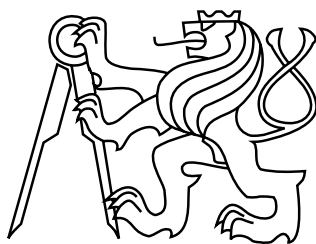


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
OBOR GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE
ANALÝZA VYUŽITELNOSTI SOLÁRNÍ ENERGIE
V MĚSTSKÉ ZÁSTAVBĚ

Vedoucí práce: Ing. Jiří Cajthaml, Ph.D.
Katedra mapování a kartografie

leden 2013

Iva BAMBULOVÁ

ZDE VLOŽIT LIST ZADÁNÍ

Z důvodu správného číslování stránek

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá modelováním slunečního záření prostřednictvím geografických informačních systémů a následnou analýzou vzniklých modelů. Cílem je vytvořit systém, který by na základě informací získaných z modelů solární radiace a podrobného modelu povrchu sloužil uživatelům jako pomůcka při určování energetického potenciálu jejich nemovitostí, pro účely instalace střešních solárních systémů. Analýza je provedena pro území části Prahy 6, na podkladě podrobného 3D digitálního modelu terénu, zástavby a zeleně a dat z meteorologických stanic.

KLÍČOVÁ SLOVA

difuzní, přímé a globální sluneční záření, obzorníkové souřadnice, zastínění, zemská atmosféra, 3D model povrchu, TIN, rastr

ABSTRACT

This thesis deals with GIS-based modelling of solar radiation and subsequent analysis of the created models. The aim is to develop a system which would, based on information gained from the solar radiation models and detailed surface model, serve to users as a device to assess the energetic potential of their buildings for the purpose of solar roof system installation. The analysis is performed for specified parts of Prague 6 district with inputs of 3D digital model of terrain, buildings and green vegetation.

KEYWORDS

diffuse, beam and global solar radiation, horizontal coordinates, shading, Earth's atmosphere, 3D surface model, TIN, raster

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Analýza využitelnosti solární energie v městské zástavbě“ jsem vypracovala samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu práce Ing. Jiřímu Cajthamlovi, Ph.D. za vedení této práce. Dále děkuji společnosti SportSoft za zapůjčení počítačů a Ing. Kamilu Staňkovi, Ph.D. za poskytnutí meteorologických dat.

Hlavní dík patří mým rodičům a mému partnerovi za velkou podporu během celého studia, bez které by tato životní kapitola nebyla uskutečnitelná. Děkuji.

Obsah

Úvod	8
1 Slunce jako zdroj energie	10
1.1 Sluneční záření	11
1.1.1 Extraterestrické sluneční záření	11
1.1.2 Vliv zemské atmosféry na sluneční záření	12
1.1.3 Terestrické sluneční záření	13
1.1.4 Propustnost atmosféry	14
1.2 Zdánlivý denní a roční pohyb Slunce	14
1.2.1 Poloha Slunce vůči pozorovateli	16
1.3 Možnosti využití sluneční energie	20
1.3.1 Fotovoltaické systémy	21
1.3.2 Termální solární systémy	22
2 Vstupní data a použitý software	23
2.1 Digitální model zástavby a zeleně hl. m. Prahy	23
2.2 Meteorologická data	24
2.3 Použitý software	26
3 Dosavadní projekty na toto téma	27
4 GIS modely slunečního záření	28
4.1 Solar Radiation Toolset (ArcGIS)	29
4.1.1 Princip výpočtu slunečního záření	30
4.1.2 Vzorce pro výpočet slunečního záření	34
5 Modelování solární radiace v ArcGIS	38
5.1 Příprava rastru terénu, zástavby a zeleně	38
5.1.1 Rastr terénu	39
5.1.2 Rastr budov	41
5.1.3 Rastr zeleně	44

5.1.4	Spojení dílčích rastrů	44
5.2	Konfigurace času	45
5.3	Odhad atmosférických parametrů	46
5.3.1	Kalibrace atmosférických parametrů	49
5.4	Stanovení parametrů pro výpočet map	52
5.5	Tvorba modelu dopadajícího slunečního záření	53
6	Ověření spolehlivosti vypočtených dat	56
7	Analýza využitelnosti solární energie	60
8	Prezentace vypočtených dat	64
	Závěr	67
	Použité zdroje	69
	Seznam příloh	72
A	Přílohy v tištěné formě	73
A.1	Návod přístupu k webové mapě	73
A.2	Modely pro přípravu rastru terénu	74
A.3	Modely pro přípravu rastru budov	76
A.4	Modely pro přípravu rastru zeleně	79
B	Přílohy v elektronické formě	80

Úvod

Obnovitelné zdroje energie se stávají čím dál více středem pozornosti. Může za to nejistá budoucnost zásob fosilních paliv a zvyšující se znečištění ovzduší. Mnoho měst v dnešní době zavádí různé programy, jimiž podporují své obyvatele ve využívání obnovitelných zdrojů energie v bytech a domech. Jedním z nich je například program Čistá energie Praha, který v hlavním městě probíhá již od roku 1994. Většina forem obnovitelných zdrojů je však nákladná a vyžaduje velké prostory. Výjimkou jsou pouze solární systémy, které lze instalovat i v malých měřítkách, v podobě střešních systémů.

Cílem této diplomové práce je navrhnout systém, který by občanům pomohl stanovit solární potenciál jejich nemovitosti a zároveň městům sloužil jako pomůcka při prosazování čisté energetické politiky.

Energetický potenciál místa závisí nejvíce na množství dopadajícího slunečního záření na daný povrch. Určení této hodnoty je při navrhování solárních systémů stěžejní, zároveň ale také problematické. Ačkoli jsou po světě rozmístěny tisíce meteorologických stanic, monitorujících solární radiaci, pro většinu oblastí nejsou přesná data dostupná. Pouhá interpolace staničních měření nezachycuje reálný stav, protože sluneční záření výrazně závisí na topografii povrchu a lokálních atmosférických podmínkách. Ani jeden z těchto aspektů se však v interpolovaných datech neuvažuje.

Ideální řešení pro takové oblasti představují GIS modely slunečního záření, které umožňují předpověď prostorové a časové proměnlivosti slunečního záření, uvažující topografii i lokální atmosférické vlivy.

Hlavní náplň této práce spočívá právě v tvorbě modelu slunečního záření v GIS. Jelikož nejde o příliš probádanou oblast, ke které by existovala dostatečná dokumentace, jedná se o jakýsi průzkum dostupných nástrojů a následnou aplikaci jednoho z nich na vzorovém území pokrývajícím část Prahy 6. Konkrétně jde o model ArcGIS Solar Radiation. V textu je věnována velká pozornost zejména přípravě vstupních parametrů výpočtu, na kterých stojí přesnost určených hodnot. Nechybí ani ohodnocení přesnosti a důvěryhodnosti vytvořeného modelu pomocí porovnání vypočtených dat s daty z meteorologických stanic na zpracovávaném území.

Vytvořený model solární radiace dále slouží jako hlavní podklad pro podrobnou analýzu solárního potenciálu budov ve zpracovávaném území, které je věnována samostatná kapitola.

Poslední část práce představuje popis navržené formy prezentace dat získaných analýzou. Snahou bylo sestavit přehlednou interaktivní webovou mapu s intuitivním ovládáním a poutavým designem, tak aby zaujala pozornost a donutila lidi přemýšlet o nových možnostech.

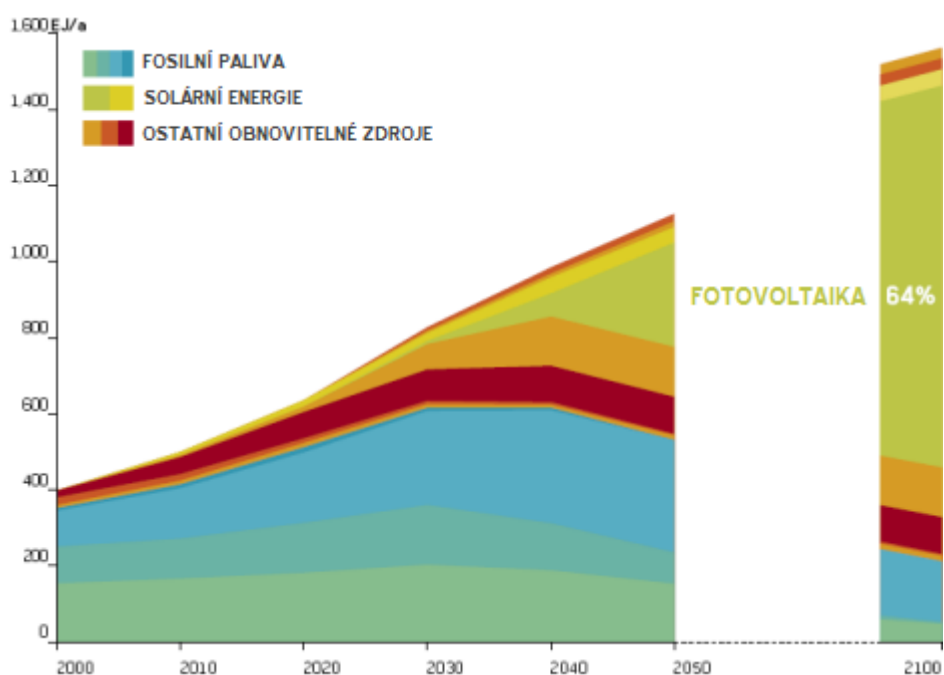
Kromě popisu tří zásadních etap uvedených výše text diplomové práce obsahuje teoretické základy, jejichž znalost je nutná pro pochopení celé problematiky a také popis vstupních dat, která byla pro účely práce získána.

1 Slunce jako zdroj energie

Od dob průmyslové revoluce začaly vyspělé národy využívat pro výrobu energie ve velkém množství fosilních paliv. Tento trend trvá do dnešních dob. Potřeba energie však spolu s technologickým vývojem a rostoucí životní úrovní nezadržitelně roste, což přináší pro lidstvo dvě zásadní úskalí.

Prvním problémem je, že zásoby ropy, zemního plynu, uhlí atd. nejsou nekonečné. Jejich potřeba se zvyšuje, ale jejich množství snižuje a v budoucnu tomu nebude jinak. Navíc největší ložiska fosilních paliv se nacházejí v zemích, které jsou poznamenány válečnými konflikty, jako např. země Blízkého východu. Ostatní státy jsou na dodávkách z těchto zemí bytostně závislé, což pro ně znamená velkou nejistotu a také hrozbu nestabilních cen.

Druhá věc je nepříznivý dopad užívání těchto zdrojů energie na životní prostředí. V současné době je velkým tématem globální oteplování, což se dává za vinu zejména dosavadnímu způsobu čerpání energie.



Obr. 1.1: Předpokládaný vývoj energetických zdrojů do roku 2100.

Řešení těchto problémů je spatřováno v návratu k obnovitelným zdrojům energie. Tyto zdroje přinášejí jistotu nevyčerpatelnosti, nezávislost a také minimální

ekologický dopad. V dnešní době je podíl obnovitelných zdrojů v celkové produkci energie relativně nízký. Evropské politiky ale začínají prosazovat strategie vedoucí k jejich výraznému rozšíření. Energetické studie prokazují, že se v obnovitelných zdrojích energie skrývá velký potenciál, viz obrázek 1.1.

Většina obnovitelných zdrojů - energie vody, biomasa, větrná energie, má svůj původ v energii slunečního záření. Výjimkou je pouze geotermální energie, jež pochází ze zemského jádra. Největší potenciál ve smyslu množství energie, které nám může poskytnout, má však přímé využití slunečního záření. Ročně dopadne ze Slunce na Zemi cca 10.000 krát větší množství energie, než je celková lidská potřeba.

1.1 Sluneční záření

Slunce je zdrojem téměř veškeré energie na naší planetě. Sluneční energie (sluneční záření, solární radiace) je výsledkem termonukleární reakce ve Slunci, při níž dochází k přeměně vodíku v hélium. Ze Slunce je tato energie vyzařována v podobě elektromagnetického záření. Spektrální složení slunečního záření se výrazně mění při průchodu atmosférou (více v kapitole 1.1.2).

Veličiny charakterizující sluneční záření

Dopadající sluneční záření se dá charakterizovat buď jeho množstvím nebo jeho intenzitou. Obvyklou jednotkou množství dopadající sluneční energie je kWh/m^2 . Je to úhrn záření v kW, které dopadne na plochu 1 m^2 za 1 hodinu. Intenzita slunečního záření je vyjadřována jednotkou W/m^2 .

1.1.1 Extraterestrické sluneční záření

Sluneční záření vně atmosféry má jinou intenzitu a jiné spektrální složení, než záření, které po průchodu atmosférou dopadá na zemský povrch. Extraterestrické záření charakterizuje tzv. sluneční konstanta, což je intenzita slunečního záření dopadajícího na plochu 1 m^2 kolmou ke slunečním paprskům ve střední vzdálenosti Země od Slunce (1 AU) vně zemské atmosféry. Její zavedená hodnota je $1367\text{ W}/\text{m}^2$. Ve skutečnosti se intenzita v průběhu roku mění.

1.1.2 Vliv zemské atmosféry na sluneční záření

Zemská atmosféra ochraňuje Zemi před nadměrným množstvím slunečního záření. Bez této ochrany by nebyl život na planetě Zemi možný. Množství dopadajícího slunečního záření v daném místě na Zemi závisí na

- síle ozonové vrstvy,
- vzdálenosti, kterou musí paprsky urazit skrze atmosféru,
- množství mlhoviny ve vzduchu (prachové částice, vodní pára, atd.),
- rozsahu oblačnosti.

Redukci solární radiace na její cestě k Zemi zajišťují tři atmosférické procesy - rozptyl, absorpce a odraz.

Rozptyl

Střet záření s molekulami plynu a malými částicemi způsobuje rozptyl slunečního záření do různých směrů. Velké množství slunečního záření je tímto způsobem nasměrováno zpět do vesmíru. Právě tento proces mimo jiné způsobuje, že je denní obloha modrá. Kdyby k atmosférickému rozptylu nedocházelo, obloha by i za dne zůstávala černá.

Absorpce

Absorpce způsobuje, že sluneční záření zachycené atmosférickou částicí se mění na teplo, které je částicí vyzařováno do okolí.

Odraz

Odraz je poslední proces, který výrazně ovlivňuje záření procházející atmosférou. Při tomto jevu je záření při interakci s atmosférickou částicí přeměrováno zpět, což znamená stoprocentní ztrátu radiace. Největší množství odraženého slunečního záření pochází od mraků ve stratosféře.

Kombinací atmosférického rozptylu, odrazu a absorpce dochází ke snížení množství dopadajícího záření na zemský povrch a také k výrazné změně jeho spektrálního složení. Na zemském povrchu je záření složeno zejména z viditelného světla, blízkého infračerveného záření (NIR) o vlnové délce 0,76 - 1,4 nanometrů a z malé části také blízkého ultrafialového záření.

1.1.3 Terestrické sluneční záření

Sluneční záření dopadající na zemský povrch sestává ze tří složek, přímého, difuzního a odraženého záření.

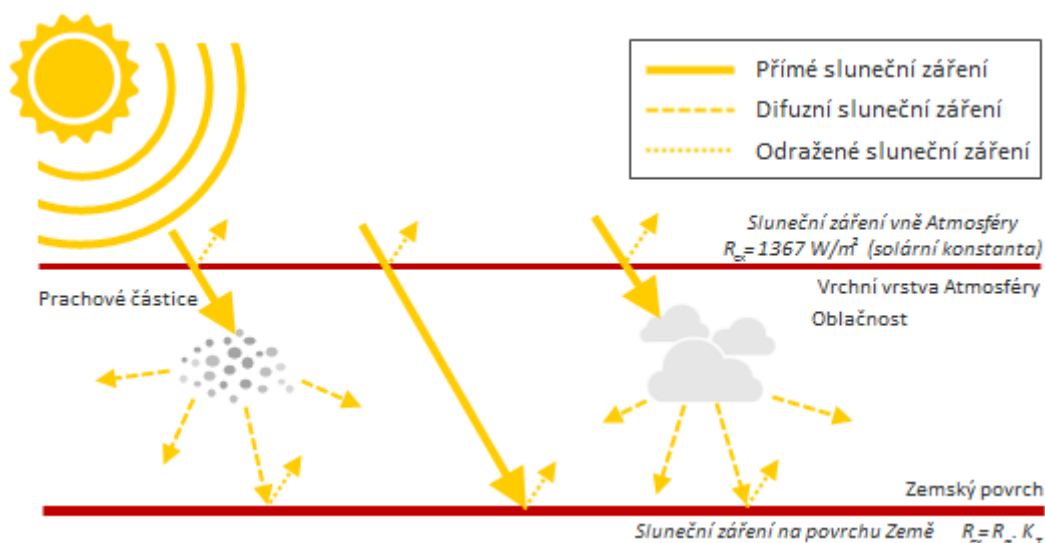
Přímé záření je ta část sluneční radiace, která dopadne na zemský povrch, aniž by byla cestou ovlivněna nějakým z atmosférických procesů. Záření, které během průchodu atmosférou ovlivní některé z atmosférických vlivů, zejména rozptyl, se nazývá difuzní sluneční záření a jeho síla je nižší než u přímého záření.

Podíl přímého a difuzního záření závisí na meteorologických podmínkách. Za jasného slunečného dne bude difuzní záření představovat maximálně 10 procent radiace. Při velké oblačnosti bude difuzní záření představovat většinu z celkové radiace.

Množství slunečního záření, které zůstane na zemském povrchu ke zpracování však není konečné ani po dopadu na zemský povrch. Poměrně velká část, přibližně 30 procent, je ztracena jeho odražením od samotného zemského povrchu. Množství takto ztraceného záření velmi závisí na odrazivosti zemského povrchu neboli albedu v daném místě zkoumání. Například polární oblasti mají velmi vysoké albedo, protože led a sníh odráží většinu záření, zatímco oceánské oblasti jsou pravým opakem, protože temné mořské hlubiny absorbují většinu z přijatého slunečního záření.

Globální sluneční záření

Celkové sluneční záření je charakterizováno jako globální záření. Je to součet přímé a difuzní radiace.



Obr. 1.2: Složky slunečního záření dopadajícího skrze atmosféru na zemský povrch.

1.1.4 Propustnost atmosféry

Propustnost atmosféry neboli „clearness index“ udává, jaké procento extraterestrického slunečního záření dopadá na zemský povrch. Je to tedy podíl globálního a extraterestrického záření dopadajícího na horizontální povrch.

$$K_T = \frac{R_g}{R_{Ex}} \quad (1.1)$$

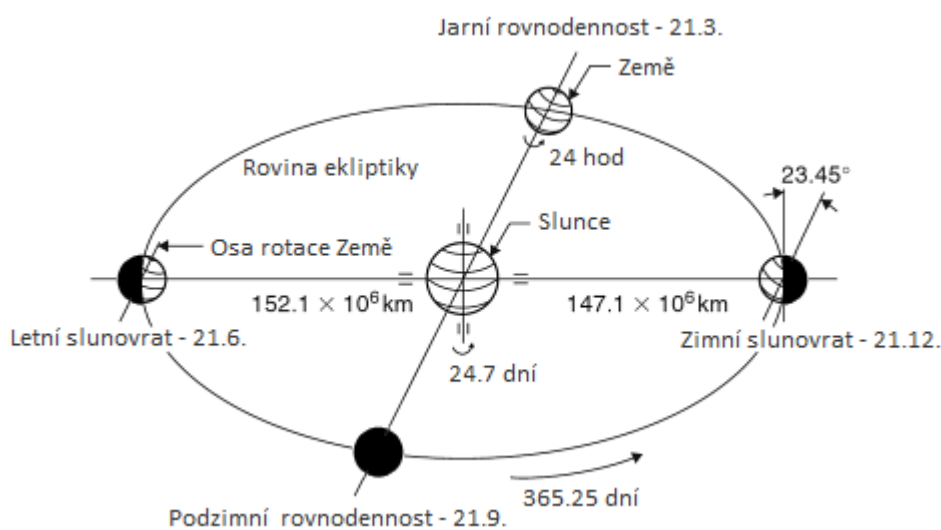
Hodnota K_T se určuje pro různé časové intervaly, zpravidla měsíce. Její hodnoty závisí na zeměpisné šířce a výrazně se mění v průběhu roku. Je velmi důležitým atmosférickým koeficientem při modelování sluneční radiace dopadající na zemský povrch.

1.2 Zdánlivý denní a roční pohyb Slunce

V důsledku pohybu Země po oběžné dráze a rotaci kolem osy se neustále během dne a roku mění poloha Slunce vůči pozorovateli. Tento zdánlivý pohyb Slunce po obloze způsobuje, že se v průběhu roku mění délka dne a noci, délka stínů, roční období, denní teplota a také poloha západu či východu Slunce na obzoru. Vyjmenované změny jsou klíčové pro množství dopadajícího slunečního záření a liší se v závislosti na zeměpisných souřadnicích.

Země obíhá kolem Slunce po ekliptice, což je mírně eliptická průsečnice roviny oběhu Země kolem Slunce (roviny ekliptiky) s nebeskou sférou, respektive zdánlivá dráha Slunce kolem Země. Světový rovník je vůči ekliptice nakloněn o úhel $23,5^\circ$ - sklon ekliptiky. Osa rotace Země je tedy vůči ekliptice odchýlena o $66,5^\circ$.

Zatímco změny způsobené změnou vzdálenosti od Slunce (díky eliptickému tvaru ekliptiky) jsou nepatrné, hlavní vliv na sezónní změny má měnící se úhel, pod kterým na Zemi dopadají sluneční paprsky, což je důsledkem sklonu ekliptiky.



Obr. 1.3: Roční pohyb Země kolem Slunce po ekliptice. Data rovnodenností a slunovratů jsou přibližná, v průběhu let se mírně mění.

