejčastěji kvadrokoptéry se čtyřmi vrtulemi, dnes už se ale objevují i hexakoptéry se šesti vrtulemi, nebo oktakoptéry, které ve vzduchu udržuje osm vrtulí. UAS létají zpravidla na elektrický pohon a podle typu vydrží letět až 20 minut s rychlostí okolo 20 m/s. Na rozdíl od letadel a vrtulníků používaných u LiDARU mají výrazně nižší hmotnost (jen několik kg), což se projevuje citlivostí na vliv větru. Mohou se proto používat pouze v bezvětří, nebo za slabého větru. Data sbírají drony pomocí vysoce kvalitních digitálních fotoaparátů a jsou naprogramovány tak, aby za jeden let pokryly předem definovanou plochu. Během letu trvajícího 20 minut může UAS v konfiguraci 0,25 m² pokrýt až 100 ha. (Haala et al. 2013)

Analýzu na porovnání dat získaných pomocí UAS a standardně pomocí LiDARu provedli např. (Zink et al. 2015). Vytvořili porovnávací DEM s rozlišeními 1 cm, 7,5 cm, 10 cm, 25 cm, 50 cm a 1 m. S rostoucím rozlišením přirozeně rostla ostrost střech a dalo se lépe rozeznat jednotlivé objekty. Při nejjemnějším rozlišení 1 cm se daly nejen dobře rozeznat komíny na střechách a jejich hrany, ale také jednotlivé střešní tašky. Takto vysoká úroveň rozlišení se však zdá být poněkud zbytečná. Fotovoltaické panely, pro které se sluneční potenciál počítá, mají na rozdíl od střešních tašek plochý tvar, jejich povrch tedy bude zastoupen jediným sklonem. Vytvořené mapy nejevily výrazné rozdíly, jako ideální rozlišení se zdálo být 25 cm, které přináší nejlepší kompromis mezi výsledným detailem a výpočetní náročností. Čas výpočtu byl výrazně nižší než u rozlišení 1 cm při stále poměrně reálném obrazu.

Rozlišení UAS bylo sice několikanásobně ostřejší než u LiDARových dat, zato ale jejich pořízení bylo výrazně dražší a časově náročnější. Proto se UAS uplatní hlavně na malých oblastech, jež je potřeba zmapovat ve velmi ostrém rozlišení. Náklady se dají snížit např. použitím levnějších fotoaparátů, má to ale za následek snížení stability geometrie obrazu a omezení radiometrické kvality. Přesto mohou i takové lety přinést dostatečně kvalitní data (Haala et al. 2013).

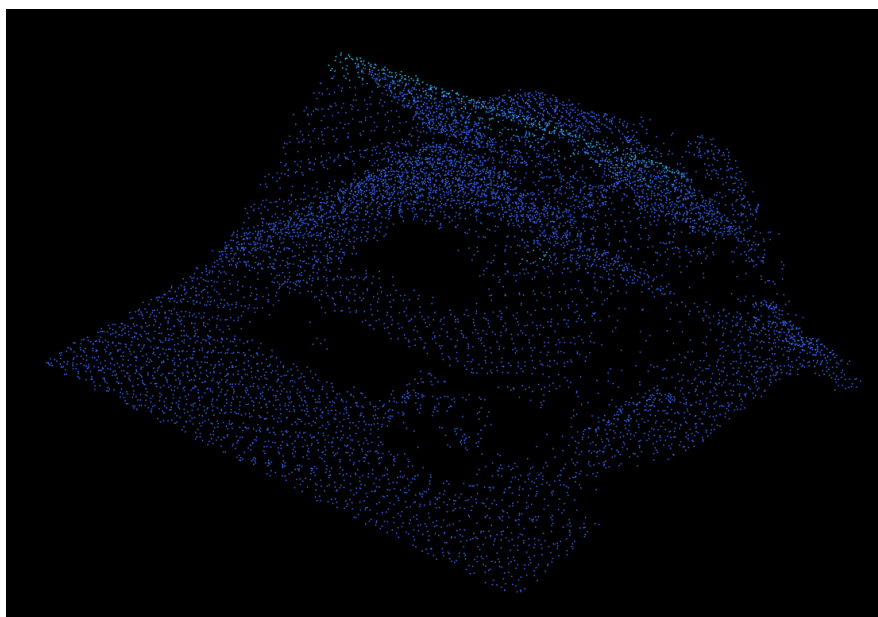
3 Metodika

3.1 Charakteristika území

Lokalitou, vybranou pro účely této práce je horské město Pec pod Sněžkou. Leží v Krkonoších na severovýchodě Čech v Královéhradeckém kraji, v nadmořské výšce 750 metrů a v současné době eviduje 600 stálých obyvatel. Protékají zde řeka Úpa a Zelený potok. Je to významné horské středisko pro zimní i letní rekreaci a významné centrum cestovního ruchu. Přímo ve městě je lyžařský areál, jako součást největšího lyžařského resortu v České republice. V blízkosti se nachází také Sněžka, nejvyšší hora České republiky.

Jako první vzorek byla vybrána střecha penzionu Taxiskútr (Obr. 14), který leží v jihozápadní části Pece pod Sněžkou mezi Vlčím a Zeleným potokem, před jejich soutokem. Z jihovýchodu je střecha stíněna vysokými stromy, což se zdá být jako vhodné pro výpočty v této práci k porovnání vlivu zastínění.

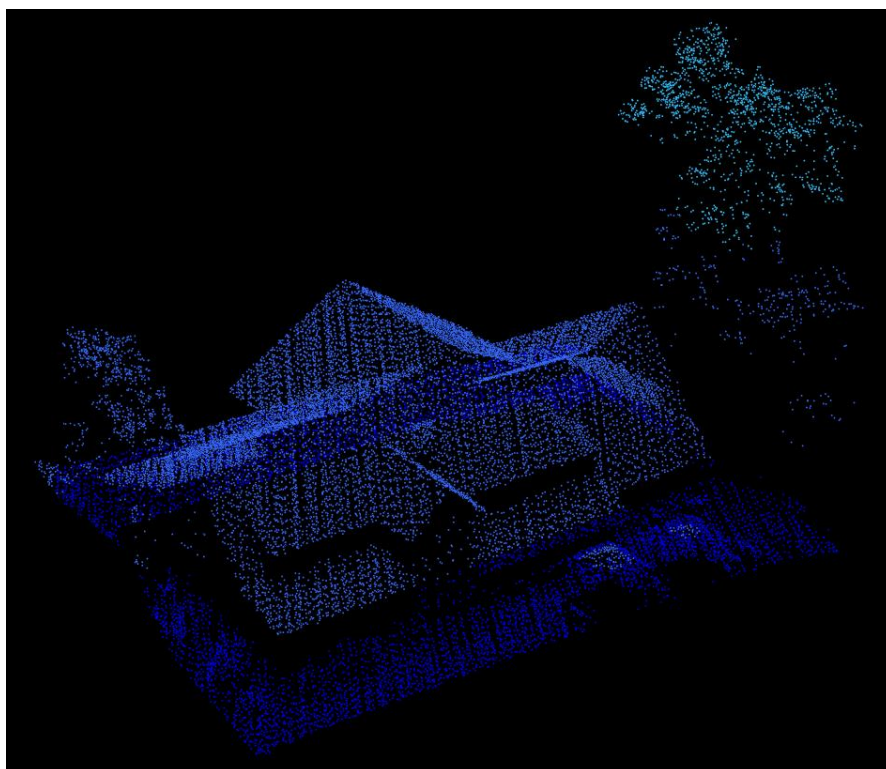
Obrázek 14: Detail první střechy LiDARového mračna bodů



