**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie**

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika

**Bc. Dominik Mazur**

# Generalizace vodních toků metodou částečné prostorové redukce

# Simplification of rivers based on the spatial reduction method

Diplomová práce

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

Praha 2020

**Vysoká škola:** Univerzita Karlova v Praze **Fakulta:** Přírodovědecká

**Katedra:** Aplikované geoinformatiky a kartografie **Školní rok:** 2019/2020

# Zadání diplomové práce

**pro** Bc. Dominika Mazura

**obor** Kartografie a geoinformatika

**Název tématu:**

## Generalizace vodních toků metodou částečné prostorové redukce

Cílem diplomové práce bude návrh metody pro automatizovanou generalizaci vodních toků metodou částečné prostorové redukce. Ověření metodiky a její zhodnocení bude provedeno na vybraných úsecích vodních toků.

Navržený postup umožní automatizovat postup generalizace vodního toku, resp. jeho částí, metodou částečné prostorové redukce. Bude zahrnovat také identifikaci řešení složitějších situací, se kterými se při ruční generalizaci setkáme, zejména ostrovů, slepých ramen, soutoků, umělých rozšíření (např. jezů) s cílem vyhotovit kartograficky korektní reprezentaci vodního toku kombinující plošnou reprezentaci (tj. metodou břehovky) s reprezentací liniovou. Diskutovány budou také problematické situace, kde navržené řešení nepodává optimální výsledky.

Jednotlivé kroky navrženého generalizačního algoritmu budou implementovány ve formě skriptů ve vybraném programovacím jazyce, vizualizace výsledků proběhne v některém z vhodných SW.

**Zásady pro vypracování**

**Rozsah grafických prací:** cca 20 stran

**Rozsah průvodní zprávy:** cca 80 stran

**Seznam odborné literatury:**

AICHHOLZER, Oswin, Franz AURENHAMMER, David ALBERTS a Bernd GÄRTNER, 1995. A Novel Type of Skeleton for Polygons. *Journal of Universal Computer Science* [online]. 752–761. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-80350-5_65

HAUNERT, Jan-Henrik a Monika SESTER, 2004. Using the Straight Skeleton for Generalisation in a Multiple Representation Environment. *Proceeding of I8th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. 1–10.

HAUNERT, Jan Henrik a Monika SESTER, 2008. Area collapse and road centerlines based on straight skeletons. *GeoInformatica* [online]. **12**(2), 169–191. IS'N 13846175. Dostupné z: doi:10.1007/s10707-007-0028-x

STUM, Alexander K., Barbara P. BUTTENFIELD a Lawrence V. STANISLAWSKI, 2017. Partial polygon pruning of hydrographic features in automated generalization. *Transactions in GIS* [online]. **21**(5), 1061–1078. IS'N 14679671. Dostupné z: doi:10.1111/tgis.12270

SZOMBARA, Stanisław, 2013. Unambiguous Collapse Operator of Digital Cartographic Generalisation. *Proceedings of 16th ICA Workshop on Generalisation and Map Production*. 1–10.

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

Datum zadání diplomové práce: 30. 11. 2018

Termín odevzdání diplomové práce: dle harmonogramu příslušného akademického roku

..... .....

Garant studijního programu/oboru Vedoucí práce

V Praze dne 30. 11. 2018

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto 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.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků získaných v této práci mimo Univerzitu Karlovu v Praze, je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 21. července 2020 .....

Bc. Dominik Mazur

**Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Tomáši Bayerovi, Ph.D. za jeho rady a čas věnovaný opravám této práce. Za poskytnutí dat bych rád poděkoval Českému úřadu zeměměřickému a katastrálnímu.

# Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá generalizací vodních toků metodou úplné a částečné prostorové redukce s využitím datové struktury straight skeleton. Navržená metoda je koncipována pro mapy z pohledu geografie velkých, a pohledu kartografie středních měřítek (do 1 : 100 000). Je zde řešen problém šířky vodního toku jako samostatného kritéria pro rozhodování o generalizaci. Prezentované řešení představuje sadu doplňkových kritérií, která rozhodují o generalizaci vodního toku. V práci jsou řešeny také problematické situace vyskytující se na vodním toku, jako jsou ostrovy, rozdvojení, ramena či soutoky.

Součástí práce je navržený generalizační algoritmus, který je vícefázový a využívá datovou strukturu straight skeleton. Algoritmus je implementován v programovacím jazyce C++ ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio. Ke svému fungování využívá algoritmus externí knihovny Qt a CGAL (Computational Geometry Algorithms Library). Výsledky algoritmu jsou ukládány do ESRI geodatabáze s využitím programovacího jazyku Python 2.7 a externí knihovny ArcPy.

Za vhodná testovací data byla zvolena data vodních ploch ze ZABAGED. Dosažené výsledky generalizace jsou prezentovány na testovacích datech pro různá měřítka a jsou porovnávány se Základními mapami České republiky.



**Klíčová slova:** digitální kartografie, kartografická generalizace, straight skeleton, prostorová redukce, částečná prostorová redukce, GIS

# Abstract

This master thesis is focused on cartography generalization of a rivers using collapse and partial collapse method with the usage of straight skeleton data structure. The proposed method was designed for large scale maps in geographical view and for medium scale maps in cartographic view (till 1 : 100 000). The thesis is focusing on width of a river as stand alone criteria for generalization decision. The presented solution represents set of a criteria which decides on generalization of a river. The presented thesis also solves problematic situations that exist on a river such as islands, junctions, shoulders or bifurcation.

The thesis also includes proposed generalization algorithm which is using straight skeleton data structure. The algorithm is implemented in C++ programming language in Microsoft Visual Studio IDE. The algorithm uses external libraries Qt and CGAL (Computational Geometry Algorithms Library) for functioning. Algorithm results are saved in ESRI geodatabase with the usage of Python 2.7 programming language and external library ArcPy.

Water areas from ZABAGED were chosen as appropriate data for testing. Achieved results of generalization are presented on test data for various scales and they are compared with base maps of Czech Republic.



**Keywords:** digital cartography, cartography generalization, straight skeleton, collapse, partial collapse, GIS

# OBSAH

Seznam obrázků ..... 11

1. Úvod ..... 16

2. Rešerše současného stavu ..... 19

2.1 Skeletonizace ..... 20

2.1.1 Využití medial axis v kartografii ..... 21

2.1.2 Využití chordal axis v kartografii ..... 21

2.1.3 Využití straight skeletonu v kartografii ..... 22

2.2 Prostorová redukce ..... 22

2.2.1 Skeletonizace plošných sítí ..... 23

2.2.2 Topologie generalizovaných prvků ..... 24

2.2.3 Konektivita generalizovaných prvků ..... 25

2.2.4 Částečná prostorová redukce ..... 25

2.2.5 Ostrovy na vodním toku ..... 28

3. Generalizace vodního toku metodou prostorové redukce ..... 29

3.1 Prostorová redukce ..... 29

3.1.1 Částečná prostorová redukce ..... 30

3.2 Stanovení šířky vodního toku ..... 31

3.2.1 Kritéria pro rozhodování o generalizaci vodního toku ..... 33

3.2.2 Místa rozšíření vodního toku ..... 34

3.2.3 Místa s ostrovy ..... 35

3.3 Kartografická pravidla použitá při generalizaci vodního toku ..... 37

3.3.1 Seznam kartografických pravidel ..... 37

3.3.2 Seznam topologických pravidel ..... 41

3.3.3 Systém řízení kartografických pravidel ..... 42

3.4 Reprezentace vodního toku ..... 42

3.5 Prostorová redukce na významných mapových portálech ..... 43
3.5.1 Portál mapy.cz ..... 43
3.5.2 Portál OpenStreetMap ..... 44
3.5.3 Portál Google Maps ..... 44
3.5.4 Statní mapové dílo ..... 45
4. Implementace generalizačního algoritmu ..... 47
4.1 Datové struktury a algoritmy ..... 47
4.1.1 Chordal axis ..... 48
4.1.2 Straight skeleton ..... 49
4.1.3 Grafová reprezentace straight skeletonu ..... 50
4.1.4 Linear axis ..... 52
4.1.5 Prohledávání grafu do šířky ..... 53
4.1.6 Konvexní obálka ..... 54
4.1.7 Obdélník s minimální plochou ..... 55
4.1.8 Plocha polygonu ..... 55
4.2 Základní terminologie spojená s implementací ..... 55
4.3 Koncept generalizačního algoritmu ..... 57
4.4 Eliminace ostrovů ..... 58
4.5 Vytvoření datové struktury straight skeleton ..... 61
4.6 Seřazení vnitřních segmentů a rozdělení skeletonu na jednotlivé skupiny vnitřních segmentů ..... 62
4.6.1 Nalezení nejkratší cesty ..... 62
4.6.2 Seřazení a rozdělení vnitřních segmentů straight skeletonu ..... 65
4.6.3 Nalezení ostrovních ramen ..... 67
4.7 Odstranění výběžků skeletonu ..... 71
4.8 Úprava struktury skeletonu v okolí počátečního a koncového bodu vodního toku ..... 75
4.9 Určení šířky vodního toku ..... 78

4.9.1 Maximální vepsaná kružnice ..... 78
4.9.2 Negativní buffer ..... 78
4.9.3 Metody využívající převzorkování břehů ..... 79
Vzdálenost mezi jednotlivými body obou břehů ..... 81
4.9.4 Měření délky kolmic ..... 83
4.9.4.1 Odstranění kolmic dle počtu průsečíků s ostatními skupinami vnitřních segmentů ..... 86
4.9.4.2 Odstranění kolmic dle počtu průsečíků s vnitřními segmenty ..... 87
4.9.4.3 Odstranění kolmic dle počtu průsečíků v rámci jedné skupiny vnitřních segmentů ..... 89
4.10 Identifikace a rekonstrukce úseků vodního toku ..... 92
4.10.1 Hledání úseků vodního toku určených k zachování ..... 92
4.10.2 Rekonstrukce úseků vodního toku ..... 98
4.10.3 Spojení zrekonstruovaných úseků vodního toku ..... 100
4.11 Aplikace doplňkových kritérií ..... 104
5.Výsledky ..... 107
5.1 Vstupní data ..... 107
5.2 Formát výsledků ..... 108
5.3 Vstupní parametry algoritmu ..... 109
5.3.1 Vliv doplňkových kritérií ..... 111
5.3.2 Vliv hodnoty $w_{max}$ ..... 116
5.4 Porovnání výsledků s vybraným mapovým portálem ..... 133
5.5 Hodnocení doplňkových kritérií ..... 138
5.6 Sporná místa ..... 141
5.7 Slabiny algoritmu ..... 144
6 Závěr ..... 146
Seznam použitých zdrojů informací ..... 148
Seznam příloh ..... 151

# Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení plochy vodního toku po prostorové redukci podle straight skeletonu. ..... 24
Obr. 2 (a) Napojení řeky na jezero, (b) vytvoření straight skeletonu – ztráta konektivity, (c) upravený straight skeleton metodou úpravy sklonu roviny. ..... 25
Obr. 3 (a) Jezero, do kterého ústí řeka (b) zastavený proces smršťování na půlce prahové hodnoty (c) kolaps (d, e) možnosti rekonstrukce původního tvaru jezera (f) kolaps-jiný prahové hodnoty než (c). ..... 26
Obr. 4 Ukázka kolapsu metody využívající medial axis v jednotlivých měřítkách – různě zvětšené výsledky. ..... 27
Obr. 5 Světle modře jsou odstraněné oblasti, červeně oblasti, které mají být odstraněny, ale v důsledku nezbytnosti pro konektivitu jsou zachovány. ..... 28
Obr. 6 Ukázka operátoru prostorové redukce. ..... 29
Obr. 7 Upravené obrázky 4 a 5, kde jsou červeně znázorněny anomálie. ..... 31
Obr. 8 Vlevo modrou barvou zvýrazněny úseky, které nebudou generalizovány, vznikají umělá rozšíření vodního toku (vpravo). ..... 32
Obr. 9 Stejný jev jako na Obr. 8 na jiných částech vodního toku. ..... 32
Obr. 10 Znázornění jednotlivých parametrů šířky a délky úseku vodního toku. ..... 34
Obr. 11 Nesouvislost reprezentace vodního toku břehovkami z důvodu neodstraněného ostrova. ..... 36
Obr. 12 Ukázka důsledku pravidla P1, vlevo původní stav, vpravo stav po aplikaci pravidla P1. ..... 37
Obr. 13 Ukázka pravidla P2, vlevo původní stav, vpravo aplikace pravidla P2 (ponechán obrys řeky). ..... 38
Obr. 14 Ukázka pravidla P3, vlevo původní stav, vpravo aplikace pravidla P3 (ponechán obrys řeky). ..... 39
Obr. 15 Ukázka pravidla P4, zpracování jednotlivých ramen odděleně, jen na jedno rameno bylo aplikováno pravidlo P2. ..... 39
Obr. 16 Ukázka pravidla P5, zpracování jednotlivých částí v místě soutoku, každá část vyhodnocena zvlášť. ..... 40
Obr. 17 Ukázka pravidla P6, původní stav na Obr. 16, spojení zpracovávaných částí vodního toku. ..... 41
Obr. 18 Schéma systému kartografických pravidel. ..... 42

Obr. 19 Různá měřítka části řeky Tichá Orlice z portálu mapy.cz. ..... 44
Obr. 20 Různá měřítka části řeky Tichá Orlice z portálu OpenStreetMap..... 44
Obr. 21 Různá měřítka části řeky Tichá Orlice z portálu Google Maps, červeně vyznačeny chybějící úseky. ..... 45
Obr. 22 Část řeky Tichá Orlice, vlevo ZM 10, uprostřed ZM 50, vpravo ZM 100..... 46
Obr. 23 Část řeky Tichá Orlice v měřítku 1:100 000. ..... 46
Obr. 24 Problémový výběžek (vpravo) u chordal axis. ..... 48
Obr. 25 Straight skeleton pro polygon s dírou..... 50
Obr. 26 Grafová reprezentace straight skeletonu ..... 51
Obr. 27 Ukázka spojové reprezentace neorientovaného grafu z Obr. 26 ..... 52
Obr. 28 Ukázka popsaných skeletonů, b - chordal axis, c - straight skeleton a d - linear axis. ..... 53
Obr. 29 Znázornění skupin vnitřních segmentů (s1', s2', s3'), uzlů ($u_1$, $u_2$), ramene R a hlavního toku TL. ..... 56
Obr. 30 Modře vyznačený hlavní vodní tok TL, červeně ostrovní rameno OR a zeleně rameno R. ..... 57
Obr. 31 Na levé straně straight skeleton s ostrovem a na pravé straně bez ostrovu. ..... 58
Obr. 32 Ohraničující obdélník s nejmenší plochou (červeně) a jeho osa (zeleně). ..... 59
Obr. 33 Znázornění výpočtu šířky ramene $R_r$..... 60
Obr. 34 Hledání počátečního bodu $v_p$ a koncového bodu $v_k$. ..... 63
Obr. 35 Nejkratší cesta C (červeně vyznačená) z počátečního bodu $v_p$ ke koncovému bodu $v_k$. ..... 64
Obr. 36 Vlevo pořadí jednotlivých skupin (modře označený hlavní tok, červeně rameno), vpravo pořadí vnitřních segmentů skupiny s5'. ..... 65
Obr. 37 Postupné vykreslování již seřazených skupin vnitřních segmentů (barevně vyznačená aktuální skupina)..... 66
Obr. 38 Rameno OR, které je tvořeno jen jednou skupinou vnitřních segmentů. ..... 68
Obr. 39 Využití ostrovního ramene OR jako součást hlavního vodního toku TL pro identifikaci ramene R..... 69
Obr. 40 Znázornění procesu hledání ostrovního ramene. ..... 70
Obr. 41 Vlevo celá struktura straight skeletonu, vpravo struktura straight skeletonu po odstranění segmentů, jejichž koncové body incidují s vrcholy původního polygonu. ..... 71
Obr. 42 Znázornění parametrů pro kritérium 1) délka skupiny vnitřních segmentů. ..... 72
Obr. 43 Znázornění parametrů pro kritérium 2) délka ramene. ..... 73

