

**UNIVERZITA KARLOVA**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie**

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geoinformatika, kartografie a dálkový průzkum Země



**Bc. Tomáš Hřebec**

**Řešení grafických konfliktů v mapách metodou partial  
modification**

**Automated solving of graphical conflicts in maps using the  
partial modification**

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Bayer, Ph.D.

Praha 2023

**Vysoká škola:** Univerzita Karlova v Praze

**Fakulta:** Přírodovědecká

**Katedra:** Aplikované geoinformatiky a kartografie

**Školní rok:** 2023/2024

## **Zadání diplomové práce**

**pro** Bc. Tomáše Hřebce

**obor** Geoinformatika, kartografie a dálkový průzkum země

**Název tématu:** Řešení grafických konfliktů v mapách metodou Partial Modification

### **Zásady pro vypracování**

Cílem diplomové práce bude návrh a vývoj metody pro automatizované řešení grafických konfliktů mapových prvků metodou partial modification.

Navržený postup bude zaměřen na problematiku souběžných či blízkých liniových prvků v topografických mapách velkých a středních měřítek, u kterých může docházet ke graficky nekorektní reprezentaci, popř. ke grafickým konfliktům s okolními prvky.

Součástí navrženého řešení bude i možnost propagace generalizační operace tak, aby změny polohy a tvaru prvku působily přirozeně.

Praktické ověření efektivity metodiky bude provedeno na datové sadě topografických map (ZABAGED, ZTM5), výsledky budou vizualizovány prostřednictvím vhodných kartografických metod.

Jednotlivé kroky budou implementovány ve formě skriptů ve vybraném programovacím jazyce (Python, Matlab), vizualizace výsledků proběhne v některém z vhodných SW (ArcGIS, QGIS).

**Rozsah průvodní zprávy:** 60–80 stran.

**Rozsah grafických prací:** 5–10 stran.

**Seznam odborné literatury:**

BADER, M. (2001). Energy Minimization Methods for Feature Displacement in Map Generalization, disertační práce, Universität Zurich

BURGHARDT, D., MEIER, S. (1997). Cartographic displacement using the snakes concept. in W. Foerstner and L. Pluemer (Eds.), *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Birkhaeuser-Verlag: Basel, 1997.

CHEN, Q., WANG, S. a LIU, X. (2016): An Improved Snake Model for Refinement of Lidar-Derived Building Roof Contours Using Aerial Images, ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B3, 2016, pp.583-589. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B3-583-2016.

GUILBERT, E. a SAUX, E. (2008). Cartographic generalisation of lines based on a B-spline snake model. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(8), 847-870. ISSN 1365-8816. doi:10.1080/13658810701689846

KASS, M., WITKIN, A., TERZOPOULOS, D. (1987). Snakes: Active contour models. *Int J Comput Vision* 1, 321–331. <https://doi.org/10.1007/BF00133570>

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Tomáš Bayer, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 5. července 2022

Termín odevzdání diplomové práce: léto 2024

V Praze dne

.....

Garant studijního programu/oboru

.....

Vedoucí práce

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 30. 07. 2021

.....

Bc. Tomáš Hřebec

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Tomáš Bayer, Ph.D. za vedení, za pomoc a rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a všem přátelům, kteří mě při studiu podporovali.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou generalizace liniových prvků v kartografii s využitím operátoru Partial Modification. Cílem bylo aplikovat operátor na reálná data ZTM10 a porovnat dva modely výpočtu Snakes a New Splines. Práce se zaměřuje na vyhodnocení efektivity těchto metod v různých situacích generalizace, včetně analýzy vlivu jednotlivých vstupních parametrů na výsledky.

Na základě existujících prací byly vybrány 3 situace pro generalizaci a navrženo jejich řešení pomocí algoritmu v programovacím jazyce Python. Nejprve byl analyzován vliv jednotlivých vstupních parametrů obou modelů a pak porovnávány výsledky modelů mezi sebou. Porovnání proběhlo za pomoci číselných metrik, které hodnotily polohovou přesnost a zachování tvaru generalizované linie.

Výzkum ukázal, že metoda Snakes dosahuje lepších výsledků v složitějších situacích, zatímco metoda New Splines se vyznačuje rychlejšími výpočty, ale v některých případech se ukázala být méně efektivní. Obě metody čelí problémům s deformacemi tvaru linií při odsunu více prvků najednou. Testování vlivu parametrů potvrdilo, že optimální nastavení je silně závislé na specifických datech a situacích, přičemž univerzální doporučení pro volbu parametrů není možné. Porovnání obou modelů práce poskytuje cenné informace pro budoucí výzkum v oblasti kartografické generalizace a navrhuje úpravy algoritmů pro lepší výkon v komplexních scénářích.

**Klíčová slova:** generalizace liniových prvků, energetické modely, Partial Modification, kartografická generalizace, GIS.

## Abstract

This thesis addresses the problem of line feature generalization in cartography using the Partial Modification operator. The aim was to apply the operator to real ZTM10 data and compare two calculation models, Snakes and New Splines. The study focuses on evaluating the effectiveness of these methods in various generalization scenarios, including analysing the impact of individual input parameters on the results.

Based on existing studies, three generalization scenarios were selected, and solutions were proposed using algorithms implemented in Python. Initially, the influence of individual input parameters of both models was analysed, and then the results of the models were compared. The comparison was performed using numerical metrics that assessed positional accuracy and shape preservation of the generalized lines.

The research demonstrated that the Snakes method achieves better results in more complex situations, whereas the New Splines method is characterized by faster computations but was found to be less effective in some cases. Both methods face issues with shape distortions of lines when multiple features are displaced simultaneously. Testing the influence of parameters confirmed that optimal settings are strongly dependent on specific data and situations, with no universal recommendations for parameter choices. The comparison of both models provides valuable insights for future research in cartographic generalization and suggests modifications to algorithms for improved performance in complex scenarios.

**Keywords:** line feature generalization, energy models, Partial Modification, cartographic generalization, GIS.

# Obsah

Seznam obrázků a tabulek .....	7
1 Úvod .....	10
2 Rešerše literatury .....	12
2.1 Přístupy ke generalizaci .....	12
2.1.1 Inkrementální algoritmy .....	12
2.1.2 Optimalizační algoritmy .....	13
2.1.3 AI/ML generalizace .....	16
2.2 Model Snakes .....	17
2.2.1 Další implementace popsané v literatuře .....	18
3 Kartografická generalizace .....	20
3.1 Kartografická generalizace .....	20
3.1.1 Faktory kartografické generalizace .....	20
3.1.2 Metody kartografické generalizace .....	22
3.2 Grafické kolize mezi objekty v mapě .....	22
3.2.1 Minimální vzdálenost mezi objekty .....	24
3.3 Generalizační operátory .....	26
4 Operátor Partial Modification .....	29
4.1 Popis operátoru Partial Modification .....	29
4.1.1 Výhody a nevýhody operátoru Partial Modification .....	29
4.2 Kartografická pravidla .....	31
4.3 Generalizační situace řešené s využitím operátoru Partial Modification .....	35
4.3.1 Priorita kartografických prvků .....	36
4.3.2 Generalizační schémata .....	37
5 Strategie Partial Modification .....	41
5.1 Snakes .....	41
5.1.1 Vnitřní energie .....	42



5.1.2	Vnější energie .....	42
5.1.3	Diskrétní řešení .....	44
5.2	New Splines .....	45
5.2.1	Vnitřní energie .....	46
5.2.2	Vnější energie .....	47
5.3	Hodnocení kartografické generalizace .....	48
5.3.1	Metriky pro hodnocení polohové přesnosti .....	49
5.3.2	Metriky pro hodnocení tvarové podobnosti .....	50
5.3.3	Metriky pro hodnocení hladkosti .....	51
6	Implementace .....	52
6.1	Hardwarová a softwarová konfigurace .....	52
6.2	Implementace Snakes .....	52
6.2.1	Algoritmus Snakes .....	53
6.3	Implementace New Splines .....	56
6.3.1	Algoritmus New Splines .....	57
6.4	Volba a testování parametrů .....	60
6.5	Výpočet metrik a hodnocení vlivu parametrů .....	61
7	Přehled výsledků .....	63
7.1	Data .....	63
7.1.1	Předzpracování dat .....	63
7.1.2	Generalizovaná situace 1 .....	63
7.1.3	Generalizovaná situace 2 .....	64
7.1.4	Generalizovaná situace 3 .....	65
7.2	Výsledky .....	66
7.2.1	Vliv parametrů – metoda Snakes .....	66
7.2.2	Vliv parametrů – New Splines .....	72
7.2.3	Porovnání a vyhodnocení metod .....	78

8	Diskuse .....	86
9	Závěr .....	89
	Seznam literatury .....	90

## Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 3-1 Grafické konflikty při zmenšení měřítka mapy. (a) výchozí stav, (b)stav po změně měřítka, (c) výsledný stav Zdroj: Ware a Jones (1998).....	24
Obrázek 3-2 Grafické konflikty při změně symbolů. (a)výchozí symptologie, (b) změněná symptologie vytvářející kolizi. Zdroj: Bader (2001).....	24
Obrázek 3-3 Příklady generalizačních operátorů Zdroj: Li (2006) .....	28
Obrázek 4-1 Displacement (nahore) a Partial Modification (dole) .....	30
Obrázek 4-2 P1: odstranění konfliktů. Vlevo situace před odsunem, vpravo situace po odsunu.....	32
Obrázek 4-3 P2: zachování tvaru generalizovaného prvku, a) modifikace prvku bez pravidla P2, b) modifikace prvku v souladu s pravidlem P2.....	32
Obrázek 4-4 P3: zachování polohové přesnosti generalizovaného prvku, a) modifikace bez pravidla P3, b) modifikace v souladu s pravidlem P3.....	33
Obrázek 4-5 P4: přirozená změna tvaru generalizovaného prvku. a) modifikace bez pravidla P4, b) modifikace v souladu s pravidlem P4. ....	34
Obrázek 4-6 P5: zajištění topologické návaznosti generalizovaných prvků. a) modifikace bez pravidla P5, b) modifikace v souladu s pravidlem P5.....	35
Obrázek 4-7 Částečná modifikace jednoho prvku v reálné situaci Zdroj: <a href="https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/">https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/</a> .....	38
Obrázek 4-8 Částečná modifikace dvou prvků v reálné situaci Zdroj: <a href="https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/">https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/</a> .....	39
Obrázek 4-9 Vzájemný odsun více prvků v reálné situaci Zdroj: <a href="https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/">https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/</a> .....	40
Obrázek 5-1 Vzájemný vliv linií ( $L_i$ generalizovaná line, $L_j$ linie generující sílu, $P_i$ bod zájmu Zdroj: (Burghardt a Meier 1997) editováno.....	43
Obrázek 5-2 Housdorff distance. Čárkované čáry vizualizují Housdorff distance, zelená čára množinu X a modrá množinu Y. Zdroj: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Hausdorff_distance">https://en.wikipedia.org/wiki/Hausdorff_distance</a> .....	50
Obrázek 5-3 $\Theta$ značí hodnotu Turning function v daném segmentu s. Zdroj: Volotao et al. 2010 .....	51
Obrázek 7-7-1 Situace 1 - přiblížený pohled (vlevo), pohled v měřítku 1:10 000 (vpravo). Zdroj: <a href="https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/">https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/</a> .....	64

Obrázek 7-2 Situace 2 - přiblížený pohled (nahore), pohled v měřítku 1:10 000 (dole). Zdroj: <a href="https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/">https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/</a> .....	65
Obrázek 7-3 Situace 3 - přiblížený pohled (vlevo), pohled v měřítku 1:10 000 (vpravo). Zdroj: <a href="https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/">https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/</a> .....	66
Obrázek 7-4 Vliv parametru $\alpha$ na jednotlivé metriky .....	68
Obrázek 7-5 Vliv parametru $\alpha$ na počet iterací.....	68
Obrázek 7-6 Vliv parametru $\beta$ na jednotlivé metriky .....	69
Obrázek 7-7 Vliv parametru $\beta$ na počet iterací.....	70
Obrázek 7-8 Vliv parametru $\gamma$ na jednotlivé metriky .....	71
Obrázek 7-9 Vliv parametru $\gamma$ na počet iterací .....	72
Obrázek 7-10 Grafy vliv parametru $\lambda_1$ na jednotlivé metriky .....	73
Obrázek 7-11 Vliv parametru $\lambda_2$ . .....	74
Obrázek 7-12 Vliv parametru $\lambda_3$ . .....	75
Obrázek 7-13 Vliv parametru $\lambda_4$ . .....	76
Obrázek 7-14 Vliv parametru $\lambda_4$ s vybranými daty. ....	77
Obrázek 7-15 Vliv parametru $\lambda_5$ . .....	78
Obrázek 7-16 Situace 1 – Snakes (1 : 10 000).....	80
Obrázek 7-17 Situace 1 - New Splines (1: 10 000) .....	81
Obrázek 7-18 Situace 2 - Nahoře: původní stav, New Splines, Snakes (1:10 000). Dole přiblížené situace New Splines a Snakes. ....	83
Obrázek 7-19 Situace 3. Nahoře: původní stav, New Splines, Snakes (1:10 000). Dole přiblížené situace New Splines a Snakes. ....	85
Tabulka 7-1 Výběr výsledků pro Snakes – situace 1. ....	79
Tabulka 7-2 Výběr výsledků pro New Splines – situace 1 .....	79
Tabulka 7-3 Výběr výsledků pro Snakes – situace 2. 1. line je železnice, 2. komunikace. .....	82
Tabulka 7-4 Výběr výsledků pro New Splines – situace 2. 1. line je železnice, 2. komunikace.....	82
Tabulka 7-5 Výběr výsledků pro Snakes – situace 3. 1. line je železnice, 2. komunikace. .....	84
Tabulka 7-6 Výběr výsledků pro New Splines – situace 3. 1. line je železnice, 2. komunikace.....	84



# 1 Úvod

Kartografická generalizace je klíčovým procesem při tvorbě map. Tento proces umožňuje zjednodušení geografických informací pro zajištění lepší čitelnosti a použitelnosti. S nárůstem množství podrobných dat se požadavek na efektivní a kartograficky korektní generalizaci zvyšuje. Za tímto účelem jsou vyvíjeny automatické generalizační algoritmy, které aplikují jednotlivé generalizační operátory a schémata. Tato automatizace má tři hlavní cíle: zrychlit generalizační proces, zvýšit jeho přesnost a odstranit subjektivní vnímání autora generalizace.

V současné době existuje několik metod pro provádění tohoto procesu. Každý proces je aplikován na různé typy dat. Tato práce se zabývá generalizací souběžných liniových prvků, u kterých dochází ke grafické kolizi. Tyto kolize jsou řešeny za pomoci operátoru Partial Modification. Konkrétně jsou zde porovnávány dva generalizační modely, které využívají energetických splinů a minimalizace jejich celkové energie. Jedná se o model Snakes v jeho upravené verzi (Bader 2001) a o model založen na DEMS (Discrete Energy Minimizing Spline) (Bayer et al. 2024), který je v práci nazýván New Splines.

Motivací tedy byl fakt, že déle existující metoda Snakes nemá příliš popsáné vlivy jednotlivých vstupních parametrů na výsledky při jejím použití na reálná kartografická data. Další motivací bylo to, že více známá metoda Snakes je výpočetně a časově náročná. Tím pádem není vhodná pro velké datové sady a je zapotřebí hledat lepší a efektivnější přístupy k automatické generalizaci. Jedním z takových řešení by mohl být model New Splines. Hlavním úkolem této práce je analyzovat parametry obou modelů a zjistit, jaký vliv mají na výsledky generalizace při jejich použití na reálné kolize souběžných linií. Dále dalším úkolem bylo posoudit to, zda jsou obě metody srovnatelné kvalitativně. Toto srovnání probíhalo za využití různých hodnotících metrik, aby byl výsledek zproštěn subjektivního vlivu.

Práce je členěna do 9 kapitol. V teoretické části práce jsou popsány základní přístupy k automatické generalizaci a jejich členění. Dále je zde popsán vývoj a využití modelu Snakes pro generalizace liniových i jiných objektů v kartografii. Ve třetí kapitole práce je popsána kartografická generalizace a společně s ní jednotlivé generalizační operátory a schémata využívána pro úpravu liniových prvků. Operátoru Partial Modification je zde věnována samostatná kapitola. V ní je popsán zmíněný operátor, jednotlivá kartografická pravidla, které musí výsledky splňovat, a jednotlivé reálné situace, na které může být

operátor partial Modification použit. V poslední kapitole teoretické části jsou popsány jednotlivé strategie a modely Snakes a New Splines. V rámci této kapitoly jsou také popsány hodnotící metriky. V implementační části jsou poté popsány metody implementace obou modelů a jejich hodnocení. V další kapitole jsou popsány jednotlivé výsledky metod. V této části jsou také popsána data, která byla využita pro dosažení výsledků. V diskusní části jsou poté rozebírány výsledky obou metod. Výsledky jsou poté porovnávány s jinými pracemi a jsou zde diskutována možná vylepšení implementace obou modelů.

## 2 Rešerše literatury

V této kapitole je probrán vývoj automatizace kartografické generalizace. V kapitole 2.1 Přístupy ke generalizaci jsou popsány jednotlivé přístupy k tomuto problému. Důraz je zde kladen hlavně na sekvenční a optimalizační přístup. U optimalizačního přístupu jsou popsány zásadní metody, které jsou převážně založené na energetických modelech. Elastic Beams a model Snakes, kterým se podrobněji zabývá podkapitola 2.2.

### 2.1 Přístupy ke generalizaci

V moderní kartografii je snaha generalizaci co nejvíce automatizovat. Za účelem automatizace se vyvinuly dvě základní strategie ke generalizaci, a to rule-based přístup a AI/ML přístup. Do první kategorie spadají metody, které se snaží simulovat chování kartografa a napodobit kartografická pravidla. Do druhé skupiny patří metody, které se snaží kartografická pravidla odvodit samostatně, a to s využitím statistických modelů na bázi AI/ML. Tyto strategie lze následně dělit do skupin algoritmy se sekvenčním a s optimalizačním přístupem (Wang et al. 2017). Samotné toto dělení není jednoznačné a například optimalizační algoritmus může využívat sekvenční strategie.

Kartografická generalizace se řadí mezi NP problémy. Nelze je tedy řešit exaktně a je nutné hledat různé strategie řešení.

#### 2.1.1 Inkrementální algoritmy

Inkrementální algoritmy, někdy také nazývané sekvenční, se vyznačují tím, že pracují s jednotlivými objekty postupně. Nehledají tedy nějaké globální řešení, ale vždy řeší problematiku odsunu jen u jednoho objektu vůči ostatním (Wang et al. 2017). Mezi první sekvenční algoritmy pro odsun objektů patří přístup, který představil Lichtner (1979). Tento algoritmus je zaměřen na liniové objekty a generalizuje je tím, že na každý vrchol polylinie aplikuje stejný vektor posunutí tak, aby byla zajištěna podmínka minimální vzdálenosti.

Z tohoto přístupu vychází se své práci Nickerson (1988). Ten tuto metodu ještě doplňuje o využití bufferu k detekci konfliktních situací a využívá triangle filtr pro zjemnění odsunů.

Wei et al. (2018) ve svém článku uvádí další významné práce zabývající se sekvenčními algoritmy pro generalizace. Mezi stěžejní patří například vytvoření komplexního



algoritmu pro postupný odsun budov měnících se v různých určitých situacích (Ruas 1998). Odsun celých bloků budov v závislosti na úhlu svírajícího s okolními komunikacemi poté představili v článku Wu et al. (2010).

Další využití inkrementálního přístupu pro generalizaci je například práce od Xiuqin et al. (2012). Autoři se zde zaměřují na postupné odsuny budov pomocí silového pole. Algoritmus byl poté vylepšen a doplněn prací Sun et al. (2016), kde se autoři zaměřují i na orientaci a vyrovnání jednotlivých budov.

Wei et al. (2018) sami navrhli sekvenční algoritmus využívající vektorové pole. Toto pole je založeno na pravděpodobnosti konfliktu a odsunu. Některé prvky mají velkou pravděpodobnost konfliktu, pokud se nacházejí blízko sebe. Pravděpodobnost odsunu je pak založena na typu jednotlivých objektů. Jednotlivé konflikty se pak řeší postupně, každý různým generalizačním operátorem. Autoři uvádějí, že metoda je schopna většinu situací vyhodnotit spolehlivě, ale například operátor Agregace polygonů není schopen vyřešit komplexnější situace. Také upozorňují na o absenci některých podmínek, které by bylo potřeba doplnit pro lepší výsledky.

### **2.1.2 Optimalizační algoritmy**

Optimalizační algoritmy (někdy také nazývané globální) pracují s celým modelem a se všemi objekty v něm. Tím se liší od jednodušších sekvenčních algoritmů. Jejich hlavní výhoda spočívá v tom, že při práci se všemi objekty je lépe patrný celkový kontext generalizované situace. Nevýhodou je komplikovanější řešení vzájemných konfliktů mezi prvky.

Samotné globální algoritmy se poté dělí do dvou základních skupin:

- algoritmy využívající kombinatoriku,
- algoritmy využívající energetické modely.

#### **Algoritmy využívající kombinatoriku**

Tyto algoritmy sice pracují s celým modelem naráz, avšak nevyužívají k nalezení optimalizaci. U těchto metod jsou nejprve získána teoretická místa, kam se mohou jednotlivé objekty posunout. Následně je za pomoci kombinatoriky testováno různé rozložení objektů na těchto teoretických místech, a nakonec je vybrána nejpriznivější kombinace. Nevýhoda těchto algoritmů je, že při změně počtu vstupních objektů se

dramaticky zvýší výpočetní čas (Wang et al. 2017). Mezi tyto algoritmy může být zařazeno například iterativní odstraňování konfliktů pomocí optimalizace Steepest descent, kde je hledáno minimum ve směru gradientu (Ware a Jones 1998).

Další práce Ware et al. (2002) zabývající se touto problematikou využívají například tzv. Tabu search metodu. Dále práce, kde je výsledek získán pomocí genetických algoritmů (Wilson et al. 2003; Sun et al. 2016b). Autoři zde navrhují přístup odstranění konfliktů vzniklých při změně měřítka mapy.

Algoritmus založený na kombinatorice také představil ve své práci Gottstein (2019) pro generalizaci budov za použití generalizačního operátoru typifikace. Autor zde určuje důležitost jednotlivých budov na základě kartografických pravidel (například struktura, plošná výměra, občanská důležitost nebo také okolních přilehlých objektech).

### **Algoritmy využívající energetické modely**

Algoritmy v této skupině jsou pro implementaci složitější než předchozí skupina s kombinatorickým přístupem. Jedná se o metody založené na modelech převzatých z fyzikálních oborů. Jejich základním principem je minimalizace celkové energie modelu. Objekty generují energii, vzájemně na sebe působí, cílem je nalezení rovnovážného stavu. Jednotlivé objekty nacházejí v silovém poli, které na ně působí, a tím je vytvářena energie, která je závislá na vzájemné poloze jednotlivých objektů. Toto pole si lze představit například jako magnetické pole (Wang et al. 2017).

Do této skupiny lze zařadit algoritmy, u kterých navržené komplexní fyzikální modely, jejich popis a řešení vedou ke složitému matematickému aparátu, který je obtížné řešit analyticky. Typickým příkladem jsou soustavy parciálních diferenciálních rovnic. Používají se proto numerické metody řešení, např. FEM (Finite Element Method).

Vyhodnocení fyzikálního modelu pomocí FEM je využito například v práci, která popisuje interaktivní odsun objektů při změně jejich velikosti tak, aby nedocházelo k překryvu (Højholt 2000). Tato metoda je založena na diskretizaci silového pole pomocí Delaunay triangulace na konečný počet podoblastí, nad kterými poté probíhají výpočty posunů samostatně. Prostorové vztahy mezi jednotlivými prvky nacházejícími se v tomto silovém poli jsou definovány pomocí funkcí, které reflektují vlastnosti materiálů. Těmito vlastnostmi jsou například tuhost a elasticita. Nevýhoda této metody spočívá hlavně

v nemožnosti určení některých parametrů jako jsou například přímost komunikace nebo pravoúhlost budov.

Dalším silovým modelem, který může být využit ke generalizaci se nazývá Elastic Beams. Tento fyzikální model využil pro generalizaci liniových prvku Bader (2001). Linie jsou v tomto modelu reprezentovány takzvanými paprsky (beams). Tyto paprsky si lze představit jako kovovou tyč s nenulovou délkou a šířkou. Tato metoda vychází z fyzikálních vlastností materiálů. Na jednotlivé paprsky lze aplikovat podélný a příčný tlak, přičemž příčný má za následek ohyb paprsku a podélný prodloužení či zkrácení paprsku. Autor zde uvádí, že tento model zajišťuje přirozenou deformaci linií. Nedochází k prudkým změnám tvaru a je co nejvíce zachován původní tvar objektu. Jako hlavní nevýhody autor uvádí náročnější implementaci a potřebu velkého množství iterací pro dosažení výsledků.

Bader et al. (2005) využívají modelu Elastic Beams k odsunům budov. Model doplňují o prostorové vazby mezi jednotlivými budovami a tím vytvářejí sítě budov. Tato síť je poté doformována na základě Elastic Beams, aby byly dosaženy výchozí podmínky a nescházelo ke konfliktům. Autoři tento model založený na Elastic Beams poté řeší pomocí FEM. Výhodou tohoto přístupu je, že jsou zachovány prostorové vazby mezi budovami. Jako nevýhoda je zde uveden fakt, že občas není prostor tyto vazby zachovat a je zapotřebí některé budovy například odstranit či sloučit.

Další práce zabývající se modelem Elastic Beams od autorů Liu et al. (2014) se snaží původní model doplnit o Delaunay triangulaci a to tak, že s pomocí trojúhelníkové sítě budou schopni detekovat místa, kde dochází ke kolizi objektů. Autoři zde uvádějí, že metodu doplnili o lepší odhad vstupních parametrů a že jejich přístup dokáže řešit více konfliktních situací.

Na druhou stranu autoři připouštějí, že metoda je velice závislá na tom, zda minimální vzdálenost mezi objekty koresponduje s maximální velikostí sil. Když tato podmínka není zajištěna, některé úseky mohou být posunuty příliš daleko, protože vnější síla je v nerovnováze s vnitřní energií některých objektů.

Do kategorie optimalizačních metod se řadí ještě metoda využívající nejmenších čtverců k odsouvání objektů a zjednodušování jejich tvarů (Sester 2005). Zde autorka využívá tuto optimalizaci k odsunu budov a silničních komunikací anebo k zjednodušování jejich tvarů. Odsunu je zde dosaženo tak, že jednotlivé podmínky jsou vyjádřeny lineárními

rovnícemi a poté je pomocí metody nejmenších čtverců nalezeno optimální řešení. Autorka uvádí, že tato metoda je schopna dobře provádět kontinuální odsun nebo deformaci objektů. Dále zde zmiňuje, že metoda není příliš vhodná pro změny větších měřítek, kde je zapotřebí výpočtu diskrétních změn objektů. V takových případech je vhodné využít jiných metod pro předzpracování dat.

Metodu nejmenších čtverců pak třeba využívá například Touya a Lokhat (2022) pro odsun linií, které představují svah podél břehů vodních toků od silničních komunikací. Autoři zde kombinují předchozí metodu (Sester 2005) s triangulací pro vyhledávání identifikování okolí, ve kterém se provádí odsun. Autoři také uvádějí, že tato metoda umí pracovat s komplexnějšími situacemi, ale již ji neporovnávají s jinými možnými přístupy ke generalizaci.

Nejdůležitější skupinou generalizačních metod založených na fyzikálních modelech představují Snakes, známé též jako model energetických splínů. Práce zabývající se využitím tohoto energetického modelu v kartografii jsou diskutovány samostatně v kapitole 2.2 pro lepší přehlednost.

### **2.1.3 AI/ML generalizace**

Na rozdíl od rule-based přístupu, který generalizuje dané situace pomocí generalizačních schémat skládajících se ze sekvence jednotlivých generalizačních operátorů, je přístup AI/ML méně intuitivní. Pravidla pro generalizaci nejsou skládána z operátorů a jejich parametrů, ale jsou získávána z trénovacích dat. Tento přístup zvolili například (Weibel et al. 1995) nebo (Sester 2000). U těchto prvních aplikací se jednalo spíše o nastínění možného využití machine learningu v oblasti generalizací.

Tento přístup poté využili Sester et al. (2018) pro generalizaci budov. Konkrétně se jednalo o odsun, zjednodušení, agregaci a typifikaci. Autoři zde uvádějí, že výsledky pro zjednodušení tvarů budov byly hlediska kvantitativního i vizuálního hodnocení dostačující. Jako nevýhodu uvádějí, že byl zanedbán charakter jednotlivých budov.

Courtial et al. (2020) aplikovali přístup AI/ML na vektorová data horských silnic. Autoři uvádějí, že se byli schopni získat uspokojivé výsledky pro vyhlazení linií, ale v oblasti displacementu zaostávají za rule-based generalizací. Výhodu však vidí v tom, že tyto metody lze použít pro komplexnější situace, kde nelze generalizační schéma pro rule-based přístup jednoduše parametrizovat.

Karsznia et al. (2024) využili AI/ML pro generalizaci pomocí operátoru výběru na mapy malých měřítek. Autoři zde uvádějí, že generalizace pomocí ML má velký potenciál v budoucnu a v porovnání s ostatními metodami, které nevyužívají IA/ML vycházejí srovnatelně nebo lépe.

## 2.2 Model Snakes

Energetický model Snakes navrhli a popsali Kass et al. (1987). V této práci autoři představili optimalizační metodu, která minimalizuje energii splinů. Tato metoda byla publikována za účelem využití v oblasti počítačové grafiky.

Původní model ovlivňoval výchozí tvar linií, proto byl model upraven autory (Radeva et al. 1995) tak, aby měl na výpočet vliv pouze rozdíl v poloze výchozího stavu vůči výslednému. Energie splinů je tedy vypočítávána z velikosti samotných změn tvarů a posunů, a ne z výchozího průběhu, kde by například zakroucené úseky měly tendenci se narovnávat. Tohle moc nechápu.

Tento energetický model poté přebírají Burghardt a Meier (1997) a aplikují ho pro účely kartografické generalizace. Autoři zde porovnávají Snakes s metodami využívajícími základní geometrické průměry souřadnic nebo například s metodou využívající spring tension model (Bobrich 1996).