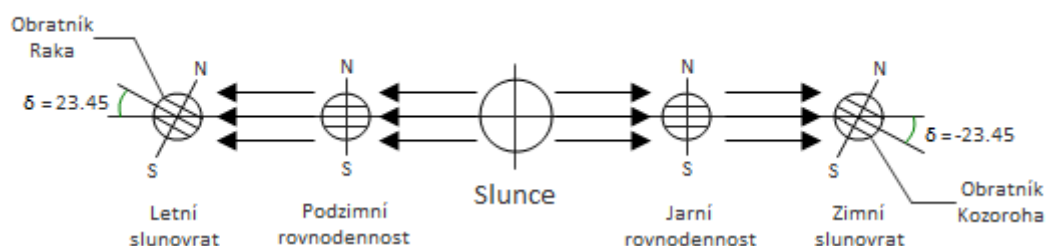
Vliv zdánlivého pohybu Slunce na změny podmínek na Zemi během roku nejlépe charakterizují čtyři speciální dny: jarní a podzimní rovnodennost a letní a zimní slunovrat. Tyto dny zároveň dělí rok do ročních období.

Při rovnodennosti se Slunce na své zdánlivé dráze dostává do místa zvaného jarní či podzimní bod. Jde o průsečíky roviny ekliptiky s rovinou světového rovníku. Sluneční paprsky v tento den dopadají na zemský povrch rovnoběžně s rovníkem. Slunce vychází všude na Zemi přesně na východě a zapadá přesně na západě. Den trvá stejně dlouho jako noc, až na drobnou odchylku způsobenou atmosférickou refrakcí slunečních paprsků. Při rovnodennosti nastává jaro či podzim.

Po rovnodennosti se Slunce vzdaluje od jarního či podzimního bodu. Postupně se mění délka i výška denního oblouku Slunce nad obzorem. Po jarní rovnodennosti

se prodlužuje den a Slunce se dostává výše nad obzor. Po podzimní rovnodennosti je to přesně naopak. Tak tomu je až do doby, kdy nastává letní či zimní slunovrat.

Při slunovratu Slunce dosáhne nejsevernějšího resp. nejjižnějšího bodu své pomyslné dráhy, tzv. obratníku Raka (letní slunovrat) či obratníku Kozoroha (zimní slunovrat). Jde o nejdelší či nejkratší den v roce. Na zemských pólech v tento den vrcholí polární den či noc. Při letním slunovratu nastává léto, při zimním zima.



Obr. 1.4: Variace sklonu slunečních paprsků během roku.

1.2.1 Poloha Slunce vůči pozorovateli

Pro určování polohy kosmických těles se využívají různé astronomické souřadnicové soustavy. Dělí se podle základních směrů a rovin, podle bodu, do kterého je vložen jejich střed atd. Výběr vhodné soustavy závisí na tom, vůči čemu má být poloha tělesa charakterizována. Pro možnost určení polohy Slunce vůči pozorovateli na zemském povrchu se používá soustava obzorníková neboli horizontální.

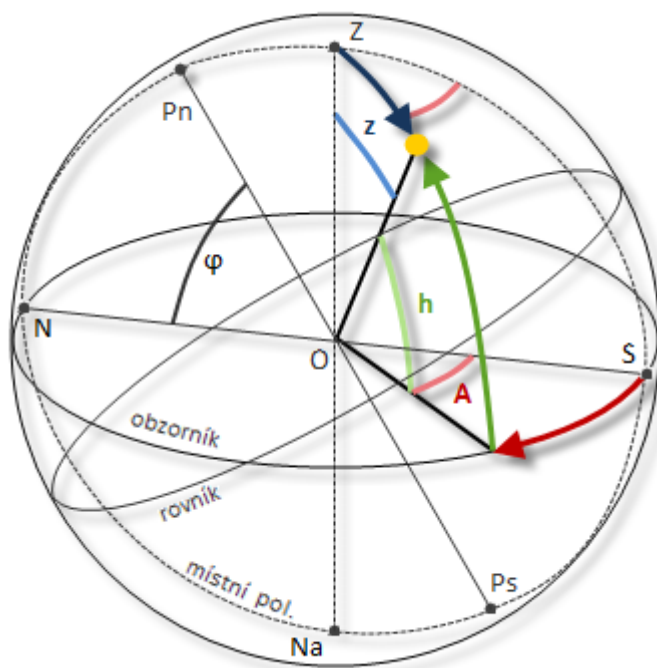
Obzorníková souřadnicová soustava

Základní rovinou obzorníkové souřadnicové soustavy je rovina horizontu, to znamená rovina kolmá na svislici procházející zenitem a nadírem v místě pozorování. Jde o soustavu topocentrickou, její střed je umístěn do pozorovacího stanoviště.

Poloha tělesa je v soustavě obzorníkových souřadnic dána astronomickým azimutem A a výškou h (případně zenitovou vzdáleností z). Výška h je úhel mezi rovinou obzorníku a směrem ke kosmickému tělesu. Nad horizontem je výška kladná, pod

horizontem záporná. Azimut je úhel, který svírá vertikální rovina proložená sledovaným tělesem s rovinou místního poledníku neboli se směrem k jihu (na severní polokouli). Některé zdroje však uvádějí směr k severu. Více v [2].

Obzorníkové souřadnice se neustále mění v důsledku rotace Země. Mění se také se změnou stanoviště. Jsou tedy závislé na zeměpisné šířce a délce.



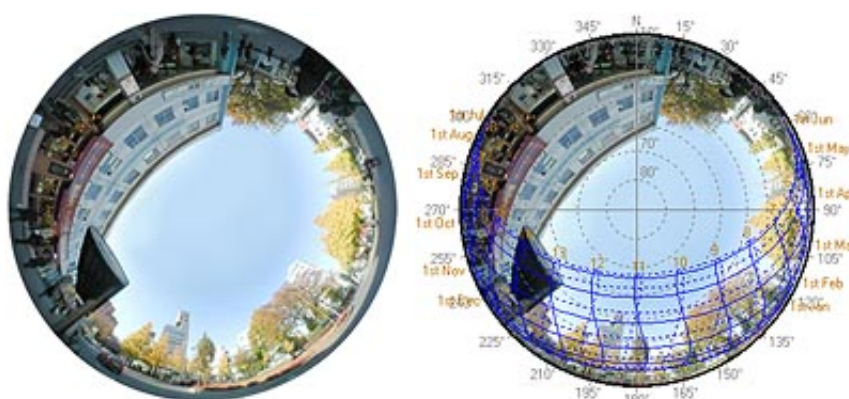
Obr. 1.5: Obzorníková souřadnicová soustava.

Sluneční diagram

Jak bylo dříve popsáno, zdánlivý pohyb Slunce je systematický a tím pádem i předvídatelný. Přesnou polohu Slunce lze pro daný den a čas vypočítat podle známých vzorců viz [2]. Tento proces je však relativně složitou a časově náročnou výpočetní úlohou. Nehledě na to, že v praxi, například ve stavebnictví, je zpravidla nutné analyzovat pohyb Slunce v průběhu celého roku a celých dní. Pro tyto praktické účely byly vyvinuty sluneční diagramy.

Sluneční diagram znázorňuje průmět Sluneční dráhy během roku do roviny obzorníku. Je z něho možné vyčíst polohu Slunce v obzorníkových souřadnicích pro

jakýkoli čas během roku. Astronomická výška Slunce h a azimut A jsou podle známých rovnic viz [2] funkcemi zeměpisné šířky φ , hodinového úhlu t a deklinace δ . Ve dvourozměrném grafu však mohou pro jejich vyjádření vystupovat pouze dva nezávislé parametry. Proto je běžnou praxí konstruovat sluneční diagramy pro konkrétní zeměpisnou šířku.



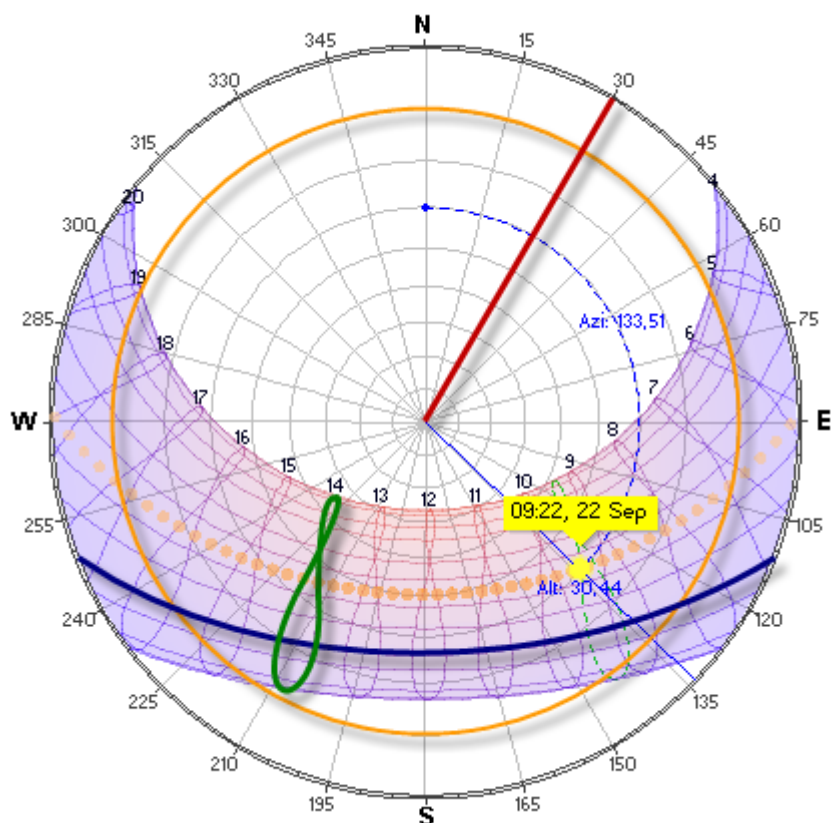
Obr. 1.6: Nejsnazší způsob, jak pochopit sluneční diagram je položit jej na fotografii oblohy, pořízenou rybím okem s rozsahem 180° směrem k zenitu.

Existuje mnoho druhů slunečních diagramů. Všechny jsou založeny na stejném principu, liší se pouze v druhu souřadnic (pravoúhlé nebo polární) a projekce (ortografická, stereografická, sférická atd.). Každý z nich má své výhody a nevýhody. Konstrukce stereografického diagramu je krok po kroku popsána v [3].

Pro pochopení slunečního diagramu je nutné vědět, co která linie v grafu znamená. Pro názornost je v obrázku 1.7 zvýrazněna vždy jedna linie pro každou skupinu základních komponent.

- azimutální linie - úsečky procházející středem kružnice s koncovými body na obvodu kružnice. Představují azimut Slunce v daný čas, v tomto případě počítaný od severu. Linie azimutu o hodnotě 30° je v grafu zvýrazněna vínovou barvou.
- výškové linie - soustředné kruhy představující výšku Slunce v daný čas. Vnější kruh představuje výšku rovnou 0° . Směrem ke středu výška narůstá až do hodnoty 90° . V tomto případě s intervalem 10° . Výšková linie pro 10° je v obrázku zvýrazněna oranžovou barvou.

- datumové linie - oblouky znázorňující dráhu Slunce po obloze v průběhu jednoho konkrétního dne v roce. Tyto linie bývají zpravidla vykresleny vždy pro první den měsíce. Pro ostatní dny se musí použít interpolace. V obrázku je modrou barvou zvýrazněn oblouk odpovídající datu 1. listopadu.
- hodinové linie - křivky, které reprezentují pozici Slunce v danou hodinu v průběhu celého roku. V obrázku je zelenou barvou označena křivka pro 14. hodinu.



Obr. 1.7: Základní komponenty slunečního diagramu demonstrovány na stereografickém diagramu pro zeměpisnou šířku $\varphi = 50^\circ$

Při určování obzorníkových souřadnic Slunce pomocí slunečního diagramu se postupuje následovně:

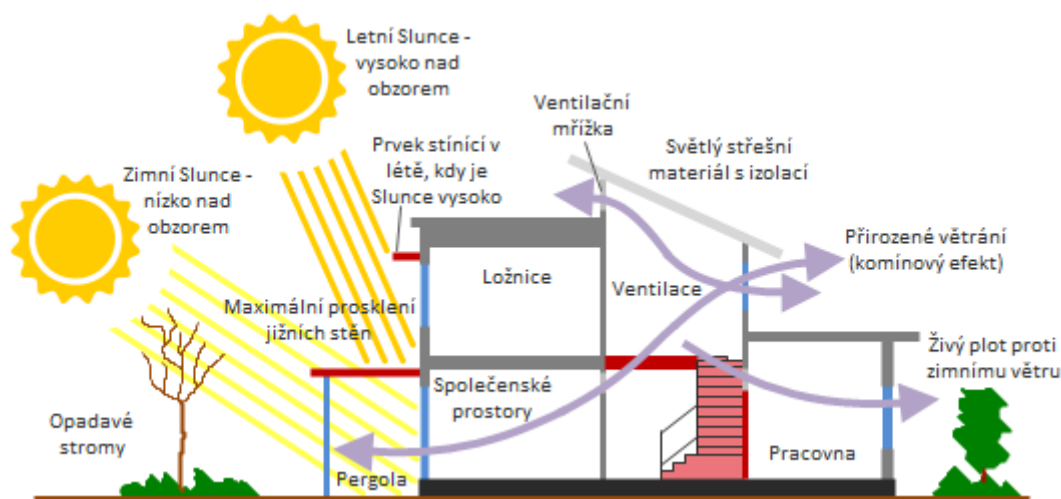
1. Vyhledá se hodinová linie odpovídající požadovanému času a datumová linie pro požadovaný den.
2. Nakreslí se přímka procházející středem diagramu a průsečíkem odpovídající hodinové a datumové linie. Výsledkem je azimutální linie. Azimut Slunce odpovídá hodnotě této linie.
3. Nakreslí se kružnice se středem ve středu diagramu a procházející průsečíkem hodinové a datumové linie. Výsledkem je výšková linie, jejíž hodnota odpovídá výšce Slunce v hledaný okamžik.

Protože jsou v diagramu uváděny zpravidla jen celé hodiny a první dny měsíce, je nutné použít interpolaci. Příklad je uveden v obrázku 1.7, kdy je určována poloha Slunce v 9:22 dne 22.9.

1.3 Možnosti využití sluneční energie

Solární energii lze využívat buď pasivně nebo aktivně. Pasivním využitím se rozumí principy solární architektury. Tzv. solární domy jsou navrhovány tak, aby samostatně a výhodně hospodařily s přijímaným slunečním zářením a tím snižovaly potřebu umělého vytápění v zimním a klimatizace v letním období. Základními prvky jsou velké prosklené plochy či tepelně akumulární stěny orientované na jih, výsadba opadavé zeleně v blízkosti objektu, pergoly a zimní zahrady, které v létě, kdy je Slunce vysoko nad obzorem zastíňují okna a v zimních měsících nebrání slunečním paprskům v průchodu do budovy.

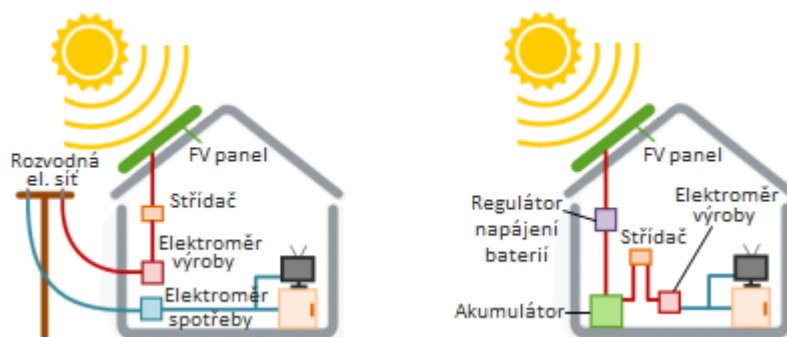
Aktivní využití sluneční energie je realizováno pomocí speciálních technických zařízení, která sluneční energii přemění buď na teplo (termální solární systémy) nebo na elektrickou energii (fotovoltaické systémy).



Obr. 1.8: Ukázka technik využívaných v pasivní solární architektuře.

1.3.1 Fotovoltaické systémy

Fotovoltaické systémy slouží k výrobě elektrické energie. Systém tvoří panely složené z fotovoltaických článků, které pomocí tzv. fotovoltaického jevu mění energii slunečního záření přímo na elektřinu.

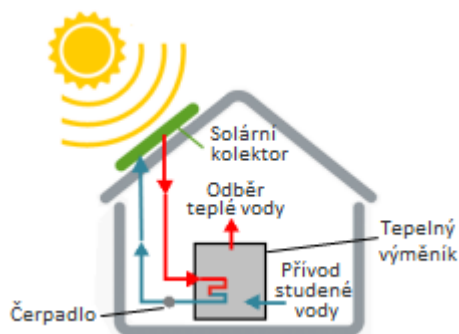


Obr. 1.9: Schéma střešního fotovoltaického systému připojeného na rozvodnou síť (vlevo) a ostrovního systému (vpravo).

Systém může být napojen na rozvodnou elektrickou síť, tzv. „grid-connected“ systém. V takovém případě je vyrobená energie podle potřeby buď spotřebována nebo odvedena do sítě. To je případ malých střešních systémů v městských oblastech nebo velkých fotovoltaických elektrárn. V místech odlehlých od civilizace, kde není k dispozici elektřina ze sítě se používá systém „off-grid“, neboli ostrovní systém, který je samostatný a přebytečnou energii ukládá do akumulátorů pro pozdější využití.

1.3.2 Termální solární systémy

Termální solární systémy přeměňují sluneční záření na tepelnou energii. Využívají se k vytápění budov, ohřevu teplé užitkové vody a bazénů. Je možné je použít i pro ochlazování klimatizací. Zařízení, které absorbuje sluneční záření se nazývá solární kolektor (panel). Ten spolu s řadou přídatných prvků tvoří solární systém vytvářející tepelnou energii.



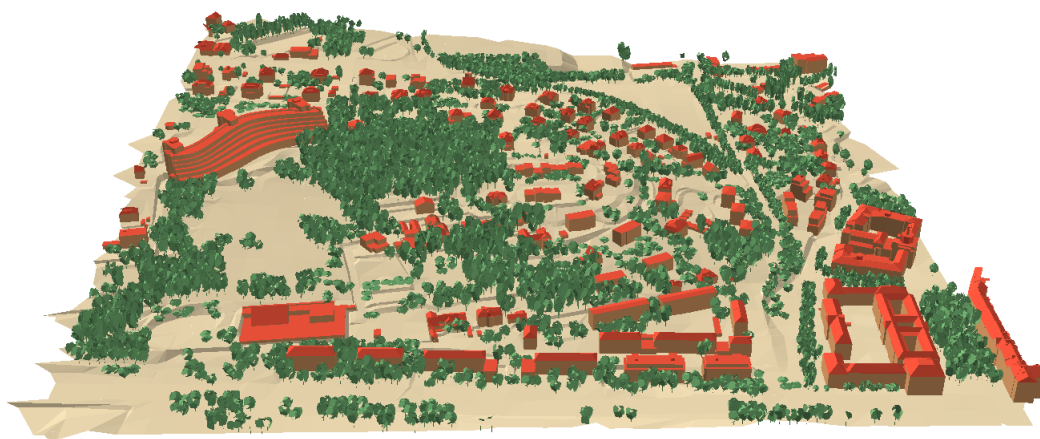
Obr. 1.10: Schéma solárního termálního systému.

2 Vstupní data a použitý software

2.1 Digitální model zástavby a zeleně hl. m. Prahy

Hlavním podkladem pro takovýto projekt je podrobný 3D model povrchu města, včetně budov a nejlépe i včetně zeleně. Taková data jsou však relativně vzácná a pokud jsou k dispozici, jejich cena bývá vysoká. Hledání vhodných podkladů nakonec dospělo ke zdárnému konci. Byla nalezena možnost bezplatného poskytnutí kvalitního 3D modelu zástavby a zeleně hl.m.Prahy.

3D model byl vytvořen firmou GEODIS na základě zpracování leteckých snímků hl. m. Prahy fotogrammetrickou metodou. Jeho tvorba začala roku 2000 a byla prováděna po etapách. V současné době je digitální model zástavby a zeleně kompletní, pokrývá celé území hlavního města. Data, kromě zeleně, jsou průběžně aktualizována.



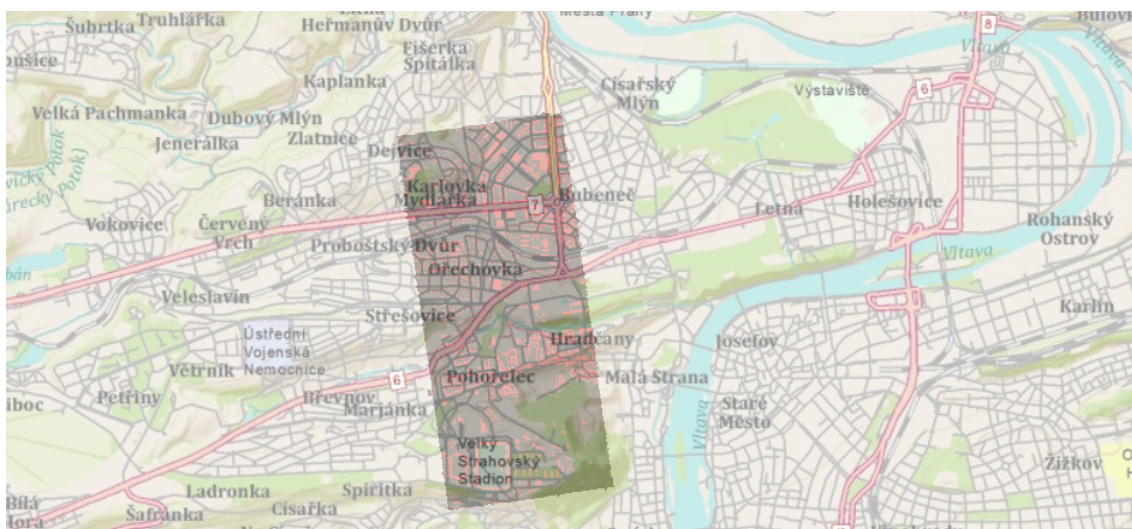
Obr. 2.1: Ukázka části digitálního modelu zástavby a zeleně hl. m. Prahy.

