Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta
Katedra geoinformatiky

# ROZŠÍŘENÍ ANALÝZY VIDITELNOSTI POMOCÍ INDEXŮ VIDITELNOSTI

**Rigorózní práce**

**Mgr. Jan CAHA, Ph.D.**

**Konzultant: Mgr. Tuček Pavel, Ph.D.**

**Olomouc 2015**
**Geoinformatika**

# ANOTACE

Cílem rigorózní práce je analýza možností získávání doplňkových informací při analýze viditelnosti. Tyto doplňkové informace mají podobu indexů viditelnosti. V práci je představeno celkem 11 indexů a spolu s nimi několik variant výpočtů, neboť některé indexy mohou být využívány v různých kontextech. V rámci předkládané rigorózní práce byly provedeny implementace, založené na open source implementaci analýzy viditelnosti v GRASS GIS, těchto indexů, za účelem vytvoření ukázkových výpočtů. Tyto výpočty jsou součástí práce v podobě elektronické přílohy na DVD. Zmíněná příloha pomáhá uživateli lépe ze zorientovat ve výsledcích a výstupech poskytovaných indexy viditelnosti. Přínosem této práce je prezentace posunu analýzy viditelnosti z kvalitativní analýzy na analýzu kvantitativní, která umožňuje mnohem širší použití a poskytuje odpovědi na výrazně širší spektrum otázek, které se váží k analýze viditelnosti.

# KLÍČOVÁ SLOVA

viditelnost, analýza viditelnosti, prostorové analýzy

Počet stran práce: 73
Počet příloh: 1

# ANOTATION

The main aim of this thesis is the analysis of possibilities of obtaining additional information about the visibility analysis. The additional information has the form of indices of visibility. The thesis describes 11 of such indices along with several variants, as some indexes can be used in various contexts. As part of the thesis the implementation of these indices was carried out, based on the implementation of viewshed analyses in GRASS GIS. This implementation was used to carry out the calculations of the indices in order to provide exemplary results. These results are provided in form of electronic appendix on DVD. This appendix should help the user understand the results and outputs provided by visibility indices. The contribution of the thesis is in presentation of visibility analyses as a quantitative analyses instead of qualitative. This enhancement allows broader utilization of results and provides answers to wider spectrum of questions connected to the visibility analyses.

# KEYWORDS

visibility, viewshed, spatial analysis

Number of pages: 73
Number of appendixes: 1

***PROHLAŠUJI, ŽE***

- rigorózní práci včetně příloh jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu,

- jsem si vědom, že na moji rigorózní práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, rigorózní práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, aby jeden výtisk diplomové práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,

- souhlasím, že údaje o mé rigorózní práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé rigorózní práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci 29. července 2015 Mgr. Jan CAHA, Ph.D.

Děkuji všem, kdo mě v průběhu tvorby této práce podporovali a motivovali mě k jejímu dokončení.

Zvláštní poděkování patří Alexandře Rášové za všechny diskuze, debaty a poznámky, týkající se analýzy viditelnosti, které zásadně ovlivnily výslednou podobu této práce.

Díky patří i Petu Fisherovi, za to, že mi představil analýzu viditelnosti ze zcela odlišného pohledu, a za podporu a rady v těžkých začátcích.

# Obsah

**ÚVOD** **8**

**1 CÍLE PRÁCE** **10**

**2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ** **11**

2.1 Použitá data . . . . . 11

2.2 Popis datové sady . . . . . 12

2.3 Použité programy . . . . . 14

2.4 Elektronické přílohy práce . . . . . 15

**3 VIDITELNOST** **16**

3.1 Dělení typů analýz viditelnosti . . . . . 18

**4 ALGORITMUS VÝPOČTU VIDITELNOSTI** **20**

4.1 Základ algoritmu pro výpočet viditelnosti . . . . . 21

4.2 Identifikace linie pohledu . . . . . 23

4.3 Výběr bodů na linii viditelnosti a určení jejich výšek . . . . . 26

4.3.1 Korekce výšek bodů . . . . . 28

4.4 Výpočet viditelnosti na LoS . . . . . 29

4.5 Porovnání implementací . . . . . 30

4.6 Inverzní viditelnost . . . . . 31

4.7 Parametry výpočtu viditelnosti . . . . . 32

4.8 Rozšíření informací získávaných z LoS . . . . . 33

**5 INDEXY VIDITELNOSTI** **35**

5.1 Booleovská viditelnost . . . . . 35

5.1.1 Inverzní booleovská viditelnost . . . . . 35

5.2 Fuzzy viditelnost . . . . . 37

5.3 Indexy polohy pozorovatele . . . . . 41
5.3.1 Rozdíl výšek pozorovatele a cíle . . . . . 41
5.3.2 Výškový pozorovací úhel . . . . . 42
5.3.3 Další možné indexy pozorovatele . . . . . 43
5.4 Indexy spojené s lokálními horizonty . . . . . 44
5.4.1 Vymezení lokálních horizontů z pozorovaného bodu . . . . 45
5.4.2 Počet lokálních horizontů před pozorovaným bodem . . . . 46
5.4.3 Rozdíl výšek od lokálního horizontu . . . . . 47
5.4.4 Rozdíl pohledových úhlů od lokálního horizontu . . . . . 50
5.4.5 Inverzní varianty indexů od lokálních horizontů . . . . . 52
5.5 Indexy spojené s globálním horizontem . . . . . 53
5.5.1 Vymezení globálního horizontu . . . . . 53
5.5.2 Rozdíl výšek od globálního horizontu . . . . . 54
5.5.3 Rozdíl pohledových úhlů od globálního horizontu . . . . . 55
5.5.4 Inverzní varianty indexů od globálního horizontu . . . . . 56
5.6 Rozdíl pohledového úhlu a sklonu LoS . . . . . 57

**6 VYUŽITÍ INDEXŮ VIDITELNOSTI V KOMPLEXNÍCH ANALÝZÁCH VIDITELNOSTI 60**

**7 DISKUZE 63**

7.1 Budoucí vývoj . . . . . 65

**8 ZÁVĚR 67**

**Seznam příloh 74**

# ÚVOD

Analýza viditelnosti patří mezi jednu ze základních geoinformatických analýz, jejíž praktické využití nachází uplatnění v mnoha různých oborech. Poměrně často je využívána v oborech jako jsou archeologie (Fisher et al., 1997; Lake et al., 1998; Loots et al., 1999; Ogburn, 2006), krajinné a územní plánování (Domingo-Santos et al., 2011; Fernandez-Jimenez et al., 2015; Fisher, 1995, 1996b), ale uplatnění najde i v dalších oborech např. architektura (Hlavatá a Oťahel, 2010), ochrana krajiny, monitorování krizových situací (Bao et al., 2015; Fisher, 1996b) a dalších. Svoji roli hraje i při výběru vhodných lokalit pro nejrůznější stavby (Bao et al., 2015; Dodd, 2001; Tsouchlaraki a Achilleos, 2004).

Zejména v rámci územního plánování může být přínosné využití analýzy viditelnosti, zejména s ohledem na v poslední době velice aktuální diskuze o vlivu výškových staveb na narušení panoramat a jejich viditelnosti z okolí. Při posuzování takovýchto staveb se často vyskytují jejich nejrůznější vizualizace při pohledu z okolí (zejména pohledy na tyto budovy ze zájmových či významných míst), ale málokdy je realizováno zhodnocení viditelnosti stavby v podobě prostorové analýzy. Za takové hodnocení by bylo možné považovat např. vymezení oblastí, ze kterých bude stavba viditelná, určení, nakolik bude stavba vystupovat nad lokální či dokonce globální horizont, a nebo specifikace, jaká část stavby (zejména výškově) bude z kterých lokalit viditelná.

Příklady potenciálních analýz viditelnosti uvedené v předchozím odstavci poukazují na komplexnost viditelnosti jako jevu. Každá ze zmíněných analýz přistupuje k problematice hodnocení viditelnosti z jiného úhlu a klade ve své podstatě jinou otázku. Ogburn (2006) vysvětluje, že není důležitá pouze otázka, jestli je něco viditelného, ale zejména to, jak je to viditelné. Což jsou dvě elementárně odlišné otázky. Zatímco na první lze odpovědět jednoduše, odpověď na druhou otázku může být výrazně komplikovanější a odvíjí se od přesného znění otázky.

Jak zmiňuje Fisher (1992) jsou s analýzou viditelnosti obvykle spojeny dva nesprávné předpoklady. Prvním předpokladem je, že terén, nad kterým je analýza viditelnosti počítána, je přesný. Z mnoha studií vyplývá, že tento předpoklad nelze považovat za správný a že je v rámci analýzy třeba uvažovat nejistotu či neurčitost povrchu (Fisher, 1992, 1998; Fisher a Tate, 2006; Huss a Pumar, 1997; Nackaerts et al., 1999; Anile et al., 2003). Druhým ze zmíněných nesprávných předpokladů je vnímání viditelnosti jako booleovského (pravdivostního) jevu (Fisher,

1992). Viditelnost je ve své podstatě mnohem komplexnějším fenoménem a jeho zjednodušení do podoby viditelných a neviditelných částí povrchu je často zavádějící a pro některé aplikace, a na nich založené rozhodovací analýzy, i vysloveně nevhodné (Fisher, 1996b). Komplexní zhodnocení viditelnosti vyžaduje více informace než klasická analýza viditelnosti (v softwarech obvykle označovaná jako Viewshed) poskytuje.

Rozšíření klasické booleovské viditelnosti, které by poskytovaly doplňkové informace pro hodnocení viditelnosti, byly sice navrženy a prakticky demonstrovány, viz např. studie, které provedli Fisher (1994b, 1995, 1996b), Llobera (2007) nebo Caha a Rášová (2015), ale jejich praktické využití je poměrně málo časté. Jejich častější praktická aplikace by přitom vhodně rozšiřovala schopnost kvantifikovat viditelnost a její parametry, což je pro mnohé praktické aplikace velice podstatné. Z těchto důvodů je výzkum a analýza možností získávaní informací o viditelnosti důležitou oblastí zájmu v geoinformatice. V rámci této rigorózní práce budou doplňkové informace o viditelnosti označovány jako indexy viditelnosti, tak jak tento termín použili Caha a Rášová (2015). Fisher (1996b) ve své práci tyto indexy označuje jako typy viditelnosti. De Floriani a Magillo (2003) pro tyto doplňkové informace používá termín rozšířené viditelnosti (angl. extendeds viewsheds).

Tato práce vznikla na základě autorova dlouhodobého zájmu o tuto problematiku, které se z pohledu ovlivnění analýzy viditelnosti nejistotou modelu povrchu věnoval v disertační práci (Caha, 2014), a na základě konzultací a korespondence, které vedl s prof. Peterem Fisherem z University of Leicester. Jistou motivací k sepsání této práce je i práce, kterou publikoval Felleman (1979). Ta popisuje mnoho konceptů a aspektů viditelnosti, které současná literatura věnující se viditelnostem v geoinformace opomíjí.

Část této práce, v níž byly navrženy dva nové indexy viditelnosti, byla prezentována jako příspěvek *„Line-of-Sight Derived Indices: Viewing Angle Difference to a Local Horizon and the Difference of Viewing Angle and the Slope of Line of Sight“* na konferenci GIS Ostrava 2015 (Caha a Rášová, 2015).

# 1 CÍLE PRÁCE

Hlavní cílem rigorózní práce je analýza možností získávání doplňkových informací (nad rámec prosté booleovské viditelnosti) při analýze viditelnosti a jejich následné praktické uplatnění při kvantifikaci viditelnosti. Součástí tohoto cíle bude demonstrace ukázek výpočtu jednotlivých charakteristik viditelnosti na praktických příkladech, které vhodně a názorně poukáží na jejich praktickou použitelnost a přínos při hodnocení viditelnosti.

Dílčím cílem práce je názorný popis postupu výpočtu viditelnosti v geografickém informačním systému (GIS), na němž budou demonstrovány možnosti rozšíření výpočtu viditelnosti o doplňkové charakteristiky. Tento cíl bude realizován v návaznosti na existující implementace výpočtu viditelnosti v open source geografických informačních systémech, zejména implementaci v GRASS GIS.

Na základě poznatků z rešeršní části práce, která se bude věnovat možnostem využití analýzy viditelnosti v praktických aplikacích a popisu rozšiřujících charakteristik viditelnosti, budou vznesena doporučení týkající se využití doplňkových charakteristik viditelnosti v praxi. Budou specifikovány konkrétní typy úloh, při nichž mohou některé z indexů viditelnosti poskytovat potřebné informace.

V rámci rigorózní práce nebude detailněji rozebírána problematika nejistoty povrchu a její vliv na výpočet viditelnosti. Pouze bude u každé charakteristiky viditelnosti stručně zmíněno, zdali je možné a vhodné při jejím výpočtu nejistotu povrchu hodnotit a jakým způsobem tato nejistota výpočet charakteristiky ovlivní. Důvodem, proč toto téma není v rámci práce řešeno, je jednak existence velkého počtu studií v této oblasti (viz např. Fisher (1992, 1995), Nackaerts et al. (1999), Huss a Pumar (1997), Rášová (2014) a mnoho dalších) a také fakt, že autor se tímto tématem již zaobíral ve své disertační práci (Caha, 2014).

# 2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

## 2.1 Použitá data

V rigorózní práci jsou použita data poskytovaná službou OpenTopography[1], která poskytuje svobodná (zcela zbavená všech copyrightových omezení) LiDaRová data (LiDaR zkratka pojmu Light Detection and Ranging), jenž lze libovolně využívat pro komerční i nekomerční účely[2]. Cílem této služby je podporovat rozšíření detailních modelů povrchů mezi odbornou i laickou veřejnost.

S ohledem na využití těchto volně dostupných dat je na tomto místě uvedeno poděkování tak, jak je specifikují metadata k vrstvě.

> LiDAR data acquisition and processing completed by the National Center for Airborne Laser Mapping (NCALM - http://www.ncalm.org). NCALM funding provided by NSF's Division of Earth Sciences, Instrumentation and Facilities Program. EAR-1043051.
>
> This material is based on [data, processing] services provided by the OpenTopography Facility with support from the National Science Foundation under NSF Award Numbers 0930731 & 0930643.

OpenTopography v současnosti zahrnuje celkem 185 datasetů zejména z USA. Velikost plochy datasetů i hustota nasnímaných bodů se různí, jsou k dispozici extrémně malé datasety o rozloze pouze 100 $m^2$ s hustotou bodů 2 221,44 bodů na $m^2$, stejně jako rozlehlé datasety o ploše 4 374 $km^2$ s hustotou bodů 13,73 na $m^2$. Kromě možnosti stažení surových dat (tzv. mračna bodů), lze přímo ze služby generovat modely povrchů a to jak ve formě rastrových dat, tak i TIN (triangulated irregular network).

Vzhledem k tomu, že data mají v rigorózní práci pouze ilustrační charakter, bylo možné vyhledat vhodný dataset, na němž lze demonstrovat všechny nezbytné charakteristiky. Pro tyto potřeby byl zvolen dataset *Durham, NH: Hyporheic Zone Extent and Exchange in a Coastal Strea* (National Center for Airborne Laser Mapping, 2015). Jedná se o město asi 16 km severovýchodně od Porthsmouthu ve státě

[1] Služba je dostupná z adresy: `http://www.opentopography.org/`.

[2] Možnosti využití dat z OpenTopography jsou shrnuty na `http://www.opentopography.org/index.php/about/policies`

New Hampshire. Data používají souřadnicový systém NAD 1983 HARN UTM Zone 19N (EPGS kód 3749), který bude dále používán pro všechna data v rigorózní práci.

## 2.2 Popis datové sady

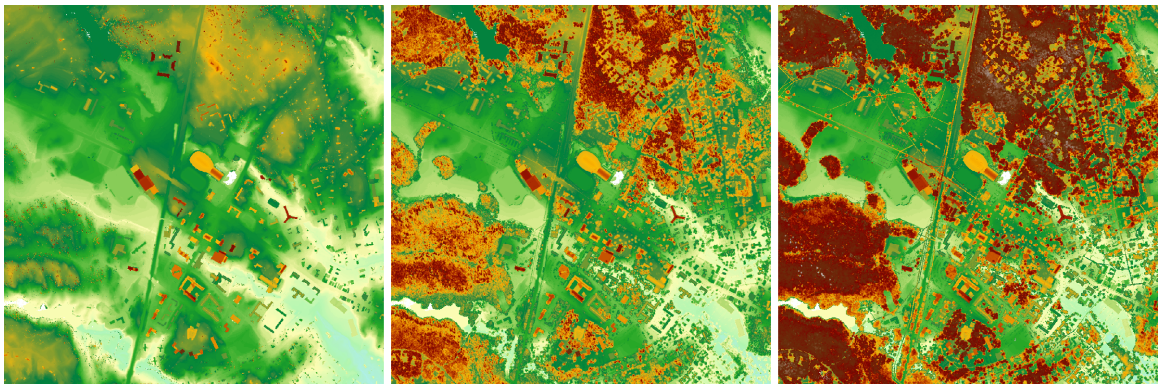
Vybraná datová sada zahrnuje samotné město a část neurbanizované krajiny v okolí. Celý dataset má plochu 47 km$^2$ s hustotou 10,99 bodů na metr čtverečný. Z důvodu zmenšení výpočetního času bylo z tohoto datasetu vybráno menší zájmové území o rozměrech přibližně 2×2 km, zahrnující střed města Durham, na němž budou analýzy viditelnosti počítány (viz obr. 1).

Obr. 1: Zájmová oblast vymezená červeným čtvercem. Podklad OpenStreetMap (© OpenStreetMap contributors – `www.openstreetmap.org`).

Zvolená část datové sady zahrnuje 1872×1866 pixelů o rozlišení 1×1 metr. Jedná se tedy na poměry výpočty viditelnosti o relativně velice detailní dataset, který umožňuje velice podrobné zhodnocení viditelnosti v zájmové oblasti. Jak bylo zmíněno výše, lze ze služby OpenTopography získávat jedna surová data (mračno bodů), ale také přímo data v rastrové podobě. Pro potřeby této práce bylo vhodnější využít data v rastrové podobě. Byly proto získány tři rastry reprezentující minimální, průměrnou a maximální výšku odrazu LiDaRu. Pro velkou část aplikací je dostačující průměrná výška odrazu, kterou budeme považovat za korektní povrch, nad nímž budou počítány analýzy viditelnosti. Zejména v případě vegetace poskytuje průměrná hodnota odrazu dobrou informaci o skutečném povrchu, která není vychýlena ani směrem k minimu (obvykle odraz od povrchu) ani k maximu (např. odraz od ojedinělé větve, která vystupuje výrazně nad korunu stromu, či odchylka v měření). U ploch bez výraznější vegetace (keře či stromy) se odchylky výšek mezi minimem a maximem pohybují často do 1 metru, do rozdílu 3 výškových metrů se pak tyto plochy vejdou takřka bez výjimek. Pouze hrany budov mají rozdíly větší, což je ale logické a správné. Zejména pro potřeby inverzní analýzy viditelnosti (popsáno dále v textu kap. 4.6) je vhodné využít i doplňkové informace o minimálním a maximálním odrazu. Pokud bude v textu práce zmiňován povrch bez bližší specifikace, předpokládáme využití průměrného odrazu.

V průměrném odrazu je nejnižší výška v zájmovém území 5,1 metru, nejvyšší je 74,2 metru a průměrná výška 28,3 metru. Celkově se příliš nevyskytují hodnoty nad 55 metrů, vyšší hodnoty jsou spíše odchylky, jedná se řádově o cca 600 pixelů, což reprezentuje asi 0,017 % pixelů z plochy. U maximálního odrazu se nad hranicí 55 metrů nachází cca 3,2 % pixelů, a maximum je 205 metrů, což je zjevná odchylka.

Obrázek 2 ukazuje všechny tři povrchy. Je zřejmé, že v nejnižším odrazu se zobrazí zejména povrch a budovy, v průměrném hraje významnější roli vegetace, která je potom nejvýraznějším výškovým prvkem v maximálním odrazu. Při vizuálním porovnání nejnižšího a průměrného odrazu si lze udělat zběžnou představu o vlivu vegetace na viditelnost.



Obr. 2: Srovnání tří povrchů, dle typu odrazu – vlevo minimální, uprostřed průměrný, vpravo maximální. Všechny povrchy jsou vztaženy k rozsahu hodnot průměrného odrazu, barvy využívají běžnou hypsometrickou stupnici.

## 2.3 Použité programy

S ohledem na cíle práce je zřejmé, že nebylo možné využít existující GIS softwary, neboť ty neumožňují rozšiřování a úpravu existujících algoritmů a nástrojů. Teoreticky by sice bylo možné navrhované algoritmy implementovat v open source programech např. GRASS GIS, nicméně tato varianta by byla velice náročná a zahrnovala by nastudování a pochopení kompletního API zmíněného softwaru. Jako jednodušší varianta byla zvolena vlastní implementace van Kreveldova algoritmu (van Kreveld, 1996) v programovacím jazyce Java. Samotný algoritmus je popsán v kapitole 4. Volba programovacího jazyka v tomto případě nehraje podstatnější roli, autor ho zvolil zejména z důvodu dobré znalosti tohoto jazyka.

Z důvodu kontroly implementace algoritmu pro výpočet viditelnosti byly pro potřeby rigorózní práce využity programy ArcMap ve verzi 10.2 a GRASS GIS ve verzi 7.0.0. Z těchto programů byly použity nástroje Viewshed, respektive r.viewshed. Jak zmiňuje Fisher (1993), nelze očekávat shodné výsledky při výpočtu viditelnosti z různých softwarů, zejména kvůli odlišnostem v implementaci. Zběžné porovnání vlastní implementace a implementací v ArcMap a GRASS GIS je uvedeno v kapitole 4.5.

Vytvořené algoritmy nejsou součástí práce, neboť práce se zaměřuje na indexy viditelnosti, nikoliv na jejich přímou implementaci. Samozřejmě pro potřeby výpočtu ukázek bylo nezbytné jednotlivé indexy implementovat, nicméně úroveň implementace odpovídá účelu práce, tj. demonstrace jednotlivých výpočtů. Algoritmy tak nebyly optimalizovány, následkem čehož jsou některé z nich výrazně

časově a paměťově náročné. Autor také nepředpokládal jejich využití v této podobě, tudíž k těmto algoritmům neexistuje uživatelské prostředí a ani odpovídající dokumentace. Práce s algoritmy v této podobě je uživatelsky poměrně náročná a nebylo shledáno nezbytným, aby tyto algoritmy tvořily přílohu práce.

## 2.4 Elektronické přílohy práce

Pro potřeby zhodnocení a vizualizace jednotlivých indexů jsou v příslušných kapitolách vždy uvedeny ilustrační obrázky. Ty ale mohou jen obtížně postihnout v dostatečném detailu všechny detaily a situace, které se mohou v rámci jednotlivých indexů viditelnosti vyskytnout. Z tohoto důvodu je na přiloženém DVD uložena geodatábaze se všemi dílčími výstupy, spolu s projekty pro ArcMap (ve verzi 10.2) pro jednotlivé typy indexů a 3D scénami vybraných indexů v ArcScene. Tyto typy příloh poskytují nejvhodnější přístup k datům pro uživatele a umožňují vhodné zkoumání a vizualizace indexů viditelnosti dle jeho potřeb. Na ilustračních obrázcích se také nachází pouze jeden obrázek, zatímco pro většinu indexů jsou v elektronické příloze případy pro všech 5 testovacích rozhledových bodů.