Zdroj: autor

Jako druhý vzorek byla vybrána střecha penzionu Hospoda na Peci (Obr. 15). Nachází se v centru města Pec pod Sněžkou, poblíž soutoku řeky Úpy se Zeleným potokem. Budova pochází již z roku 1773 a je na seznamu kulturních památek v Peci pod Sněžkou. Její střecha z rovného plechu má poměrně hodně členitý tvar. V těsné blízkosti budovy rostou vysoké listnaté stromy. Nejvíce je zastíněna z východní strany.

Obrázek 15: Detail druhé střechy LiDARového mračka bodů



Zdroj: autor

3.2 Vstupní data

Pro účely výpočtu solárního potenciálu byly použity LAS soubory LiDARových dat Pece pod Sněžkou. Z původního materiálu 36 souborů o celkových rozměrech cca 1 870 m x 1 510 m, které pokrývaly plochu celé Pece pod Sněžkou, byl pro každou ze střech nejdříve vytvořen merge (spojení) z potřebných souborů a následně vytvořen výřez v okruhu 150 m od střechy.

3.3 Výpočet solárního potenciálu

Celá práce modelace a výpočtů probíhala v prostředí programu ArcGIS Desktop 10.4.1 s použitím nástrojů tohoto programu a nástrojů doinstalovaného toolboxu LAStools. Po výběru vzorových střech byly zjištěny konkrétní LAS soubory, které obsahovaly potřebné území. Byl vytvořen nový LAS Dataset, ve kterém byly soubory spojeny nástrojem lasmerge a následně vytvořen požadovaný výřez v okolí 150 m od střechy pomocí nástroje lasclip. Klasifikace lidarových dat proběhla nejdříve v nástroji lasground, kde byly automaticky rozeznány body zemského povrchu. Následně byla u všech ostatních bodů zjištěna jejich výška od země, a to pomocí lasheight. Na závěr byly odlišeny body výšky vegetace a střech. Ty byly ještě zpřesněny ručním vektorizováním.

Dalším krokem bylo vytvoření třech modelů DEM a to pouze pro určenou střechu, s okolím (bufferem) 25 m a s bufferem 100 m. K tomu posloužily nástroje Buffer, LASdataset to raster a Clip. Všechny tři byly vytvořeny s rozlišením 0,25 m.

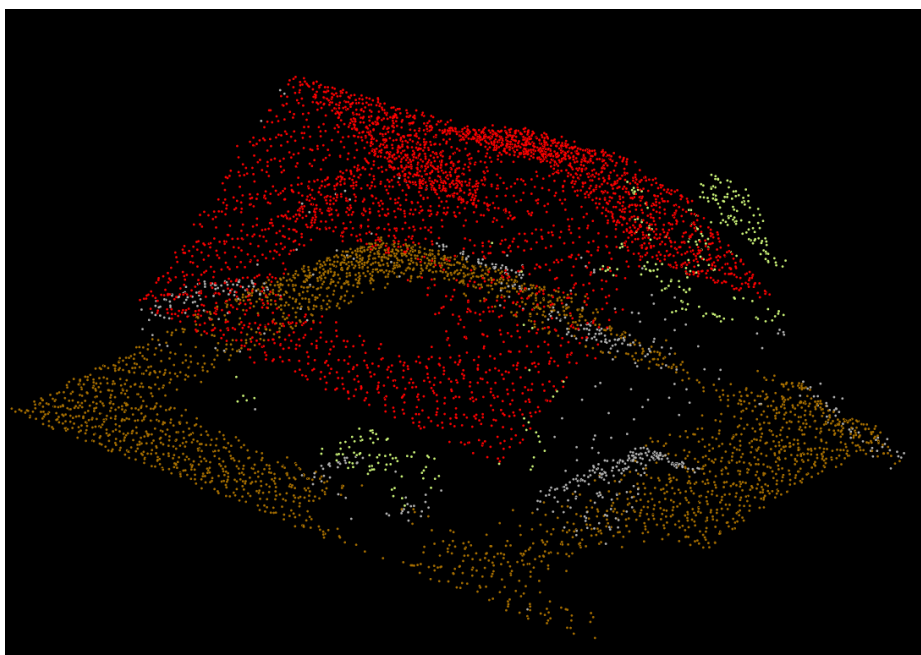
Tyto DEM byly použity jako vstup pro nástroj Area solar radiation, pro výpočet mapy solárního potenciálu pomocí algoritmu popsáným v kapitole 2.4. Pro každý DEM byl zvlášť proveden výpočet s parametrem Calculation directions (počet směrů, ze kterých se počítá zastínění) nastaveným na 8, 16, 32, 64 a 128 směrů. Sky size rozlišení bylo nastaveno na 200 a modelovaný potenciál se počítal pro roční průměrné dopadající záření pro rok 2017 v měsíčních intervalech. Slope (míra svažitosti ploch) a Aspekt (orientace ploch ke světovým stranám) byly automaticky spočítány z DEM. Ostatní parametry byly záměrně ponechány na defaultních hodnotách. Dále byl spočítán solární potenciál pro obě střechy v závislosti na měsíci v roce. K tomuto výpočtu byly nastaveny parametry stejně jako u předchozího výpočtu. Parametr Calculation direction byl nastaven na 32, velikost bufferu byla 100 m. Hodnoty maximálního, minimálního i průměrného dopadajícího záření byly nakonec pro každou variantu zjištěny nástrojem Zonal statistics.

4 Výsledky

4.1 Klasifikace DEM

Zásadním krokem k určení solárního potenciálu střechy je klasifikace DEM. Určuje, které body rastru se týkají střechy a lze pro ně tedy počítat množství potenciálu přijatého slunečního záření.