Model byl tvořen v programu MicroStation a posléze exportován do dalších formátů. Pro účely této práce byl použit formát ESRI shapefile. Celý model se skládá ze 4 dílčích souborů - polygonové shapefile obsahující budovy, terén, zeleň a mosty. Budovy jsou atributově rozčleněny podle typu ploch do osmi skupin - svislé obvodové plochy, vodorovné střešní plochy, šikmé střešní plochy, dílčí plochy kruhových střešních ploch, vikýře a střešní nástavby, komíny, význačné věže na střeše, výtahy a větrání a klimatizace. Jako třídící atribut slouží atribut „Color“. Každá budova

v modelu obsahuje kromě střechy úplný počet stěn. Jsou zpracovány nadstavby a vikýře širší než 2 m, komíny vyšší než 2 m a na zdech výstupky větší než 0,7 m.

Tvorbu a správu 3D modelu zajišťuje Ústav rozvoje hlavního města Prahy (ÚRM) a data prezentuje prostřednictvím Geoportálu Praha. Studentům vzdělávacích institucí poskytuje ÚRM data bezplatně na základě písemné žádosti potvrzené školou.

Pro tuto práci byl na vyžádání poskytnut výřez dat pokrývající oblast o rozloze 3,2 x 1,5 km. Výběr oblasti byl zásadní, vzhledem k podstatě následujícího zpracování a analýz. Důležité bylo vybrat co nejrozmanitější oblast, aby analýza pokrývala všechny druhy domů (vysoké blokové činžovní domy, rodinné vily se zahradami, panelové domy atd.) a zeleně. Druhé kritérium bylo, aby se ve vybrané oblasti nacházely alespoň 2 meteostanice, pro možnost zhodnocení výsledků analýz. A třetí důležitou podmínkou byl co nejvíce členitý a kopcovitý terén. Všechny tyto podmínky ideálně splňuje oblast, která je studentovi ČVUT nejbližší, viz obrázek 2.2.



Obr. 2.2: Rozsah dat digitálního modelu zástavby a zeleně hl. m. Prahy obdržенých od ÚRM pro tuto DP.

2.2 Meteorologická data

Pro ověření důvěryhodnosti výstupů analýz bylo zapotřebí získat data o množství slunečního záření ve sledované lokalitě. Ještě před pořízením DMZZ byla provedena

rešerše amatérských i profesionálních meteorologických stanic na území Prahy a také dostupnosti jejich dat. Jako dobré řešení se zdálo využít meteostanici na Strahově a dat z pyranometru na střeše budovy Fsv ČVUT. Data z ČVUT však nakonec nebyla dostupná. Po konzultaci s Ing. Kamilem Staňkem (k124), provozujícím fotovoltaickou laboratoř (FVLab) na Fsv, bylo rozhodnuto, že je možné data z ČVUT nahradit daty z meteostanice ČHMÚ Karlov, kterými katedra konstrukcí pozemních staveb disponuje. Hodnoty radiace by měly být obdobné, jedná-li se o horizontální povrch, kterému nic nestíní.

Data z meteorologické stanice ČHMÚ Karlov

Meteorologická stanice Praha - Karlov je profesionální stanice Českého hydrometeorologického ústavu. Byla zřízena roku 1920. Je umístěna na budově Fyzikálního ústavu MFF UK v Praze na Karlově.

Data solární radiace z meteostanice ČHMÚ Karlov byla získána jako náhrada za data z ČVUT od Ing. Kamila Staňka, Ph.D. z katedry konstrukcí pozemních staveb. Jedná se o hodnoty pro ročníky 2006 - 2010 měřené s hodinovým intervalem. Kromě globální radiace jsou v datové sadě uvedeny i hodnoty difuzního a přímého záření zvláště a také extraterestrického záření, což jsou údaje, které lze jinak získat velmi obtížně. Nedostupnost dat z ČVUT se nakonec ukázala být spíše výhodou.

Data z meteorologické stanice Strahov

Klub studentské unie ČVUT Silicon Hill zřídil v roce 2010 na Strahově poloprofesionální meteostanici Davis Vantage Pro2. Je umístěna na střeše bloku č.4. Stanice měří teplotu a relativní vlhkost vzduchu, směr a rychlost větru, srážkový úhrn, tlak, intenzitu slunečního a UV záření. Data jsou nepřetržitě snímána a odesílána na server *weather.siliconhill.cz*, kde jsou zdarma zpřístupněna všem uživatelům. Na tomto serveru jsou rovněž k dispozici historická data, která lze stáhnout ve formátu textového souboru. Hodnoty jsou zaznamenávány v pětiminutovém intervalu.

Pro účely této práce byla použita data intenzity slunečního záření v roce 2012. Z pětiminutových dat byla vypočtena denní data množství slunečního záření a z denních dat měsíční úhrny.

2.3 Použitý software

Pro komplexnost a možnost automatizace výpočtů byla snaha navrhnout postup proveditelný jedním programem. Před zahájením práce byl tedy proveden průzkum, které systémy by toto řešení umožňovaly. Pro autorku bylo nejschůdnější cestou použít ArcGIS, vzhledem ke zkušenostem s tímto programem. Tato volba přinesla výhody i při návrhu prezentace vypočtených dat. Výsledky bylo možné jednoduše a efektně prezentovat na internetu v prostředí ArcGIS Online. Většina práce byla provedena ve verzi ArcGIS 10.1, pouze pro časově velmi náročnou tvorbu modelů solární radiace musely být použity 4 další počítače, na nichž byla nainstalována verze 9.3. Toto přineslo nečekané problémy, více v kapitole 6.

3 Dosavadní projekty na toto téma

Téma této diplomové práce bylo inspirováno produktem, který na svých webových stránkách nabízí evropská firma Blom, zabývající se sběrem a zpracováním přesných geoprostorových dat. Žádné postupy ani ukázky výsledků nebyly k dispozici, jedná se o komerční produkt, podrobnosti jsou firemním tajemstvím.

V rámci České republiky nebyly nalezeny jiné komerční ani nekomerční projekty s tímto záměrem.

V celosvětovém měřítku se již podařilo nalézt několik projektů s podobnou myšlenkou. Nejzdařilejším se zdá být projekt „The Solar Boston Map“. Tento projekt zaštiťuje město Boston a jeho posláním je dostat do povědomí obyvatel města, jaký potenciál se skrývá ve sluneční energii v místě jejich bydliště a také posloužit jako pomůcka při plánování solárních systémů. Jedná se o interaktivní online mapu dostupnou na těchto internetových stránkách [http : //gis.cityofboston.gov/SolarBoston](http://gis.cityofboston.gov/SolarBoston). Spolu s ní město vydalo jakýsi návod, jak postupovat při plánování a pořizování solárních systémů.

Odlišný koncept se stejnou tematikou nabízí projekt PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Jde o projekt Evropské unie, vyvinutý v Joint Research Centre. Je dostupný široké veřejnosti v podobě webové služby na adrese [http : //re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php). PVGIS má k dispozici databázi meteorologických dat z celé Evropy od roku 1995 a na jejich základě je schopen modelovat množství dopadajícího slunečního záření v průběhu dne a roku a množství vyprodukované el. energie fotovoltaickým systémem, je nutné zadat pouze lokalitu a vlastnosti systému. Pro modelování slunečního záření se v PVGIS využívá modelu *r.sun*, viz kapitola 4.

PVGIS je asi nejpoužívanější pomůckou při projektování solárních systémů v rámci Evropy.

4 GIS modely slunečního záření

V globálním měřítku jsou změny intenzity a množství slunečního záření, způsobené rotací Země kolem své osy a ročním pohybem kolem Slunce, dobře známé a předvídatelné. Závisí pouze na zeměpisné šířce. V menších měřítkách je zásadním faktorem, upravujícím rozdělení sluneční radiace, topografie. Nadmořská výška, orientace, sklon, zastínění okolními objekty, lokální atmosférické podmínky, to vše utváří konečnou podobu slunečního záření dopadajícího na zemský povrch.

Pro většinu aplikací a projektů jsou zapotřebí přesné mapy slunečního záření, které uvažují výše vyjmenované aspekty, globální předpověď nestačí. Tak je tomu i u solárních systémů, jenž jsou předmětem této práce.

Ačkoli po celém světě existuje nespočet meteorologických stanic, monitorujících kromě jiného i sluneční záření, pro většinu území nejsou k dispozici přesná solární data. Interpolace dat pro území mezi stanicemi totiž nedává přesné výsledky, insolace je silně ovlivněna lokální topografií, která je při interpolaci ignorována.

Ideálním způsobem pro předpověď chování slunečního záření v takovýchto územích je využití modelů slunečního záření integrovaných v geografických informačních systémech. Tyto modely poskytují rychlé, nenákladné a přesné odhady solární radiace pro jakékoli území a měřítko a uvažují jak topografii, tak lokální atmosférické podmínky.

Různé modely sluneční radiace založené na GIS

Jedním z prvních GIS modelů slunečního záření byl *SolarFlux* (Dubayah and Rich 1995, Hetrick et al 1993). Byl vyvinut v roce 1995 pro ARC/INFO a GRID. Další model pro výpočet všech tří složek solární radiace byl realizován jako samostatný program *Solei*, fungující pod MS Windows. *Solei* byl propojitelný s GIS software IDRISI. Výše uvedené modely byly založeny na jednoduchých empirických vzorcích, které nebyly vhodné pro výpočty na větších územích.

Mnohem propracovanější metody jsou implementovány ve třech modelech, které se používají v dnešní době. *SRAD* model (Wilson and Gallant 2000, McKenney et al 1999) byl navržen pro modelování krátkovlnného i dlouhovlnného záření při

průchodu atmosférou a dopadu na zemský povrch. Tento model není příliš vhodný pro velká teritoria.

Model *r.sun* je volně dostupný a je implementován v open source prostředí GRASS GIS. Je používán i v projektu PVGIS, který byl zmíněn v kapitole 3.

V této práci je využíván Solar Radiation Toolset, sada nástrojů nadstavby ArcGIS Spatial Analyst, který je založen na modelu Solar Analyst (Fu and Rich 2000). Detailní popis je uveden v kapitole 4.1.

4.1 Solar Radiation Toolset (ArcGIS)

Nástroje pro analýzu slunečního záření v nadstavbě ArcGIS Spatial Analyst umožňují mapování a analýzu solární radiace pro danou geografickou oblast a specifikované období. Při výpočtech jsou uvažovány atmosférické podmínky, sklon a orientace povrchu, zeměpisná šířka a nadmořská výška oblasti, zdánlivý denní a roční pohyb Slunce a zastínění okolními topografickými objekty. Výstupy mohou být jednoduše integrovány s dalšími GIS daty.

Sada nástrojů Solar Radiation obsahuje 3 nástroje:

- Area Solar Radiation, určený k výpočtu slunečního záření na celém území. Vstupním souborem je rastr povrchu daného území a výstupem je model slunečního záření pro celou tuto oblast. Výpočet je proveden pro každý pixel vstupního rastru.
- Point Solar Radiation, používaný k výpočtu solární radiace pouze pro daná místa. Do výpočtu vstupuje rovněž rastr povrchu, a navíc bodový shapefile. Hodnoty solární radiace jsou určeny pouze pro dané body, a to na základě topografie povrchu z rastru.
- Solar Radiation Graphics. Jde o vedlejší nástroj. Generuje speciální rastry, které program interně používá při výpočtech přímého, difuzního a globálního záření v předchozích dvou nástrojích. Výsledky jsou mapa viditelnosti, mapa pohybu Slunce a mapa oblohy.

4.1.1 Princip výpočtu slunečního záření

Nástroj Solar Radiation může provádět výpočty pro místa daná body (Point Solar Radiation) nebo pro celou oblast, kterou pokrývá vstupní model povrchu (Area Solar Radiation). Při výpočtu globální radiace je uvažováno přímé a difuzní záření, odražené je ignorováno.

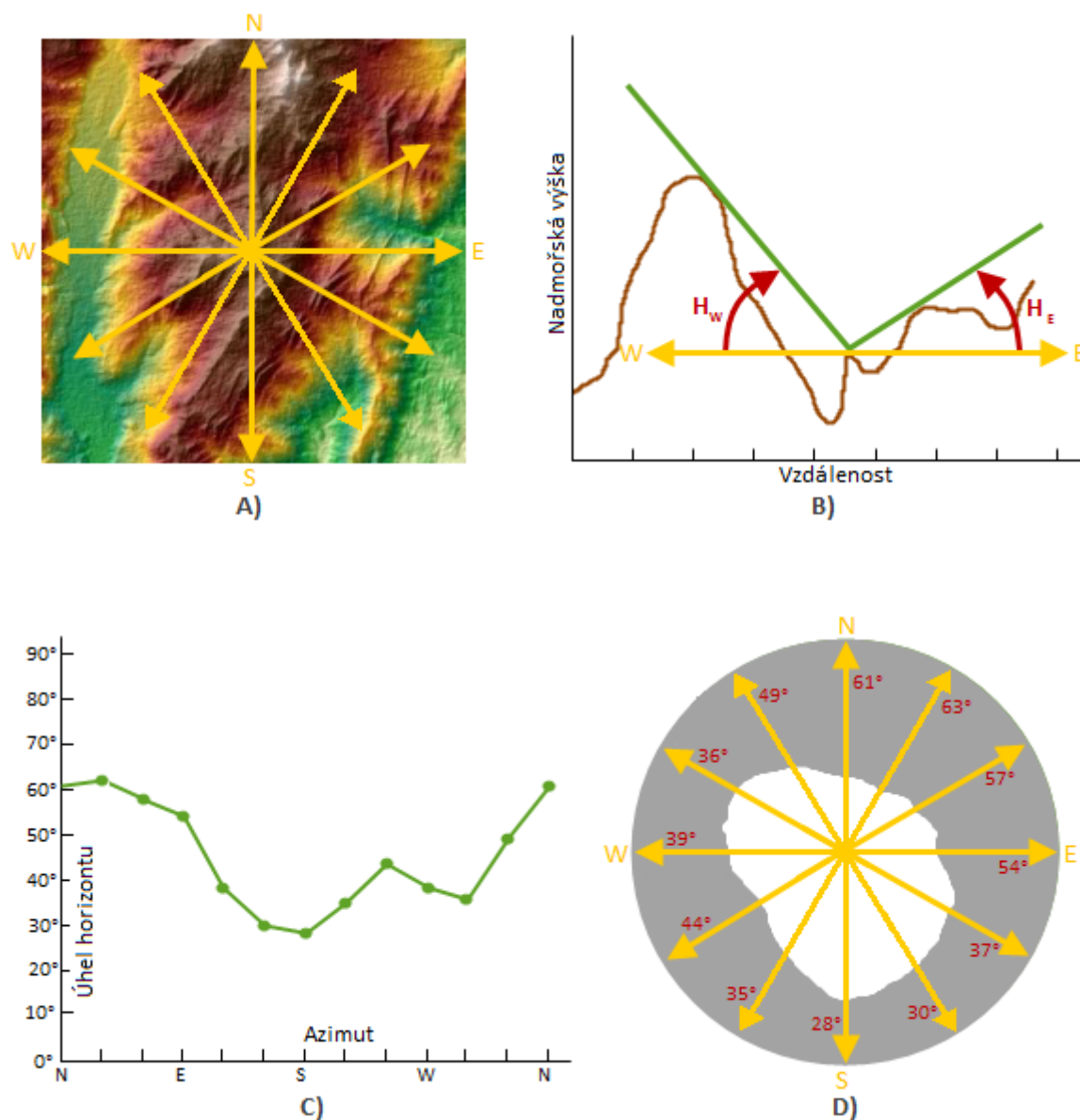
Výpočet je založen na hemisférickém algoritmu viditelnosti (Rich 1989, a Rich et al. 1994) a skládá se ze 4 základních kroků:

1. Výpočet hemisférické mapy viditelnosti oblohy ve směru k zenitu, založený na topografii místa.
2. Výpočet mapy slunečního pohybu a její překrytí mapou viditelnosti, čímž se určí hodnota přímého záření.
3. Výpočet mapy oblohy a její překrytí mapou viditelnosti, čímž se určí hodnota difuzního záření.
4. Opakování tohoto procesu pro všechna místa zájmu, tj. u Area Solar Radiation pro každý pixel vstupního rastru a u Point Solar Radiation pro každý bod vstupního shapefile.

Výpočet mapy viditelnosti

Protože radiace je výrazně ovlivňována okolními objekty a topografií, klíčovým krokem celého výpočtu je tvorba hemisférické mapy viditelnosti oblohy, která reprezentuje, jaká část oblohy je z daného místa viditelná a která je zakryta okolními objekty. Takovou mapu je možné si představit jako fotografii, pořízenou fotoaparátem typu „rybí oko“ s rozsahem 180° směrem k zenitu. Princip znázornění a způsob projekce je totožný se slunečním diagramem, popsáným v kapitole 1.2.1.

Viditelnost je určena vytyčením specifikovaného počtu směrů kolem místa zájmu a určením maximálního úhlu zakrytí oblohy, nazývanému též úhel horizontu. Pro všechny ostatní směry se úhel horizontu dopočítá interpolací. Vypočtené směry jsou z prostorové hemisféry stereograficky projektovány na plochu, obdobně, jako u slunečního diagramu (viz kapitola 1.2.1). Tím vznikne kruhová mapa viditelnosti oblohy.



Obr. 4.1: Ukázka výpočtu mapy viditelnosti pro jeden pixel rastru. A) Vytýčení daného počtu směrů kolem místa zájmu. B) Určení úhlu horizontu pro směry na východ a na západ. Tímto způsobem se určí úhel H pro všechny vytýčené směry. C) Interpolace úhlů horizontu pro mezilehlé směry. D) Výsledná mapa viditelnosti po projekci úhlů horizontu do 2D souřadnicového systému. Šedá plocha reprezentuje směry, které nejsou viditelné, bílá značí viditelnou oblohu. Čísla představují hodnoty úhlů horizontu, souhlasí s grafem C).

Každému pixelu je přiřazena hodnota 1 či -1, podle toho, jestli je v daném směru obloha viditelná či nikoli. Mapa je založena na stejném principu, jako sluneční diagram (viz kapitola 1.2.1). Poloha pixelu rovněž odpovídá obzorníkovým souřadnicím - azimutu A a v tomto případě zenitovému úhlu z (tj. doplňku výškového úhlu h).

Velikost mapy viditelnosti a počet směrů, z nichž se určuje úhel horizontu jsou vstupními parametry nástroje. Na jejich volbě výrazně závisí přesnost výsledku. Je nutné uvažovat, jakého charakteru je povrch daného území. V případě členitého terénu nebo obsahuje-li model povrchu i budovy a zeleň, je potřeba zvolit co největší počet výpočetních směrů i velikost mapy. S většími parametry se však znatelně prodlužuje doba výpočtu.

Výpočet mapy pohybu Slunce

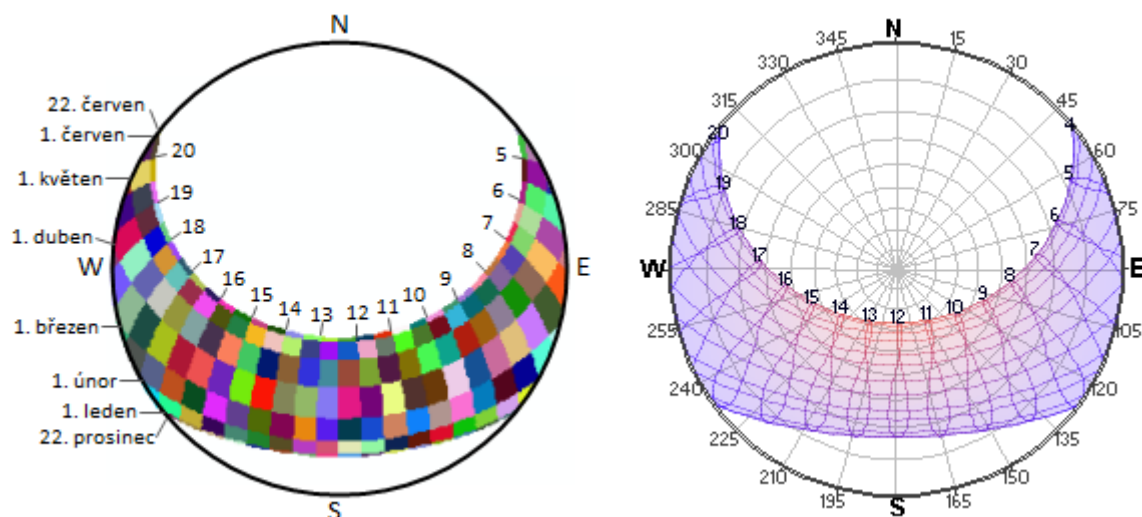
Mapa pohybu Slunce ve stejné hemisférické projekci jako mapa viditelnosti slouží k výpočtu přímého slunečního záření, které dopadá do daného místa ze všech směrů.

Jde o přesnou analogii ke slunečnímu diagramu, popsánému v kapitole 1.2.1 (viz obrázek 4.2). Počet sektorů je dán časovou konfigurací, kterou volí uživatel. Pro každý sektor zvlášť je určena hodnota solární radiace.

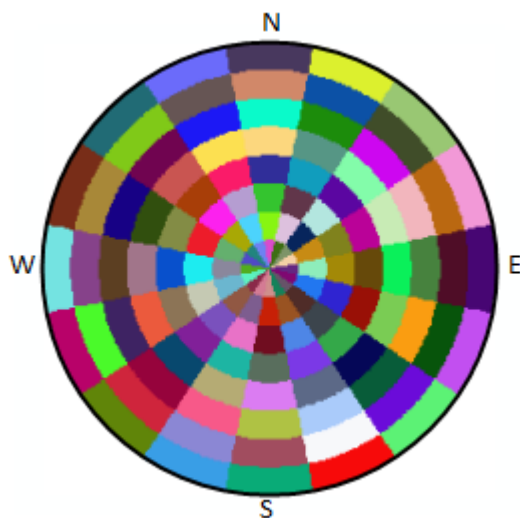
Výpočet mapy oblohy

Na rozdíl od přímého záření, které přichází pouze ze směrů daných dráhou Slunce nad obzorem, difuzní záření pochází ze všech směrů. To je způsobeno atmosférickým rozptylem paprsků na cestě k zemskému povrchu (viz kapitola 1.1.2).