# 3 VIDITELNOST

Pojmy jako viditelnost, dohlednost a další příbuzné mají svoje definice jednoznačně určené v meteorologii a klimatologii, viz popisy těchto pojmů, které popisuje Vysoudil (2003). Tyto definice se ale neshodují s vnímáním viditelnosti v geoinformatice. Je nezbytné tyto pojmy odlišit a na viditelnost nahlížet jako na prostorovou analýzu, tak ji popisuje např. Fisher (1993).

Viditelnost, jako prostorová analýza, odkazuje k širokému spektru otázek. Mezi nejjednodušší patří otázka, zda bude pozorovaný bod z pozorovací lokality viditelný. Jeli odpověď na tuto otázku kladná, lze dále hodnotit, jak dobře je pozorovaný bod viditelný či nakolik je při pozorování výrazný. Tato hodnocení jsou v mnoha případech důležitější, než samotný fakt, že pozorovaný bod je z pozorovací lokality viditelný. Tyto informace o viditelnosti lze získávat při samotném výpočtu viditelnosti, ale bohužel se v praxi velice málo využívají.

Jednou z prvních publikací komplexně popisujících problematiku viditelnosti a jejích komplexních analýz publikoval Felleman (1979). V této studii jsou GIS využívány okrajově, což je vzhledem k datu publikování logické. Jedná se o geografický průzkum, opírající se z velké části o terénní šetření a teoretické popisy mnoha konceptů. Ačkoliv se jedná z dnešního pohledu o poměrně starou literaturu, je pro analýzy viditelnosti zcela zásadní, neboť popisuje mnohé koncepty, které se jinde v literatuře příliš často nevyskytují, ale jejichž implementace jsou pro komplexní analýzu viditelnosti poměrně klíčové. Pro tuto rigorózní práci tvoří právě tato publikace jeden ze zásadních výchozích bodů.

V geoinformatice se pro hodnocení viditelnosti nejčastěji používají algoritmy založené na vymezení takzvané linie pohledu, která spojuje pozorovací bod (bod s pozorovatelem) s cílovým bodem (Fisher, 1993). Existují sice i alternativní algoritmy, které linii pohledu nevyužívají, ale jejich implementace v softwarech není příliš častá (Izraelevitz, 2003; Wang et al., 2000). Linie pohledu (anglicky označovaná jako line-of-sight se zkratkou LoS) vymezuje na modelu povrchu, nad kterým je viditelnost počítána, profil, ze kterého lze určit, zdali je cílový bod viditelný. Obecně ale profil mezi pozorovatelem a pozorovacím bodem obsahuje větší množství informace než pouhé vymezení viditelnosti nebo neviditelnosti cílového (pozorovaného) bodu. Bohužel způsob, jakým je analýza viditelnosti obvykle implementována v GIS, veškeré informace, které by bylo možné z linie pohledu získat, značně redukuje (Fisher, 1996b). Tato redukce je z hlediska potenciálního využití

a možností poměrně nešťastná a nevhodná. V práci bude dále prakticky ukázáno, že bez této redukce informace, je možné viditelnost mnohem lépe hodnotit a kvantifikovat.

Výpočet analýzy viditelnosti se v GIS takřka vždy provádí nad povrchem reprezentovaným v rastrovém datovém typu a to i přes to, že existují algoritmy pro výpočet nad terénem reprezentovaným v podobě TINu (triangulated irregular network) (Nagy, 1994; Coll et al., 2007). S ohledem na tuto skutečnost bude pro potřeby rigorózní práce uvažován pouze algoritmus vymezující viditelnost nad povrchem reprezentovaným rastrem. Analýzy viditelnosti budou také vnímány zejména jako prostorové analýzy, bude se tedy dodržovat jejich vnímání tak, jak je obvyklé například ve výzkumu, který provedl Fisher (1993). Naproti tomu některé novější přístupy např. studie, kterou provedli Bartie et al. (2010), zaměřená zejména na viditelnosti budov, přistupují k problematice viditelnosti z jiného úhlu a pro výpočet nevyužívají klasický algoritmus. Tyto přístupy poskytují zajímavou alternativu a mohou být i zdrojem inspirace, nicméně přímo v podobě, v jaké jsou popsané ve zmíněné literatuře, nebudou v rigorózní práci využity.

Pro analýzu viditelnosti je zcela klíčové použití vhodných dat pro tvorbu podkladového modelu povrchu. Pro tuto analýzu není vhodné využívat modely reliéfu, neboť ty neobsahují zejména budovy a vegetaci, které mají na výsledky analýzy zásadní vliv. Z toho důvodu je vhodnější použití modelu povrchu, který bude obsahovat jak stavby, tak i vegetaci. S tím, jak se zvyšuje dostupnost dat z LiDaR (Light Detection and Ranging), se stává vytváření modelů povrchu o vysoké přesnosti méně problematickým. V některých oblastech nicméně stále nejsou LiDaRová data dostupná a využívají se tedy modely terénu, které se v některých případech doplňují o známá data o vegetaci a budovách, což ale nelze považovat za optimální řešení. Nicméně například pro archeologické aplikace je nezbytné se spokojit s pouhými odhady jak vegetaci tak i staveb. Tuto problematiku detailněji zmiňují Fisher et al. (1997), Lake et al. (1998), Ogburn (2006) a Rášová (2013).

Starší studie (např. Fisher (1991, 1996b),Huss a Pumar (1997),Loots et al. (1999)) často používaly prosté modely terénu, bez informací o vegetaci a budovách, s velkým prostorovým rozlišením (buňky 30×30 metrů i větší). Toto prostorové rozlišení není pro analýzy viditelnosti zcela vhodné, neboť buňky gridu jsou již poměrně velké, čímž dochází k závažné generalizaci terénu, a také je otázka, nakolik jsou zaznamenané výšky reprezentativní. Problematikou reprezentativnosti hodnot pixelu se detailněji zaobíral Fisher (1997). Při praktickém srovnání vy-

počtené viditelnosti s pozorováními v terénu zjistili Maloy a Dean (2001) značné rozdíly, které připisují právě odchylkám v zaznamenaných výškách a také příliš velkým buňkám gridu. S ohledem na dříve již zmíněnou rostoucí dostupnost dat z LiDaRu, je vhodné, pokud je to možné, využít těchto dat, která poskytují u obou parametrů výrazně větší přesnost a mohou kromě modelu terénu zahrnovat i informace o vegetaci a budovách.

Z hlediska praktického použití může být analýza viditelnosti ukázkou toho, jak dostupné implementace limitují uživatele. Na celou řadu otázek, které mohou uživatelé ve vztahu k viditelnosti vznášet, neumí současné geografické informační systémy vhodně odpovědět. Software obvykle poskytuje pouze základní analýzu, která umožní zhodnotit, které oblasti povrchu jsou z pozorovacího bodu vidět. To ale není dostačující, jak zmiňuje Fisher (1994b, 1996b,a) a na praktické studii dokládá i Felleman (1979). Uživatele mohou například kromě klasické viditelnosti zajímat oblasti, kde by byl viditelný objekt o specifické výšce umístěný na povrchu (tuto variantu umí například ArcMap i GRASS GIS vypočítat, nicméně ne všichni uživatelé jsou si tohoto faktu vědomi). Ale co obrácená varianta viditelnosti, kterou Fisher (1996b) označuje jako inverzní viditelnost (angl. inverse viewshed)? Tato analýza, při níž se nehodnotí viditelnost okolí z jednoho bodu, ale naopak viditelnost jednoho bodu z okolí, není implementována v žádném dostupném GIS. Využití nástroje viewshed, může být v této situaci nesprávné, neboť jak je z literatury zřejmé, nelze tvrdit, že je-li z $A$ vidět $B$, pak i z $B$ musí být vidět $A$ (Fisher, 1996b,a; Huss a Pumar, 1997). Nicméně díky nastavení parametrů OFFSETA a OFFSETB lze inverzní viditelnost v ArcMap spočítat (Esri, 2014). Stejné nastavení, pouze s jiným označením, obsahuje i GRASS GIS (Toma et al., 2014). Nicméně absence kvalitní dokumentace k této problematice způsobuje, že s touto variantou nejsou uživatelé dostatečně obeznámeni. Navíc implementaci viditelnosti a inverzní viditelnosti v jednom nástroji nelze považovat, s ohledem na uživatele, za šťastnou, neboť se jedná o dvě principiálně odlišné analýzy. Navíc v této podobě lze inverzní viditelnost použít pouze pro výpočet booleovské viditelnosti, pro jiné indexy viditelnosti již tento postup použít nelze (Fisher, 1996b).

## 3.1 Dělení typů analýz viditelnosti

Jak bylo dříve zmíněno, viditelnost je složitým jevem, který lze hodnotit z mnoha úhlů pohledu. Zde se pokusíme uvést možné způsoby dělení analýz viditelností do

kategorií. Základním dělením je vymezení klasické viditelnosti, při níž se hodnotí viditelnost povrchu z pozorovacího bodu, a inverzní viditelnosti, při níž pro každý bod povrchu zjišťujeme, jestli pozorovatel umístěný v této lokalitě uvidí na jeden konkrétní cílový bod (Fisher, 1996b). Příkladem inverzní viditelnosti je například zjišťování, z kterých lokalit bude viditelná plánovaná větrná elektrárna o výšce $x$ metrů, umístěná v lokalitě $z$.

Další možností je vyčlenění viditelností, které specificky vymezují pouze horizonty. Vymezení globálního horizontu má své praktické využití např. pro optimalizaci měření pomocí GPS, ale vymezení horizontů je důležité i z jiných hledisek, např. pozorovatelnost objektů na obloze. Objekty vertikálně blízké horizontům jsou také vždy výraznější než objekty, které nemají k horizontům žádný výrazný vztah (Felleman, 1979). Pro hodnocení viditelnosti nemusí být zajímavý pouze globální (maximální) horizont, stejně podstatné jsou i horizonty lokální.

Dalším dělením může být rozdělení viditelností na ty, které jsou založené na porovnávání úhlů a ty, které pracují s výškami. Kupříkladu na otázku, jaká část budovy bude vystupovat nad horizont při pohledu z okolí, je třeba podat odpověď ve výškových metrech, aby bylo možné zhodnotit část budovy, která bude vidět. Naproti tomu na otázku, nakolik bude budova vystupovat nad lokální horizont při pohledu z okolí, je vhodné uvést odpověď jako úhel. Pouze tak bude zajištěna možnost adekvátního porovnání výraznosti budovy z rozdílných míst v okolí. Obecně jsou aspekty viditelnosti založené na srovnání úhlů vhodné pro porovnávání oblastí v různých vzdálenostech od pozorovatele (globální analýzy), zatímco porovnání výšek je vhodné pro zhodnocení v konkrétní lokalitě (lokální analýza).

Dalším dělením analýz viditelnosti může být rozdělení na ty analýzy, které má smysl počítat pouze pro viditelné části povrchu (např. pohledový úhel), a analýzy, které má smysl počítat i pro neviditelné části povrchu (např. rozdíl výšek k lokálnímu horizontu).

Zvláštní samostatnou kategorií pak je fuzzy viditelnost, která hodnotí, nakolik je uživatel v cílovém bodě schopen rozlišit určitý objekt, či jaká je jeho viditelnost ve vztahu ke vzdálenosti od pozorovatele.

Tento výčet možnosti rozdělení typů analýz viditelnosti není konečný, zcela jistě existují i pohledy na tyto analýzy, které zde nebyly zmíněny. Navíc je možné některé indexy vzájemně kombinovat a poskytovat tak odpovědi na mnohem komplexnější dotazy.

# 4 ALGORITMUS VÝPOČTU VIDITELNOSTI

Jak bylo dříve zmíněno, existují varianty výpočtu viditelnosti jak pro rastrové datové struktury, tak i pro datové struktury vektorové (TIN). Vzhledem k tomu, že většina výzkumu dotýkajícího se viditelnosti, je prezentována na površích reprezentovaných jako rastry a také, že algoritmy pro výpočet viditelnosti častěji pracují s rastrovými daty, bude pro potřeby rigorózní práce využíván pouze tento typ algoritmu. Algoritmy pro výpočet viditelnosti nad datovou strukturou TIN popisují např. Nagy (1994), Coll et al. (2007) a také De Floriani a Magillo (2003), kteří také poskytují poměrně rozsáhlý přehled další literatury zmiňující tuto problematiku.

Výpočet viditelnosti lze realizovat různými postupy, byť nejčastěji se využívají metody založené na linii pohledu (LoS) (Fisher, 1993; Sorensen a Lanter, 1993). Alternativu k tomuto přístupu popisují např. Wang et al. (2000), nicméně jedná se o velice specifický algoritmus, který nelze jednoduše rozšiřovat o doplňkové charakteristiky viditelnosti. Vzhledem k zaměření rigorózní práce na doplňkové informace týkající se viditelnosti, které lze nejlépe získávat právě z LoS, se zaměříme právě na tuto skupinu algoritmů.

Použitý algoritmus výpočtu viditelnosti zásadním způsobem ovlivňuje získaný výsledek. Testování a porovnání vypočtených viditelností v dostupných softwarech (celkem 7) provedl Fisher (1993). Jím získané výsledky prokázaly až 30 % rozdíly mezi implementacemi výpočtu viditelnosti v různých softwarech. Na základě těchto výsledků poukázal autor na fakt, že nelze srovnávat výsledky z různých softwarů, pokud není znám přesný algoritmus, který dané softwary pro výpočet viditelnosti používají. Zveřejňování použitých algoritmů ale není, se zřejmou výjimkou open source GIS, obvyklé. Fisher (1993) nicméně zdůraznil, že pro vhodné vyhodnocení a korektní využití je znalost využívaného algoritmu naprosto nezbytná, neboť pouze na základě znalosti algoritmu lze hodnotit potenciální nedostatky a problémy, které se s výpočtem viditelnosti pojí. V rámci této studie autor také apeloval na tvůrce softwaru, aby komplexněji dokumentovali nejen analýzu viditelnosti, ale i ostatní analýzy. Tento apel autor posléze opakoval (Fisher, 2007), nicméně řada softwarů stále k implementaci neposkytuje dostatečné detaily. Mezi tyto softwary patří např. ArcMap (Esri, 2014). Nejlépe zdokumentovaný algoritmus výpočtu viditelnosti má open source software GRASS GIS a to jednak přímo

v dokumentaci (Toma et al., 2014) ale i v publikacích (Haverkort et al., 2007, 2009). Jedná se zefektivněnou variantu sweep algoritmu, který popsal van Kreveld (1996).

Samotný algoritmus výpočtu viditelnosti má několik dílčích kroků, ve kterých dochází k výpočtu, na základě literatury lze za tři nejdůležitější části označit:

- identifikace jednotlivých linií pohledu,
- výběr důležitých bodů na linii pohledu a určení jejich výšek,
- výpočet viditelnosti (či jiné doplňkové charakteristiky).

Každá z těchto dílčích částí zásadně ovlivňuje získaný výsledek. V následujících kapitolách budou tyto dílčí části algoritmu detailněji popsány.

## 4.1 Základ algoritmu pro výpočet viditelnosti

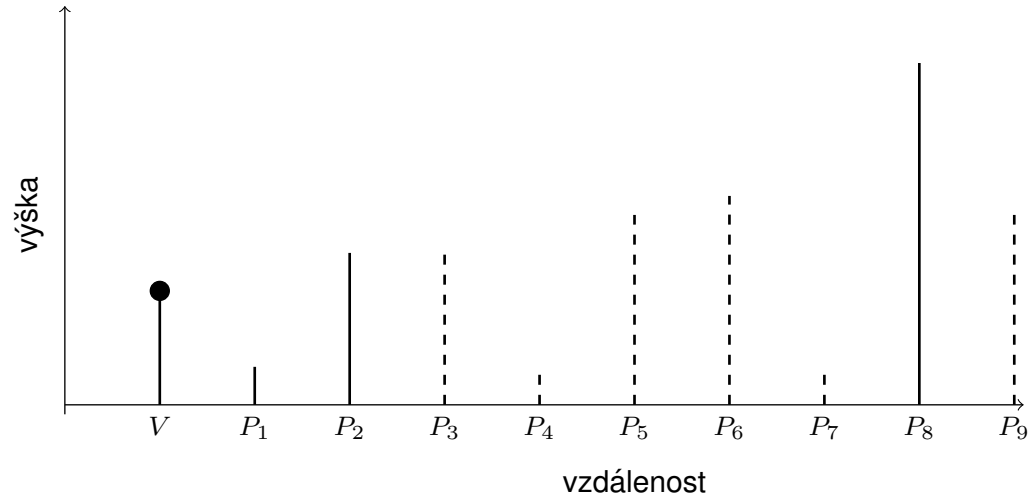
Výpočet viditelnosti vyžaduje poměrně jednoduché vstupy – model povrchu a pozorovací bod. Je důležité zmínit, že je vhodnější použít model povrchu, který zahrnuje jak vegetaci tak i lidské výtvory (zejména stavby), než model reliéfu, který tyto doplňující prvky neobsahuje. Jak budovy, tak vegetace totiž zásadním způsobem ovlivňují výsledek analýzy. Vliv vegetace na viditelnost popisuje Llobera (2007), vlivem budov se zaobírali Bartie et al. (2010).

Model povrchu do analýzy vstupuje jako rastrová vrstva o $m \times n$ buňkách. Důležitým faktorem je prostorové rozlišení tohoto modelu povrchu a přesnost zaznamenaných výšek. Nad tímto modelem povrchu bude viditelnost a další její charakteristiky počítány. Klasická implementace analýzy viditelnosti určuje pro každou z $m \times n$ buněk, zdali je z pozorovacího bodu viditelná. Všechny komplexnější analýzy, jako například celková viditelnost (Kim et al., 2004), fuzzy viditelnost (Fisher, 1994a) a další varianty viditelnosti (Fisher, 1996b), pak využívají tento základní algoritmus, který dále modifikují, či využívají opakovaně. Dále v textu bude popsán základní algoritmus určení viditelnosti a pro každou doplňující charakteristiku bude popsáno, jakým způsobem je třeba jednotlivé části algoritmu modifikovat.

Pozorovací bod vstupuje do analýzy obvykle v podobě souřadnic na vstupním povrchu a výšky (takzvaném offsetu), která udává vertikální odsazení pozorovatele

od povrchu v daném bodě. Pokud by pozorovatel byl umístěn přímo na povrchu, pak by výsledná viditelná oblast byla obvykle velice malá. Pro potřeby výpočtů značíme pozorovatele jako $V$, jeho výšku, která zahrnuje výšku povrchu v místě pozorovatele včetně offset, potom jako $Ve$.

Výpočet viditelnosti, za využití algoritmů založených na LoS, potom určuje, zdali je cílový (nebo též pozorovaný) bod $P_t$, který má výšku $P_te$ a vzdálenost od pozorovatele $P_td$, zastíněný některým z bodů $P_i, i \in \{0, \ldots, n\}$, které mají stejně jako $P_t$ svoji výšku a vzdálenost od pozorovatele, ležících mezi $V$ a $P_t$ (Obr. 3). $P_td$ se počítá jako prostá planární vzdálenost $P_t$ od $V$. Pro výpočet klasické viditelnosti to nepředstavuje problém, ale minimálně pro fuzzy viditelnost toto určení vzdálenosti nemusí být nejvhodnější. Využívaná notace a značení součástí LoS je přebírána z práce, kterou publikoval Izraelevitz (2003), a částečně upravena, aby lépe odpovídala potřebám této práce. Pro výpočet viditelnosti bohužel neexistuje v literatuře jednotné značení, používané zápisy jsou tak průnikem zápisů z různých zdrojů.




Obr. 3: Ukázka linie pohledu s pozorovatelem a devíti body. Na této ukázce není specificky určen bod zájmu. Body pro pozorovatele viditelné jsou reprezentovány plnými liniemi, zatímco body neviditelné jsou reprezentované čerchovanými liniemi.

Pozorovatel ($V$), body na LoS ($P_i$) a cílový bod ($P_t$) jsou jediné nezbytné prvky, které je třeba k určení viditelnosti na povrchu mezi dvěma body. Ačkoliv se na první pohled jedná o velice jednoduché vstupní parametry, v následujících kapitolách bude demonstrováno, že jejich určení a správná volba není tak jednoduchou otázkou, neboť existuje více než jedna možnost, jak dílčí části algoritmu imple-

mentovat. Kombinací těchto částí pak vzniká široké spektrum možností, jak může být konkrétní algoritmus výpočtu viditelnosti implementován .

## 4.2 Identifikace linie pohledu

Prvním krokem při výpočtu viditelnosti mezi $V$ a $P_t$ je určení bodů, nacházejících se mezi těmito body. Vzhledem k tomu, že povrch je reprezentován jako rastrová struktura, lze ze znalosti souřadnic $x$ a $y$ obou bodů v rámci rastru vybrat body ležící mezi nimi, například pomocí Bresenhamova algoritmu (Bresenham, 1965). Tento algoritmus se v počítačové grafice běžně používá pro vykreslování linií v rastrech a podobných aplikacích. Při jeho použití je třeba brát v potaz existenci několika variant tohoto algoritmu, kdy jedna varianta vybírá všechny pixely, jimiž prochází linie, zatím co jiné označují pouze pixely, kterými linie prochází výrazně (tato varianta se nejčastěji využívá v počítačové grafice). Pro implementaci pro analýzu viditelnosti je výrazně vhodnější varianta první, protože všechny buňky gridu, kterými prochází linie mezi $V$ a $P_t$, ovlivňují viditelnost.

S využitím Bresenhamova algoritmu lze pro každou buňku ze vstupního gridu určit buňky nacházející se na linii pohledu mezi pozorovatelem a cílovou buňkou. Problematická je nezbytnost provedení této operace $m \times n$-krát. To představuje poměrně výraznou výpočetní zátěž, až do takové míry, že pro větší hodnoty $n$ a $m$ (obecně hodnoty větší než 1000) může výpočet trvat řádově až několik hodin. Tento problém popisuje van Kreveld (1996) a pro grid o rozměru $n \times n$ uvádí složitost algoritmu $O(n^3)$. Uváděná složitost vede k tomu, že s rostoucím rozměrem gridu roste počet výpočtů vymezení linie kubicky, což představuje zásadní omezení. Na toto omezení běžně narážely i implementace v softwaru. Například v GRASS GIS verze 6.4.4 je výpočet viditelnosti implementován v modulu r.los, který v dokumentaci striktně doporučuje udržovat hodnoty $m$ i $n$ nižší než 1 000, čili celý grid menší než jeden milión buněk. A to pouze z důvodu časové náročnosti výpočtu. Od verze 7.0.0, kdy byl tento starý modul, nahrazen výrazně optimalizovaným modulem r.viewshed, se toto doporučení v dokumentaci nevyskytuje (Haverkort et al., 2009; Toma et al., 2014). Problematické je i náhodné čtení výškových dat z rastru, které může dále výrazně zpomalit celý algoritmus (van Kreveld, 1996). Dalším nedostatkem tohoto určení je vymezení pouze LoS striktně mezi $V$ a $P_t$. Jak bude ukázáno později, pro některé aplikace, je vhodné pracovat s LoS s větším dosahem, který přesahuje zájmový bod.