Obr. 44 Seřazená struktura straight skeleton po odstranění nepodstatných výběžků..... 74
Obr. 45 Vlevo obvyklý průběh straight skeletonu nad celým vodním tokem, vpravo straight skeleton úseku vodního toku v místě rozdělení vodního toku. ..... 76
Obr. 46 Znázornění procesu odstranění bodů v rámci skupiny vnitřních segmentů s1'. 77
Obr. 47 Levá část znázorňuje vodní tok před aplikací negativního bufferu, pravá část znázorňuje vodní tok po aplikaci negativního bufferu (šedá barva) ..... 79
Obr. 48 Jednotlivé skupiny vnitřních segmentů barevně. ..... 80
Obr. 49 Vazba segmentů, jejichž koncové body (modře a červeně) incidují s hranicí polygonu vodního toku na skupinu vnitřních segmentů (žlutě). ..... 81
Obr. 50 Problematika počátečních a koncových bodů při měření šířky pomocí metody měření vzdálenosti mezi jednotlivými body obou břehů..... 82
Obr. 51 Problém metody minimální vzdálenosti mezi břehy. ..... 83
Obr. 52 Kolmice k vedená ke břehům vodního toku $T_r$, $T_l$. ..... 84
Obr. 53 Kolmice (červeně) pro měření šířky vodního toku. ..... 84
Obr. 54 Znázornění protnutí kolmic (modře) skupiny s1' s kolmicemi (červeně) skupiny s2'. ..... 86
Obr. 55 Znázornění protnutí kolmic a vnitřních segmentů ostatních skupin. ..... 88
Obr. 56 Znázornění místa, kde se protíná velké množství kolmic z jedné skupiny vnitřních segmentů s'. ..... 89
Obr. 57 Výsledné kolmice po provedení všech redukcí kolmic, původní Obr. 53. ..... 90
Obr. 58 Znázornění redukce kolmic mezi skupinami vnitřních segmentů a) původní stav b) odstranění podle 4.9.4.1 c) odstranění podle 4.9.4.2..... 91
Obr. 59 Znázornění redukce kolmic v rámci jedné skupiny vnitřních segmentů a) původní stav b) odstranění podle 4.9.4.3. ..... 91
Obr. 60 Krátký úsek určený ke generalizaci mezi dvěma úseky určenými k zachování.93
Obr. 61 Znázornění situace při hledání úseků určených k zachování, krátké kolmice (modré) a dlouhé kolmice (červené). ..... 94
Obr. 62 Vlevo situace po první iteraci vyhledávacího procesu, vpravo situace po druhé iteraci vyhledávacího procesu. ..... 96
Obr. 63 Znázornění rekonstrukce břehů daného úseku vodního toku. ..... 99
Obr. 64 Kontrola spojení zrekonstruovaných úseků v místě rozdělení vodního toku.. 101
Obr. 65 Znázornění procesu spojení tří úseků $P_1$, $P_2$ a $P_3$. ..... 102
Obr. 66 Znázornění procesu spojení tří břehů $P_{S,1}$, $P_{S,2}$, $P_{S,3}$ a vytvoření finálního polygonu. ..... 103

Obr. 67 Mapové listy zájmového území. ..... 108
Obr. 68 Část první části vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 12 m, vlevo původní stav, uprostřed úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře), vpravo finální kartografická reprezentace. ..... 112
Obr. 69 Část čtvrté části vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 25 m, nahoře původní stav, uprostřed úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře), dole finální kartografická reprezentace. ..... 113
Obr. 70 Část první části vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 12 m, vlevo původní stav, uprostřed úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře), vpravo finální kartografická reprezentace. ..... 114
Obr. 71 Třetí část vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 1 m, vlevo původní stav, uprostřed úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě wmax (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře), vpravo finální kartografická reprezentace. ..... 114
Obr. 72 Čtvrtá část vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 15 m, úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře). ..... 115
Obr. 73 Čtvrtá část vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 30 m, úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře). ..... 116
Obr. 74 Ostrov a rameno $w_{max}$ = 10 m, generalizace části ramene. ..... 118
Obr. 75 Ostrov a rameno $w_{max}$ = 20 m, střídavá reprezentace vodního toku liniemi a břehovkami. ..... 119
Obr. 76 Ostrov a rameno $w_{max}$ = 30 m, úplná generalizace vodního toku, reprezentace linií. ..... 120
Obr. 77 Rozšíření a rameno $w_{max}$ = 10 m, generalizace části ramene. ..... 122
Obr. 78 Rozšíření a rameno $w_{max}$ = 20 m, generalizace celého ramene. ..... 123
Obr. 79 Rozšíření a rameno $w_{max}$ = 30 m, generalizace části vodního toku, nejširší úsek vodního toku zachován (reprezentován břehovkami). ..... 124
Obr. 80 Rozšíření a ostrov $w_{max}$ = 10 m, generalizace jednoho ramene. ..... 126

Obr. 81 Rozšíření a ostrov $w_{max}$ = 20 m, generalizace části vodního toku, nejširší úsek vodního toku zachován (reprezentován břehovkami). ..... 126
Obr. 82 Rozšíření a ostrov $w_{max}$ = 30 m, úplná generalizace vodního toku, reprezentace linií. ..... 126
Obr. 83 Dvě ramena a ostrov $w_{max}$ = 10 m, generalizace části dvou ramen. ..... 128
Obr. 84 Dvě ramena a ostrov $w_{max}$ = 20 m, generalizace ramen a zúžených úseků kolem ostrova, zbytek vodního toku reprezentován břehovkami. ..... 128
Obr. 85 Dvě ramena a ostrov $w_{max}$ = 30 m, úplná generalizace vodního toku, reprezentace linií. ..... 128
Obr. 86 Rozdvojení toku $w_{max}$ = 10 m, generalizace přítoku, ramene a nejužšího úseku v místě rozdvojení, střídavá reprezentace vodního toku liniemi a břehovkami. ..... 130
Obr. 87 Rozdvojení toku $w_{max}$ = 20 m, střídavá reprezentace vodního toku liniemi a břehovkami (jen nejvýraznější úseky). ..... 131
Obr. 88 Rozdvojení toku $w_{max}$ = 30 m, úplná generalizace vodního toku, reprezentace linií. ..... 132
Obr. 89 Rozdvojení vodního toku v prvním úseku v měřítku 1 : 50 000. ..... 134
Obr. 90 Rozdvojení vodního toku v prvním úseku v měřítku 1 : 100 000. ..... 134
Obr. 91 Rozdvojení vodního toku v druhém úseku v měřítku 1 : 50 000. ..... 135
Obr. 92 Rozdvojení vodního toku v druhém úseku v měřítku 1 : 100 000. ..... 135
Obr. 93 Ostrov na vodním toku v měřítku 1 : 50 000. ..... 136
Obr. 94 Ostrov na vodním toku v měřítku 1 : 100 000. ..... 136
Obr. 95 Přítok v měřítku 1 : 50 000. ..... 137
Obr. 96 Přítok v měřítku 1 : 100 000. ..... 137
Obr. 97 Sporný úsek na Obr. 79. ..... 142
Obr. 98 Sporný úsek na Obr. 94. ..... 142
Obr. 99 Sporný úsek na Obr. 96. ..... 143
Obr. 100 Sporný úsek na první části vodního toku s hodnotou $w_{max}$ = 18 m. ..... 143
Obr. 101 Sporný úsek na páté části vodního toku s hodnotou $w_{max}$ = 20 m. ..... 144

# 1. Úvod

Jelikož není v lidských silách převést veškeré informace ze zemského povrchu do mapy, dochází při zobrazování zemského povrchu do map k redukci dat. Abychom minimalizovali množství redundantních dat, zakreslují se do mapy jen vybrané objekty, které znázorňují důležité obsahové prvky. Další fázi představuje volba vhodných kartografických znaků, které budou reprezentovat jednotlivé objekty tak, aby výsledná mapa zůstala přehledná.

Veškeré vybrané objekty reálného světa, které jsou zobrazeny na mapách, musejí mít určitou úroveň abstrakce a určitou úroveň geometrického detailu. Reprezentace objektů s vysokou úrovní detailu nalezneme na mapách velkých měřítek, zatímco reprezentace velkých územních celků s menší úrovní detailu je typická pro mapy malých měřítek. Kartografové přizpůsobují obsah a úroveň detailu mapy tak, aby vyhovovaly jejímu měřítku a účelu. Tento proces se nazývá kartografická generalizace (Jonas a Ware 2005). Při generalizaci dochází ke ztrátě informací a vzniká nové odvozené kartografické dílo, které je ovlivněno několika faktory.

Nárůst množství dat a z nich vytvářených map společně s vývojem hardware, geoinformačních systémů (GIS) a nových počítačových algoritmů ve 21. století zvýšil poptávku po automatizované generalizaci. Jelikož neexistuje kritérium, podle kterého je možné výslednou generalizaci hodnotit, je proces automatické generalizace obtížný. V dnešní době zatím není možné zcela nahradit lidský přístup přístupem (semi) automatizovaným. Existuje již mnoho algoritmů reprezentujících různé generalizační metody, ale problémem automatické generalizace je nesmírná variabilita a složitost zemského povrchu, která vede k mnoha speciálním případům a k mnoha anomáliím, jež dané algoritmy neumí řešit správně, popřípadě je vyřeší odlišně od kartografa.

Tato práce se zabývá generalizací vodních toků metodou změny prostorové dimenze s využitím datové struktury straight skeleton. Vodní toky znázorněné plošným kartografickým znakem (břehovkami) jsou nahrazeny liniovým kartografickým znakem. Z kartografického pohledu je tato problematika důležitá pro topografické mapy velkých měřítek, zejména měřítek větších než 1 : 100 000. Práce si klade důraz na některé specifické situace, které je obtížné automatizovat. Jedná se zejména o krátká rozšiřující se místa na vodním toku. V těchto místech může být obtížné správně rozhodnout, zdali zachovat reprezentaci vodního toku břehovkami či provést generalizaci. Práce

poukazuje na problematiku šířky vodního toku jako rozhodovacího kritéria pro generalizaci. Chybná rozhodnutí mohou vést k nekorektní kartografické reprezentaci vodního toku. Dále také řeší problematiku přítomnosti ostrovů na vodním toku, jejichž přítomnost může výrazně ovlivnit výsledky prostorové redukce. Motivací pro výběr tohoto tématu je nízká míra úspěšnosti automatizovaného řešení tohoto problému.

Ačkoli se tato problematika může zdát jednoduchá a výše zmíněné problémy očividné, v kartografické odborné literatuře této problematice doposud nebyla věnována dostatečná pozornost. Tato práce si klade za cíl poukázat na dosud neřešené problémy a nedostatky stávajících řešení v oblasti prostorové redukce.

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout a otestovat algoritmus pro automatizovanou generalizaci vodních toků metodou změny prostorové dimenze. Vytvořený algoritmus bude mít podobu skriptu, který bude vytvořen ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio v programovacím jazyce C++. Skript ke svému fungování bude využívat externí knihovny. Nejdůležitější externí knihovnou je Computational Geometry Algorithms Library (www.cgal.org), což je knihovna geometrických algoritmů, která mimo jiné umožňuje jednoduché vytvoření datové struktury straight skeleton. Straigh skeleton byl vybrán z důvodu jeho geometrických vlastností, které jsou popsány ve čtvrté kapitole.

Dílčím cílem této práce je dokázat, že samotná šířka vodního toku je nedostatečné kritérium pro rozhodování o zachování reprezentace břehovkami či generalizování vodního toku, a navrhnout další vhodná doplňková kritéria. Dalšími cíli práce jsou:

- stanovení kartografických kritérií pro prostorovou redukci,
- provedení prostorové redukce tak, aby byla z kartografického hlediska korektní, a nevznikaly anomálie,
- ošetření problémů vznikající přítomností ostrůvků na vodním toku.

Algoritmus bude testován na datech, která poskytl Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK). Jsou tvořena vrstvou „VodniPlocha“ ze ZABAGED (Základní báze geografických dat České republiky) v rozsahu deseti mapových listů. Geograficky lze území vymezit od malé vesnice Chloumek v okresu Ústí nad Orlicí až po Hradec Králové. Data zahrnují řeku Tichou Orlici od 22. říčního kilometru až po soutok s Divokou Orlicí i řeku Orlice, která pokračuje od soutoku Divoké a Tiché Orlice až do

3. říčního kilometru. Tato oblast byla vybrána z důvodu velkého výskytu míst s rozdílnou šířkou, a tudíž je vhodným místem pro testování.

Práce má následující uspořádání. Druhá kapitola je věnována rešerši stávajícího stavu zahrnující jak vlastní metody generalizace, tak i pomocné geometrické struktury (skeletony). Ve třetí kapitole je rozebrána problematika prostorové redukce z kartografického pohledu. Podrobně je diskutována šířka řeky jako základní rozhodovací kritérium generalizace. Kapitola čtvrtá se věnuje návrhu vlastního generalizačního algoritmu. Testování algoritmu na ukázkových datech s dosaženými výsledky lze nalézt v kapitole 5. Šestá kapitola shrnuje obsah celé práce.

# 2. Rešerše současného stavu

Definici digitální generalizace podle McMaster a Stuart Shea (1992) zní: „*Digitální generalizace může být definována jako proces odvození symbolicky či digitálně uloženého souboru kartografických dat z datového zdroje s využitím prostorových a atributových transformací*.“ překlad převzat z Hynková (2014).

Kartografická generalizace je ovlivňována několika faktory, zejména účelem, měřítkem, charakteristikou území, vybranými kartografickými vyjadřovacími prostředky a subjektivismem kartografa. Na základě svých zkušeností vnáší kartograf do procesu generalizace své vlastní uvážení a rozhodnutí. Pokud tedy bude ta samá mapa generalizována znovu dalším kartografem, výsledné mapy se mohou, a zřejmě i budou lišit. Subjektivismus kartografa je největší problém algoritmizace generalizačních metod. Každá generalizační metoda se liší výsledkem a efektivitou.

Eduard Imhof prohlásil, že obsah složité mapy nemůže být nikdy generalizován automatizovaně, jelikož stroje postrádají geografický úsudek a estetické cítění (Imhof 1982). Vzhledem k obsahu zpracovávaných dat je snaha o vytvoření takových automatizovaných postupů, jejichž výsledky budou totožné nebo se budou blížit výsledkům kartografa.