Mapa oblohy znázorňuje celou oblohu rozdělenou do zvoleného počtu sektorů, definovaných zenitovým úhlem a azimutem. Difuzní radiace je počítána ze všech sektorů, na základě jejich obzorníkových souřadnic.



Obr. 4.2: Mapa pohybu Slunce, vygenerovaná programem ArcGIS pro zeměpisnou šířku $\varphi = 50^\circ$, pro období od zimního do letního slunovratu, s intervalem 1 měsíc a 0,5 hodiny. Jeden sektor mapy odpovídá 1 měsíci a 0,5 hodiny. Pro možnost porovnání je zobrazen i sluneční diagram pro tutéž zeměpisnou šířku (vpravo).

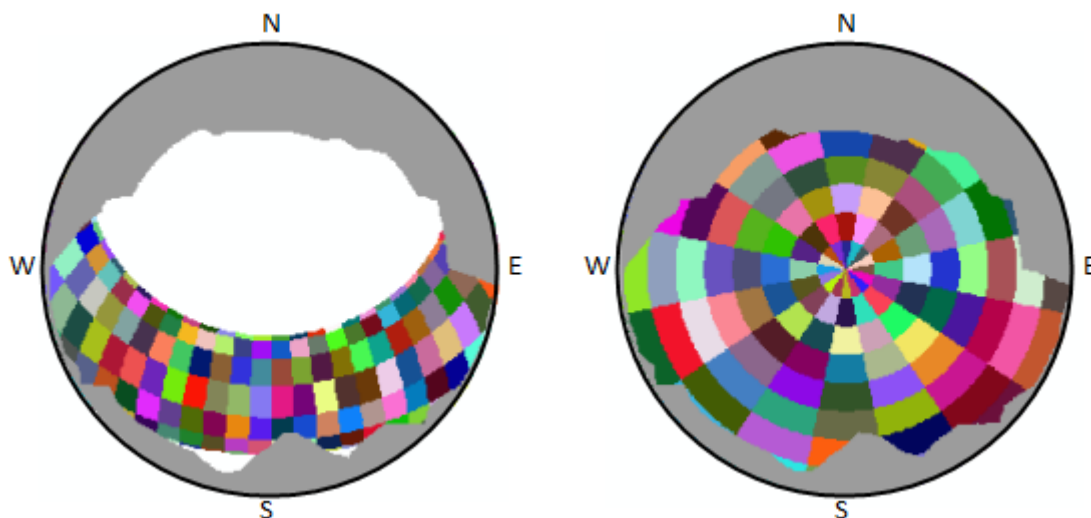


Obr. 4.3: Mapa oblohy vypočtená programem ArcGIS o 24 azimutálních a 24 zenitových sektorech.

Překrytí mapy slunečního pohybu a oblohy mapou viditelnosti

Mapy slunečního pohybu a oblohy znázorňují přímé resp. difuzní záření přicházející ze všech možných směrů. Ve skutečnosti je ale místo zájmu částečně zastíněno okolními objekty. Zastínění znázorňuje mapa viditelnosti.

Ke konečným hodnotám přímé a difuzní složky slunečního záření se dojde překrytím mapy slunečního pohybu a mapy oblohy mapou viditelnosti. Výsledné globální sluneční záření se rovná součtu přímého a difuzního záření pocházejícího ze sektorů nezakrytých šedou částí mapy viditelnosti. U sektorů, které jsou zakryté částečně se velikost viditelné části vypočte jako podíl počtu nezakrytých pixelů a počtu všech pixelů sektoru.



Obr. 4.4: Ukázka překrytí mapy pohybu Slunce a mapy oblohy mapou viditelnosti.

4.1.2 Vzorce pro výpočet slunečního záření

V předchozí kapitole byl vysvětlen princip výpočtu slunečního záření. Tato kapitola popisuje konkrétní matematické vztahy, které jsou používány při sestavování mapy pohybu Slunce, mapy oblohy a výsledné globální solární radiace.

Přímé sluneční záření

Celkové množství solární radiace pro dané místo je dáno součtem přímého slunečního záření ze všech viditelných sektorů mapy pohybu Slunce (viz kapitola 4.1.1).

$$R_{Tot}^P = \sum R_{A,z}^P \quad (4.1)$$

Solární radiace pro sektor o obzorníkových souřadnicích A a z je dána vztahem

$$R_{A,z}^P = R_S \cdot K_T^{m(z)} \cdot T_{A,z} \cdot V_{A,z}^{Sl} \cdot \cos(\alpha_{A,z}) \quad (4.2)$$

kde

R_S – Solární konstanta (více v kapitole 1.1.1).

$K_T^{m(z)}$ – Propustnost atmosféry pro všechny vlnové délky ve směru k zenitu.

m_z – „Air mass“ - délka cesty slunečního paprsku od Slunce k nulové hladině, když je Slunce v zenitu. Dána vztahem (4.3).

$T_{A,z}$ – Doba reprezentovaná sektorem. Pro většinu sektorů je rovna součinu uživatelem zvoleného denního intervalu (např. 1 měsíc) a hodinového intervalu (např. 0,5 hodiny). Pro sektory, které jsou částečně zakryté mapou viditelnosti je vztah složitější, používá se sférické geometrie.

$V_{A,z}^{Sl}$ – Procento viditelné plochy sektoru z jeho celkové plochy, tj. nezakryté šedou částí mapy viditelnosti. Je-li sektor kompletně zakrytý, hodnota je rovna 0. Je-li celý viditelný, hodnota je rovna 1.

$\alpha_{A,z}$ – Úhel dopadu mezi povrchem, na který paprsek dopadá a centrem daného sektoru. Dán vztahem (4.4).

„Air mass“ je dána zenitovým úhlem Slunce a nadmořskou výškou. Pro zenitový úhel Slunce menší než 80° se vypočte podle vzorce (4.3). Pro větší zenitový úhel je nutné uvažovat refrakci.

$$m_z = \frac{\exp(-0,000118 \cdot H - 1,638 \cdot 10^{-0,9} \cdot H^2)}{\cos(z)} \quad (4.3)$$

kde

H – Nadmořská výška v metrech.

Sluneční záření ovlivňuje i orientace povrchu, na který paprsky dopadají. Ta je ve vztahu (4.2) představována úhlem dopadu $\alpha_{A,z}$. Jeho velikost se určí podle vztahu (4.4).

$$\alpha_{A,z} = \arccos[\cos(z) \cdot \cos(P_z) + \sin(z) \cdot \sin(P_z) \cdot \sin(A - P_A)] \quad (4.4)$$

kde

P_z – Zenitový úhel povrchu.

P_A – Azimut povrchu.

Difuzní sluneční záření

Celková difuzní radiace se vypočte obdobně, jako přímá radiace, sečtením hodnot záření všech viditelných sektorů, v tomto případě však sektorů mapy oblohy.

$$R_{Tot}^{Dif} = \sum R_{A,z}^{Dif} \quad (4.5)$$

Difuzní záření pro každý sektor mapy oblohy, daný zenitovým úhlem a azimutem se vypočte podle rovnice (4.6).

$$R_{A,z}^{Dif} = R_{GN} \cdot P_{Dif} \cdot T \cdot V_{A,z}^{Ob} \cdot p_{A,z} \cdot \cos(\alpha_{A,z}) \quad (4.6)$$

kde

R_{GN} – Globální normální sluneční záření. Vysvětlení viz rovnice (4.7).

P_{Dif} – Podíl difuzního záření z celkového globálního slunečního záření. Tento atmosférický parametr zadává uživatel. Má zásadní vliv na výsledek.

T – Zvolený časový interval.

$V_{A,z}^{Ob}$ – Procento viditelné plochy sektoru z jeho celkové plochy, tj. nezakryté šedou částí mapy viditelnosti. Obdobné, jako u přímého záření.

$p_{A,z}$ – Podíl difuzního záření pocházejícího z daného sektoru vůči globálnímu záření ze všech sektorů.

$\alpha_{A,z}$ – Úhel dopadu mezi povrchem, na který paprsek dopadá a centrem daného sektoru mapy oblohy.

Globální normální sluneční záření R_{GN} je možné vypočítat jako součet přímého záření ze všech sektorů mapy pohybu Slunce (i včetně sektorů zakrytých mapou viditelnosti) bez korekce z orientace povrchu, opravený o podíl přímého slunečního záření z globálního záření, který je roven $(1 - P_{Dif})$.

$$R_{GN} = \frac{R_S \cdot \sum(K_T^{m(z)})}{(1 - P_{Dif})} \quad (4.7)$$

Globální sluneční záření

Globální sluneční záření pro dané místo je dáno součtem celkového přímého a difuzního záření, tj. přímého a difuzního záření ze všech viditelných sektorů mapy pohybu Slunce a mapy oblohy.

$$R_{Tot}^{Glob} = R_{Tot}^P + R_{Tot}^{Dif} \quad (4.8)$$

5 Modelování solární radiace v ArcGIS

Nástroj Area Solar Radiation vyžaduje relativně velké množství vstupních parametrů a souborů. Některé z nich mají zásadní vliv na přesnost a objektivitu výsledného modelu, některé zase pouze konfigurují vlastnosti výstupu (jako např. období, pro které je model vytvořen atd.).

5.1 Příprava rastru terénu, zástavby a zeleně

Hlavním a povinným vstupem do nástrojů Solar Radiation je digitální model povrchu v podobě rastru. Jiné typy modelů povrchu, které ArcGIS podporuje, tj. TIN, terén ani LAS dataset, nejsou akceptovány. Míra detailu výsledného modelu slunečního záření závisí na rozlišení vstupního rastru, pixely výstupního rastru jsou stejného rozměru, jako pixely vstupního povrchu.

Jak je popsáno v kapitole 2.1, pro práci byl získán 3D model terénu, zástavby a zeleně v podobě 3D polygonových shapefile souborů. Prvním úkolem tedy bylo navrhnout postup převodu těchto přesných a podrobných dat do formátu rastru, a to tak, aby nedošlo ke ztrátě jejich přesnosti a detailu.

Ačkoli vstupní data pokrývají jen část města, i tak jde o velmi objemné soubory a operace s nimi jsou velmi náročné na operační paměť počítače. V případě, že by měla být analýza zpracována pro celé město, nebylo by v žádném případě možné pracovat s celým územím najednou. Dalším požadavkem na způsob převodu dat do rastrového formátu byla možnost automatizace celého procesu, aby se daly automatizovaně zpracovávat menší sektory zvlášť.

Nejprve byly prostudovány dostupné zdroje, zabývající se touto problematikou a všechny funkce programu ArcGIS. Kvůli výše popsané podmínce, že proces musí být automatizovaný, se výběr z ArcGIS nástrojů omezil na nástroje geoprocessingu, které se dají řetězit a kombinovat do nových komplexních modelů.

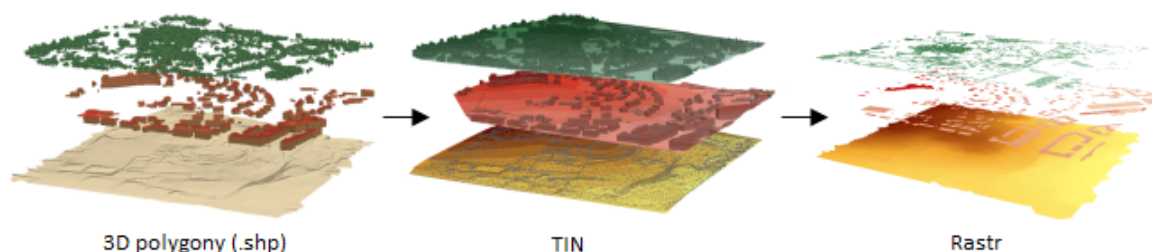
Rešerše ukázala, že existuje mnoho způsobů, jak sestavit z 3D polygonů rastrový model povrchu s budovami, které mají plochou střechu. Návod či nástroj, jak do rastru převést 3D model s různými typy šikmých střech a navíc včetně komínů,

vikýřů a dalších střešních prvků, nalezen nebyl. Pro modelování solární radiace je však sklon a orientace střechy zásadní a střešní prvky jsou nejbližšími stínícími objekty. Zjednodušení 3D modelu na ploché střechy by vedlo k irelevantním výsledkům.

Protože jednodušší cesta nebyla nalezena, bylo rozhodnuto použít klasickou metodu - převedení 3D polygonů do formátu povrchu Triangulated Irregular Network (TIN) a následného převedení TIN do rastru. Přitom musely být uvažovány dvě věci:

- TIN nemůže obsahovat vertikální trojúhelníky.
- TIN nemůže obsahovat více vrstev ve vertikálním směru.

Tyto vlastnosti TIN povrchu vedly k úvaze, že bude nutné zpracovat terén, budovy a zeleň zvlášť, protože se vzájemně překrývají. Pro každou z těchto 3 složek musel být navržen speciální postup.



Obr. 5.1: Schéma přípravy modelu terénu, zástavby a zeleně ve formátu rastru.

5.1.1 Rastr terénu

Tvorba TIN terénu nebyla složitá. Byla provedena nástrojem *Create TIN (3D Analyst)*, který ze vstupních prvků (bodů, linií, polygonů atd.) na základě nastavení jejich vlastností vytvoří TIN. Výčet znázorňuje nastavení zásadních vstupních parametrů, ostatní parametry jsou nepodstatné.

- Input Feature Class - Vstupní soubor prvků.
- Height Field - Výběr atributového pole, které reprezentuje zdroj hodnot nadmořské výšky prvků. V případě, že vstupní soubor obsahuje z-ové souřadnice, může se nadmořská výška kopírovat ze 3D geometrie prvku, volbou parametru *Shape.Z*.

- SF Type - Výběr typu prvku, který definuje, jakým způsobem má být prvek při tvorbě terénu zpracován. Pro polygony existuje 5 způsobů využití. Pro naše potřeby byl využit typ *Hard Line*, který definuje, že hrany vstupních polygonů budou použity jako lomové hrany. To znamená, že budou definovat hrany trojúhelníků TIN.

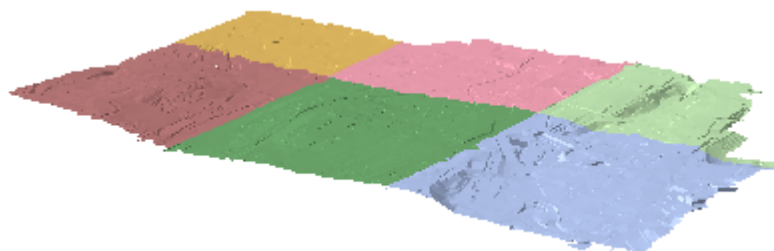
Input Feature Class	Height Field	SF Type
terén.shp	Shape.Z	Hard Line

Tab. 5.1: Nastavení zásadních parametrů při tvorbě TIN terénu.

Převod TIN povrchu do rastru byl proveden nástrojem *TIN to Raster (3D Analyst)*. Datový typ výstupního rastru byl zvolen jako *float* a velikost pixelu byla nastavena na 0,2 metru, aby nedocházelo ke ztrátě přesnosti a detailu.

Pro automatizaci převodu terénu ze 3D polygonů ve formátu .shp do rastru byly vytvořeny 3 modely. První model *1 Spatial Join by Grid* přidává vstupnímu souboru nové atributové pole, které rozdělí polygony do pomyslných čtvercových segmentů o zvolené velikosti.

Model *2 Divide Terrain to Segments* rozděljuje vstupní soubor na segmenty na základě atributového pole, předdefinovaného modelem *1 Spatial Join by Grid*. Vstupem je původní 3D model terénu ve formátu .shp a výstupem je X souborů ve stejném formátu, obsahujících jednotlivé segmenty. V modelu je použito iterace přes jednotlivé prvky souboru (polygony).



Obr. 5.2: Ukázka výsledku automatického rozdělení vstupního souboru na segmenty o zvolené velikosti.

Model 3 *Create TIN and Raster of Terrain Segments* automaticky iteruje přes soubory segmentů vytvořených modelem 2. Z každého segmentu vytvoří TIN, TIN převede na rastr a provede oříznutí vzniklého rastru, na jeho původní území. Během tvorby TIN totiž dochází k rozšíření území o nesmyslné okrajové trojúhelníky, které je potřeba odstranit.

Na závěr byly všechny rastrové segmenty spojeny do výsledného rastru nástrojem *Append*.

Spojením však vznikly mezi segmenty malé otvory, tj. pixely s hodnotou NoData. To proto, že jednotlivé segmenty k sobě místy nepatrně nedoléhaly. Těchto pár pixelů ale při další práci s budovami způsobovalo velké problémy. Proto bylo nutné ještě výsledný rastr zbavit prázdných pixelů, respektive nahradit hodnotu NoData nějakou hodnotou. Není důležité, jakou hodnotou, hlavní je zaplnit díry.

Pro nahrazení NoData pixelů nějakou hodnotou se použily nástroje *IsNull* a *Con*. *IsNull* přiřazuje pixelům s NoData hodnotu 1 a ostatním pixelům hodnotu 0, výstupem je rastr o těchto dvou hodnotách. Tento rastr byl použit jako podmínkový rastr v nástroji *Con*. Bylo nastaveno, že tam, kde je podmínkový rastr roven 1, hodnota pixelu se změní na zvolenou hodnotu (např. 200) a tam, kde je roven 0, pixelům zůstanou hodnoty z původního rastru.

5.1.2 Rastr budov

Zpracování rastru budov již činilo větší potíže. Nejprve byl vyzkoušen analogický postup, jako při zpracování terénu. Výsledek však nebyl přijatelný. Deformace při převodu do TIN způsobovaly svislé stěny domů a vícenásobné vrstvy polygonů ve vertikálním směru, což se dalo očekávat, vzhledem ke dvěma vlastnostem TIN povrchu, uvedeným v kapitole 5.1.

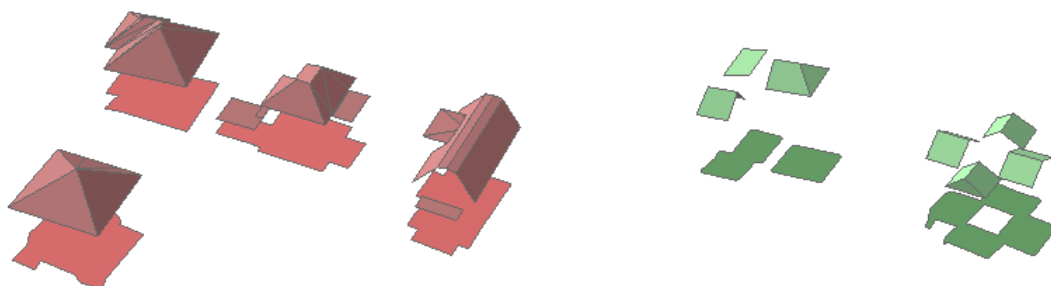
Na základě doporučení uživatelů na fóru společnosti ESRI byly na webových stránkách podpory nalezeny 2 nástroje ve formě ArcScripts, které měly sloužit k převodu 3D budov přímo do rastrového modelu terénu: *DSMTools* a *Add Buildings to DEM*. Ani jeden z těchto nástrojů však nevedl k akceptovatelným výsledkům.

Musel být tedy navržen vlastní postup. Jeho princip je shodný se zpracováním terénu, opět se postupuje přes TIN. Provedení je však značně složitější.

Stěny budov ve 3D modelu jsou přesně svislé a u mnoha budov se nachází více objektů nad sebou, např. komín či vikýř na střeše. Toto jsou dva problémy, které znemožňovaly přímé převedení budov do TIN, viz 2 vlastnosti TIN v 5.1. Oba tyto problémy bylo nutné odstranit.

Co se týká překrývajících se objektů, aby se tomuto problému předešlo, byly ze všeho nejdříve střechy rozděleny do dvou souborů - jeden obsahující šikmé a vodorovné střechy a druhý obsahující vikýře, komíny a ostatní objekty, nacházející se na povrchu střechy (dále jen „střešní objekty“). Tyto soubory byly nadále zpracovávány samostatně. Rozdělení bylo jednoduše proveditelné, díky atributovému rozdělení typu ploch (popis viz kapitola 2.1). Pro zjednodušení byl sestrojen model *1 Separate Building Surfaces*, který provádí rozdělení automaticky. Viz příloha A.2.

Princip řešení druhého problému je velmi jednoduchý. Ačkoli svislé stěny způsobovaly při tvorbě TIN velké problémy, bylo zjištěno, že stěny s jen nepatrným sklonem, např. 1° jsou zpracovány bezchybně. Svislé stěny byly tedy ze vstupního modelu odstraněny a byly nahrazeny polygony, které představovaly podstavy budov, zvětšené o přiměřenou hodnotu (např. 0,5 metru). Automatizovaný postup tvorby těchto zvětšených půdorysů je dokumentován v geoprocessingovém modelu *2 Create Buffered Footprints*, viz příloha A.2, kde je uveden i popis použitého algoritmu. Tento model po vytvoření půdorysů navíc spojuje vytvořené půdorysy střech či střešních objektů se vstupními 3D polygony. Tím vzniká konečný vstupní soubor pro tvorbu TIN povrchu střech či střešních objektů.



Obr. 5.3: Ukázka finálně upravených objektů, z nichž byl vytvořen posléze vytvořen TIN budov.

Z takto připravených dat bylo možné tvořit bezchybné TIN povrchy. Jak již bylo řečeno, zpracování probíhalo zvlášť pro střechy a střešní objekty. Následující tabulka ukazuje, jaké vstupní parametry byly při tvorbě TIN použity.

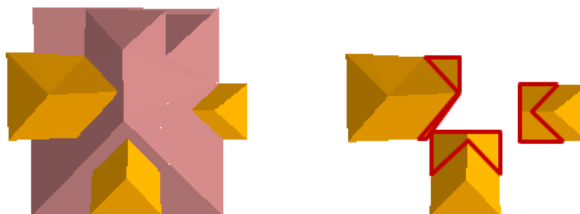
Input Feature Class	Height Field	SF Type
šikmé a vodorovné střechy a jejich zvětšené půdorysy	Shape.Z	Hard Line
střešní objekty a jejich zvětšené půdorysy	Shape.Z	Hard Line

Tab. 5.2: Nastavení zásadních parametrů při tvorbě TIN budov.