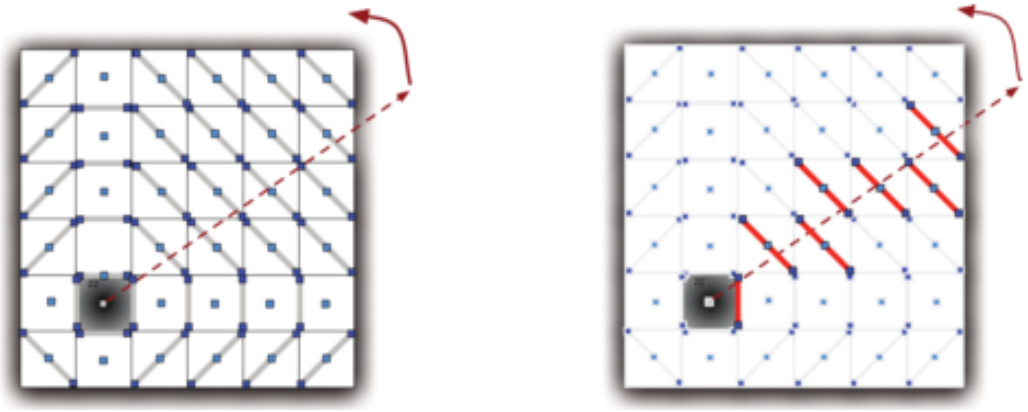
Výsledkem snahy o optimalizaci výpočtu linie pohledu je využití takzvaného algoritmu pro procházení roviny (anglicky plane sweep algorithm). Tento algoritmus zásadně snižuje složitost mnoha geografických (či přesněji řečeno geometrických) aplikací a jeho vztah ke geoinformatickým analýzám popisují například Wood a Kim (2008). Jeho využití pro analýzy viditelnosti jako první popsal van Kreveld (1996). Složitost tohoto algoritmu je na gridu o velikosti $n \times n$ pouze $O(n^2 \log n)$, což odpovídá snížení časových nároků zhruba o řád (van Kreveld, 1996; Haverkort et al., 2009), byť za cenu větších nároků na paměť, ale tyto nároky lze považovat za zanedbatelné v kontextu ušetřeného výpočetního času.

Plane sweep algoritmy obecně transformují vstupní strukturu (v tomto případě buňky gridu) do podoby setříděného seznamu. Obecná podoba algoritmu je popsána v algoritmu 1, konkrétní varianta pro výpočet viditelnosti Buňky gridu jsou v tomto seznamu reprezentované pomocí prvků dle nejmenšího, středového a největšího úhlu (horizontální orientace od pozorovatele). Každá buňka je tedy reprezentována třemi záznamy. Tento seznam se v algoritmech označuje jako *Event List* (van Kreveld, 1996). *Event List* se posléze po prvcích prochází a do nové struktury (označované jako *Status List*) jsou ukládány aktuálně zpracovávané buňky, pokud se jedná o nejmenší úhel. Pro středové úhly je v rámci *Status Listu* počítána viditelnost a při nalezení největšího úhlu je prvek ze *Status Listu* odstraněn. Detailněji, včetně samotného algoritmu, tento postup výpočtu popisují jednak van Kreveld (1996) a také Haverkort et al. (2009).

**Algoritmus 1** Obecná struktura plane sweep algoritmu. Upraveno dle: van Kreveld (1996)

Vytvoření a naplnění *EventListu*
Vytvoření *StatusListu* a naplnění počátečními hodnotami
▷
**while** *StatusList* není prázdný **do**
    Smaž první prvek *EventListu*
    **if** Sweep line protnula nový prvek **then**
        Přidej nový prvek do *StatusListu*.
    **end if**
    **if** Sweep line přestala protínat některý prvek **then**
        Odstraň prvek ze *StatusListu*.
    **end if**
    Proveď výpočet na stávajícím *StatusListem*.
    Pokud je to nutné, přidej nové prvky do *EventListu*
**end while**
▷ Poslední krok je velice obecný, verze algoritmu pro viditelnost se v podstatě netýká.

Postupně tedy jak polopřímka, která rotuje okolo pozorovatele, prochází těmito buňkami, jsou do Status Listu přidávány aktuálně zpracovávané buňky a jsou z ní odstraňovány buňky již zpracované. Rotace teoretické polopřímky je zajišťována postupným procházením *Event Listu*. *Status List* tak vždy obsahuje všechny buňky gridu ležící na polopřímce spojující bod s pozorovatelem s bodem na okraji rastru (Obr. 4). Výhodou tak je, že pro každou buňku rastru máme k dispozici celou LoS, včetně částí ležící až za pozorovaným bodem. To posléze vhodně poslouží při výpočtech některých indexů viditelnosti.

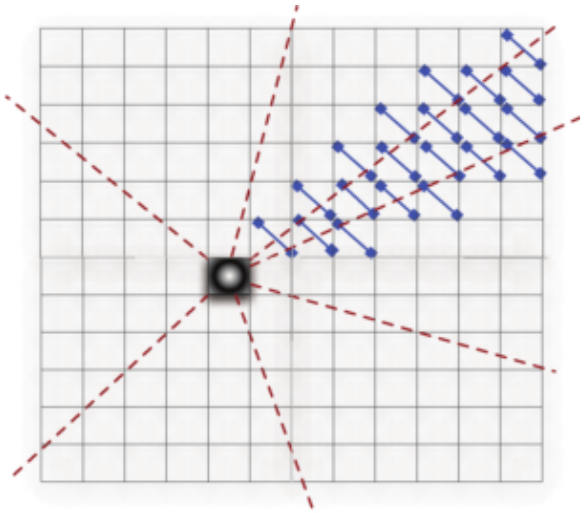


Obr. 4: Princip plane sweep algoritmu jak ho popsal van Kreveld (1996). Vlevo prvky *Event Listu* a vpravo aktuální prvky ve *Status Listu*. (převzato z: Haverkort et al. (2009))

Tento algoritmus je implementován v GRASS GIS (Toma et al., 2014) a tato konkrétní implementace je popsána v článcích, které publikovali Haverkort et al. (2007, 2009). V širších souvislostech a detailněji tento algoritmus popisuje van Kreveld (1996).

Dalším krokem je potom snaha algoritmus dále zrychlovat optimalizací či paralelizací výpočtu. Tato problematika patří mezi často řešená témata, viz například návrh optimalizace rozdělením vstupního gridu na části (Obr. 5), jak ji popsali Haverkort et al. (2007, 2009). Dalšími autory, kteří tuto problematiku řešili jsou např. Tabik et al. (2013), Ferreira et al. (2014) a Teng et al. (1997).

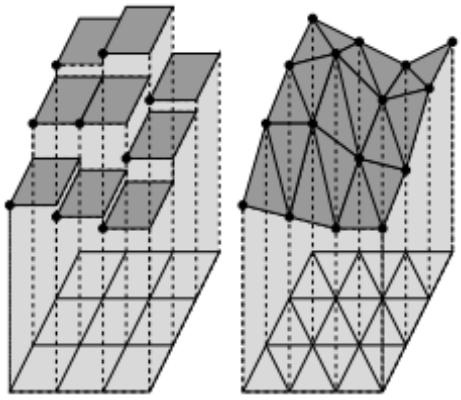
Na základě popisu dvou možných algoritmů pro vymezení LoS na gridu lze říci, že výrazně lepším řešením je využití plane sweep algoritmu, jednak kvůli výrazně rychlejšímu výpočtu a také z toho důvodu, že umožňuje pracovat s kompletní LoS, která sahá i za zájmový bod. Implementace tohoto algoritmu byla využita pro všechny výpočty viditelnosti v rigorózní práci.



Obr. 5: Možnost optimalizace výpočtu viditelnosti rozdělením gridu do $n$ částí. (převzato z: Haverkort et al. (2009))

## 4.3 Výběr bodů na linii viditelnosti a určení jejich výšek

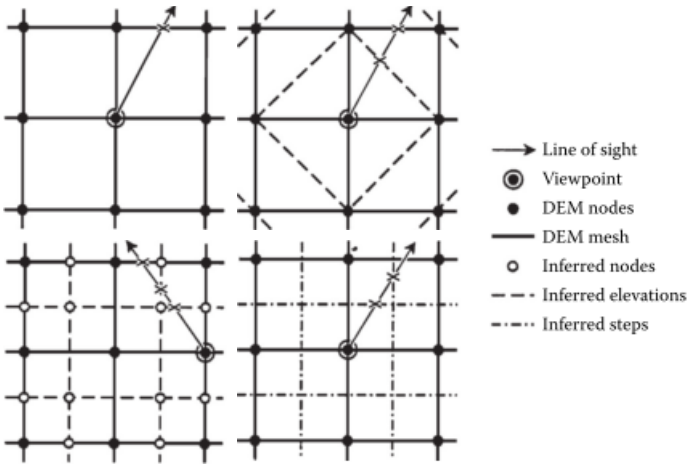
Při odvozování LoS z modelu povrchu je třeba brát v potaz i fakt, že ačkoliv jsou často povrchy v geoinformatice vnímány jako spojité, ve skutečnosti je grid (raster) reprezentuje jako nespojité (diskrétní) struktury (De Floriani a Magillo, 2003). Tento problém je ilustrován na obr. 6. Výpočet viditelnosti nad diskrétní strukturou gridu je sice teoreticky rychlejší, ale výsledkem jsou pouze hrubé aproximace viditelnosti (Izraelevitz, 2003), zejména kvůli zjevným nedostatkům tohoto modelu. Reálný povrch je mnohem lépe aproximován gridem, o kterém uvažujeme jako o spojitém modelu povrchu.



Obr. 6: Reprezentace gridu jako diskrétní (vlevo) a spojité (vpravo) veličiny. (převzato z: De Floriani a Magillo (2003))

Vzhledem k tomu, že jak bylo popsáno výše, je vhodné vnímat grid jako spojitý model povrchu, je nezbytné při vytváření LoS odvodit z povrchu hodnoty výšek v místech, která ji nemají specifikovanou. V modelech povrchů obvykle hodnota buňky reprezentuje výšku ve středu buňky, byť je možné, aby se jednalo o jiným způsobem reprezentativní hodnotu (Fisher, 1997). Pro analýzy viditelnosti je ale nejvhodnější, aby byla v buňce uložena středová hodnota.

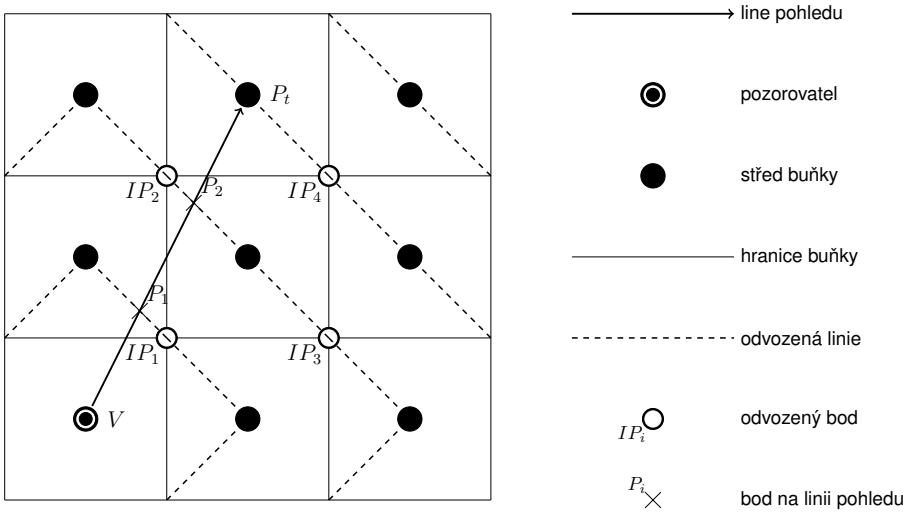
Při studiu nejistoty pojící se implementací analýzy viditelnosti popsal Fisher (1993) celkem 4 možnosti, jak lze výšky z gridu odvozovat. Odlišnosti jsou zřejmé z obr. 7. Ve všech variantách se vypočítávají hodnoty výšek v rozích buněk jako průměr ze čtyř sousedících buněk. Body mezi středy buněk se počítají jako vážený průměr dvou středů, mezi nimiž se nacházejí, přičemž váhou je vzdálenost k jednotlivým středům. Identicky se potom vypočtou body na hranicích buněk jako vážený průměr dvou bodů v rozích buněk, mezi nimiž se tento bod nachází.




Obr. 7: Možnosti doplnění gridové struktury o doplňkové body. Vlevo nahoře – lineární interpolace mezi středy buněk, vpravo nahoře – triangulace gridu, vlevo dole – lineární interpolace mezi středy buněk doplněná o body na hranicích buněk, vpravo dole – body na hranicích buněk. (převzato z: Fisher (1993))

Na základě studie, kterou provedl Fisher (1993) a algoritmu, který je implementován v GRASS GIS (Toma et al., 2014; Haverkort et al., 2009), byl pro praktickou implementaci zvolen jako vhodný algoritmus tzv. triangulace gridu (obr. 7 vpravo nahoře). Vlastní popis algoritmu je zobrazen na obr. 8. Použitá implementace se jen nepatrně liší od algoritmu v GRASS GIS, a to pro body, které leží ve stejném sloupci nebo řádku jako pozorovací bod, tato úprava byla provedena, aby algoritmus odpovídal popisu dle Fishera (1993). Na obrázku jsou patrné body v rozích buněk značené jako $IP_i$ a body na LoS $P_1$ a $P_2$. Výšky bodů na LoS

jsou získány jako vážený průměr středu buňky a příslušné hodnoty v rohu buňky (spojené odvozenou linií).




Obr. 8: Použitý algoritmus pro získání bodů na LoS.

Využití bodů odvozených z povrchu různými metodami z obr. 7 může vést k zásadním rozdílům v získaných výsledcích analýzy viditelnosti. Rozdíly mohou být velice výrazné zejména mezi použitím pouhé lineární interpolace a bodech na hranicích buněk (Fisher, 1993), kdy první poskytuje příliš optimistické výsledky, zatímco druhý poskytuje poměrně pesimistické predikce. Z tohoto důvodu se jako vhodná varianta jeví metoda triangulace gridu i s ohledem na to, že je implementována v GRASS GIS.

### 4.3.1 Korekce výšek bodů

Při výpočtu výšek bodů je v některých případech třeba také uvažovat zakřivení Země a refrakci světla. Obě tyto korekce jsou poměrně jednoduché a popisuje je např. manuál ArcGIS (Esri, 2014). Pro bod $P_i$ na LoS s výškou $P_ie$ a vzdáleností od pozorovatele $P_id$ vypadá následovně:

$$P_ie_k = P_ie - \frac{P_id}{d} + r\frac{P_id}{d}, \tag{1}$$

kde $d$ je průměr Země, $r$ je refrakční koeficient, $P_ie$ je původní výška a $P_ie_k$ je upravená výška s korekcemi. Pro všechny další výpočty nicméně budeme používat značení $P_ie$ pro obě výšky, neboť korekce výšek s ohledem na zakřivení Země

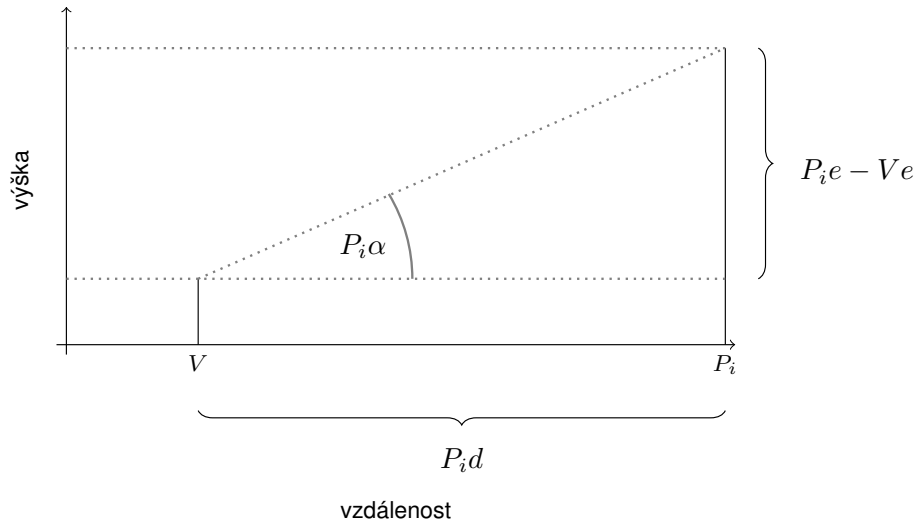
a refrakci světla není při výpočtu vždy nezbytně nutná. Zejména, pokud je zájmové území malého rozměru, nemají tyto korekce takřka smysl.

Manuál ArcGIS uvádí jako výchozí hodnoty 12 740 000 metrů pro průměr Země a 0,13 pro refrakční koeficient (Esri, 2014). Manuál GRASS GIS uvádí hodnotu refrakčního koeficientu 0,14286 a korekce pro zakřivení Země se vypočítává interaktivně z použitého souřadnicového systému (Toma et al., 2014). Nicméně pro potřeby většiny aplikací jsou hodnoty navrhované manuálem ArcGIS dostačující aproximací.

## 4.4 Výpočet viditelnosti na LoS

V momentě, kdy je vymezená LoS a získaná množina bodů $P_i$ mezi $V$ a $P_t$, lze přistoupit k samotnému výpočtu viditelnosti. Fisher (1993) popisuje, že zájmový (cílový) bod $P_t$ je viditelný z pozorovacího bodu $V$, pokud přímou spojnici mezi těmito body neprotne terén. Pro formální definici je nezbytné pro každý bod na LoS vypočítat jeho pozorovací úhel $P_i\alpha$. Tento úhel se určí jako (obr. 9):

$$P_i\alpha = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{P_ie - Ve}{P_id}\right). \tag{2}$$

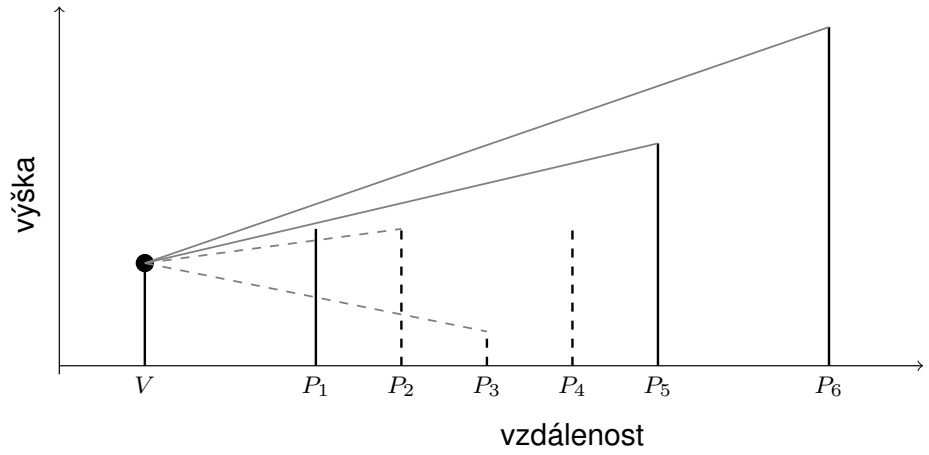



Obr. 9: Výpočet pozorovacího úhlu.

Tento úhel určuje polohu pozorovaného bodu buď nad nebo pod rovinou, v níž je pozorovatel. Zájmový bod $P_t$ je potom viditelný, pokud $P_i\alpha < P_t\alpha$ pro všechny

$P_i$, pro které platí $P_i d < P_t d$ (Izraelevitz, 2003). Grafické zobrazení je na obr. 10.

Při vymezení viditelnosti potom platí, že pokud je podmínka splněna, pak je zájmový bod viditelný, pokud splněna není, je bod neviditelný. Samotné určení viditelnosti je již poměrně snadnou úlohou, s níž se nepojí ani žádná implementační neurčitost, ani výpočetní problém (Fisher, 1993).




Obr. 10: Pozorovací úhly ke čtyřem vybraným bodům – šedé linie. Body pro pozorovatele viditelné jsou vyznačeny plnou linií, body neviditelné potom linií přerušovanou.

## 4.5 Porovnání implementací

Pro porovnání viditelnosti je třeba zmínit, že naprogramovaná implementace van Krevedlova algoritmu (van Kreveld, 1996) nepočítá viditelnost pro okrajové pixely gridu, protože u nich nelze adekvátně spočítat odvozené body (dle obr. 8). Proto tyto pixely vynecháváme. Nejedná se obvykle o problém, neboť okrajové oblasti nebývají zájmové a celkové vyznění analýzy se zásadně nemění.

Porovnání algoritmů bylo provedeno pro pozorovací bod s ID 4. Byla vypočtena klasická booleovská viditelnost pomocí nástrojů Viewshed (ArcMap), r.viewshed (GRASS GIS) a pomocí vlastní implementace. Výsledky jsou shrnuty v tab. 1. Odlišnost mezi implementacemi dosahuje cca 6 % plochy u viditelných pixelů, což odpovídá závěrům, které vznesl Fisher (1993). Mezi vlastní implementací použitou pro potřeby rigorózní práce a GRASS GIS je toto číslo výrazně nižší. Celková shoda zařazení pixelu do kategorií pak mezi vlastní implementací a ArcMapem dosahuje 99,25 % a 99,94 % mezi vlastní implementací a GRASS GIS.

Tabulka 1: Porovnání výsledků viditelností
v různých implementacích pro bod s ID 4.

| Pixely | ArcMap | GRASS GIS | Vlastní implementace |
|---|---|---|---|
| viditelné | 220 993 | 234 548 | 234 863 |
| neviditelné | 3 264 104 | 3 250 549 | 3 242 812 |

Při testování na jiných pozorovacích bodech se získané výsledky lišily od těch prezentovaných výše, ale nejednalo se o výrazné odlišnosti (viz tab. 2). Tyto odlišnosti jsou způsobeny i konkrétním typem terénu a volbou pozorovacího bodu, je tedy možné, že na určitém typu bude shoda výrazně vyšší, než na jiném typu terénu. Obecně lze říci, že v plošších oblastech je shoda lepší, zatímco v členitém terénu se více zdůrazní odlišnosti jednotlivých algoritmů. Nicméně tento závěr lze očekávat (Fisher, 1993).

Na základě prezentovaných výsledků je tedy možné konstatovat, že vlastní implementace je provedena korektně a neobsahuje žádnou zásadnější chybu, která by výrazně ovlivňovala výsledky analýzy.

Tabulka 2: Porovnání výsledků viditelností
v různých implementacích pro bod s ID 5.

| Pixely | ArcMap | GRASS GIS | Vlastní implementace |
|---|---|---|---|
| viditelné | 174 303 | 184 178 | 184 747 |
| neviditelné | 3 310 794 | 3 300 919 | 3 292 928 |

## 4.6 Inverzní viditelnost

Tuto variantu viditelnosti popsal Fisher (1994b, 1996b) a zjišťuje se při ní, zdali je pozorovaný bod viditelný z jednotlivých buněk gridu. Jedná se tedy o inverzní (též reverzní) problém ke klasické viditelnosti. Do buněk gridu pak není zaznamenáváno, zdali je buňka viditelná, ale naopak, zdali je z ní vidět cílový bod. Při této variantě se obvykle zadává výška pozorovatele (offset), o který se zvýší výška buňky v momentě, kdy je z ní počítána viditelnost na cílový bod, ale také offset cílového bodu. Pokud nepoužijeme offset cílového bodu, zjišťujeme viditelnost povrchu na pozorovaném místě. Ta bývá obecně výrazně nižší, než viditelnost s použitím i relativně malého offsetu. Nicméně tato problematika je poměrně dobře zdokumentována (Fisher, 1994b, 1996b,a).