Z tohoto energetického modelu vychází ve své práci Bader (2001) a využívá jej pro odstranění grafických konfliktů v topografických mapách při kartografické generalizaci. Autor zde uvádí, že model uvedený Burghardtem a Meierem (1997) se není schopen dostatečně adaptovat na různé problémy, které mohou při generalizaci nastat. Jedná se především problém s propagací linií v oblastech křížení nebo generalizace více linií současně. Bader (2001) upravuje několik částí v původním modelu, jako je například podmínka polohové přesnosti. Baderův upravený model je tedy přesnější a je schopen odstraňovat i konflikt více než 2 linií. Nevýhodou je však nemožnost přesného nastavení modelu pomocí parametrů, které by reflektovaly charakter linií. Další nevýhodou tohoto modelu je jeho výpočetní náročnost, protože k získání výsledků je zapotřebí velkého množství iterací, které dosahuje řádů stovek a mohou se přibližovat i k tisící. V této práci je také model Snakes porovnáván s metodou Elastic Beams. Model Snakes je dle autora lehčí na implementaci, avšak model Elastic Beams přináší větší flexibilitu a intuitivnější přístup. Hlavní rozdíly spočívají například v tom, že Snakes řeší problém odsunů zvláště

pro osy X a Y, zatímco u Elastic Beams není nutné dělit posun do těchto dvou směrů, a tím je tento model schopný zajistit lepší výsledky. Další rozdíl je například v nastavování vstupních parametrů. Podle Badera je u Snakes obtížnější nastavit správné parametry a jejich vliv na výsledek není tak zřejmý jako u Elastic Beams. Celkově dle autora jsou výsledky získané pomocí Elastic Beams lepší a věrohodnější, ale jestliže byla výpočetní náročnost u modelu Snakes vysoká, tak zde je ještě vyšší, protože každý prvek zde není popsán 3, ale 6 proměnnými.

Wang et al. (2017) kombinují partial modification pomocí modelu Snakes s multi-agent procesem. Každá skupina prvků představuje jednu kategorii agentů. Autoři zde rozdělují prvky na Map Agent, Object Agent, Conflicting Agent a Relationship Agent. Každý agent má pak v generalizaci svůj vlastní úkol. Jednotliví agenti spolupracují na dokončení procesu generalizace. Autoři uvádějí, že model Snakes není využit na všechna vstupní data, a proto je metodu zapotřebí doplnit i o jiné modely.

Využití tohoto modelu může pak být například odsun budov, kde je upraven algoritmus tak, aby pracoval se sítěmi polygonových prvků (Sun et al. 2016).

### **2.2.1 Další implementace popsané v literatuře**

Guilbert a Saux (2008) ve svém článku také využívají metodu Snakes. Tento model však kombinují i s operací vyhlazování linií (smoothing). Hlavní rozdíl v použití modelu Snakes oproti předchozím zmíněným pracím (Bader 2001; Burghardt a Meier 1997) je v tom, že zde bylo pracováno s více vstupními podmínkami generalizace. V předchozích publikacích je hlavní podmínkou minimální vzdálenost dvou linií. Guilbert a Saux pracují i s omezující podmínkou, jakým směrem lze posun linie provést. Této podmínky bylo využito při generalizaci hloubnic (izobat). Práce tedy ukazuje možnost rozšíření vstupních podmínek a kombinaci více generalizačních operátorů. Autoři zde také zmiňují, že při generalizaci hloubnic by bylo dobré pracovat i s topologickou informací a na jejím základě konstruovat silový model.

Generalizaci pomocí operátorů smoothing a displacement za využití modelu Snakes představil Burghardt (2005). Autor zde používá model Snakes ke shlazení linií. Jako výhody zmiňuje, že globální přístup ke shlazení linie zajišťuje její přirozený tvar. Další výhodou je pak právě snadná kombinace s operátorem partial modification. Rozdíl mezi těmito operátory při použití modelu Snakes leží v rozdílných použití vnitřní energie

splinu. Autor také poukazuje na nutnost správného nastavení vstupních parametrů, které je pro správnost výsledků zásadní.

Nakhmani a Tannenbaum (2012) doplňují model Snakes o možnost detekce míst, kde linie kříží sama sebe. Tato metoda je založena na Winding number, kde je za pomoci úhlů mezi jednotlivými segmenty linií odhaleno místo kolize.

Energetický model Snakes v upravené podobě je využit i v práci autorů Chen et al. (2016). Tato práce se nezaměřuje na řešení grafických konfliktů vzniklých při generalizaci, ale na zpracování LIDARových snímků a extrakci hran střech budov. K tomu využívá upraveného Snakes modelu. Hlavní úprava spočívá v modelu vnitřní a vnější energie. Jedna z úprav zahrnuje zjednodušování linií v závislosti na velikosti úhlů, který svírají jednotlivé segmenty linie, když je tento úhel překročen, je linie zjednodušena (bod je odstraněn). Zde prezentovaný přístup je zaměřen hlavně na upravování linií, aby odpovídaly tvaru střech budov. Výsledkem jsou převážně rovné linie svírající pravé úhly. Jednotlivé parametry však mohou být upraveny pro použití i v jiných případech, než jsou střechy, ale například velké zákruty komunikací či vodních toků.

Další využití modelu Snakes pro operátor smoothing je například práce Skopeliti et al. (2021) vytvořená za účelem zjednodušení hloubnic a pobřežnic tak, aby dopovídala jejich generalizace a přesnost okolním datům, která nebyla pořízena ve srovnatelné kvalitě.

Zjednodušení liniiových objektů získaných z 3D bodových mračen za pomoci Snakes modelu je publikováno autory Bayer et al. (2023).

Model Snakes nemusí být využíván jen ke kartografické generalizaci. Je možné ho například využít pro segmentaci obrazu (Pierre et al. 2021). Metoda zde pracuje podobně jako u generalizace. Opět je založena na minimalizaci celkové energie modelu. Rozdílem je zde, že síly zde nejsou vyvolávány blízkými objekty, ale jsou vyvolány gradientem obrazu. Síla působící na spliny není vyvolávána blízkými objekty, nýbrž gradientem v obrazu. Autoři metodu testují ve 2D i 3D. Metoda je efektivní pro segmentaci obrazu, kde je předem znám přibližný tvar. Také zde poukazují na zásadní vliv vstupních parametrů, které není lehké zvolit.

## 3 Kartografická generalizace

Tato kapitola se zabývá popisem a definicí základech pojmů z oblasti kartografické generalizace. V části 3.1 je vysvětlen samotný pojem generalizace, faktory, které ji ovlivňují a její základní metody. Kapitola 3.2 diskutuje případy kolize grafických objektů a zmiňuje situace, kdy je ke kartografické generalizaci nutno přistoupit. Dále v kapitole 3.3 jsou popsány základní generalizační operátory pro práci s liniovými prvky.

### 3.1 Kartografická generalizace

Hlavní funkcí mapy je věrně zobrazovat prvky reálného světa a vztahy mezi nimi. Protože by bylo nepraktické tyto prvky zobrazovat v měřítku 1:1, jsou tedy znázorňovány v mapách zmenšené.

Mapy využívají různá měřítka vyjádřená měřítkovým číslem  $M$ . Toto měřítkové číslo závisí na mnoha faktorech. Jedním z nich je účel mapy. Mapy malých měřítek slouží k znázornění velkých územních celků (světa, hemisféry, kontinenty), typické jsou pro atlasovou kartografii. Naopak mapy velkých měřítek se využívají pro zobrazování menších území, typickým příkladem jsou topografické či katastrální mapy.

Při zmenšení zobrazovací plochy však nastává problém, že ne všechny prvky, které se v zobrazované oblasti vyskytovaly, lze zobrazit tak, aby byly čitelné, a nedocházelo mezi nimi ke grafickým konfliktům. Tímto problémem se zabývá kartografická generalizace Veverky a Zimové (2008).

Existuje několik dalších definic kartografické generalizace, Například Mezinárodní kartografická asociace (ICA) definuje kartografickou generalizaci jako: výběr prvků a jejich zjednodušení v závislosti na měřítku, účelu mapy a dalších faktorech. Kartografická generalizace redukuje množství informací, které poskytuje mapa, tak aby byla zachována její podstata, a zároveň nedocházelo k zahlcení informacemi (International Cartographic Association 1973).

#### 3.1.1 Faktory kartografické generalizace

Míra kartografické generalizace je ovlivněna několika faktory. Mezi ně patří dle (Veverka a Zimová 2008):

- měřítko mapy,



- téma a účel mapy,
- geografická charakteristika zobrazovaného území,
- znakový klíč.

### **Měřítko mapy**

Jeden z hlavních faktorů ovlivňující kartografickou generalizaci. Zvětšení měřítka mapy má za násadek zmenšení zobrazovací plochy mapy a tím pádem i její obsahovou kapacitu. Tím pádem nelze v generalizované mapě zobrazit všechny původní objekty a musíme přistoupit k jejich řízené selekci.

### **Téma a účel mapy**

Tento faktor je úzce spojen s měřítkem mapy. Účel, za kterým je mapa tvořena, definuje specifický znakový klíč a měřítko mapy. Prvky, které jsou pro danou mapu méně podstatné lze generalizovat s větší mírou, a naopak prvky svázané s tématem mapy by měly být generalizovány co nejméně.

### **Geografická charakteristika zobrazovaného území**

Při generalizaci je potřeba ke každému území přistupovat individuálně. Zobrazovaná území mají rozdílnou charakteristiku, kterou je potřeba při generalizaci zachovat. Některé objekty jsou v geografickém kontextu významné a nelze je tedy generalizovat nebo je lze generalizovat méně, než kdyby se nacházely v jiném území.

### **Znakový klíč**

Poslední faktor opět vychází z měřítka a účelu mapy. Různé kartografické vyjadřovací prostředky mají odlišné nároky na grafickou zaplněnost mapy. Je tedy zapotřebí brát v potaz mapový klíč a případně jej uzpůsobit danému měřítku mapy a jejímu účelu.

V kartografii je proces generalizace mapového díla uplatňován v různých situacích. Typickým příkladem je výše zmíněná změna měřítka, a to jak při primárním sběru dat, tak při vytváření odvozené (tj. zpravidla méně podrobné) mapy v menším měřítku. Dalším důvodem pro generalizaci objektů v mapě je potlačení nedůležitých objektů z hlediska tématu mapy nebo lepší estetika mapy. Hlavním cílem generalizace je tedy vytvoření snadno čitelné a přehledné mapy (International Cartographic Association 1973).

### **3.1.2 Metody kartografické generalizace**

Metody kartografické generalizace lze rozdělit do dvou hlavních skupin – primární a sekundární (Shea 1988).

#### **Primární generalizace**

Primární generalizace nastává při samotném sběr/výběru dat, která se mají zobrazit v generalizované mapě. Data jsou volena na základě tématu mapy. Jiná data budou vybrána pro topografické mapy a jiná pro tematické mapy zaměřené na zobrazování nějakého konkrétního jevu.

#### **Sekundární generalizace**

Sekundární generalizace nastává převážně při změně měřítka generalizované mapy nebo při tvorbě odvozené tematické mapy. Při zmenšení měřítka dochází k zvětšení zobrazované oblasti a při převzetí všech prvků z původní mapy dochází k vzájemným konfliktům, které vedou k nečitelnosti mapy. Dále při zmenšení měřítka může nastat problém, že některé prvky, které byly dříve zobrazeny, jsou nyní příliš malé a stávají se také nečitelnými, popř. dochází ke grafickým kolizím. Při tvorbě odvozených tematických map je naopak žádoucí potlačení či zvýraznění některých jevů, a to opět vede k potřebě použití kartografické generalizace.

Tato diplomová práce se zabývá grafickými kolizemi liniových prvků a jejich odstraňováním. Samotným kolizím je věnována kapitola 3.2.

## **3.2 Grafické kolize mezi objekty v mapě**

Jak již bylo naznačeno v kapitole 3.1, při generalizačních operacích dochází ke grafickým konfliktům objektů v mapách. Při tomto procesu je zmenšena plocha mapového pole do měřítka cílové mapy, nebo velikost mapového pole zůstává stejná, ale při tvorbě odvozené mapy z více zdrojů může dojít ke zvětšení počtu zobrazovaných objektů. V obou případech je zmenšován prostor mezi jednotlivými symboly v generalizované mapě a tím pádem může docházet ke slévání jednotlivých objektů. Tento problém postihuje všechny typy objektů v mapě (Ware a Jones 1998).

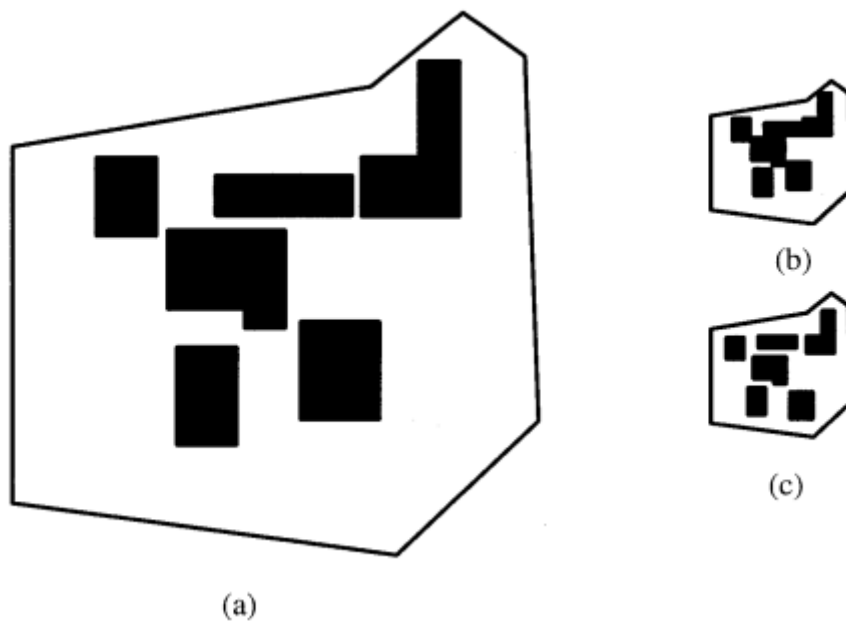
Huang et al. (2009) uvádějí další případy, kde ke grafickým kolizím může docházet. Celkem zmiňují tyto tři případy:

- zmenšení prostoru mezi objekty,  
Při zmenšení prostoru se se dostávají do grafické kolize kartografické znaky. V důsledku zmenšení vzdáleností mezi nimi dochází ke slévání jednotlivých objektů.
- zvětšení symbolů jednotlivých objektů,  
Zvětšení symbolů má za následek stejný problém. Původně menší symbol byl zobrazen korektně bez konfliktů, ale po jeho úpravě se sousední symboly mohou dostat do kolize.
- konflikt vyvolaný odsunem jiných objektů.  
Poslední zmiňovaná příčina nastává jako důsledek vzájemného odsunu jednotlivých objektů. Tato kolize vzniká jak důsledek předchozí generalizace, které mohla být provedena za účelem odstranění jiných konfliktů, ale jejím výsledkem jsou konflikty nové.

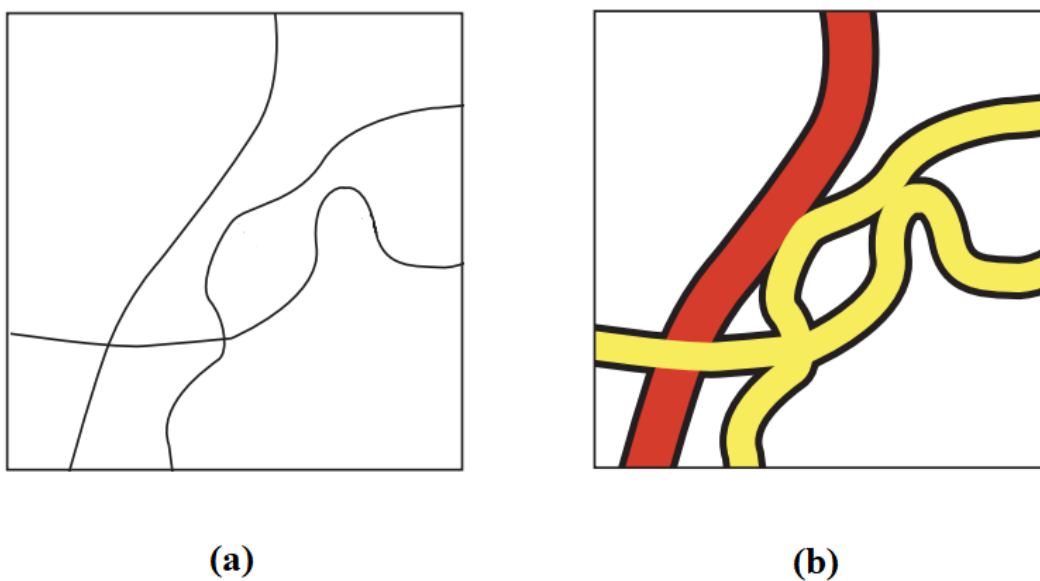
Mapa se ve všech výše uvedených případech stává obtížněji čitelná a je zapotřebí k odstranění těchto kolizí využít vhodného generalizačního operátoru. Tyto generalizační operátory budou podrobněji rozevírány v kapitole 3.3.

Na obrázku 3-1 je příklad situace, kde se dostávají do grafické kolize kartografické budovy. Jednotlivé budovy musejí být od sebe odsunuty tak, aby kolize byly odstraněny, a mapa byla čitelná. Zároveň je potřeba dbát na to, aby v důsledku této generalizační operace nevznikaly konflikty nové.

Druhý příklad grafické kolize, tentokrát mezi liniiovými prvky při resymbolizaci, je znázorněn na obrázku 3-2. I zde musí být zajištěno, aby nevznikaly nové kolize v důsledku posunu objektů.



Obrázek 3-1 Grafické konflikty při zmenšení měřítka mapy. (a) výchozí stav, (b) stav po změně měřítka, (c) výsledný stav  
Zdroj: Ware a Jones (1998).



Obrázek 3-2 Grafické konflikty při změně symbolů. (a) výchozí symptologie, (b) změněná symptologie vytvářející kolizi.  
Zdroj: Bader (2001).

### 3.2.1 Minimální vzdálenost mezi objekty

Ke grafické kolizi objektů dochází za situace, kdy minimální vzdálenost mezi prvky v mapě klesne pod určitou hranici. Tuto hranici, představující minimální vzdálenost mezi

objekty, lze definovat jako funkci měřítkového čísla mapy  $M$ . Dle Li (2006) by minimální vzdálenost dvou prvků v mapě měla být  $d_{min} = 2$  mm.

Z tohoto předpokladu lze určit minimální vzdálenost objektů  $D_{min}$  na zemském povrchu

$$D_{min} = d_{min}M, \quad (3-1)$$

kde  $M$  je měřítkové číslo mapy. Vztah lze přepsat do tvaru

$$D_{min} = \frac{2M}{1000}$$

což ve skutečnosti odpovídá minimální vzdálenosti prvků v metrech. Například pro mapy v měřítku 1 : 10 000, je ze vztahu 3-1 patrné, že minimální vzdálenost mezi jednotlivými prvky je 20 metrů v souřadnicovém systému mapy.

Tato vzdálenost však musí být ještě doplněna o šířku grafické reprezentace jednotlivých kartografických symbolů. Tato hodnota však může být u každého prvku jiná. Protože je těžké ji určit jednoznačně, je přidána jako samostatná proměnná pro každé dva mapové prvky

$$D_{min} = \frac{\left(2 + \frac{s_1}{2} + \frac{s_2}{2}\right)M}{1000}, \quad (3-2)$$

kde  $s_1$  a  $s_2$  reprezentují šířky liniových symbolů v mm použitých pro reprezentaci mapového prvku. K původní minimální vzdálenosti jsou  $d_{min}$  jsou přičteny ještě poloviny šířek symbolů, aby výsledná minimální vzdálenost mezi hranami objektů byla 2 mm.

Vztah 3-2 definuje vztah mezi měřítkem mapy a minimální vzdáleností. Tento vztah bude použit jako vstupní podmínka generalizace. Objekty, nebo jejich segmenty, které budou k sobě blíže než  $D_{min}$ , splňující podmínku

$$D < D_{min},$$

budou následně generalizovány. Podrobněji je parametr  $D_{min}$ , rozebírán v kapitole 5.

Toto pravidlo je dle Li (2006) aplikovatelné pro bodové, liniové a plošné kartografické znaky. V této práci je využíváno především pro stanovení minimální vzdálenosti mezi dvěma liniovými kartografickými znaky. Rozhoduje o tom, zda bude či nebude přistoupeno ke kartografické generalizaci. Generalizace je poté provedena za pomoci

generalizačních operátorů. Operátory aplikovatelné na liniové prvky jsou popsány v následující kapitole 3.3.

### 3.3 Generalizační operátory

Pro odstranění grafických konfliktů jsou navrženy generalizační operátory a generalizační schémata (Regnauld a McMaster 2007).

**Generalizační operátor.** GO realizuje elementární operaci při úpravě mapy. Tyto operátory jsou abstraktní popis úprav prvků v mapě. Samostatná generalizace je poté prováděna za pomoci generalizačního schématu.

**Generalizační schéma.** GS sdružuje několik GO. Je to tedy sekvence po sobě jdoucích generalizačních operátorů.

Jednotlivé GO lze klasifikovat do několika jednotlivých kategorií různými způsoby dle různých kritérií. Mezi jeden například patří způsob představený (McMaster a Monmonier 1989), kde klasifikují jednotlivé operátory dle generalizovaných dat na rastrové a vektorové. Dále je možné tyto operátory klasifikovat dle jejich funkcionality.

Jako první GO takto klasifikovali McMaster a Shea (1992). Zde jsou generalizační operátory rozděleny do 12 kategorií: simplification (zjednodušení tvaru), smoothing (vyhlazení), aggregation (agregace), amalgamation (sloučení), merging (spojení), collapse (prostorová redukce), refinement (zjemnění), exaggeration (zvětšení), enhancement (zvýraznění), displacement (přemístění), classification (klasifikace) a symbolisation (symbolizace). Robinson et al. (1995) ve své publikaci uvádějí ještě operátor typification (typizace). Tyner (2010) ve své knize například používá podobné rozdělení, ale zmenšil jej jen na 8 skupin.

Li (2006) uvádí tyto generalizační operátory, které se vztahují k liniovým prvkům:

- elimination (odstranění)
- points reduction (redukce bodů),
- smoothing (vyhlazení),
- typification (typizace),
- displacement (odsun),
- modification (modifikace),
- partial modification (částečná změna tvaru).

Níže jsou jednotlivé tyto vybrané operátory stručně popsány. Detailnější popis lze nalézt v samotné publikaci od Li (2006).

**Elimination:** Odstranění generalizovaných prvků z mapy. Může se jednat o prvky s malým rozměrem, nebo objekty se zanedbatelným významem vzhledem k účelu mapy.

**Points Reduction:** Zmenšení počtu lomových bodů, kterými je generalizovaný prvek definován. Body jsou odstraňovány tak, aby byl zachován tvar či křivost původního prvku.

**Smoothing:** Jedná se o vyhlazení tvaru lomené čáry. V praxi lze realizovat několika způsoby. Prvním z nich je filtrace, odstraňuje malé detaily linie a tím je zajištěna hladkost. Druhý způsob využívá aproximační/interpolační křivky (popř. jejich diskrétní aproximace), při kterém se původní polylinie nahradí hladkou křivkou. Dále např. e-rolling, využívající vyhlazování linie za pomoci kružnice.












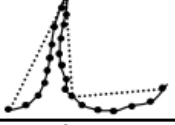


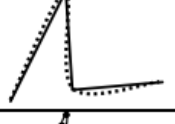






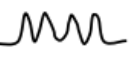

**Typification:** U liniových prvků je definován tento operátor jako zjednodušení skupiny liniových prvků takovým způsobem, aby byl tvar, který skupina tvoří zjednodušen, ale stále byly zachovány jejich typické tvarové rysy, které mají přednost před geometrickou přesností. U liniových prvků tento operátor není často používán.

**Displacement:** Jedná se o posunutí jednotlivých generalizovaných prvků tak, aby nedocházelo k jejich vzájemnému grafickému konfliktu. Není měněna geometrie objektu, avšak jen jeho poloha. Všechny lomové body prvku, jsou tedy posunuty ve stejném směru o stejnou vzdálenost. U tohoto operátoru mohou vznikat nové kolize s okolními prvky mapy, zvláště v místech s vysokým grafickým zaplněním mapy, popř. u rozsáhlých objektů.

**Partial Modification:** Tento operátor kombinuje operátory Displacement a Modification. Představuje tedy částečnou modifikaci tvaru prvku kombinovanou s odsunem některých segmentů prvku. Jednotlivé linie jsou modifikovány v místech, kde dochází k jejímu odsunu. Je efektivnější než displacement, protože odsun a modifikace linie je aplikována jen v oblastech, kde dochází ke kolizím.

Tato práce se zabývá generalizací právě pomocí operátoru Partial Modification, a proto je důkladněji popsán v kapitole 4

Jednotlivé příklady těchto generalizačních operátorů jsou pro liniové prvky znázorněny na obrázku 3-3.

Operátor		Velké měřítko	Střední	Malé měřítko
Displacement				
Elimination				
(Scale-driven) generalisation				
Partial modification				
Point reduction				
Smoothing	Curve fitting			
	Filtering			
Typification				

Obrázek 3-3 Příklady generalizačních operátorů  
Zdroj: Li (2006)

Tato diplomová práce se zabývá generalizací z využití operátoru Partial Modification. Z tohoto důvodu je tomuto operátoru věnována nadcházející kapitola 4.



## 4 Operátor Partial Modification

Tato kapitola popisuje operátor Partial Modification, kterým se diplomová práce zabývá. Jsou zde diskutovány jeho vlastnosti, výhody či nevýhody oproti operátoru Displacement (posun). Dále jsou zde uvedena tři základní schémata, které mohou být řešena vzájemným odsunem liniových prvků.

### 4.1 Popis operátoru Partial Modification

Operátor Partial Modification (PM) je rozšířením operátoru Displacement. Představuje kombinaci posunu prvku (Displacement) a změny tvaru prvku (Modification). Zachovává tvar generalizovaného prvku v místech, kde nedochází ke grafickým konfliktům s ostatními prvky v mapě. Tvar prvku je upraven za pomoci odsunu některých jeho segmentů, které je prováděno různými směry. Zásadní odlišnost spočívá v tom, že se operátor neaplikuje na celý generalizovaný objekt, ale jen na část, která se dostává do konfliktu se svým okolím (Bader 2001).

Výhoda oproti odsunu je fakt, že všechny segmenty generalizovaného prvku nejsou odsouvány stejným směrem, a je tedy snazší zamezit případným nově vzniklým grafickým konfliktům.

Posunutí je definováno za pomoci vektorů posunu, který je ve všech vrcholech stejný. U PM může mít každý vektor rozdílný vektor posunu, a to jak ve smyslu velikosti, tak i jeho a orientace. V některých vrcholech mohou být tyto vektory nulové a tím pádem zde nedochází k žádnému posunu.

Operátor PM je aplikovatelný převážně na liniové a plošné kartografické znaky, v GIS terminologii reprezentované polyliniemi a polygony. U liniových kartografických znaků dochází v důsledku modifikace ke změně úhlů mezi jednotlivými segmenty. Tvar polylinií je modifikován lokálně, ale nemusí tomu tak být v celém průběhu. Některé definiční body polylinie mohou zůstat nezměněny (Li 2006). U plošných kartografických znaků dochází také ke změnám úhlů mezi jednotlivými segmenty, zpravidla také požadujeme, aby zůstala zachovaná velikost jejich plochy (Li 2006).

#### 4.1.1 Výhody a nevýhody operátoru Partial Modification

Popišme stručně výhody operátoru PM:

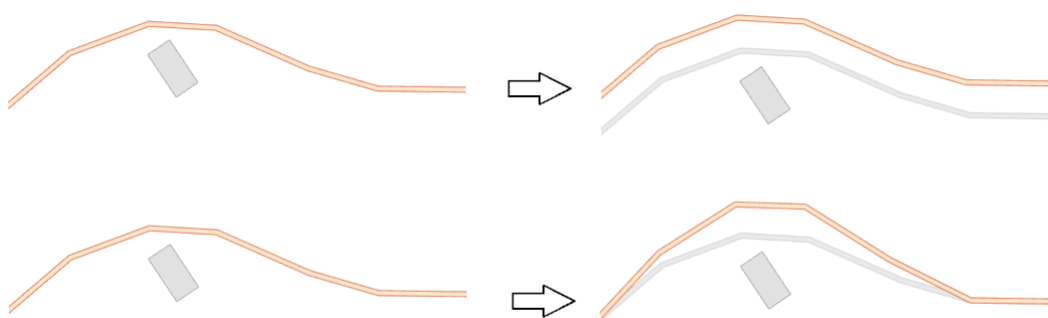
- Oproti klasickému odsunu je modifikován tvar generalizovaného prvku jen v úsecích, kde dochází ke kolizím. Lokální polohová prvku přesnost se v těchto místech zhoršuje, avšak v ostatních, s výjimkou propagovaných míst, se nemění.
- U odsunu celé polylinie může dojít ke vzniku konfliktů s okolními prvky, a to zvláště u liniových segmentů (komunikace, vodstvo, železnice). U PM je lépe kontrolován případný vznik nových kolizí, modifikují se pouze segmenty, které jsou v konfliktu s okolními prvky.

Uvedme také nevýhody operátoru PM:

- S ohledem na odsun jen určitých segmentů dochází ke zkreslení tvaru generalizovaného prvku a může docházet k nepřírozeným změnám tvaru.
- Nutnost zavedení propagačního pravidla.
- Výpočet jednotlivých posunů je náročnější než u operátoru Displacement.

Partial Modification je ve srovnání s operátorem displacement komplexnější. Může být aplikován jen v některých místech, pracuje se všemi okolními prvky a tím zamezuje vzniku nových kolizí, změny tvaru linie jsou omezeny minimalizovány v rámci kritických úseků linie.(Bader 2001).

Generalizační operátor PM musí splňovat základní kartografická pravidla, která jsou popsána v kapitole 4.2.



Obrázek 4-1 Displacement (nahore) a Partial Modification (dole)

Na obrázku 4-1 je ukázán příklad obou generalizačních operátorů. Je zde posouván prvek reprezentující komunikaci vůči prvku reprezentujícímu budovu. U operátoru Displacement, je komunikace posunuta v celé své délce, a to o stejně velkou vzdálenost

a stejným směrem. U operátoru Partial Modification je komunikace posunuta jen v některých částech, a to o rozdílnou vzdálenost.

## 4.2 Kartografická pravidla

Samotný proces generalizace je řízen kartografickými pravidly. Pomocí těchto pravidel jsou definovány jednotlivé parametry generalizačních operátorů a tím je ovlivňován výsledek tak, aby dodržoval kartografické zásady. Pravidla omezují prostor, na kterém se generalizace odehrává, velikost změn jednotlivých jevů a nebo například definují vztahy mezi jednotlivými objekty v mapě (Weibel a Dutton 1998).