Obrázek 16: První střecha, klasifikace DEM

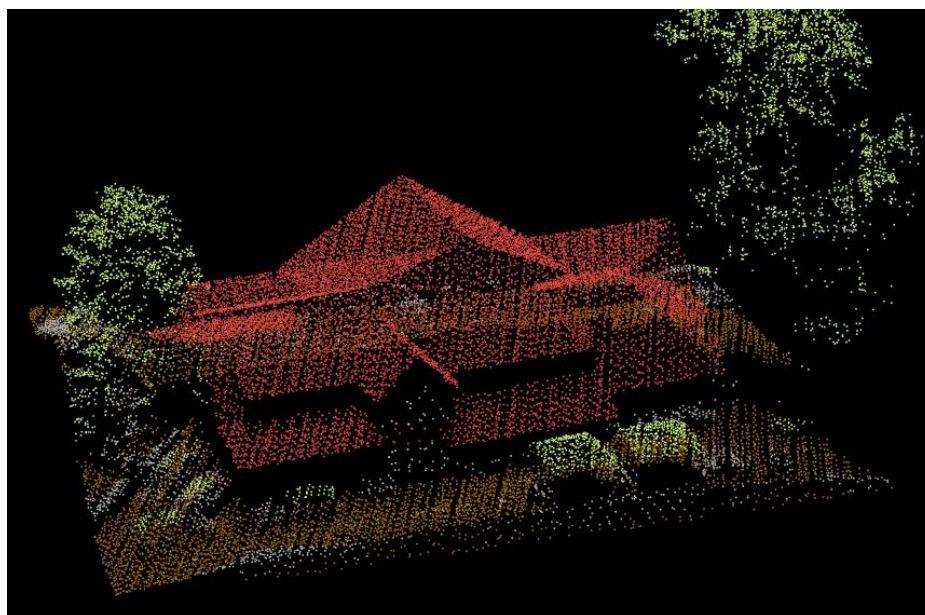


Zdroj: autor

Na obrázku výše (Obr. 16) je vidět klasifikace DEM pro první střechu. Z dat je patrný tvar, sklon střechy i její výška nad zemí, a je znázorněna body červené barvy. V jejím okolí jsou patrné hnědé body znázorňující povrch země. Zelené body vyobrazují povrch zeleně. Lze vidět i šedivé body, které nemají žádnou klasifikaci. Jsou to zde např. body fasády domu.

Ve vyobrazení druhé střechy (Obr. 17) je vidět, že má značně složitější tvar než střecha první. Je složena z několika menších částí a není moc vysoko nad zemí. Stromy jsou v její úplné blízkosti, některé větve dokonce i střechu z vrchu mírně zakrývají. Výška stromů na obou stranách domu je větší než výška domu. Šedivé body na střeše jsou komín a anténa, které není třeba klasifikovat.

Obrázek 17: Druhá střecha, klasifikace DEM

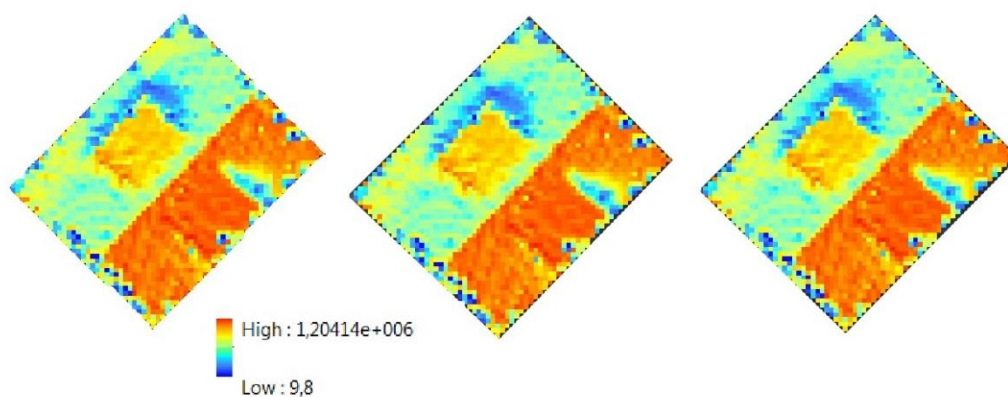


Zdroj: autor

4.2 Solární potenciál – vliv parametrů

4.2.1 Vliv parametru Calculation directions bez vnějšího zastínění

Obrázek 18: Sluneční mapa první střechy

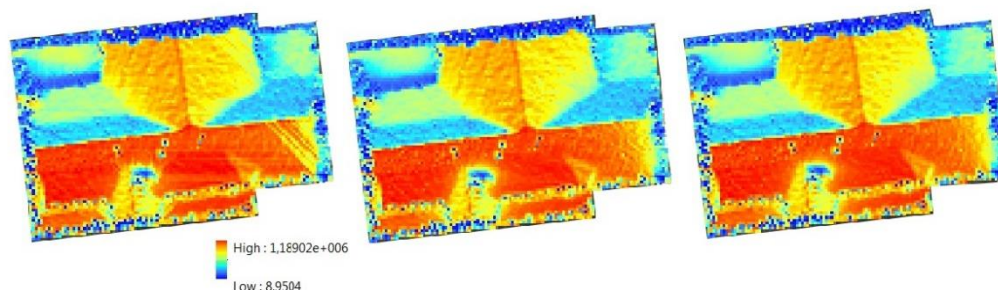


Zdroj: autor

Severozápadní část první střechy se nezdá být vhodná k umístění solárních panelů. Přesto, že výpočet nepočítal se zastíněním, vykazuje pouze průměrné až podprůměrné hodnoty. Zato jihovýchodní část se zdá být k solárnímu využití vhodnější, solární potenciál je zde v nadprůměrných hodnotách (Obr. 18). Vliv parametru Calculation directions je v tomto případě zanedbatelný. i při podrobném zkoumání zobrazení

potenciálu je velmi náročné rozeznat rozdíl mezi výsledkem počítaným s 8 a 128 směry zastínění.

Obrázek 19: Sluneční mapa druhé střechy



Zdroj: autor

Druhá střecha má poněkud složitější tvar než střecha první. Ze zobrazení (Obr. 19) se dá usoudit, že k využití solárními panely by bez zastínění okolními objekty byla vhodná její jižní strana, která má velmi vysoký solární potenciál. Rozdíl mezi výsledkem s použitím 8 a 32 směry zastínění je poměrně patrný, i když ne příliš velký. Zato mezi 32 a 128 směry je prakticky nerozeznatelný.