Inverzní viditelnost nemusí byt nutně počítána pouze pro booleovskou viditelnost. Řadu doplňkových indexů, které lze počítat z LoS, lze počítat nejen jako klasickou viditelnost, ale i jako viditelnost inverzní. U každého navrhovaného indexu viditelnosti bude zmíněno, zdali má smysl jeho výpočet i pro inverzní variantu viditelnosti.

Většinu těchto indexů inverzní viditelnosti lze počítat s přímým využitím van Kreveldova algoritmu, kde cílový bod inverzní viditelnosti slouží jako pozorovací bod, kolem kterého rotuje polopřímka, a cílový bod klasické viditelnosti je pozorovacím bodem viditelnosti inverzní. Je tedy nutná pouze úprava posledního kroku v tomto algoritmu, dva první kroky není nutné upravovat. Což umožňuje poměrně jednoduchou implementaci těchto indexů. Tato možnost ale neplatí vždy, zejména u indexů vztahujících se ke globálnímu horizontu nelze tuto úpravu van Kreveldova algoritmu použít.

## 4.7 Parametry výpočtu viditelnosti

Implementace výpočtu viditelnosti v softwarech obvykle umožňují nastavení různých parametrů, kterými lze upravit výpočet. Patrně nejčastěji využívaným parametrem je omezení maximální vzdálenosti, pro kterou je viditelnosti počítána. Potom platí, že pro body, které mají $P_i d$ větší než určená limitní hodnota, se viditelnost nepočítá, body jsou rovnou označeny jako neviditelné. Jedná se o užitečný parametr, který umožňuje zkrácení výpočetního času.

Dalšími často implementovanými parametry jsou omezení vertikálního a horizontálního pozorovacího úhlu. Tato nastavení umožňují specifičtější výpočet viditelnosti, např. při pohledu z budovy je omezen jak vertikální, tak i horizontální pohledový úhel. Tato omezení jsou určena např. okny, nebo terasou dané budovy.

Dalším často implementovaným doplňkovým parametrem je nastavení offsetu pro cílový (pozorovaný) bod. Pomocí offsetu se pozorovaný bod vyvýší o definovanou výšku $x$ nad terén. Při analýze viditelnosti pak neurčujeme, jestli je z $V$ vidět povrch v bode $P_i$, ale zdali je z $V$ vidět teoretická tyč o výšce $x$ umístěná na $P_i$.

Pomocí těchto parametrů lze modifikovat výpočet viditelnosti, nicméně se jedná v podstatě o přesnější vymezení výpočtu. Tyto parametry nikterak neovlivňují získané výsledky, ani postup výpočtu, takže není nutné je v rámci analýzy brát v potaz, navíc jejich implementace je velice jednoduchá.

## 4.8 Rozšíření informací získávaných z LoS

Pro získávání doplňkových informací z LoS jsou důležité významné body LoS. Těmito body jsou lokální a globální horizonty. Horizontem na LoS je obecně takový viditelný bod $P_i$, po kterém ihned následuje bod $P_{i+1}$, který viditelný není. Lokálních horizontů může na LoS existovat více, typickým případem jsou horská panoramata, kde se postupně za sebou nachází jednotlivé horské masivy. Lokální horizonty budou v práci značeny jako $LH$ a stejně jako další body na LoS mají vzdálenost od pozorovatele ($LHd$), výšku ($LHe$) a pohledový úhel ($LH\alpha$). Teoreticky lze lokální horizonty i číslovat dle vzdálenosti od pozorovatele jako $LH_1, \ldots, LH_n$. Lokální horizonty lze dělit na ty, které se nachází k pozorovateli blíže než zájmový bod, a ty, které se nacházejí dále. Každý z těchto typů ovlivňuje viditelnost jinak. Pro indexy představené v této práci jsou důležité zejména lokální horizonty nacházející se mezi pozorovatelem a zájmovým (cílovým) bodem.

Globální horizont na LoS existuje pouze jeden a je to horizont s nejvyšším pozorovacím úhlem $LH_i\alpha$, který značíme jako $GH$ a opět pro něj existují všechny proměnné, jako pro horizont lokální. Globální horizont je místem, kde se pro pozorovatele model povrchu stýká s oblohou. S globálním horizontem se pojí dva problémy. Za prvé, aby bylo možné určit vztah pozorovaného bodu $P_t$ ke globálnímu horizontu, je nezbytné mít k dispozici celou LoS, sahající i za $P_t$, protože globální horizont může ležet i za ním. S použitím van Kreveldova algoritmu to není problém, ale Bresenhamův algoritmus toto jednoduše neumožňuje. Druhým problémem, který nelze jednoduše řešit, je fakt, že globální horizont pro danou LoS se vůbec nemusí nacházet v datech, se kterými pracujeme. Například při výpočtu viditelnosti v rámci města Olomouc mohou některé globální horizonty tvořit vrcholy Oderských vrchů, které ale nemusí být zahrnuty v datasetu, který může zahrnovat pouze Olomouc jako město. Bohužel tento problém nelze jednoduše odstranit, je nutná obezřetnost uživatele k tomu faktu a i jeho znalost lokality, s kterou pracuje, aby byl schopen tomuto problému předcházet. Pro korektní práci s globálními horizonty by bylo nezbytné používat velice rozsáhlé datasety, s nimiž je výpočet poměrně problematický.

Při zkoumání obr. 10 lze zhruba odhadnout, jaké množství informace je v LoS obsaženo. Například lze určit vzdálenost jednotlivých bodů od pozorovacího bodu, což je zásadní pro určení, jaké objekty budou ještě rozlišitelné. Lze také určit, že na demonstrované LoS se nachází jeden lokální horizont ($P_1$) a že v dané LoS

bude bod $P_6$ mít roli globálního horizontu. Dále lze pro ostatní body určovat jejich vztah k těmto horizontům. Všechny tyto informace ale budou po vypočtení booleovské viditelnosti z dat zcela odstraněny a výsledek je omezen na hodnocení viditelný/neviditelný. Snahou této rigorózní práce je tyto doplňkové informace z dat LoS vyčerpat a vhodným způsobem je využít pro kvantitativní hodnocení viditelnosti.

# 5 INDEXY VIDITELNOSTI

V této kapitole budou detailně popsány jednotlivé indexy viditelnosti, s důrazem na jejich praktické využití a názornými ukázkami. Ty se zaměří zejména na detaily a názorné ukázky, kompletní data k jednotlivým indexů jsou pak dostupná v elektronických přílohách práce na DVD.

## 5.1 Booleovská viditelnost

Ačkoliv nelze klasickou booleovskou viditelnost označit za index viditelnosti, tak jak jsou popisovány v této rigorózní práci, v rámci kompletnosti bude na tomto místě velice stručně charakterizována.

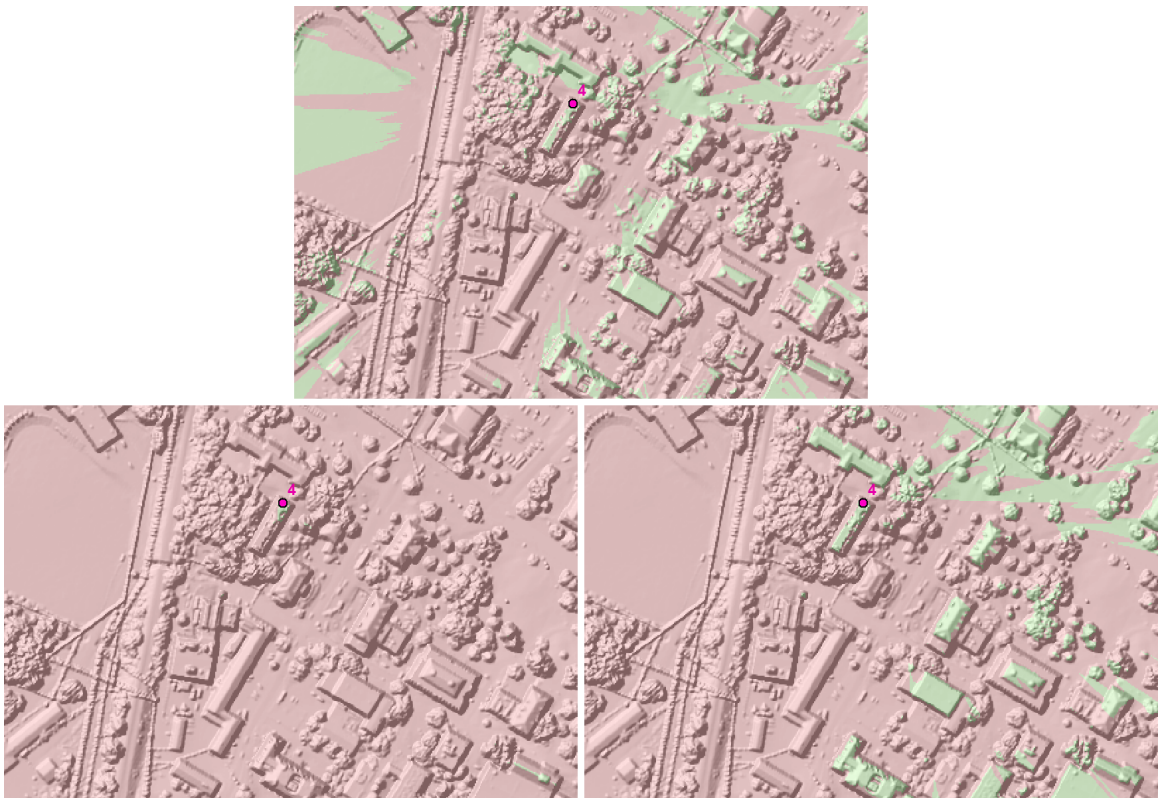
Booleovská viditelnost odpovídá na základní otázku: „Jaké části povrchu budou viditelné z bodu $B$, pokud v tomto bodě budeme uvažovat pozorovatele ve výšce $x$ nad terénem?“ V rozšířené variantě, pokud neuvažujeme pouze offset pozorovatele, ale i offset pozorovaného bodu, může tato analýza odpovídat i na otázku: „Na jaké části povrchu bude z bodu $B$ viditelný předmět o výšce $y$, pokud v tomto bodě budeme uvažovat pozorovatele ve výšce $x$ nad terénem?“ Na tyto otázky poskytne tato analýza odpovědi, ale neposkytne k této viditelnosti už žádné detaily. Výsledkem jsou hodnoty 0 a 1, kde nula reprezentuje plochy neviditelné a 1 plochy viditelné pro pozorovatele.

Booleovská viditelnost je důležitá pro výpočet indexů viditelnosti, neboť většinou poskytuje implementační či myšlenkový rámec, v některých případech přímo rastrovou masku, jak ukazuje např. Rášová (2013, 2014), pro další indexy viditelnosti.

### 5.1.1 Inverzní booleovská viditelnost

Inverzní booleovská viditelnosti odpovídá na dotaz: „Z kterých lokalit bude pozorovatel o výšce $x$ nad terénem vidět cílový bod $B$?“ Případně pokud dojde k nastavení offsetu cílového bodu, pak analýza odpovídá na otázku: „Z kterých lokalit bude pozorovatel o výšce $x$ nad terénem vidět předmět o výšce $y$ nad cílovým bod $B$?“ Výsledný grid pak ukazuje plochy, odkud pozorovatel vidí na cílový bod (hodnota 1) a plochy, odkud cílový bod pro pozorovatele viditelný není (hodnota 0).

Nastavení offsetu pozorovaného bodu hraje v případě inverzní viditelnosti poměrně zásadní roli, která je zřetelná i z obr. 11 při porovnání offsetu pozorovaného bodu 0, kdy je cílový bod viditelný pouze z bezprostředního okolí a potom z velice malé plochy, nacházející se v obrázku vpravo dole, a offsetu cílového bodu 0,5 metru, kdy už je na cílový bod vidět z výrazně více ploch.




Obr. 11: Ukázka viditelnosti z bodu 4 (nahoře) pro pozorovatele s výškou 1,75 metru. Dole inverzní viditelnost k bodu ID 4 pro pozorovatele v výškou 1,75 metru a offset pozorovaného bodu 0 metrů (vlevo) a 0,5 metru (vpravo). V této ukázce není odfiltrována vegetace. Vizualizace viditelnosti je podložena stínovaným reliéfem.

Při tomto naivním výpočtu inverzní viditelnosti dochází k nelogičnosti v umisťování pozorovatele. Vzhledem k tomu, že povrch obsahuje i vegetaci, je v určitých situacích pozorovatel umístěn na vegetaci. Takovéto umístění nedává z logického pohledu smysl, nelze očekávat, že pozorovatel se může nacházet o specifikovaný offset nad vegetací. Na druhou stranu, je potřeba, aby vegetace do analýzy vstupovala jako součást povrchu, neboť je výrazným faktorem ovlivňujícím viditelnost. Z povrchu vegetace nemá ale smysl inverzní viditelnost počítat. Plochy s vegetací lze naštěstí poměrně snadno odfiltrovat a to pomocí rozdílu nejmenšího a průměrného odrazu LiDaRu. Výsledkem je rozdíl zaznamenaných výšek, pokud je tento

rozdíl větší než 2 metry, považujeme plochu za nevhodnou pro výpočet inverzní viditelnosti, pokud je rozdíl menší, pak z ní inverzní viditelnost počítat lze. Jedná se o poměrně hrubou masku, která kromě vegetace označí i hrany budov, nicméně pro ilustrační účely ji lze považovat za dostačující. Pro reálné aplikace by bylo nutné postup výběru vegetace optimalizovat, za účelem získání vhodnějších výsledků. V elektronické příloze práce je pro omezení inverzních viditelností připravena maska, kterou lze vrstvu viditelnosti ořezat.

Booleovská viditelnost a její inverzní varianta, která je využívána výrazně méně (Fisher, 1996b), se kromě hodnocení viditelnosti využívá např. i při optimalizaci lokalizace pozorovacích věží (Bao et al., 2015), umístění průmyslových závodů (Fernandez-Jimenez et al., 2015), hodnocení dopadu staveb na krajinu (Hernández et al., 2004) nebo hodnocení dopadů viditelnosti větrných turbín na cenu domů (Lang et al., 2014) a dalších aplikacích. Jak ale popisuje Fisher (1996b, 1994b), v mnoha aplikacích by bylo použití některého z dále popsaných indexů pro analýzu výrazně přínosnější, než prostý výpočet booleovské viditelnosti.

## 5.2 Fuzzy viditelnost

Tento typ viditelnosti popsal poprvé Fisher (1994a), s cílem postihnout fakt, že se zvětšující se vzdáleností od pozorovatele se viditelnosti postupně horší a pozorovatel je schopen rozeznat stále méně a méně detailů, až je dosažena hranice za níž už rozezná pouze horizont jako takový. Toto zhoršování viditelnosti s narůstající vzdálenosti popsal Higuchi (1983) jako úrovně viditelnosti, přičemž rozlišuje 3 základní úrovně. Tyto úrovně stanovil dle schopnosti uživatele rozlišit – detaily stromů, jednotlivé stromy a skupiny stromů. Teoreticky lze tyto úrovně viditelnosti vymezovat i podle jiných prvků, než právě stromy, nicméně obvykle je toto dělení postačující.

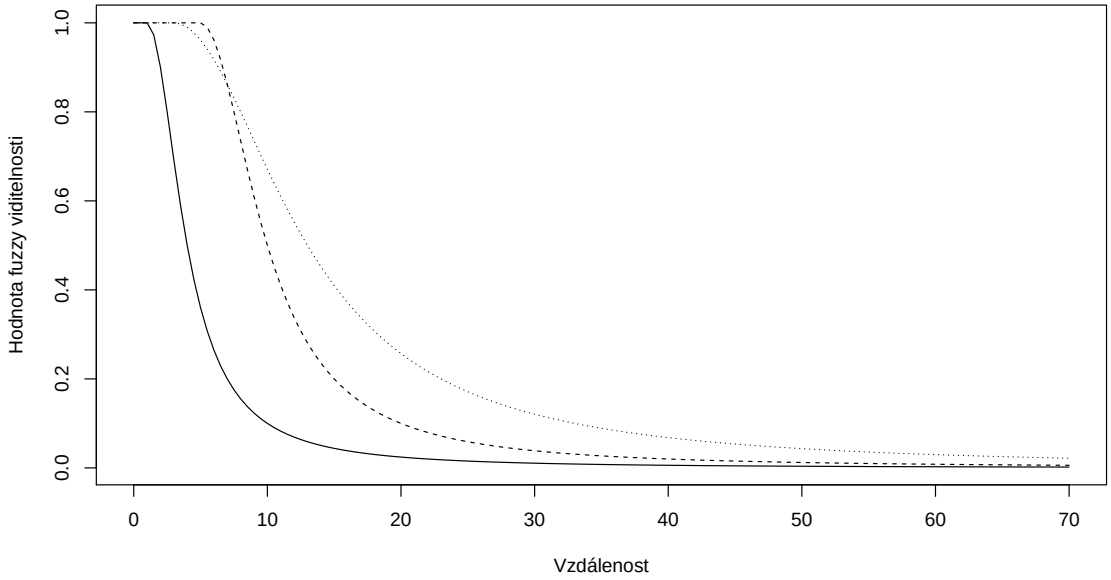
Snahou fuzzy viditelnosti, jak ji popsal Fisher (1994a), je reálněji modelovat tzv. dohledovou vzdálenost (jak je popsána v kap. 4.7), která v realitě nemá podobu jedné hodnoty, ale spíše postupného přechodu. Metoda je založena na takzvané distance decay funkci, která popisuje vliv interakce objektů měnící se v závislosti na vzdálenosti těchto objektů. Funkce se často používá mimo jiné v socioekonomické geografii (Tesla a Horák, 2015).

Distance decay funkce transformuje hodnoty vzdálenosti dle nastavení dvou parametrů $b_1$ a $b_2$ na škálu hodnot v rozmezí $< 0, 1 >$, čímž dochází k vytvoření

fuzzy viditelnosti. Ve fuzzy viditelnosti hodnota 0 implikuje neviditelnou část povrchu, zatímco 1 velice dobře viditelnou část povrchu. Hodnoty mezi těmito dvěma hodnotami reprezentují postupně se horšící viditelnost. Distance decay funkce je definována jako:

$$\begin{aligned} \mu(P_i) &= 1 \text{ pokud } P_i d \leq b_1, \\ \mu(P_i) &= \frac{1}{1 + \left(\frac{P_i d - b_1}{b_2}\right)^2} \text{ pokud } P_i d > b_1, \end{aligned} \tag{3}$$

kde $\mu(P_i)$ je výsledná hodnota fuzzy viditelnosti, a $b_1$ a $b_2$ jsou parametry ovlivňující tvar funkce (upraveno dle Fisher (1994a)). Hodnota $b_1 + b_2$ určuje tzv. přechodový bod, kde má fuzzy viditelnost hodnotu právě 0.5. Ukázka tvaru funkce a ovlivnění parametry je na obr. 12.




Obr. 12: Ukázka distance decay funkcí s třemi kombinacemi parametrů $b_1$ a $b_2$. Plná linie zobrazuje kombinaci hodnota 1 a 3, čerchovaná 5 a 5 a tečková 3 a 10.

Fisher (1994a) původně funkci definoval za účelem rozostření dohledové vzdálenosti, použití ale následně rozšířil Ogburn (2006). Zatímco Fisher navrhoval použití fuzzy viditelnosti velice obecně, Ogburn ji později vztáhl k pozorovanému objektu. Taková fuzzy viditelnost se potom zakládá na velikosti pozorovaného objektu $s$ a cílovém úhlu $\beta$ (v radiánech), která má objekt minimálně v zorném

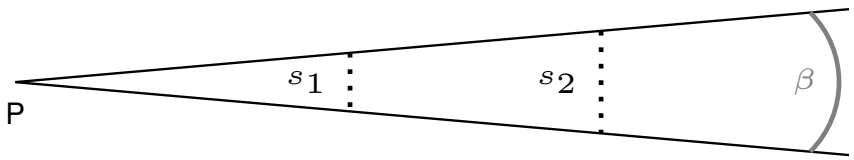
poli zaobírat (viz obr 13). Na základě toho úhlu vypočteme koeficient vzdálenosti $a$ jako (Ogburn, 2006):

$$a = \frac{1}{2\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)}. \tag{4}$$

Na základě toho koeficientu pak lze odvodit přechodový bod distance decay funkce jako:

$$b_1 + b_2 = a \times s. \tag{5}$$

Následně je třeba, aby uživatel specifikoval hodnotu $b_1$, tj. oblasti plné viditelnosti. Tento postup je poměrně hrubou aproximací reality, neboť existuje řada výjimek (detailněji je popisuje Ogburn (2006)), nicméně vhodnější varianta hodnocení viditelnosti na základě vzdálenosti zatím nebyla vytvořena. Nicméně oproti klasické booleovské viditelnosti tento koncept stále přináší značné zlepšení a umožňuje lépe hodnotit viditelnost ve vztahu ke vzdálenosti od pozorovatele.




Obr. 13: Objekty velikosti $s_1$ a $s_2$ v různých vzdálenostech od pozorovatele $P$ se shodným velikostním úhlem $\beta$ (upraveno dle Ogburn (2006)).

Ogburn (2006) doporučuje definovat $\beta$ jako alespoň $1'$, aby měl tento úhel smysl pro většinu uživatelů za normálních atmosférických podmínek. Samozřejmě, pro určité uživatele a specifické podmínky, se může tato hodnota výrazně měnit a to na obě strany od doporučované hodnoty.