Výsledky získané operátorem PM musí splňovat níže uvedená kartografická pravidla. Pravidla se mohou lehce lišit na základě typu objektů a konkrétních řešených generalizačních situací. Z několika zdrojů (Bader 2001; Swiss Society of Cartography 2005; Liu et al. 2014) byla vybrána nejdůležitější pravidla vztažená k tomuto operátoru:

- P1: odstranění grafických konfliktů,
- P2: zachování tvaru generalizovaného prvku,
- P3: zachování polohové přesnosti generalizovaného prvku,
- P4: přirozená změna tvaru prvku (propagace),
- P5: topologická konzistence (zajištění návaznosti).

### **P1: Odstranění konfliktů**

Tento požadavek vychází z předpokladu dodržení minimální vzdálenosti  $d_{\min}$  mezi dvěma generalizovanými prvky v mapě. Jak bylo uvedeno výše, jednotlivé vrcholy generalizovaných prvků jsou od sebe postupně odsouvány, dokud je jejich vzdálenost ve všech odpovídajících vrcholech větší než  $d_{\min}$ . Minimální vzdálenost je definována v kapitole 3.2.1. Je však nutné se vyhnout nově vzniklým kolizím, způsobeným odsunem prvku do blízkosti jiného okolního prvku.

Toto pravidlo je znázorněno na obrázku 4-2. Modrá linie představující například vodní tok je zde v grafickém konfliktu s černou linií představující například komunikaci, jejich vzdálenost je menší než  $d_{\min}$ . Aby nedocházelo k novým grafickým kolizím generalizovaného prvku, při jeho odsunu je zapotřebí brát v potaz i okolní prvky v mapě, v tomto případě budovu.

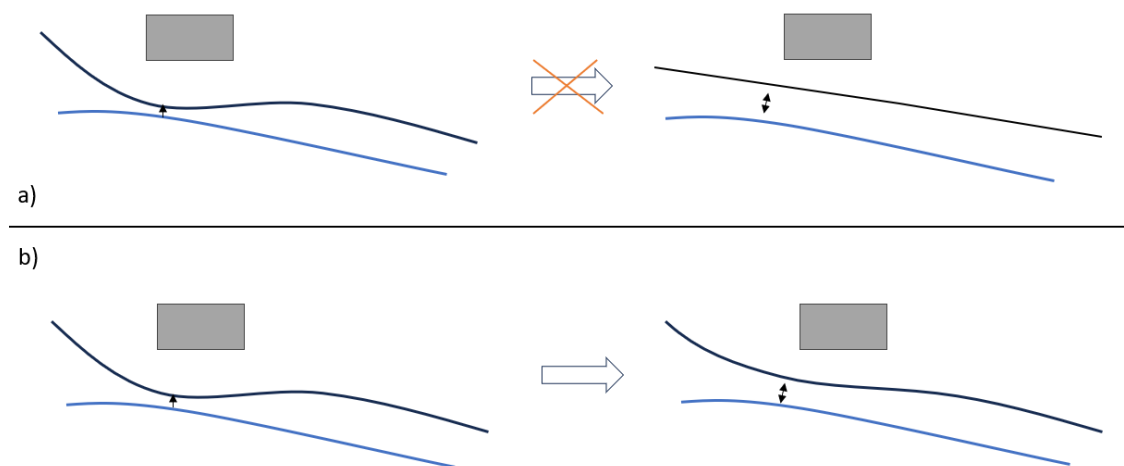


Obrázek 4-2 P1: odstranění konfliktů. Vlevo situace před odsunem, vpravo situace po odsunu.

## P2: Zachování tvaru

Tento požadavek ovlivňuje modifikaci tvaru prvku v rámci generalizační operace. Výsledný prvek by měl respektovat tvar původního prvku. Nemělo by docházet k jeho zakřivení v místech, které byly původně rovné, a naopak. Měla by být také zachována tvarově specifická místa prvku. V některých situacích však může docházet ke konfliktům s ostatními pravidly a nemusí být vždy možné tento požadavek dodržet.

Toto pravidlo je znázorněno na obrázku 4-3 ilustrující dvě varianty odsunu segmentů v místě grafického konfliktu. Obrázek a) znázorňuje modifikaci prvku bez zohlednění pravidla P2. Černá linie je zde modifikována bez ohledu na její původní tvar a dochází k narovnání zakřiveného úseku. Obrázek b) naznačuje odsun prvku v souladu s pravidlem P2, nedochází tak k nepřírozené změně tvaru prvku.

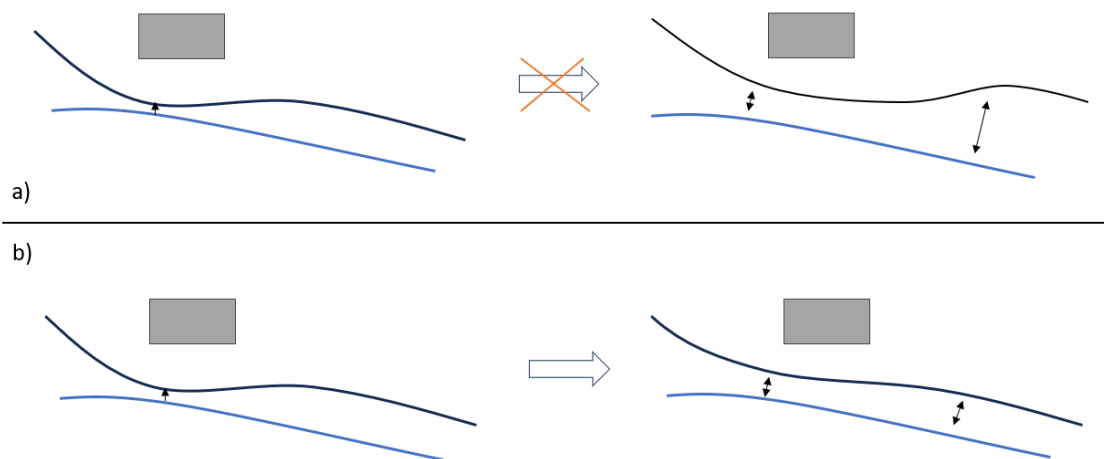


Obrázek 4-3 P2: zachování tvaru generalizovaného prvku, a) modifikace prvku bez pravidla P2, b) modifikace prvku v souladu s pravidlem P2.

## P3: Zachování polohové přesnosti

Tato podmínka navazuje na předchozí pravidlo s cílem minimalizovat polohové odchylky mezi původním a generalizovaným prvkem. V místech, kde nedochází ke grafickému konfliktu, by poloha měla být zachována, a nemělo by zde, s výjimkou propagace (následující pravidlo P4), docházet k žádným posunům nebo tvarovým změnám. V místech, kde k těmto konfliktům dochází, by měl být případný posun volen tak, aby byla zachována co největší polohová přesnost původních objektů, a nedocházelo k příliš velkým změnám v jejich poloze.

Na obrázku 4-4 jsou znázorněny dva odsuny. Modifikace a) probíhá bez pravidla P3 a linie je modifikována i v místech, kde nedocházelo k žádnému konfliktu. Modifikace b) již probíhá s aplikovaným pravidlem P3 a linie je modifikována jen v místech konfliktu.

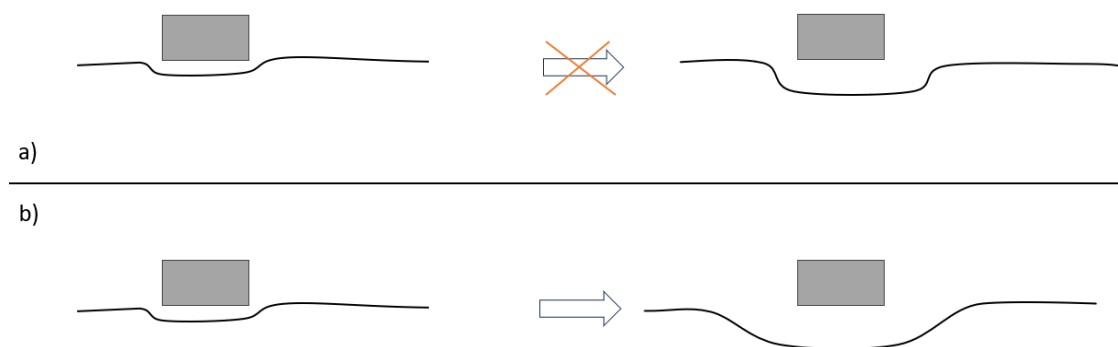


Obrázek 4-4 P3: zachování polohové přesnosti generalizovaného prvku, a) modifikace bez pravidla P3, b) modifikace v souladu s pravidlem P3.

#### **P4: Přírozená změna tvaru (propagace)**

Přírozená změna tvaru generalizovaného prvku neboli propagace je podmínkou, která zajišťuje, aby při generalizaci nenastávaly příliš rychlé změny tvaru prvku. Změna tvaru by měla nastávat pomalu a na delším úseku. Jinak řečeno, jedná se o plynulou změnu křivosti mezi generalizovanou a nengeneralizovanou částí prvku. Příkladem je umístění přechodnic do kolejí v místech, kde na přímý úsek navazují oblouky. Na linii poté nevznikají nepřirozené zlomy a tvar generalizovaného prvku respektuje originál. Toto pravidlo se často dostává do konfliktu s P3, je tedy zapotřebí nalézt kompromis mezi oběma požadavky.

Obrázek 4-5 ilustruje princip propagace při generalizaci liniového kartografického znaku. Pokud není průběh polylinie přirozený a plynulý, a dochází zde k náhlým změnám tvaru, což je znázorněno v situaci a). Propagace by měla zajistit přirozené navázání generalizované části prvku na negeneralizovanou s minimalizací změny křivosti, a to i za cenu ztráty přesnosti. To lze pozorovat v situaci b), kdy prvek nemění svůj průběh tak ostře. Nevýhodou je fakt, že je prvek modifikován i v místech, kde před tím nedocházelo ke grafickým konfliktům.



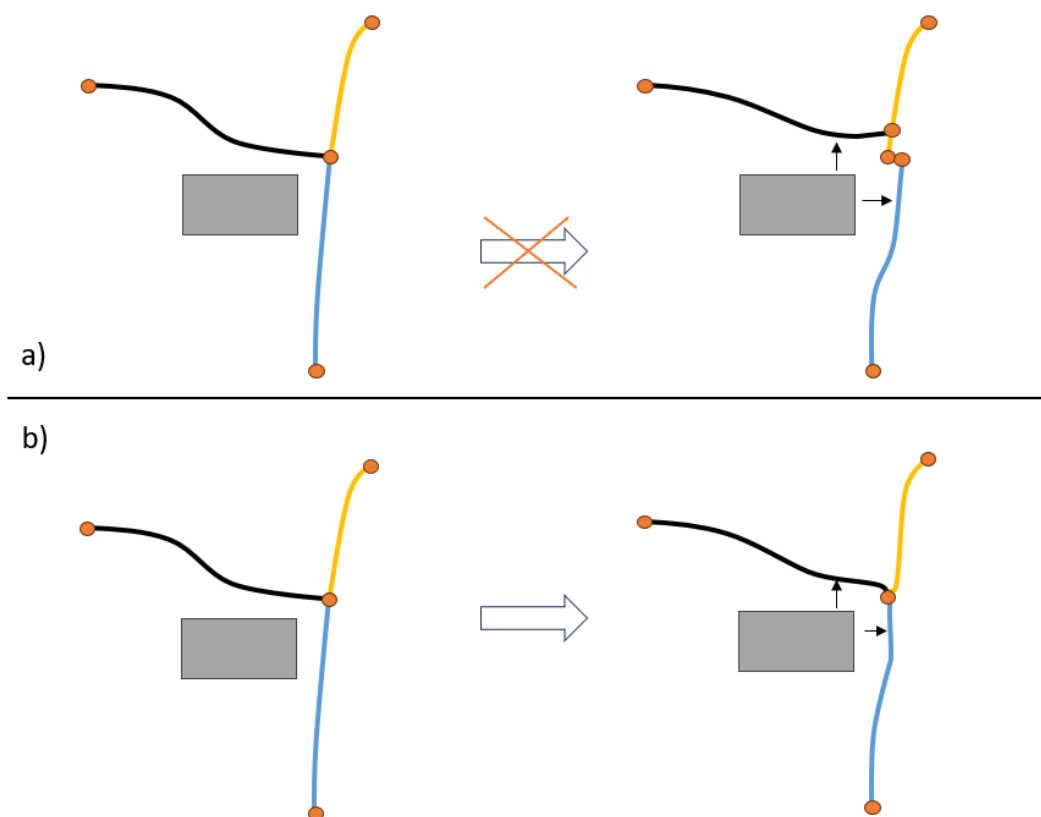
Obrázek 4-5 P4: přirozená změna tvaru generalizovaného prvku. a) modifikace bez pravidla P4, b) modifikace v souladu s pravidlem P4.

### P5: Zajištění topologické návaznosti prvků

Tento požadavek zajišťuje, aby byly zachovány topologické vazby jednotlivých prvků. To zahrnuje především zachování návaznosti počátečních a koncových bodů jednotlivých polylinií tak, aby nedocházelo k rozpojení na sebe navazujících segmentů. Když dochází k posunu koncových bodů generalizovaných prvků, je tedy nutné neporušit jejich návaznost, a použít pro tyto body stejný vektor posunu. Podmínka odstranění konfliktů v místě křižovatek (místa, kde dochází k napojení více linií) není závislá na minimální vzdálenosti, protože je z hlediska definice automaticky nedodržena. Proto musí být tato situace řešena zvlášť (Bader 2001). Tato práce se těmito situacemi nezabývá, a proto tyto podmínky nejsou dále řešeny.

Na obrázku 4-6 je znázorněna situace s požadavkem zachování topologické návaznosti, kde na sebe navazují tři linie v jednom společném bodě. V kartografické praxi se může jednat například o křižovatku. Situace a) ukazuje operaci PM bez zachování topologické návaznosti v jednom bodě. Po jejich modifikaci se toto napojení rozpadlo a topologie

prvků již není zachována. V druhé situaci b) je topologie zachována, koncové body mají identické souřadnice. Toto pravidlo může být v konfliktu s pravidly P1 a P4.



Obrázek 4-6 P5: zajištění topologické návaznosti generalizovaných prvků. a) modifikace bez pravidla P5, b) modifikace v souladu s pravidlem P5

K výše uvedeným pravidlům poté musejí přihlížet metody generalizace založené na operátoru PM popsané v kapitole 5.

### 4.3 Generalizační situace řešené s využitím operátoru Partial Modification

V této kapitole je nejprve v podkapitole 4.3.1 popsána priorita kartografický prvků při generalizaci. V podkapitole 4.3.2 jsou poté názorné ukázky jednotlivých situací.

### 4.3.1 Priorita kartografických prvků

V kartografické praxi jsou vstupem generalizace prvky, které mají různou nebo stejnou prioritu pro zachování přesnosti. Tyto priority jsou úzce spojené s obsahem či tématem mapy.

Při konstrukci mapy jsou její obsahové prvky vykreslovány v různém pořadí, některé dříve, jiné později. Kritériem je zpravidla důležitost, která je definována jejich významem. Takové prvky mají různou prioritu zpracování, která by měla být zachována i při kartografické generalizaci. Pro zdůraznění významu se navíc kreslí přes míru.

Pro účel této diplomové práce se soustředíme na trojici liniových prvků, a to vodstvo, železnice a komunikace a definujeme následující prioritu:

1. Prvky s největší prioritou jsou vodní toky, orografické schéma se vykresluje zpravidla jako první, představuje významný orientační bod. U vodních toků je také zapotřebí zachovat polohovou přesnost, aby nedocházelo k odsunům mimo vrstevnicemi tvořená koryta.

2. Nižší prioritu než vodní toky mají komunikace. Tato kategorie spojuje železnice a silnice. V některých případech mohly být železnice brány s vyšší prioritou. Jedná se spíše o tradici z doby, kdy železnice měly strategický význam, a zajišťovaly většinu pohybu zboží a lidí. Pro tuto práci toto členění nemá význam, proto jsou zde železnice i silnice na stejné úrovni.

3. Do této kategorie patří ostatní obsahové prvky mapy.

Zformulujme dvě následující **kartografická pravidla**:

K1: Pokud se tedy v generalizačních situacích vyskytnou prvky napříč různými kategoriemi, je potřeba zohlednit jejich prioritu. Prvek s vyšší prioritou je chápán jako pevný (označíme ho jako bariéru), tj. negeneralizuje se, prvek s nižší prioritou může být generalizován.

K2: Pokud se v generalizačních situacích vyskytují pouze prvky ze stejné kategorie, mohou být všechny generalizovány.



### **K1: Prvky s rozdílnou prioritou**

Generalizovaný prvek je představován polylinií  $L = \{p_1, \dots, p_n\}$  s  $n$  vrcholy  $p_i = [x_i, y_i]$ . Prvek s vyšší prioritou, často označovaný jako překážka (resp. bariéra), je poté představován polylinií  $B = \{q_1, \dots, q_m\}$  s  $m$  vrcholy  $q_j = [x_j, y_j]$ . Jako bariéry lze volit i jiné obsahové prvky mapy (např. budovy), překážek může být i více než jen jedna. Z kapitoly 3.2.1 je patrné, že vzájemná kolize těchto prvků závisí na vzdálenosti vrcholů bariéry  $B$  od vrcholů generalizované linie  $P$ . Tato vzdálenost je měřena mezi každým bodem  $p_i$  a  $k$  nejbližšími body  $q_j$ . Zpravidla však volíme  $k=1$ , zohledňujeme vliv pouze nejbližšího prvku překážky. U komplexnějších generalizačních situací zpravidla volíme  $k > 1$ .

Příkladem prvku s vyšší prioritou může být vodní tok, prvkem s nižší prioritou pak komunikace, viz Obr. 4-7. V tomto případě podléhá PM pouze prvek s nižší prioritou.

### **K2: Prvky se stejnou prioritou**

První generalizovaný prvek je představován polylinií  $L_1 = \{p_1, \dots, p_n\}$  s  $n$  vrcholy  $p_i = [x_i, y_i]$  a druhý polylinií  $L_2 = \{q_1, \dots, q_m\}$  s  $m$  vrcholy  $q_i = [x_i, y_i]$ . I zde odsun závisí na vzdálenosti okolních prvků. Tato vzdálenost je měřena mezi dvěma vzájemně nejbližšími body  $L_1$  a  $L_2$ . Tato hodnota se v průběhu výpočtu mění s tím, jak oba prvky vzájemně odsouvají

V praxi se může jednat o prvky reprezentující komunikaci a železnici. Takový příklad je na obrázku 4-8.

Na základě těchto výše uvedených priorit lze vyvodit základní generalizační schémata popsané v následující kapitole.

## **4.3.2 Generalizační schémata**

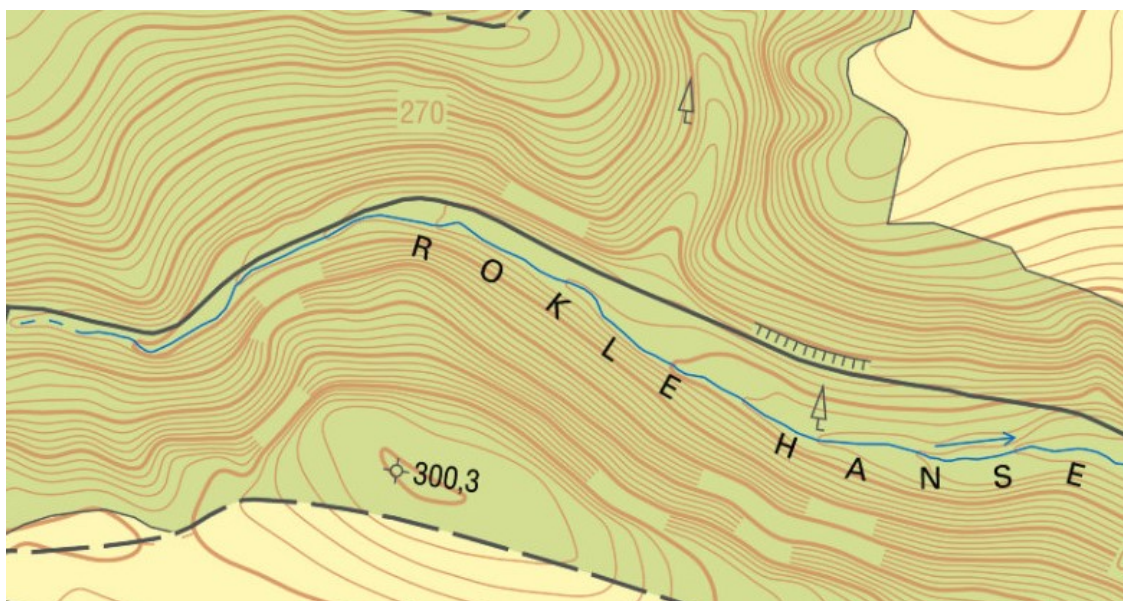
V této podkapitole jsou popsána tři základní schémata kartografické generalizace liniových prvků s využitím operace PM. Tato schémata jsou vytvořena na základě priority jednotlivých kartografických prvků:

- S1: jeden prvek pevný, druhý generalizovaný,
- S2: oba prvky generalizovány,
- S3: kombinace obou výše uvedených situací.

### Schéma S1: Částečná modifikace jednoho prvku od pevné překážky

První generalizační schéma je nejjednodušší, zahrnuje pevný a generalizovaný prvek.

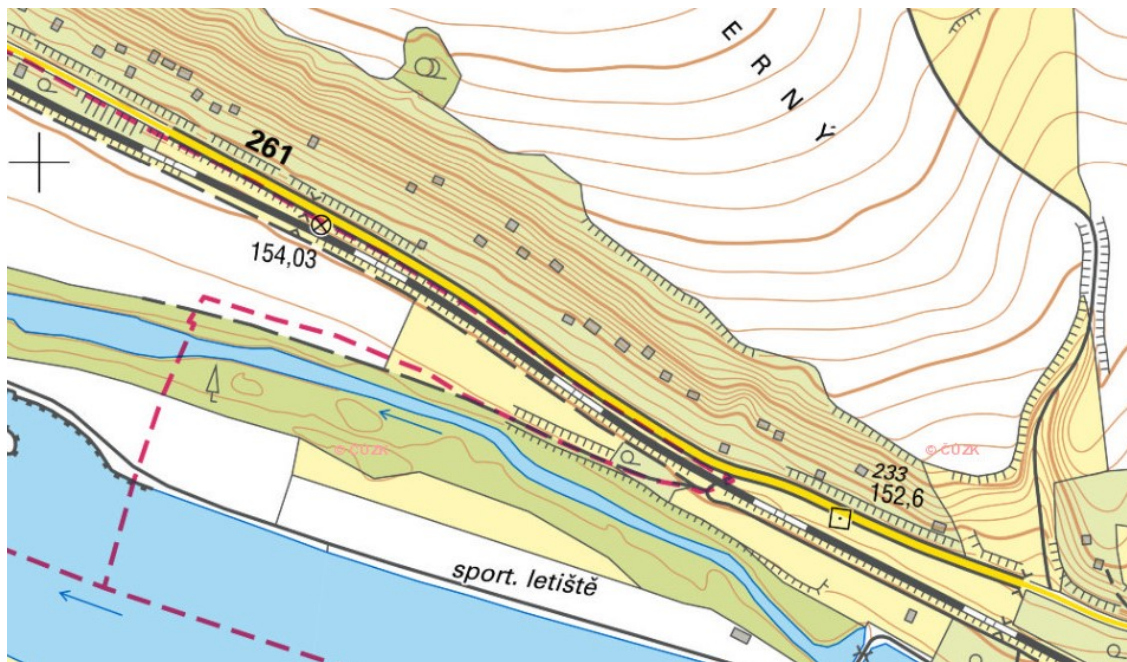
Tato situace může být řešena v případě, když jsou v grafickém konfliktu dva liniové prvky, ze kterých je jeden prioritní a je zapotřebí zachovat jeho přesnou polohu, zatímco druhý prvek s nižší prioritou může být částečně odsunut a modifikován v místech konfliktu. Toto schéma je aplikovatelné například na situaci na obrázku 4-7. Zde je schéma navrženo tak, že bude docházet k odsunu polylinie reprezentující komunikaci od polylinie vodního toku s vyšší prioritou.



Obrázek 4-7 Částečná modifikace jednoho prvku v reálné situaci  
Zdroj: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

### Schéma S2: Vzájemný odsun dvou prvků

Další schéma, které může být řešeno, představuje vzájemný odsun dvou liniových prvků vůči sobě, pokud mají oba prvky stejnou prioritu. V takovém případě mohou být odsouvány a modifikovány oba prvky. Toto schéma je aplikovatelné například na situaci na obrázku 4-8. Schéma v této situaci je navrženo tak, že budou odsouvány oba liniové objekty současně. Obě polylinie reprezentující železnici i komunikaci mají stejnou prioritu.

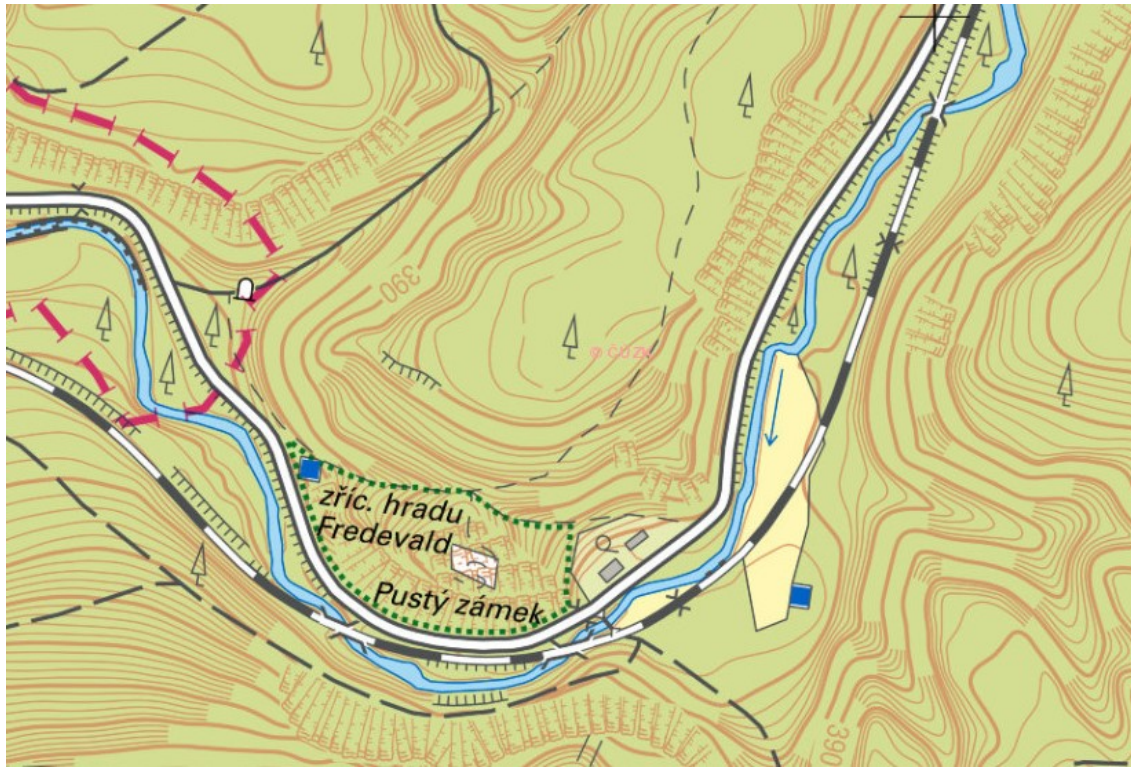


Obrázek 4-8 Částečná *modifikace* dvou prvků v reálné situaci  
 Zdroj: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

### Schéma S3: Vzájemný odsun více prvků

Poslední schéma je kombinace dvou předchozích. V některých případech vstupuje do generalizace větší množství prvků. Některé se mohou vzájemně posouvat a některé naopak mají fixní polohu. Stejně jako v předchozích případech bude vždy hledán nejbližší bod ke generalizované polylinii od všech ostatních objektů.

Obrázek 4-9 ukazuje situaci, kde se nachází 3 liniové prvky. Linie reprezentující vodní tok má největší prioritu a je tedy nepohyblivá. Druhé dvě linie, které reprezentují komunikaci a železnici, mají stejnou, ale nižší prioritu. Budou tedy generalizovány.



Obrázek 4-9 Vzájemný odsun více prvků v reálné situaci  
Zdroj: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

## 5 Strategie Partial Modification

V této kapitole jsou popsány přístupy k řešení grafických kolizí operátorem Partial Modification za využití energetického modelu Snakes (Burghardt a Meier 1997; Bader 2001) (kapitola 5.1) a jeho adaptací v podobě New Splines (Bayer et al. 2024) (kapitola 5.2). Tyto strategie musejí obě splňovat základní pravidla (P1-P5), která jsou uvedena v kapitole 4.2. Dále jsou zde popsány základní myšlenky obou strategií a stručný matematický popis včetně diskretizace spojitého modelu. V poslední kapitole 5.3 hodnotící metriky generalizace.

### 5.1 Snakes

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2, model Snakes je energetický model. Model kombinuje vnitřní a vnější energie splinů a hledá minimum jejich součtu reprezentující rovnovážný stav.

Spline  $v(s)$  je parametrická křivka definována pomocí rovnic

$$v(s) = (x(s), y(s)),$$

kde  $s, s \in [0, 1]$  je parametr (Burghardt a Meier 1997). Řídícím polynomem splinu  $v(s)$  je generalizovaný prvek

$$L(s) = (x(p(s)), y(p(s))).$$

Celková energii  $E$  působící na jednotlivé body splinu je definována jako

$$E = E_{ext} + E_{int}, \quad (5-1)$$

kde  $E_{ext}$  je vnější energie prostředí a  $E_{int}$  je vnitřní energie splinu.

Celková energie splinu je představuje integrál přes celý její průběh

$$I(v) = \int_0^1 E ds.$$

Cílem je minimalizovat celkovou energii

$$I(v) = \min$$

a tím získat rovnovážnou polohu splinu.

### 5.1.1 Vnitřní energie

Vnitřní energie splinu  $E_{int}$  určuje, jak se bude měnit jeho tvar v průběhu generalizace. Výpočet dle Badera (2001) je odvozen z první a druhé derivace podle parametru  $s$

$$E_{int} = \frac{1}{2} \left( \alpha(s) |d(s)|^2 + \beta(s) \left| \frac{\partial d(s)}{\partial s} \right|^2 + \gamma(s) \left| \frac{\partial d(s)^2}{\partial s^2} \right|^2 \right),$$

kde první člen rovnice představuje rezidua (vzdálenost od jeho původní pozice), druhý elasticitu a poslední tuhost. Hodnoty těchto vlivů jsou škálovány pomocí skalárních parametrů  $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}^+$ .