Tabulka 1: Výsledky dopadajícího slunečního záření v závislosti na parametru Calculation directions

Calculation directions	min (Wh/m ²)	max (kWh/m ²)	mean (kWh/m ²)	sum (MWh na střechu)
Střecha 1				
8	178,0420685	295,95275	189,9170614	425,4142176
16	139,2289428	295,4328438	188,3079848	421,8098859
32	164,3314058	295,5198125	188,3048615	421,8028897
64	164,3314058	295,5446875	188,4376981	422,1004437
128	164,3314058	295,5429688	188,2510289	421,6823047
Střecha 2				
8	16,424221	298,3202813	179,6051169	1441,869878
16	14,9564	298,2120625	177,8889841	1428,092764
32	17,68052875	298,3562188	177,836193	1427,668957
64	16,8438625	298,6605938	177,9208497	1428,348581
128	15,399333	298,500375	177,8348528	1427,658198

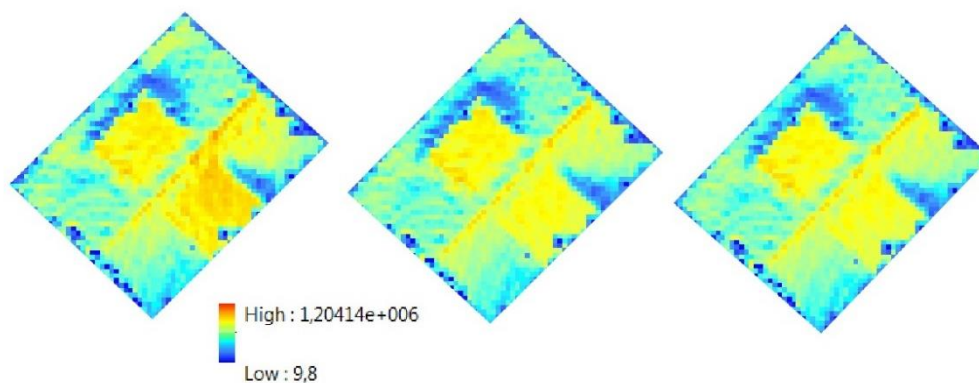
Zdroj: autor

Konkrétní hodnoty odhadů ročního solárního potenciálu bez vnějšího zastínění uvádí tabulka 1. Při zpřesnění výpočtů minimálního záření nedochází ke kontinuálnímu vývoji, zpřesňování měření nepřináší ani radikální změny. Největší odchylku minimálního záření od měření se 128 směry má v prvním případě případ s 16 směry a

to 25,1 Wh/m². Zato přesnější měření s 32, 64 i 128 směry přináší totožné hodnoty, ke zpřesnění zde již vůbec nedochází. U druhé střechy mají všechny případy vyšší hodnotu než nepřesnější z nich, jen hodnota 16 směrů je nižší, a to o 0,4 Wh/m². Hodnoty maximálního záření se v žádném z případů téměř neliší. U průměrného záření jsou výsledky srovnatelné. Nejvíce se vzdaluje případ s 8 směry zastínění a to o 1,6 resp. 1,7 kWh/m². U celkové sumy dopadajícího záření na střechu jsou rozdíly podobné. U případů výpočtů se 16 a více směrů jsou výsledky srovnatelné, případ s 8 směrů se liší od nejpřesnějšího měření o 3,7 resp. 14,2 MWh. Výsledky pro druhou střechu se podstatně liší od střechy první.

4.2.2 Vliv Calculation directions s vnějším zastíněním

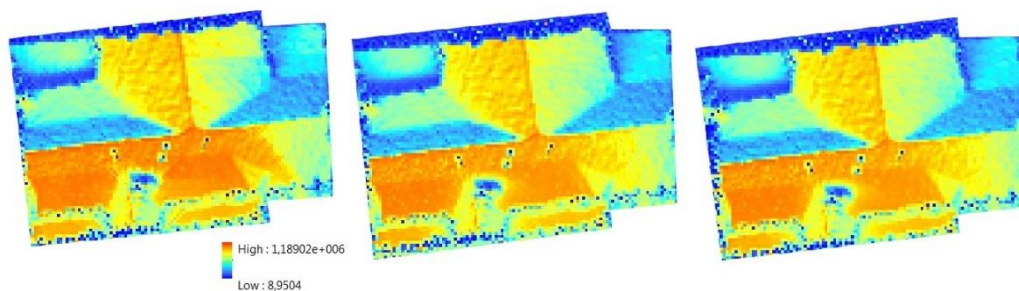
Obrázek 20: Sluneční mapa první střechy



Zdroj: autor

Zastínění má na solární potenciál první střechy velmi výrazný vliv. Žádná část střechy se nezdá být k solárnímu využití vhodná. Největší rozdíl, patrný na první pohled, je zde mezi zobrazením vytvořeným na základě 8 a 32 směrů zastínění. Zato v případě 32 a 128 směrů je již rozdíl zanedbatelný.

Obrázek 21: Sluneční mapa druhé střechy



Zdroj: autor

Také na druhou střechu má zastínění velký vliv. Přesto se její jižní strana, hlavně její západní část, zdá být stále vhodná k solárnímu využití. Její solární potenciál zůstává

v nadprůměrných hodnotách. Rozdíl mezi použitím 8 a 32 směrů zastínění je patrný převážně na východní straně střechy. Mezi 32 a 128 směry zastínění už však prakticky nelze rozeznat.

Tabulka 2: Výsledky dopadajícího slunečního záření v závislosti na parametru Calculation directions

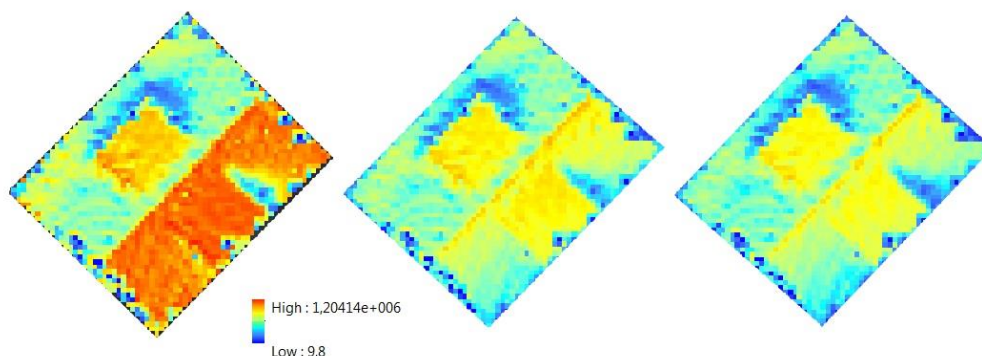
Calculation directions	min (Wh/m ²)	max (kWh/m ²)	mean (kWh/m ²)	sum (MWh na střechu)
Střecha 1				
8	115,2131958	243,9738438	141,0071443	317,4070818
16	87,85797875	229,277875	135,8037349	305,6942072
32	119,690651	228,0209531	135,4978204	305,0055937
64	131,9077148	227,3157813	135,3438744	304,6590614
128	126,736061	227,8193594	135,3463434	304,664619
Střecha 2				
8	13,17100525	272,829125	149,7125507	1209,827122
16	14,4674835	269,3056563	146,5112174	1183,957148
32	14,543766	267,3164375	146,3775285	1182,876808
64	14,543766	267,108625	146,4916234	1183,798809
128	13,84997175	266,43025	146,4618733	1183,558398