Fuzzy viditelnost v implementacích, které prezentovali Fisher (1994a), Ogburn (2006), Loots et al. (1999) i Rášová (2014) bere v potaz pouze vzdálenost horizontální. To v zásadě nevadí, pokud nejsou vertikální vzdálenosti v rámci povrchu velice výrazné a pokud se vyhledávají větší objekty. Při menší objektech a velkých vertikálních vzdálenostech (např. horské masivy) by bylo vhodnější i tuto

proměnnou do výpočtu zahrnout. A nahradit tak $P_i d$ ve rovnici 3 výrazem:

$$P_i d^r = \sqrt{P_i d^2 + (P_i e - V e)^2}, \tag{6}$$

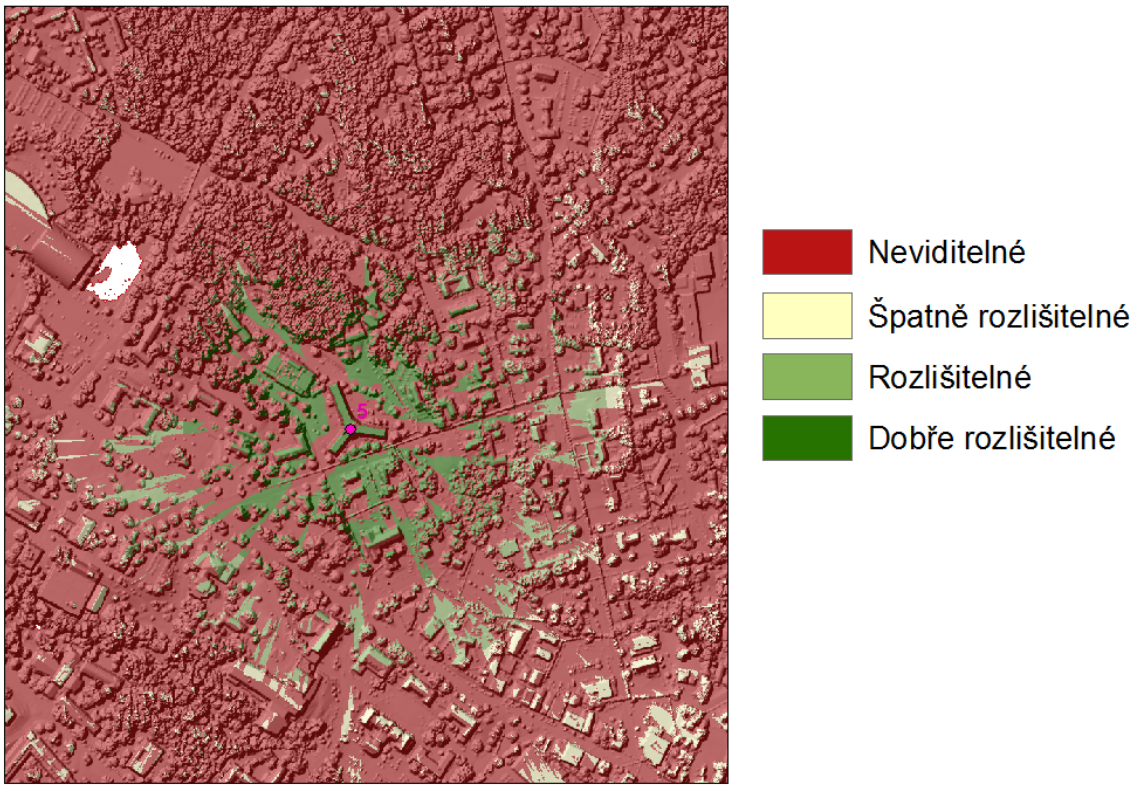
kde $P_i d^r$ je reálná vzdálenost bodu $P_i$ od $V$, která zahrnuje i výškový element. V podobném duchu tuto problematiku popisuje i Felleman (1979), byť bez přímého vztahu k fuzzy viditelnosti. Rozdíl ve výsledcích byl v případě dat použitých v rigorózní práci marginální, nelze tedy říct, že by se jednalo o důležitý faktor, nicméně v některých situacích může hrát roli.

Ukázkovým případem využití může být rozlišení objektu o rozměru 0,5 metru, který by měl zabírat úhel alespoň $0,1°$, aby byl pro uživatele rozpoznatelný. Jedná se o poměrně malý objekt, nicméně pro ilustraci konceptu, je příklad dostačující. Přechodový bod se nachází ve vzdálenosti cca 286 metrů od pozorovatele. Výsledný rastr následně rozdělíme do 4 kategorií, dle hodnot fuzzy viditelnosti. První kategorií jsou plochy pro uživatele neviditelné. Následují plochy, kde je cílový objekt obtížně rozlišitelný (hodnoty fuzzy viditelnosti 0 – 0,25), a plochy s objektem rozlišitelným (0,25 – 0,75). Poslední kategorií pak jsou plochy, kde je objekt dobře rozlišitelný (hodnoty 0,75 – 1). Vizualizace je na obr. 14. Podobné vizualizace výsledků prezentuje i Rášová (2013, 2014) s aplikacemi v archeologii.

V elektronické příloze práce, se nachází tento index vypočítaný pro všech 5 pozorovacích bodů a ve dvou možných vizualizacích, jednak vizualizace zobrazená na obr. 14 a také se spojitou stupnicí. Na příkladu bodu s ID 4 nejlépe vyniká klasická kruhová struktura, kterou tento index produkuje.

Ogburn (2006) dále tento koncept rozvinul a navrhl další možné varianty výpočtu, které pozměňují, upravují a optimalizují zejména tvar distance decay funkce. Tyto úpravy nejsou ale pro samotný koncept fuzzy viditelnosti zásadní, pouze rozšiřují jeho možnosti.

Fuzzy viditelnost je ideálním nástrojem pro hodnocení, zdali uživatel bude na cílovém bodě schopen rozlišit předem určené objekty a nakolik dobře budou pro něj rozlišitelné za příznivých atmosferických podmínek. Fuzzy viditelnost je možné počítat i v inverzní variantě, nicméně hodnoty budou shodné (vzdálenost je symetrická), pouze se změní lokality viditelnosti (obdobně jako na obr. 11).




Obr. 14: Fuzzy viditelnost klasifikovaná do kategorií pro objekt o velikosti 0,5 m, zaobírající alespoň $0,1°$. Hodnota $b_1$ je nastavena na 150 m. Podklad obrazu je stínovaný reliéf.

## 5.3 Indexy polohy pozorovatele

Indexy polohy pozorovatele nepatří mezi často zmiňované rozšíření analýz viditelnosti, nicméně Felleman (1979) je popisuje a jisté využití jim připisuje. Z tohoto důvodu je na tomto místě velice krátce zmíníme. Výhodou těchto indexů je fakt, že k jejich výpočtu obvykle postačují nástroje běžně dostupné v GIS, není třeba nijak speciálně upravovat algoritmus viditelnosti.

### 5.3.1 Rozdíl výšek pozorovatele a cíle

Rozdíl výšek pozorovatele a cílového bodu je nejjednodušším indexem polohy pozorovatele. Implementuje ho např. GRASS GIS v modulu r.viewshed (Toma et al., 2014). Ačkoliv implementace v GRASS GIS využívá algoritmu pro výpočet viditelnosti, lze pro výpočet indexu využít i nástroje mapové algebry. Obdobně počítala fuzzy viditelnost Rášová (2013), pouze zde použijeme jiné ze základních GIS

nástrojů. Samotný výpočet indexu je natolik jednoduchý, že ho na tomto místě nebudeme popisovat.

Jedním z hlavních využití tohoto indexu je podle popisu, který poskytuje Felleman (1979), primární vymezení výrazných rozhledových bodů. Významné rozhledové body mají totiž společnou charakteristiku, že většina okolních výšek je nižší (vrcholky kopců, budov atd.). Na základě tohoto indexu lze pak z většího počtu vybrat kandidáty, pro které se počítá přímo viditelnost. Nicméně jak popisují Franklin a Ray (1994) může být v některých případech pouhé posuzování výšky pro hodnocení viditelnosti zavádějící. Nicméně ukázky v elektronické příloze práce tento fakt potvrzují, protože rozhledové body s ID 4 a 5, které se nachází na budovách, zcela potvrzují Fellmanův popis a to v porovnání s body 1, 2 a 3, které natolik významné nejsou. Implementace použitá pro tento výpočet používá pro neviditelné body hodnotu -9000.

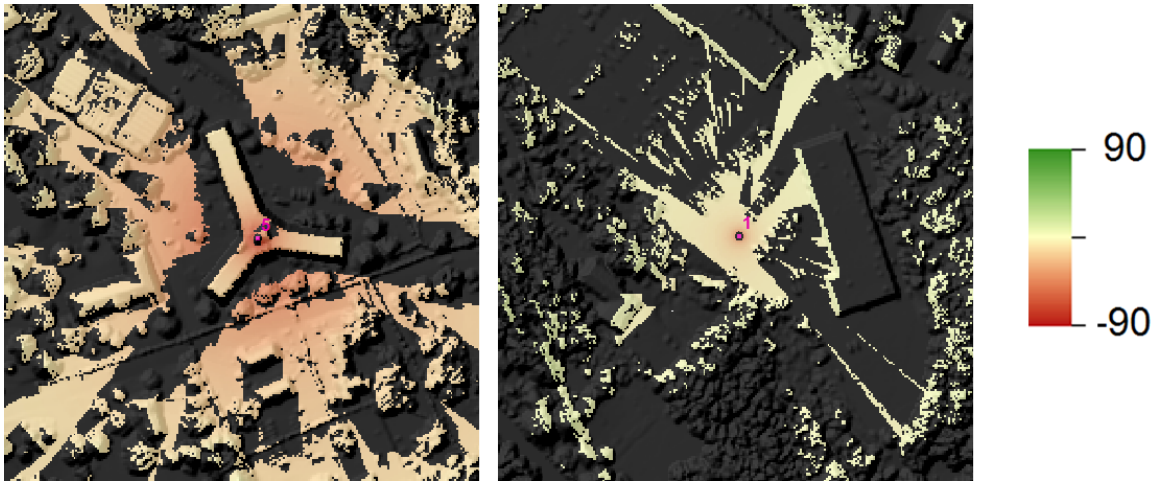
### 5.3.2 Výškový pozorovací úhel

Jedná se o variantu viditelnosti, kde pro viditelné body zapisujeme jejich hodnotu $P_i\alpha$. Pokud je pozorovaný bod nad úrovní pozorovatele, je hodnota kladná, pro body pod úrovní pozorovatele je záporná. Neviditelné části terénu se v tomto indexu označují jako „null“ nebo „no data“. Tento index ve výchozím nastavení počítá modul r.viewshed GRASS GIS (Toma et al., 2014). Výpočet není třeba provádět z LoS, lze využít Map Algebru, kde pro výpočet pozorovacího úhlu použijeme vrstvu rozdílů výšek (z předchozího indexu) a vrstvu vzdálenosti od pozorovacího bodu. Následně tento výstup přemaskujeme booleovskou viditelností, abychom odstranili z indexu neviditelné oblasti. Opět se jedná o velice jednoduchý index.

Hodnoty výškového pozorovacího úhlu mohou sloužit podobně jako rozdíl výšek, popsaný v předchozí kapitole, k určení významných rozhledových bodů. Rozhledové body budou mít obecně větší počet pixelů se zápornými hodnotami pozorovacího úhlu. Ukázka tohoto indexu je na obr. 15. Levý obrázek ukazuje pozorovací bod umístěný na budově, zatímco pravý je na zemském povrchu a výhled je značně omezen vegetací a budovami. Z vizuálního porovnání je zřejmý větší podíl ploch se zápornými pozorovacími úhly na levém obrázku.

Obě přílohy zobrazené na obr. 15 vycházejí z vlastní implementace výpočtu pozorovacího úhlu. Drobnou odchylkou je vymezení neviditelných ploch hodnotou

-100, která pro úhel nemůže být dosažena. Hodnota indexu je uváděna ve stupních.




Obr. 15: Pohledové úhly ze dvou pozorovacích bodů. Podkreslení obrazu je stínovaný reliéf.

Závěry, které je možné přijmout na základě ukázek toho indexu v elektronických přílohách práce, odpovídají původnímu popisu Fellmana (1979), totiž že výrazné rozhledové body budou mít více ploch se zápornými hodnotami pozorovacích úhlů. To odpovídá faktu, že tyto body jsou obvykle umístěny výše, než okolní povrch.

### 5.3.3 Další možné indexy pozorovatele

Dva výše popsané indexy polohy pozorovatele patří mezi ty, jenž literatura v ojedinělých případech zmiňuje. Felleman (1979) ovšem zmiňuje i další indexy zejména pak pozorovací úhel horizontální, ten dle jeho popisu hraje roli při hodnocení viditelnosti v závislosti času, ve kterém pozorovatel pozoruje. Jedná se zejména o vliv polohy slunce, pozorovatele a pozorovaného bodu. Při konfiguraci pozorovatel → pozorovaný bod → slunce nebude viditelnost příliš dobrá, neboť slunce pozorovatele oslepuje a zhoršuje tím viditelnost. Naproti tomu při konfiguraci slunce → pozorovatel → pozorovaný bod bude viditelnost velice dobrá, neboť slunce pozorovatele neoslepuje, ale naopak mu zvýrazňuje cíl (Felleman, 1979). Dvě popsané situace jsou samozřejmě limitní a existuje mezi nimi celá řada dalších možností, jak může vzájemná konfigurace těchto tří objektů ovlivňovat viditelnost.

Tento index má sice poměrně velký potenciál, nicméně je poměrně hodně specifický a správné hodnocení viditelnosti na jeho základě by si vyžádalo poměrně výrazné množství výpočtů. Tento fakt je možná jedním z důvodů, proč je index

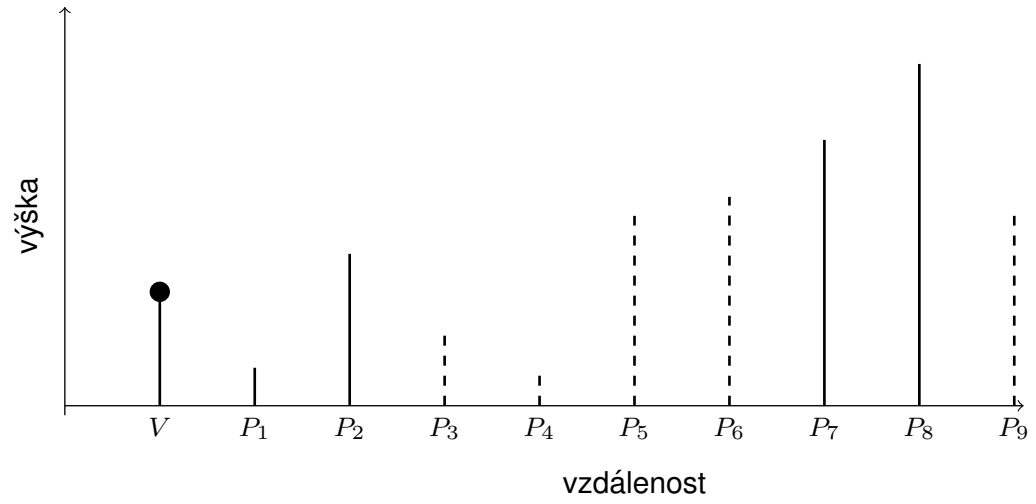
velice málo využívaný. Nicméně pokud by bylo cílem analýzy hodnotit, jak dobře pozorovatel uvidí cíl v průběhu dne, respektive určení, kdy je nejlepší doba na pozorování, pak by tento index jistě měl své místo. Jeho implementace v GIS by nebyla problematická, stačí využít existující nástroje podobně, jako to představila pro fuzzy viditelnost Rášová (2013, 2014).

## 5.4 Indexy spojené s lokálními horizonty

V kapitole 4.8 byly popsány důležité body linie pohledu, mezi nimi i lokální horizonty. Lokální horizonty výrazně ovlivňují viditelnost, respektive její kvalitu. Například, pokud se mezi pozorovaným bodem a pozorovatelem žádný lokální horizont nenachází, bude viditelnost velice dobrá. Pokud je počet lokálních horizontů vysoký, může to být indikátorem nepříliš dobré viditelnosti (byť je zde otázkou, jaká je vertikální vzdálenost cíle od těchto horizontů). Body blízko, či přímo na lokálních horizontech jsou pro pozorovatele vždy velice výrazné, v porovnání s ostatními viditelnými body. V této kapitole se zaměříme na lokální horizonty, je ale důležité zmínit, že v zde může figurovat i horizont globální, neboť ten z výběru přímo nevyčleňujeme. Pro potřeby indexů zmíněných v této kapitole uvažujeme pouze lokální horizonty nacházející se mezi pozorovatelem a cílovým bodem. Je možné, že za pozorovaným bodem se nachází další lokální horizonty, ale ty nejsou pro viditelnost obvykle příliš důležité, důležitější je následně vztah ke globálnímu horizontu, který bude popsán v další kapitole.

Při hodnocení těchto indexů je třeba brát v potaz, že nejvyšší lokální horizont nemusí být nutně nejvyšším bodem, který zakrývá cílový bod (viz obr. 16). Důvodem pro používání nejvyššího horizontu na místo bodu s největším pohledovým úhlem je fakt, že horizont je samostatným prvkem LoS, zatímco bod s nejvyšším pohledovým úhlem samostatným prvkem být nemusí (Fisher, 1994b). Situaci ilustruje obr. 16, kde bod $P_2$ je lokálním horizontem, který by na reálném terénu mohl být např. stromem nebo terénní vlnou. Bod $P_7$, sice zastiňuje cílový bod $P_8$, ale při pohledu na LoS působí jakou součást celku s bodem $P_8$, může se jednat např. o kopec či masu vegetace. Je tedy vhodnější hodnotit vůči lokálním horizontům, které mají tendenci vymezovat jednotlivé prvky LoS, než vůči maximálním pohledovým úhlům. Horizonty jsou také mnohem výraznějšími prvky reálné LoS. Z těchto důvodů se pro indexy využívají horizonty mnohem častěji, byť i indexy založené na maximálním pohledovém úhlu před cílovým bodem by mohly mít svoje

využití a opodstatnění. V současnosti ale zatím jejich využití nebylo v literatuře navrženo.




Obr. 16: Rozdíl mezi horizontem (bod $P_2$) a bodem zastiňujícím cílový bod ($P_8$), který není horizontem ($P_7$).

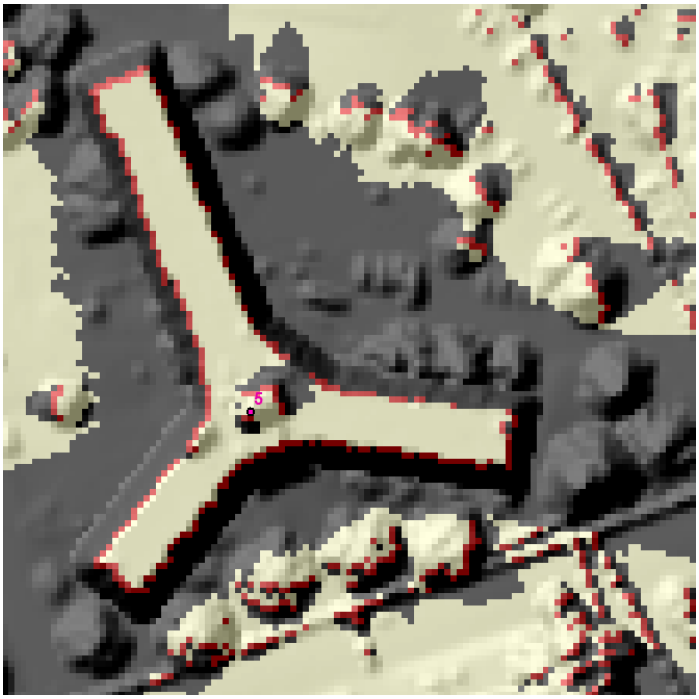
### 5.4.1 Vymezení lokálních horizontů z pozorovaného bodu

Tento typ viditelnosti představil poprvé Fisher (1994b, 1996b). V rámci toho indexu přidělovat bodům na LoS hodnotu 1, pokud byly lokálním horizontem (a tudíž logicky i viditelné), a hodnotu 0 všem ostatním bodům. Implementace představená v této práci, tento koncept nepatrně rozšiřuje a přiřazuje bodům hodnoty -1, 0 a 1. Hodnota -1 znamená, že bod není viditelný, 0 značí bod viditelný, který ale není lokálním horizontem, a 1 značí body, které jsou lokálními horizonty.

Výpočet je při použití van Kreveldova algoritmu velice jednoduchý, bod $P_i$ musí být viditelný a následující bod $P_{i+1}$ musí být neviditelný, aby bylo možné bod $P_i$ prohlásit za lokální horizont. Pokud za bodem $P_i$ už žádný další bod neleží pak jej nelze označit za lokální horizont. Jinak výpočet vychází z van Kreveldova algoritmu pro určení viditelnosti.

Obr. 17 zobrazuje ukázku vymezení lokálních horizontů. Lze si povšimnout, že ve většině případů lokální horizonty tvoří hranice viditelných ploch, což lze očekávat. V některých (nepříliš častých případech) se ale vyskytují i uprostřed viditelných ploch, tento fakt je způsoben tím, že pro hodnocení viditelnosti každé buňky se interpolují výšky v buňkách, jimiž LoS prochází. To v některých situacích způsobuje, že střed buňky je vyhodnocen jako viditelný, zatímco jiný její bod být

viditelný nemusí, neboť ho zakryje přecházející buňka (která může být odlišná než přecházející buňka pro střed). Tato problematika je patrná z obr. 8 v kap. 4.3. Nejedná se tedy o chybu implementace, byť na první pohled může tento dojem vzniknout.



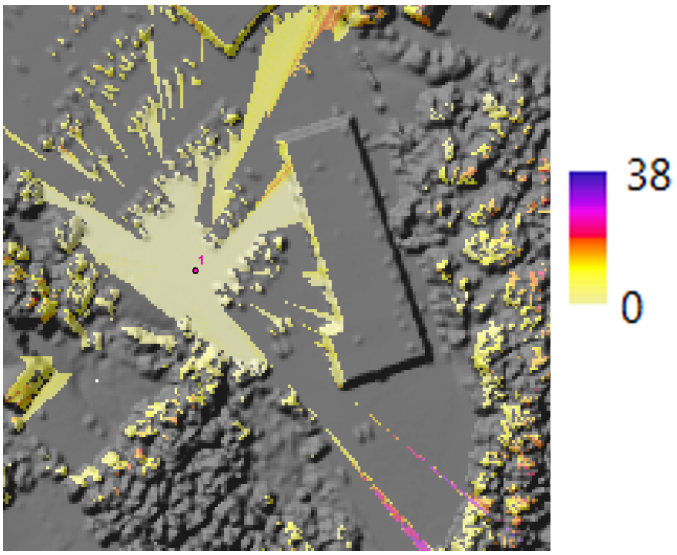
Obr. 17: Vymezení lokálních horizontů – šedé plochy jsou pro pozorovatele neviditelné, žluté plochy jsou viditelné, červené pixely jsou lokálními horizonty. Podkreslení obrazu je stínovaný reliéf.

Z toto indexu viditelnosti lze velice dobře posoudit, které plochy tvoří jednotlivé horizonty. Tato informace je důležitá, neboť právě horizonty jsou velice výraznými body pro pozorovatele. Navíc lze z výsledku zjistit, které horizonty zakrývají zájmová místa a lze tudíž pro pozorovací bod navrhnout například úpravu vegetace, která by vedla ke zlepšení viditelnosti.

### 5.4.2 Počet lokálních horizontů před pozorovaným bodem

Tento index ukládá pro viditelné body počet lokálních horizontů mezi pozorovatelem a pozorovaným bodem. Index popsal Fisher (1996b). Na tento index má velký vliv zejména vegetace, která např. v případě lesa nebo parku může vytvářet velké množství lokálních horizontů. Obecně je pro viditelnost lepší menší počet lokálních horizontů, ale jak bude naznačeno v dalších kapitolách, nezáleží pouze na jejich počtu, ale také na vzdálenosti cíle od těchto horizontů. Lze ale říci, že

plochy s nízkými hodnotami tohoto indexu mají lepší a jednodušší viditelnost než ty s vysokou hodnotu počtu lokálních horizontů.




Obr. 18: Počet lokálních horizontů. Podkreslení obrazu je stínovaný reliéf.