Multi-scale representation maps nabízí možnost přechodu mezi jednotlivými měřítky v digitálním kartografickém díle. Při přechodu z většího měřítka do menšího je možné zobrazit jen podmnožinu původních dat, jelikož zobrazované území se zvětšuje, ale plocha mapy zůstává stejně velká. Dochází k nutné změně prostorové reprezentace, která zahrnuje transformaci vzájemných vztahů, geometrickou a tematickou transformaci (Bayer 2018).

Generalizační operátory jsou metody, které se aplikují na zpracovávaná data při procesu generalizace. Popisují, co má být s danými prvky provedeno, zatímco generalizační algoritmy popisují, jakým způsobem toho dosáhnout. Při procesu generalizace je nutné správně zvolit kombinaci jednotlivých operátorů a pořadí, ve kterém budou použity. Tento proces je nazýván **systémem řízení kartografické generalizace**. Neexistuje však univerzální pravidlo, podle kterého by se bylo možné řídit, a proto je nutné vždy volit operátory individuálně pro jednotlivé specifické případy. Podle Shea a McMaster (1989) je právě volba operátorů nejsložitějším procesem v konceptu automatizace digitálního procesu generalizace.

McMaster a Stuart Shea (1992) popsali deset metod prostorové transformace, které se používají pro změnu grafického zobrazení prvků při změně (zmenšení) měřítka mapy, aby byla zachovaná přehlednost mapy. Popsané metody:

- Simplification (zjednodušení) – zjednodušení tvaru prvku při zachování základních tvarových charakteristik daného prvku.
- Smoothing (vyhlazení) – úprava liniového prvku tak, aby byl esteticky příjemnější pro oko.
- Aggregation (agregace) – spojení blízkých prvků se stejnou geometrickou reprezentací v jeden prvek.
- Amalgamation (sloučení) – spojení uzavřených oblastí, které jsou blízko sebe, ale jsou odděleny jiným prvkem, v jednu oblast.
- Merging (spojení) – spojení liniového prvku se sousedním liniovým prvkem.
- Collapse (změna prostorové dimenze) – transformace plošných prvků na linie či body.
- Refinement (zdokonalení) – úplné odstranění příliš malých prvků či prvků, které jsou pro celkový dojem z mapy nepodstatné.
- Exaggeration (zvětšení) – zvětšení prvku tak, aby byl zobrazitelný na mapě.
- Enhancement (rozšíření) – úprava symbolů, aby byly v daném měřítku rozpoznatelné.
- Displacement (přesun) – přesun jednoho či více prvků.

Později bylo doplněno několik dalších metod (Li 2016), mezi tyto metody patří regionalizace, selektivní vynechání, typizace, redukce počtu bodů, částečný posun, měřítkově závislá generalizace, rozdělení, seskupení, přemístění a rozpuštění. Avšak tento seznam metod nemusí být konečný.

Podle geometrické reprezentace daného objektu a podle typu kartografického objektu se liší operátory generalizace, které je možné na daný prvek použít. Některé operátory se dají použít i na více typů geometrických reprezentací, například agregaci je možné aplikovat na skupinu uzavřených oblastí i na skupinu bodů (Li 2006).

## 2.1 Skeletonizace

Tato práce se zabývá změnou prostorové dimenze neboli prostorovou redukcí plošného prvku konkrétně vodního toku, pro účely prostorové redukce se používá skeletonizace.

Skeletonizace je proces, při kterém dochází k redukci dimenze plošného prvku a vzniká jeho topologická kostra. Pro tento proces se využívají skeletonizační algoritmy, které vytvoří topologickou kostru (skeleton) plošného objektu. Objekt je následně nahrazen vlastním skeletonem. Skeletonizační algoritmy tedy dekomponují polygon na posloupnost úseček či křivek.

Nejčastěji se ve vektorovém formátu používají tři typy topologické kostry: medial axis, chordal axis a straight skeleton. Topologické kostry jsou velmi důležitým nástrojem pro tvarovou analýzu a využívají se v různých vědních oborech. V kartografii jsou skeletonizační algoritmy nejdůležitější skupinou algoritmů pro prostorovou redukci (Buczek 2017).

### 2.1.1 Využití medial axis v kartografii

Medial axis neboli střední osu prezentoval a pojmenoval Blum (1967). Tato topologická kostra je již dlouhodobě využívána pro generalizační účely v kartografii. Jiang et al. (2011) navrhli algoritmus využívající medial axis pro generalizaci vodního toku metodou prostorové redukce. Jejich práce se zabývá hlavně zachováním topologie po provedení úplné prostorové redukce s využitím Delaunay triangulace.

McAllister a Snoeyink (2000) použili medial axis pro generalizaci vodních toků a jezer. O prostorové redukci je rozhodováno na základě odhadované plochy části vodního toku. Autoři v práci hledají nejvhodnější pomocnou strukturu k sestrojení medial axis, aby byla následně použitelná i na extrakci atributů vodního toku.

Szombara (2013) prezentoval metodu pro částečnou prostorovou redukci vodního toku s využitím medial axis vytvořenou pomocí Voronoi diagramů. Prezentovaná metoda je řízena pouze měřítkem.

### 2.1.2 Využití chordal axis v kartografii

Chordal axis poprvé představil Prasad (1997). Její diskrétní varianta využívá ke své konstrukci Delaunay triangulaci. Jones et al. (1995) se zabývali využitím Delaunay triangulace pro tvorbu topologické kostry jako jedni z prvních. Na základě vytvořené topologické kostry navrhli několik generalizačních metod. Jednalo se o prostorovou redukci, sloučení a zvětšení.

Bader a Weibel (1997) popsali několik generalizačních metod, které využívají chordal axis. Tyto metody následně také implementovali v rámci experimentálního systému PolyGen. Jednalo se především o odstranění uzavřené oblasti a následné rozdělení její plochy sousedním oblastem. Dále se zabývali posunutím uzavřené oblasti a agregací. van der Poorten a Jones (2002) využili Delaunay triangulaci pro konstrukci topologické kostry ke generalizování kartografických linií.

### 2.1.3 Využití straight skeletonu v kartografii

Myšlenku straight skeletonu poprvé představili Aichholzer et al. (1995). Tato myšlenka byla později definována a algoritmus pro obecné rovinné oblasti publikovali Aichholzer a Aurenhammer (1996).

Petzold et al. (2005) se zabývají využitím straight skeletonu v oblasti generalizace plánů měst. Práce se zaměřuje především na problematiku topologie a konektivity linií po provedení prostorové redukce. Li et al. (2018) využili straight skeleton pro extrakci linií cestní sítě. Jejich práce se zaměřuje na topologickou korekci v komplexních místech, jako jsou složité křižovatky.

Použití straight skeletonu při generalizaci se dále zabývali Haunert a Sester (2004) a Haunert a Sester (2008). Autoři také navrhli a implementovali vlastní metodu pro prostorovou redukci a částečnou prostorovou redukci.

Haunert a Sester (2008) použili také modifikaci straight skeletonu tzv. vážený straight skeleton k zachování topologie při kolapsu plošného vodního toku. Biedl et al. (2015) podrobně studovali vážený straight skeleton a upozorňují, že hodně přirozených vlastností straight skeletonu se nepřenáší na vážený straight skeleton. Je tedy nutné dbát na tento fakt při použití váženého straight skeletonu (Biedl et al. 2015). Vážený straight skeleton je zatím ve fázi výzkumu a pro jeho využití je nutná podrobná znalost problematiky.

Šíp (2007) využil straight skeleton pro odstranění uzavřené oblasti a rozdělení její plochy sousedícím oblastem metodou dissolvingu.

## 2.2 Prostorová redukce

Prostorová redukce, někdy také změna prostorové dimenze nebo kolaps, je prostorová transformace, která má široké uplatnění při kartografické generalizaci plošných objektů.

Proces prostorové redukce daného objektu v měřítku $1:M_0$ na měřítko $1:M_i$ má dle Szombara (2013) následující kroky. Krok 1 a 2 je možné na základě vybrané metodiky provést v opačném pořadí.

1. Určení skeletonu daného objektu.
2. Kontrola zdali je objekt rozpoznatelný v novém měřítku $1:M_i$.
3. Vykreslení rozpoznatelných částí plošného objektu v novém měřiku $1:M_i$.
4. Výměna nerozpoznatelných částí objektu v měřítku $1:M_i$ (nebo celého objektu) za liniový prvek s využitím skeletonu.

Haunert a Sester (2008) sepsali obecné požadavky, které musí metoda splňovat, aby mohla být použita pro řešení úlohy kolapsu. Těchto požadavků je celkem šest, ale nemusí to být konečný počet, jak autoři uvádějí, pro specifické případy jich může být více. Požadavky týkající se této práce jsou:

- Při částečném kolapsu by si prvek měl zachovat 2D reprezentaci v místech, které přesahují prahovou hodnotu šířky.
- Odvozený lineární tvar musí reflektovat hlavní prodloužení uzavřené oblasti a ignorovat malé anomálie.

### 2.2.1 Skeletonizace plošných sítí

Skeletonizace spojené oblasti, jako například spojené plošné silniční sítě, může vyústit v nepřirozený průběh skeletonu na křižovatkách, kde se setkává několik silnic. Tento problém i s možným řešením popsali Haunert a Sester (2004).

Haunert a Sester (2004) prezentovali možné řešení pomocí agregace uzlů skeletonu na křižovatkách a dalších omezení, ale upozorňují na fakt, že se jedná spíše a heuristickou metodu, která funguje pro tento specifický příklad.

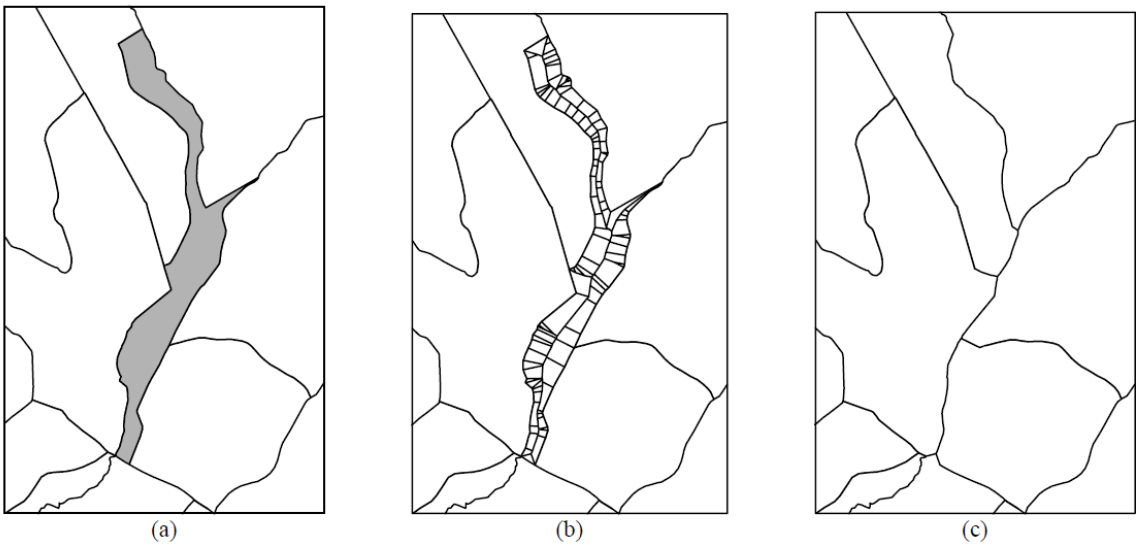
Stejnou problematikou dále řeší Haunert a Sester (2008), kteří se věnují skeletonizaci silniční sítě a křižovatkám více do hloubky. Na nedostatky metody, kterou navrhli, poukázali Li et al. (2018) a prezentovali nový přístup ke složitým křižovatkám.

Tato problematika zde nebude podrobně rozpracována, jelikož vodní toky netvoří tak komplexní „křižovatky“ jako silniční síť, a proto není nutné se zde touto problematikou podrobně zabývat.

### 2.2.2 Topologie generalizovaných prvků

Při prostorové redukci vodního toku znázorněného břehovkami na liniový dochází ke zmenšení plochy objektu, což má za následek chybu v topologii. Mezi liniovým vodním tokem a oblastí sousedící s vodním tokem, vznikne mezera. Tento problém a jeho řešení přiřazením prázdného místa sousedící oblasti s největší plochou byly popsány v Haunert a Sester (2004).

To ale může způsobit dramatickou změnu ve velikosti dané uzavřené oblasti a vyústit v nepřirozené hranice pro daný typ povrchu. Při aplikování straight skeletonu je možné jednotlivé plochy vzniklé liniemi skeletonu přiřadit jednotlivým sousedům, čímž je rozdělení plochy vyváženější a nedochází k tvorbě nepřirozených hranic (Haunert a Sester 2004). Ukázka tohoto procesu je vidět na Obr. 1.




*Obr. 1 Rozdělení plochy vodního toku po prostorové redukci podle straight skeletonu.*

*Zdroj: (Haunert a Sester 2004)*

Haunert a Sester (2008) doplnili metodu o použití vah tak, aby k určité oblasti bylo přidáno víc plochy než k jiné. V takovém případě ale dochází k vychýlení skeletonu z původního středu vodního toku. Tato problematika je ale velice specifická, jelikož případné chyby v topologii mohou být řešeny různě tak, aby reprezentace vyhovovala požadovanému výsledku.

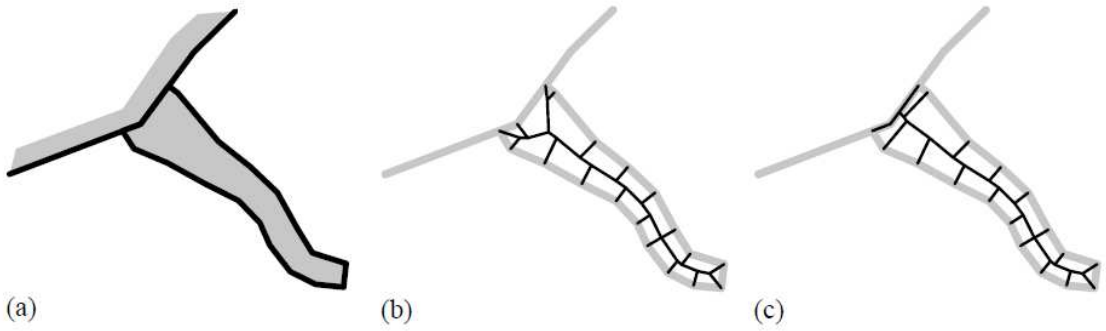
### 2.2.3 Konektivita generalizovaných prvků

Při prostorové redukci řeky, která vtéká do jezera, dochází ke ztrátě konektivity, jelikož skeleton (nebo jeho aproximace) se nemusí dotýkat okraje uzavřené oblasti. Tento problém je možné řešit dvěma způsoby:

- úprava sklonu rovin definujících skeleton,
- přidání bodu na sdílenou hranu.

První metoda byla popsána Haunert a Sester (2008). Metodu je možné interpretovat geometricky ve 3D. Jedná se o úpravu sklonu rovin definujících skeleton, které se zvedají z každé hrany. Při zvětšování sklonu roviny se skeleton pohybuje ve směru hrany, ze které se rovina zvedá. Dochází tedy k zmenšování vzdálenosti segmentů skeletonu. Ve 2D je možné si představit sklon roviny jako váhový parametr, který určuje zmenšování vzdálenosti, jelikož všechny plochy mají ve 2D sklon 0°. Na Obr. 2c je možné vidět definovanou vertikální rovinu (90°) na sdílené hraně, což zajišťuje konektivitu, jelikož straight skeleton se dotýká sdílené hrany.