Zdroj: autor

Ani z tabulky přesných naměřených hodnot při vnějším zastínění nevyplývá radikální zlepšení odhadů při použití přesnějšího měření (Tabulka 2). Pro hodnotu minimálního záření se u první střechy jako nejméně vhodné ukázalo měření se 16 směry zastínění, lišící se od nejpřesnějšího měření o 38,8 Wh/m². Zato výsledky druhé střechy jsou srovnatelné. Také u maximálního záření jsou v obou případech hodnoty se 16 a více směrů srovnatelné. Více se liší pouze výpočet s nejnižší přesností a to o 16,1 resp. 6,3 kWh/m². Hodnoty průměrného záření se v případě 8 směrů zastínění liší o 5,6 resp. 3,2 kWh/m², ostatní případy přináší velmi podobné výsledky. Ani přesnější měření sumárního záření na střechu od 16 směrů výše nepřináší téměř žádné zpřesnění výsledků. Pouze případ s 8 směry zastínění se znatelněji vzdaluje od nejpřesnějšího měření a to o 12,7 resp. 26,3 MWh na celou plochu střechy.

4.2.3 Vliv velikosti bufferu

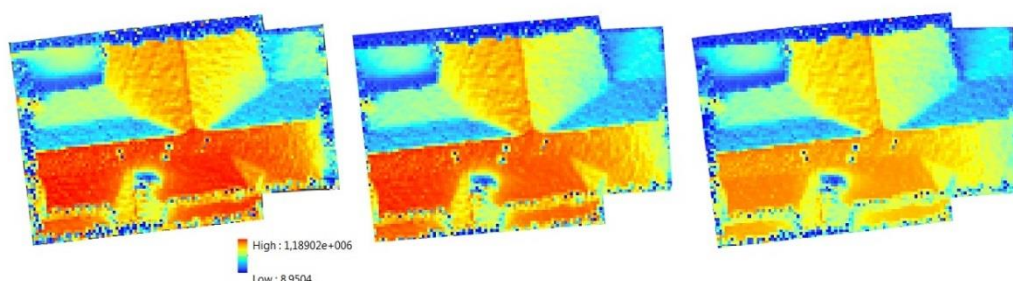
Obrázek 21: Sluneční mapa první střechy



Zdroj: autor

Vliv velikosti bufferu (rozlehlosti okolního území, které vstupuje do výpočtu) se u první střechy projevuje především mezi zobrazením úplně bez bufferu a bufferem 25 m. Bez bufferu se zdá být jihovýchodní strana střechy vhodná k solárnímu využití. V ostatních případech jsou na celé střeše hodnoty průměrné až podprůměrné a nezdá se být k solárním účelům vhodná. Mezi bufferem 25 m a 100 m je zde jen nepatrný rozdíl.

Obrázek 22: Sluneční mapa druhé střechy



Zdroj: autor

Také na druhou střechu má buffer velký vliv. Při zobrazení bez bufferu a s bufferem 25 m se zdá být její jižní strana pro instalaci solárních panelů vhodná, i když rozdíl mezi těmito zobrazeními je již patrný. Největší rozdíl je mezi zobrazením s použitým bufferem 25 m a 100 m. Při bufferu 100 m se již střecha nezdá být příliš vhodná k solárnímu využití. Je to způsobeno zastíněním objekty, které jsou ve větší vzdálenosti než 25 m.

Přesné hodnoty výpočtů (Tabulka 3) ukazují, že zásadní rozdíl pro minimální záření je v případě obou střech při výpočtech bez bufferu a s bufferem. Zato ani v jednom

případě není rozdíl mezi buffery 25 m a 100 m. Pro maximální záření docházelo ke zlepšení vždy při zvětšení bufferu pro obě střechy. V případě druhé střechy však byl jen malý rozdíl mezi bufferem 0 m a 25 m. Z výsledků průměrného dopadajícího záření je také zřejmé postupné zpřesňování výsledků, a to ve všech případech. Celkové dopadající záření ukazuje zpřesnění výsledků při zvětšení bufferu u obou střech a rozdíly nejsou zanedbatelné. Rozdíl mezi výsledky bez bufferu a s bufferem 100 m činí 117 MWh resp. 244 MWh na plochu celé střechy.

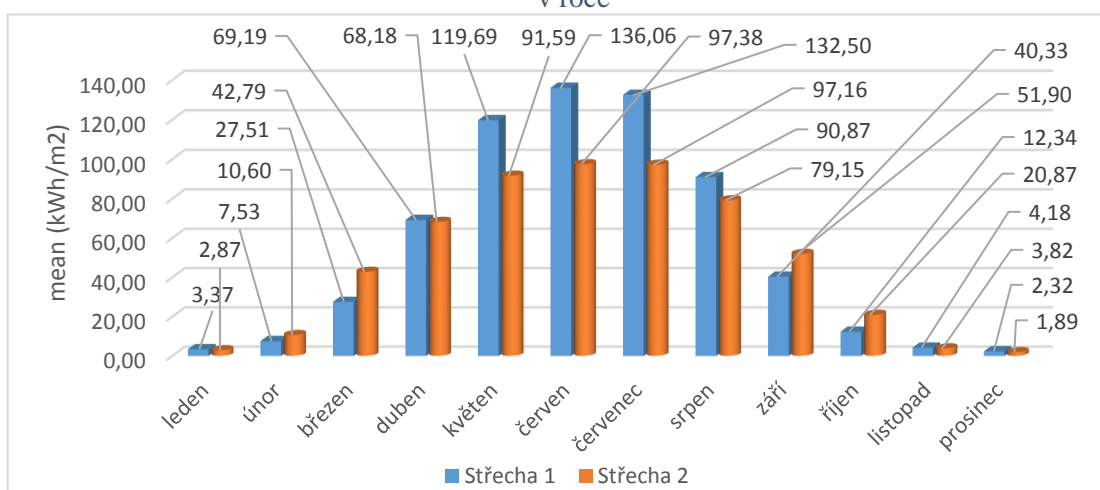
Tabulka 3: Výsledky dopadajícího slunečního záření v závislosti na velikosti bufferu

Velikost bufferu	min (Wh/m ²)	max (kWh/m ²)	mean (kWh/m ²)	sum (MWh na střechu)
Střecha 1				
0 m	164,3314058	295,5429688	188,2510289	421,6823047
25 m	126,736061	237,4792656	144,7816785	325,9035583
100 m	126,736061	227,8193594	135,3463434	304,664619
Střecha 2				
0 m	15,399333	298,500375	177,8348528	1427,658198
25 m	13,84997175	295,0217813	161,4920822	1305,017516
100 m	13,84997175	266,43025	146,4618733	1183,558398

Zdroj: autor

4.2.4 Měsíční průběh

Obrázek 23: Průměrné sluneční záření dopadající na 1 m² střechy v závislosti na měsících v roce



Zdroj: autor

Z grafu (obrázek 23) je dobře vidět rozdíl mezi slunečním zářením přicházejícím v zimě, resp. v létě. Zatímco v létě dosahuje záření maximálních hodnot, v zimě je jeho množství minimální.