Výše uvedené členy mají za úkol realizovat podmínky kladené na generalizaci. Volba skalárních parametrů ovlivňuje především podmínky P2 (Zachování tvaru), P3 (Zachování polohové přesnosti) a P4 (Přirozená změna tvaru, propagace).

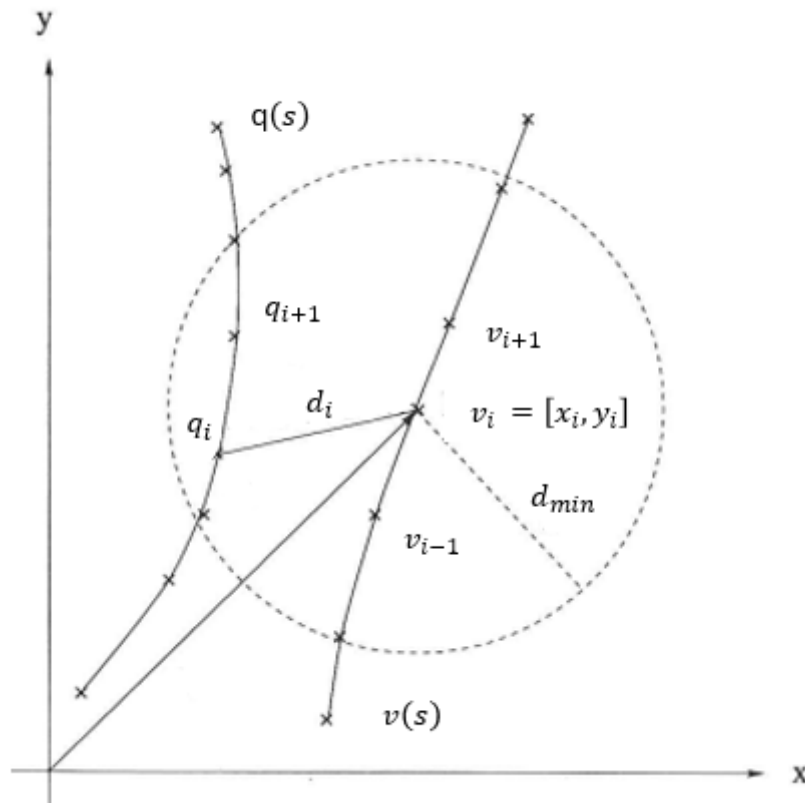
Tuhost a elasticita ovlivňují vnitřní pevnost splinu a s tím spojené množství síly, které je potřeba k jeho deformaci. Dle Burghardta a Meiera (1997) zvýšení hodnot skalárních parametrů  $\beta, \gamma$  zvýší celkovou vnitřní energii a tím pádem je spline méně náchylný ke změnám, které by měly být přirozenější a pozvolnější. Předpokládáme, že jejich vhodná volba, diskutována v závěrečné části práce, docílí také zachování tvarové věrohodnosti a polohové přesnosti.

### 5.1.2 Vnější energie

Vnější energie je definována Burghardtem a Meierem (1997) jako síla, která posouvá a tvarově modifikuje spline. Výpočet vnější energie závisí na specifikacích modelu. Autoři sílu definují jako funkci efektivní vzdálenosti  $h$ , která ovlivňuje do jaké vzdálenosti mají okolní objekty ještě vliv na spline (tj. na generalizovaný objekt). Hraniční vzdálenost odpovídá minimální požadované vzdálenosti  $d_{min}$  prvků vstupujících do generalizace. Když je tato hranice překročena, je vnější energie rovna 0 a prvek nemá na generalizovaný spline vliv. Vnější síla je na každý bod splinu  $v(s) \equiv v_i = [x_i, y_i]$  aplikována samostatně. Nejjednodušší model vnější energie je definován jako

$$E_{ext}(v_i) = \begin{cases} c \left( 1 - \frac{d_i}{d_{min}} \right), & \text{,} d_i < d_{min}, \\ 0, & \text{,} d_i \geq d_{min}, \end{cases}$$

kde  $d_i$  je vzdálenost mezi bodem  $v_i = [x_i, y_i]$  generalizovaného splinu a nejbližším bodem  $q_i = [x_{q,i}, y_{q,i}]$  na okolním objektu (tj. překážce),  $c$  je kladná konstanta používaná pro ovlivnění rychlosti konvergence iteračního procesu. Podrobněji je diskutována v Burghardt a Meier (1997). Situace je vizualizována na obrázku 5-1.



Obrázek 5-1 Vzájemný vliv linií ( $L_i$  generalizovaná line,  $L_j$  linie generující sílu,  $P_i$  bod zájmu  
Zdroj: (Burghardt a Meier 1997) editováno

Po dosazení dostáváme vztah (Bader, 2001)

$$E_{ext}(v_i) = c \left( 1 - \frac{\|v_i - q_i\|}{d_{min}} \right) = c \left( 1 - \frac{\sqrt{(x_i - x_{q,i})^2 + (y_i - y_{q,i})^2}}{d_{min}} \right). \quad (5-2)$$

Protože  $d_{min}$  odpovídá minimální vzdálenosti mezi objekty nacházejícími se v mapě, vnější energie zajišťuje úspěšné řešení podmínky kartografické generalizace P1 (Odstranění konfliktů).

### 5.1.3 Diskrétní řešení

Z důvodu výpočetní náročnosti Snakes (Bader 2001) je zapotřebí řešení diskretizovat. V tomto článku je také řešení podrobněji diskutováno a popsáno. Spline je vzorkován krokem  $h$  a lze jej zapsat jeho diskrétní aproximací.

Pro model Snakes minimalizace celkové energie splinu (po diskretizaci již polylinie) vede na maticový zápis (Bader 2001). Minimalizace energie je vypočítávána ve směrech os X a Y takto:

$$A\Delta X + E_x = 0,$$

$$A\Delta Y + E_y = 0,$$

kde  $a$  hodnoty  $\Delta X, \Delta Y$  představují posun bodu polylinie ve směru X a Y a  $A$  je pentadiagonální matice

$$A = \begin{bmatrix} a & b & c & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & a & b & c & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c & b & a & b & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c & b & a & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a & b & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & b & a & b & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & c & b & a & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & c & b & a \end{bmatrix}, \quad (5-3)$$

kde  $a, b$  a  $c$  jsou získány takto:

$$a = \alpha + \frac{2\beta}{h^2} + \frac{6\gamma}{h^4}, \quad b = -\frac{\beta}{h^2} - \frac{4\gamma}{h^4}, \quad c = \frac{\gamma}{h^4},$$

$E_x$  a  $E_y$  jsou parciální derivace vnější energie podle proměnných  $x, y$ , proměnná  $h$  představuje střední hodnotu (např. medián) velikostí jednotlivých segmentů polylinie a provádí normalizaci kroku, předpokládáme nerovnoměrné vzorkování (rozestupy) mezi jednotlivými body. Pro zvolenou vnější energii popsanou vztahem (5-2) mají parciální derivace tvar

$$E_x = -c \frac{x_i - x_n}{d_i d_{min}}, \quad E_y = -c \frac{y_i - y_n}{d_i d_{min}}, \quad (5-4)$$



kde  $x_i, y_i$  jsou souřadnice aktuálního bodu křivky,  $x_{q,i}, y_{q,i}$  souřadnice nejbližšího bodu překážky k aktuálnímu bodu,  $d_i$  je vzdálenost mezi aktuálním bodem a nejbližším bodem na překážce,  $d_{min}$  je minimální vzdálenost generalizovaných prvků a  $c$  je parametr generalizace určující vliv vnější síly.

Hodnotu posunu  $\Delta X, \Delta Y$  není možné určit přímo a je tedy řešena iterativně. Z tohoto pramení nevýhoda tohoto modelu. Pro velké datasey má výsledek pomalou konvergenci a je náročný na výpočet (Wang a Liu 2017).

Výsledné posuny vrcholů splinu v  $i$ -té iteraci určíme ze vztahu

$$\Delta x_i = (A + \lambda I)^{-1}(\lambda \Delta x_{i-1} - E_x), \quad \Delta y_i = (A + \lambda I)^{-1}(\lambda \Delta y_{i-1} - E_y). \quad (5-5)$$

$\lambda$  je vektor vlastních čísel matice  $A$ . Výše uvedené diskrétní řešení má však řadu nevýhod, uveďme pomalou konvergenci a tím výpočetní náročnost při práci s většími datasey. Nastavení hodnot parametrů  $\alpha, \beta, \gamma$  parametrů je poněkud nepřehledné a spline garantuje pouze  $C0$  spojitost.

## 5.2 New Splines

Tyto problémy se částečně snaží odstranit ve své publikaci Bayer et al. (2024). Energetický model zde byl upraven tak, aby navíc zahrnoval odchylky ve tvaru a křivosti aproximované polylinie i překážkami. Výsledný spline může více či méně kopírovat tvar aproximovaného prvku nebo překážek. Varianta s  $C1$  spojitostí v době řešení diplomové práce nebyla k dispozici. Řešení splinu je k dispozici v algebraickém tvaru, nemusí tedy probíhat iterativní výpočet.

Metoda opět pracuje s minimalizací celkové energie  $E$ , vypočtené dle rovnice 5.1.

Označme  $c(t)$  generalizovaný prvek představovaný diskrétní křivkou danou rovnicí

$$c(t) = (f_1(t), f_2(t)),$$

kde  $f_1(t), f_2(t)$  představují souřadnicové funkce. Výsledný spline lze zapsat ve tvaru

$$s(t) = (g_1(x(t)), g_2(y(t))),$$

kde  $g_1(x(t)), g_2(y(t))$  jsou souřadnicové funkce. Překážka je tvořena diskretizovanou křivkou

$$q(t) = (h_1(t), h_2(t)),$$

která může být otevřená nebo uzavřená.

### 5.2.1 Vnitřní energie

Vnitřní energie  $E_{int}$  je zde vypočtena jako lineární kombinace 3 složek takto:

$$E_{int} = \lambda_1 E_1 + \lambda_2 E_2 + \lambda_3 E_3,$$

kde  $E_1, E_2$  a  $E_3$  jsou energetické funkce a  $\lambda_1, \lambda_2$  a  $\lambda_3$  jsou parametry, které určují váhu jednotlivých energetických funkcí.

Energetická funkce  $E_1$  má za úkol měřit rezidua mezi hledaným splinem  $s(t)$  a diskrétní aproximací původní křivky  $c(t)$  (tj. generalizovaným prvkem).

$$E_1 = \sum_{i=0}^n w_{1,i}^2 \left[ (x_i - g_1(x_i))^2 + (y_i - g_2(y_i))^2 \right],$$

Energie  $E_2$  určuje hladkost a tuhost splinu  $s(t)$ .

$$E_2 = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^n w_{2,i}^2 \left[ \left( g_1^{(j)}(x_i) \right)^2 + \left( g_2^{(j)}(y_i) \right)^2 \right],$$

$g_1^{(j)}, g_2^{(j)}$  představují  $j$ -té derivace souřadnicových funkcí  $s(t)$  podle jednotlivých proměnných.

Energie  $E_3$ , vypočtena z

$$E_3 = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^n w_{3,i}^2 \left[ \left( f_1^{(j)}(x_i) - g_1^{(j)}(x_i) \right)^2 + \left( f_2^{(j)}(y_i) - g_2^{(j)}(y_i) \right)^2 \right],$$

měří odchylky ve tvaru a křivosti mezi hledaným splinem  $s(t)$  a původní křivkou  $c(t)$  (tj. generalizovaným prvkem).

$f_1^{(j)}, f_2^{(j)}$  představují  $j$ -té derivace souřadnicových funkcí  $c(t)$  podle jednotlivých proměnných  $x_s, y_s$ .

$E_3$  zajišťuje podobnost tvarů původního prvku  $c(t)$  a výsledného splinu  $s(t)$ .

Hodnoty  $w$  představují váhy jednotlivých vrcholů křivky. Pro účely práce byly tyto váhy zvoleny 1.

Jednotlivé energetické funkce, ze kterých je určena vnitřní energie splinu, mají za úkol dodržení podmínek generalizace P2, P3 a P4 popsanych v kapitole 4.2. Jinak řečeno, zajišťují, aby nedošlo k nerealistické deformaci linie vlivem vnější síly při její modifikaci.

## 5.2.2 Vnější energie

Vnější energie  $E_{ext}$  je určena lineární kombinací 2 energií

$$E_{ext} = \lambda_4 E_4 + \lambda_5 E_5,$$

kde  $E_4, E_5$  jsou příslušné energetické funkce a  $\lambda_4, \lambda_5$  jsou skalární parametry, které určují váhu jednotlivých energetických funkcí.

Energetická funkce  $E_{4,k}$

$$E_{4,k} = \sum_{i=0}^n w_{4,k,i}^2 (d_{k,i} - \delta)^2,$$

pracuje s residui mezi výsledným splinem  $s(t)$  a offsetem  $\delta$  překážky  $q_k(t)$ . Energetická funkce  $E_{5,k}$

$$E_{5,k} = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=0}^n w_{5,k,i}^2 \left[ \left( h_{1,k}^{(j)}(x_i) - g_1^{(j)}(x_i) \right)^2 + \left( h_{2,k}^{(j)}(y_i) - g_2^{(j)}(x_y) \right)^2 \right],$$

měří odchylky ve tvaru a křivosti mezi hledaným splinem  $s(t)$  a offsetem  $\delta$  překážky  $q_k(t)$ . Za předpokladu stejného vlivu všech překážek  $q_k(t)$  platí

$$E_4 = \sum_{k=1}^{n_q} E_{4,k},$$

$$E_5 = \sum_{k=1}^{n_q} E_{5,k},$$

kde  $n_q$  představuje celkový počet překážek.

Model New Splines (Bayer et al. 2024) je navržen tak, aby minimalizace celkové energie nemusela být počítána iterativně. Hledaná křivka minimalizuje celkovou energii  $E$  danou (5-1).

Protože  $E$  je konvexní funkcí, souřadnicové funkce splinu jsou určeny z podmínek pro extrém

$$\frac{\partial E}{\partial x_s} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial y_s} = 0.$$

Odvození je poměrně komplikované, viz Bayer et al. (2024). Výsledné vektorové rovnice splinu pro jednu překážku  $q(t)$  mají tvar

$$\begin{aligned} x_s &= B^{-1}[(\lambda_1 I + \lambda_3 D^T D)x + (\lambda_4 W^T W + \lambda_5 D^T W^T W D)\underline{x}_q], \\ y_s &= B^{-1}[(\lambda_1 I + \lambda_3 D^T D)y + (\lambda_4 W^T W + \lambda_5 D^T W^T W D)\underline{y}_q], \end{aligned} \quad (5-6)$$

kde  $x_s(n, 1)$ ,  $y_s(n, 1)$  jsou sloupcové vektory souřadnice splinu  $s(t)$ ,  $x(n, 1)$ ,  $y(n, 1)$  jsou sloupcové vektory souřadnice původní křivky  $c(t)$ ,  $\underline{x}_q(n, 1)$ ,  $\underline{y}_q(n, 1)$  jsou sloupcové vektory souřadnic nejbližšího bodu překážky  $q_k$ .  $W_{(n,n)}$  je diagonální matice vah jednotlivých vrcholů,

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

$D$  jsou matice prvních a druhých centrálních diferencí, které mají tvar

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_1 &= \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5-8) \\ \mathbf{D}_2 &= \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Pro účely diplomové práce jsme volili  $D = D_1$ . Matice  $B$  má tvar

$$B = \lambda_1 I + (\lambda_2 + \lambda_3)D^T D + \lambda_4 W^T W + \lambda_5 D^T W^T W D. \quad (5-9)$$

### 5.3 Hodnocení kartografické generalizace

Nezbytnou součástí procesu kartografické generalizace je i vlastní hodnocení jejich výsledků. Vzhledem k faktu že generalizace představuje komplexní proces, mnohdy

s nedeterministickými kroky, často realizovaný prostřednictvím fuzzy pravidel, kombinující geometrické i estetické parametry, je proces hodnocení netriviální. Často je proto používáno multikriteriální hodnocení kombinující různé typy hodnotících parametrů.

Pro hodnocení kvality generalizace bylo vybráno až 6 kritérií, která byla volena, aby reflektovala podmínky generalizace P1-P5 popsané v kapitole 4.2. Jedná se o distanční kritéria (minimální vzdálenosti od překážky, Chamfer distance, Hausdorff distance), tvarová kritéria (Turning function) a kritéria hladkosti (křivost linie, LLR). Pro metodu Snakes bylo ještě přidáno kritérium dodržení maximálního počtu iterací. Výpočet a význam těchto metrik je diskutován níže. Dále je prováděno testování a vyhodnocení vlivu jednotlivých skalárních parametrů  $\lambda_1$ - $\lambda_5$  na kvalitu generalizačního procesu. Podobný princip hodnocení byl použit v Bayer (2024).

### 5.3.1 Metriky pro hodnocení polohové přesnosti

P3: Zachování polohové přesnosti reflektované pravidlem P3 ověřují metriky Chamfer a Hausdorff distance.

Chamfer distance dvou množin  $X, Y$  má obecný tvar

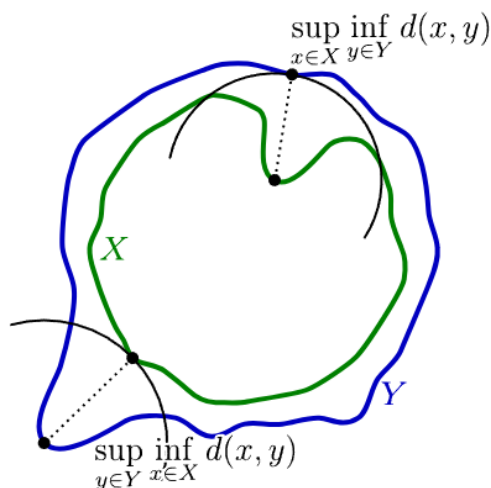
$$d_{CD}(X, Y) = \sum_{x \in X} \min_{y \in Y} \|x - y\|_2^2 + \sum_{y \in Y} \min_{x \in X} \|x - y\|_2^2. \quad (5-10)$$

V našem případě  $X$  představují body původního prvku,  $Y$  body generalizovaného prvku. Chamfer distance tedy určuje střední hodnotu součtu vzdáleností bodů generalizované polylinie vzhledem k jejich původní poloze.

Hausdorff distance dvou množin  $X, Y$  má obecný tvar

$$d_H(X, Y) = \max\{\sup_{x \in X} \inf_{y \in Y} d(x, y), \sup_{y \in Y} \inf_{x \in X} d(y, x)\}, \quad (5-11)$$

symbolologie je stejná jako v předchozím případě. Symbol  $\inf_{y \in Y} d(x, y)$  reprezentuje vzdálenost bodu  $x$  od nejbližšího bodu množiny  $Y$ , symbol  $\sup_{x \in X} \inf_{y \in Y} d(x, y)$  reprezentuje maximum z minimálních vzdáleností pro body z množiny  $X$ , a podobně pro zbylé dva členy. Hausdorff distance je tedy maximální hodnota z těchto dvou hodnot. Vizualizace je na obrázku Obrázek 5-2.



Obrázek 5-2 Housdorff distance. Čárkované čáry vizualizují Housdorff distance, zelená čára množinu  $X$  a modrá množinu  $Y$ .

Zdroj: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hausdorff\\_distance](https://en.wikipedia.org/wiki/Hausdorff_distance)

Obě metriky pracují se vzdáleností bodů generalizované polylinie od odpovídajících bodů vstupní polylinie. Vstupní předpoklad byl takový, že obě vzdálenosti by měly být co nejmenší, nemělo by tedy docházet k výraznějším posunům generalizovaných prvků. Chamford distance je chápána jako střední hodnota, měla by mít větší vypovídající schopnost než Hausdorff distance.

### 5.3.2 Metriky pro hodnocení tvarové podobnosti

Existuje mnoho metrik posuzujících tvarovou podobnost prvků. Pro účely diplomové práce byla použita Turning function (Volotao et al. 2010). Turning function je definována jako úhel mezi tečnou k hranici tvaru a referenční čarou (například osou  $X$ ) v závislosti na délce oblouku  $s$ . Délka oblouku  $s$  je měřítko vzdálenosti podél hranice tvaru, počínající v referenčním bodě (často zvoleném na začátku obvodu) a měřící se ve směru pohybu po obvodu. Výpočet probíhá dle vzorce

$$\theta = \sum_{i=0}^n \theta_i u_i(s), \quad (5-12)$$

kde  $\theta_i$  je úhel mezi tečnou k hranici a referenční čarou v  $i$ -tém segmentu,  $n$  je počet segmentů a  $u_i(s)$  je indikátorová funkce, která je 1, pokud  $s$  spadá do segmentu  $i$  a 0 když ne. Na obrázku Obrázek 5-3 je znázorněn převod 2D tvaru do 1D.

Turning function hodnotí dodržení pravidla P2: Zachování tvaru.



Obrázek 5-3  $\theta$  značí hodnotu Turning function v daném segmentu  $s$ .  
Zdroj: Volotao et al. 2010

### 5.3.3 Metriky pro hodnocení hladkosti

Pro měření hladkosti generalizovaného prvku byly použity dvě metriky. První z nich představuje první křivost (Ciomaga et al. (2017).

$$\kappa = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2 \sin \omega_i}{\|p_{i-1}p_{i+1}\|} = \frac{-2 \det(p_i p_{i-1} p_i p_{i+1})}{\|p_{i-1}p_i\| \|p_i p_{i+1}\| \|p_{i-1}p_{i+1}\|} \quad (5-13)$$

$p_i$  je aktuální bod linie a  $\omega_i$  je úhel mezi body  $p_{i-1}, p_i, p_{i+1}$ .

Druhým kritériem je Local Length Ratio (LLR) (Nakos a Miropoulos 2003)

$$LLR = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \sin^{-1} \frac{\omega_i}{2}, \quad (5-14)$$

$\omega_i$  je úhel mezi body  $p_{i-1}, p_i, p_{i+1}$ .

LLR a křivost hodnotí především dodržení pravidla P4: Přirozená změna tvaru (propagace).

Pravidlo P1: Odstranění konfliktů bylo hodnoceno porovnáním minimální vzdálenosti od překážky po proběhlé generalizaci a minimální vzdálenosti, která definovala kolizi pro dané situace.

Pravidlo P5: Zajištění topologické návaznosti prvků) bylo z hlediska hodnocení vyjmuta, protože řešené situace nemají pevně definované kontrolní body, kterými by výsledná odsunutá linie měla procházet.

## 6 Implementace

V této kapitole je důkladněji popsána implementace generalizačních metod realizujících operaci Partial Modification, a to Snakes a New Splines. Kapitola 6.1 obsahuje HW a SW specifikace za kterých probíhal výpočet, Kapitoly 6.2 a 6.3 obsahují popis implementace a algoritmu výpočtu modelu Snakes a New Splines. Kapitola 6.4 obsahuje volbu jednotlivých vstupních parametrů a kapitola 6.5 obsahuje popis implementace výpočtu hodnotících metrik.

### 6.1 Hardwarová a softwarová konfigurace

Implementace obou generalizačních metod využívá matematický aparát zmíněný v kapitole 5. Jakožto výchozí programovací jazyk byl zvolen Python 3.8, pro obě metody byly vytvořeny skripty v tomto programovacím jazyce. Skripty byly psané ve vývojovém prostředí PyCharm Samotné výpočty pak byly uskutečněny pomocí počítače s operačním systémem Windows 10 s procesorem Intel(R) Core(TM) i5-8265U a operační paměť RAM 16 GB.

### 6.2 Implementace Snakes

Skript pro odsun linie pomocí operátoru Partial modification byl navrhnut tak, aby odsouval jednu linii od překážky. Tento odsun probíhá iterativně a v každém kroku je linie odsouvána jen o malou vzdálenost směrem od překážky dle vztahu (5-5).

Samotný algoritmus v každém kroku iterace vypočítá odsun a aktualizuje jednotlivé vrcholy linie. Tento výpočet je určen v závislosti na vstupních parametrech linie  $\alpha, \beta, \delta$  a parametru vlivu vnější síly  $c$ . Další generalizační parametry jsou minimální vzdálenost  $d_{min}$  a maximální počet iterací  $n$ .

Tento proces probíhá, dokud není splněna podmínka, že všechny vrcholy generalizované polylinie jsou v dostatečné vzdálenosti od překážky, nebo dokud není překročen limit počtu iterací.

Vstupem pro výpočet byly tedy použity dva listy reprezentující souřadnice vrcholů první generalizované polylinie  $L_{1,x} = [p_{1,x,1}, \dots, p_{1,x,n}]$   $L_{1,y} = [p_{1,y,1}, \dots, p_{1,y,n}]$  a druhé generalizované polylinie  $L_{2,x} = [p_{2,x,1}, \dots, p_{2,x,n}]$   $L_{2,y} = [p_{2,y,1}, \dots, p_{2,y,n}]$ . U situace s překážkou jsou zapotřebí ještě dva listy  $B_x = [q_{x1}, \dots, q_{xm}]$  a  $B_y = [q_{y,1}, \dots, q_{y,m}]$



reprezentující vrcholy překážek. V tomto listu byly být nahrány souřadnice X, Y všech překážek, a to za sebou.

Výstupem algoritmu jsou poté vrcholy odsunutá polylinie (popřípadě polylinií).

### 6.2.1 Algoritmus Snakes

V této kapitole je uvedena implementace modelu Snakes pro dvě různé generalizační situace.

#### Odsun jednoho prvku

Pro modifikaci jednoho prvku (situace 1) byly vstupní data  $L_1$  a  $B = L_2$ . Déle byly zvoleny příslušné  $\alpha, \beta, \delta$  a  $c$ . Minimální vzdálenost byla spočtena pro aktuální data na základě jejich šířky symbolů dle vzorce (3-2). V tomto případě je minimální potřebná vzdálenost  $d_{min} = 23,5$  m.

Vrcholy generalizované linie  $L$  byly nahrány po souřadnicích jako  $L_{x,l}$  a  $L_{y,l}$ . Vrcholy překážky  $B = L_2$  po souřadnicích jako  $B_x$  a  $B_y$ .

Implementace algoritmu je tvořena níže uvedenými kroky.

#### 1. Inicializace:

Inicializace vstupních parametry  $\alpha, \beta, \delta, c$  a  $d_{min}$  na zvolené hodnoty. Import listů  $L_{1x}$ ,  $L_{1y}$  s vrcholy gen. linie  $L_1$ , Import listů  $B_x$  a  $B_y$  s vrcholy překážky  $B = L_2$ ,

#### 2. Výpočet kroku $h$ :

Jsou vytvořeny listy se souřadnicovými rozdíly v osách X a Y

$$\delta X = x_{1,i+1} - x_{1,i}, \delta Y = y_{1,i+1} - y_{1,i}.$$

Následně je vypočtena vzdálenost mezi vrcholy

$$H = \sqrt{\|\delta X\|^2 + \|\delta Y\|^2},$$

ze které je určen krok  $h$  jako střední hodnota  $H$ .

#### 3. Výpočet inverzní matice

Vytvoříme matici  $A$  dle vztahu (5-3), z ní vypočteme  $B = A + \lambda I$ , a určíme inverzní matici  $B^{-1}$ .

#### 4. Inicializace parametrů Snakes

Inicializace aktuální min. vzdálenosti  $d_{akt} = 0$ . Inicializace listu aktuálních posunů

$$\Delta X = [0 * \text{len}(L_{1,x})], \Delta Y = [0 * \text{len}(L_{1,y})],$$

a předchozích posunů

$$\Delta X_{i-1} = [0 * \text{len}(L_{1,x})], \Delta Y_{i-1} = [0 * \text{len}(L_{1,y})].$$

#### 5. Iterační proces výpočtu Snakes

Dokud není splněna podmínka minimální vzdálenosti  $d_{akt} < d_{min}$ :

- Pro každý bod  $p_{1,i} \in L_1$  najdi nejbližší bod  $q_i \in B$  a jeho souřadnice ulož do listů  $X_q$  a  $Y_q$  a jeho vzdálenost  $d_i$  jako  $D$ .
- Aktualizace  $d_{akt} = \underline{D}$ , kde  $\underline{D}$  s podtržítkem je minimální hodnota  $D$
- Výpočet  $E_x, E_y$  dle vzorce (5-4).
- Výpočet posunů  $\Delta X, \Delta Y$  dle (5-5).
- Výpočet nových vrcholů

$$L_{1,x} = L_{1,x} + \Delta X,$$

$$L_{1,y} = L_{1,y} + \Delta Y.$$

- Aktualizace posunu  $\Delta X_{i-1}$  a  $\Delta Y_{i-1}$  a to jak?

#### 6. Vrácení výsledku $L_{1,x}$ a $L_{1,y}$ .

##### Odsun dvou prvků

Pro situaci 2 bylo zapotřebí vypočítat odsun pro 2 polylinii  $L_1$  a  $L_2$ . V tomto případě nevstupovala do generalizace žádná pevná překážka. Vstupní listy tedy byly  $L_{1,x}$   $L_{1,y}$  a  $L_{2,x}$   $L_{2,y}$ . J ednotlivé výpočty matic, posunů a vzdáleností byly počítány pro každou linii zvlášť. Výpočet tedy probíhal tak, že v každé iteraci, kde je počítán odsun a nových souřadnic linií, byl nejprve vypočten odsun  $L_1$  vůči v tuto chvíli pevné polzlinii  $L_2$  a poté v rámci stejné iterace byl vypočten odsun  $L_2$  a od již mírně posunutě  $L_1$ . Tento proces byl opakován, dokud nebyla splněna podmínka minimální vzdálenosti, která pro data v situaci 2 byla  $d_{min} = 29,0$  m.

Implementace algoritmu je tvořena níže uvedenými kroky.

### 1. Inicializace:

Inicializace vstupních parametry  $\alpha, \beta, \delta, c$  a  $d_{min}$  na zvolené hodnoty. Import listů  $L_{1x}, L_{1y}$  s vrcholy gen. linie  $L_1$ , a import listů  $L_{2x}, L_{2y}$  s vrcholy gen. linie  $L_2$

### 2. Výpočet kroku $h_1$ a $h_2$ :

Jsou vytvořeny listy se souřadnicovými rozdíly v osách x a y

$$\delta X_1 = x_{1,i+1} - x_{1i}, \delta Y_1 = y_{1,i+1} - y_{1i},$$

$$\delta X_2 = x_{2,i+1} - x_{2i}, \delta Y_2 = y_{2,i+1} - y_{2i}.$$

Následně je vypočtena vzdálenost mezi vrcholy

$$H_1 = \sqrt{\|\delta X_1\|^2 + \|\delta Y_1\|^2},$$

$$H_2 = \sqrt{\|\delta X_2\|^2 + \|\delta Y_2\|^2},$$

ze které je určen krok  $h_1$  a  $h_2$  jako střední hodnota  $H_1$  a  $H_2$ .