Druhá metoda byla popsána Haunert a Sester (2004). Metoda spočívá v přidání bodu na sdílenou hranu jezera a řeky. Tento bod se při skeletonizaci promítne do výsledného skeletonu a nechá za sebou linii, která zajistí konektivitu se sousedním objektem. Tato linie nesmí být při odstraňování okrajových linií skeletonu smazána.




*Obr. 2 (a) Napojení řeky na jezero, (b) vytvoření straight skeletonu – ztráta konektivity, (c) upravený straight skeleton metodou úpravy sklonu roviny.*

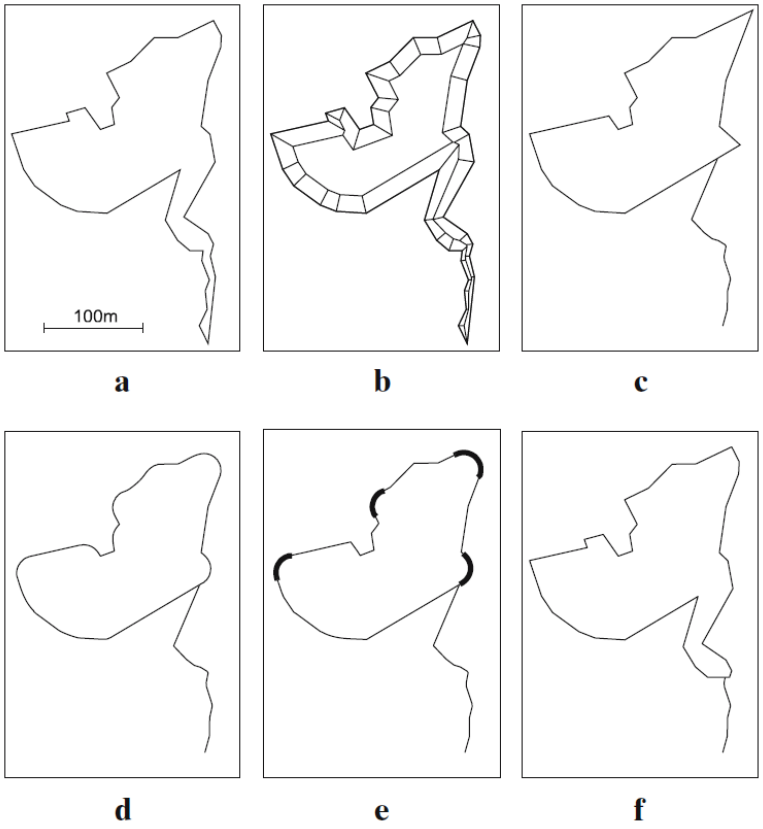
*Zdroj: (Haunert a Sester 2004)*

### 2.2.4 Částečná prostorová redukce

Pokud části uzavřené oblasti mají být znázorněny odlišně, je nutné daný objekt rozdělit a rozhodnout, zdali bude určitá část redukována či nikoliv. Tento proces závisí na dané

prahové hodnotě. Prahová hodnota je většinou určována jako minimální šířka, kterou musí řeka splňovat, aby zůstala zachována (Haunert a Sester 2004).

Haunert a Sester (2008) představili metodu pro částečnou prostorovou redukci využívající straight skeleton. Metoda je založena na základě smršťovacího procesu skeletonu, který se zastaví, jakmile urazí polovinu zadané prahové hodnoty, jak je možné vidět na Obr. 3b. Dále následuje kolaps částí, u kterých byla skeletonizace kompletní. Po tomto procesu záleží na metodě rekonstrukce tvaru jezera, může být použit například kruhový buffer, viz Obr. 3d. Prahová hodnota v tomto případě reprezentuje polovinu šířky vodního toku. Autoři ale také zmiňují, že často podmínka šířky nestačí, a je nutné najít nové podmínky pro částečnou prostorovou redukci.

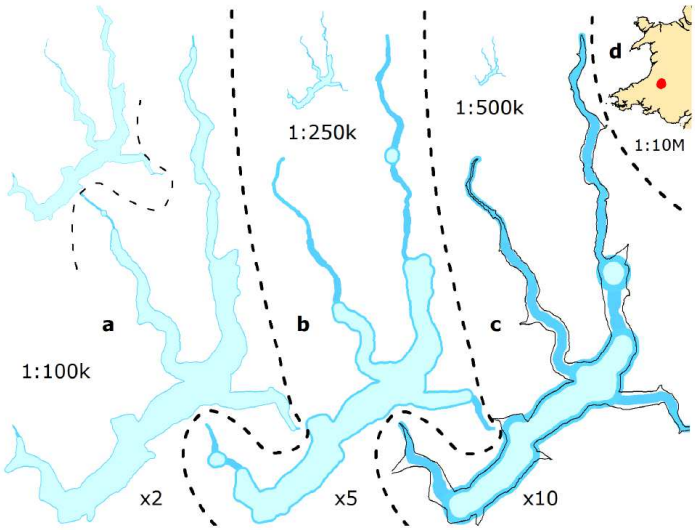



*Obr. 3 (a) Jezero, do kterého ústí řeka (b) zastavený proces smršťování na půlce prahové hodnoty (c) kolaps (d, e) možnosti rekonstrukce původního tvaru jezera (f) kolaps-jiný prahové hodnoty než (c).*

*Zdroj: (Haunert a Sester 2008)*

Szombara (2013) přispěl do oblasti částečné prostorové redukce metodou, která nepoužívá straight skeleton, ale využívá medial axis vytvořenou pomocí Voronoi diagramů. Autorova prezentovaná metoda je řízena pouze měřítkem a využívá největší vepsané kružnice, které mají střed na střední ose. Velikost kružnice určuje, jaká část

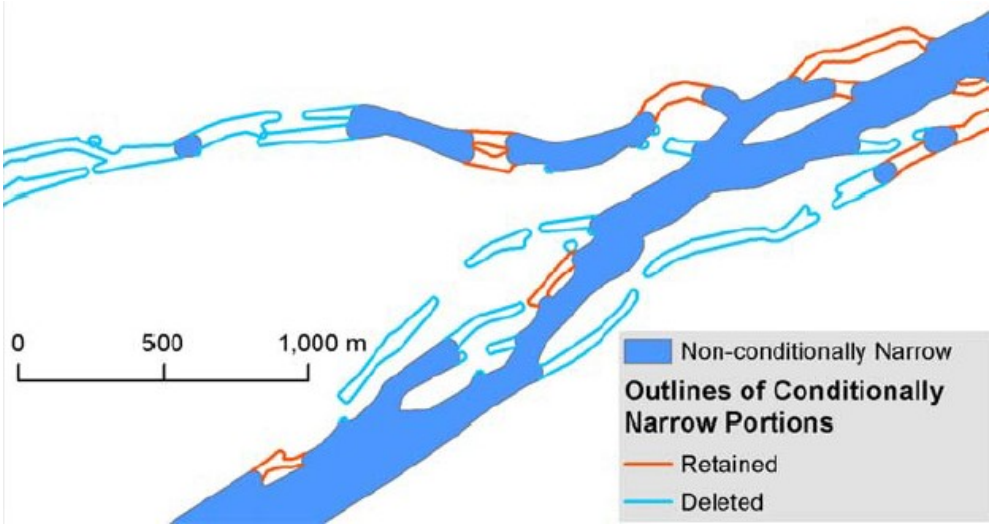
oblasti má být zredukována. Průměr disku představuje šířku uzavřené oblasti v daném místě. Výsledky generalizace této metody je možné vidět na Obr. 4.




*Obr. 4 Ukázka kolapsu metody využívající medial axis v jednotlivých měřítkách – různě zvětšené výsledky. Zdroj: (Szombara 2013)*

Nejnovějším příspěvkem do této tématiky přispěli Stum et al. (2017), kteří se sice nezabývali prostorovou redukcí, nýbrž kompletní eliminací vodních ploch, které nesplňují určité podmínky. Autoři však zmiňují, že pokud by prvky nebyly odstraněny, mohly by být nahrazeny liniovým znakem. Tato modifikace metody by z ní udělala operátor pro prostorovou redukci.

Metoda, kterou Stum et al. (2017) prezentovali, neuvažuje pro rozhodování o odstranění vodního toku pouze jeho šířku, ale pracuje s kritérii. Nejdříve dochází k rozdělení vodního toku na jednotlivé prvky, aby například při rozdělení vodního toku ostrovem bylo řešeno každé rameno vodního toku zvlášť. Na jednotlivé prvky je následně aplikováno kritérium, které rozhodne, zdali prvek odstranit. Podle tohoto kritéria musejí být části vodního toku větší než specifická šířka podmíněná délkou části vodního toku. Prvky nesplňující tato kritéria jsou smazány, pokud nejsou nezbytné pro zachování konektivity viz Obr. 5. Šířka je určována pomocí negativního bufferu.




*Obr. 5 Světle modře jsou odstraněné oblasti, červeně oblasti, které mají být odstraněny, ale v důsledku nezbytnosti pro konektivitu jsou zachovány.*

*Zdroj: (Stum et al. 2017)*

### 2.2.5 Ostrovy na vodním toku

Tento problém poprvé nastínili McAllister a Snoeyink (2000). Autoři zmiňují, že ostrovy na vodním toku ovlivňují výsledky prostorové redukce a je nutné je brát při prostorové redukci v úvahu. V práci tuto problematiku ale autoři neřeší.

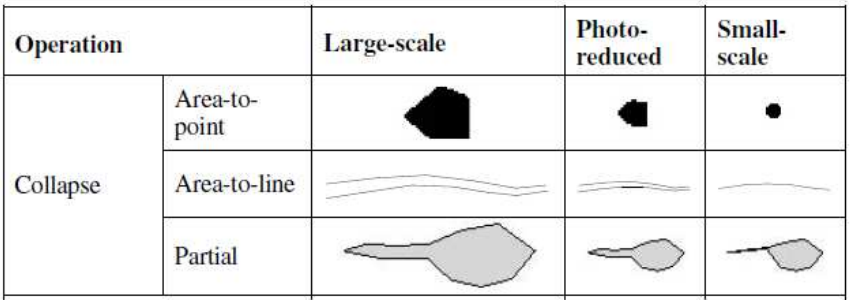
Stum et al. (2017) řeší v rámci odstraňování částí vodního toku také ostrovy na vodním toku. Metoda, kterou autoři prezentovali, využívá kritéria, která rozhodují, zdali ostrov na vodním toku zachovat či ho odstranit. V práci autoři využívají kritérium short-axis algoritmus. Aby uzavřené oblasti splňovaly toto kritérium, musejí mít větší šířku podél kratší osy, než je zadaná prahová hodnota. Pokud ostrovy nejsou odstraněny, může docházet k agregaci s jinými ostrovy, jelikož úzké linie mezi nimi jsou vynechány. Odstranění ostrovů způsobuje zvětšení plochy vodního toku, což je důležité, jelikož se tím mění šířka řeky pro další kritéria.

# 3. Generalizace vodního toku metodou prostorové redukce

Tato kapitola se zabývá metodou prostorové redukce (změnou prostorové dimenze), která je použita pro generalizaci vodního toku. Úvodní část je věnována popisu metody z kartografického pohledu. Klíčový faktor pro aplikaci této metody představuje šířka vodního toku. Rozbor kritérií pro její stanovení a rozbor použitých kartografických pravidel je možné nalézt v dalších podkapitolách. Na závěr se tato kapitola věnuje prostorové redukci vodních toků na významných mapových portálech. Další důležitou část představuje návrh generalizačního algoritmu pro prostorovou redukci vodního toku, jehož implementaci nalezneme v kapitole 4.

## 3.1 Prostorová redukce

Prostorová redukce je generalizační operátor, který redukuje dimenzi objektu. Nejčastěji se používá redukce plošného prvku na linii nebo posloupnost navazujících linií (2D -> 1D) a z plošného prvku na bod nebo množinu bodů (2D -> 0D). Vodní toky jsou do určitého měřítka reprezentovány plošným kartografickým znakem, tzv. břehovkami. Z pohledu GIS se zpravidla jedná o polygon uložený v nějaké digitální databázi. V této práci je prostorová redukce chápána jako úplná či částečná transformace uzavřené oblasti na liniový prvek tak, aby byl vodní tok zachován a korektně kartograficky reprezentován v mapě menšího měřítka.




*Obr. 6 Ukázka operátoru prostorové redukce.*

*Zdroj: (Li 2006)*

K úplné prostorové redukci dochází, pokud daná uzavřená oblast je v daném měřítku již příliš malá a nelze ji reprezentovat plošným prvkem, celá oblast se tedy nahradí liniovým prvkem. K částečné prostorové redukci dochází, když část uzavřené oblasti je již nereprezentovatelná plošným prvkem, ale zbytek oblasti stále je. Příkladem může být

řeka ústící do vodní nádrže, vodní nádrž je znatelně širší než řeka, jenž do ní ústí. Práce se zabývá jak úplným, tak částečným kolapsem vodních toků v mapách velkých měřítek. Konkrétně je v práci prováděna prostorová redukce pro topografické mapy napříč měřítkovými čísly od 1 : 5 000 do 1 : 100 000. Práce při prostorové redukci nevychází z konkrétních měřítkových čísel, ale z konkrétních prahových hodnot šířky.

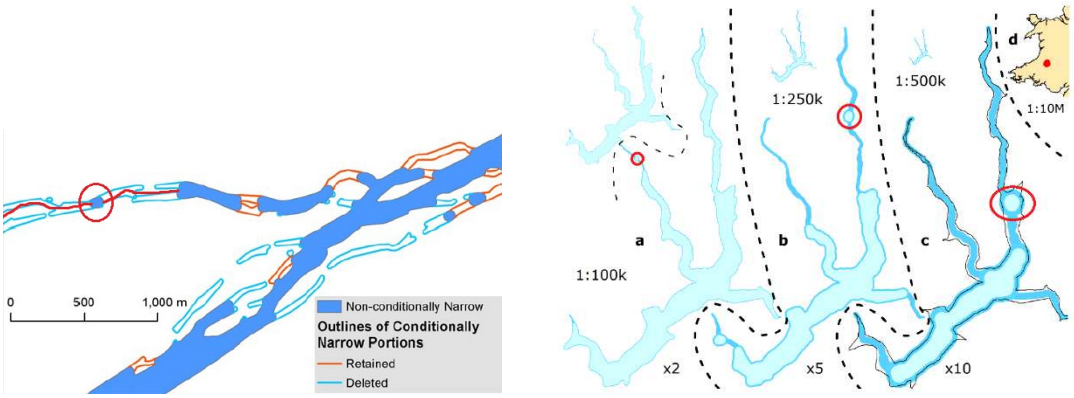
V této práci je při prostorové redukci uzavřená oblast reprezentována lomenými čárami nahrazována částí straight skeletonu. Jedná se o podmnožinu straight skeletonu takovou, že její segmenty neincidují s vrcholy původní oblasti. Taková část straight skeletonu vytváří nový liniový prvek, který reprezentuje vodní tok v novém měřítku. Na tento liniový prvek je možné dále aplikovat vyhlazovací algoritmy pro estetičtější vzhled.