Pro tvorbu TIN střech či střešních objektů, jejich převedení do rastru a následné oříznutí byl opět sestaven geoprocessingový model, který automaticky zpracovává celý vstupní 3D model po segmentech. Princip je naprosto stejný, jako při zpracování terénu.

Pro budovy tedy byly zpracovávány 2 druhy TIN povrchu - TIN střech a TIN střešních objektů. Tyto soubory byly dále převedeny zvlášť do rastru. Postup byl totožný, znázorňuje ho model *3 Create TIN and Raster Segments*, který byl sestrojen pro automatizované převedení budov přes TIN do rastru, rovněž po segmentech, jak tomu bylo i u zpracování terénu.

Během zpracování se naskytl ještě jeden problém. Střešní objekty jsou ve vstupním 3D modelu zkonstruovány tak, že se částečně zanořují dovnitř do budov, pro názornost viz 5.4. Po spojení rastru střech a rastru střešních objektů vytvořených zvlášť tedy docházelo k problému, že střešní objekty zakrývaly větší část střechy, než je tomu ve skutečnosti (viz obrázek 5.4).



Obr. 5.4: Znázornění problému zanořujících se střešních objektů dovnitř budovy.

Sestavený postup pro automatické definování, které části střešních objektů jsou nad střechami a které jsou zanořené uvnitř domu, je zachycen v geoprocessingovém modelu *4 Mask DandCh Segments*. Používá se v něm nástroj *CutFill*, který je schopen zachytit změnu objemů mezi dvěma vstupními rastry. Výstupem z této funkce je rastr, jehož hodnoty odpovídají rozdílovému objemu. Pixely o hodnotě menší než 0 značí, že druhý rastr je nad povrchem prvního, rovny 0 na povrchu a větší než 0 pod povrchem. Tento rastr se reklasifikuje tak, že záporné hodnoty se seskupí do třídy o hodnotě -1 (nad povrchem) a kladné o hodnotě +1 (pod povrchem). Z takového rastru je již možné vytvořit polygony částí nad a pod povrchem. Více v příloze A.2.

5.1.3 Rastr zeleně

Pro zpracování souboru zeleně byl sestaven geoprocessingový model *Create Final Tree Raster Segments*. Postup byl obdobný, jako v případě střech. Jednotlivé kroky jsou zřejmé z grafického znázornění modelu, viz příloha A.3. Výsledkem je sada segmentů rastru zeleně.

5.1.4 Spojení dílčích rastrů

Segmenty rastrů terénu, zástavby a zeleně byly na závěr spojeny nástrojem *Append*. Za cílový rastr se zvolil celkový rastr terénu. Nástroj byl použit třikrát zvlášť. Nejprve se připojily všechny segmenty rastru zeleně, následovalo připojení segmentů rastru šikmých a vodorovných střech a nakonec se připojily segmenty rastru střešních objektů.

5.2 Konfigurace času

Před spuštěním nástroje Solar Radiation je potřeba nastavit 3 parametry, které udávají, pro jaké období a v jakých intervalech bude model slunečního záření vytvořen.

- Časová konfigurace - Určuje, pro jaké období bude solární radiace určována.

K dispozici jsou 4 možnosti:

- Jeden den - Volí se, pokud je cílem určit solární radiaci pro vybraný den. Při této volbě se nastaví Juliánské datum požadovaného dne a počáteční a koncový čas v hodinách. Výsledkem výpočtu je sluneční záření pro tento interval.
- Více dní - Ideální pro výpočet solární radiace například pro 1 týden či jiný souvislý časový úsek. Volí se rok a počáteční a koncový den požadovaného časového úseku.
- Speciální dny - Určuje sluneční záření pro 4 charakteristické dny v roce - slunovraty a rovnodennosti (viz kapitola 1.2).
- Celý rok - Pokud je cílem získat hodnoty slunečního záření pro celý rok, volí se tato možnost. Výpočet probíhá automaticky s měsíčním intervalem.

- Denní interval - Údaj, který specifikuje vertikální rozměr sektorů sluneční mapy (vysvětlení viz 4.1.1). Výpočet přímého záření probíhá po těchto intervalech.

- Hodinový interval - Údaj, který specifikuje horizontální rozměr sektorů sluneční mapy, čímž charakterizuje průběh výpočtu přímé radiace.

Účelem této práce bylo vytvořit model slunečního záření pro celý rok. Charakter i množství slunečního záření se během roku mění, v důsledku mnoha důvodů, popsaných v kapitole 1.1. Takovéto změny nelze zanedbat, výroba elektřiny či tepla střešními solárními systémy díky nim značně kolísá. Ideálním řešením bylo určit množství slunečního záření pro jednotlivé měsíce v roce. Tím se zachytí charakter

změn slunečního záření během roku. Časová konfigurace byla tedy nastavována na "Celý rok". Denní interval je u této volby automaticky nastaven na kalendářní měsíc a hodinový interval byl ponechán na hodnotě 0,5 hodiny.

5.3 Odhad atmosférických parametrů

Další vstupní data, na nichž velmi závisí přesnost výsledku, jsou atmosférické parametry - propustnost atmosféry a podíl difuzního záření vůči globálnímu. Bohužel dokumentace nástroje Solar Radiation neposkytuje téměř žádný popis těchto dvou hodnot, ačkoli jejich hodnoty mají na výsledek opravdu zásadní vliv. V případě difuzního podílu je význam relativně jasný a pro určení této hodnoty existují i různé zdroje dat. Propustnost atmosféry představovala větší problém.

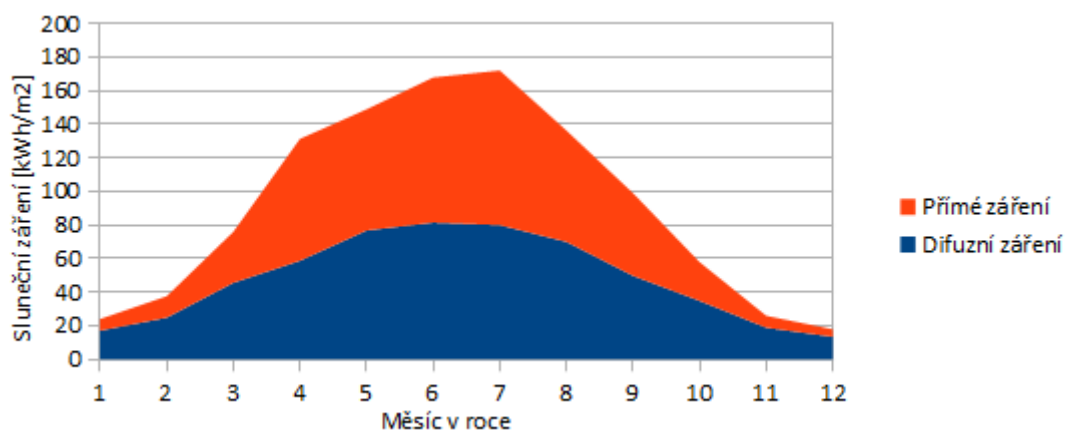
Následující odstavce obsahují doslovný překlad veškeré dokumentace atmosférických parametrů.

- Podíl difuzního záření („Diffuse Proportion“) - Procento z globální normální radiace, která je difuzní. Hodnota může nabývat hodnot v intervalu od 0 do 1. Parametr by měl být nastaven tak, aby co nejlépe odpovídal místním atmosférickým podmínkám. Výchozí hodnota je 0,3 a představuje podmínky při jasné obloze.
- Propustnost („Transmissivity“) - Část slunečního záření, která projde skrz atmosféru (průměr ze všech vlnových délek). Parametr dosahuje hodnot od 0 (atmosférou neprojde nic) do 1 (atmosférou projde veškeré záření). Výchozí hodnota je 0,5 pro obecně jasnou oblohu.

Podíl difuzního záření

Význam pojmů difuzní, přímé a globální záření je vysvětlen v kapitole 1.1. V České republice činí podíl difuzního záření průměrně cca 50% až 60%. Jeho hodnota se však mění v průběhu roku, v závislosti na charakteru počasí. V zimních měsících, kdy je převážně zataženo a oblačno, je podíl difuzního záření značně vyšší,

dosahuje hodnot od 60% do 75%. V létě se podíl přímého a difuzního záření dostává téměř do rovnováhy.



Obr. 5.5: Podíl difuzního a přímého záření v průběhu roku pro Prahu. Graf zobrazuje průměrné měsíční hodnoty z let 2006 - 2010, naměřených na stanici ČHMÚ Karlov.

Pro určení tohoto atmosférického parametru byly nalezeny dva zdroje dat. Prvním byl webový projekt PVGIS, o němž je pojednáváno v kapitole 3. PVGIS je pro zadanou lokalitu schopen vygenerovat, kromě jiného, přímo průměrné hodnoty podílu difuzního záření pro každý měsíc v roce.

Druhým zdrojem byla data z profesionální meteorologické stanice ČHMÚ Karlov. Roční soubory naměřených dat totiž kromě globální radiace obsahovaly mnoho dalších měření, včetně difuzní a přímé radiace (měřené v hodinovém intervalu). Z těchto dat bylo jednoduché vypočítat průměrné měsíční hodnoty podílu difuzního záření. Výsledné hodnoty jsou průměry z měsíčních hodnot pro roky 2006 až 2010.

Po porovnání hodnot z těchto dvou zdrojů bylo rozhodnuto, že pro konfiguraci podílu difuzního záření bude využito měření z meteostanice ČHMÚ Karlov. Mezi oběma zdroji jsou jen nepatrné odchylky, Karlov byl vybrán pouze z toho důvodu, že jde o reálné hodnoty, jejichž původ lze prokázat.

Podíl difuzního záření je hlavní parametr, který upravuje výsledné množství difuzního záření modelu.

	Led	Ún	Bře	Dub	Kvě	Čvn	Čvc	Srp	Zá	Ří	Lis	Pro
Karlov	0,71	0,67	0,61	0,46	0,53	0,49	0,47	0,52	0,51	0,61	0,73	0,75
PVGIS	0,73	0,67	0,62	0,57	0,55	0,59	0,55	0,55	0,58	0,59	0,76	0,79

Tab. 5.3: Průměrné měsíční hodnoty podílu difuzního záření určené z měřených na ČHMÚ Karlov a modelované v PVGIS.

Propustnost atmosféry

Existuje mnoho koeficientů a veličin, které nějakým způsobem charakterizují, jakým způsobem atmosféra ovlivňuje sluneční paprsky při průchodu, například Air mass, Linke Turbidity, Clearness Index atd. V dokumentaci nástroje Solar Radiation není příliš detailně vysvětleno, co přesně se myslí parametrem Transmissivity, jež je vstupním prvkem výpočtu. Nejvíce však popisu odpovídá zřejmě parametr „clearness index“, popsáný v kapitole 1.1.4.

Clearness Index udává podíl extraterestrického záření, které projde atmosférou a dopadne na zemský povrch. Výpočetní vztah je jednoduchý zlomek extraterestrického a terestrického záření.

Data z meteorologické stanice ČHMÚ Karlov obsahují i hodinové hodnoty extraterestrického záření, dopadajícího na horizontální povrch vně atmosféry. Nebylo tedy složité určit ani měsíční hodnoty clearness indexu, viz tabulka 5.4.

	Led	Ún	Bře	Dub	Kvě	Čvn	Čvc	Srp	Zá	Ří	Lis	Pro
Karlov	0,30	0,33	0,39	0,50	0,45	0,48	0,50	0,46	0,45	0,38	0,29	0,27

Tab. 5.4: Průměrné měsíční hodnoty Clearness indexu, vypočtené z dat pro roky 2006-2010, měřených na ČHMÚ Karlov.

Jak je vidět v rovnici 4.2, propustnost atmosféry má na výsledek výpočtu globálního slunečního záření zásadní vliv. Pouze na základě tohoto parametru se vypočítává, jaké množství extraterestrického záření, reprezentovaného solární konstantou, projde atmosférou na zemský povrch.

5.3.1 Kalibrace atmosférických parametrů

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit model slunečního záření pro průběh celého roku tak, aby co nejvíce odpovídal realitě a poskytoval relevantní informace. Protože množství a intenzita solární radiace se díky mnoha vlivům v průběhu roku výrazně mění (viz kapitola 1.1), bylo rozhodnuto, že množství záření bude analyzováno pro jednotlivé měsíce, což je i u většiny ostatních modelů běžná praxe.

Nastala tedy otázka, jakým způsobem nastavit atmosférické parametry - zda bude stačit určit průměrné hodnoty podílu difuzního záření a propustnosti atmosféry pro celý rok, nebo jestli bude nutná speciální konfigurace pro každý měsíc zvlášť nebo kompromis mezi těmito dvěma způsoby. Samozřejmě, že jednodušší nastavení by vedlo k jednoduššímu a rychlejšímu zpracování, složitější vstupní konfigurace zase k vyšší přesnosti.

Metoda, jakou byla hledána nejvhodnější konfigurace by se dala nazvat kalibrací.

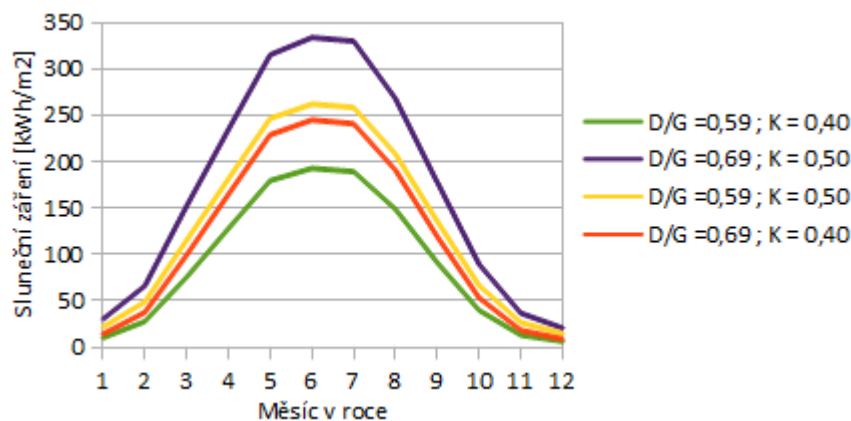
Z modelu povrchu byla vyříznuta malá část, pokrývající území strahovských kolejí. Pro toto území se nástrojem Area Solar Radiation vytvářely pokusné modely slunečního záření s různými konfiguracemi atmosférických parametrů. Data z meteorologické stanice ČHMÚ Karlov sloužila jako podklad pro určování kombinace atmosférických parametrů a společně s daty z amatérské meteostanice Strahov a z PVGIS i jako závazné hodnoty, ke kterým bylo potřeba se co nejvíce přiblížit.

Z každého pokusného modelu byly vyčteny hodnoty množství slunečního záření pro jednotlivé měsíce pro střechu bloku č.4, na níž je umístěna referenční meteostanice. Tyto měsíční hodnoty byly porovnány, jak je uvedeno výše, s daty ze stanice Strahov, ČHMÚ Karlov a modelovanými daty z PVGIS.

Za referenční bylo možné považovat data ze všech 3 uvedených zdrojů, protože jak střecha bloku č.4, tak plocha, kde je umístěna meteostanice Karlov je horizontální nezastíněná rovina. Modelovaná data z PVGIS jsou počítána také pro horizontální rovinu. Měsíční hodnoty solární radiace by si tedy měly být, vzhledem k blízkosti obou stanic, víceméně rovny. Tuto úvahu potvrdil i Ing. Kamil Staněk PhD. Použití všech 3 zdrojů místo dat pouze ze Strahova bylo vhodné hlavně proto, že strahovská data jsou pouze pro rok 2012 do měsíce října a také protože nikde není potvrzena bezchybnost ani jednoho ze zdrojů.

Hned na začátku se ukázalo, že dosazení parametrů uvedených v tabulkách 5.3 a 5.4 měsíc po měsíci nepovede ihned ke správným výsledkům. To mohlo být zapříčiněno tím, že pojem propustnost atmosféry nebyl pochopen tak, jak by měl. Dalším odůvodněním může být i to, že při výpočtu pro celý rok s měsíčním intervalem může být algoritmus postaven tak, že vysloveně vyžaduje průměrnou roční hodnotu propustnosti, protože jak bude dále popsáno, právě toto bylo nakonec řešením. Nikde však bohužel není psáno, co má hodnota přesně vyjadřovat.

Proces kalibrace byl velmi zdoluhavý, není možné dokumentovat zde všechny pokusy, skrze které bylo nakonec dosaženo zdárného výsledku. Následující příklady ukazují, jak zásadní dopad na podobu konečného modelu mají pouhé setiny atmosférických parametrů. Je s nimi potřeba zacházet velmi obezřetně.



Obr. 5.6: Názorný příklad toho, jaký mají drobné změny hodnot atmosférických parametrů vliv na výsledný model slunečního záření.

Pro první pokus byla vypočtena nejjednodušší konfigurace - podíl difuzního záření byl určen jako průměr pro celý rok z hodnot v tabulce 5.5 (Karlov). Propustnost byla průměrem pro celý rok, určená z měsíčních hodnot v tabulce 5.4. Jak je patrné z grafu 5.7, výsledek řádově odpovídá reálným datům, takže cesta k řešení zřejmě vede tímto směrem, rozhodně se nejedná o zásadní nesouhlas, způsobený hrubou chybou. Odchyłky jsou však relativně velké. Z grafu je zřejmé, že hodnoty záření pro zimní měsíce jsou pod úrovní reálných dat a pro letní měsíce je patrný zase opačný trend. Bylo tedy jasné, že toto nemůže být řešení, protože pokud by se našla taková kombinace dvou parametrů pro celý rok, že by ideálně kopírovala průběh

v létě, pro zimní měsíce by byly hodnoty zákonitě o to víc chybné. To vedlo k myšlence, že se musí najít takový kompromis, při kterém se hodnoty pro zimní měsíce zvednou a v letních naopak sníží.

Měsíce	D/G	K_T
celý rok	0,59	0,40

Tab. 5.5: Konfigurace atmosférických parametrů sestavená z celoročních průměrů.

Další pokusy tedy spočívaly v různém seskupování měsíců, ve kterých mají atmosférické koeficienty podobný charakter, do několika skupin a v provádění výpočtů pro tyto skupiny zvlášť. Pro každou skupinu byly oba parametry určeny aritmetickým průměrem pro obsažené měsíce. Po mnoha takovýchto pokusech se ukázalo, že když jsou oba parametry v průběhu roku proměnlivé, vyhledat vhodnou konfiguraci je téměř nemožné. Navíc tento způsob ještě zvýšil rozdíl mezi modelovanými a reálnými hodnotami v zimních měsících.

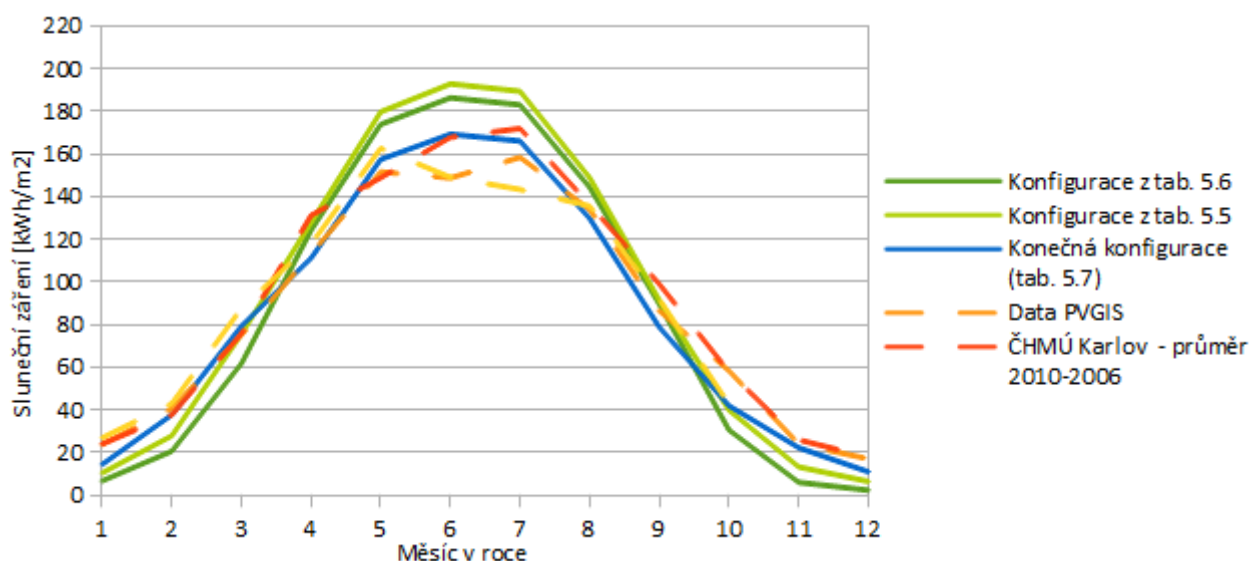
Měsíce	D/G	K_T
1,2,3,10	0,65	0,35
4,5,6,7,8,9	0,50	0,47
11,12	0,74	0,28

Tab. 5.6: Konfigurace atmosférických parametrů sestavená ze skupinových průměrů obou atmosférických parametrů.

Následovala tedy další etapa, ve které byl jeden parametr (propustnost atmosféry) zvolen jako stálý, reprezentující průměrnou hodnotu propustnosti během roku a druhý parametr se různě seskupoval do skupin, jak bylo popsáno výše. Touto cestou byla nakonec sestavena nejvhodnější konfigurace, která kopíruje reálný průběh slunečního záření během roku celkem věrně.

Měsíce	D/G	K_T
1,2	0,69	0,40
3,4,5,6,7,8,9,10	0,52	0,40
11,12	0,74	0,40

Tab. 5.7: Konečná konfigurace atmosférických parametrů sestavená z fixního parametru propustnosti, rovnému celoročnímu průměru a skupinovému průměru podílu difuzního záření.