### 3. Výpočet inverzní matice

Vytvoříme matici  $A$  dle vztahu (5-3), z ní vypočteme  $B = A + \lambda I$ , a určíme inverzní matici  $B^{-1}$ .

### 4. Inicializace parametrů Snakes

Inicializace aktuální min. vzdálenosti  $d_{akt} = 0$ , inicializace listu aktuálních posunů

$$\Delta X_1 = [0 * \text{len}(L_{1x})], \Delta Y_1 = [0 * \text{len}(L_{1y})],$$

$$\Delta X_2 = [0 * \text{len}(L_{2x})], \Delta Y_2 = [0 * \text{len}(L_{2y})]$$

a předchozích posunů

$$\Delta X_{1i-1} = [0 * \text{len}(L_{1x})], \Delta Y_{1i-1} = [0 * \text{len}(L_{1y})],$$

$$\Delta X_{2i-1} = [0 * \text{len}(L_{2x})], \Delta Y_{2i-1} = [0 * \text{len}(L_{2y})].$$

### 5. Iterační proces výpočtu Snakes

Dokud není splněna podmínka minimální vzdálenosti  $d_{akt} < d_{min}$ :

- a) Pro každý bod  $p_{1i} \in L_1$  najdi nejbližší bod  $q_{1,i} \in L_2$  a jejich souřadnice ulož do listů  $X_{1q}$  a  $Y_{1q}$   $B$  a jeho vzdálenost  $d_{1,i}$  jako list  $D_l$ . a pro každý

bod  $p_{2,i} \in L_1$  najdi nejbližší bod  $q_{2,i} \in L_2$  a jejich souřadnice ulož jako listy  $X_{2q}$  a  $Y_{2q}$   $B$  a jeho vzdálenost  $d_{2,i}$  jako list  $D_2$

- b) Aktualizace  $d_{akt} = \min(D_1, D_2)$ .
- c) Výpočet  $E_{1,x}, E_{1,y}$  a  $E_{2,x}, E_{2,y}$  dle vzorce (5-4).
- d) Výpočet posunů  $\Delta X_1, \Delta Y_1$  a  $\Delta X_2, \Delta Y_2$  dle (5-5).
- e) Výpočet nových vrcholů

$$L_{1,x} = L_{1,x} + \Delta X_1$$

$$L_{1,y} = L_{1,y} + \Delta Y_1$$

$$L_{2,x} = L_{2,x} + \Delta X_2$$

$$L_{2,y} = L_{2,y} + \Delta Y_2$$

- f) Aktualizace posunu  $\Delta X_{1,i-1}, \Delta Y_{1,i-1}$  a  $\Delta X_{2,i-1}, \Delta Y_{2,i-1}$

6. Vrácení výsledku  $L_{1,x}, L_{1,y}$  a  $L_{2,x}$  a  $L_{2,y}$ .

### Odsun dvou prvků a překážky (Snakes)

Pro konkrétní data generalizační situace 3, která jsou popsána v kapitole 7.1.3, do generalizace vstoupily 2 odsouvané linie  $L_1$  a  $L_2$  (obdobně jako u odsunu 2 prvků) a vrcholy překážky  $B$  jako listy  $B_x$  a  $B_y$ . Odsun probíhal obdobně jako v případě odsunu dvou linií od sebe s drobnou odlišností, kdy ke každé linii, které zrovna představovala překážku, byly přidány ještě vrcholy pevné bariéry. Vlastní implementace metody je umístěna v souboru se zdrojovým kódem xxxx.py

Minimální vzdálenost, která zde musela být dodržena byla  $d_{min} = 31,0$  m.

## 6.3 Implementace New Splines

Implementace modelu New Splines byla obdobná implementaci Snakes. Z vlastností tohoto modelu odpadá nutnost počítat odsun iterativně a tím pádem není potřebný vstupní parametr maximálního počtu iterací. Tento výpočet je prováděn dle vzorce 5-6.

Parametry generalizace zde tvořily koeficienty vlivu jednotlivých energetických funkcí  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  a  $\lambda_5$ . Dále zde zůstává parametr minimální vzdálenosti objektů  $d_{min}$ . Tento parametr byl rozdělen do dvou. První  $d_{1 min}$  zastupuje prahovou hodnotu pro detekci kolize a druhý  $d_{2 min}$  značí, do jaké vzdálenosti má být odsouvaná linie posunuta.

Stejně jako u metody Snakes byla vstupní data tvořena listy  $L_{1,x}$ ,  $L_{1,y}$  a  $L_{2,x}$   $L_{2,y}$  reprezentující vrcholy generalizovaných polylinií uložené po jednotlivých souřadnicích. Obdobně, pro generalizovanou polylinii a dva listy pro souřadnice vrcholů překážky  $B_x = [q_{x,1}, \dots, q_{x,m}]$  a  $B_y = [q_{y,1}, \dots, q_{y,m}]$ . V kapitole xxx je zmíněno, že při práci s více překážkami celkovou vnější energii určíme jako sumu všech vnějších energií generovaných působením okolních překážek na generalizovaný prvek. V této práci však tento problém nebylo třeba implementovat.

### 6.3.1 Algoritmus New Splines

V této kapitole je uvedena implementace modelu New Splines pro dvě různé generalizační situace.

#### Odsun 1 prvku

Pro situaci 1 byla použita stejná data jako tomu bylo u modelu Snakes. Rozdíl zde nastává jen v zadaných parametrech (kterých?  $L_{m\lambda}$ ?). Pro odsun jednoho prvku  $L_1$  od překážky  $B = L_2$  byly opět použity parametry  $d_{1\min} = d_{2\min} = 23,5$  m. Jako kolizní jsou brány všechny prvky, které jsou generalizovanému prvku blíže než hraniční hodnota  $d_{1,\min}$ , a jsou následně odsunuty do vzdálenosti  $d_{2,\min}$ .

Implementace algoritmu New Splines je tvořena níže uvedenými kroky.

#### 1. Inicializace

Inicializace vstupních parametrů  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, d_{1\min}$  a  $d_{2\min}$ . Import listů vrcholů  $L_{1x}, L_{1y}$  s vrcholy gen. polylinie  $L_1$ . Import listů vrcholů  $B_x$  a  $B_y$  překážky  $B = L_2$ .

#### 2. Odsun linií

Výpočet matice  $D$  dle vzorce ( 5-8). Výpočet matice  $W$  dle vzorce ( 5-7). Když je  $d_{1\min} < d_i$  tak  $w_i = 1$ , jinak  $w_i = 0$ . Vytvoření matice  $B$  dle vzorce (5-9). Vytvoření inverzní matice  $B^{-1}$ .

Výpočet offsetu  $D_{\cos}, D_{\sin}$ .

$$Diff_x = D_x - L_{1x},$$

$$Diff_y = D_y - L_{1y},$$

$$SIG = \tan^{-1} \left( \frac{Diff_y}{Diff_x} \right),$$

$$D_{cos} = d_{2min} \cos(SIG),$$

$$D_{sin} = d_{2min} \sin(SIG).$$

Výpočet jednotlivých nových vrcholů  $L_{1x}$  a  $L_{1y}$  dle upraveného vzorce (5-6)

$$L_{xs} = B^{-1}[\lambda_1 L_x + \lambda_3 D^T * D * L_x + \lambda_4 W * (Dx - D_{cos}) + \lambda_5 W * D^T * D * Dx],$$

$$L_{ys} = B^{-1}[\lambda_1 L_y + \lambda_3 D^T * D * L_y + \lambda_4 W * (Dy - D_{sin}) + \lambda_5 W * D^T * D * Dy],$$

kde \* je maticový součin.

3. *Vrácení výsledku  $L_{xs}$  a  $L_{ys}$ .*

## Odsun 2 prvků

Odsun dvou prvků zároveň se u této metody liší od Snakes. U Snakes bylo možno díky postupnému posunu v každém kroku počítat odsun jednoho prvku od druhého souběžně. U New Splines to není možné, protože linie je odsunuta rovnou do své nové pozice. Přístup zde tedy musel být upraven tak, že byl rozdělen do 2 kroků. Nejprve byla linie  $L_1$  odsouvána s parametry  $d_{1min} = 29,0$  m o vzdálenost  $d_{2min} = 14,5$  m od linie  $L_2$ . Tedy o poloviční potřebnou vzdálenost. Poté teprve mohl být posun dokončen tím, že byla linie  $L_2$  odsunuta od původní linie  $L_1$  se stejnými zvolenými parametry. Vstupní listy tedy byly  $L_{1,x}$   $L_{1,y}$  a  $L_{2,x}$   $L_{2,y}$ .

Implementace proběhla za pomoci algoritmu.

### 1. Inicializace

Inicializace vstupních parametrů  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, d_{1min}$  a  $d_{2min}$ .

Import listů vrcholů  $L_{1x}, L_{1y}$  s vrcholy gen. linie  $L_1$ .

Import listů vrcholů  $L_{2x}, L_{2y}$  s vrcholy gen. linie  $L_2$ .

### 2. Výpočet odsunu

Výpočet matic  $D_1$  a  $D_2$  dle vzorce (5-8). Výpočet matic  $W_1$  a  $W_2$  dle vzorce (5-7). Když je  $d_{1min} < d_i$ , tak  $w_{1,i} = 1$ , jinak  $w_{1,i} = 0$ . To samé platí pro  $w_{2,i}$ .

Vytvoření matic  $B_1$  a  $B_2$  dle vzorce (5-9), výpočet inverzních matic  $B_1^{-1}$  a  $B_2^{-1}$ .

Výpočet offsetů  $D_{1cos}$ ,  $D_{1sin}$  a  $D_{2cos}$ ,  $D_{2sin}$ . Všude čárku mezi indexy

$$Diff_{1x} = D_{1x} - L_{1x},$$

$$Diff_{1y} = D_{1y} - L_{1y},$$

$$SIG_1 = \tan^{-1}\left(\frac{Diff_{1y}}{Diff_{1x}}\right),$$

$$D_{1cos} = d_{2min} \cos(SIG_1),$$

$$D_{1sin} = d_{2min} \sin(SIG_1),$$

$$Diff_{2x} = D_{2x} - L_{2x},$$

$$Diff_{2y} = D_{2y} - L_{2y},$$

$$SIG_2 = \tan^{-1}\left(\frac{Diff_{2y}}{Diff_{2x}}\right),$$

$$D_{2cos} = d_{2min} \cos(SIG_2),$$

$$D_{2sin} = d_{2min} \sin(SIG_2).$$

Výpočet jednotlivých nových vrcholů  $L_{1x}$ ,  $L_{1y}$  a  $L_{2x}$ ,  $L_{2y}$  dle upraveného vzorce (5-6)

$$L_{1xs} = B_1^{-1}[\lambda_1 L_{1x} + \lambda_3 D_1^T * D_1 * L_{1x} + \lambda_4 W_1 * (D_{1x} - D_{1cos}) + \lambda_5 W_1 * D_1^T * D_1 * D_{1x}],$$

$$L_{1ys} = B_1^{-1}[\lambda_1 L_{1y} + \lambda_3 D_1^T * D_1 * L_{1y} + \lambda_4 W_1 * (D_{1y} - D_{1cos}) + \lambda_5 W_1 * D_1^T * D_1 * D_{1y}],$$

$$L_{2xs} = B_2^{-1}[\lambda_1 L_{2x} + \lambda_3 D_2^T * D_2 * L_{2x} + \lambda_4 W_2 * (D_{2x} - D_{2cos}) + \lambda_5 W_2 * D_2^T * D_2 * D_{2x}],$$

$$L_{2ys} = B_2^{-1}[\lambda_1 L_{2y} + \lambda_3 D_2^T * D_2 * L_{2y} + \lambda_4 W_2 * (D_{2y} - D_{2cos}) + \lambda_5 W_2 * D_2^T * D_2 * D_{2y}],$$

kde \* je maticový součin.

3. Vrácení výsledku  $L_{1xs}$ ,  $L_{1ys}$  a  $L_{2xs}$ ,  $L_{2ys}$ .

### Odsun 2 prvků a překážky

U této situace byla modifikace provedena podobně jako u vzájemného odsunu dvou linií. Z náhledu situace 3 (obrázek 7-3) bylo odvozeno pořadí jednotlivých dílčích posunů. První byla odsunuta linie  $L_1$  představující železnici od linie komunikace.  $L_2$ . Parametr pro detekci kolize  $d_{1,min}$  byl nastaven na 29,0 m a parametr odsunu  $d_{2,min} = 14,5$ . Výsledkem odsunu byla předzpracovaná data  $L_{1,new}$ .

V druhé fázi byl proveden odsun linie  $L_2$  od pevné překážky  $B$ , které zde reprezentovala hranici vodní plochy. Pro tento odsun byly změněny parametry minimální vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že hranice vodní plochy nemá šířku hrany, tak musel být tento parametr přepočítán opět dle vzorce (3-2) s tou obměnou, že  $s_2$  nesoucí informaci o šířce symbolu linie komunikace  $L_2$  bylo rovno 1 mm a  $s_b = 0$  mm (šířka hrany překážky). Tím bylo zajištěno dodržení minimální vzdálenosti od této hranice. Získaná minimální vzdálenost  $d_{1\ min} = d_{2\ min} = 29,0$  m. Tím byla získána poloha  $L_{2\ new}$ .

Nyní mohla být znovu odsunuta znovu již získaná data  $L_{1\ new}$  od linie  $L_{2\ new}$ . Tentokrát parametry nejmenší povolené vzdálenosti a velikosti odsunu byly vypočteny stejně jako v prvním kroku, ale s tou obměnou, že i  $d_{1\ min} = d_{2\ min} = 29,0$  m.

## 6.4 Volba a testování parametrů

Jedním z úkolů práce je analýza volby generalizačních parametrů. Pro obě metody byly tedy testovány jejich různé kombinace. Kombinace byly testovány pomocí vnořených cyklů tak, že všechny 3 výše popsané situace byly počítány s různými kombinacemi parametrů.

Pro metodu Snakes byl pevně zvolen parametr  $c$ , který určuje vliv vnější síly. Ten byl stanoven na  $c = 0,5$ . parametry vzdáleností byly voleny dle situace a jejich volba je popsána výše. Tyto parametry byly pro danou situaci vždy konstantní. Měněné parametry byly tedy  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ .

Parametry byly umístěny do 3 vnořených cyklů, kde každý měnil hodnotu jednoho parametru. Konkrétně byly postupně testovány tyto hodnoty parametrů 1, 100, 300, 400, 500, 600, 800, 900, 1000, 1300 a 1500. Bylo tedy testováno  $11^3$  kombinací. Pro toto testování byla zvolena prahová hodnota maximálního počtu iterací na 1000, protože u vyšších hodnot parametrů by mohl výpočet být příliš časově náročný. Hodnoty byly voleny na základě předchozí analýzy. Menší krok neměl na výsledky příliš velký vliv a vyšší hodnoty nedokázaly splnit požadavek na  $d_{min}$ .

U metody New Splines byly opět konstantní pro všechny výpočty parametry minimálních vzdáleností v závislosti na dané situaci. Rozdíl od předešlé metody je v tom, že k výpočtu je zapotřebí nastavit 5 parametrů místo 3. To vede k většímu množství kombinací. Na základě výsledků (Bayer et al. 2024) byly zvolené parametry omezeny na hodnoty 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Pro tyto hodnoty byly opět pomocí pěti vnořených cyklů



testovány vzájemné kombinace pro parametry  $\lambda_1$  až  $\lambda_5$ . Celkem se jednalo o  $9^5$  kombinací. Vyšší hodnoty nebyly testovány, protože dle (Bayer et al. 2024) je u parametrů důležitý jejich poměr, a ne absolutní hodnota.

Za pomoci této metody bylo získáno velké množství výsledků, které bylo potřeba analyzovat a porovnat. Kritéria a metody pro hodnocení kvality výsledků generalizace a vliv jednotlivých parametrů jsou popsány v následující kapitole.

## 6.5 Výpočet metrik a hodnocení vlivu parametrů

Dále bylo potřeba implementovat jednotlivé metriky a následně za jejich pomoci určit vliv jednotlivých parametrů.

Metriky Chamfer a Housdorff distance byly pro původní a generalizovanou polylinii vypočteny dle vzorců (5-10) a (5-11).

Rozdíl křivost byla určena z křivostí původní polylinie a polylinie po generalizaci vypočtené dle vzorce (5-13). Rozdíl byl poté normalizován na interval  $\langle 0, 1 \rangle$  s využitím

$$k = \frac{|k_1 - k_2|}{k_1 + k_2},$$

kde  $k$  je výsledná křivost a  $k_1, k_2$  jsou křivosti linie před a po generalizaci.

Pomocí rozdílu a následné normalizace byla vypočtena i metrika pro LLR pomocí vzorce (5-14). Poslední metrika Turning function byla vypočtena pomocí Python funkce (<https://pypi.org/project/turning-function/>).

Další krok představoval vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů  $\lambda_1$ -  $\lambda_5$  na generalizační operace a soulad s výše uvedenými pravidly. Pro tento účel byl použit přístup, kdy ostatní parametry, s výjimkou analyzovaného, měly konstantní hodnotu (1 nebo 0), zatímco hodnota analyzovaného parametru se plynule měnila.

Na tomto základě poté vybrány kombinace vstupních parametrů pro obě metody, aby poskytovaly co možná nejlepší výsledky splňující výše zmíněná pravidla generalizace. Hodnocení bylo provedeno s využitím metrik popsanych v kapitole 5.3.1.

Kombinace parametrů  $\lambda_1$ -  $\lambda_5$  byly vybrány tak, aby minimalizovaly hodnoty hodnotících kritérií. Zároveň však výsledek musel splňovat kritérium minimální vzdálenost, která je z pohledu řešené problematiky klíčová. Z jednotlivých kombinací byla následně vybrána

a vizualizována varianta s nejlepším hodnocením. Výstupy byly vizualizovány v programu ArcGIS Pro.

## 7 Přehled výsledků

Tato kapitola obsahuje popis použitých testovacích dat a prezentuje výsledky generalizace metodou Partial displacement. Kapitola je rozdělena do 2 částí. Podkapitola 7-1 obsahuje popis testovacích dat a 7-2 samotné výsledky získané metodami Snakes a New Splines. Jednotlivé generalizační metody jsou zde hodnoceny na základě výše definovaných metrik. Je zde hodnocen také vliv jednotlivých vstupních parametrů. Nakonec jsou zde porovnávány obě metody vůči sobě.

### 7.1 Data

Obě metody byly testovány na reálných datech dostupných na portále ČUZK. Konkrétně se jednalo o vektorová data ZTM10 ve formátu shapefile. Pro samotné testování obou metod byly zvoleny tři generalizační situace, které odpovídají schématům uvedeným v kapitole 4.3.

#### 7.1.1 Předzpracování dat

Všechny datasey byly následně předzpracovány tak, aby byly vhodné pro samotnou generalizaci. Jednotlivé situace byly ořezány jen na nejbližší zájmové okolí a byly ponechány jen objekty, které mají na generalizaci vliv; tím jsou myšleny jen nejbližší liniové objekty.

U samotných generalizovaných linií a překážek, které jsou s nimi v kolizi, bylo zapotřebí ještě upravit jejich geometrii, aby obě metody dosahovaly dostačujících výsledků. Tato úprava spočívala v přidání lomových bodů mezi jednotlivé úseky, které tvoří polylinie. Provedlo se tedy převzorkování jednotlivých objektů tak, že každý segment linie byl dvakrát iterativně rozdělen na dva nové, čímž došlo k navýšení hustoty bodů a zpřesnění výpočtů. Tyto pomocné body mohou být následně odstraněny pomocí jiných generalizačních operátorů.

Šířky jednotlivých symbolů  $s$  byly odečteny z mapy a následně použity pro výpočet minimální vzdálenosti dle vzorce (3-2), kterou je potřeba dodržet pro čitelnost mopy.

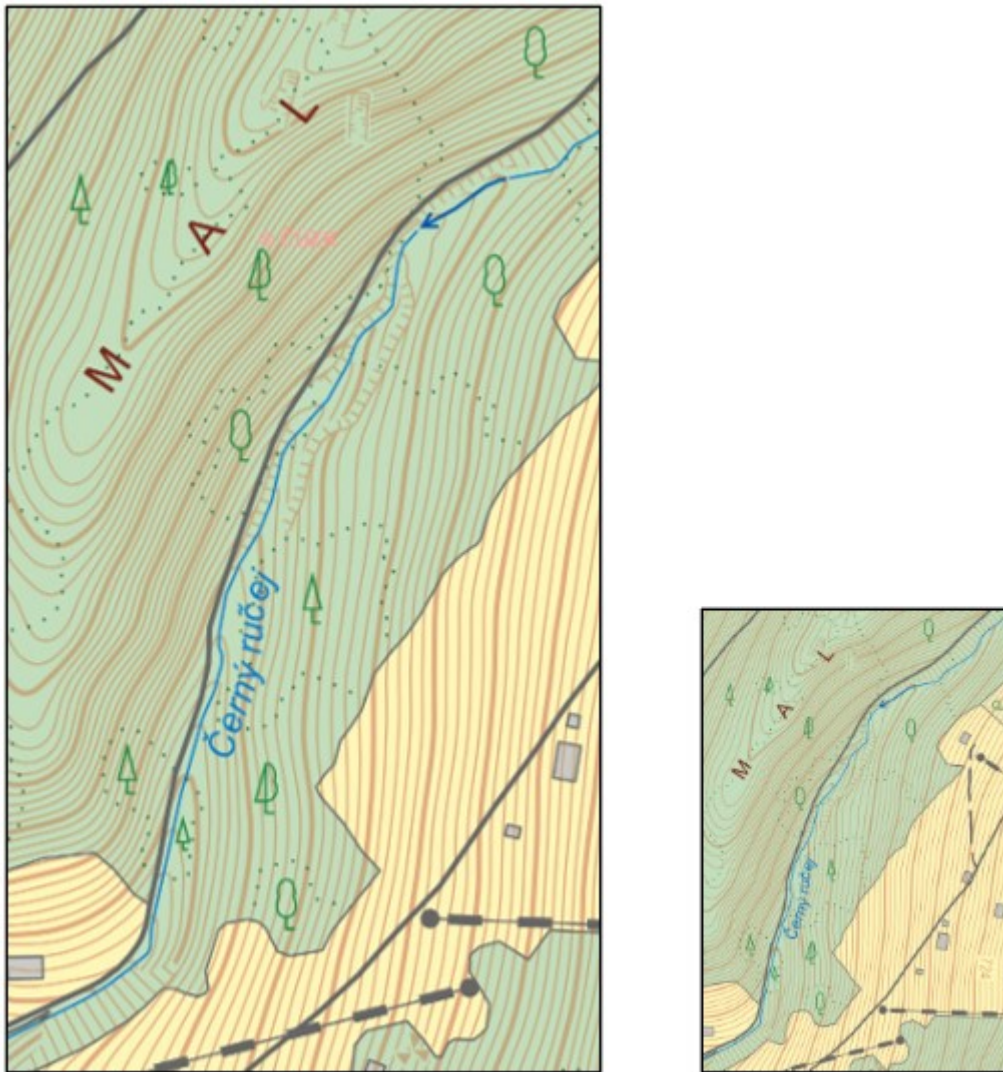
Data byla volena, aby odpovídala schématům v kapitole 4.3.

#### 7.1.2 Generalizovaná situace 1

V této situaci tedy dochází k odsunu jednoho prvku v závislosti na vzdálenosti od překážky, jejíž poloha se nemění. Pro testování parametrů metod bylo zvoleno místo u obce Vítkovice v Krkonoších (S-JTSK/Krovak: Y = 655777,45 m; X = 985856,36 m). Na obrázku č. 7-1 je situace zobrazena.

Do kolize se zde dostávají 2 objekty:

- pevný objekt (překážka) – vodní tok ( $s = 0,2$  mm),
- odsouvaná linie – komunikace ( $s = 0,5$  mm).



Obrázek 7-7-1 Situace 1 - přibližný pohled (vlevo), pohled v měřítku 1:10 000 (vpravo).  
Zdroj: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

### 7.1.3 Generalizovaná situace 2

Zde byla vstupní data tak, aby byly odsouvány a modifikovány dvě linie vzhledem k sobě. Pro testování a porovnání obou metod bylo vybráno místo u obce Volary (S-JTSK/Krovak: Y = 796407,18 m; X = 1165959,77 m), kde se dostávají do grafické kolize železnice a silnice:

- 1. odsouvaný prvek – železnice ( $s = 0,8$  mm),
- 2. odsouvaný objekt – komunikace ( $s = 1,0$  mm).

Náhled dat je na obrázku 7-2.



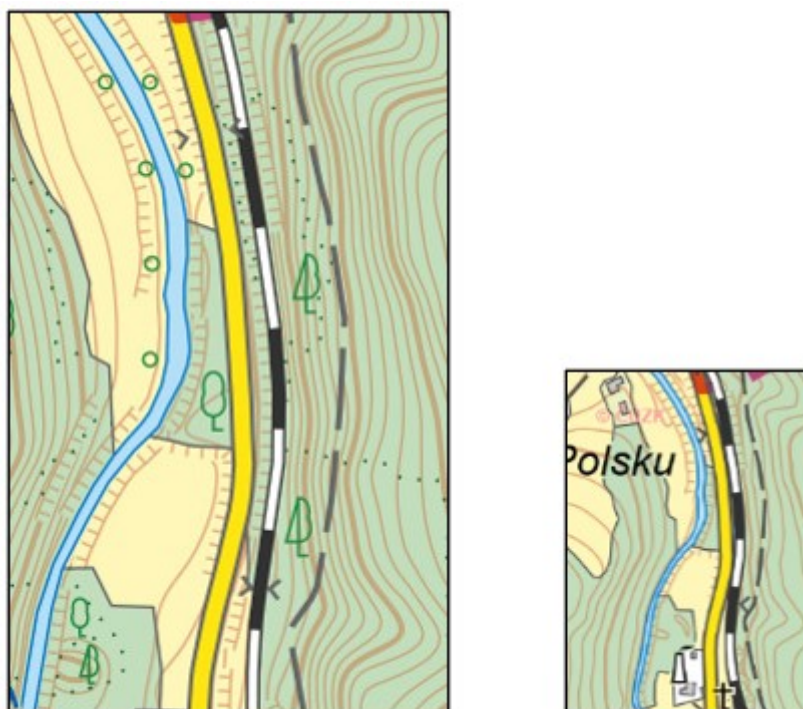
Obrázek 7-2 Situace 2 - přibližný pohled (nahore), pohled v měřítku 1:10 000 (dole).  
Zdroj: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

### 7.1.4 Generalizovaná situace 3

Pro třetí situaci, kde jsou odsouvány 2 linie od sebe a zároveň od překážky byla zvolen v okolí obce Nová ves nad Popelkou (S-JTSK/Krovak: Y = 663394,94 m; X = 1004519,05 m). Zde jsou vůči sobě odsouvání objekty:

- 1. odsouvaný prvek – železnice ( $s = 0,8$  mm),
- 2. odsouvaný objekt – komunikace ( $s = 1,0$  mm),
- pevný objekt – plocha vodního toku ( $s$  je zde 0, šířku určuje sama velikost plochy).

Ukázka dat se nachází na obrázku 7-3.



Obrázek 7-3 Situace 3 - přibližný pohled (vlevo), pohled v měřítku 1:10 000 (vpravo).  
Zdroj: <https://ags.cuzk.cz/geoprohlizec/>

## 7.2 Výsledky

Tato podkapitola popisuje výsledky dosažené metodami Snakes a New Splines. Kapitola je rozdělena do 3 částí. Nejprve jsou analyzovány vliv parametrů s cílem nalézt jejich optimální hodnoty pro Snakes (viz kap. 7.3.1) a New Splines (viz kap. 7.3.2). V kapitole 7.3.3 jsou na třech vzorových situacích porovnány obě metody, dosažené výsledky jsou následně diskutovány.

### 7.2.1 Vliv parametrů – metoda Snakes

Výše zmíněnou metodou byly získány výsledky pro různé kombinace parametrů generalizace  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Na obrázcích jsou vizualizovány závislosti jednotlivých metrik, které hodnotí kvalitu generalizace na vstupních parametrech generalizace. Výsledné

grafy, znázorňují, jak se mění jednotlivé hodnoty kritérií při změně zkoumaného parametru, zatímco ostatní parametry jsou volny jako konstantní.

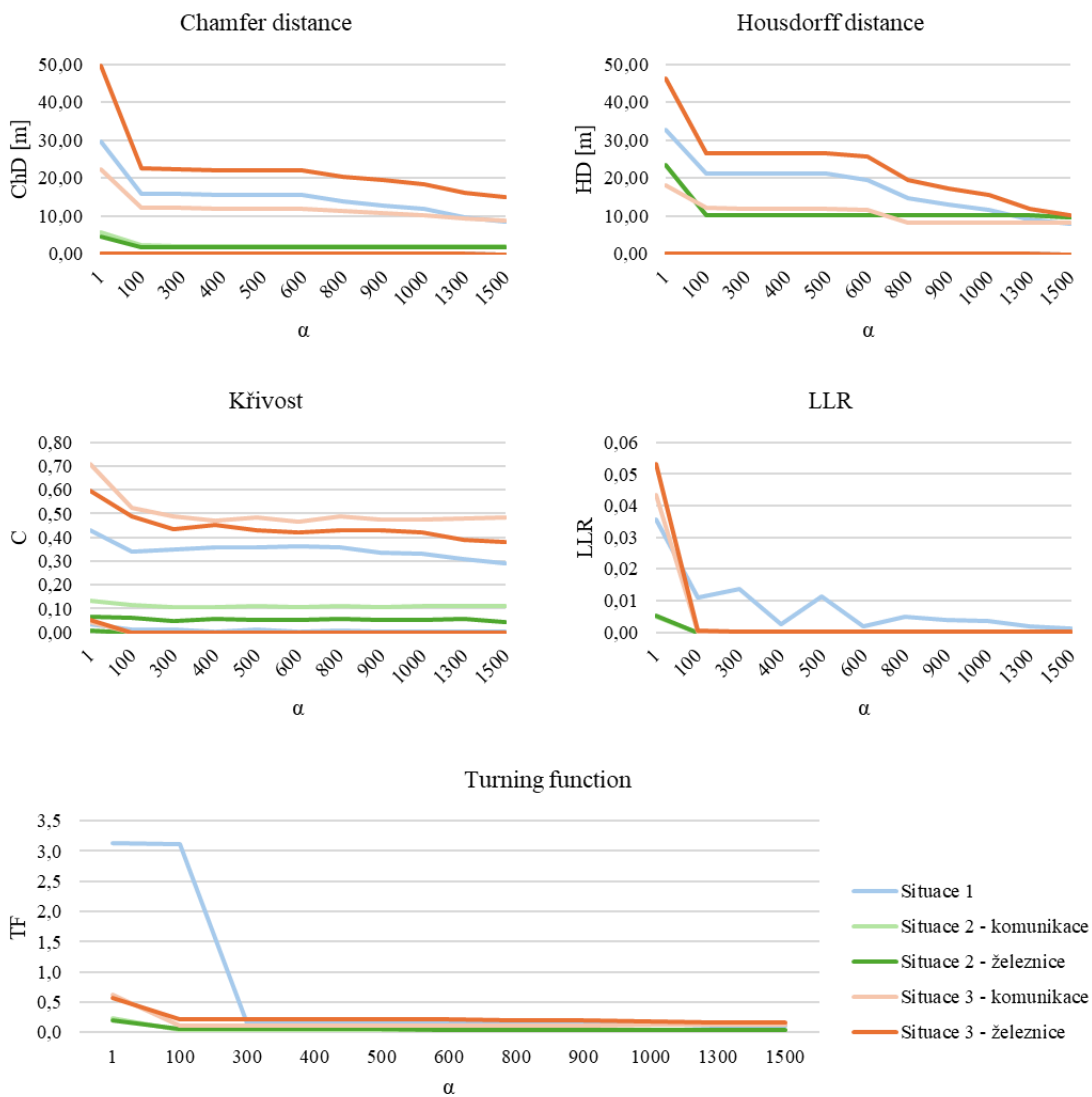
### **Závislost hodnotících metrik na $\alpha$**

Na obrázku 7-4 je zobrazena závislost hodnotících metrik na parametru  $\alpha$  pro jednotlivé generalizační situace. Z grafu pro Chamfer a Hausdorff distance lze pozorovat skokovou změnu jejich hodnoty na intervalu  $\alpha = (1, 100)$ . Dále obě vzdálenosti klesají s rostoucím hodnotou  $\alpha$  pozvolně. Lze tedy říci, že pro nízké hodnoty  $\alpha$  jsou výsledky nepřesné v poloze.