4.3 Čas výpočtu

Přesné hodnoty času výpočtu představuje tabulka 4. Největší vliv na dobu výpočtu měla velikost bufferu. V prvním případě výpočtů (bez vnějšího zastínění) je doba výpočtu tak krátká, že nejsou patrné příliš velké rozdíly při změně Calculation directions. V případě bufferu 25 m již lze pozorovat, jak se při navýšení počtu zkoumaných směrů zastínění prodlužuje výpočetní čas. Ten se pohybuje mezi 20,91 s a 29,74 s resp. 30,89 s a 44,42 s. U bufferu 100 m jsou již poměrně dlouhé časové úseky výpočtu, prohloubily se však také rozdíly mezi výpočty s rozdílným parametrem Calculation directions. Čím větší je rozdíl mezi počtem zkoumaných směrů zastínění, tím se více prohlubuje časový rozdíl výpočtu. U obou střech je výpočet se 128 směry více než 2x delší, než stejný výpočet s 32 směry. Zato rozdíl mezi výpočtem s 8 a 32 směry je pouze 24 % resp. 32 %.

Tabulka 4: Čas výpočtu v závislosti na parametru Calculation directions

Calculation directions	Buffer 0m		Buffer 25m		Buffer 100m	
	Střecha 1	Střecha 2	Střecha 1	Střecha 2	Střecha 1	Střecha 2
8	1,62 s	3,65 s	20,91 s	30,89 s	212 s	235 s
16	1,6 s	3,66 s	21,74 s	32,23 s	239 s	260 s
32	1,6 s	3,99 s	22,61 s	34,52 s	278 s	310 s
64	1,66 s	3,97 s	25,33 s	38,36 s	360 s	393 s
128	1,68 s	4,33 s	29,74 s	44,42 s	516 s	643 s

Zdroj: autor

5 Diskuze

V práci byl porovnán vliv parametru Calculation directions na výsledky výpočtu solárního potenciálu. Výstupy výpočtů pro jednotlivé střešní systémy, vytvořené programem ArcGis, ukazují, že tento parametr nemá na výpočty zásadní vliv. Přes to bylo pozorovatelné znatelné zpřesnění výpočtů především ve srovnání s nejméně přesným modelem, počítaným pouze s 8 směry zastínění. Ten se ve většině případů znatelně lišil od nejpřesnějšího počítaného způsobu se zahrnutím 128 směrů zastínění.

Potřebná velikost parametru Calculation directions je odvislá mimo jiné od použitého rozlišení DEM. Při jeho hrubém rozlišení (30 m) postačí počítat s 16 či 32 směry. Při použití ostrého DEM je však nutné počet zkoumaných směrů zastínění adekvátně navýšit (ArcGis help 2014). Provedené studie různých rozlišení ukazují jako ideální volbu rozlišení 0,25 m, které je pro podobné výpočty dostačující (Zink et al. 2015). Toto rozlišení bylo také použito v této práci s očekáváním, že potřebný počet zkoumaných směrů zastínění bude třeba adekvátně navýšit.

Dle Fu et Rich (1999) je při větším podílu zastínění třeba také navýšit přesnost jeho počítání navýšením počtu zkoumaných směrů zastínění a rozlišení mapy oblohy, což tato práce potvrzuje. V případě výpočtů solárního potenciálu bez vnějšího zastínění střechy se zdá být vliv Calculation directions zanedbatelný. Rozdíl mezi měřenými případy je ve většině případů pouze do 1 %. V případě výpočtů se zastíněním je vliv parametru již výraznější. Rozdíly mezi nejpřesnějším a nejméně přesným typem výpočtu jsou v některých případech více než 5 %, vždy jsou ale do 10 %. Zamyslet se nad počtem zkoumaných směrů zastínění zde již tedy dává smysl. Výjimkou je ale případ porovnání Calculation directions pro minimální záření u první střechy se zastíněním. Výpočet se 16 směry zastínění je výrazně méně přesný než všechny ostatní počítané případy a jeho výsledek je o necelých 40 % menší než výsledek nejpřesnějšího výpočtu. Může to být způsobeno chybnou interpolací zbylých směrů. Případy s 32, 64 a 128 směry se od sebe i v případě počítání s vnějším zastíněním liší ve většině hodnot pouze do 1 %, což se dá pokládat za zanedbatelné.

Výsledky práce také ukazují, že velikost bufferu má zásadní vliv na získané výsledky solárního potenciálu. Zvětšení bufferu v každém případě přineslo nižší výsledek dopadajícího slunečního záření, je tedy otázkou, zda by se výsledek také změnil při použití ještě většího bufferu než 100 m. Porovnání výsledků bez bufferu a s bufferem naznačuje množství záření, kterého ubývá vlivem zastínění. Je k zamyšlení, zda by v některých případech nebylo lépe okolní stromy odstranit a získat tak více „čisté“ energie ze Slunce. Z výzkumu Tooke et al. (2011) se ukázalo, že stínící stromy průměrně redukuje celkové sluneční záření střech obytných budov o 38 %. Toto později vyvrátili Fogl et Moudrý (2016). Z jejich výsledků vyplývá, že část ročního slunečního záření, která se v urbanizovaném prostředí ztrácí vlivem vegetace, se pohybuje mezi 3 % a 11 %. U střech zkoumaných v této práci je vliv zastínění vyšší. V případě první střechy je sumární dopadající záření bez vnějšího zastínění o 20,6 % vyšší než se zastíněním (použitý buffer 100 m). U druhé střechy je rozdíl stejných výsledků ještě větší, a to o 38,4 %. Pro účely této práce však byly vybrány střechy v blízkosti stromů s velkým zastíněním, nelze tedy tyto hodnoty globalizovat. Na velké zastínění také nemá vliv pouze okolní vegetace, ale určitá část je způsobena také okolními budovami, nebo zeměpisným profilem.