### 3.1.1 Částečná prostorová redukce

Jak již bylo uvedeno výše, metoda prostorové redukce představuje redukci dimenze objektu. V této práci je prostorová redukce chápána jako úplná či částečná transformace uzavřené oblasti na liniový prvek. Tato generalizační operace je typická pro topografické mapy velkých a středních měřítek. V práci jsou řešeny uzavřené oblasti (vodní toky) topografické mapy velkého měřítka.

Největším problémem metody částečné prostorové redukce je použití šířky vodního toku v daném místě jako kritérium pro rozhodování o zachování reprezentace břehovkami, či generalizování vodního toku. Pokud existuje na vodním toku úsek, který je jen o trochu širší než jeho okolí, může dojít k zachování plochy reprezentované břehovkami, která by z kartografického hlediska měla být nahrazena liniovým prvkem a vznikne anomálie viz Obr. 7.

Taková reprezentace působí dojmem, že se na daném místě nachází rozšíření vodního toku např. vodní nádrž, jezírko či rybník. Ve skutečnosti se jedná jen o malou anomálii, která by neměla být brána v úvahu. Za vznik těchto, z kartografického pohledu problematických míst, může právě šířka vodního toku, která v zachovaných místech (reprezentovaných břehovkami) vodního toku dosahuje vyšších hodnot, než je stanovená prahová hodnota.




*Obr. 7 Upravené obrázky 4 a 5, kde jsou červeně znázorněny anomálie.*

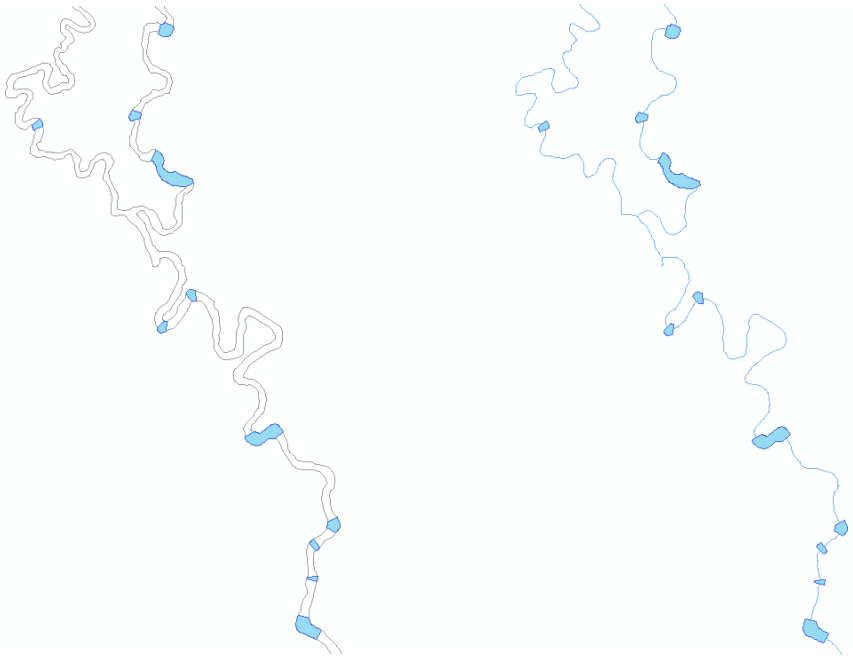
Při částečné či úplné prostorové redukci vodních toků by měly být brány v úvahu i ostrovy, v těchto místech dochází zpravidla ke změně šířky vodního toku, která doposud není při automatizované generalizaci korektně interpretována. Pokud je ostrov malý, může dojít i k jeho úplnému odstranění, což se projeví na šířce řeky v daném místě.

## 3.2 Stanovení šířky vodního toku

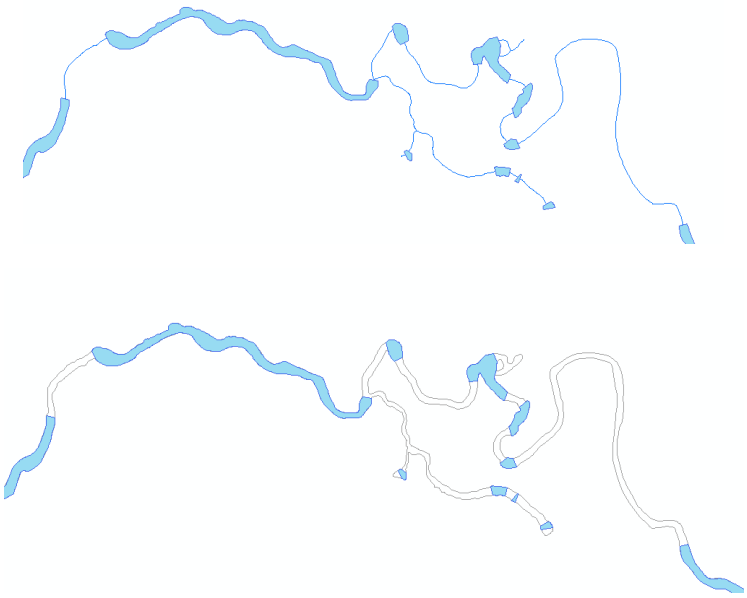
Obecně pro vodní tok platí, že čím dál od pramene, tím větší šířka vodního toku. Lokálně toto pravidlo však neplatí, jelikož vodní tok neustále mění svoji šířku. Důležité je si uvědomit, že při velkých skocích mezi měřítkovými čísly (například skoková změna měřítka z 1 : 50 000 na 1 : 100 000) není problém zmíněný v předchozí kapitole 3.1 tolik výrazný, jelikož vodní plocha bude výrazně generalizovaná. Při méně výrazné změně měřítka (např. 1 : 50 000 do 1 : 75 000) bychom narazili na hodnotu měřítkového čísla (hraniční hodnota), kdy dojde k transformaci uzavřené oblasti na linii, protože již nebude možné vodní tok reprezentovat břehovkami. Změny uzavřené oblasti na linii se tedy projeví na různých místech vodního toku podle nastavené prahové hodnoty šířky, která určuje, zdali zachovat reprezentaci vodního toku břehovkami, či ho generalizovat. Dojde tedy k částečné prostorové redukci vodního toku, která může mít za následek nekorektní generalizaci z kartografického hlediska.

Pokud budou části reprezentované břehovkami vodního toku jen o trochu širší než prahová hodnota šířky, tak vizuální rozdíl mezi šířkou části reprezentované břehovkami vodního toku a části určené k redukci bude velice malý či téměř žádný. Přesto se však po provedení prostorové redukce změní reprezentace vodního toku na soustavu linií a ploch, které mohou být v mapě interpretovány odlišně od původní reprezentace vodního toku. Novou reprezentaci vodního toku tvoří umělá rozšíření, která by zde neměla být.

Na Obr. 8 a 9 je možné vidět vizuální rozdíl mezi částmi vodního toku, které jsou reprezentované břehovkami, a částmi určenými k redukci. Dále obrázky znázorňují umělá rozšíření vodního toku.



*Obr. 8 Vlevo modrou barvou zvýrazněny úseky, které nebudou generalizovány, vznikají umělá rozšíření vodního toku (vpravo).*



*Obr. 9 Stejný jev jako na Obr. 8 na jiných částech vodního toku.*

### 3.2.1 Kritéria pro rozhodování o generalizaci vodního toku

Z rešerše vyplývá, že v naprosté většině případů se používá stanovení minimální šířky vodního toku jako činitele pro rozhodování, zdali vodní tok generalizovat metodou prostorové redukce, či nikoliv. Z výše uvedených obrázků je patrné, že lokální šířka není dostatečně robustní kritérium, aby bylo možné správně rozhodnout o provedení generalizace. Nicméně šířka bude v konečné množině kritérií jedním z důležitých ukazatelů. Kritéria bude nutné kombinovat nebo aplikovat několik kritérií po sobě, v podstatě se tedy bude jednat o multikriteriální hodnocení. Pro detekci rozšiřujících se míst na vodním toku se nabízí několik kritérií, viz Obr. 10:

Poměr délky a průměrné šířky

$$\alpha = \frac{l(P)}{\overline{w}(P)}, \tag{1}$$

kde *l(P)* je délka daného úseku *P* (oblasti) vodního toku a $\overline{w}(P)$, představuje průměrnou šířku daného úseku vodního toku.

Poměr délky a prahové hodnoty šířky

$$\beta = \frac{l(P)}{w_{max}}, \tag{2}$$

kde *l(P)* je délka daného úseku vodního toku a $w_{max}$, představuje prahovou hodnotu šířky.

Průměrná odchylka šířky

$$\sigma = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|w_i(P) - \overline{w}(P)|, \tag{3}$$

kde $\overline{w}(P)$ představuje průměrnou šířku daného úseku vodního toku, *n* je počet míst, na kterých byla šířka měřena v rámci daného úseku a $w_i(P)$, označuje šířku daného úseku vodního toku v místě s indexem *i*.

Poměr průměrné šířky a prahové hodnoty šířky

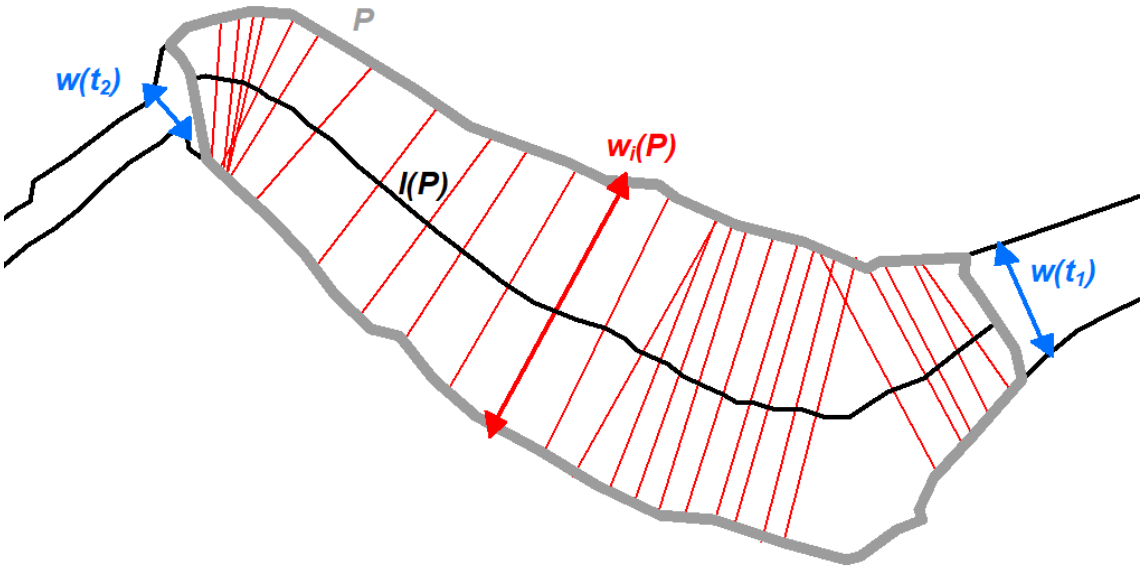
$$\delta = \frac{\overline{w}(P)}{w_{max}}, \tag{4}$$

kde $\overline{w}(P)$ je průměrná šířka daného úseku vodního toku a $w_{max}$, představuje prahovou hodnotu šířky.

Poměr maximální a okrajové šířky

$$\varepsilon = \frac{\max_P\{w(P)\}}{\min\{w(t_1), w(t_2)\}}, \tag{5}$$

kde čitatel představuje maximální šířku daného úseku vodního toku reprezentovaného oblastí *P* a jmenovatel je menší z lokálních šířek sousedních úseků vodního toku v místě styku s daným úsekem *P* vodního toku, viz Obr. 10.




*Obr. 10 Znázornění jednotlivých parametrů šířky a délky úseku vodního toku.*

### 3.2.2 Místa rozšíření vodního toku

Pro detekci rozšiřujících se míst na vodním toku se nabízejí dvě možnosti.

1. **Detekce na základě šířky vodního toku**

   V tomto případě se detekují rozšiřující se místa jen na základě jejich šířky a následně se na ně aplikují doplňková kritéria.

2. **Detekce s využitím navržených kritérií**

   Pro detekci rozšiřujících se míst pomocí ostatních parametrů a kritérií lze použít např. klouzavý průměr. Tato metoda bere při detekci rozšiřujících se míst v potaz okolí kolem aktuálně měřeného místa.

Cílem práce je dokázat, že šířka jako samostatné kritérium není dostačující, a proto byla v této práci zvolena detekce na základě šířky vodního toku. Tato metoda umožňuje kombinovat různé druhy navržených doplňkových kritérií a aplikovat je na již detekované úseky, aniž by to ovlivňovalo postup algoritmu.

### 3.2.3 Místa s ostrovy

Při zjišťování, v jakých místech má dojít k prostorové redukci vodního toku, je nutné znát přítomnost ostrovů v místě předpokládané generalizace. Pokud bychom toto neznali, docházelo by zde k větvení skeletonu a ke vzniku nevhodné kartografické reprezentace vodního toku. Musí tedy být rozhodnuto, jestli v cílovém měřítku bude ostrov zachován, či odstraněn, jelikož od této skutečnosti se bude odvíjet zpracování dané části vodního toku.

Z rešerše v této práci je zřejmé, že tato otázka není v literatuře téměř vůbec řešena. K tomuto problému je nutné přistupovat podobným způsobem jako k prostorové redukci, protože spolu souvisí. Jelikož prostorová a částečná prostorová redukce závisí z velké části na šířce vodního toku, je možné využít parametr šířky a vytvořit kritéria, která budou rozhodovat o přítomnosti ostrovu na vodním toku. Navrženými kritérii v této práci jsou:

1) **Kritérium lokální šířky vodního toku**

   Kritérium bere v úvahu lokální šířku vodního toku podobně jako při prostorové redukci. Pokud tedy platí

   $$w(R_r) > w_{max} \vee w(R_l) > w_{max}\,, \tag{6}$$

   kde $w_{max}$ je prahová hodnota šířky pro prostorovou redukci, $w(R_r)$ je šířka pravého ramene a $w(R_l)$ je šířka levého ramene vedoucí kolem ostrova, tak není důvod ostrov odstraňovat, jelikož dojde k prostorové redukci jen jednoho ramene. V tomto případě může být ostrov v mapě stále zobrazen.

2) **Kritérium plochy ostrova**

   Jelikož plocha některých ostrovů může dosahovat i několik km$^2$, takové ostrovy nelze odstranit jen na základě lokální šířky vodního toku. Pokud tedy platí

   $$A > A_{max}\,, \tag{7}$$

   kde $A$ je plocha ostrova a $A_{max}$ je stanovená maximální plocha ostrova, tak musí být ostrov zachován i kdyby nesplňoval podmínku (6).