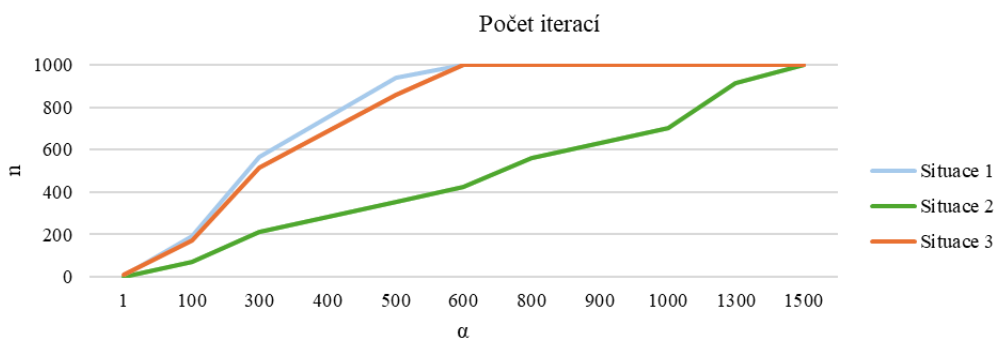
Podobné chování lze pozorovat pro křivost, LLR a Turning function, následně jejich hodnoty klesají již velice pomalu. Při porovnání chování napříč jednotlivými situacemi lze odečíst, že se metriky a parametry chovají podobně. Je zde rozdíl převážně v absolutních číslech, ale trend zůstává zachován.

Pouze u Turning function lze pozorovat, že po dosažení prahové hodnoty  $\alpha = 300$ , již dochází jen k malému zlepšení výsledků

Obrázek 7-5 poté zobrazuje, jak ovlivňuje hodnota  $\alpha$  počet iterací k dosažení výsledku, který by splňoval podmínku minimální vzdálenosti. Z grafu je patrné, že počet iterací narůstá zhruba lineárně v závislosti na  $\alpha$ . Počet iterací je omezen prahovou hodnotou 1000. Této hodnoty bylo dosaženo pro různé situace v různý okamžik. Například situace 2 se k této hodnotě dostala až pro  $\alpha = 1500$  zatímco situace 1 a 3 pro  $\alpha = 600$ . Tento trend je pozorovatelný i na grafech s Hausdorff a Chamfer distance, kde po jejím dosažení začínají vzdálenosti výrazně klesat.



Obrázek 7-4 Vliv parametru  $\alpha$  na jednotlivé metriky



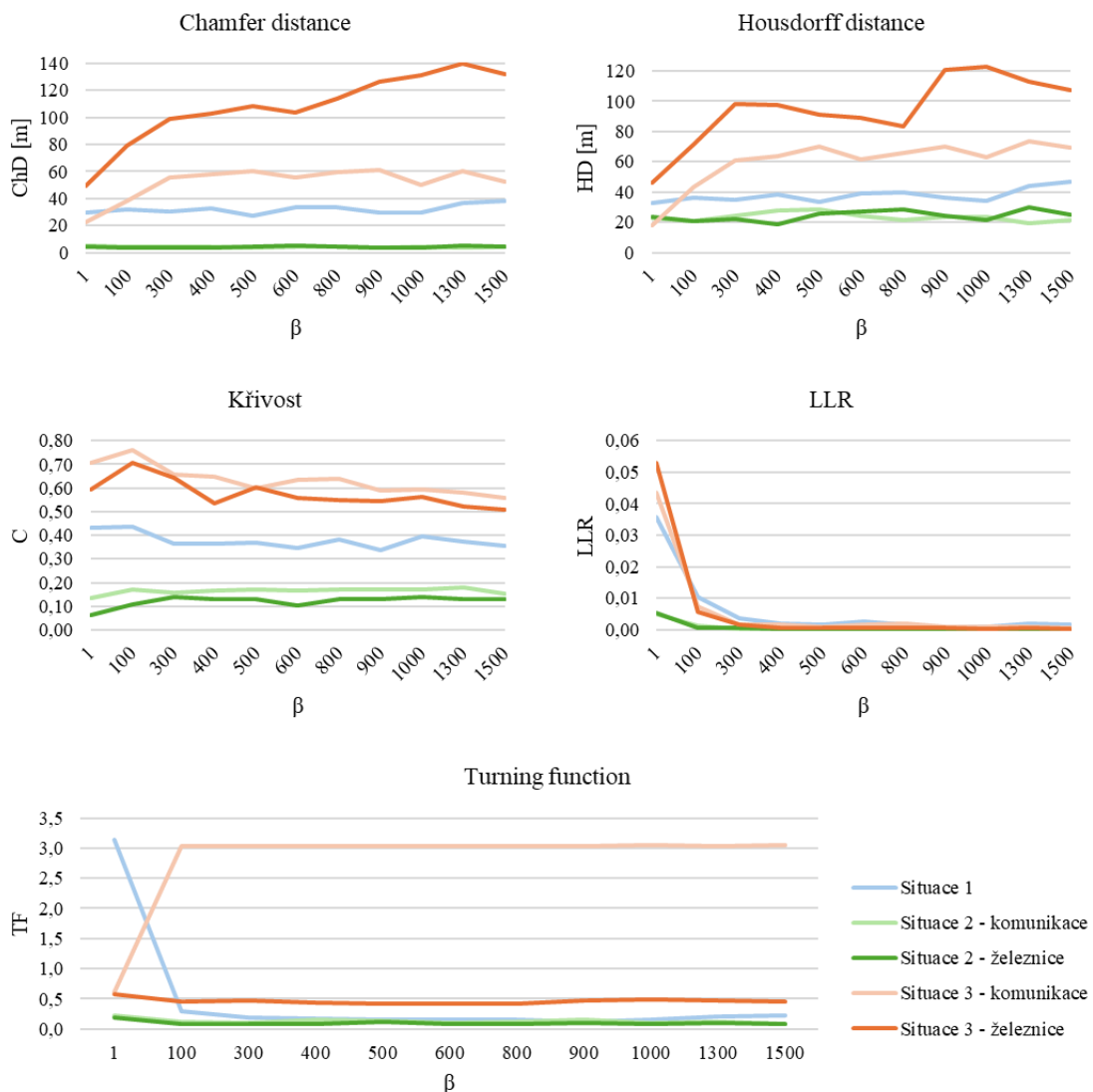
Obrázek 7-5 Vliv parametru  $\alpha$  na počet iterací

### Závislost hodnotících metrik na $\beta$



Závislosti hodnotících metrik na parametru  $\beta$  jsou vizualizovány v grafech na obrázcích 7-6 a 7-7. Při pohledu na grafy Chamfer a Housdorff distance lze vidět rozdílný trend, a pozvolný nárůst vzdáleností v závislosti na  $\beta$  u situace 3 (jedná se o červenou a oranžovou linii). U situací 1 a 2 je trend nejasný, projevuje se spíše drobnými oscilacemi. Dle výsledků lze soudit, že závislost parametru  $\beta$  je ovlivněna vstupními daty.

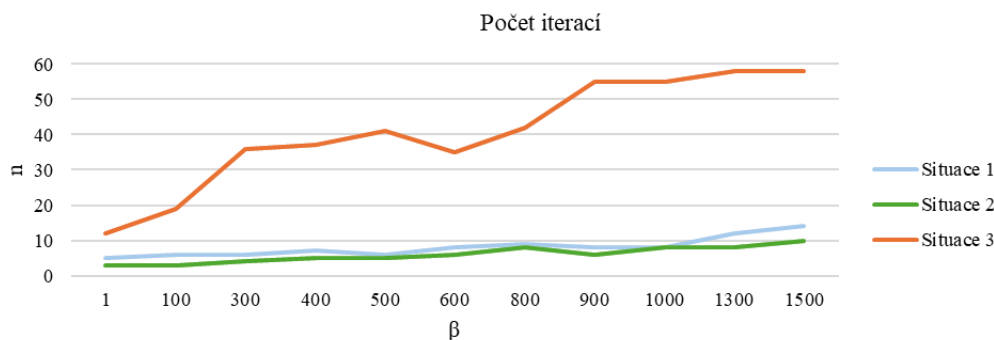
Na grafu znázorňujícím křivost je vidět podobný trend jako na obrázku 7-4 pro parametr  $\alpha$ , křivost pro vyšší hodnoty  $\beta$  klesá. Samostatný vliv je spíše nejednoznačný a u každé situace rozdílný. Pro situaci 3, kde je pokles nejvýraznější, hodnota křivosti klesá strměji do hodnoty  $\beta = 400$  a poté klesá pomaleji. Pro situaci 1 klesá křivost do hodnoty  $\beta = 300$  a poté hodnota rozdílů křivosti osciluje v intervalu 0,4 a 0,3. Pro situaci 2 naopak  $\beta$  roste až k hodnotě 300, a poté se příliš nemění.



Obrázek 7-6 Vliv parametru  $\beta$  na jednotlivé metriky

Vliv  $\beta$  na hodnoty LLR je srovnatelný s vlivem parametru  $\alpha$ . Největší rozdíl této metriky nasává na intervalu  $\beta = (1, 100)$ . Turning function se chová obdobně jako LLR, ale pokles není tak strmý. Navíc pro situaci 3 naopak rozdílnost tvarů stoupá, poté se ustálí na konstantní hodnotě.

Obrázek 7-7 popisuje opět vliv  $\beta$  parateru na počet iterací. Pro situaci 3 sice křivka počtu iterací roste, ale roste ve výrazně pomaleji, než tomu bylo pro parametr  $\alpha$ .



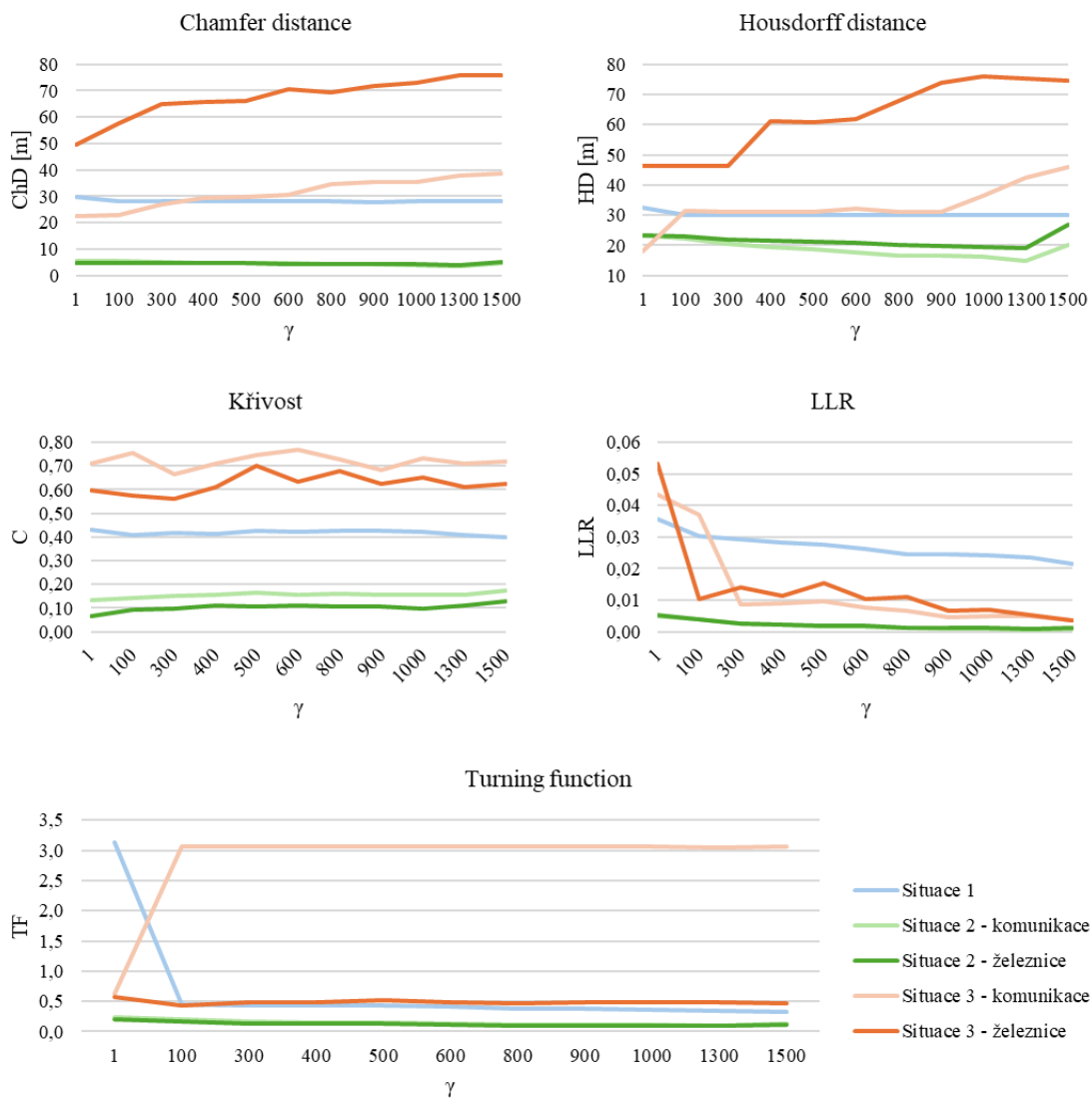
Obrázek 7-7 Vliv parametru  $\beta$  na počet iterací

### Závislost hodnotících metrik na $\gamma$

Poslední zkoumaný parametr metody Snakes je  $\gamma$ . Výsledky jsou znázorněny na obrázcích 7-8 a 7-9. První dva grafy z obrázku 7-8, které zobrazují Chamfer a Hausdorff distance, mají na první pohled podobnou závislost jako parametr  $\beta$ , rozdíl je však především v hodnotách, kde dosahují maxima (80 m místo předešlých 140 m). Znovu se zde opakuje situace výrazných rozdílů metrik pro jednotlivá vstupní data. Další rozdíl je pozorovatelný u konce intervalu, kde pro Hausdorff distance vidíme u situace 2 nárůst vzdáleností pro  $\gamma = 1300$ . Naopak pro situaci 1 jsou obě vzdálenosti konstantní a nezávisí na  $\gamma$ .

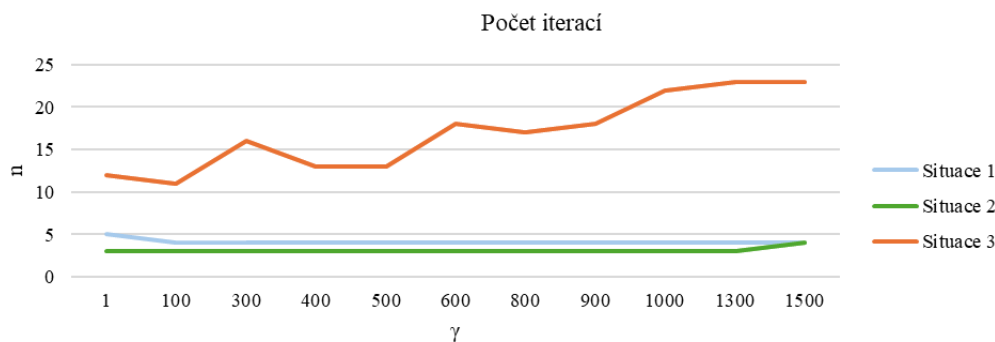
Graf vlivu na křivost ukazuje, že je tato metrika nezávislá na  $\gamma$ . Data situace 3 kolísají mezi hodnotami 0,8 a 0,55, pro ostatní situace jsou rozdíly daleko menší.

Vliv  $\gamma$  na LLR a křivost je srovnatelný s parametrem  $\beta$ . Opět je zde viditelná prahová hodnota vlivu parametru  $\gamma = 100$ . S rostoucími hodnotami  $\gamma$  se vliv na LLR ztrácí. Znovu je pozorovatelná závislost na vstupních datech pro Turning function, kde se pro data situace 3 chová zpočátku odlišným způsobem než situace ostatní.



Obrázek 7-8 Vliv parametru  $\gamma$  na jednotlivé metriky

Poslední obrázek 7-9 pro metodu Snakes ukazuje vliv  $\gamma$  na počet iterací. Obdobně jako na obrázku 7-7 je pro dvě situace patrná nezávislost počtu iterací na  $\gamma$ . Jen u situace 3 vidíme mírný nárůst, avšak menší než u parametru  $\beta$ , kde se množství iterací k dosažení kýžené minimální vzdálenosti blížilo k 60. Zde je tomu méně než 25.



Obrázek 7-9 Vliv parametru  $\gamma$  na počet iterací

## 7.2.2 Vliv parametrů – New Splines

Výsledky závislosti metrik na vstupních parametrech byly pro metodu New Splines získány a vyhodnoceny obdobným způsobem. Pro tuto metodu je zkoumáno 5 parametrů namísto 3. Pro všechny parametry byly opět vytvořeny grafy, které znázorňují vliv parametrů na jednotlivé metriky hodnotící generalizaci. Jeden parametr se vždy mění, ostatní zůstávají konstantní na hodnotě 1. Na rozdíl od Snakes, není u této metody hodnocen vliv počtu iterací na jednotlivé parametry, metoda byla volána vždy jen jednou.

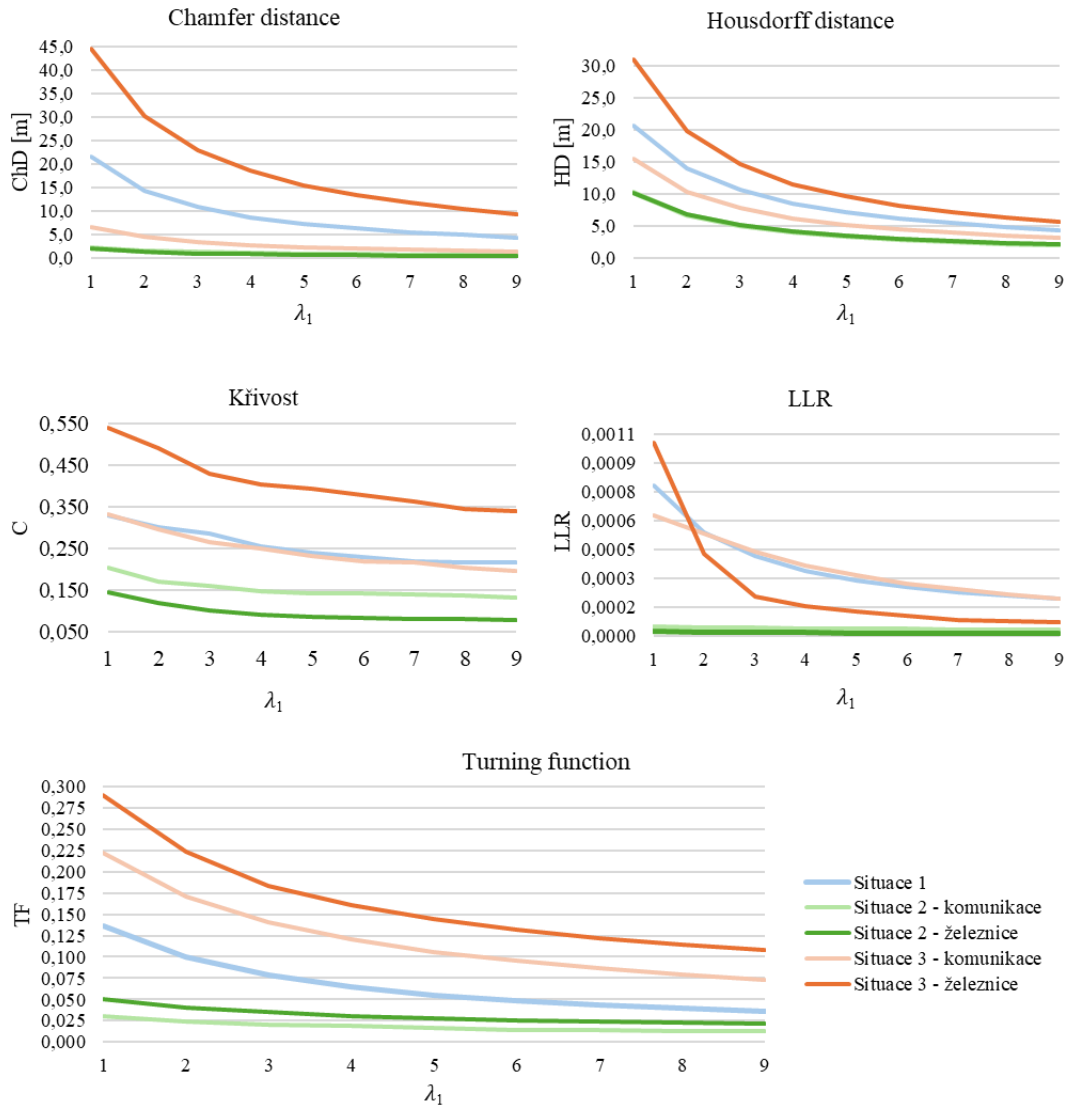
### Závislost hodnotících metrik na $\lambda_1$

Na obrázku 7-10 je znázorněn první parametr  $\lambda_1$  v 5 grafech. Z grafů pro Chamfer a Hausdorff distance je patrné, že parametr  $\lambda_1$  ovlivňuje vzdálenost, o jakou bude linie posunuta. Čím je parametr vyšší tím je polohová přesnost linie vyšší a dochází k menším odchýlkám. Podoba trendu kopíruje exponenciální křivku, kde k největším změnám dochází mezi parametry na intervalu  $\lambda_1 = (1, 3)$  a následně vliv klesá. Absolutní hodnoty vzdáleností jsou poté ovlivněny vstupními daty.

Metriky popisující rozdíl mezi tvarem výsledné a generalizované polylinie kopírují tento trend. Rozdíly křivosti a Turning function klesají pomaleji, oproti parametru  $\alpha$  na obrázku 7-4 dochází k daleko menší oscilaci hodnot, ale vliv tohoto parametru je podobný. Vliv  $\lambda_1$  na LLR opět klesá pro situace 1 a 3 exponenciálně. Pro linii reprezentující železnici v situaci 3 je vidět prudký pokles rozdílů na intervalu  $\lambda_1 = (1, 3)$ . Naopak, pro situaci 2 je pozorovatelný pouze malý pokles rozdílů LLR.

### Závislost hodnotících metrik na $\lambda_2$

Vliv parametru  $\lambda_2$  se nachází na obrázku 7-11. Hned na první pohled zaujme fakt, že tento parametr nemá žádný vliv na odchylky ve vzdálenostech linií. Grafy pro Chamfer distance a Hausdorff distance jsou prakticky konstantní a neměnné pro hodnoty  $\lambda_2 = 1$  až  $\lambda_2 = 9$ . Tento parametr ovlivňuje pouze vyhlazení generalizované polylinie.

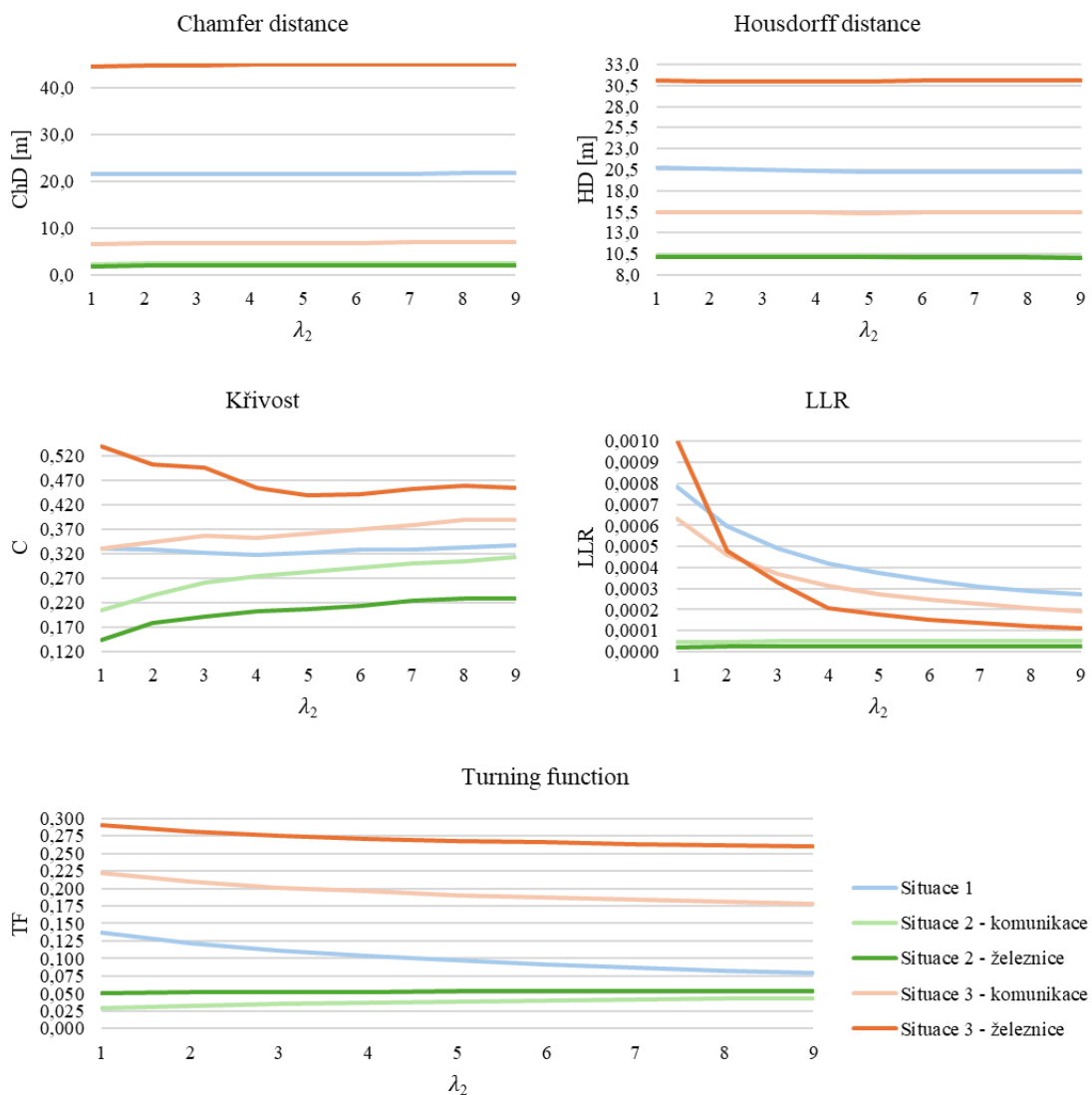


Obrázek 7-10 Grafy vliv parametru  $\lambda_1$  na jednotlivé metriky

Vliv na křivost parametru  $\lambda_2$  je z obrázku těžko popsatelný. Pro každou situaci se chová rozdílně. U situace 1 nemá výrazný vliv a křivka se drží okolo hodnoty 0,32. Pro data ze situace 2 naopak s narůstající hodnotou parametru postupně rozdíl v křivostech roste. Pro linii železnice stoupá od 0,14 až po 0,22. u dat pro komunikaci stoupá křivost podobným tempem od 0,20 až po 0,32. Pro parametr  $\lambda_2 = 1$  až  $\lambda_2 = 5$  data železnice situace 3 naopak rozdíl v křivosti klesá.

Závislost LLR je srovnatelná a podobná jako u parametru  $\lambda_1$ . Turning function se s parametrem  $\lambda_2$  mění velice pomalu. Pro situace 1 a 3 pomalu klesá s narůstající hodnotou  $\lambda_2$ , zatímco pro situaci 2 je patrný pomalý nárůst Turning function. Trend je však spíše ovlivněn daty samými než přímo samotným  $\lambda_2$ . Protože  $\lambda_2$  ovlivňuje hladkost polylinie, hodnoty LLR klesají.

Dle původní hypotézy by měl být průběh křivosti a LLR podobný, protože obě metriky hodnotí zachování hladkosti linie. Při jejich porovnání jsou průběhy rozdílné.