Obr. 5.7: Názorné příklady vývoje kalibrace atmosférických parametrů. Přerušované linie představují měřené referenční hodnoty, plné zelené linie znázorňují mezikroky vývoje a modrá linie představuje model pro konečnou konfiguraci.

5.4 Stanovení parametrů pro výpočet map

Vysvětlení pojmů mapa viditelnosti, mapa pohybu Slunce a mapa oblohy je uvedeno v kapitole 4.1.1. Na nastavení jejich výpočtu hodně závisí doba modelování slunečního záření, zároveň ale také přesnost. V případě použití nástroje Area Solar Radiation se totiž interně sestavují všechny tyto 3 mapy pro každý pixel vstupního rastru, což je velmi náročné pro operační paměť počítače.

Proto bylo potřeba nalézt kompromis, který by zajistil přijatelnou dobu výpočtu a zároveň dostatečnou přesnost výsledku. Hledání kompromisu spočívalo v pročítání

dokumentace nástroje Solar Radiation a různých doporučení či zkušeností uživatelů ArcGIS na internetu a také v praktickém zkoušení. Nakonec byly stanoveny následující hodnoty:

- Parametr „Sky size / Resolution“, čili rozlišení mapy viditelnosti, pohybu Slunce a oblohy, byl nastaven na hodnotu 400.
- Parametr „Calculation Directions“, udávající počet směrů, ze kterých je určena mapa viditelnosti byl nastaven na vysokou hodnotu 80. To z toho důvodu, že se jedná o velmi členitý a povrch s budovami i stromy, kdy se úhly horizontu mění velmi často a nespojitě, na rozdíl od povrchu pouhého terénu, který je plynulý. Vysvětlení pojmu úhel horizontu a principu mapy viditelnosti je popsán v kapitole 4.1.1.
- Parametry „Zenith a Azimuth Divisions“, které určují počet sektorů mapy oblohy, ze které se počítá difuzní záření. Oba tyto údaje byly nastaveny na hodnotu 24.

5.5 Tvorba modelu dopadajícího slunečního záření

Po dokončení příprav vstupních souborů a parametrů, popsaných v kapitolách 5.1 až 5.4, mohla být spuštěna tvorba modelu solární radiace pro území části Prahy 6.

Výpočet byl zahájen pro první dva měsíce v roce, viz tabulka 5.7. Časová konfigurace byla nastavena tak, jak je popsáno v kapitole 5.2. Vstupní rastr pokrýval celé zpracovávané území, jeho velikost byla 7 423 x 16 203 pixelů o rozměru 0,2 x 0,2 metru. Po více než týdnu neustálého počítání nebyla dokončena ani čtvrtina výpočtu. Taková doba, vzhledem k tomu, že ten samý výpočet musel být posléze proveden ještě dvakrát, s jinými vstupními parametry (odůvodnění viz tabulka 5.7), nebyla přijatelná.

Řešením tohoto problému bylo rozdělení vstupního rastru povrchu do menších segmentů a spuštění výpočtů pro tyto segmenty zvlášť na jiných počítačích. Rastr

povrchu území Prahy 6 byl tedy rozdělen do pěti částí a bylo zaměstnáno celkem pět počítačů.

Rozdělení rastru povrchu muselo být provedeno rozvážně, tak aby mělo co nejmenší dopad na konečný výsledek. Bylo nutné dbát na to, aby se neoddělily prvky, které si vzájemně stíní.



Obr. 5.8: Rozdělení rastru povrchu do pěti segmentů, pracovně pojmenovaných jako Břevnov, Dejvice, Kulafák, Malovanka a Strahov.

Každý segment původního rastru byl zpracováván na jiném počítači. Vzhledem ke stanovené konfiguraci atmosférických parametrů (viz tabulka 5.7) byl pro každý segment výpočet proveden třikrát. Tabulka 5.8 znázorňuje doby výpočtů pro jednotlivé segmenty a časové intervaly. Na pěti relativně kvalitních počítačích trval výpočet solární radiace pro rastr o celkové velikosti 7 423 x 16 203 pixelů, rozdělený do tří kroků díky atmosférickým parametrům, zhruba 10 dní.

Časová náročnost výpočtu by se dala snížit několika cestami, například zmenšením rozlišení vstupního rastru nebo snížením parametrů pro výpočet map viditelnosti, pohybu Slunce a oblohy, atd. Ve všech případech by však snížení doby výpočtu mělo za následek snížení kvality výstupního modelu slunečního záření.

Měsíce	Břevnov [hod]	Dejvice [hod]	Kulaťák [hod]	Malovanka [hod]	Strahov [hod]
1,2	69,25	76,53	69,50	58,22	81,53
3,4,5,6,7,8,9,10	69,75	76,92	78,60	134,93	80,83
11,12	69,88	76,78	77,23	57,83	82,18
Celý rok	208,88	230,23	225,33	250,98	244,55
Celý rok	8 dní 17 h	9 dní 14 h	9 dní 9 h	10 dní 11 h	10 dní 5 h

Tab. 5.8: Přehled dob výpočtů modelů slunečního záření pro jednotlivá území. Každé území bylo zpracováno ve třech intervalech.

Výsledkem výpočtu pro jeden segment byl pro každý měsíc v roce rastr modelu globálního slunečního záření, rastr modelu difuzního záření, rastr modelu přímého záření a rastr znázorňující dobu svitu. Celkově bylo tedy pro každý segment vytvořeno 48 výsledných rastrů. Všechny tyto modely uvažují atmosférické podmínky, zastínění okolními objekty (budovami a zelení), sklon a orientaci povrchu, zeměpisnou polohu a nadmořskou výšku oblasti.

V případě modelů slunečního záření nese každý pixel rastru vypočtenou hodnotu množství globálního, difuzního či přímého záření ve Wh/m^2 , které dopadlo na jeho plochu za celý měsíc. Rastr znázorňující dobu svitu představuje čas v hodinách, po který na plochu pixelu dopadaly sluneční paprsky během celého měsíce.



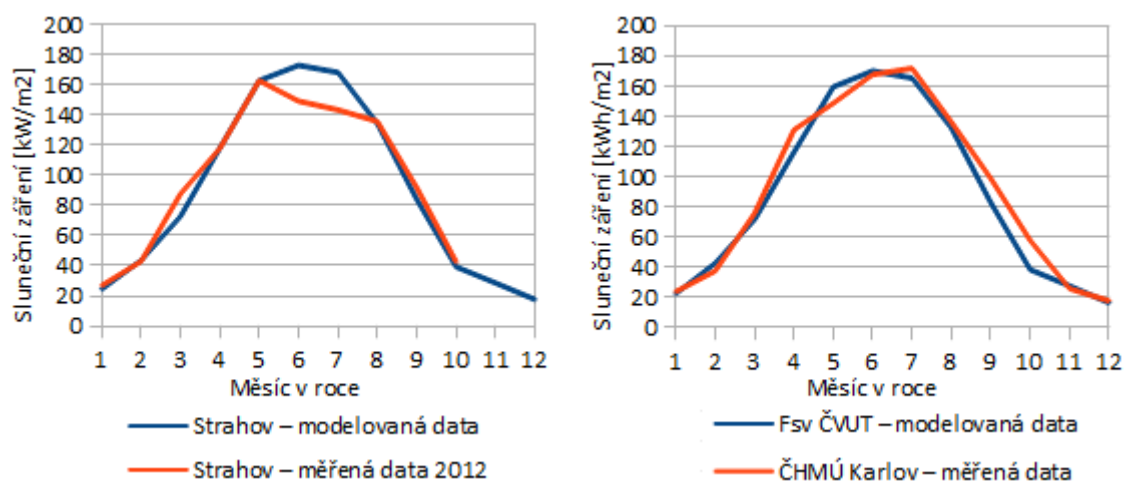
Obr. 5.9: Ukázka výsledných rastrů pro segment Strahov, měsíc květen.

6 Ověření spolehlivosti vypočtených dat

Po dokončení tvorby modelu slunečního záření bylo potřeba ověřit spolehlivost vypočtených dat. Bylo navrženo několik způsobů kontroly.

První způsob spočíval v porovnání dosažených hodnot s reálnými daty, naměřenými na meteorologických stanicích Strahov a ČHMÚ Karlov. Ačkoli konfigurace výpočtu byla sestavována na základě stejných dat, ověření bylo nutné, kvůli případným hrubým chybám. Jak již bylo vysvětleno (viz kapitola 2.2), data ze stanice Karlov byla použita jako plnohodnotná náhrada za školní data ze stanice na střeše budovy B, Fsv ČVUT.

Byl vytvořen soubor, obsahující dva body, které reprezentovaly polohy zmíněných meteorologických stanic. Nástrojem *Sample* byly z rastrů měsíční a roční globální radiace určeny hodnoty množství slunečního záření pro dané dvě stanice. Tyto hodnoty pak byly vyneseny do grafu a porovnány s reálnými měřenými hodnotami z meteorologických stanic.



Obr. 6.1: Grafické porovnání modelovaných a měřených měsíčních hodnot globální solární energie pro dvě kontrolní místa - Strahov a Fsv ČVUT.

Proměnlivost celkových ročních úhrnů slunečního záření mezi jednotlivými ročníky dosahuje zpravidla 10%, i více. Jako důkaz může sloužit tabulka 7.1, která znázorňuje úhrny pro roky 2006 až 2010 z meteorologické stanice ČHMÚ Karlov a jejich opravy vůči průměru. Měsíční hodnoty se mohou lišit meziročně i o 30%, což

také dokazují měřená data z Karlova. Rozdíly mezi modelovanými a měřenými daty lze zhodnotit právě na základě této úvahy. Pro názornost byla sestavena tabulka 6.2, ve které jsou uvedeny modelované měsíční i roční hodnoty, měřené hodnoty a jejich rozdíly.

rok	úhrn sl. záření [kWh/m ²]	oprava [kWh/m ²]
2006	1145,12	-51,35
2007	1132,32	-38,56
2008	1063,91	29,86
2009	1062,69	31,08
2010	1064,80	28,97

Tab. 6.1: Tabulka znázorňující proměnlivost ročních úhrnů slunečního záření.

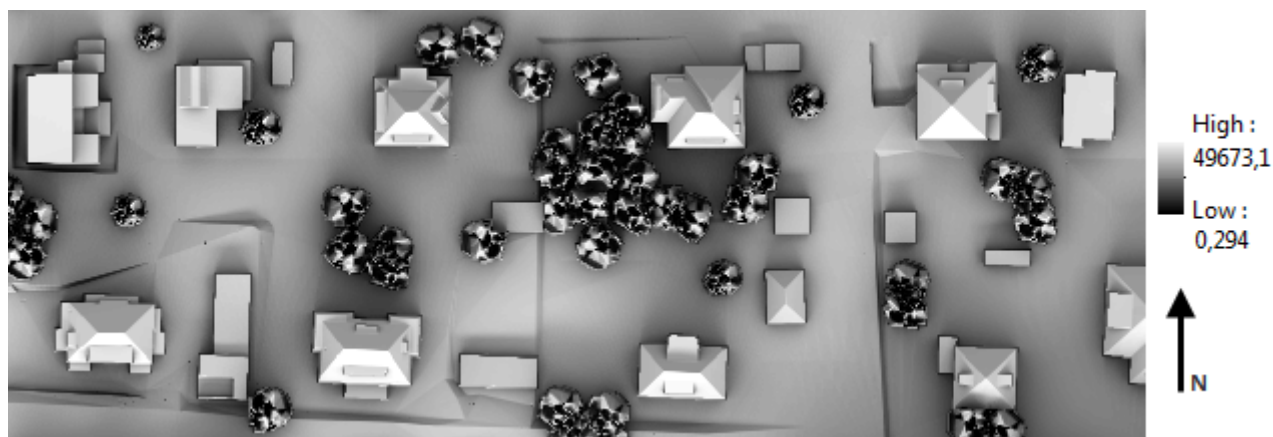
Kromě měsíčního úhrnu pro říjen v případě kontrolního místa Fsv ČVUT, kdy rozdíl dosahuje 33,4%, všechny měsíční i roční hodnoty vyhovují tomuto kritériu. Výsledný model slunečního záření se dá považovat za věrohodný. Obě uvažované meteostanice však mají obdobný charakter. Ani jedna z nich není zastíněna žádnými objekty, jelikož je umístěna na vysoké budově. Bylo tedy na místě nějakým způsobem ověřit také věrnost modelování zastínění. K tomu však bohužel nebyla získána potřebná data.

Kontrola správnosti modelování slunečního záření byla tedy provedena alespoň vizuálně. Na základě znalostí z kapitoly 1 byla provedena vizuální kontrola vytvořených modelů. Kontrolováno bylo, zda skloněné plochy orientované na jih nesou větší hodnoty úhrnů slunečního záření, než plochy orientované na sever a do ostatních směrů. Dále byla sledována proměnlivost délky stínů, měnící se během roku. A v neposlední řadě byly vyhledávány objekty, které jsou nižší, než okolní budovy či stromy. U takových ploch by měl být z modelu patrný úbytek záření na takto zastíněné ploše. Tento jev se dal dobře sledovat také u střešních objektů (komínů, vikýřů apod.). Jak je patrné z obrázku 6.2, zastínění zdá se odpovídat výše uvedeným předpokladům.

	ČVUT			Strahov		
měsíc	model [kWh/m ²]	měřeno [kWh/m ²]	Δ [kWh/m ²]	model [kWh/m ²]	měřeno [kWh/m ²]	Δ [kWh/m ²]
Leden	22,58	23,95	1,38	24,45	26,83	2,38
Únor	42,71	37,52	-5,20	43,55	42,90	-0,64
Březen	71,66	75,86	4,20	72,58	87,61	15,03
Duben	116,47	131,23	14,76	117,97	117,76	-0,21
Květen	159,67	148,83	-10,84	162,70	162,70	0,00
Červen	170,26	167,81	-2,45	172,88	149,08	-23,79
Červenec	165,49	171,95	6,47	168,14	143,32	-24,82
Srpen	132,35	136,25	3,89	134,20	135,60	1,40
Září	82,87	98,91	16,04	84,04	91,82	7,78
Říjen	38,49	57,81	19,32	39,18	42,43	3,25
Listopad	27,76	25,86	-1,89	28,47	-	-
Prosinec	16,50	17,78	1,29	17,59	-	-
Celý rok	1046,80	1093,77	46,97	1065,74	-	-

Tab. 6.2: Číselné porovnání modelovaných a měřených měsíčních úhrnů globální solární energie. Pro Strahov byla k dispozici měřená data pouze pro rok 2012 a to pouze do měsíce října. U Fsv ČVUT byla použita průměrná data z let 2006 - 2010.

Pro opravdu zevrubné prověření výsledného modelu slunečního záření nebyl k dispozici dostatek podkladových dat. Proto byla na závěr provedena rešerše, zda se někdo touto problematikou již nezabýval. Podařilo se najít vědecký článek, který je zaměřen přímo na ohodnocení důvěryhodnosti GIS modelů slunečního záření [9]. Autor měl k dispozici mnohem širší škálu dat. Výzkum spočíval v porovnání osmiletých dat ze 14 meteostanic rozmístěných po celém území Austrálie s daty vytvořenými modelováním různými druhy GIS modelů, včetně ArcGIS. Výsledek výzkumu prokázal vysokou spolehlivost vzniklých modelů. Modelové hodnoty se od měřených lišily v průměru o 2%.



Obr. 6.2: Ukázka části modelu globální solární radiace pro měsíc únor. Modelované zastínění odpovídá předpokladům, uvedeným na straně 58.

Při prověřování výsledků byla nalezena jedna nesrovnalost. Většina modelů byla vytvořena v programu ArcGIS, verze 9.3. Pouze oblast „Malovanka“ byla částečně zpracována v nejnovější verzi 10.1. Ačkoli dokumentace k nástroji Solar Radiation jsou naprosto stejné a nikde není uvedeno, že by se výpočetní algoritmus měl lišit, z výsledku je evidentní, že nová verze generuje po zadání naprosto stejných vstupních parametrů prokazatelně nižší hodnoty solární radiace, než verze 9.3. Paradoxně se však ukázalo, že ačkoli byly vstupní parametry kalibrovány ve verzi 10.1, lépe odpovídají realitě modely z verze 9.3. Nejde o nikterak zásadní rozdíly, výstupy z obou verzí bylo možné akceptovat.

7 Analýza využitelnosti solární energie

Vytvořený model slunečního záření, popsany v kapitole 5.5, obsahuje cenné informace o solární radiaci v průběhu roku. Sám o sobě však o využitelnosti solární energie střešními solárními systémy nic neříká. Bylo potřeba z něho informace o slunečním záření na střechách budov získat a smysluplně je analyzovat a prezentovat.

Způsob analýzy byl navržen následovně. Z původního 3D modelu byly vytvořeny půdorysné polygony střech, z nichž byly vyříznuty oblasti obsahující střešní objekty (komíny, vikýře apod.). Pro tyto polygony byly na základě analýz modelů slunečního záření, modelu povrchu atd., určovány hodnoty a informace, které jsou pro výkon střešních solárních systémů důležité. Určené hodnoty a informace byly zapisovány do atributové tabulky souboru polygonů. Výsledkem byl soubor střešních polygonů, kde byly pro každý tento polygon evidovány potřebné informace. Soubor byl posléze prezentován interaktivní formou, tak aby si každý uživatel mohl vyhledat svou střechu a všechny potřebné informace o ní zjistit (více v kapitole 8).

Před zahájením analýzy bylo potřeba uvědomit si, jaké údaje jsou pro projektanty střešních systémů zásadní a které z nich mohou být poskytnuty. Nejzásadnější roli samozřejmě hraje množství dopadajícího slunečního záření na daný povrch. Jeho hodnota velmi závisí na sklonu povrchu a také na jeho orientaci vůči severu. Ačkoli model slunečního záření již tyto aspekty zohledňuje, přesto bylo rozhodnuto tyto hodnoty z praktických důvodů uvést. Výtěžnost solárního systému je také přímo úměrná jeho velikosti. Proto bylo do analýzy zařazeno také určení ploch jednotlivých střešních částí. Na základě těchto údajů pak bylo možné určit výtěžnost potenciálního střešního systému.

Měsíční globální sluneční záření

Hlavní vliv na výkonnost má samozřejmě množství globálního slunečního záření, dopadajícího na plochu panelů solárních systémů. Prvním krokem bylo tedy určení množství globální solární energie pro každý střešní polygon a to pro všechny měsíce v roce. K tomu bylo použito nástroje *Zonal Statistics as Table*, který sumarizuje hodnoty pixelů vstupního rastru, obsažených v zónách, které jsou definovány jiným

vstupním souborem a výsledné hodnoty ukládá do tabulky.

V tomto případě byl nástroj použit tak, že jako vstupní rastr vstupoval rastr globálního slunečního záření pro jednotlivé měsíce a jako zónový soubor polygony střech. Jako statistický typ byl zvolen průměr. Výsledkem tedy byla tabulka, kde identifikační číslo odpovídalo identifikačnímu číslu střešního polygonu a hodnota odpovídala průměrné hodnotě globálního záření, které dopadá na plochu tohoto polygonu. Pro každý měsíc byla vytvořena jedna tabulka. Všech 12 tabulek bylo následně připojeno k atributové tabulce střešních polygonů, na základě identifikačního čísla.

Roční globální sluneční záření

Užitečnou informací o střešním prostoru je také celkové roční množství globálního slunečního záření. Ke zjištění této hodnoty pro každou střechu bylo potřeba nejprve sečíst dílčí rastry měsíčního slunečního záření pomocí *Map Algebra*. Průměrné hodnoty roční radiace pro střešní polygony byly určeny a připojeny do atributové tabulky střešních polygonů obdobným způsobem, jako u měsíční radiace.

Sklon a orientace střechy

Sklon a orientace povrchu velice ovlivňuje množství dopadajícího slunečního záření. Ideální orientace solárních panelů je přímo na jih. Při orientaci povrchu v rozsahu jihovýchod až jihozápad jsou ztráty výkonu solárního systému maximálně 5%. Co se týká sklonu, pro Českou republiku je ideální hodnota 32°. V případě, že se solární panel umístí do vodorovné polohy, ztráta dosahuje cca 10%, při svislé poloze až 30%.

Ačkoli model slunečního záření popsany v kapitole 5, sklon i orientaci uvažuje již během výpočtu, přesto mohou být pro projektanta či jiného uživatele tyto údaje užitečné. Bylo rozhodnuto je do analýzy zahrnout.

Nejprve musely být nástroje rozšíření Spatial Analyst vytvořeny z modelu povrchu rastry sklonu a orientace. Z takto vytvořených rastrů byly získány průměrné hodnoty sklonu a povrchu každého střešního polygonu, a to stejným způsobem, jako v předcházejících případech.

Použitelná plocha střechy

Od velikosti střešní plochy se odvíjí možná velikost potenciálního střešního solárního systému. Dalším úkolem tedy bylo určit reálnou 3D plochu střešních polygonů. Střešní objekty (komíny, vikýře atd.) samozřejmě nebyly do celkové plochy započítávány. Přiřazení 3D ploch jednotlivým polygonům bylo provedeno nástrojem *Add Surface Information*, který vypočte plochu střešních polygonů, položených na model povrchu budov ve formě TIN.

Energetická výtěžnost potenciálního střešního systému

Energetický potenciál střešního solárního systému jistě nejlépe charakterizuje jeho energetická výtěžnost. To znamená, jaké množství elektrické či tepelné energie je systém za zvolené období schopen vyprodukovat. Tato hodnota závisí na dodané energii a na účinnosti systému.

Dodanou energii v případě této práce reprezentuje modelované množství globálního slunečního záření.

Energetická účinnost je fyzikální veličina, která udává poměr mezi využitou energií a dodanou energií. Jde o bezrozměrnou veličinu, zpravidla udávanou v procentech. V případě solárních systémů je účinnost jejich základní technickou charakteristikou. Udává, kolik procent ze sluneční energie dopadající na panel se přemění na elektřinu či teplo.