3) **Kritérium velké změny měřítkového čísla**

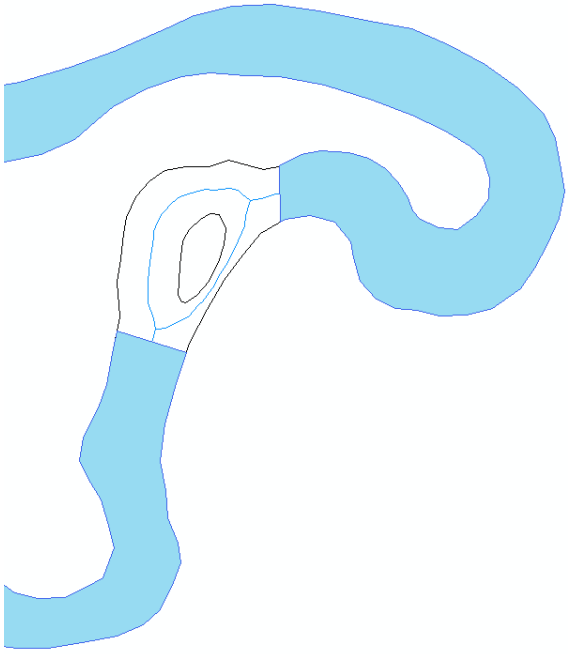
Pokud dojde k velkému skoku mezi měřítkovými čísly, tak ani plocha ostrova nemusí být relevantní údaj pro jeho zachování v mapě. Proto je nutné stanovit kritérium, které bere v úvahu poměr *e*

$$e = \frac{w_{max}}{w(R_r) + w(R_l)}, \tag{8}$$

mezi prahovou hodnotou šířky $w_{max}$ a šířkou obou ramen $w(R_l)$, $w(R_r)$. Poměr *e* je porovnáván s prahovou hodnotou $e_{max}$, která představuje takovou mezní hodnotu, při které pro daný tok není možné zachovat daný ostrov. Došlo by k velkému skoku mezi měřítky a plochu ostrova by již nebylo možné v mapě zobrazit.

K odstranění ostrovu by tedy mělo docházet jen v případě, že prahová hodnota šířky je několikanásobně vyšší než šířka obou ramen nebo obě ramena vodního toku nejsou širší než stanovená prahová hodnota šířky, a zároveň není daný ostrov dostatečně veliký.

Pokud dojde k odstranění ostrova, šířka vodního toku se v daném místě zvětší. Tento proces zvýší šanci na zachování reprezentace břehovkami daného místa na vodním toku. Jedná se o případ, kdy daný ostrov není v daném měřítku zobrazitelný, jelikož by nebylo možné zachovat plošné zobrazení vodního toku v daném místě. Pokud by ostrov nebyl odstraněn, může vzniknout nesouvislost reprezentace vodního toku břehovkami, jak je možné vidět na Obr. 11.



*Obr. 11 Nesouvislost reprezentace vodního toku břehovkami z důvodu neodstraněného ostrova.*

## 3.3 Kartografická pravidla použitá při generalizaci vodního toku

Kartografická pravidla nejsou kodifikována, některá nemají závazný charakter, jedná se spíše o formulovaná doporučení, jak ke zjednodušení obsahu mapy přistupovat. Řešení kartografické situace není tedy vždy jednoznačné, jelikož z kartografického pohledu může existovat více správných variant. Pokud má být automatizovaná generalizační technika kartograficky korektní (nebo se alespoň k takovému výsledku blížit), je nutné, aby každý algoritmus respektoval definovaná kartografická pravidla, podle kterých by generalizaci prováděl kartograf.

Při generalizaci vodního toku metodou změny prostorové dimenze je nutno zohlednit jak pravidla kartografická, tak topologická.

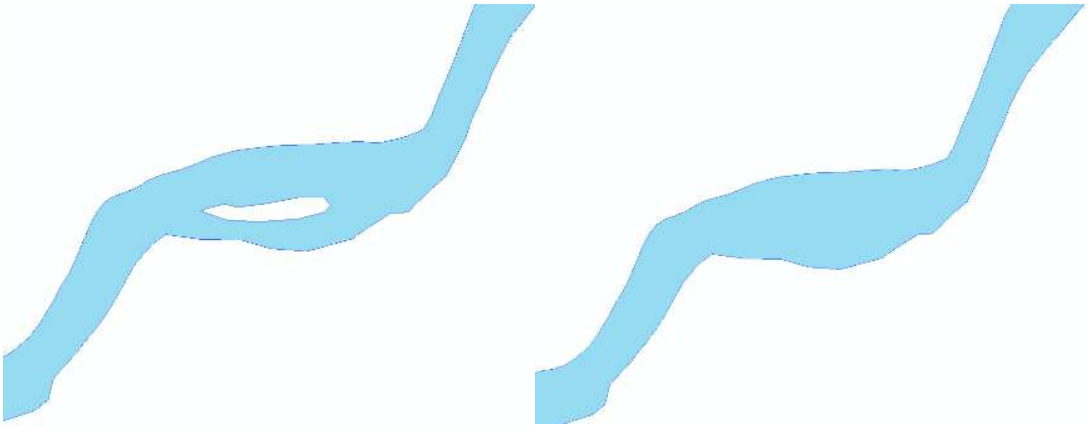
### 3.3.1 Seznam kartografických pravidel

Pravidla P1 až P6 o prostorové redukci:

**P1: Eliminace ostrovů**

Pokud se na vodním toku vyskytují ostrovy, jsou na ostrovy aplikována kritéria, která rozhodnou, zdali ostrov odstranit či ho zachovat.

- Ostrovy, které mají větší plochu než $A_{max}$, by měly zůstat zachovány.



*Obr. 12 Ukázka důsledku pravidla P1, vlevo původní stav, vpravo stav po aplikaci pravidla P1.*

**P2: Prostorová redukce**

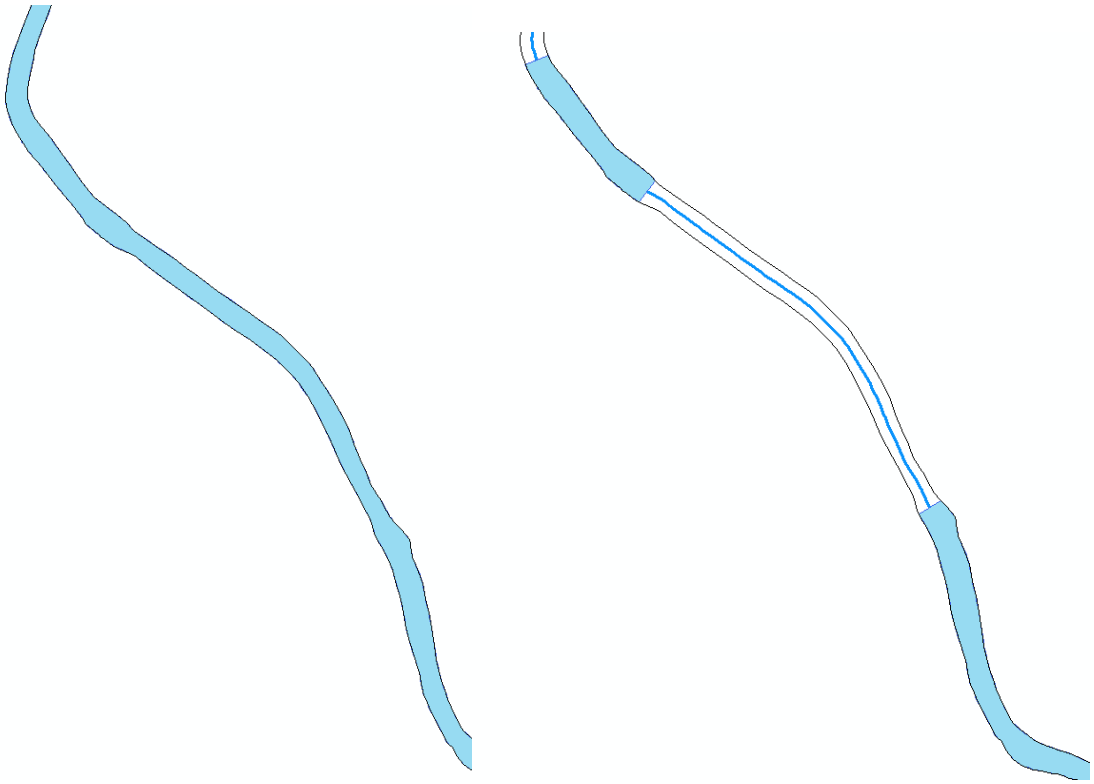
Pokud je šířka toku na nějakém intervalu menší než $w_{max}$, je provedena jeho generalizace změnou prostorové dimenze na tomto intervalu (úplná prostorová redukce).

*Obr. 13 Ukázka pravidla P2, vlevo původní stav, vpravo aplikace pravidla P2 (ponechán obrys řeky).*

**P3: Částečná prostorová redukce**

Pokud se na intervalu vodního toku vyskytují místa, jejichž šířka je větší než $w_{max}$ a zároveň se zde vyskytují místa, jejichž šířka je menší než $w_{max}$, je nutné přistoupit k metodě částečné prostorové redukce.

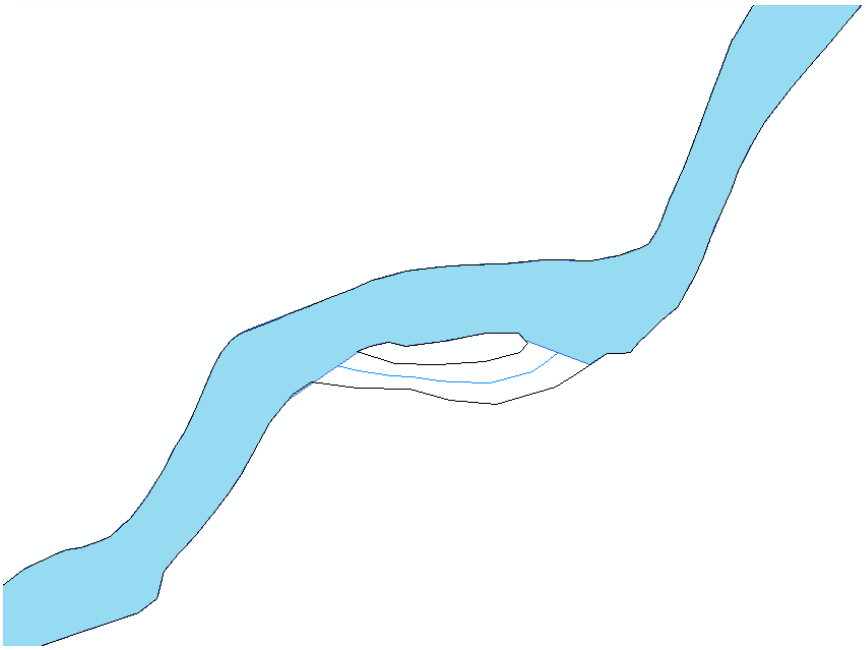
- Na úseky vodního toku, které jsou širší než $w_{max}$, jsou aplikována zvolená doplňková kritéria, která byla představena v kapitole 3.2.1: poměr délky a průměrné šířky $\alpha$ (1), poměr délky a prahové hodnoty šířky $\beta$ (2), průměrná odchylka šířky $\sigma$ (3), poměr průměrné šířky a prahové hodnoty šířky $\delta$ (4) a poměr maximální a okrajové šířky $\varepsilon$ (5). Tato kritéria rozhodnou, zdali zachovat reprezentaci vodního toku břehovkami, či ho generalizovat.



*Obr. 14 Ukázka pravidla P3, vlevo původní stav, vpravo aplikace pravidla P3 (ponechán obrys řeky).*

**P4: Větvení vodního toku**

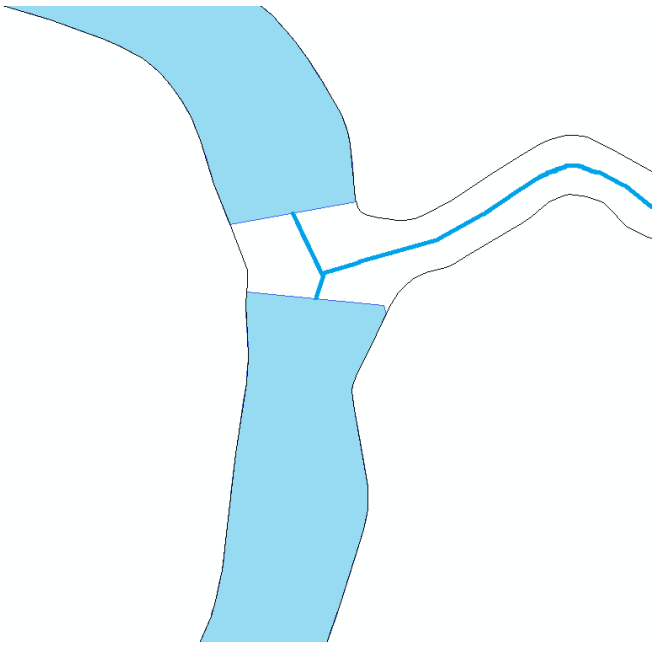
Pokud se tok větví v důsledku přítomnosti ostrova, dochází ke zpracování jednotlivých ramen odděleně. Je tedy voláno pravidlo P2 nebo P3.



*Obr. 15 Ukázka pravidla P4, zpracování jednotlivých ramen odděleně, jen na jedno rameno bylo aplikováno pravidlo P2.*

**P5: Soutok vodních toků**

Pokud dochází k soutoku s jiným vodním tokem, prostorová redukce se řeší pro každou část toku zvlášť, tedy pro část vodního toku vedoucí k místu soutoku, část vodního toku vedoucí od místa soutoku a přítok vodního toku. Na každou část zvlášť je tedy opět voláno pravidlo P2 nebo P3.

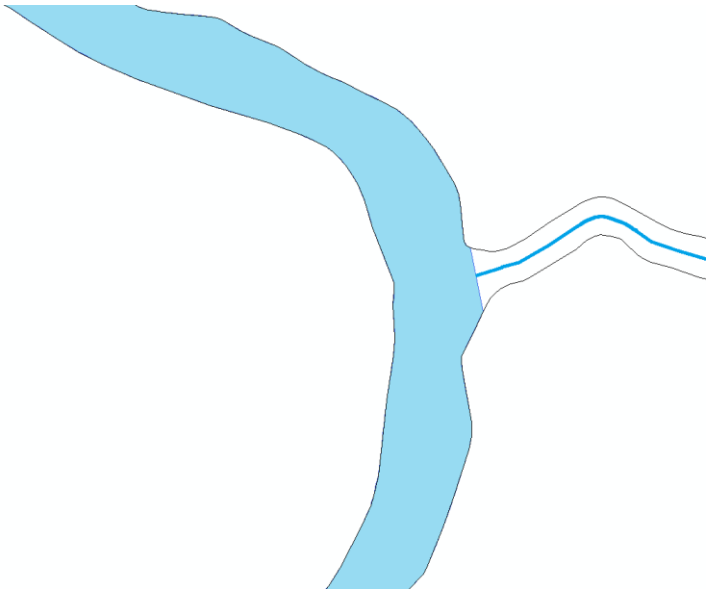


*Obr. 16 Ukázka pravidla P5, zpracování jednotlivých částí v místě soutoku, každá část vyhodnocena zvlášť.*

**P6: Návaznost generalizovaných segmentů**

Po provedení prostorové redukce v místě soutoku s jiným vodním tokem či ramen daného vodního toku, dochází ke spojení jednotlivých částí vodního toku.

- Pokud dochází k napojení liniového a plošného prvku, tak by mělo výsledné spojení vypadat přirozeně. Neměly by tedy vznikat žádné mezery mezi segmenty a liniové přítoky vodního toku by měly být spojeny na hranici vodního toku vyjádřeného plošným znakem.