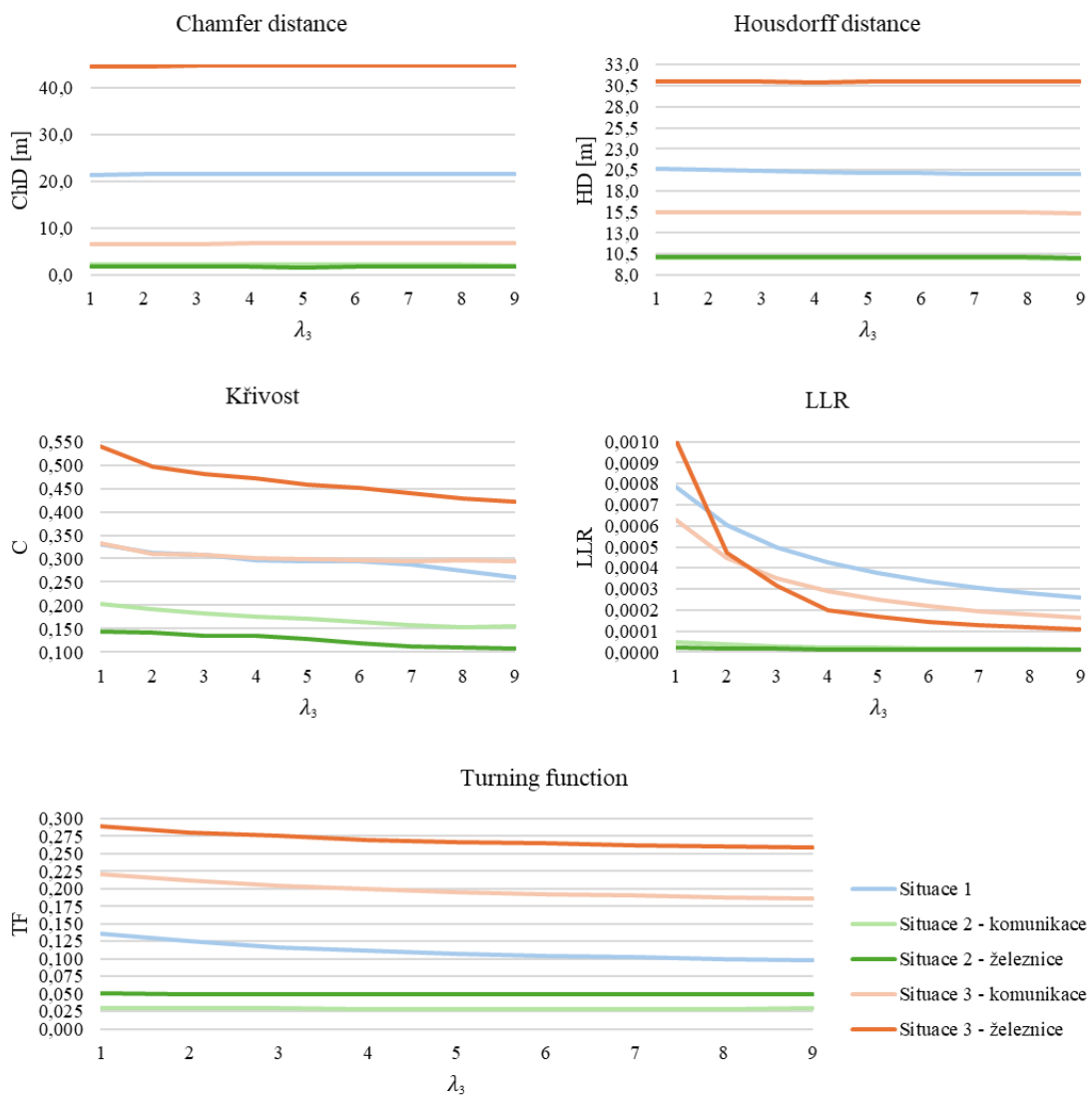
Obrázek 7-11 Vliv parametru  $\lambda_2$ .

### Závislost hodnotících metrik na $\lambda_3$

Obrázek 7-12 popisuje vliv parametru  $\lambda_3$  na hodnotící metriky. U tohoto parametru je opět vidět pro Chamfer a Hausdorff distance stejné chování jako u  $\lambda_2$ . I absolutní hodnoty

kritérií jsou v tomto případě srovnatelné. Podobné trendy jsou pozorovatelné i na změnách hodnot metrik LLR a Turning function. Absolutní hodnoty výsledků a jejich průběh se zdají být velice podobné.

Graf křivosti je zde naopak porovnatelný spíše s hodnotami a průběhy pro parametr  $\lambda_1$ . Malé rozdíly tu však pozorovatelné jsou, a to především v rychlosti poklesu hodnot s narůstající hodnotou  $\lambda_3$ . Zde je pokles hodnot o něco méně výrazný a v absolutních číslech se tedy minimální hodnoty pohybují v nepatrně větších číslech.

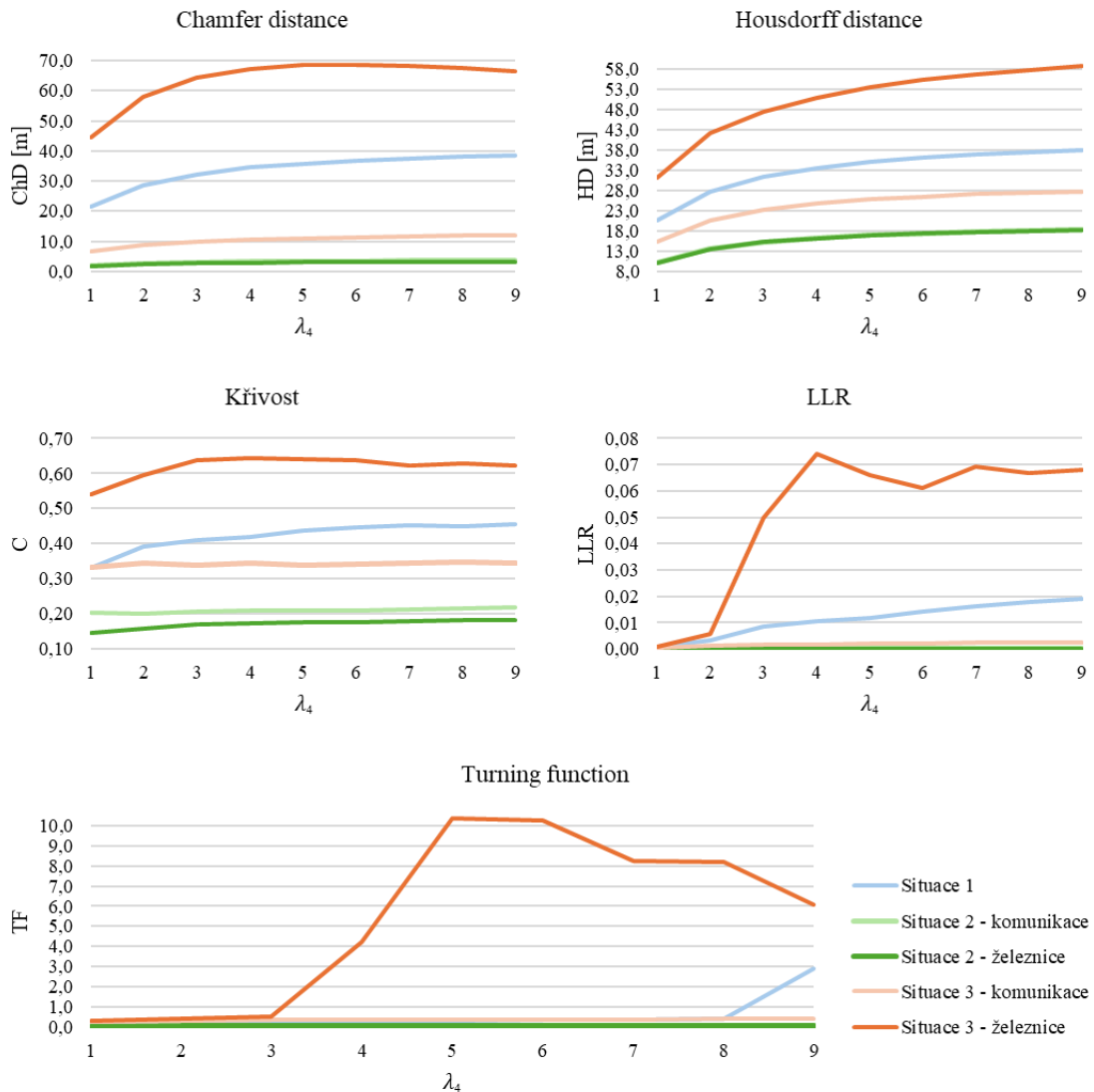


Obrázek 7-12 Vliv parametru  $\lambda_3$ .

### Závislost hodnotících metrik na $\lambda_4$

Další dva parametry, které byly hodnoceny, popisují vliv vnějších energií. Parametr  $\lambda_4$  je vizualizován na obrázku 7-13. Hned na první pohled je vidět změna v chování

Chamfer a Hausdorff distance. Obě metriky rostou se zvyšující se hodnotou  $\lambda_4$ , nárůst připomíná logaritmickou křivku. Toto chování je očekávané, protože  $\lambda_4$  ovlivňuje odchylky mezi generalizovaným prvkem a překážkou.



Obrázek 7-13 Vliv parametru  $\lambda_4$ .

Odchylky křivosti v závislosti na  $\lambda_4$  pomalu rostou, a to nejvíce na intervalu (1, 3). Pro další hodnoty reste křivost velmi pomalu nebo je konstantní, a to v závislosti na vstupních datech. LLR a Turning function pro tento parametr vykazují zajímavé chování. U LLR je vidět velký výkyv v datech pro situaci 3, konkrétně se jedná o data reprezentující železnici. Dochází zde k velkému nárůstu rozdílů LLR na intervalu  $\lambda_4 = (2, 4)$ , poté rozdíl již osciluje. U dat situace 1 kritérium LLR roste pomalu a pro ostatní

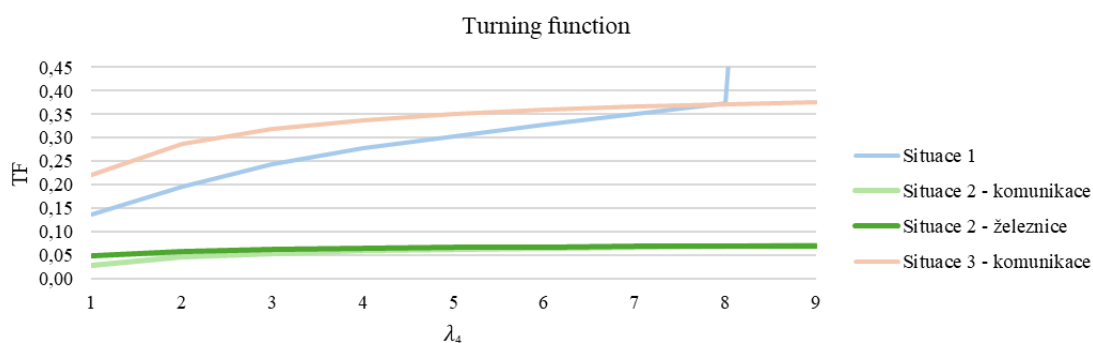


data narůstá jen nepatrně a má spíše konstantní průběh. Je to způsobené modifikací generalizovaného prvku tak, že přebírá tvar překážky.

Metrika Turning function je opět odlišná pro situaci 3 – železnice. Na intervalu  $\lambda_4 = (4, 5)$  strmě roste a poté začíná naopak klesat. U ostatních situací je pak patrná jejich malá citlivost vzhledem k  $\lambda_4$ . Po odstranění dat situace 3 je lépe vidět trend pomalého nárůstu hodnoty Turning function s v závislosti na  $\lambda_4$ ; viz Obr. 7-14.

### Závislost hodnotících metrik na $\lambda_5$

Poslední zkoumaný parametr byl  $\lambda_5$ . Výsledky jsou znázorněny na obrázku č. 7-15. Grafy Chamfer a Hausdorff distance opět ukazují, že parametr  $\lambda_5$  na tyto metriky nemá významný vliv. Dochází zde jen k malým změnám hodnot. To je způsobeno tím, že hodnota tohoto parametru určuje, jak moc se bude výsledný tvar generalizované linie podobat překážce.

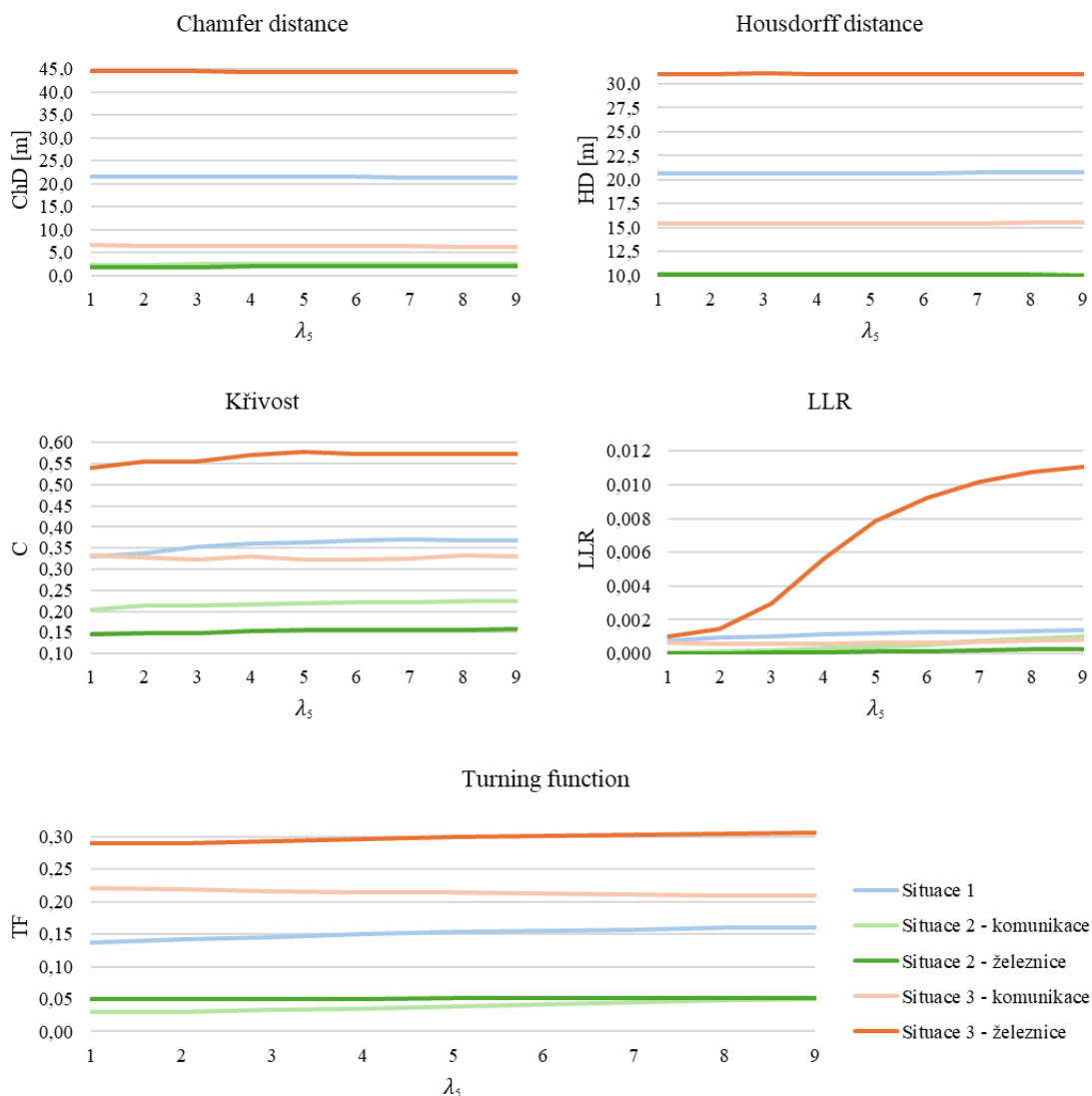


Obrázek 7-14 Vliv parametru  $\lambda_4$  s vybranými daty.

Trend vlivu  $\lambda_5$  je podobný  $\lambda_4$ , avšak s pomalejším růstem. Hodnota je závislá na datech představující překážky, na jejich hladkosti či míře vzorkování. Rozdíl křivostí také narůstá, ale pomaleji a v menších absolutních hodnotách. U hodnot Turning function dochází v porovnání s  $\lambda_4$  k odlišnému chování, hodnoty kritérií se s narůstajícím parametrem  $\lambda_5$  příliš nemění, a to pro všechny situace.

Poslední zkoumaná metrika byl rozdíl LLR. Situace 3 – železnice má opět výrazně jiné chování než ostatní situace. Dochází zde k strmějšímu nárůstu stejně jako u LLR pro  $\lambda_4$ . Důvodem je fakt, že překážka, jejíž tvar je kopírován (vodní tok), není tak hladká jako železnice. Pro ostatní data LLR také roste ale pomalejším tempem.

Vyhodnocení, diskuze a shrnutí vlivů jednotlivých parametrů na metriky je popsáno v kapitole 8.



Obrázek 7-15 Vliv parametru  $\lambda_5$ .

### 7.2.3 Porovnání a vyhodnocení metod

V této kapitole jsou mezi sebou porovnány obě metody. Bylo testováno všechny zvolené kombinace s parametry v intervalech definovaných v kapitole 6.4. Následně zde jsou prezentovány jen vybrané výsledky, které mají nejmenší součet všech hodnotících kritérií. Nvíc musela být hodnota Chamfer distance a Hausdorff distance normalizována, aby neměla tak velký vliv na výsledek. Normalizace proběhla tak, že jednotlivé vzdálenosti byly vyděleny nejdelší možnou vzdáleností v datasetu.

V tabulce 7-1 jsou čtyři výsledků pro situaci 1 generalizované pomocí Snakes.  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1300$ ,  $\gamma = 800$ . Zde je zajímavé porovnání s výsledky pro parametry  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 400$ ,  $\gamma = 800$ . Druhá možnost zachovává lépe přesnost v poloze díky menším hodnotám ChD a

HD. Zatímco první možnost naopak minimalizuje křivost. K dosažení obou výsledků bylo zapotřebí 9 a 10 iterací.

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$d_{\min}$ [m]	ITER	HD [m] (norm)	ChD [m] (norm)	TF	C	LLR	Celk..
1	1300	800	23,6657	9	38,7216 (0,0413)	30,2756 (0,0322)	0,1334	0,2721	0,0006	0,4797
1	1300	600	23,7111	9	36,6630 (0,0391)	29,9887 (0,0319)	0,1273	0,3083	0,0009	0,5076
1	1500	900	24,3607	10	39,7144 (0,0423)	31,6814 (0,0337)	0,1343	0,2995	0,0004	0,5104
1	400	800	24,3801	6	35,7666 (0,0381)	29,3997 (0,0313)	0,1402	0,3041	0,0010	0,5147

Tabulka 7-1 Výběr výsledků pro Snakes – situace 1.

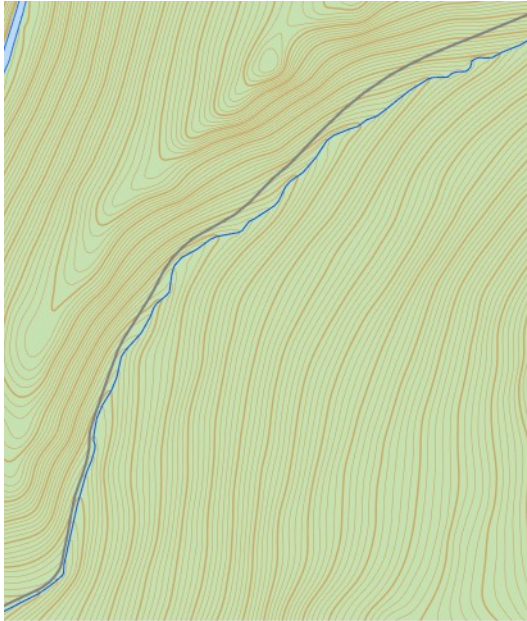
Tyto dva výsledky jsou poté zobrazeny na obrázku 7-16. Z obrázku lze pozorovat že možnost s parametry  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 400$   $\gamma = 800$  přebírá trochu více tvar překážky. Rozdíl je nepatrný, ale některé zákruty jsou hlubší, než je tomu pro výsledky s parametry  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1300$   $\gamma = 800$ . Toto pozorování koresponduje s rozdíly v metrikách křivosti, LLR a TF.

Výsledky stejné situace, ale pro metodu New Splines jsou v tabulce 7-2. Zde jsou hodnoty všech výsledku skoro totožné. I zvolené parametry zde nabývají podobných hodnot. Při porovnání s výsledky v tabulce 7-1 lze pozorovat výrazně nižší hodnoty HD. Ostatní metriky jsou pak podobné nebo nepatrně vyšší. Součet metrik je pak pro New Splines také o něco větší. To je způsobeno potlačením vah metriky HD a tím dán větší důraz na zachování tvaru linie.

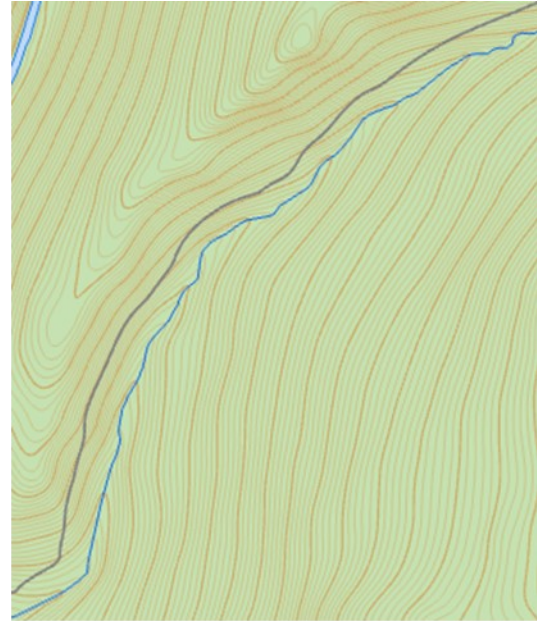
$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$d_{\min}$ [m]	HD [m] (norm)	ChD [m] (norm)	TF	C	LLR	Celk..
1	7	9	3	1	27,7631	30,1552 (0,0320)	32,6970 (0,0347)	0,1397	0,3211	0,0005	0,5280
1	6	9	3	1	27,7555	30,1546 (0,0320)	32,6829 (0,0347)	0,1423	0,3189	0,0005	0,5285
1	8	9	3	1	27,7702	30,1547 (0,0320)	32,7102 (0,0347)	0,1374	0,3249	0,0005	0,5295
1	5	9	3	1	27,7475	30,1526 (0,0320)	32,6676 (0,0347)	0,1450	0,3176	0,0006	0,5299

Tabulka 7-2 Výběr výsledků pro New Splines – situace 1

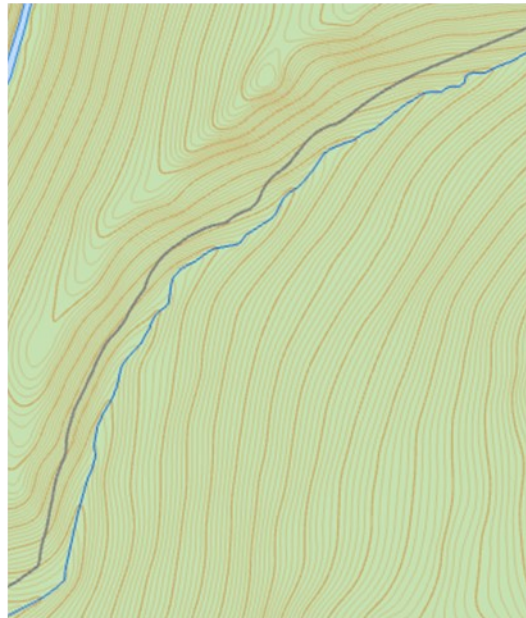
Vizualizován byl na obrázku 7-17 nejlepší výsledek s parametry  $\lambda_1 = 1$ ,  $\lambda_2 = 7$ ,  $\lambda_3 = 9$ ,  $\lambda_4 = 3$  a  $\lambda_5 = 1$ . Ostatní nebyly vizualizovány, protože metriky i parametry nabývají podobných hodnot. Při porovnání s obrázkem 7-16 není vidět příliš velký rozdíl ve tvaru linie získané pomocí Snakes s parametry  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1300$   $\gamma = 800$ .



původní

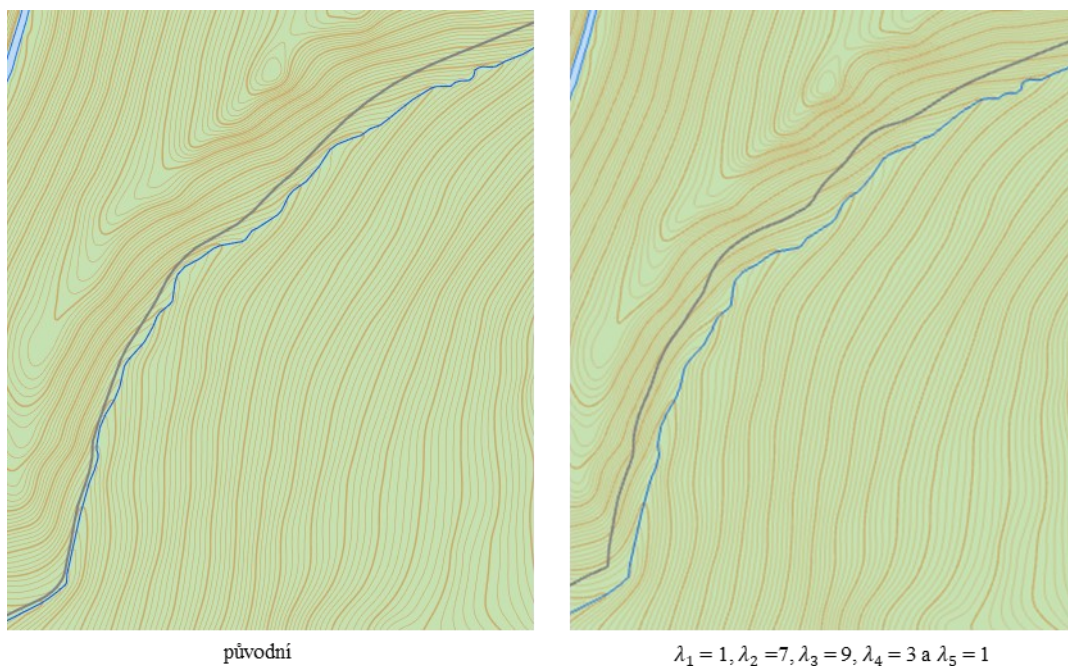


$\alpha = 1, \beta = 1300 \gamma = 800$



$\alpha = 1, \beta = 400 \gamma = 800$

*Obrázek 7-16 Situace 1 – Snakes (1 : 10 000)*



Obrázek 7-17 Situace 1 - New Splines (1: 10 000)

Výsledky druhé situace pomocí metody Snakes jsou v tabulce 7-3. Nejlepších výsledků dle sumy kritérií bylo dosaženo s parametry  $\alpha = 300$ ,  $\beta = 1$   $\gamma = 1$ . jednotlivé sumy se příliš neliší. Pro vizualizaci na obrázku 7-18 byl proto vybrán jen tento výsledek. Za povšimnutí stojí fakt, že k dosažení minimální prahové vzdálenosti linií bylo zapotřebí výrazně více iterací než pro situaci 1. Pro nejlepší výsledek z hlediska metrik tomu bylo 212 namísto 9. Při pohledu do tabulky je také pozorovatelné, že největší vliv na výsledky mají parametry  $\alpha$  a  $\beta$ , protože  $\gamma$  je jediná měněna a nemá ta velkou váhu.

Pro Metodu New Splines jsou výsledky v tabulce 7-4. Při pohledu na součet kritérií i na kritéria samostatně je hned patrné, že pro tuto situaci byly výsledky generalizace metodou New Spline horší. Rozdíl je nejpatrnější pro kritérium křivosti u linie reprezentující železnici. Výsledek je také vizualizován na obrázku 7-18.

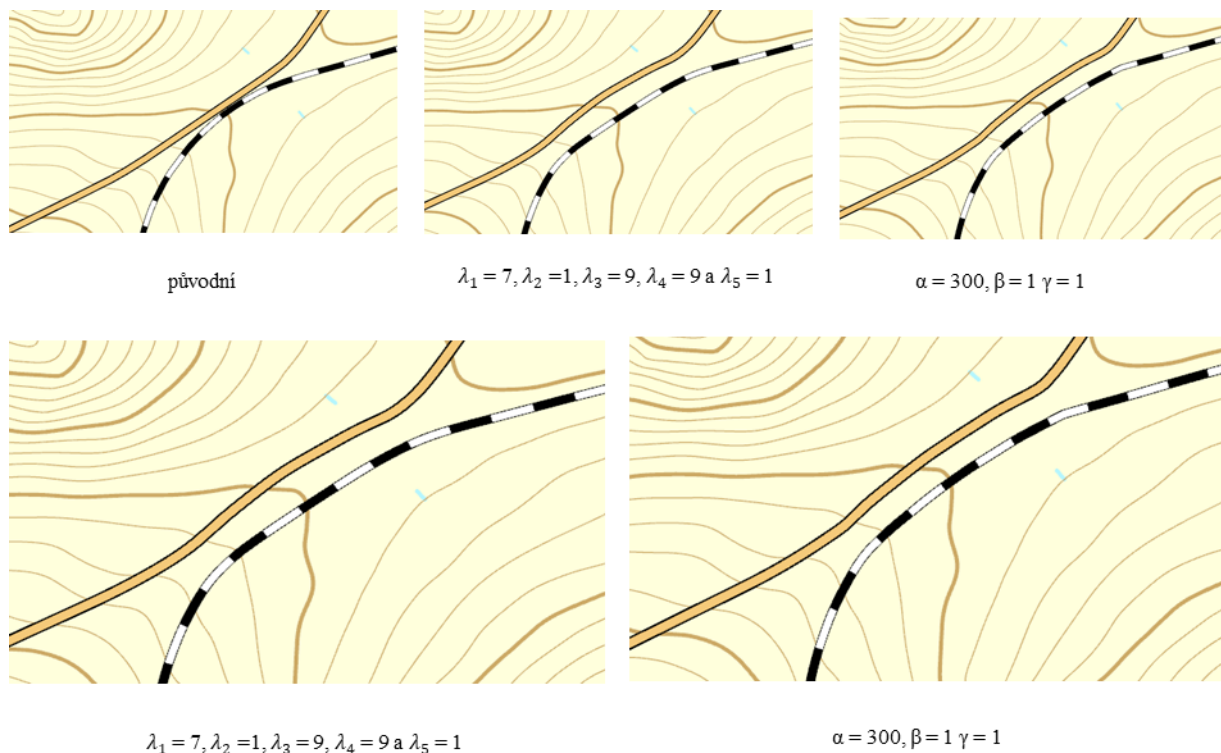
Z obrázku je patrné, že tvar linie železnice je více modifikován metodou New Splines. Linie je rovnější, než tomu byl výchozí stav.