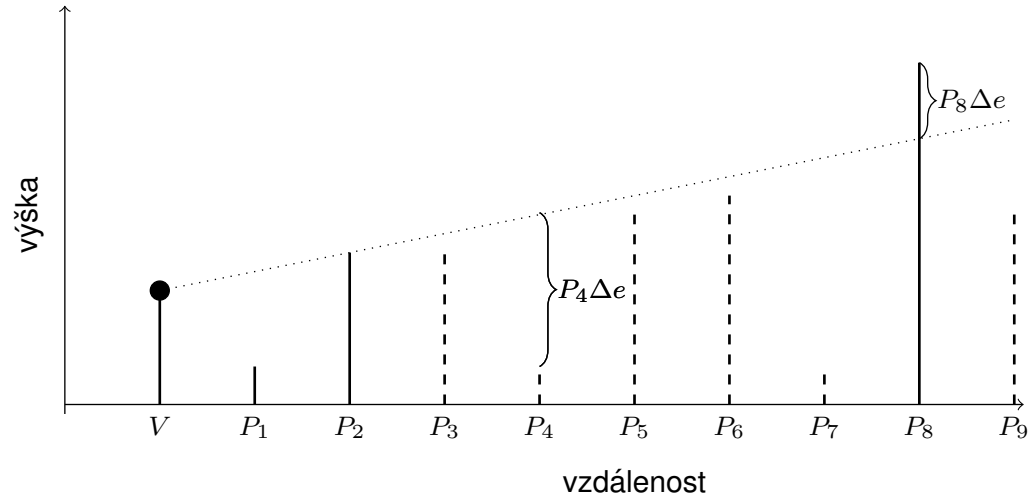
Ukázkový výpočet indexu počtu lokálních horizontů je na obr. 18, v pravé části obrázku je zřejmý vliv vegetace na hodnotu indexu.

### 5.4.3 Rozdíl výšek od lokálního horizontu

Tento index v určité variantě popsal Fisher (1996b), který popisuje využití pro pozorování požárů. Obdobně později tento index popsali Bartie et al. (2010). Cílem je zjištění rozdílu výšek cílového bodu a lokálního horizontu, extrapolovaného na pozici cílového bodu. Pro vymezení indexu je nutné zjistit hodnotu maximálního pohledového úhlu lokálního horizontu $LH\alpha$, který označíme jako $maxLH\alpha$. Na jeho základě pak lze vypočítat pro cílový bod $P_t$ rozdíl výšek $\Delta e$:

$$P_t\Delta e = P_t e - (\tan(maxLH\alpha) \times P_t d). \tag{7}$$

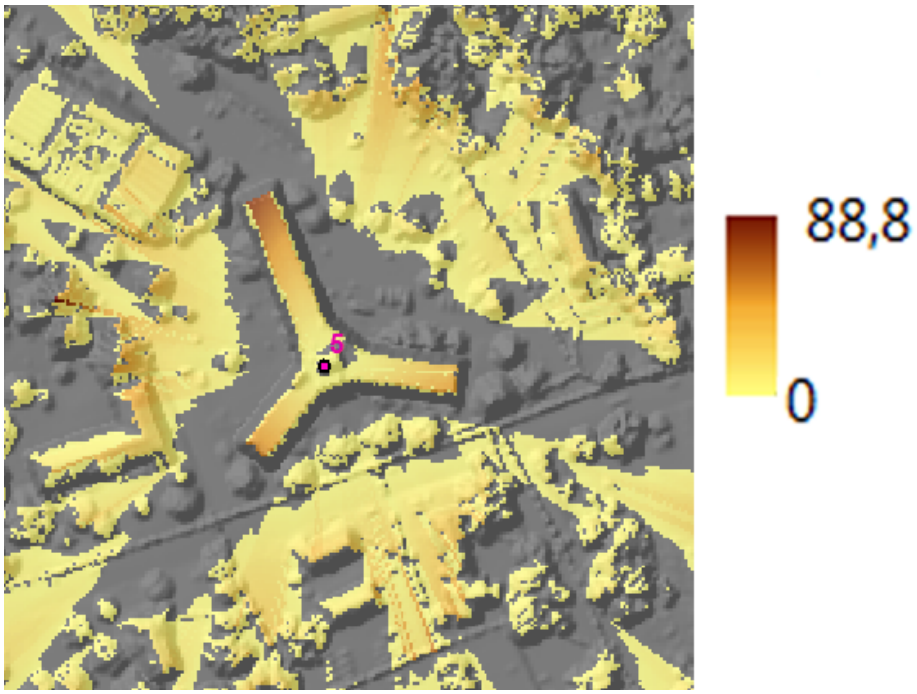
Vizuálně je výpočet zobrazen na obr. 19. V implementaci použité v této práci jsou viditelné plochy, které neleží za žádným lokálním horizontem, oceněny hodnotou 0 a neviditelné plochy hodnotou -9000. Hodnoty tohoto indexu jsou uváděny ve výškových jednotkách odpovídajících původnímu povrchu, v případě rigorózní práce jsou touto jednotkou metry. Uvedené hodnoty se mohou v různých implementacích měnit.



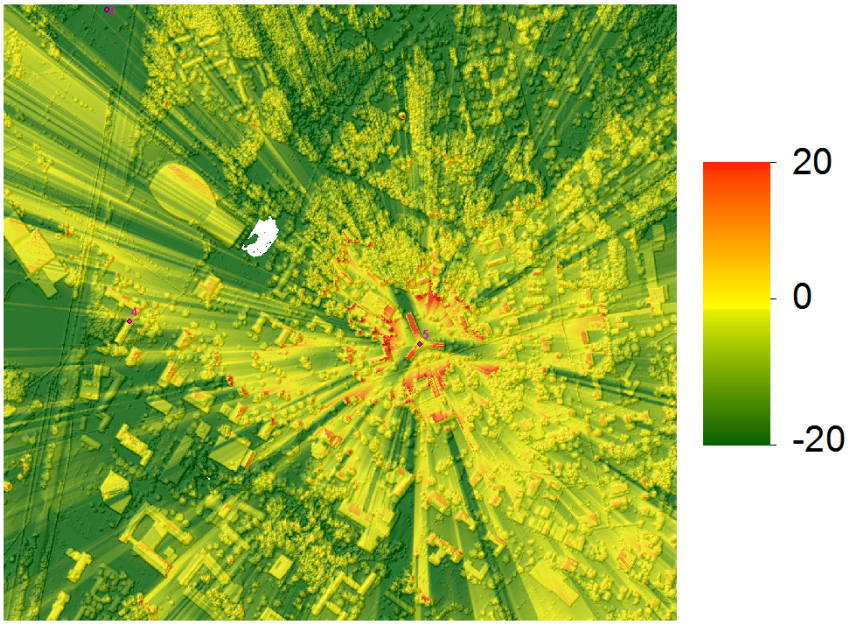

Obr. 19: Rozdíl výšek od lokálního horizontu ($P_2$) pro body $P_4$ a $P_8$. Pohledový úhel je naznačen tečkovanou čárou.

Z obr. 19 je patrné, že index lze počítat i pro neviditelné body ($P_4$). Tím vznikají dvě možné varianty tohoto indexu – pouze pro viditelné body a pro všechny body v zájmovém území. Pro neviditelné body má index zápornou hodnotu, zatímco pro body viditelné je hodnota kladná ($P_8$). Záporné hodnoty poukazují, jakou výšku by bylo potřeba k povrchu přidat, aby byl viditelný (tuto variantu umí spočítat i ArcMap v operaci viewshed nastavení „Output above ground level raster“ (Esri, 2014)), kladné hodnoty naznačují, jaká část povrchu je viditelná. Např. pokud víme, že na cílovém místě stojí budova o 8 patrech a uvažujeme výšku 3 metry na patro, pak hodnota indexu 11 naznačuje, že budou nad horizont vystupovat zhruba 4 patra budovy. Pokud by hodnota indexu byla -4, pak by bylo nezbytné na střeše budovy vztyčit minimálně 4 metrovou tyč, aby byla viditelná. Ukázka indexu pouze pro viditelné body je na obr. 20.

Fisher (1995) navrhoval použití varianty, která počítá index i pro neviditelné body, pro hodnocení viditelností potenciálních lesních požárů. U těch předpokládal viditelnost alespoň 15 metrového sloupce kouře, což by odpovídalo hodnotám indexu -15. A lze tedy vymezovat zóny z pozorovacích věží viditelné bez potíží (kladné hodnoty indexu), viditelné bez rizika (hodnoty 0 až -10), viditelné s rizikem (-10 až -15) a neviditelné (méně než -15). Podobných případů využití si lze představit vícero, zejména např. pro hodnocení viditelnosti budov a jejich částí. Ukázka této varianty indexu je na obr. 21.




Obr. 20: Rozdíl výšek od lokálního horizontu pro bod 5. Podkreslení obrazu je stínovaný reliéf.




Obr. 21: Rozdíl výšek od lokálního horizontu pro bod 5, vypočtený pro viditelné i neviditelné body. Legenda je omezena na hodnoty -20 až 20, aby hodnoty výraznější (rozsah reálných hodnot je větší). Podkreslení obrazu je stínovaný reliéf.

U tohoto indexu je důležité poznamenat, že nelze porovnávat hodnoty indexu v zájmovém území, neboť různé hodnoty v různých vzdálenostech od pozorovatele budou mít rozdílný velikostní úhel, jak je popsáno v kap. 5.2. Pro porovnávání v rámci území je nezbytné používat rozdíly pohledových úhlů, což bude rozebráno v dalších kapitolách.

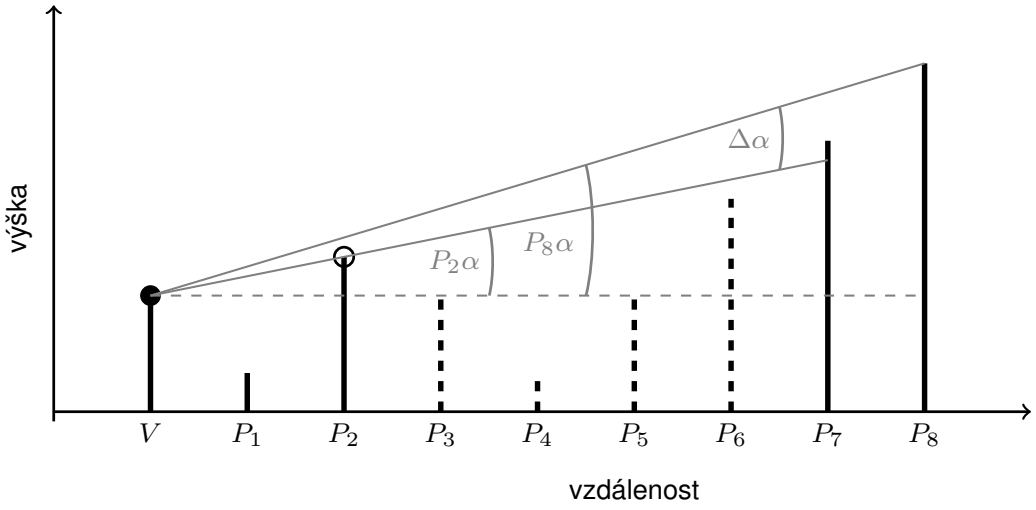
### 5.4.4 Rozdíl pohledových úhlů od lokálního horizontu

Pro hodnocení výraznosti bodu nad lokálním horizontem je vhodné použít úhel, který umožní srovnání v rámci celého území. Základní myšlenky pro tento index podal Felleman (1979), jistou variantu indexu zmiňují Bartie et al. (2010), nicméně praktickou implementaci založenou na van Kreveldově algoritmu představili až Caha a Rášová (2015).

Úhlový rozdíl (uváděný ve stupních) mezi lokálním horizontem, nacházejícím se mezi pozorovatelem a cílovým bodem, značíme $P_t\Delta\alpha$ a vypočte se jako:

$$\begin{aligned} &P_t\Delta\alpha = P_t\alpha - (maxLH\alpha) \text{ pokud existuje } LH, \\ &P_t\Delta\alpha = 90 \text{ pokud } LH \text{ neexistuje .} \end{aligned} \tag{8}$$

Hodnota 90 pro body, které neleží za žádným horizontem, značí optimální viditelnost.

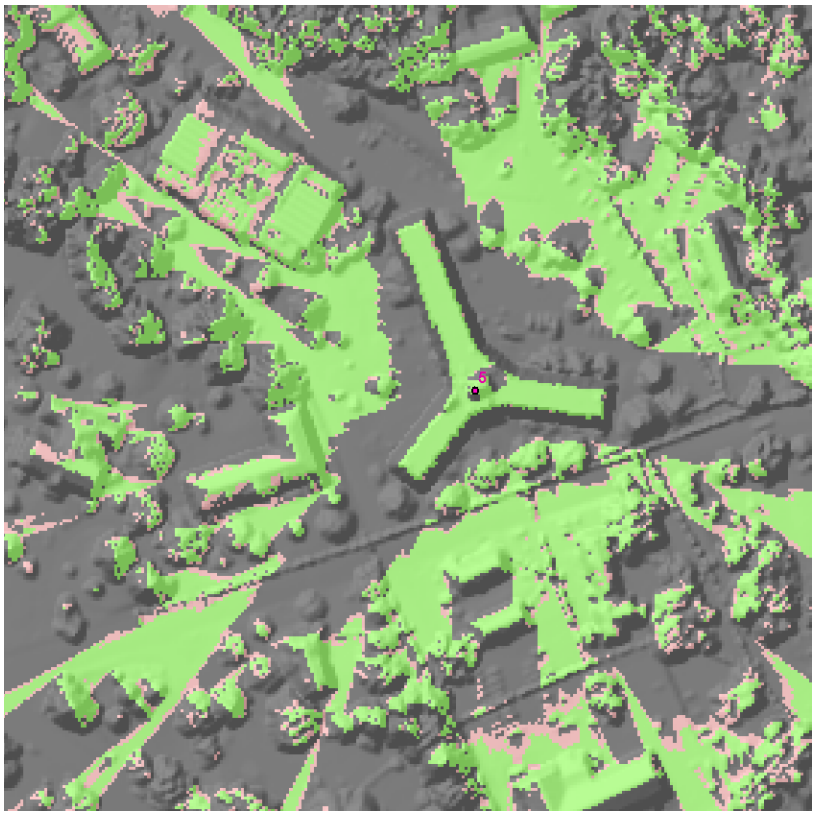



Obr. 22: Výpočet rozdílu pohledových úhlů pro bod $P_7$ od lokálního horizontu $P_2$. (převzato z: Caha a Rášová (2015))

Obdobně jako u předchozího indexu lze počítat variantu pro všechny body a variantu pouze pro body viditelné. V případě všech bodů negativní hodnoty indikují body skryté za horizontem a kladné hodnoty body viditelné. Ve variantě pouze pro viditelné body budou úhlové rozdíly vždy kladné, hodnota -1 označuje body, které nejsou viditelné.

Jak popisují Caha a Rášová (2015), má tento index velký potenciál při hodnocení, nakolik jsou cílové body opravdu viditelné. Ve variantě pouze pro viditelné body hodnoty blízké nule poukazují na značně problematickou viditelnost. Cíl nevystupuje nad horizont dostatečně a také nepřesnost a nejistota povrchu mohou mít na viditelnost zásadní vliv. Pomocí tohoto indexu lze z povrchu odfiltrovat plochy, které jsou sice teoreticky viditelné, ale vystupují nad horizont tak nevýrazně, že je pozorovatel bude schopen jen stěží zaznamenat. Caha a Rášová (2015) navrhli použití limitu 1° jako limit, mezi body nevýrazně a výrazně vystupující nad horizont.

Na testovacím výpočtu tohoto indexu pro pozorovací bod 5, bylo zjištěno, že z celkového počtu 184 747 viditelných pixelů jich 147 917 (tj. cca 80 %) má rozdíl pozorovací úhlu k horizontu menší než jeden 1°, což je hranice špatné pozorovatelnosti, kterou navrhli Caha a Rášová (2015). Snížení této hranice na 0.5° situaci výrazně nezlepší, stále bude pod touto hranicí 125 834 (tj. cca 68%) pixelů. Ukázka tohoto rozčlenění je na obr. 23, nízké hodnoty indexu se vyskytují zejména dále od pozorovacího bodu a jsou lépe patrné v elektronické příloze práce. Na tomto případě je možno názorně ilustrovat praktickou důležitost tohoto indexu. Velké množství pixelů je sice identifikováno jako viditelných, ale nachází se tak blízko horizontu, že uživatel je nebude schopen téměř rozlišit. Navíc jsou tyto pixely výrazně citlivé na chybu v datech povrchu. Např. vzrůst vegetace je může velice snadno zastínit. V elektronické příloze práce jsou dostupné klasifikované úhlové rozdíly pro všech pět pohledových bodů.



Obr. 23: Reklasifikace úhlového rozdílu. Šedé plochy jsou neviditelné, červené plochy jsou viditelné, ale rozdíl úhlů je pod $0,5°$, zelené jsou pak ostatní viditelné plochy. Podkreslení obrazu je stínovaný reliéf.

### 5.4.5 Inverzní varianty indexů od lokálních horizontů

Pro všechny indexy, kromě vymezení lokálních horizontů, zmíněné v této kapitole lze vypočítat i jejich inverzní varianty s použitím van Kreveldova algoritmu, neboť se pracuje pouze z body mezi pozorovatelem a cílovým bodem. Struktura, kterou tento algoritmus využívá, umožňuje bez problémů realizovat tyto výpočty. Dojde k záměně, polopřímka v tomto případě rotuje okolo cílového bodu, který je navýšen o offset, a k výšce každého pixelu se připočte výška pozorovatele. Potom lze vymezovat jak počty horizontů mezi pozorovatelem a cílovým bodem, tak i výškový a úhlový odstup mezi cílovým bodem a lokálním horizontem.

Index pro vymezení lokálních horizontů nedává v inverzní variantě smysl, protože dochází k posunu pozorovatele. Teoreticky by bylo možné hodnotit pro každý pixel, zdali se cílový bod nachází na lokálním horizontu, ale využitelnost takového indexu je otázkou. Byť teoreticky pro potřeby např. územního plánování by možná svoje využití najít mohl.

## 5.5 Indexy spojené s globálním horizontem

Zatímco indexy spojené s lokálními horizonty napovídají, nakolik bude cílový bod výrazný nad překážkou v pohodě horizontu, indexy založené na globálním horizontu napovídají, nakolik je cílový bod umístěn pod nejvýraznějším horizontem. Jak bylo popsáno v kapitole 4.8 je globální horizont místem, kde dochází z pohledu pozorovatele k setkávání modelu povrchu s volným prostorem (hovorově označovaným jako nebe). Globální horizont je speciálním případem lokálního horizontu s nejvyšší hodnotou $LH\alpha$ mezi lokálními horizonty.

Při vymezování těchto indexů bereme v potaz nejen body ležící mezi pozorovatelem a cílovým bodem, ale i body za cílovým bodem (kompletní polopřímku LoS). Globální horizont totiž často leží až za cílovým bodem.

### 5.5.1 Vymezení globálního horizontu

Stejně jako v případě lokálních horizontů je základním indexem samotné vymezení globálního horizontu. Pomáhá určit, v kterých místech se pro pozorovatele nachází nejvýraznější bod LoS. Index poprvé zmínil Fisher (1996b).

Bod je globálním horizontem, pokud je lokálním horizontem a zároveň jeho $LH\alpha$ je největší z množiny $LH_1\alpha, \ldots, LH_i\alpha$, pak jej značíme jako $GH$. Obdobně jako u lokálního horizontu použijeme lehce upravenou variantu indexu, kde hodnotou -1 značíme neviditelné body, 0 viditelné body, které ale nejsou globálními horizonty, a 1 značíme globální horizonty. Obdobně jako u vymezení lokálních horizontů, zde mohou vznikat neintuitivní situace, při nichž se dva globální horizonty nachází „za sebou“. Tato situace by prakticky neměla nastat, nicméně nejedná se o chybu, ale opět je to následek interpolace výšek v rámci jednotlivých buněk gridu.

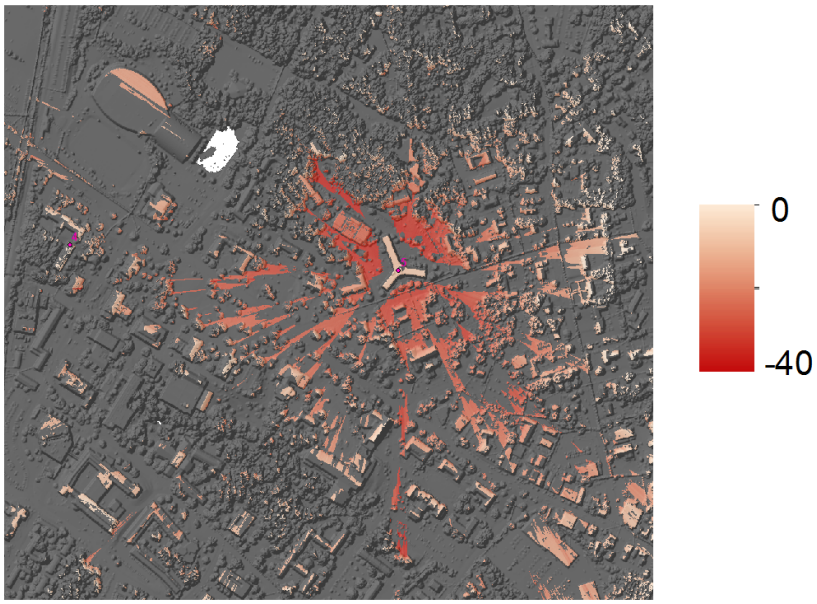
V GIS obvykle existuje nástroj na vymezení globálních horizontů v podobě vektorové linie, např. ArcMAP implementuje tuto funkcionalitu v nástrojích Skyline, Skyline Graph a Skyline Barrier (Esri, 2014). Podobný nástroj vytvořil i Janků (2011) v bakalářské práci. Ukázka vypočteného indexu je na přiloženém CD, vzhledem k povaze indexu není jeho grafická vizualizace příliš vypovídající.

### 5.5.2 Rozdíl výšek od globálního horizontu

Identicky, jako v případě rozdílu výšek od lokálního horizontu, spočteme rozdíl výšek od globálního horizontu. Hodnota indexu je určena vzorcem:.

$$P_t\Delta e = P_t e - (\tan(GH\alpha) \times P_t d). \tag{9}$$

Ten je shodný s rozdílem výšek k lokálnímu horizontu, pouze zaměníme pohledový úhel lokálního horizontu za pohledový úhel horizontu globálního. Vzhledem k tomu, že globální horizont je vždy nejvyšší bod LoS, pak hodnoty indexu budou vždy záporné a uváděné v příslušných výškových jednotkách vstupních dat (zde metry). Pro identifikaci neviditelných bodů tedy použijeme hodnotu 1. Absolutní hodnota toho indexu pak udává, o kolik je možné navýšit terén ve zvoleném bodě, aniž by byl pro daného pozorovatele narušen stávající horizont. Tato varianta může mít široké uplatnění zejména v urbanistických aplikacích, při stanovování výškových limitů staveb v oblastech, kde je nežádoucí narušení horizontů budovami. Ukázka indexu je na obr. 24.