*Obr. 17 Ukázka pravidla P6, původní stav na Obr. 16, spojení zpracovávaných částí vodního toku.*

Pravidla P7 a P8 o posunu prvků:

**P7: Posun sousedících prvků**

Při změně plošného prvku na liniový dochází ke vzniku prázdných míst v mapě. Tato místa musejí být doplněna prvky, které před provedením prostorové redukce sousedily s vodním tokem. Vzniklé prázdné místo na mapě musí být tedy vyplněno plochou sousedních prvků. Těmito prvky může být například les, louka, zástavba apod.

**P8: Zachování vztahu se sousedními prvky**

Pokud se v blízkosti vodního toku nachází objekt, u kterého je nutné zachovat vztah s vodním tokem, například rybník, musí se po provedení prostorové redukce přistoupit k jeho odsunu.

### 3.3.2 Seznam topologických pravidel

Pravidla T1 až T3 o topologických vazbách mezi prvky:

**T1: Eliminace ostrovů**

Pokud dojde k odstranění ostrova na vodním toku, musí být toto místo nahrazeno vodní plochou, aby nevznikala prázdná míst. Toto pravidlo je možné vidět na Obr. 12.

**T2: Topologie sousedních prvků**

Při prostorové redukci či částečné prostorové redukci vodního toku je nutné zachovat topologické vazby se sousedními prvky.

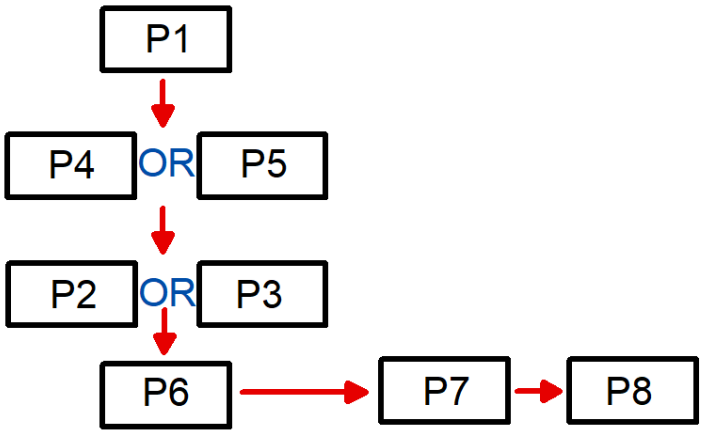
**T3: Konektivita vodního toku**

Po provedení částečné prostorové redukce je nutné zachovat konektivitu mezi plošným a liniovým prvkem vodního toku.

Ačkoli všechna uvedená pravidla jsou při procesu prostorové redukce důležitá, tato práce se věnuje jen prvním šesti kartografickým pravidlům a prvnímu topologickému pravidlu. Jednotlivá řešená pravidla jsou v rámci této práce algoritmizovaná a jejich implementace je rozebrána v kapitole 4.

### 3.3.3 Systém řízení kartografických pravidel

Pro automatizovanou korektní kartografickou generalizaci hraje důležitou roli pořadí, ve kterém jsou kartografická pravidla aplikována. Prezentovaná pravidla je nutné aplikovat opakovaně pokaždé, když dojde k situaci, kterou dané pravidlo popisuje. Každé pravidlo může být aplikováno na konkrétní situaci na vodním toku jen jednou. Z toho vyplývá že pro konkrétní situaci na vodním toku (konkrétní úsek) je systém kartografických pravidel jednoprůchodový, ale pro celý vodní tok je iterativní. Schéma systému kartografických pravidel je možné vidět na Obr. 18.




*Obr. 18 Schéma systému kartografických pravidel.*

## 3.4 Reprezentace vodního toku

Aby bylo možné realizovat zobrazení vodního toku břehovkami a nedocházelo ke grafickému slití kresby, musí být šířka vodního toku v měřítku mapy větší než cca 1

mm. Mitropoulos et al. (2005) sumarizují, že pro dlouhé a úzké plochy, jako jsou velmi úzké řeky, je možné zjistit šířku objektu vztahem

$$w = \frac{A}{d_{max}}, \tag{9}$$

kde $w$ je odhadovaná průměrná šířka objektu, $A$ je plocha objektu a $d_{max}$ je délka, která je určena nejdelší linií skeletonu daného objektu.

Předpis, který udává, kdy je možné reprezentovat vodní tok břehovkami, představuje spíše doporučené pravidlo, a proto je možné zmíněnou problematiku částečné prostorové redukce obejít. Možností existuje více, například reprezentace vodního toku liniovým prvkem pro všechna měřítka. Liniový prvek následně mění svoji tloušťku jen v závislosti na měřítkovém čísle. Dalším příkladem jsou velké skoky mezi měřítky, které zaručí, že vodní tok má být v cílovém měřítku již celý reprezentován linií.

## 3.5 Prostorová redukce na významných mapových portálech

Z krátkého průzkumu je možné nastínit, jak řeší problematiku prostorové redukce nejvýznamnější mapové portály. V práci je pozornost zaměřena na dva lokální a dva zahraniční portály. Ze zahraničních mapových portálů byly vybrány portály Google Maps a OpenStreetMap. Z lokálních mapových portálů se práce zaměřuje na mapy.cz a geoportál.cuzk.cz, který obsahuje základní mapy České republiky.

### 3.5.1 Portál mapy.cz

Portál nabízí celkem velké množství měřítek zobrazení mapy, ale vodní tok je generalizován jen při přechodu mezi měřítkovými čísly cca 1 : 25 000 na 1 : 50 000. Tato skutečnost je vidět na Obr. 19. Na levé straně je vodní tok reprezentován plošně (břehovky mají stejnou barvu jako řeka). Při přechodu přes měřítkové číslo cca 1 : 25 000 na 1 : 50 000 je vodní tok generalizován a je nahrazen linií. Generalizace nastává až ve chvíli, kdy je dané měřítkové číslo dostatečně velké, aby mohla být provedena prostorová redukce celého vodního toku, popřípadě jeho podstatné části.

*Obr. 19 Různá měřítka části řeky Tichá Orlice z portálu mapy.cz.*

*Zdroj: mapy.cz*

### 3.5.2 Portál OpenStreetMap

První zahraniční mapový portál OpenStreetMap (www.openstreetmap.org) problematiku prostorové redukce vůbec neřeší. Vodní tok je reprezentován liniovým prvkem ve všech měřítkách. Jediná změna, která nastává při přechodu mezi měřítkovými čísly je tloušťka liniového prvku. Na Obr. 20 je možné vidět stejnou část řeky Tichá Orlice, jako na Obr. 19. Tentokrát jsou obrázky pořízené z mapového portálu OpenStreetMap.

*Obr. 20 Různá měřítka části řeky Tichá Orlice z portálu OpenStreetMap.*

*Zdroj: https://www.openstreetmap.org/#map*

### 3.5.3 Portál Google Maps

Další zahraniční populární mapový portál Google Maps (https://www.google.cz/maps) řeší tuto problematiku jiným způsobem, respektive neřeší. Na Obr. 21 je opět možné vidět část řeky Tichá Orlice. Tentokrát je daný obrázek z mapového portálu Google Maps. Vodní tok je ve všech těchto případech reprezentován plošně (břehovky mají opět stejnou barvu jako řeka). Levá část obrázku vypadá kartograficky v pořádku, jelikož celý vodní tok je reprezentován plošným prvkem. Nedochází zde k přechodu na linii či jinému přerušení vodního toku. V případě prostřední části je možné vidět, že nejužší části toku se nemění na linii, ale jsou odstraňovány. Tento jev je vidět výrazněji v pravé části obrázku, kde nejužší část vodního toku chybí. Taková generalizace

rozhodně není kartograficky správná. Z tohoto obrázku je možné odvodit, že generalizační algoritmus pravděpodobně pracuje právě s prahovou hodnotou šířky, kterou si vypočítává z měřítka mapy. Nejedná se o prostorovou redukci, jelikož plošná reprezentace není nahrazována liniovou, ale jde o stejný problém týkající se šířky vodního toku.

*Obr. 21 Různá měřítka části řeky Tichá Orlice z portálu Google Maps, červeně vyznačeny chybějící úseky.*

*Zdroj: https://www.google.cz/maps*

### 3.5.4 Statní mapové dílo

Základní mapy České republiky jsou státním mapovým dílem, které bylo tvořeno kartografy manuálně. Tyto mapy jsou k dispozici na mapovém portálu geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec. Veškeré objekty na mapách jsou zakresleny ručně. Změna objektu vodního toku na mapách různého měřítka znázorňuje lidský přístup ke generalizaci vodního toku. V levé části Obr. 22 je možné opět vidět část řeky Tichá Orlice, která je reprezentována břehovkami na základní mapě 1 : 10 000 (ZM 10). Uprostřed je řeka stále reprezentována břehovkami na ZM 50. Ačkoliv to vypadá, že je v pravé části obrázku řeka reprezentována linií, není tomu tak. Stále je tok reprezentovaný břehovkami, ale v úzkých místech řeky dochází ke slívání břehovek v jednu linii. Plochy jsou výrazněji vidět na Obr. 23. K reprezentaci vodního toku linií dochází až na ZM 200. Jelikož tyto mapy nebyly vytvářeny automaticky, přechod mezi měřítky je velice skokový, což neumožňuje podrobnější analýzu. Ze všech ukázek jsou tyto mapy z kartografického pohledu nejlepší, jelikož nebyly tvořeny automatizovaně. Je zde možné vidět trend zachovávání reprezentace vodního toku břehovkami, až do doby, kdy by měla být zgeneralizována naprostá většina vodního toku.

*Obr. 22 Část řeky Tichá Orlice, vlevo ZM 10, uprostřed ZM 50, vpravo ZM 100.*

*Zdroj: https://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/*

*Obr. 23 Část řeky Tichá Orlice v měřítku 1:100 000.*

*Zdroj: https://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/*

# 4. Implementace generalizačního algoritmu

Kapitola je zaměřena na vlastní implementaci generalizačního algoritmu. Úvodní část je věnována definici a popisu pomocných datových struktur a algoritmů. Klíčovou datovou strukturou použitou pro realizaci vlastní generalizační operace byl straight skeleton. Z kartografického i geometrického hlediska poskytuje vhodné vlastnosti. Je tvořen liniovými segmenty, jeho část vede v ose prvku a pro jeho konstrukci existují odladěné algoritmy. Kapitola se dále věnuje popisu a implementaci jednotlivých kroků, které vycházejí z kartografických pravidel uvedených v kapitole 3.3

Implementace generalizačního algoritmu proběhla ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2017. Generalizační algoritmus je psaný v programovacím jazyce C++. Tento jazyk byl vybrán z důvodu využití externí knihovny geometrických algoritmů CGAL (https://www.cgal.org/), která poskytuje modul pro vytvoření datové struktury straight skeleton. Dále byly využity moduly pro konstrukci konvexní obálky a obdélníku s minimální plochou. Algoritmus také využívá externí knihovnu Qt, která ve zdrojovém kódu slouží převážně pro vykreslovací účely. Pro nahrávání dat je využita databáze PostgreSQL s nadstavbou PostGIS. Součástí algoritmu je také script v programovacím jazyce Python verze 2.7, který slouží pro export výsledků do ESRI geodatabáze, a využívá ArcGIS API pro Python (ArcPy). Zdrojový kód celého algoritmu je možné najít na přiloženém CD ve složce „Source“.

## 4.1 Datové struktury a algoritmy

V této kapitole jsou definovány pomocné datové struktury, které jsou použity při implementaci, generalizačního algoritmu. Straight skeleton je popsán v kapitole 4.1.2, grafová reprezentace straight skeletonu v kapitole 4.1.3, konvexní obálka a obdélník s minimální plochou jsou pospány v kapitolách 4.1.6, 4.1.7. Z použitých grafových algoritmů pak BFS (prohledávání do šířky), které najdeme v kapitole 4.1.5.

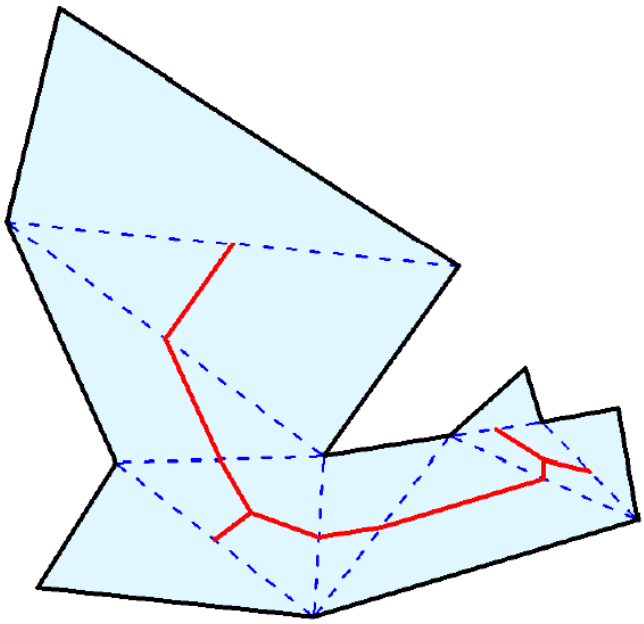
Chordal axis je pospána v kapitole 4.1.1. V této práci slouží jako pomocná struktura pro jednu z navržených metod určování šířky vodního toku viz kapitolu 4.9.1. Linear axis, vylepšující vlastnosti straight skeletonu, je popsána v kapitole 4.1.4. V této diplomové práci nebyla použita, avšak představuje jedno z možných vylepšení liniové reprezentace vodního toku.

### 4.1.1 Chordal axis

Chordal axis je topologická kostra tvořena s využitím maximálních kruhů, které jsou tečné k uzavřené oblasti alespoň ve dvou bodech. Spojnice těchto bodů, tedy sečna kružnice, dělí kružnici na dva oblouky, kde alespoň jeden neobsahuje žádný další bod uzavřené oblasti. Tato spojnice je označována jako Maximal Chord of Tangency (MCT), tedy maximální sečna. Chordal axis je potom spojnice všech středů MCT. Chordal axis byla poprvé definována Prasad (1997) a zní:

„*Chordal axis nedegenerovaného planárního tvaru je množina všech uspořádaných párů (p, δ), kde p a δ jsou buď střed a polovina délky (MCT), nebo střed a poloměr maximální kružnice se třemi (MCT), které tvoří ostroúhlý trojúhelník*“.

Pro obecnou uzavřenou oblast má tvar křivky, ale pro polygon složený pouze z úseček je chordal axis tvořena úsečkami. Diskrétní varianta chordal axis je tvořena s využitím pomocné struktury, konkrétně Delaunay triangulace. V případě, že daný tvar je tvořen pouze úsečkami, triangulace se děje pouze uvnitř objektu a chordal axis vznikne jako spojení středů hran CDT (*constrained Delaunay triangulation*) (Prasad 1997).



*Obr. 24 Problémový výběžek (vpravo) u chordal axis.*

*Zdroj: (Hynková 2014)*

Základní nevýhodou chordal axis je fakt, že její diskrétní varianta není tak hladká, jako je medial axis. Další nevýhodou chordal axis je jako u všech skeletonů citlivost k šumu

vstupní oblasti, která se projevuje nežádoucí oscilací skeletonu, jak je možné vidět na Obr. 24. Tento problém je možné řešit přidáním dalších pravidel pro tvorbu chordal axis. Pokud spolu takovéto polygony sousedí a jsou komplexnější, může být definice nových pravidel značně obtížná (Hynková 2014).