Z výsledků měsíčního průběhu dopadajícího záření je zřejmý enormní rozdíl v létě a v zimě. Tyto výsledky se ale vzhledem k délce dne a sluneční dráze v těchto obdobích daly očekávat. Je překvapivé, že ve slabších měsících je průměrné záření u druhé střechy silnější než u první, zato v silnějších měsících je tomu naopak. Je to pravděpodobně způsobeno větším zastíněním první střechy z jihu. V létě je totiž Slunce výš na obzoru, svítí tedy přes stromy z jihu, které v zimě střechu stíní.

Posouzení času potřebného k modelaci solárních map ukazuje jeho postupné prodlužování s narůstajícím počtem zkoumaných směrů zastínění. Výjimkou je pouze případ s nulovým bufferem, kdy je výpočetní čas tak malý, že jeho čas výrazněji ovlivňuje momentální vytížení procesoru dalšími běžícími procesy. Čas výpočtu výrazně vzrostl s použitím většího bufferu. Ukazuje se, že čím větší je použitý buffer, tím větší vliv má na délku modelace také parametr Calculation directions. Při použití bufferu 100 m byl rozdíl mezi 8 a 16 zkoumanými směry zastínění 12,7 % resp.

10,6 %. Zato rozdíl mezi 64 a 128 zkoumanými směry byl už 43,3 % resp. 63,6 %. Je tedy zřejmé, že při výpočtech solárního potenciálu pro velká území se dá značná část výpočetního času ušetřit použitím menšího počtu zkoumaných směrů. Zato při zkoumání malého prostoru pouze jedné střechy je časový rozdíl zanedbatelný a je tedy lepší počítat s vyšší přesností.

Při hodnocení potenciálu obou střech z pohledu vhodnosti pro instalaci fotovoltaických systémů je dobré brát v úvahu také ideální podmínky jejich užití (Ludwig et al. 2009). První střecha nedosahuje v žádné části maximálního slunečního záření. Jak je vidět z výsledků práce, je to způsobeno především její blízkostí lesa, a tudíž vysokému zastínění. Ani její orientace a velikost nejsou pro takové využití ideální. Také druhá střecha podléhá zastínění. Přesto ale její jižní a západní části vykazují nadprůměrné hodnoty. Orientace střechy je vhodnější než u střechy první, také její plocha je větší. Proto by se o vhodnosti instalace fotovoltaických systémů dalo uvažovat. Je dobré vzít v úvahu také využití domu během roku. Vzhledem k tomu, že dům slouží celoročně jako penzion, mohl by využít letní záření, kdy je sluneční záření maximální. K zamyšlení je zde také možnost omezení okolní vegetace, za účelem zvýšení efektivity potenciálních solárních systémů.

Z výsledků práce se jeví jako ideální počet zkoumaných směrů zastínění pro většinu případů 32. Má již velmi přesné číselné i grafické odhady. Také výpočetní čas je ještě v přijatelných mezích. Stejný počet směrů zastínění používají k analýze solárního potenciálu také autoři tematické odborné literatury, jako např. (Kodysh et al. 2013) a (Fu et Rich 1999). Také podpora programu ArcGIS považuje takovou velikost Calculation directions za ideální, proto je také nastavena jako defaultní (ArcGis help 2014). Vždy je však rozhodnutí věcí lidského úsudku, jakou velikost parametru Calculation directions je potřeba v daném případě použít.

6 Závěr

Výsledky ukazují, že vliv parametru Calculation directions na výsledky není ve většině případů zásadní. Jeho vliv však roste s velikostí zkoumaného území, v tomto případě bufferu. Jako nevhodný se ukázal pouze minimální nastavitelný počet zkoumaných směrů zastínění – 8. Ze zkoumaných scénářů byla jeho odchylka výrazně vyšší než u ostatních, které se od sebe příliš nelišily. Při porovnání s použitím bufferu se jeho výsledek průměrného záření od nejpřesnějšího výpočtu lišil o 4,16 % resp. 2,22 %. Stejný rozdíl byl mezi těmito scénáři i u sumárního záření na střechu. Stejně tak u grafických odhadů je patrný rozdíl mezi tímto a ostatními scénáři. Oproti tomu kalkulace se 128 zkoumanými směry zastínění se již zdá jako zbytečná. Kromě hodnoty minimálního dopadajícího slunečního záření (které není pro instalaci solárních systémů zásadní) neměla výraznější vliv na přesnost údajů, zato výpočetní čas při použití bufferu výrazně rostl. Z výsledků práce se jeví jako ideální počet zkoumaných směrů zastínění pro většinu případů 32. Má již velmi přesné číselné i grafické odhady. Také výpočetní čas je ještě v přijatelných mezích. Stejný počet směrů zastínění považují za ideální také (Kodysh et al. 2013), kteří jej používají ke svým výpočtům. Parametr Calculation directions by měl být individuálně nastavován na základě požadované přesnosti výsledků, rozlišení vstupního DEM, topografické členitosti území, i s ohledem na časové nároky výpočtu.

7 Použitá literatura

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

ARCGIS HELP 10.1, 2012: Area Solar Radiation (Spatial Analyst), ArcGIS Resources, online:

<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z000000t5000000>, cit. 7.4.2017.

ARCGIS HELP 10.1, 2013: Creating raster DEMs and DSMs from large lidar point collections, ArcGIS Resources, online:

<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//015w0000004q000000>, cit. 6.4.2017.

ARCGIS HELP 10.2, 2014: Solar Radiation Graphics (Spatial Analyst), online:

<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//009z000000t7000000>, cit. 8.4.2017.

BALTSAVIAS E.P., 1999: Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54: 164-198.

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

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

FLOOD M., 2001: Lidar Activities and Research Priorities in The Commercial Sector, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34: 3-7.

FOGL M. et MOUDRÝ V., 2016: Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments, *Applied Geography* 66: 73-80.

FU P. et RICH P. M., 1999: Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales, online: http://professorpaul.com/publications/fu_rich_1999_esri.pdf, cit. 15.4.2017.

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

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

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

HAALA N., CRAMER M. et ROTHERMEL M., 2013: Quality of 3D point clouds from highly overlapping UAV imagery, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2: 183-188, online: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W2/183/2013/isprsarchives-XL-1-W2-183-2013.pdf>, cit. 10.4.2017

HIPPENSTIEL R. et BROWNSON J. R. S., 2012: Computing solar energy potential of urban areas using airborne LiDAR and orthoimagery, online: https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0296_full%20paper.pdf, cit. 6.4.2017.

HOEFLE B., 2010: "Airborne and Terrestrial Laser Scanning and geomorphology: possibilities, problems, and solutions", LiDAR Research Group, online: <http://www.laserdata.info/index.php?pageref=bericht&sid=589&fid=2143>, cit. 18.4.2017.

HOFIERKA J. et KAŇUK J., 2009: Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools, Renewable Energy 34: 2206–2214.

HOFIERKA J. et ŠŮRI M., 2002: The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications, Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference 2002 - Trento, Italy: 1-19.