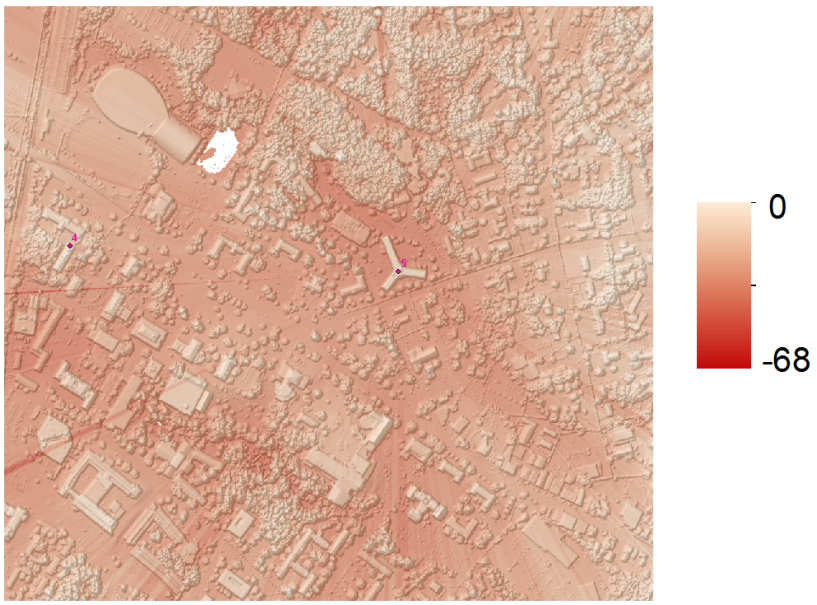



Obr. 24: Hodnoty indexu rozdílu výšek od globálního horizontu pro viditelné body. Podkreslení obrazu je stínovaný reliéf.

Index díky využívání výšek neumožňuje porovnání hodnot v rámci území, neboť ty se mění v závislosti na vzdálenosti od pozorovatele. Ale umožňuje vhodně

posoudit, jestli při zvýšení určitých ploch dojde k narušení horizontu. Tento index má velký potenciál jednak při plánování výstavby budov, nebo při plánování umístění zeleně, kdy je snaha nenarušit stávající horizont.

Tento index lze počítat i pro neviditelné body. Vypovídací hodnota bude stejná jako pro viditelné body, absolutní hodnota indexu bude odpovídat možnému navýšení v daném bodě bez toho, aby došlo k narušení stávajícího horizontu. Ukázka této varianty indexu je na obr. 25.




Obr. 25: Hodnoty indexu rozdílu výšek od globálního horizontu pro viditelné body. Podkreslení obrazu je stínovaný reliéf.

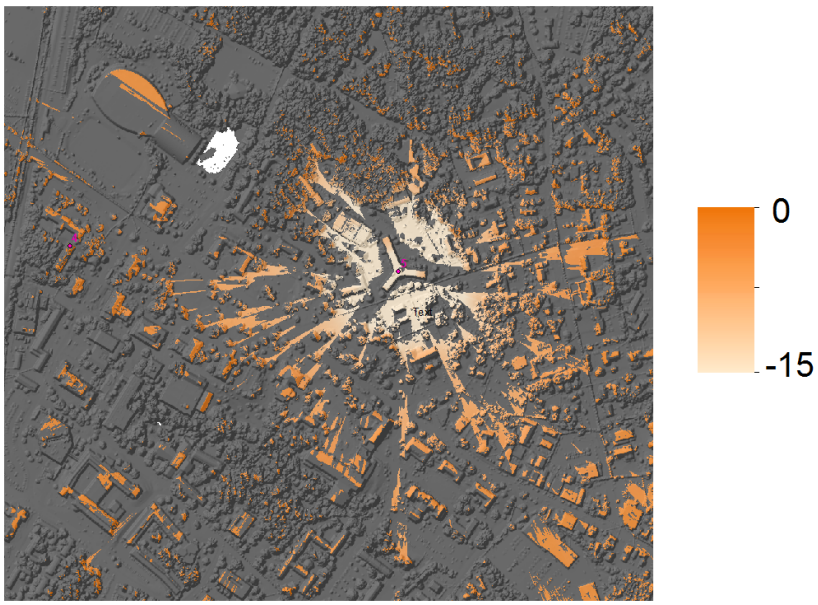
### 5.5.3 Rozdíl pohledových úhlů od globálního horizontu

Obdobně jako u indexů spojených s lokálním horizontem je pro hodnocení významnosti viditelnosti bodů v rámci území vhodnější využívat nikoliv rozdílů výšek, ale rozdílů pohledových úhlů. Zmínky o výpočtu tohoto indexu najdeme v pracích, které sepsal Felleman (1979) a Fisher (1996b, 1994b). Pro výpočet potřebujeme opět zjistit, který z bodů celé LoS je globálním horizontem. Hodnotu indexu ve stupních pak spočteme jako:

$$P_t\Delta\alpha = P_t\alpha - (GH\alpha). \tag{10}$$

Na rozdíl od porovnávání k lokálnímu horizontu, globální horizont vždy existuje. Z výpočtu je zřejmé, že hodnoty indexu budou vždy záporné, neboť body nemohou ležet výše než globální horizont. Hodnot 1 tedy použijeme pro indikaci neviditelných bodů.

Index napomáhá s vymezením výrazných částí LoS. Body s hodnotou indexu blízkou 0 se budou vyskytovat blízko globálního horizontu, a jak bylo již dříve zmíněno, body blízko horizontu jsou výraznější než body od horizontu vertikálně vzdálené. Ukázka indexu je na obr. 26, kde je tento fakt zřejmý.




Obr. 26: Hodnoty indexu rozdílu pohledových úhlů od globálního horizontu. Podkreslení obrazu je stínovaný reliéf.

### 5.5.4 Inverzní varianty indexů od globálního horizontu

Inverzní varianty viditelnosti indexů spojených s globálním horizontem by poskytovaly zajímavé hodnocení cílového bodu ze všech bodů povrchu. Umožňovaly by posoudit, jak vysoký objekt může být postaven na cílovém místě, aniž by se narušily horizonty. Stejně tak by bylo možné zhodnotit, nakolik je cílový bod blízký horizontu a podobně. Možnosti použití těchto indexů jsou velice zajímavé.

Nicméně s jejich výpočtem se pojí zásadní problém. Nelze již využít van Kreveldův algoritmus, neboť je zapotřebí získávat nejen body mezi pozorovatelem a cílovým bodem, ale i ty, které leží za cílovým bodem. V tomto případě ne-

postačuje provádět výpočet na LoS, kterou poskytuje van Kreveldův algoritmus. Je zapotřebí nalézt jiný vhodný algoritmus, který zvládne vhodně indexovat pixely povrchu do struktur *EventListu* a *StatusListu*. Autor v rámci pokusů vyzkoušel pro výpočty implementaci pomocí Bresenhamova algoritmu, která ale není použitelná na grid o rozměrech větších jak $1000 \times 1000$ pixelů, a úpravu van Kreveldova algoritmu pro přepočet *EventListu* pro každý pohledový bod. Nicméně ani jedna z těchto variant není reálně použitelná, zejména kvůli výrazné časové náročnosti, ani čas překračující 48 hodin nevede k výsledku. Tento čas označují za limitní pro reálně možné výpočty Haverkort et al. (2009).

S ohledem na to, jak rozsáhlá je problematika optimalizace výpočtu viditelnosti z hlediska teoretického i praktického a na množství literatury, která tuto problematiku řeší (Ferreira et al., 2014; Haverkort et al., 2009; Izraelevitz, 2003; van Kreveld, 1996; Nagy, 1994; Sorensen a Lanter, 1993; Tabik et al., 2013; Teng et al., 1997) , nebyla praktická implementace inverzních indexů viditelnosti pro globální horizont v této rigorózní práci provedena. Naznačené možnosti využití ale poukazují na fakt, že by bylo vhodné se touto oblastí v budoucnu zabývat a vytvoření vhodného algoritmu je více než žádoucí.

## 5.6 Rozdíl pohledového úhlu a sklonu LoS

Jednou z důležitých charakteristik viditelnosti je sklon povrchu, který pozorovatel sleduje. Felleman (1979) navrhoval využití sklonu a orientace povrchu k selekci částí povrchu, které mají pro pozorovatele nízkou informační hodnotu. Za takové části povrchu označil ty, které jsou sice pro uživatele viditelné, ale jejich sklon je buď velice podobný pozorovacímu úhlu, nebo jejich orientace je pro uživatele vysloveně nevhodná. Bohužel, kromě naznačení základního konceptu, není žádný detailnější popis k dispozici.

Na základě popisu, který poskytl Felleman (1979), představili upravenou verzi tohoto indexu Caha a Rášová (2015). V jejich implementaci nehraje orientace výraznější roli, neboť sklon se počítá přímo pro konkrétní LoS a nikoliv pro povrch, jak navrhoval Felleman (1979). Tento index vychází z předpokladu, že pro pozorovatele jsou mnohem výraznější části povrchu s velkým sklonem (relativně velkým, v kontextu pohledového úhlu).

Představme si pozorovatele, stojícího na relativně rovném povrchu, kde se ve větší vzdálenosti od něj vyskytují buď budovy nebo kopce. Blízké okolí je pro

pozorovatele dobře viditelné, neboť jeho pohledový úhel a sklon LoS u bodu se výrazně odlišují. Nicméně, čím dál od pozorovatele na rovném povrchu se nachází pozorovaný bod, tím více se tyto úhly k sobě blíží a tím se viditelnost (či spíše rozlišitelnost) těchto bodů horší, až se pro pozorovatele stanou takřka nerozlišitelnými. Pokud se ale z tohoto rovného povrchu zvedají kopce či budovy, bude jejich viditelnost pro pozorovatele dobrá, neboť rozdíl sklonu povrchu a pozorovacího úhlu naroste.

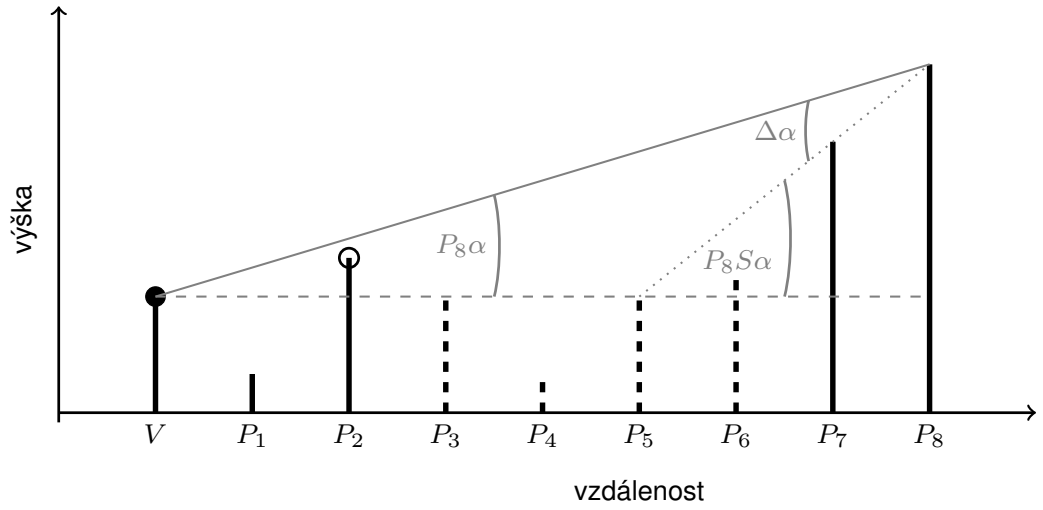
Sklon LoS pro pod $P_i$ spočítáme za pomoci přecházejícího bodu $P_{i-1}$ následně:

$$P_iS\alpha = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{P_ie - P_{i-1}e}{P_id - P_{i-1}d}\right), \tag{11}$$

kde $P_iS\alpha$ je sklon LoS v bodě $P_i$. Na základě znalosti sklonu LoS lze vypočítat index jako:

$$P_iS\Delta\alpha = P_iS\alpha - P_i\alpha, \tag{12}$$

kde $P_iS\Delta\alpha$ je rozdíl sklonu LoS a pohledového úhlu uváděný ve stupních. Graficky je tento výpočet zobrazen na obr. 27. Identicky tento výpočet popisují Caha a Rášová (2015).




Obr. 27: Výpočet rozdílu sklonu LoS a pohledového úhlů pro bod $P_8$ (převzato z: Caha a Rášová (2015)).

Ukázka výpočtu indexu je na obr. 28, z vizualizace je patrné, že nejvyšší hodnoty mají buď stěny budov nebo vegetace. Tyto prvky tvoří nejvýraznější překážky a jejich sklon je obvykle výrazný s ohledem na pozorovací úhel. Hodnoty indexu mohou teoreticky nabývat hodnot v rozmezí 0 až 180. Pro pozorovatele

je optimální hodnota 90, hodnoty 0 a 180 jsou nevhodné, neboť dochází k tomu, že pohledový úhel je téměř shodný se sklonem LoS, pouze orientace je odlišná.

Tento index určí plochy, které budou pro pozorovatele výrazné a velice dobře viditelné. Lze tak odlišit sice viditelné plochy, z nichž ale uživatel není schopen získat informaci (Felleman, 1979), od ploch, z nichž naopak informaci pozorovatel získá snadno a v podstatě kompletní.

Obr. 28: Hodnoty indexu rozdílu sklonu LoS a pohledového úhlu.

# 6 VYUŽITÍ INDEXŮ VIDITELNOSTI V KOMPLEXNÍCH ANALÝZÁCH VIDITELNOSTI

Kromě jednoduchého výpočtu viditelnosti či inverzní viditelnosti se využívají i komplexnější analýzy viditelnosti, které obvykle kombinují výsledek několika výpočtů viditelnosti do jednoho výsledku. Z těchto analýz jsou nejčastěji využívané:

- násobná viditelnost,
- celková (totální) viditelnost,
- viditelnost z linií,
- nejistota povrchu ve výpočtu viditelnosti.

Všechny tyto analýzy se obvykle používají s booleovskou viditelností, nicméně ve všech případech by bylo možné a často i velice výhodné využít spíše některý z indexů namísto booleovské viditelnosti. V této kapitole stručně shrneme výhody a možnosti využití indexů viditelnosti v komplexních analýzách viditelnosti.

Násobná viditelnost je analýzou, při nichž hodnotíme viditelnost povrchu z více než jednoho pozorovacího bodu. Výsledkem je potom grid, jehož hodnoty udávají počet pozorovacích bodů, z nichž je daný pixel viditelný (Felleman, 1979; Coll et al., 2007). Uplatnění nachází zejména při hodnocení nejvíce viditelných bodů z okolí atd. Tato analýza ale trpí zásadním nedostatkem vycházejícím z použití booleovské viditelnosti. Jak bylo ukázáno v kap. 5.4.4, značná část viditelných ploch může často mít minimální úhlovou vzdálenost od horizontu, což znamená, že sice teoreticky (či spíše algoritmicky) jsou pro pozorovatele viditelné, ale prakticky budou viditelné jen obtížně a za ideálních podmínek. Analýza také vůbec nebere v potaz vzdálenost pozorovaných bodů od pozorovatele. Pokud je použita násobná viditelnost například pro hodnocení viditelnosti staveb či přírodních útvarů z vyhlídkových bodů, je vhodné uvažovat i tento faktor. Cílový bod sice může být viditelný, ale pozorovaný objekt může být natolik nevýrazný, že viditelnost v podstatě nedává smysl. Vzhledem k uvedeným faktům je vhodné konstatovat, že násobná viditelnost je zajímavá analýza, která sama o sobě ale často nemá dostačující vypovídací hodnotu. Je vhodné ji doplnit např. fuzzy viditelností či indexem rozdílu pohledového úhlu od lokálního horizontu, v ideálním případě

oběma. Tímto doplněním může z výsledků odfiltrovat plochy pro pozorovatele sice viditelné, ale spíše málo a špatně.

Podobnou analýzou jako násobná viditelnost je potom celková (též označovaná jako totální) viditelnost (Kim et al., 2004; Romero et al., 2011; Tabik et al., 2013; Wright et al., 2014). Při celkové viditelnosti hodnotíme, z kolika pixelů povrchu je daný pixel viditelný. Pokud máme povrch (grid) o rozměrech $n \times m$ pixelů, je potřeba při naivní implementaci provést $n \times m$ výpočtů viditelnosti (Doležal, 2012). Tyto viditelnosti se následně sečtou pomocí mapové algebry, čímž pro každý pixel získáme počet pixelů, z nichž je viditelný. Počet výpočtů lze teoreticky i optimalizovat a značně snížit časovou i výpočetní náročnost (Romero et al., 2011; Tabik et al., 2013). Výsledek celkové viditelnosti se používá pro plánování umístění jak radiových či jiných vysílačů, tak např. i rozhleden (Romero et al., 2011; Tabik et al., 2013). Detailněji popisuje možnosti využití a výpočet totální viditelnosti Doležal (2012). Celková viditelnost stejně jako násobná trpí nedostatky vycházejícími z použití booleovské viditelnosti. Zejména pak zanedbáním vlivu vzdálenosti může mít na viditelnost zásadní důsledky. Stejně tak, pokud analýza slouží jako podklad pro umístění vysílačů či rozhleden, je vhodné uvažovat o využití indexu rozdílu pohledového úhlu k lokálnímu horizontu. Ten může být pro viditelné body akumulován stejně jako booleovská viditelnost a následně z nich vypočten průměrný úhlový rozdíl. Tato charakteristika prozradí, nakolik cílový bod obvykle vystupuje nad lokální horizont, čímž se omezí vliv efektu popsaného v kap. 5.4.4.

Další častými aplikacemi komplexnějších analýz viditelnosti jsou výpočty viditelnosti z linií (Felleman, 1979; Růžičková et al., 2012b,a; Doležal, 2012). Cílem je často hodnotit atraktivitu turistických či jiných tras (Doležal, 2012). I zde je vhodné uvažovat o použití některých indexů, neboť i zde se vyskytují situace zmíněné dříve. Vznikají zde situace analogické k výše uvedeným příkladům.

Samostatnou kapitolou je hodnocení nejistoty viditelnosti na základě nejistoty povrchu. Jedná se o v literatuře často studované téma (Fisher, 1992, 1995; Nackaerts et al., 1999; Huss a Pumar, 1997). Zejména studie, kterou představili Nackaerts et al. (1999), se zaobírá teoretickou složkou tohoto výpočtu a hodnocení nejistoty. Na rozdíl od často řešených problematik při propagaci nejistoty jako jsou sklon a orientace povrchu (Heuvelink, 1998, 2002; Oksanen a Sarjakoski, 2005) nelze z klasické booleovské viditelnosti získat rozdělení pravděpodobností pro kontinuální proměnnou, pouze procenta pro viditelnost a neviditelnost cílového bodu – binomické rozdělení pravděpodobnosti viditelnosti (Nackaerts et al.,

1999). Nicméně použití indexů vztahujících se k lokálním horizontu (jak výšky, tak i úhlu), a to jak pro viditelné tak i neviditelné body LoS, by umožnilo získat právě takovou kontinuální proměnou, kterou by bylo možné dále vhodně analyzovat. Toto možné použití některých indexů zmiňují i Caha a Rášová (2015).

V této kapitole bylo stručně nastíněno možné využití indexů viditelnosti pro komplexnější analýzy viditelnosti než pouze jejich jednoduchý výpočet. V této oblasti nebyly prozatím provedeny žádné studie a toto téma tak zůstává otevřené do budoucna pro další výzkum.

# 7 DISKUZE

Za jeden ze zásadních přínosů této rigorózní práce lze považovat demonstraci, jak snadno lze na místo kvalitativní informace (booleovská viditelnost) získat informaci kvantitativní (některé indexy viditelnosti), která představuje výrazně komplexnější pohled na viditelnost a zároveň poskytuje uživateli neporovnatelně větší množství informace, se kterou může následně pracovat. Je zřejmé, že kvantitativní vyjádření viditelnosti lze dále zpracovávat s cílem získání dalších informací (např. více specifických), zatímco z kvalitativních dat jinou informaci, než která v nich je, získat nelze. Příkladem tohoto procesu je např. klasifikace fuzzy viditelnosti (obr. 14) a nebo klasifikace úhlového rozdílu pohledového úhlu k lokálnímu horizontu (obr. 23).

Je zajímavé, s ohledem na množství výzkumu věnujícího se optimalizaci výpočtu viditelnosti, viz např. Feng et al. (2015), Ferreira et al. (2014),Haverkort et al. (2009), Izraelevitz (2003), Teng et al. (1997) a i mnoho dalších, jak relativně málo prací se věnuje problematice indexů viditelnosti, či získávání doplňujících informací o viditelnosti. Z těchto prací vyčnívá zejména prvotní studie, kterou provedl Felleman (1979), a posléze celá sbírka článků, které publikoval Fisher (1994b, 1996b,a). Z poslední doby lze zmínit práce, které sepsali Bartie et al. (2010) a také Caha a Rášová (2015).

Jak bylo naznačeno v textu již dříve, indexy viditelnosti poskytují odpovědi na otázky, na které běžná analýza viditelnosti, tak jak je obvykle implementována ve většině GIS, neumí odpovědět. Konkrétní otázky byly zmíněny v rámci popisu jednotlivých indexů. Zmiňme jen namátkou otázky týkající se rozlišitelnosti specifických objektů, které lze řešit pomocí fuzzy viditelnosti, či problematiku narušování horizontů a výraznosti některých bodů ve vztahu k horizontům jak lokálním tak globálním. Vzájemnou kombinací indexů viditelnosti je možné se dopracovat k odpovědím na mnohem komplexnější otázky. Například umístění tabule či reklamy, v případě takovéto analýzy lze využít fuzzy viditelnost, sklon LoS k pohledovému úhlu a také výšku nad lokálním horizontem. Fuzzy viditelnost použijeme jako omezení, aby byl text tabule pro pozorovatele čitelný a rozlišitelný. Sklon LoS k pohledovému úhlu zvýrazní plochy na nichž bude případné cedule pro pozorovatele dobře viditelná. Pomocí rozdílu výšek od lokálního horizontu pak lze zkontrolovat, že tabule bude viditelná celá, nikoliv pouze její část. Tyto a mnohé další otázky je možné zodpovědět s využitím indexů viditelnosti, je pravdou, že

by to bylo možné i bez nich, nicméně celý proces by byl komplikovanější. V případě, kdy řešíme prostorou úlohu, viz např. výše zmíněné umístění reklamy, kde vyhledáváme optimální umístění z velké množiny možných lokalit, by řešení ani nebylo možné.

Mimo otázky zmíněné v předchozím odstavci se nabízí zajímavá aplikace indexů viditelnosti na základě výzkumu, který provedli Senaratne et al. (2013). Ti využili inverzní analýzu viditelnosti pro hodnocení správnosti geotagů fotografií na službě Flickr. Přesněji určovali, jestli na fotografii zmíněný objekt (obvykle budova) je ze souřadnic, získaných z metadat fotografie, vůbec pozorovatelný. Pokud postup poněkud rozšíříme, pak by bylo možné, podle fotografie a dostatečně detailního modelu povrchu, určit, na základě z fotografie zjištěných parametrů a příslušných indexů viditelnosti, lokalitu, odkud byla fotografie pořízena. Zatímco ve zmíněném článku fungovala tato metoda pouze s booleovskou viditelností, využití dalších indexů viditelnosti by mohlo tuto metodu zajímavě rozšířit.