Hodnota účinnosti závisí na typu fotovoltaického panelu. Panely první generace, složené z destiček monokrystalického křemíku jsou stále nejvyužívanější. Jejich běžná účinnost dosahuje hodnot od 14% do 17%. Dále se používají panely z polykrystalického či amorfního křemíku, účinnost viz tabulka 7.1. Na základě těchto hodnot byla hodnota účinnosti pro výpočet vzorové výtěžnosti solárních systémů stanovena na 14%.

Součástí analýzy solárního potenciálu budov bylo i příkladné určení výtěžnosti elektrické energie pro každou střešní plochu zpracovávaného území. Předpokladem bylo, že fotovoltaické panely pokrývají celou plochu vybrané střešní části a že účinnost tohoto potenciálního solárního systému činí 14%.

druh panelu	běžná účinnost	max. laboratorní účinnost
monokrystalický	14 - 17%	25%
polykrystalický	13 - 16%	20%
amorfní	5 - 7%	12%

Tab. 7.1: Přehled účinností fotovoltaických systému různých druhů.

Potenciální výtěžnost byla určena pro každý měsíc a také pro celý rok. Všechny potřebné hodnoty byly již obsaženy v atributové tabulce souboru střešních polygonů, hodnoty výtěžnosti byly tedy určeny nástrojem *Calculate Field*, podle jednoduchého vzorce 7.1. Uvedený výpočet je velmi zjednodušený, výsledné hodnoty jsou pouze orientační.

$$V = \frac{S_i \cdot R_{Tot}^{Glob}}{100} \cdot 14 \quad (7.1)$$

kde

i – Představuje identifikační číslo střešního polygonu.

S_i – Celková plocha potenciálního střešního systému, rovnající se celkové ploše střešního polygonu, bez střešních objektů (komíny, vikýře atd.) [m^2].

R_i^{Glob} – Množství slunečního záření za dané období (měsíc, rok), dopadající na plochu střešního polygonu [Wh/m^2].

Existuje ještě mnoho dalších praktických informací, které by se z těchto dat daly vygenerovat. Potenciálního majitele solárního systému by jistě zajímalo, jaká bude návratnost financí, které do systému vložil. Zajímavou informací by bylo také potenciální roční snížení emisí CO₂ atd. Vzhledem k časové náročnosti tohoto projektu bohužel k určení těchto informací již nedošlo. Tato problematika by vyžadovala další konzultace a studium.

8 Presentace vypočtených dat

Jelikož výsledky analýzy jsou určeny široké veřejnosti, zejména potenciálním majitelům či správcům domů na zpracovávaném území, musela být na závěr navržena forma prezentace vypočtených dat, která by je uživatelům pochopitelnou formou zpřístupnila. Představa autorky o podobě prezentace byla inspirována projektem města Boston, popsáném v kapitole 3. Mělo by jít o interaktivní webovou mapu zpracovávaného území, kde se po označení požadované střechy zobrazí veškeré informace, vypovídající o solárním potenciálu vybrané budovy, viz kapitola 7.

Skrze informace o zmíněném projektu města Boston byla objevena možnost využití ArcGIS Online. Jedná se o online systém společnosti Esri, který registrovaným uživatelům umožňuje spravovat a sdílet geoprostorová data na internetu, vytvářet z těchto dat online mapy či různé jiné aplikace. Navíc nabízí mnoho možností pro vývojáře, více v [10].

Prezentace dat byla provedena v aplikaci ArcGIS Explorer Online, která ArcGIS Online používá jako úložiště vytvořených map, nahraných dat atd. ArcGIS Explorer Online poskytuje široký výběr podkladových map, nastavitelných šablon a GIS nástrojů, které umožňují tvorbu efektních interaktivních webových map bez znalosti programování.

Jelikož jde o produkt společnosti Esri, je hlavním podporovaným formátem Esri Shapefile. Dále aplikace v základní verzi, bez předplatného, podporuje formáty CSV a GPX.

Postup prezentace

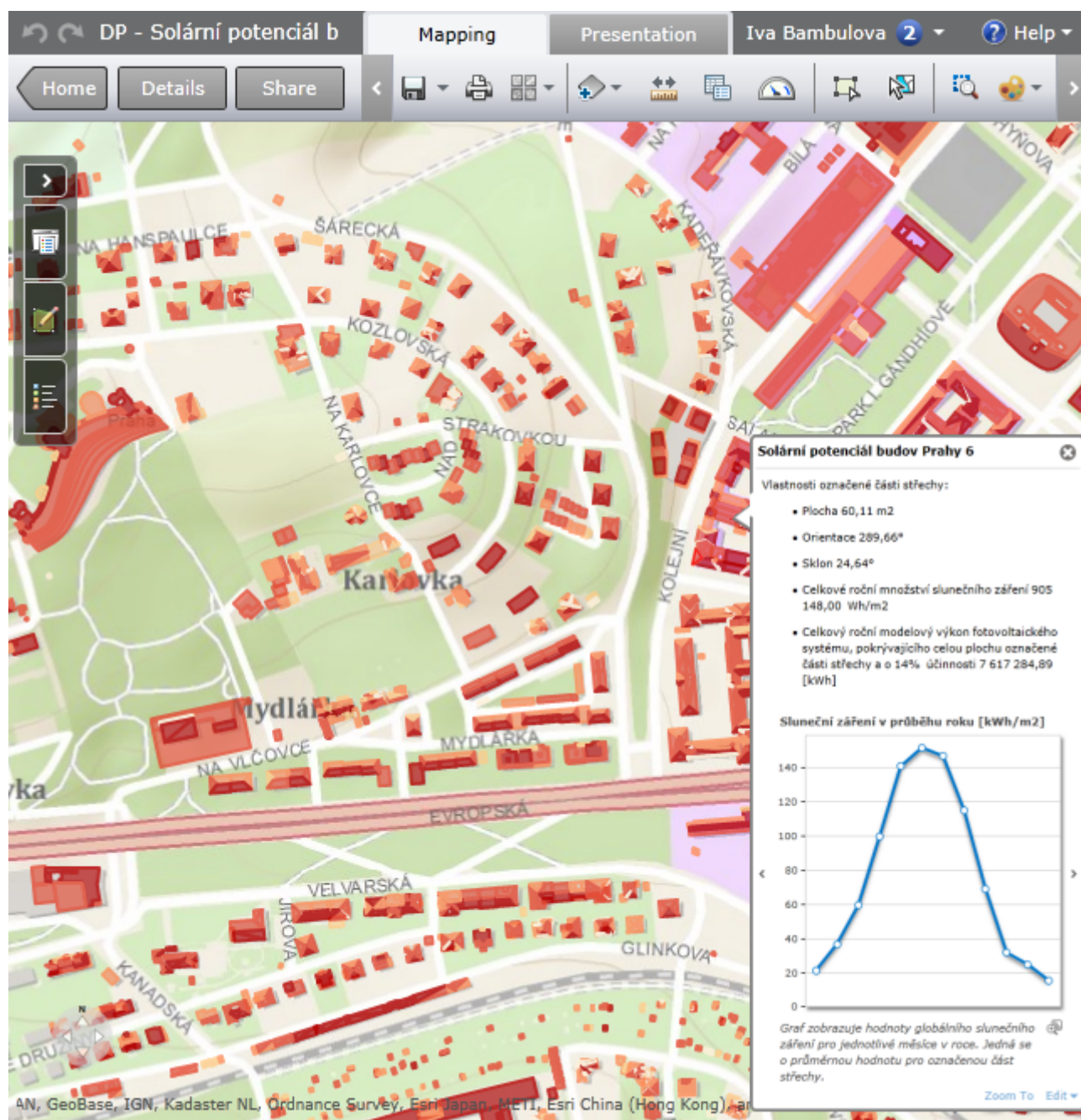
V ArcGIS Explorer byl založen nový projekt. Byla zvolena topografická podkladová mapa. Následovalo nahrání dat v podobě polygonového Shapefile souboru, detailně popsáného v kapitole 7. Poté byla provedena konfigurace pop-ups, čili vyskakovacích oken. Vyskakovací okna ve výsledné mapě slouží jako médium pro znázornění informací o solárním potenciálu jednotlivých budov. Po kliknutí na střešní polygon se zobrazí okno, obsahující informace o celkové ploše střechy, orientaci a sklonu střechy, ročním úhrnu globálního slunečního záření na 1 m² střechy a výtěžnosti

potenciálního fotovoltaiického systému o ploše rovnající se celkové ploše střechy a účinnosti rovné 14%.

Dále vyskakovací okno zobrazuje 2 grafy. Jeden znázorňující vývoj měsíční globální solární radiace během celého roku. Druhý graf zaznamenává měsíční hodnoty výtěžnosti potenciálního solárního systému. Hodnoty, které se ve vyskakovacím okně automaticky generují jsou aplikací dosazovány z atributové tabulky polygonového souboru, jejíž naplnění je popsáno v kapitole 7.

Po dokončení konfigurace pop-ups byla nastavena forma zobrazení střešních polygonů. Polygony byly klasifikovány do 9 tříd, podle hodnoty ročního úhrnu globálního slunečního záření. Třídě s nejmenšími hodnotami byl přiřazen nejsvětlejší odstín červené barvy. Čím vyšší hodnoty slunečního záření třída obsahovala, tím tmavší byl její červený odstín. Nejozářenější plochy byly vykresleny temně červenou barvou.

Data v podobě 3D modelu Prahy 6, obdržená na ÚRM Praha, nemohou být dle podmínek pro bezplatné poskytování dat zpřístupňována třetí osobě. Přístup k výsledné internetové mapě musel být na závěr zabezpečen. Mapa je přístupná pouze osobám, které znají přihlašovací údaje k vytvořenému uživatelskému účtu. Instrukce k přihlášení a otevření mapy jsou uvedeny v příloze A.1.



Obr. 8.1: Ukázka výřezu výsledné interaktivní mapy solárního potenciálu budov Prahy 6.

Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout ideální postup pro analýzu využitelnosti sluneční energie v zastavěném území, jejíž výsledky by sloužily obyvatelům jako ucelený zdroj informací, potřebných pro navrhování střešních solárních systémů.

Pro splnění tohoto cíle byla nejprve získána potřebná data, ve formě detailního 3D modelu terénu, zástavby a zeleně, pokrývajícího část Prahy 6, ve formátu Esri Shapefile. Model byl poskytnut Útvarem rozvoje hl. m. Prahy, jeho tvůrcem je firma GEODIS. Pro většinu měst nejsou data v podobě takto kvalitního 3D modelu dostupná. To ovšem neznamená, že pro ně není tato analýza proveditelná. Řešením může být například využití dat z leteckého laserového skenování (LIDAR).

Zásadním podkladem pro mapování solárního potenciálu jsou plošná data, zaznamenávající vývoj sluneční energie během roku a to se zohledněním zastínění okolními objekty, atmosférických vlivů, zeměpisné polohy a sklonu a orientace povrchu. Nejrozsáhlejší etapou práce byla právě tvorba plošného modelu dopadajícího slunečního záření v průběhu roku s měsíčním intervalem, provedená nástrojem Solar Radiation v programu ArcGIS, rozšíření Spatial Analyst. Samotnému modelování předcházelo podrobné studium všech dostupných GIS nástrojů pro modelování solární radiace a příprava vstupních souborů a parametrů.

3D model terénu, zástavby a zeleně musel být převeden do formátu rastru, přičemž nesměla být ztracena přesnost ani podrobnost zachyceného povrchu. Velkou neznámou byla konfigurace atmosférických koeficientů - propustnost atmosféry a podíl difuzního a globálního záření v dané lokalitě. Ačkoli jde o parametry, které mají zásadní vliv na výsledné hodnoty sluneční energie, dokumentace nástroje je v tomto směru nedostatečná. Sestavení ideální kombinace atmosférických parametrů byla nakonec provedena formou jakési kalibrace, pomocí meteorologických dat ze dvou meteostanic na zpracovávaném území.

Výpočet modelu solární radiace je tak náročný na využití operační paměti počítače, že území o rozměru 3,2 x 1,5 km s velikostí pixelu 0,2 x 0,2 m muselo být zpracováno po částech na více počítačích. Na pěti počítačích trvala tvorba modelu pro celý rok přibližně 10 dní, pokud by se prováděla najednou, trvala by teoreticky

46 dní 56 minut.

Vytvořený model byl ověřen z hlediska přesnosti a důvěryhodnosti vypočtených dat. Jako referenční byla použita data ze dvou meteorologických stanic na zpracovávaném území. Pro obě stanice se modelovaná data s měřeními shodují velmi dobře. Neliší se více, než je obvyklá odchylka slunečního záření, porovnávají-li se měřená data z různých ročníků. Během porovnání byla zjištěna jedna anomálie, a to, že starší verze programu (9.3) při zadání stejných vstupních parametrů vykazuje jiné výsledky, než nová verze (10.1), ačkoli dokumentace nástroje se neliší. Rozdíly však naštěstí nejsou nikterak zásadní.

Model slunečního záření sloužil jako hlavní podklad pro analýzu solárního potenciálu budov na zpracovávaném území. Pro každý střešní polygon byly z pixelů modelu solární radiace, které polygon pokrýval, automatizovaně vypočteny průměrné hodnoty množství slunečního záření pro jednotlivé měsíce v roce a pro celý rok. Dále byl pro každý polygon určen sklon, orientace a 3D plocha. Pro představu byla určena měsíční a roční výtěžnost potenciálního střešního systému, o ploše rovné ploše střešního polygonu a o účinnosti 14%. Data z analýzy byla následně prezentována formou interaktivní webové mapy v prostředí ArcGIS Online.

Výsledkem práce je návrh postupu analýzy solárního potenciálu budov a formy prezentace výsledných dat, která nabízí obyvatelům měst možnost relativně intuitivní a jednoduchou cestou zjistit přesné informace, potřebné k navrhování střešního solárního systému. Systém může sloužit i městům, jako pomůcka při propagaci čisté energetické politiky.

Existuje ještě mnoho zajímavých informací, které se z takto připravených dat dají odvodit, jako například výroční snížení emisí CO_2 , či návratnost investic atd. Z důvodů časové náročnosti projektu však již nemohly být tyto údaje do práce zahrnuty. Pro možnost reálného využití navrženého systému v praxi by bylo nutné také zdokonalit formu prezentace v podobě interaktivní webové mapy.

Použité zdroje

- [1] PIDWIRNY, M. *Fundamentals of Physical Geography* [online]. 2nd Edition. 2006 [cit. 2012-11-18]. Dostupné z: <<http://www.physicalgeography.net>>.
- [2] FIXEL, Jan. *Geodetická astronomie I. a základy kosmické geodézie*. Vyd. 1. Brno: VUTUM, 2000, 183 s. ISBN 80-214-1786-2.
- [3] SZOKOLAY, S. V. PLEA. *Solar geometry* [online]. Second revised edition. Brisbane, 2007 [cit. 2012-11-28]. ISBN 86766-634-4. Dostupné z: <<http://www.plea-arch.net>>
- [4] STAPLETON, Geoff a Susan NEILL. *Grid-connected solar electric systems: the Earthscan expert handbook for planning, design and installation*. New York: Earthscan, 2012, xx, 235 p. Earthscan expert series. ISBN 18-497-1344-8.
- [5] EUROPEAN COMMISSION. *Renewables make the difference* [online]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011, 23 p. [cit. 2012-12-04]. ISBN 92-791-6988-2.
- [6] KALOGIROU, Soteris. *Solar energy engineering: processes and systems*. Burlington, MA: Elsevier/Academic Press, c2009, xv, 760 p. ISBN 01-237-4501-2.
- [7] FU, Pinde a Paul M. RICH. *The Solar Analyst 1.0: User Manual* [online]. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), 1999-2000 [cit. 2012-12-04]. Dostupné z: <http://www.fs.fed.us>
- [8] EUROPEAN COMMISSION. *European Commission, Joint Research Centre: PVGIS* [online]. 2012, Last update: 10 February 2012 [cit. 2012-12-04]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [9] KUMAR, Lalit. ECOSYSTEM MANAGEMENT. *Reliability of GIS-based solar radiation models and their utilisation in agro-meteorological research*. School of Environmental and Rural Science, University of New England, Armidale, NSW, Australia. 2011.

- [10] *ArcGIS.com Help. ESRI. ArcGIS Resources* [online]. Copyright © 1995-2012, 12/13/2012 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: <http://resources.arcgis.com/en/help/arcgisonline/>
- [11] *ArcGIS Help 10.1. ESRI. ArcGIS Resources* [online]. Copyright © 1995-2012, 11/14/2012 [cit. 2012-12-15]. Dostupné z: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/>
- [12] *SolarTool - Help. Wiki.naturalfrequency.com* [online]. 1994 – 2012 Natural Frequency. [cit. 2012-12-2]. Dostupné z: <http://wiki.naturalfrequency.com/>
- [13] SILICON HILL. *Weather.sh.cvut.cz* [online]. 2010 [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://weather.sh.cvut.cz/weather/>
- [14] ÚTVAR ROZVOJE HL. M. PRAHY. *Geoportál Praha: Geografická data Prahy na jednom místě* [online]. Praha, Útvar rozvoje hl. m. Prahy 2010, všechna práva vyh [cit. 2012-12-06]. Dostupné z: <http://www.geoportalpraha.cz/>
- [15] DR. MARSH, Andrew. *Sun-Path Diagram Projection Methods. andrew-marsh.com* [online]. Copyright Dr. Andrew Marsh, 2012 [cit. 2012-12-07]. Dostupné z: <http://andrewmarsh.com/blog/2010/01/17/sun-path-diagram-projection-methods>
- [16] VÁLKOVÁ, Jarmila. *Návrh termoregulačního systému pro ohřev solárními kolektory. Brno, květen 2004. VUT-EU-ODDI-3302-24-01.* Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/pdf/TP04DP24.pdf>. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Josef Štětina.
- [17] CIHELKA, Miloš. *Program Čistá energie Praha pro rok 2012. ENVIS - Informační servis o životním prostředí v Praze* [online]. [2.5.2012] [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: <http://envis.praha-mesto.cz>
- [18] *SolarPro: Optimal Design, Installation & Performance* [online]. Ashland, OR: Home Power Inc, December/January 2009 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z: <http://solarprofessional.com>

- [19] MENINO, MAYOR, Thomas M. CITY OF BOSTON, *Environmental and Energy Services. Solar Boston Permitting Guide: A resource for building owners and solar installers* [online]. Fall 2010, 36 s. Dostupné z: <http://www.cityofboston.gov>
- [20] CITY OF BOSTON. *Renew Boston Solar*. Boston, [2010]. Dostupné z: <http://gis.cityofboston.gov/SolarBoston/>
- [21] ING. STANĚK, Kamil. *Dílčí výzkumná zpráva VZ04 č.1/2007: Fotovoltaický systém o výkonu 40,9 kWp na fakultě stavební, ČVUT v Praze: Vyhodnocení energetické produkce a ekonomického potenciálu*. Praha, listopad 2007. Dostupné z: http://fotovoltaika.fsv.cvut.cz/download/Zpravy/FSvFVstudie_ekon_energ.pdf. Výzkumná zpráva. Fsv ČVUT v Praze.
- [22] ING. SRDEČNÝ, Karel. EKOWATT. *Fotovoltaika v budovách: dosavadní zkušenosti pro budoucí rozvoj* [online]. EkoWATT, centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie, 2009, 40 s. Dostupné z: <http://ekowatt.cz>
- [23] WBGU. *WBGU: German Advisory Council on Global Change* [online]. 2012 WBGU. Dostupné z: <http://www.wbgu.de/en/home/>

Seznam příloh

A Přílohy v tištěné formě	73
A.1 Návod přístupu k webové mapě	73
A.2 Modely pro přípravu rastru terénu	74
A.3 Modely pro přípravu rastru budov	76
A.4 Modely pro přípravu rastru zeleně	79
B Přílohy v elektronické formě	80

A Přílohy v tištěné formě

A.1 Návod přístupu k webové mapě

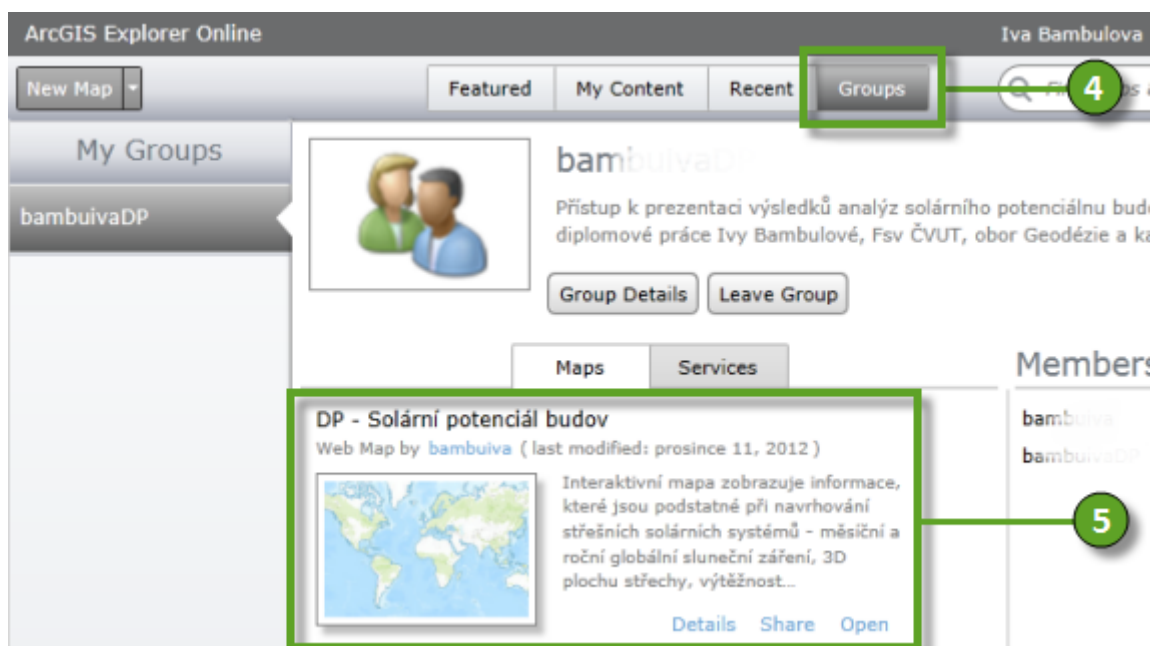
1. Jděte na adresu *http : //www.arcgis.com/explorer/* .
2. V pravém horním rohu okna stiskněte tlačítko „Sign In“.
3. Zadejte vstupní údaje:

- Username: ***
- Password: ***

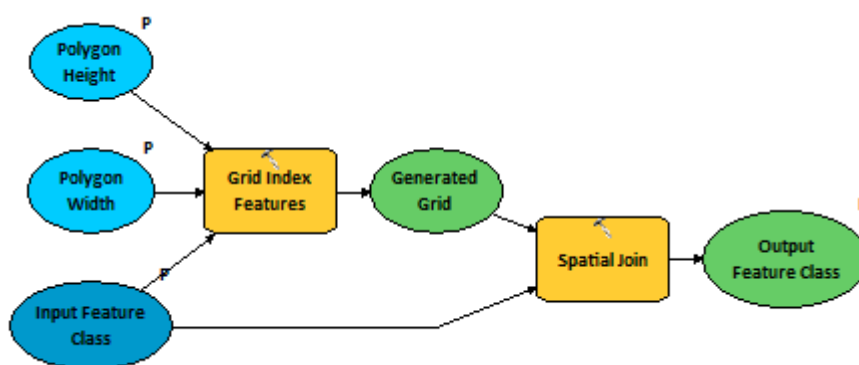
*** Vzhledem k podmínkám poskytovatele dat nemůže být mapa zveřejněna.
Vstupní údaje jsou uvedeny v tištěné formě DP.