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$d_{\min}$ [m]	ITER	HD [m] (norm)	ChD [m] (norm)	TF	C	LLR	Celk
300	1	1	29,0136	212	10,1742 (0,0111)	1,8219 (0,0020)	0,0504	0,0481	0,00002	0,2703
					10,1742 (0,0104)	2,1551 (0,0022)	0,0390	0,1051	0,00003	
300	1	100	29,0092	212	10,1742 (0,0111)	1,8219 (0,0020)	0,0504	0,0481	0,00002	0,2704
					10,1741 (0,0104)	2,1551 (0,0022)	0,0390	0,1052	0,00003	
300	1	300	29,0139	212	10,1741 (0,0111)	1,8219 (0,0020)	0,0504	0,0482	0,00002	0,2723
					10,1741 (0,0104)	2,1551 (0,0022)	0,0390	0,1053	0,00003	
300	1	400	29,0091	212	10,1741 (0,0111)	1,8219 (0,0020))	0,0504	0,0481	0,00002	0,2724
					10,1741 (0,0104)	2,1551 (0,0022)	0,0390	0,1054	0,00003	

Tabulka 7-3 Výběr výsledků pro Snakes – situace 2. 1. line je železnice, 2. komunikace.

$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$d_{\min}$ [m]	HD [m] (norm)	ChD [m] (norm)	TF	C	LLR	Celk
7	1	9	9	1	29,6474	11,4014 (0,0125)	1,9968 (0,0021)	0,0525	0,0968	0,00002	0,3510
						11,4149 (0,0116)	2,3520 (0,0024)	0,0403	0,1325	0,00002	
7	1	8	9	1	29,6533	11,4023 (0,0125)	1,9965 (0,0021)	0,0526	0,0972	0,00002	0,3525
						11,4151 (0,0116)	2,3520 (0,0024)	0,0407	0,1331	0,00002	
5	1	9	6	1	29,6460	11,0513 (0,0125)	1,9417 (0,0021)	0,0515	0,1006	0,00001	0,3529
						11,0669 (0,0116)	2,2860 (0,0024)	0,0381	0,1347	0,00002	
5	1	8	6	1	29,6516	11,0523 (0,0125)	1,9413 (0,0024)	0,0515	0,0995	0,00001	0,3532
						11,0680 (0,0116)	2,2860 (0,0024)	0,0383	0,1359	0,00002	

Tabulka 7-4 Výběr výsledků pro New Splines – situace 2. 1. line je železnice, 2. komunikace.



Obrázek 7-18 Situace 2 - Nahoře: původní stav, New Splines, Snakes (1:10 000). Dole přibližné situace New Splines a Snakes.

Výsledky pro situaci 3 jsou v tabulkách 7-5 a 7-6. při porovnání těchto tabulek se opakuje podobný trend jako u Situace 2. Pro New Splines hodnoty kritérií nabývají horších metod. Největší rozdíl je pro Chamfer distance. Za zmínku stojí, že pro linii komunikace u Snakes jsou hodnoty vyšší a pro linii železnice naopak nižší. Hodnoty LLR jsou pro obě metody srovnatelné. Další rozdíl nastává v hodnotě Turning function, které hodnotí zachování tvaru. Zde jsou výsledky rozdílné v řádu 0,05 což s porovnáním s výsledky pro ostatní situace je velký rozdíl.

Výsledek je poté vizualizován na obrázku 7-18. na první pohled je z něj patrné, že pro u obou metod došlo k výrazné tvarové deformaci. Linie komunikace přebírá výrazněji tvar pevné překážky (vodního toku) a dochází ke jejímu zvlnění. U není deformace tak patrná. Z vizuálního porovnání, že deformace je menší pro New Splines než Snakes. To odpovídá i výsledku v tabulce.

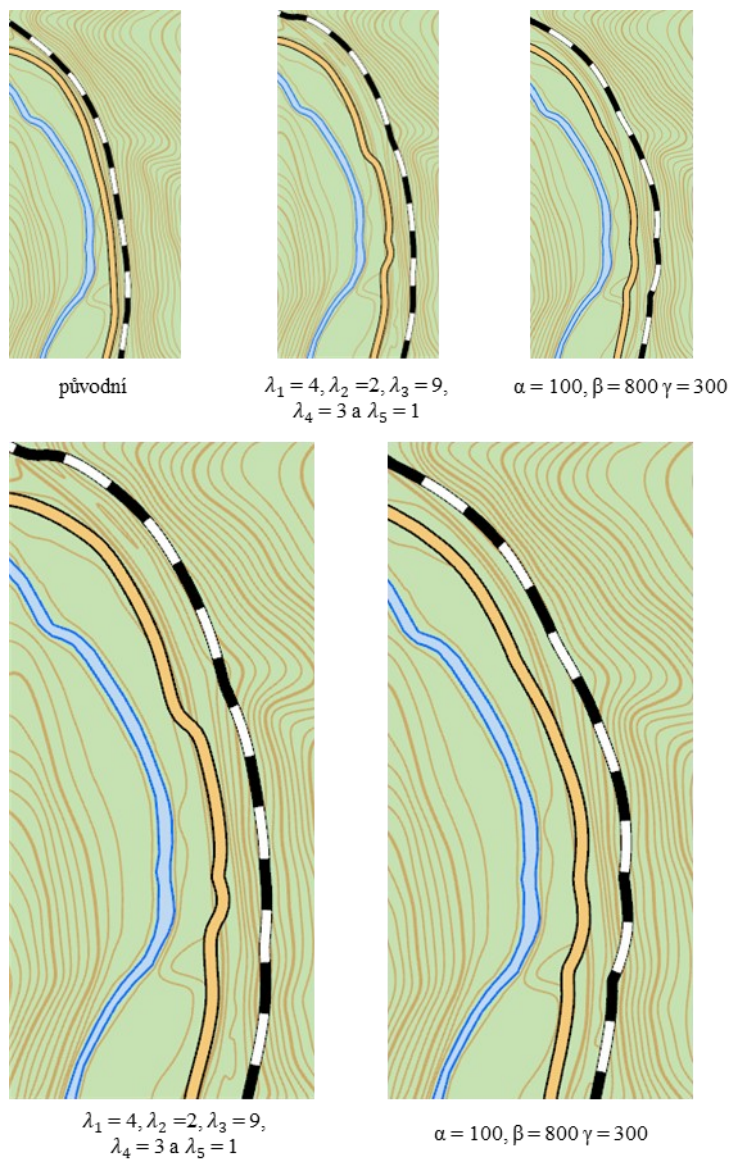
$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$d_{\min}$ [m]	ITER	HD [m] (norm)	ChD [m] (norm)	TF	C	LLR	Celk
100	800	300	31,0027	175	26,7495 0,0541	22,5999 0,0457	0,2163	0,4133	0,4257	1,3402
					12,0058 0,0264	12,3849 0,0272	0,1158	0,4408	0,4010	
300	800	1300	31,0077	515	26,4953 0,0536	22,2223 0,0450	0,2164	0,3888	0,4393	1,3410
					11,9325 0,0263	12,0834 0,0266	0,1109	0,4730	0,4326	
300	800	900	31,0078	515	26,4955 0,0536	22,2197 0,0450	0,2163	0,3897	0,4354	1,3456
					11,9322 0,0263	12,0817 0,0266	0,1118	0,4758	0,4341	
300	800	800	31,0096	516	26,5045 0,0536	22,2215 0,0450	0,2163	0,3903	0,4354	1,3473
					11,9061 0,0262	12,0813 0,0266	0,1119	0,4769	0,4345	

Tabulka 7-5 Výběr výsledků pro Snakes – situace 3. 1. line je železnice, 2. komunikace.

$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$d_{\min}$ [m]	HD [m] (norm)	ChD [m] (norm)	TF	C	LLR	Celk
4	2	9	3	1	29,3642	26,1410 0,0528	38,5951 0,0780	0,2524	0,4118	0,0002	1,3558
						13,2173 0,0292	5,7336 0,0127	0,1893	0,2939	0,0004	
4	1	9	3	1	29,3628	26,1407 0,0528	38,5944 0,0779	0,2535	0,4249	0,0002	1,3564
						13,2183 0,0292	5,7200 0,0127	0,1912	0,2789	0,0004	
4	4	9	3	1	29,3677	26,1426 0,0528	38,5803 0,0779	0,2501	0,4078	0,0002	1,3565
						13,2159 0,0292	5,7571 0,0127	0,1843	0,3099	0,0003	
4	5	9	3	1	29,3703	26,1445 0,0528	38,5800 0,0779	0,2494	0,4104	0,0002	1,3565
						13,2154 0,0292	5,7673 0,0128	0,1817	0,3120	0,0003	

Tabulka 7-6 Výběr výsledků pro New Splines – situace 3. 1. line je železnice, 2. komunikace





Obrázek 7-19 Situace 3. Nahoře: původní stav, New Splines, Snakes (1:10 000). Dole přiblížené situace New Splines a Snakes.

## 8 Diskuse

V diskusi jsou nejprve zhodnoceny dosažené výsledky a jsou porovnány s ostatními pracemi, které se zabývají generalizací liniových objektů metodou Partial Modification zaměřenou především na energetické spliny. V závěru je poté shrnuta přínosnost a vytyčení nedostatků a návrh na zlepšen.

V první části práce byl hodnocen vliv jednotlivých parametrů pro 2 metody výpočtů, které minimalizují celkovou energii při odsunu linií. U metody Snakes bylo zjištěno, že nejvýznamnější parametr na tvar linie je  $\alpha$ . Ten má za následek, že tvar linie zůstává co nejvíce přirozený. S jeho nárůstem se odsun zpomaluje a linie je „tužší“. To lze pozorovat z grafů na obrázcích 7-5, 7-7 a 7-9. Dle Badera (2001), který upravil tuto metodu pro kartografické generalizace, tento atribut ovlivňuje velikost posunu. Ze zmíněných grafů lze tento předpoklad potvrdit. S narůstající hodnotou klesá velikost odsunu a k dosažení potřebné minimální vzdálenosti je zapotřebí více iterací.

Parametry  $\beta$  a  $\gamma$  dle výsledků v kapitole 7.2.1 mají největší vliv na LLR. Při jejich maximalizaci je lépe zachován tvar, který toto pravidlo hodnotí. Naopak mohou mít negativní vliv na polohovou přesnost, protože hodnoty Chamfer a Hausdorff distance se s jejich nárůstem zvyšují. Tento předpoklad však nelze potvrdit, protože pro každou testovanou situaci se parametry chovají rozdílně. To je pozorovatelné i v poslední části výsledků kapitole 7.2.3, kde bylo pokaždé dosaženo nejlepších výsledků s jinými parametry. Někdy jsou minimální a jindy maximální.

Pro druhou metodu jsou dle dosažených výsledků v kapitole 7.2.2 nejvýznamnější parametry  $\lambda_1$  a  $\lambda_4$ . Parametr  $\lambda_1$  odpovídá parametru  $\alpha$ . Opět má za úkol hodnotit velikost odsunu linie od původního průběhu. Jednotlivé grafy zobrazující vliv  $\lambda_1$  na metriky odpovídají vlivům  $\alpha$ . Samotný parametr  $\lambda_4$  odpovídal vlivu vnější síle.

Poslední dva testované parametry  $\lambda_2$  a  $\lambda_3$  dle literatury (Bayer et al. 2024) mají ovlivňovat stejné vlastnosti křivek jako parametry  $\beta$  a  $\gamma$ . Z grafu v kapitole a 7.2.2 lze vidět shodu ve vlivu na metriku tvaru LLR. Ostatní grafy se napříč metodami příliš neshodují. Pro samotný parametr  $\lambda_2$  zde ještě dochází k jedné nesrovnalosti. Pro hodnoty křivosti a LLR mají opačný průběh pro některé situace. Z toho je dosaženo závěru, že význam jednotlivých parametrů je závislý na datech. Nelze tedy říci, zda by jejich

hodnota měla být maximalizována či minimalizována vůči ostatním parametrům. Toto lze opět pozorovat i v kapitole 7.2.3.

V druhé části byly testovány obě metody vůči sobě. Pro výběr nejlepších výsledků byly opět měřeny jednotlivé metriky. Pro lepší hodnocení byla vypočtena jejich suma. Výsledky s nejnižším součtem metrik byly poté označeny za nejlepší.

Pro metodu Snakes bylo dosaženo nejlepších výsledků s různými parametry v závislosti na datech. Nějaký univerzální klíč ve volbě parametrů nelze hledat. Při porovnání s literaturou je také obtížné určit jejich ideální volbu. Samotným optimálním nastavením se ostatní práce příliš nezabývají. Například Bader (2001) jen zmiňuje, že vhodné nastavení závisí na konkrétní situaci. Což se shoduje i se zde dosaženými výsledky. V článku od autorů Wang et al. (2017) zmiňují, že optimálních výsledků k odsunu linií bylo dosaženo s nastavením  $\beta = \gamma = \alpha/100$ . Ze zde předkládaných výsledků v kapitole 7.2.3 lze pozorovat, že poměr není totožný a pro každou situaci trochu jiný, tím pádem tento předpoklad nebyl potvrzen a neshoduje se se zde předkládanými výsledky.

Pro metodu New Splines také nelze určit z výsledků optimální nastavení parametrů. K jedinému závěru, ke krému lze dojít z tabulek v kapitole 7.2.3 je, že parametry  $\lambda_1$  a  $\lambda_4$  by měly dosahovat nabývat podobných hodnot. Volba ostatních parametrů je opět úzce spojena s konkrétní situací.

Parametr  $\lambda_5$  pro nejlepší výsledek vždy dosahoval hodnoty 1. Tento parametr má za úkol kopírovat tvar překážky. Tím pádem u této generalizační úlohy je potřeba jej minimalizovat. Toto se shoduje s popsány vlastnostmi v článku Bayer et al. (2024). Déle je zde zmíněno, že je obtížné stanovit parametry předem, což se také shoduje závěrem výše.

Při porovnání obou metod lze pozorovat, že pro Snakes dochází k získání nejlépe hodnocených výsledků u s různým počtem iterací. U situace 3 bylo nejlepších výsledků dosaženo až po více než 200 iteracích. To je ve shodě s předchozími pracemi, které tento model používají (Bader 2001; Burghardt 2005; Wang et al. 2017). Metoda New Splines výsledky počítala rychle, jen v jedné iteraci.

Při porovnání metod z hlediska metrik vyšla metoda New Splines pro situaci 1 jako vhodnější z hlediska polohové přesnosti. Pro zachování tvaru a hladkosti průběhu linie

vyšly metody srovnatelně. Na vizuálech výstupech pro tuto situaci nebyl pozorován rozdíl. Lze tedy dojít k závěru, že metoda New Splines pro data situace 1 je vhodnější, a to především kvůli své rychlosti. Naopak u situace 2 a 3 nikoli. Zde vyšly metriky povětšinou lépe pro Snakes. U těchto výsledků je rozdíl již pozorovatelný i na vizualizaci. U situace 2 je rozdíl ještě možno zanedbat a přihlídnout k rychlosti výpočtu. U situace 3 již je výsledek velice rozdílný. Toto může být zapříčiněno přístupem k samotné generalizaci více prvků naráz. U metody Snakes jsou linie odsouvány pomalu a současně, zatímco u New Splines jsou posuny dělány naráz a postupně. Nicméně obě testované metody nedosahovaly uspokojivých výsledků a na obou odsouvaných liniích docházelo k deformacím tvaru.

Nedostatek u výše zmíněné implementace pro model New Splines pro odsun 2 prvků a překážky by mohl být největší prostor pro zlepšení. Zde prezentovaná implementace odsouvá prvky postupně a vícekrát. Tím pádem je zde více prostoru pro vznik tvarových odchylek. Výsledek by mohl být zlepšen například přidáním více iterací pro metodu New Splines a odsouvat linie vůči méně upraveným (popřípadě výchozím) tvarům. Toto vylepšení je také zmíněno v článku Bayer et al. 2024. Iterací by však nemělo být více než 10. Autor ve své práci také zmiňuje, že metoda může hůře zachovávat hladkost a křivost než New Splines. Ke stejnému závěru došla i tato práce.

Další slabinou této práce v metodice pro hodnocení jednotlivých parametrů je volba velikosti testovacích intervalů a jejich krok. Z hlediska možnosti následného zpracování výsledků bylo voleno jen menší množství kombinací. Ale i z tohoto množství je pozorovatelný trend vlivu na jednotlivé metriky. K lepšímu porozumění chování parametrů by bylo vhodné testovat s menším krokem hlavně v okolí zlomových bodů.

Dále by se dala práce do budoucna rozšířit o testování více situací a na tomto základě zkusit porovnat chování parametrů nejen na hodnotách, ale i tvaru a vlastnostech vstupních dat.

## 9 Závěr

Předkládaná práce se zabývá generalizací liniových prvků pomocí operátoru Partial Modification. Konkrétně proti sobě porovnává dva modely, model Snakes a New Splines. Tyto modely testuje na reálných datech ze Základní mapy České republiky 1:10 000. Cílem práce bylo zjistit, jak se modely chovají v reálných situacích a vyhodnotit, zda efektivnější New Splines dokáží provádět generalizace srovnatelné nebo lepší kvality než model Snakes. Dalším dílčím cílem bylo určení vlivu jednotlivých vstupních parametrů na výsledky.

Navržené algoritmy pracují se třemi základními situacemi generalizace. V první vstupuje do generalizace jedna posouvající se linie a jedna pevná překážka, v druhé vstupují do generalizace dvě odsouvající se linie vůči sobě a ve třetí jsou posouvány dvě linie vůči sobě a pevné překážce.

Jednotlivé algoritmy poté zpracovávaly výsledky se stovkami kombinací různých nastavení. Takto získané výsledky byly hodnoceny pomocí metrik Chamfer Distance, Hausdorff Distance, Turning function, LLR a křivosti.

Porovnání obou metod ukázalo, že metoda New Splines dosahuje stejných nebo horších výsledků u složitějších situací. Nicméně, ani jedna metoda nedosáhla zcela uspokojivých výsledků bez deformace tvaru linií při odsunu více prvků najednou. Pro metodu New Splines byl však potvrzen předpoklad rychlejšího výpočtu. To by v budoucnu mohlo pomoci při automatizaci generalizace velkých datových sad.

U testování vlivu jednotlivých parametrů metod výsledky ukázaly a potvrdily velký vliv vstupních dat. U většiny parametrů z výsledků nelze určit jejich ideální univerzální volbu.

Pro možnou budoucí aplikaci v oboru kartografické generalizace bude potřeba upravit samotný algoritmus, který generalizuje složitější situace, aby metoda New Splines mohla dosahovat lepších výsledků než Snakes.

## Seznam literatury

BADER, Matthias, 2001. *Energy Minimization Methods for Feature Displacement in Map Generalization*. Zurich. Disertační práce. Universität Zurich.

BADER, Matthias, Mathieu BARRAULT a Robert WEIBEL, 2005. Building displacement over a ductile truss. *International Journal of Geographical Information Science* [online]. **19**(8–9), 915–936. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/13658810500161237

BAYER, T., I. KOLINGEROVÁ, M. ČELONK a J. LYSÁK, 2023. Simplification of contour lines, based on axial splines, with high-quality results. *International Journal of Geographical Information Science* [online]. **37**(7), 1520–1554. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/13658816.2023.2193969

BAYER, Tomáš, Milada KOČANDRLOVÁ a Ivana KOLINGEROVÁ, 2024. Discrete energy minimizing spline deformable by multiple objects. **2024**.

BOBRICH, Joachim, 1996. *Ein neuer Ansatz zur kartographischen Verdrängung auf der Grundlage eines mechanischen Federmodells*. B.m.: Beck. ISBN 3-7696-9498-8.

BURGHARDT, Dirk, 2005. Controlled Line Smoothing by Snakes. *GeoInformatica* [online]. **9**(3), 237–252. ISSN 1573-7624. Dostupné z: doi:10.1007/s10707-005-1283-3

BURGHARDT, Dirk a Siegfried MEIER, 1997. Cartographic displacement using the snakes concept.

CIOMAGA, Adina, Pascal MONASSE a Jean-Michel MOREL, 2017. The Image Curvature Microscope: Accurate Curvature Computation at Subpixel Resolution. *Image Processing On Line* [online]. **7**, 197–217. ISSN 2105-1232. Dostupné z: doi:10.5201/ipol.2017.212

COURTIAL, Azelle, Achraf EL AYEDI, Guillaume TOUYA a Xiang ZHANG, 2020. Exploring the Potential of Deep Learning Segmentation for Mountain Roads Generalisation. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [online]. **9**(5), 338. ISSN 2220-9964. Dostupné z: doi:10.3390/ijgi9050338

GOTTSTEIN, Otomar, 2019. Generalizace zástavby s využitím typifikace [online]. [vid. 2024-05-31]. Dostupné z: <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/109795>

GUILBERT, E. a E. SAUX, 2008. Cartographic generalisation of lines based on a B-spline snake model. *International Journal of Geographical Information Science* [online]. **22**(8), 847–870. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/13658810701689846

HØJHOLT, Peter, 2000. Solving Space Conflicts in Map Generalization: Using a Finite Element Method. *Cartography and Geographic Information Science - CARTOGR GEOGR INF SCI* [online]. **27**, 65–74. Dostupné z: doi:10.1559/152304000783548028

HUANG, Yafeng, Tinghua AI a Huihui LIU, 2009. The detection and removal of conflicts in road network generalization by delaunay triangulation. In: *2009 17th International Conference on Geoinformatics: 2009 17th International Conference on*

*Geoinformatics* [online]. s. 1–6. ISSN 2161-0258. Dostupné z: doi:10.1109/GEOINFORMATICS.2009.5293482

CHEN, Qi, Shugen WANG a Xiuguo LIU, 2016. AN IMPROVED SNAKE MODEL FOR REFINEMENT OF LIDAR-DERIVED BUILDING ROOF CONTOURS USING AERIAL IMAGES. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. **XLI-B3**, 583–589. ISSN 1682-1750. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B3-583-2016

INTERNATIONAL CARTOGRAPHIC ASSOCIATION, ed., 1973. *Multilingual dictionary of technical terms in cartography =: Dictionnaire multilingue de termes techniques cartographiques = Diccionario multilingue de terminos tecnicos cartograficos = Mnogoiazychnyislovar tekhnicheskikh terminov kartografii = Mehrsprachiges Wörterbuch kartographischer Fachbegriffe*. Wiesbaden: Franz Steiner.

KARSZNIA, Izabela, Albert ADOLF, Stefan LEYK a Robert WEIBEL, 2024. Using machine learning and data enrichment in the selection of roads for small-scale maps. *Cartography and Geographic Information Science* [online]. **51**(1), 60–78. ISSN 1523-0406. Dostupné z: doi:10.1080/15230406.2023.2283075

KASS, Michael, Andrew WITKIN a Demetri TERZOPOULOS, 1987. Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision* [online]. **1**(4), 321–331. ISSN 0920-5691, 1573-1405. Dostupné z: doi:10.1007/BF00133570

LI, Zhilin, 2006. *Algorithmic Foundation of Multi-Scale Spatial Representation*. B.m.: CRC Press. ISBN 978-1-4200-0843-2.

LICHTNER, Werner, 1979. Computer-assisted processes of cartographic generalization in topographic maps.

LIU, Yuangang, Qingsheng GUO, Yageng SUN a Xiaoya MA, 2014. A Combined Approach to Cartographic Displacement for Buildings Based on Skeleton and Improved Elastic Beam Algorithm. *PLOS ONE* [online]. **9**(12), e113953. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0113953

MCMASTER, R. B. a M. MONMONIER, 1989. A conceptual framework for quantitative and qualitative raster-mode generalization. *Unknown Journal*. 390–403. ISSN 0375-9474.

MCMASTER, Robert Brainerd a K. Stuart SHEA, 1992. *Generalization in digital cartography*. Washington, DC: Ass. of American Geographers. Resource publications for college geography. ISBN 978-0-89291-209-4.

NAKHMANI, Arie a Allen TANNENBAUM, 2012. Self-crossing detection and location for parametric active contours. *IEEE transactions on image processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society* [online]. **21**(7), 3150–3156. ISSN 1941-0042. Dostupné z: doi:10.1109/TIP.2012.2188808

NAKOS, Byron a V MIROPOULOS, 2003. Local length ratio as a measure of critical points detection for line simplification. In: *Fifth Workshop on Progress in Automated Map Generalization, Paris, France*.

- NICKERSON, Bradford G, 1988. Automated Cartographic Generalization For Linear Features. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* [online]. **25**(3), 15–66. ISSN 0317-7173. Dostupné z: doi:10.3138/4144-3U7G-MW01-1Q72
- PIERRE, Fabien, Mathieu AMENDOLA, Clémence BIGEARD, Timothé RUEL a Pierre-Frédéric VILLARD, 2021. Segmentation with Active Contours. *Image Processing On Line* [online]. **11**, 120–141. ISSN 2105-1232. Dostupné z: doi:10.5201/ipol.2021.298
- RADEVA, Petia, Joan SERRAT a Enric MARTI, 1995. A snake for model-based segmentation. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*. B.m.: IEEE, s. 816–821.
- REGNAULD, Nicolas a Robert B. MCMASTER, 2007. Chapter 3 - A synoptic View of Generalisation Operators. In: William A. MACKANESS, Anne RUAS a L. Tiina SARJAKOSKI, ed. *Generalisation of Geographic Information* [online]. Amsterdam: Elsevier Science B.V., International Cartographic Association, s. 37–66 [vid. 2023-10-23]. ISBN 978-0-08-045374-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-008045374-3/50005-3
- ROBINSON, A. H., J. L. MORRISON, P. C. MUEHRCKE, A. J. KIMERLING a S. C. GUPTILL, 1995. *Elements of cartography. 6th ed.* 6th vyd. New York, N.Y.: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-471-55579-7.
- RUAS, Anne, 1998. A method for building displacement in automated map generalisation. *International Journal of Geographical Information Science* [online]. **12**(8), 789–803. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/136588198241509
- SESTER, Monika, 2000. Knowledge acquisition for the automatic interpretation of spatial data. *International Journal of Geographical Information Science* [online]. **14**(1), 1–24. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/136588100240930
- SESTER, Monika, 2005. Optimization approaches for generalization and data abstraction. *International Journal of Geographical Information Science*. **19**(8–9), 871–897. ISSN 1365-8816.
- SESTER, Monika, Yu FENG a Frank THIEMANN, 2018. BUILDING GENERALIZATION USING DEEP LEARNING. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. **XLII-4**, 565–572. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLII-4-565-2018
- SHEA, K. Stuart, 1988. *Cartographic generalization*. 1988. B.m.: PAR Government Systems Corporation.
- SKOPELITI, Andriani, Lysandros TSOULOS a Shachak PE'ERI, 2021. Depth Contours and Coastline Generalization for Harbour and Approach Nautical Charts. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [online]. **10**(4), 197. ISSN 2220-9964. Dostupné z: doi:10.3390/ijgi10040197
- SUN, Yageng, Qingsheng GUO, Yuangang LIU, Xiuqin LV a Nai YANG, 2016a. Building Displacement Based on the Topological Structure. *The Cartographic Journal* [online]. **53**(3), 230–241. ISSN 0008-7041. Dostupné z: doi:10.1179/1743277414Y.0000000089



SUN, Yageng, Qingsheng GUO, Yuangang LIU, Xiaoya MA a Jie WENG, 2016b. An Immune Genetic Algorithm to Buildings Displacement in Cartographic Generalization. *Transactions in GIS* [online]. **20**(4), 585–612. ISSN 1467-9671. Dostupné z: doi:10.1111/tgis.12165

SWISS SOCIETY OF CARTOGRAPHY, 2005. *Topographic Maps: Map Graphics and Generalisation* [online]. B.m.: Swiss Society of Cartography. Cartographic publication series. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=oREPYAAACAAJ>

TOUYA, Guillaume a Imran LOKHAT, 2022. ReBankment: displacing embankment lines from roads and rivers with a least squares adjustment. *International Journal of Cartography* [online]. **8**(1), 37–53. ISSN 2372-9333. Dostupné z: doi:10.1080/23729333.2021.1972787

TYNER, Judith A., 2010. *Principles of map design*. New York: Guilford Press. ISBN 978-1-60623-544-7.

VEVERKA, Bohuslav a Ruzena ZIMOVÁ, 2008. *Topografická a tematická kartografie*. Vyd. 1. V Praze: České Vysoké Učení Technické. ISBN 978-80-01-04157-4.

VOLOTAO, Carlos, Rafael SANTOS, Guaraci ERTHAL a Luciano DUTRA, 2010. Shape characterization with turning functions.

WANG, Lin, Qingsheng GUO, Zhiwei WEI a Yuangang LIU, 2017. Spatial Conflict Resolution in a Multi-Agent Process by the Use of a Snake Model. *IEEE Access* [online]. **5**, 24249–24261. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2017.2771452

WANG, Zhifeng a Yan-Jun LIU, 2017. Active contour model by combining edge and region information discrete dynamic systems. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. **9**(3), 1687814017692947. ISSN 1687-8132. Dostupné z: doi:10.1177/1687814017692947

WARE, J. Mark a Christopher B. JONES, 1998. Conflict Reduction in Map Generalization Using Iterative Improvement. *GeoInformatica* [online]. **2**(4), 383–407. ISSN 1573-7624. Dostupné z: doi:10.1023/A:1009713606524

WARE, Mark, Ian WILSON, J. WARE a Christopher JONES, 2002. A tabu search approach to automated map generalisation. In: [online]. s. 101–106. Dostupné z: doi:10.1145/585147.585169

WEI, Zhiwei, Jie HE, Lin WANG, Yong WANG a Qingsheng GUO, 2018. A Collaborative Displacement Approach for Spatial Conflicts in Urban Building Map Generalization. *IEEE Access* [online]. **6**, 26918–26929. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2018.2836188

WEIBEL, R. a G. DUTTON, 1998. Constraint-Based Automated Map Generalization. In: *Proceedings of the 8 th International Symposium on Spatial Data Handling, Vancouver*. s. 214–244.

WEIBEL, Robert, Stefan KELLER a Tumasch REICHENBACHER, 1995. Overcoming the knowledge acquisition bottleneck in map generalization: The role of interactive systems and computational intelligence. In: Andrew U. FRANK a Werner KUHN, ed.

*Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer, s. 139–156. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-540-45519-6. Dostupné z: doi:10.1007/3-540-60392-1\_10

WILSON, Ian D., J. Mark WARE a J. Andrew WARE, 2003. A Genetic Algorithm approach to cartographic map generalisation. *Computers in Industry* [online]. **52**(3), Soft Computing in Industrial Applications, 291–304. ISSN 0166-3615. Dostupné z: doi:10.1016/S0166-3615(03)00132-5

WU, X., Qingyun DU a Z. XU, 2010. Disposal of spatial conflict between roads and buildings based on the multilevel displacement principles. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. **39**, 649–654.

XIUQIN, Lu, Zhang YI a Guo QINGSHENG, 2012. Research on discrete points of electric field model for conflict detection and displacement. In: *2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE): 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)* [online]. Zhangjiajie, China: IEEE, s. 6–9 [vid. 2024-05-31]. ISBN 978-1-4673-0089-6. Dostupné z: doi:10.1109/CSAE.2012.6272716