Autor této práce vidí velký potenciál mimo jiné ve využití některých indexů pro hodnocení nejistoty viditelnosti. Indexy viditelnosti je možné počítat pro terén s nejistotou za využití metody Monte Carlo obdobně, jako pro to pro klasickou viditelnost prezentoval Fisher (1991, 1994a). Zejména rozdíl pohledového úhlu k pohledovému úhlu lokálního horizontu vypočtený i pro neviditelné body poukazuje hodnotami blízkými nule, jak kladnými tak i zápornými, na oblasti, které mohou být silně ovlivněny případnou nejistotu povrchu. Index, na rozdíl od booleovské viditelnosti, poskytuje proměnnou s gaussovým (spojitým) rozdělením pravděpodobností, které lze výrazně lépe analyzovat, než binomické (diskrétní) rozdělení klasické viditelnosti. Pak by bylo možné nejistotu v analýze viditelnosti hodnotit stejnými metodami, jako je obvyklé u jiných spojitých veličin, jako jsou například derivace povrchu, pro než tyto postupy popsali například Heuvelink (1998), Oksanen a Sarjakoski (2005). Použití indexů pro vymezení globálních či lokálních horizontů pak může sloužit na površích s nejistotou k vymezení pravděpodobných horizontů. Studium vlivu nejistoty povrchu na viditelnost a její indexy se jeví jako poměrně zajímavé téma, jenž si jistě zaslouží další rozpracování.

Jedním s významných témat při řešení viditelnosti je i viditelnost skrze vegetaci (Llobera, 2007). Tato problematika se často řeší oddělením výpočtu viditelnosti skrze vegetaci od výpočtu samotné viditelnosti, jak to ostatně prezentuje i Llobera (2007). V praxi by ovšem bylo možné rozšířit algoritmus výpočtu viditelnosti natolik, že by byla pro každý bod LoS udržována informace o přítomnosti a typo-

logii vegetace. Následně by při výpočtu viditelnosti bylo možné hodnotit přes jaké množství vegetace (počet bodů LoS s vegetací) pozorovatel cílový bod vidí, a jakého typu tato vegetace je (např. pro hodnocení průhlednosti). Takováto úprava výpočtu viditelnosti by byla výrazně náročnější, než výpočet v této práci představených indexů viditelnosti, nicméně tato úprava představuje zajímavou alternativu k existujícím studiím.

Při studiu algoritmů a jejich variant, pro výpočet nejistoty, a porovnání výsledků poskytovaných různými softwary (viz kap. 4.5) vyvstává problematika absence popisu algoritmů některých (zejména komerčních) softwarů. Tuto problematiku zmiňoval již Fisher (1993, 2007). Pro potřeby kvalitního hodnocení a porovnávání je nezbytná kompletní znalost výpočetního algoritmu. Pouze na základě této znalosti je možné adekvátně uvažovat o potenciálních odchylkách a problémech, kterou mohou při výpočtu nastat. Pokud má docházet k rozšiřování algoritmu výpočtu, jak je navrhováno v této rigorózní práci, stává se tato problematika ještě důležitější. Výsledky výpočtu indexů viditelnosti jsou totiž poměrně zásadně ovlivněny všemi dílčími kroky v algoritmu výpočtu viditelnosti (popsanými v kap. 4). Autor tedy považuje za nezbytné zopakovat Fisherovu výzvu (1993, 2007), že spolu s dokumentací nástroje je nezbytné zveřejňovat i popisy algoritmů. Ideální by bylo zveřejnění zdrojových kódů, což ale v praxi nelze očekávat. Bez znalosti algoritmů působí nástroje v GIS jako blackboxy, což není pro uživatele žádoucí a má to negativní vliv na použitelnost těchto nástrojů.

## 7.1 Budoucí vývoj

Jak bylo naznačeno v kapitole 2.3, implementace vytvořené pro potřeby této rigorózní práce nejsou v současné podobě vhodné pro širší praktické využití. Jejich účelem byla demonstrace možností výsledků, nikoliv jejich širší praktické využívání, z důvodu časové náročnosti výpočtů. Ze způsobu využití těchto implementací pramenící neoptimalizovanost, časová a paměťová náročnost algoritmů je nejzásadnějším aktuálním problémem výpočtu indexů viditelnosti. Optimalizace či případně paralelizace těchto výpočtů je nezbytným krokem, který umožní širší používání těchto indexů pro reálné aplikace. Než ale bude možné k těmto optimalizacím přistoupit, je nezbytné pomocí názorných ukázek a příkladů, demonstrovat přínosy a možnosti využití těchto indexů v rámci geoinformatické komunity, aby

po těchto indexech vznikla poptávka a také obecné povědomí. Ukázky v této práci a v jejích přílohách by tuto roli měly z velké části naplňovat.

Autor doufá, že v budoucnu by se mohlo podařit alespoň nejméně výpočetně náročné indexy implementovat v některém GIS s otevřeným zdrojovým kódem. Nabízí se především varianty GRASS GIS, s jehož zdrojovým kódem je již autor částečně obeznámen, a SAGA GIS. Tento software má výhodu v menším počtu vývojářů a celkově jednoduššímu přístupu k vývoji než GRASS GIS. Implementace indexů viditelnosti v open source nástrojích je zcela jistě jedním z budoucích cílů autora této rigorózní práce.

# 8 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce byla analýza možností získávání doplňkových informací při výpočtu analýzy viditelnosti. V kapitole 4 bylo demonstrováno, že v rámci výpočtu analýzy viditelnosti je zpracováváno velké množství informace o linii pohledu, která je finálním krokem, totiž výpočtem booleovské viditelnosti, značně redukována. Pokud je při výpočtu viditelnosti poslední krok algoritmu (samotný výpočet viditelnosti na LoS – kap. 4.4) nahrazen některým z indexů viditelnosti představených v kapitole 5, je možné uživateli poskytnout odpověď i na komplikovanější otázky týkající se viditelnosti. Tyto komplexnější informace jsou v mnoha případech využití analýzy viditelnosti výrazně více žádoucí a přínosné pro uživatele, než prostá booleovská viditelnost. Tato problematika nepatří v geoinformatice mezi často řešená témata, nicméně jedná se o téma velice zajímavé, jehož výsledky mají velký potenciál pro praktické aplikace.

V kapitole 5 bylo popsáno několik indexů viditelnosti. Výběr indexů byl proveden na základě návrhů, jež přednesl Felleman (1979). Některé z těchto indexů byly již dříve v GIS implementovány – např. index rozdílu výšek od lokálního horizontu, index rozdílu výšek od globálního horizontu a jejich inverzní varianty (Fisher, 1996b). Naproti tomu u indexu rozdílu pohledových úhlu k lokálnímu horizontu a rozdílu pohledového úhlu a sklonu LoS byla první implementace v GIS provedena až v rámci článku, na kterém se autor této rigorózní práce podílel (Caha a Rášová, 2015).

V rámci rigorózní práce vznikla geodatabáze, která obsahuje pro pět testovacích rozhledových bodů výpočty vybraných indexů viditelnosti. Rámcově bylo pro každý bod vytvořeno 16 indexů, přičemž v některých případech se jedná o varianty indexu (např. pro viditelné a neviditelné body) a v některých případech se jedná o rozdílná nastavení (inverzní booleovské viditelnosti). Tato geodatábaze spolu s projekty v software ArcMap 10.2 jsou v podobě elektronické přílohy nedílnou součástí práce, která umožňuje vizualizovat a hodnotit dosažené výsledky, než obrázky v práci.

Zkušební implementace výpočtů indexů viditelnosti, která byla provedena za účelem výpočtu výše zmíněných indexů, naznačuje, že rozšíření algoritmu pro výpočet viditelnosti je možné. Z autorova subjektivního pohledu není toto rozšíření v naivní implementaci ani příliš komplikované, nicméně některé výpočty jsou časově poměrně náročné. Jak naznačuje kapitola 7, je téma optimalizace výpočtu

indexů viditelnosti do budoucna otevřené a představuje zajímavou výzvu, která svojí povahou ale patří spíše do oblasti informatiky, než geoinformatiky.

V rámci práce byly názorně demonstrovány přínosy indexů viditelnosti pro praktické aplikace, které jsou možné v mnoha oblastech využití analýzy viditelnosti, mimo jiné například v archeologii, kde použití naznačili i Caha a Rášová (2015), ale i urbanistických studiích, územním či krajinném plánování, ochraně krajiny, optimalizaci umístění staveb a dalších.

# LITERATURA


ANILE, A. M., FURNO, P., GALLO, G., MASSOLO, A. A fuzzy approach to visibility maps creation over digital terrains. *Fuzzy Sets and Systems*, 135, 1, s. 63–80, 2003.

BAO, S., XIAO, N., LAI, Z., ZHANG, H., KIM, C. Optimizing watchtower locations for forest fire monitoring using location models. *Fire Safety Journal*, 71, December 2013, s. 100–109, 2015.

BARTIE, P., REITSMA, F., KINGHAM, S., MILLS, S. Advancing visibility modelling algorithms for urban environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 6, s. 518–531, 2010.

BRESENHAM, J. Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal*, 4 , 1, s. 25–30, 1965.

CAHA, J. *Uncertainty Propagation in Fuzzy Surface Analysis.* Disertační práce, Department of Geoinformatics, Palacký University in Olomouc, 2014.

CAHA, J., RÁŠOVÁ, A. Line-of-Sight Derived Indices: Viewing Angle Difference to a Local Horizon and the Difference of Viewing Angle and the Slope of Line of Sight. In RŮŽIČKOVÁ, K., INSPEKTOR, T. (Ed.) *Surface Models for Geosciences SE - 6*, s. 61–72. Ostrava : Springer International Publishing, 2015.

COLL, N., FORT, M., MADERN, N., SELLARÈS, J. a. Multivisibility maps of triangulated terrains. *International Journal of Geographical Information Science*, 21, 10, s. 1115–1134, November 2007.

DE FLORIANI, L., MAGILLO, P. Algorithms for Visibility Computation on Terrains: a Survey. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 30, 5, s. 709–728, 2003.

DODD, H. M. *The Validity of Using a Geographic Information System Viewshed Function as a Predictor for the Reception of Line-of- Sight Radio Waves.* Master thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.

DOLEŽAL, J. *Pokročilé analýzy viditelnosti.* Magisterská práce, Univerzita Palackého v Olomouci, 2012.

DOMINGO-SANTOS, J. M., VILLARÁN, R. F., RAPP-ARRARÁS, Í., PROVENS, E. C.-P. The visual exposure in forest and rural landscapes: An algorithm and a GIS tool. *Landscape and Urban Planning*, 101, 1, s. 52–58, May 2011.

ESRI. Arcgis help 10.2, 10.2.1, and 10.2.2 – an overview of the visibility toolset, 2014. Dostupné z: `http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//00q9000000n0000000`.

FELLEMAN, J. P. Landscape Visibility Mapping : Theory and Practice. Technical report, School of Landscape Architecture, Syracuse, New York, 1979.

FENG, W., GANG, W., DEJI, P., YUAN, L., LIUZHONG, Y., HONGBO, W. A parallel algorithm for viewshed analysis in three-dimensional Digital Earth. *Computers and Geosciences*, 75, s. 57–65, 2015.

FERNANDEZ-JIMENEZ, L. A., MENDOZA-VILLENA, M., ZORZANO-SANTAMARIA, P., GARCIA-GARRIDO, E., LARA-SANTILLAN, P., ZORZANO-ALBA, E., FALCES, A. Site selection for new PV power plants based on their observability. *Renewable Energy*, 78, s. 7–15, 2015.

FERREIRA, C. R., ANDRADE, M. V. A., MAGALHÃES, S. V. G., FRANKLIN, W. R., PENA, G. C. A Parallel Algorithm for Viewshed Computation on Grid Terrains. *Journal of Information and Data Management*, 5, 2, 2014.

FISHER, P. The pixel : A snare and a delusion. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3, s. 679–685, 1997.

FISHER, P. F. 1st Experiments in Viewshed Uncertainty - Simulating Fuzzy Viewsheds. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58, 3, s. 345–352, 1992.

FISHER, P. Improved Modeling of Elevation Error with Geostatistics. *GeoInfomatica*, 2, 3, s. 215–233, 1998.

FISHER, P., FARRELLY, C., MADDOCKS, A., RUGGLES, C. Spatial Analysis of Visible Areas from the Bronze Age Cairns of Mull. *Journal of Archaeological Science*, 24, 7, s. 581–592, 1997.

FISHER, P. F. Simulation of the Uncertainty of a Viewshed. In *51st Annual Convention of the American Congress on Surveying and Mapping / 56th Annual Convention of the American Soc for Photogrammery and Remote Sensing*, s. 205—-218, Bethesda, 1991. Amer Congress Surveying & Mapping.

FISHER, P. F. Algorithm and Implementation Uncertainty in Viewshed Analysis. *International Journal of Geographical Information Systems*, 7, 4, s. 331–347, 1993.

FISHER, P. F. Probable and fuzzy models of the viewshed operation. In WORBOYS, M. (Ed.) *Innovations in GIS 1*, s. 161–175. Taylor & Francis, 1994a.

FISHER, P. F. Stretching the viewshed. In WAUGH, T. C., HEALEY, R. G. (Ed.) *Advances in GIs: Proceedings of the 6th lnternational Symposium on Spatial Data Handling*, London, 1994b. Taylor & Francis.

FISHER, P. F. An exploration of probable viewsheds in landscape planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 22, 5, s. 527–546, 1995.

FISHER, P. F. Reconsideration of the viewshed function in terrain modelling. *Geographical Systems*, 3, s. 33–58, 1996a.

FISHER, P. F. Algorithm and Implementation Uncertainty: Any Advances? In FISHER, P. (Ed.) *Classics from IJGIS: Twenty years of the International Journal of Geographical Information Science and Systems*, s. 225–228. Boca Raton : CRC Press, 2007.

FISHER, P. F., TATE, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography*, 30, 4, s. 467–489, 2006.

FISHER, P. Extending the Applicability of Viewsheds in Landscape Planning. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 11, s. 1297 – 1302, 1996b.

FRANKLIN, W. R., RAY, C. K. Higher isn' t Necessarily Better : Visibility Algorithms and Experiments. In WAUGH, T., HEALEY, R. (Ed.) *Advances in GIS Research: Sixth International Symposium on Spatial Data Handling*, s. 751–770, London, 1994. Taylor & Francis.

HAVERKORT, H., TOMA, L., ZHUANG, Y. Computing visibility on terrains in external memory. In *Proceedings of the 9th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments / Workshop on Analytic Algorithms and Combinatorics (ALENEX/ANALCO 2007)*, 2007.

HAVERKORT, H., TOMA, L., ZHUANG, Y. Computing Visibility on Terrains in External Memory. *ACM Journal on Experimental Algorithmics*, 13, 2009.

HERNÁNDEZ, J., GARCÍA, L., AYUGA, F. Assessment of the visual impact made on the landscape by new buildings: a methodology for site selection. *Landscape and Urban Planning*, 68, 1, s. 15–28, May 2004.

HEUVELINK, G. B. M. *Error Propagation in Environmental Modelling with GIS*. London : Taylor & Francis Ltd, 1998.

HEUVELINK, G. B. M. Analysing Uncertainty Propagation in GIS:Why is it not that Simple? In FOODY, G. M., ATKINSON, P. M. (Ed.) *Uncertainty in remote sensing and GIS*, s. 155–165. Chichester : Wiley, 2002.

HIGUCHI, T. *The Visual and Spatial Structure of Landscapes*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 1983.

HLAVATÁ, Z., OŤAHEL, J. Vizuálna analýza vybrabých historických dominánt Bratislavy. *Geografický časopisS*, 62, 4, s. 293–311, 2010.

HUSS, R. E., PUMAR, M. A. Effect of Database Errors on Intervisibility Estimation*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, , 63, 1997.

IZRAELEVITZ, D. A Fast Algorithm for Approximate Viewshed Computation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69, 7, s. 767–774, 2003.

JANKŮ, J. *Vymezení viditelnosti oblohy pro plánování měření GPS*. Bakalářská práce, Univerzita Palackého v Olomouci, 2011.

KIM, Y. H., RANA, S., WISE, S. Exploring multiple viewshed analysis using terrain features and optimisation techniques. *Computers and Geosciences*, 30, 9-10, s. 1019–1032, 2004.

LAKE, M., WOODMAN, P., MITHEN, S. Tailoring GIS Software for Archaeological Applications: An Example Concerning Viewshed Analysis. *Journal of Archaeological Science*, 25, 1, s. 27–38, January 1998.

LANG, C., OPALUCH, J. J., SFINAROLAKIS, G. The windy city: Property value impacts of wind turbines in an urban setting. *Energy Economics*, 44, s. 413–421, 2014.

LLOBERA, M. Modeling visibility through vegetation. *International Journal of Geographical Information Science*, 21, 7, s. 799–810, August 2007.

LOOTS, L., NACKAERTS, K., WAELKENS, M. Fuzzy Viewshed Analysis of the Hellenistic City Defence System at Sagalassos , Turkey. In DINGWALL, L., EXON, S., GAFFNEY, V., LAFLIN, S., LEUSEN, M. (Ed.) *Proceedings of the 25th Anniversary Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Birmingham, 1999.

MALOY, M. A., DEAN, D. J. An Accuracy Assessment of Various GIS-Based Viewshed Delineation Techniques. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67, 11, s. 1293–1298, 2001.

NACKAERTS, K., GOVERS, G., Van Orshoven, J. Accuracy assessment of probabilistic visibilities. *International Journal of Geographical Information Science*, 13, 7, s. 709–721, October 1999.

NAGY, G. Terrain Visibility. *Computers & Graphics*, 18, 6, s. 763–773, 1994.

National Center for Airborne Laser Mapping. Durham, nh: Hyporheic zone extent and exchange in a coastal stream, 2015. Dostupné z: `http://opentopo.sdsc.edu/gridsphere/gridsphere?cid=geonlidarframeportlet&gs_action=datasetMetadata&otCollectionID=OT.012012.26919.1`. DOI: 10.5069/G94Q7RWT.

OGBURN, D. E. Assessing the level of visibility of cultural objects in past landscapes. *Journal of Archaeological Science*, 33, 3, s. 405–413, March 2006.

OKSANEN, J., SARJAKOSKI, T. Error propagation of DEM-based surface derivatives. *Computers & Geosciences*, 31, 8, s. 1015–1027, 2005.

RÁŠOVÁ, A. *Analýza viditeľností v prostredí geografických informačných systémov*. Diplomová práca, Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2013.

RÁŠOVÁ, A. Fuzzy viewshed , probable viewshed, and their use in the analysis of prehistoric monuments placement in Western Slovakia. In HUERTA, J., SCHADE, S., GRANELL, C. (Ed.) *Connecting a Digital Europe through Location and Place. Proceedings of the AGILE'2014 International Conference on Geographic Information Science*, Castellón, 2014.

ROMERO, L. F., TABIK, S., ZAPATA, E. L. Visibility Map Computation at all Points of a Terrain. In ALMEIDA, F., BLANCO, V., LEóN, C., RODRÍGUEZ, C., SANDE, F. (Ed.) *Actas XXII Jornadas de Paralelismo (JP2011)*, s. 113–118, La Laguna, 2011. Universidad de La Laguna.

RŮŽIČKOVÁ, K., DOHNALOVÁ, M., RŮŽIČKA, J. Sensitivity analysis of analysis of visibility from line. In RŮŽIČKA, J., RŮŽIČKOVÁ, K. (Ed.) *GIS Ostrava 2012 Surface models for geosciences*, Ostrava, 2012a. VŠB-Technical University of Ostrava.

RŮŽIČKOVÁ, K., RŮŽIČKA, J., CIRBUS, J., MATUSZCZYK, M. The Influence of Observer Line Geometry on Results of Visibility Analysis. In *12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference and EXPO - Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection, SGEM 2012*, s. 1177–1184, 2012b.

SENARATNE, H., BRöRING, A., SCHRECK, T. Using reverse viewshed analysis to assess the location correctness of visually generated VGI. *Transactions in GIS*, 17, 3, s. 369–386, 2013.

SORENSEN, P. A., LANTER, D. P. Partial for Determining Two Algorithms Data Structure Visibility and Reducing Analysis Error in Viewshed lnduced. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59, s. 1149–1160, 1993.

TABIK, S., ZAPATA, E., ROMERO, L. Simultaneous computation of total viewshed on large high resolution grids. *International Journal of Geographical Information Science*, 27, 4, s. 804–814, April 2013.

TENG, Y. A., MOUNT, D., PUPPO, E., DAVIS, L. S. Parallelizing an Algorithm for Visibility on Polyhedral Terrain, 1997.

TESLA, J., HORÁK, J. Prostorové interakce vybraných krajských měst a okolních obcí. In INSPEKTOR, T., HORÁK, J., RŮŽIčKA, J. (Ed.) *GIS Ostrava 2015 Současné výzvy geoinformatiky*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015.

TOMA, L., ZHUANG, Y., RICHARD, W., METZ, M. Grass gis manual: r.viewshed, 2014. Dostupné z: `http://grass.osgeo.org/grass70/manuals/r.viewshed.html`.

TSOUCHLARAKI, A., ACHILLEOS, G. Managing Visual Impacts Through A GIS: Viewshed Analysis For Designing A Sanitary Landfill Site. In POPOV, V., ITOH, H., BREBBIA, C. A., KUNGOLOS, A. (Ed.) *Waste Management and the Environment II*, s. 439–448, Southampton, 2004. WIT Press.

VAN KREVELD, M. *Variations on Sweep Algorithms: efficient computation of extended viewsheds and class intervals*. Utrecht : Utrecht University: Information and Computing Sciences, 1996.

VYSOUDIL, M. *Meteorologie a klimatologie*. UP Olomuc, 2003.

WANG, J., ROBINSON, G. J., WHITE, K. Generating Viewsheds without Using Sightlines. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66, 1, s. 87–90, 2000.

WOOD, J., KIM, S. *Encyclopedia of GIS*, chapter Plane Sweep Algorithm, s. 876–878. Springer US, 2008.

WRIGHT, D. K., MACEACHERN, S., LEE, J. Analysis of Feature Intervisibility and Cumulative Visibility Using GIS, Bayesian and Spatial Statistics: A Study from the Mandara Mountains, Northern Cameroon. *PLoS ONE*, 9, 11, 2014.

# Seznam příloh

**Příloha 1** - DVD s textem rigorózní práce a všemi datasety prezentovanými v rigorózní práci

```
Struktura DVD
├── Text práce
│   └── caha_rigorózní_práce.pdf ..... Text práce.
└── Přílohy práce ..... Elektronické přílohy práce.
    ├── stažené datasety z OpenTopography
    │   ├── NH08_Truslow_metadata.txt ....Metadata kompletní datové sady.
    │   ├── metadata-1431947827658176180 1663.txt
    │   ├── output.max.asc ..... ASCII grid povrchu, maximální odraz.
    │   ├── output.mean.asc .....ASCII grid povrchu, průměrný odraz.
    │   └── output.min.asc ..... ASCII grid povrchu, minimální odraz.
    ├── data.gdb .....Geodatabáze se všemi výstupy.
    ├── Bod ID 4.sxd ..... 3D vizualizace indexů pro bod 4 v ArcScene.
    ├── Bod ID 5.sxd ..... 3D vizualizace indexů pro bod 4 v ArcScene.
    ├── booleovské viditelnosti rozdílné implementace.mxd ..Projekt v
    │   ArcMap.
    ├── booleovské viditelnosti.mxd .....Projekt v ArcMap.
    ├── globální horizonty.mxd ..... Projekt v ArcMap.
    ├── indexy polohy pozorovatele.mxd ..... Projekt v ArcMap.
    ├── lokální horizonty.mxd .....Projekt v ArcMap.
    ├── sklon LoS a pohledového úhlu.mxd .....Projekt v ArcMap.
    └── stínovaný povrch a body.mxd .....Projekt v ArcMap.
```