4. Jděte do záložky „Groups“.
5. Otevřete mapu „DP - Solární potenciál budov“.

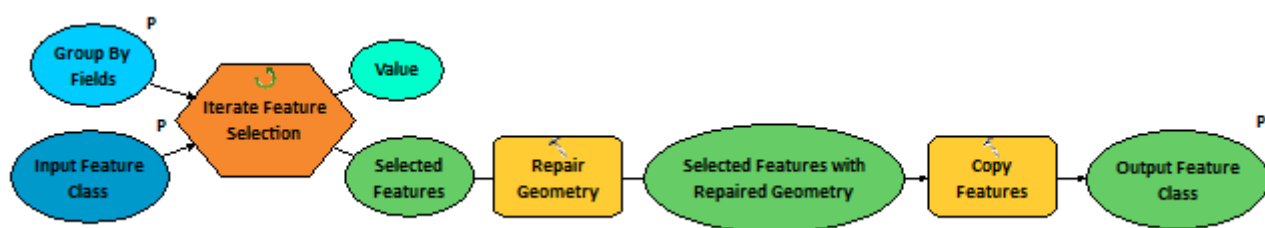
Kliknutím na jakýkoli střešní polygon ve zpracované oblasti otevřete vyskakovací okno, obsahující informace o jeho solárním potenciálu.



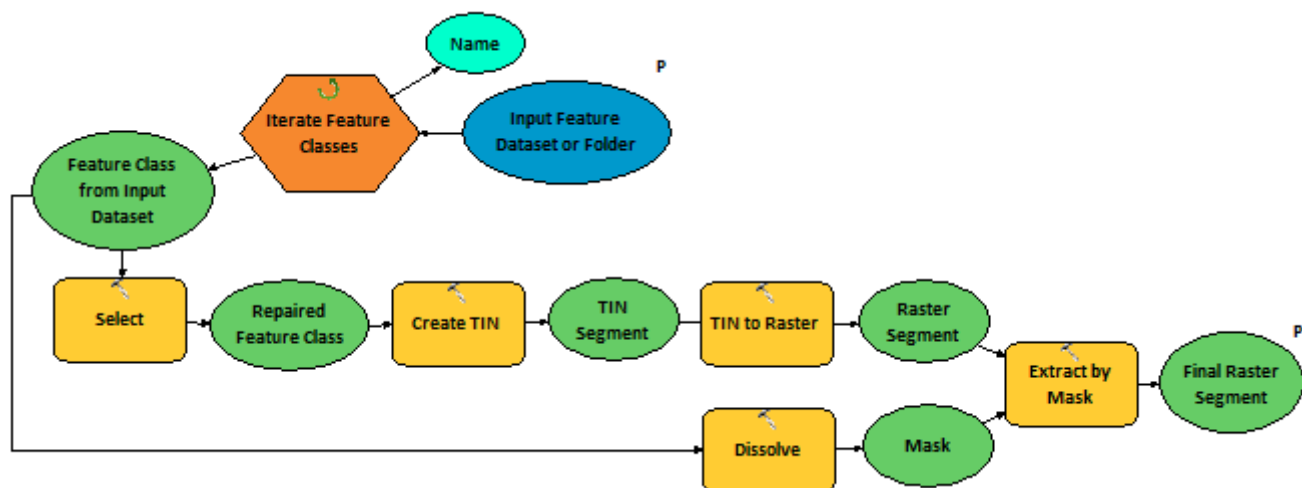
A.2 Modely pro přípravu rastru terénu



Obr. A.1: Model 1 *Spatial Join by Grid*. Vytvoří síť obdélníkových polygonů o zvoleném rozměru, které pokrývají plochu vstupního souboru. Každý obdélník má identifikační kód *PageName*. Na základě tohoto kódu jsou následně prvkům vstupního souboru přiřazeny kódy *PageName*, podle toho, ve kterém obdélníku se polohově nacházejí. Nástroj slouží k přípravě souboru prvků pro možnost jejich rozdělení do menších segmentů.

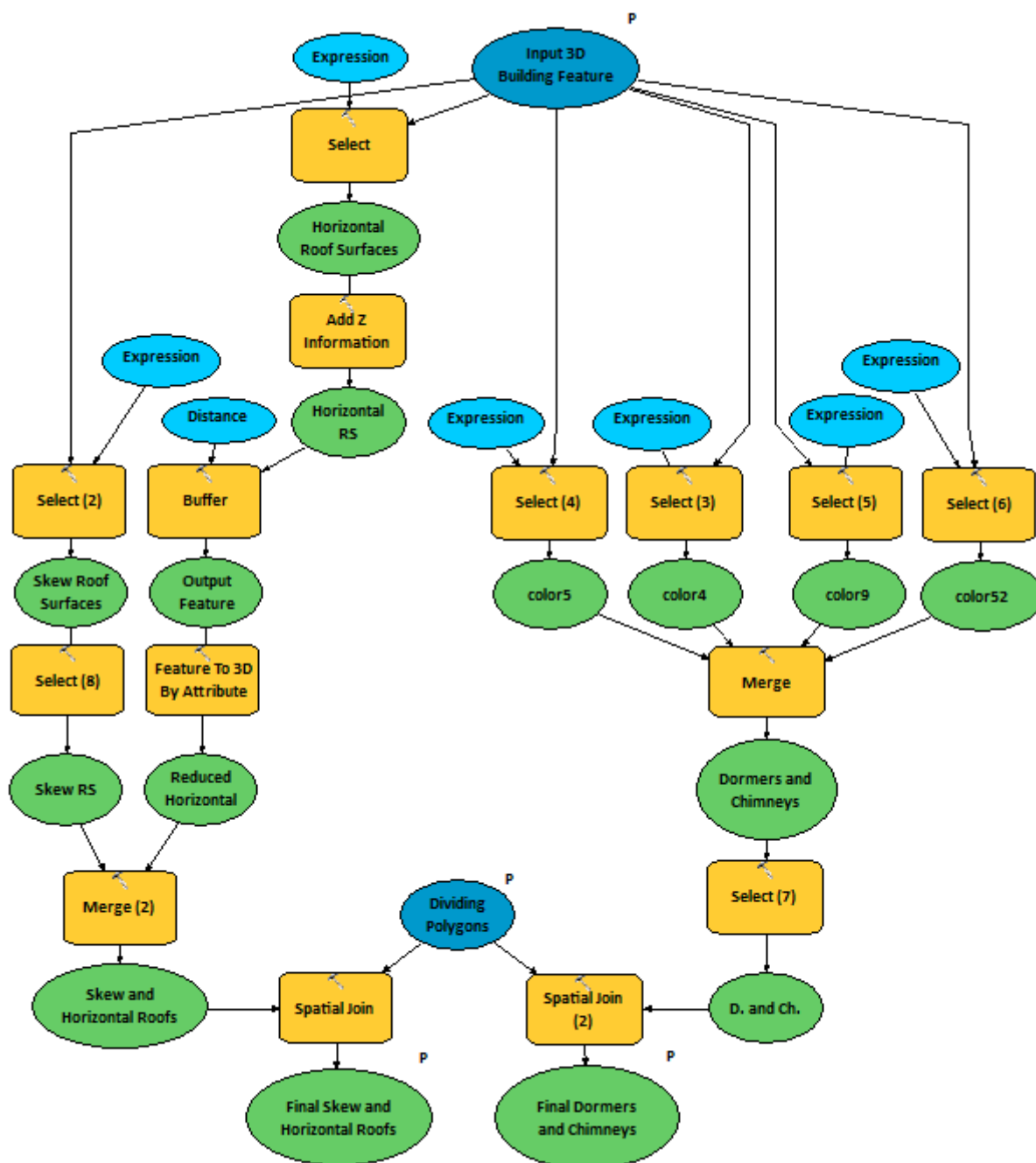


Obr. A.2: Model 2 *Divide Terrain to Segments*. Rozděluje objekty vstupního souboru do menších segmentů a ukládá je do nových souborů. Rozdělování provádí na základě společného atributu (v případě předzpracování modelem 1 *Spatial Join by Grid* jde o atribut *PageName*)

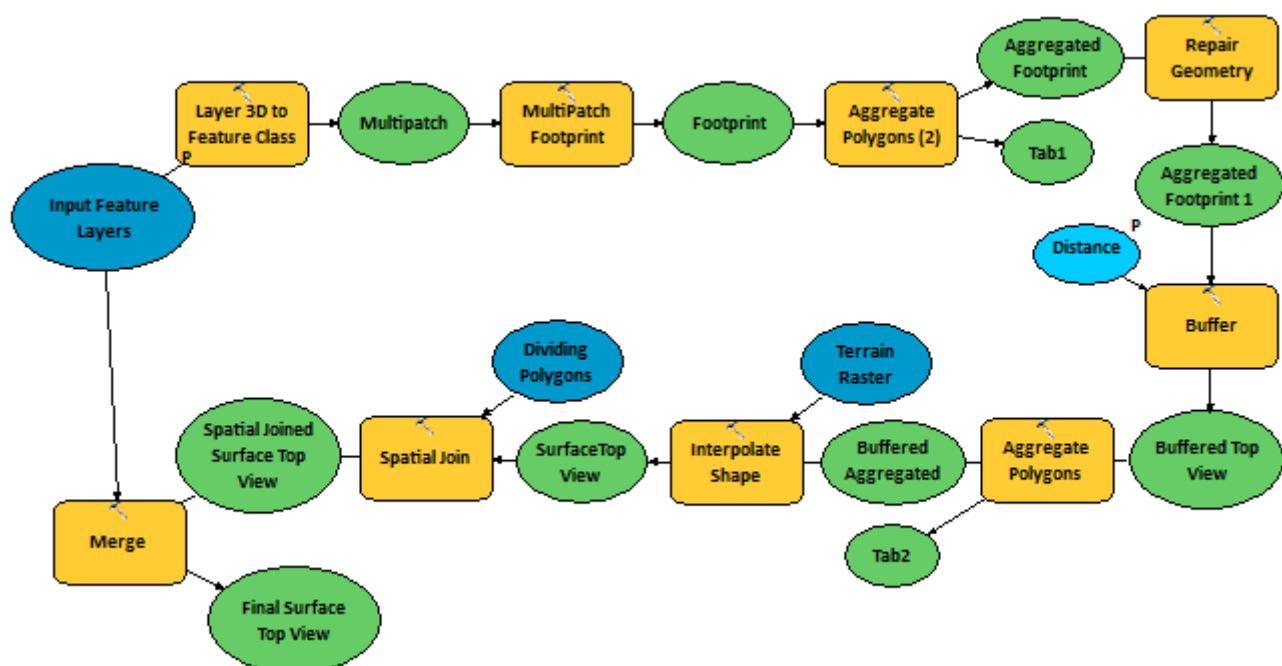


Obr. A.3: Model 3 *Create TIN and Raster of Terrain Segments*. Nástroj, který iteruje přes soubory v zadané vstupní datové sadě či složce. Pro každý soubor provede opravu geometrie, převedení 3D polygonů do TIN, převedení TIN do rastru a oříznutí rastru.

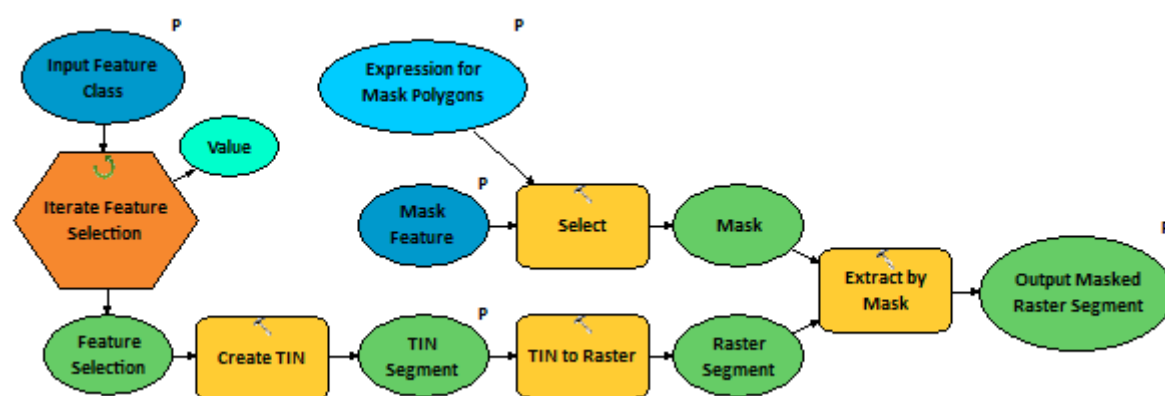
A.3 Modely pro přípravu rastru budov



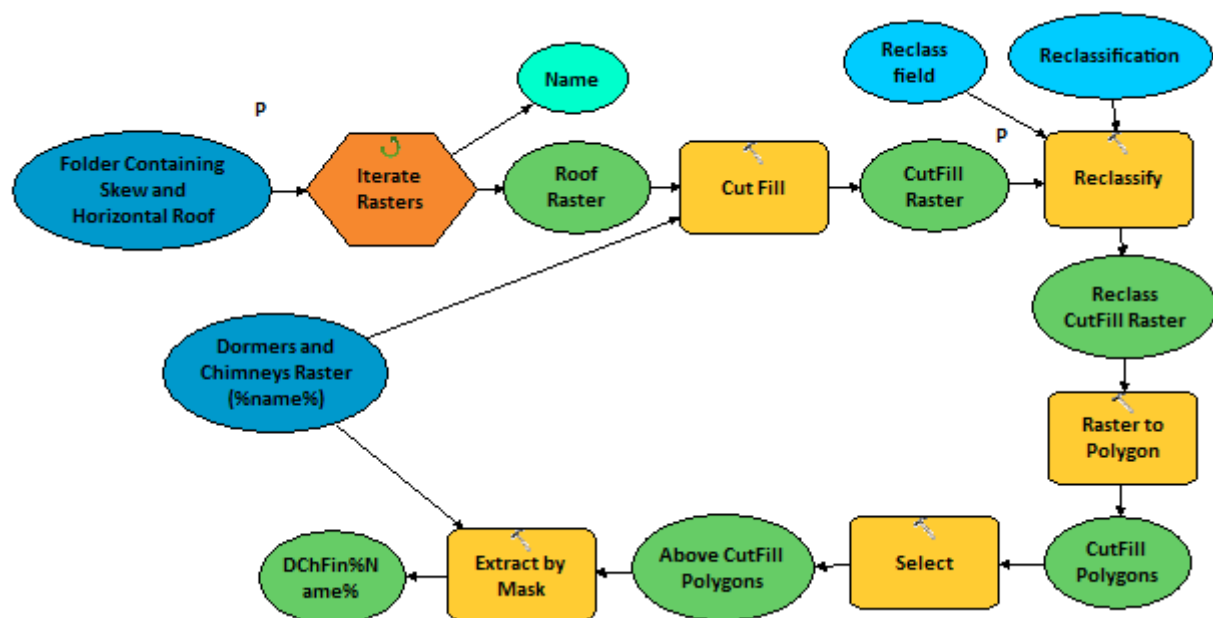
Obr. A.4: Model 1 *Separate Building Surfaces*. Nástroj rozděljuje soubor budovy do dvou souborů - šikmé a ploché střechy, střešní objekty. Rozdělení provádí na základě atributu Color. U horizontálních střech navíc provádí oříznutí polygonů, aby nepůsobily problémy při tvorbě TIN povrchu.



Obr. A.5: Model 2 *Create Buffered Footprints*. Nástroj vytváří sjednocené půdorysy vstupních objektů. Nejprve převede 3D prvky na MultiPatch, vytvoří stopy těchto prvků a sjednotí je. Následně zvětší tyto půdorysy o zvolený rozměr. Takto připravené půdorysy převede z horizontální roviny na zadaný povrch. Dále přiřadí prvkům souboru atribut, který umožní rozčlenění do menších segmentů. Nakonec výsledné půdorysy spojí se vstupními 3D prvky, čímž vznikne finální vstup pro tvorbu TIN povrchu budov či střešních objektů.

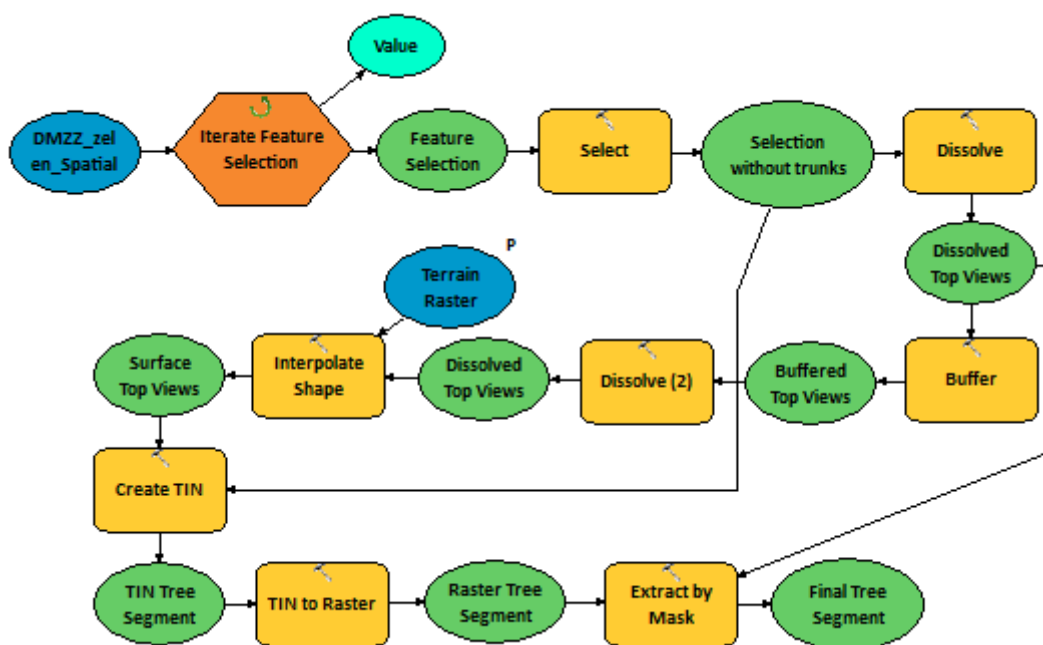


Obr. A.6: Model 3 *Create TIN and Raster Segments*. Nástroj, který iteruje přes výběr prvků ze souboru, založeném na zvoleném atributu. Pro každý výběr provede převedení 3D polygonů do TIN, převedení TIN do rastru a oříznutí rastru.



Obr. A.7: Model 4 *Mask DandCh Segments*. Do modelu postupně vstupují všechny segmenty rastru budov. Na ně se aplikuje funkce Cut Fill, která vrací rastr s atributem Volume, kde pixely o hodnotě menší než 0 jsou nad povrchem, rovny 0 na povrchu a větší než 0 pod povrchem. Každý segmentový cutfill rastr se následně reklasifikuje tak, aby obsahoval dvě hodnoty – 1 = nad povrchem, 2 = pod povrchem. Takový rastr se převede na polygonový shapefile, jehož polygony mají atribut Grid-code, tj. zmíněné jedničky či dvojky. Na tyto shapefile soubory se použije nástroj Select, který exportuje shapefile polygonů NAD povrchem. Tyto SHP se použijí jako maska původních rastrů výklenků, čímž se vytvoří konečné segmenty rastru výklenků.

A.4 Modely pro přípravu rastru zeleně



Obr. A.8: Model *Create Final Tree Raster Segments*. Tento model slouží ke kompletnímu zpracování 3D modelu zeleně. Vstupem je původní soubor zeleně a výstupem segmenty konečného rastru zeleně. Postup je obdobný, jako v případě terénu a budov.

B Přílohy v elektronické formě

Součástí diplomové práce je příloha ve formě DVD, které obsahuje následující složky.

- Text DP - obsahuje text práce ve formátu .pdf.
- Zpracování - obsahuje dále popsané složky, jejichž obsah je kompatibilní s programem ArcGIS verze 10.1.
 - Vstupní rastry terénu, zástavby a zeleně - obsahuje finální rastry povrchu, vstupující do analýz solárního potenciálu, pokrývající segmenty zpracovávaného území.
 - Výsledné rastry solární radiace, sklonu a orientace - obsahuje výsledné rastry měsíční a roční globální sluneční radiace pro jednotlivé segmenty území a rastry sklonu a orientace pro celé zpracovávané území.
 - Výsledné shapefile soubory - obsahuje soubory střešních polygonů, nesoucích informace o jejich solárním potenciálu, které byly získány z výše popsaných výsledných rastrů.
 - Vytvořené nástroje geoprocessingu - obsahuje sadu nástrojů, sestavenou pro automatizované zpracování vstupních dat.