- KANTERS J., WALL M. et KJELLSSON E., 2013: The solar map as a knowledge base for solar energy use, *Energy Procedia* 48: 1597–1606.
- KODYSH, J. B., OMITAOMU O. A., BHADURI B. L. et NEISH B.S., 2013: Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems. *Sustainable Cities and Society* 8: 31–41.
- LUDWIG D., LANIG S. et KLARKE M., 2009: Location analysis for solar panels by LiDAR-Data with Geoprocessing - SUN-AREA, *Environmental Informatics and Industrial Environmental Protection: Concepts, Methods and Tools*: 83-89.
- LUKAČ N., SEME S., DEŽAN K., ŽALIK B. et ŠTUMBERGER G., 2016: Economic and environmental assessment of rooftops regarding suitability for photovoltaic systems installation based on remote sensing data, *Energy* 107: 854-865.
- LUKAČ N., ŽLAUS D., SEME S., ŽALIK B. et ŠTUMBERGER DG., 2013: Rating of roofs' surfaces regarding their solar potential and suitability for PV systems, based on LiDAR data, *Applied Energy* 102: 803-812.
- MAY N. C. et TOTH C. K., 2007: Point Positioning Accuracy of Airborne LIDAR Systems: a Rigorous Analysis, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36: 107-111.
- PEREGO A., 2016: DEM (Digital Elevation Model), online: <http://www.alspergis.altervista.org/lezione/20-dem.html>, cit. 18.4.2017.
- RICH P.M., WOOD J., VIEGLAIS D.A., BUREK K. et WEBB N., 1999: *Guide to HemiView: software for analysis of hemispherical photography*, Delta-T Devices, Ltd., Cambridge, England.
- RUIZ-ARIAS J. A., TOVAR-PESCADOS J., POZO-VÁZQUEZ et ALSAMAMRA H., 2009: a comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain, *International Journal of Geographical Information Science* 23: 1049–1076.

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

SARRALDE J. J., QUINN D. J., WIESMANN D. et STEEMERS K., 2015: Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London, *Renewable Energy* 73: 10-17.

ŠÚRI M., HULD T. A., DUNLOP E. D. et OSSENBRINK H. A., 2007: Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries, *Solar Energy* 81: 1295–1305.

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

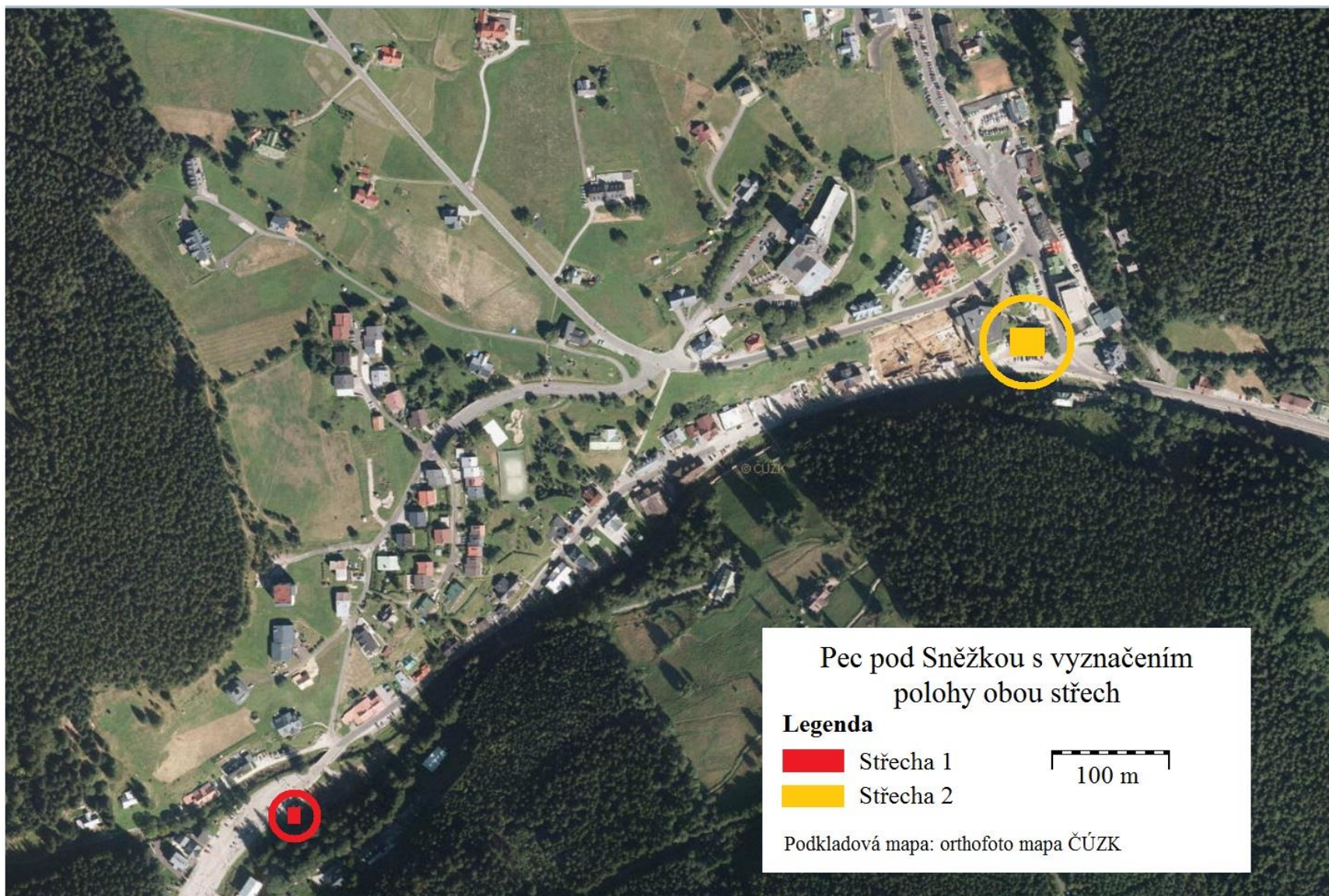
WAGNER W., ULLRICH A., MELZER T., BRIESE C. et KRAUS K., 2004: From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenge, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 35: 201-206.

ZHANG Y., LUNDBLAD A., CAMPANA P. E., BENAVENTE F. et YAN J., 2017: Battery sizing and rule-based operation of grid-connected photovoltaic-battery system: A case study in Sweden, *Energy Conversion and Management* 133: 349 - 263.

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

8 Přílohy **Chyba! Záložka není definována.**

1. Mapa Pece pod Sněžkou s vyznačením zkoumaných střech



Příloha č. 1: Mapa Pece pod Sněžkou s vyznačením zkoumaných střech