### 4.1.2 Straight skeleton

Straight skeleton je klíčovou datovou strukturou použitou při implementaci generalizačních operací. Definice straight skeletonu podle Aichholzer et al. (1995) zní:

„*Straight skeleton S uzavřené množiny P (dále polygon) označovaný jako S*(*P*) *je definován jako sjednocení částí všech bisektorů sousedících stran množiny P vzniklých procesem smršťování P*“.

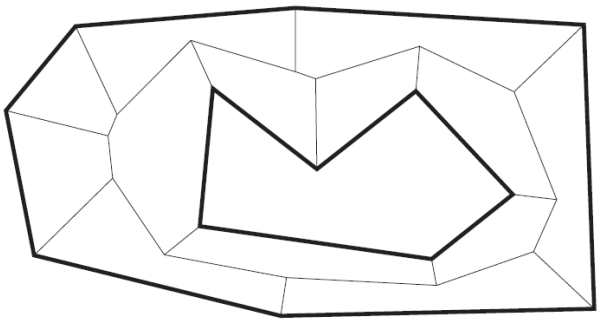
Proces konstrukce straight skeletonu nepotřebuje pomocnou strukturu, jako tomu je u chordal či medial axis. Tvorbu straight skeletonu je možné chápat jako výsledek procesu smršťování. Jednotlivé hrany polygonu se pohybují konstantní rychlostí směrem dovnitř polygonu po osách úhlů přilehlých stran polygonu. Smršťování trvá dokud nedojde ke změně topologie polygonu. Při procesu smršťování mohou nastat dvě události.

- *Edge event* – hrana polygonu je smrštěna na nulovou délku. Pokud mají její sousední hrany stále nenulovou délku, stanou se navzájem přilehlými, v opačném případě hrana zaniká a mění se na bod.
- *Split event* – dochází k rozdělení hrany při setkání s nekonvexním vrcholem, čímž je rozdělen celý polygon. Hrany polygonu, které svírají nekonvexní úhel, se tedy stávají přilehlými ke dvěma hranám.

Výsledný straight skeleton vznikne spojením os úhlů, po kterých se pohybovaly jednotlivé vrcholy polygonu (Aichholzer a Aurenhammer 1996).

Felkel a Obdrzalek (1998) představili asi nejpoužívanější verzi algoritmu konstrukce straight skeletonu pro konvexní i nekonvexní polygony s dírou viz Obr. 26. Další vylepšení přinesli Eppstein a Erickson (1999). Jejich algoritmus využívá speciální datovou strukturu pro zlepšení časové složitosti algoritmu. Cacciola (2004) opravil některé neřešené situace v algoritmu Felkela a Obdržálka (1998) a implementoval straight skeleton pro knihovnu geometrických algoritmů CGAL (Computational

Geometry Algorithm Library), která je v této práci využívána pro konstrukci skeletonu. Jeho algoritmus je výsledkem kombinace dvou výše zmíněných implementací.



*Obr. 25 Straight skeleton pro polygon s dírou.*

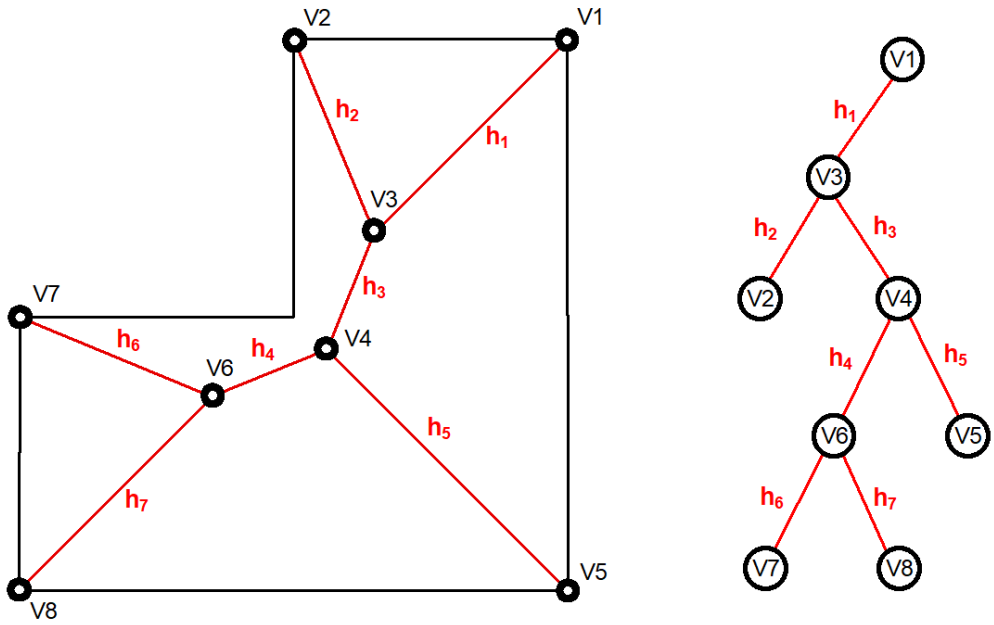
*Zdroj: (Felkel a Obdrzalek 1998)*

Největší výhodou straight skeletonu je fakt, že je tvořen pouze liniovými segmenty nikoliv křivkami, jak tomu je u střední osy (Aichholzer et al. 1995). Díky svým geometrickým vlastnostem je straight skeleton vhodnější pro práci v digitálním prostředí než střední osa.

Nevýhodou straight skeletonu je jeho obtížná konstrukce pro nekonvexní polygony s dírami. Dalším problémem jsou nekonvexní vnitřní úhly polygonu, které způsobují posunutí nekonvexního vrcholu dále od ideálního místa (tj. od pomyslné osy oblasti). Tento vrchol je spojen se sousedními vrcholy a vzniká výběžek ve výsledném skeletonu (Haunert a Sester 2008).

### 4.1.3 Grafová reprezentace straight skeletonu

Straight skeleton lze interpretovat v grafové reprezentaci jako strom. Linie a body straight skeletonu nejsou nijak setříděny, a proto je možné popsat straight skeleton pomocí neorientovaného grafu. Body a linie jsou v grafu reprezentovány jako uzly a hrany. Grafovou reprezentaci straight skeletonu je možné vidět na Obr. 26. Na levé straně je zobrazena jednoduchá struktura straight skeletonu s vyznačenými vrcholy a na pravé straně je zobrazena grafová reprezentace této struktury.

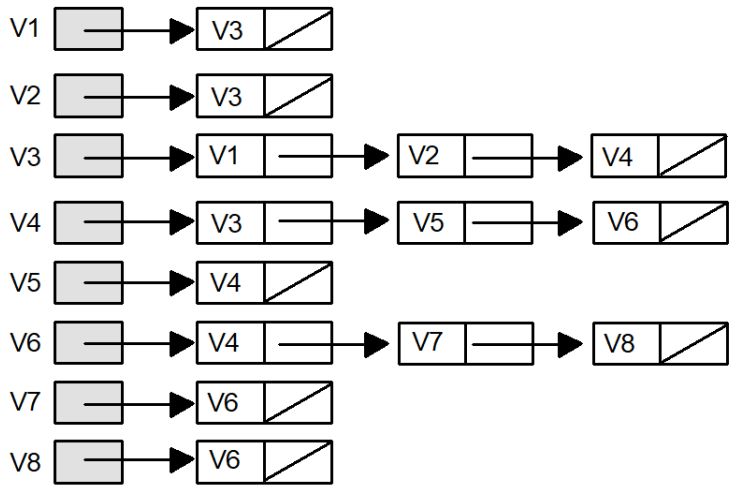



*Obr. 26 Grafová reprezentace straight skeletonu*

Definice neorientovaného grafu dle (Kolář 2000) zní:

*„Nechť H, U jsou libovolné disjunktní množiny a* $\rho : H \to U \otimes U^1$ *zobrazení. Neorientovaným grafem nazýváme uspořádanou trojici* $G = \langle H, U, \rho \rangle$*, prvky množiny H jsou hranami grafu G, prvky množiny U uzly grafu G a zobrazení* $\rho$ *incidencí grafu G.“*

V této práci je využita spojová reprezentace neorientovaného grafu $G = \langle H, U, \rho \rangle$. Tato reprezentace využívá spojový seznam *Adj*, který obsahuje odkazy na seznamy sousedů jednotlivých uzlů z množiny *U*. Pro každý uzel $u \in U$ obsahuje spojový seznam *Adj[u]* jeden záznam pro každou neorientovanou hranu $h = [u, v] \in H$ s druhým krajním uzlem *v*. Ukázka spojové reprezentace je vidět na Obr. 27.



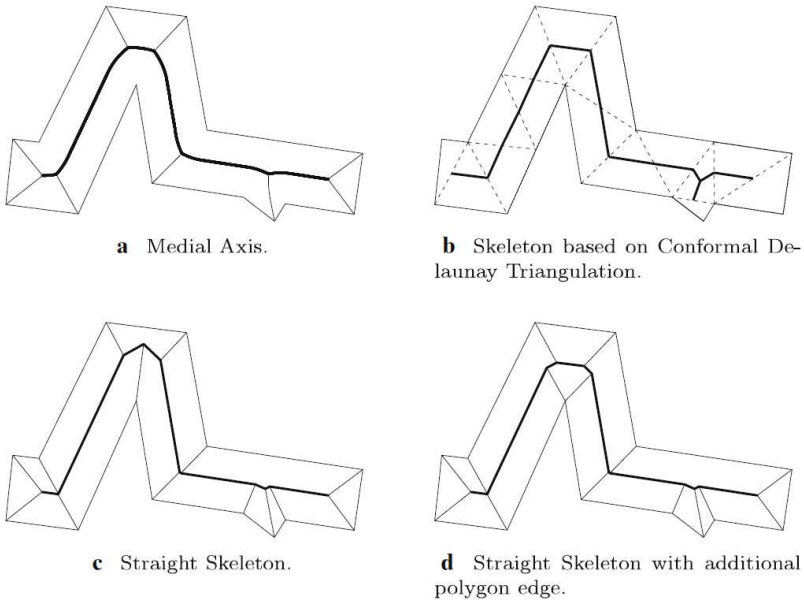

*Obr. 27 Ukázka spojové reprezentace neorientovaného grafu z Obr. 26*

### 4.1.4 Linear axis

Problém nekonvexních úhlů polygonu vyřešili Mirela a Veltkamp (2004), kteří představili nový typ skeletonu jménem linear axis. Její zjednodušená definice zní:

*„Linear axis L uzavřené množiny P označovaný jako $L^k(P)$, odpovídající posloupnosti k skrytých hran, je sjednocení částí všech bisektorů sousedících stran množiny P vzniklých procesem smršťování P“.*

Linear axis je modifikace straight skeletonu. Při procesu smršťování je možné zpomalit pohyb nekonvexních vrcholů, což odstraní problém vychýlení skeletonu z ideálního středu. Autoři k tomu využívají hrany s nulovou délkou (v praxi s délkou blížící se nule), která má stejnou počáteční i koncovou souřadnici, což je souřadnice nekonvexního vrcholu. Lineární osa aproximuje medial axis, ale zůstává složena pouze z úseček. Nulových hran je možné vložit do jednoho vrcholu i více, čímž je dosaženo lepší aproximace medial axis (Mirela a Veltkamp 2004).




*Obr. 28 Ukázka popsaných skeletonů, b - chordal axis, c - straight skeleton a d - linear axis.*

*Zdroj: (Haunert a Sester 2008)*

Jak je patrné z průběhu linear axis, straight skeleton může být modifikován tak, aby se jednotlivé vrcholy polygonu pohybovaly při procesu smršťování různou rychlostí. Této modifikaci se říká vážený straight skeleton.

### 4.1.5 Prohledávání grafu do šířky

Myšlenku algoritmu prohledávání do šířky neboli Breadth-first search (BFS) prezentoval poprvé Zuse (1972). BFS představuje jednu z možností prohledávání grafu. Algoritmus začíná od výchozího uzlu grafové struktury, postupně prochází jednotlivé sousedící uzly a rekurzivně sousedy sousedících uzlů, až nakonec projde celou grafovou strukturu. Navštívené uzly jsou označkovány. Algoritmus si při průchodu strukturou pamatuje předchůdce uzlu $u$, který označíme $p[u]$. S použitím předchůdců $p[u]$ je možné zkonstruovat cestu z koncového uzlu $v_k$ do počátečního uzlu $v_p$.

Označme výchozí uzel $v_p$, koncový uzel jako $v_k$. Graf $G$ bude v naší práci představován straight skeletonem. Algoritmus BFS využívá pomocnou datovou strukturu, frontu $Q$. Pseudokód vypadá následovně:

$BFS(G, v_p, v_k)$

1: *Inicializovat frontu* $Q = \{\}$ *a předky* $P = \{\}$
2: *Označit* $v_p$ *jako navštívený vrchol a všechny ostatní jako nenavštívené vrcholy*
3: *Přidat* $v_p$ *do* $Q$
4: *Opakovat dokud* $Q$ *není prázdná*:

5: $v$ = *vrchol, jehož sousedi budou nyní navštíveni*

6: *Odstranit v z Q*

7: *Opakovat dokud neprojdeme všechny sousedy w vrcholu v*:

8: *Pokud w není navštíven*:

9: *Přidat w do Q*

10: *Označit w jako navštívený vrchol*

11: *Přidat v jako předka w do P*

12: *Pokud w je* $v_k$ :

13: *Vyprázdnit Q*

14: *break*

15: *return P*

*Alg. 1: Procházení grafu metodou BFS.*

Po průchodu grafem pomocí metody BFS je možné přistoupit k rekonstrukci nejkratší cesty. Označme předchůdce $P$ jednotlivých uzlů $u$ a koncový uzel jako $v_k$. Pseudokód vypadá následovně:

$RekonstrukceNejkratšíCesty(P, v_k)$

1: *Inicializovat cestu C*

2: *Přidat* $v_k$ *do* $C$; $u = v_k$

3: *Opakovat dokud existuje předek* $p[u]$ *v* $P$:

4: *Přidat* $p[u]$ *do* $C$; $u = p[u]$

5: *return C*

*Alg. 2: Rekonstrukce nejkratší cesty.*

### 4.1.6 Konvexní obálka

Konvexní obálka je v průběhu generalizačního procesu použita pro konstrukci obdélníku s minimální plochou, je tedy pomocnou geometrickou strukturou.

Definice konvexní obálky podle Bazaraa a Shetty (1976) zní:

*„Konvexní obálka H množiny bodů S označovaná jako H(S) je nejmenší konvexní množina, která obsahuje množinu bodů S. H(S) je průnikem všech konvexních množin obsahujících S“*

Matematicky lze *H(S)* vyjádřit takto:

$$H(S) = \{x: x = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i x_i, x_i \in S, \lambda_i > 0, i = 1, 2, \dots, k, \sum_{i=1}^{k} \lambda_i = 1, k \geq 1\}. \quad (10)$$

Konvexní obálku je možné sestrojit různými algoritmy, které se liší implementační a časovou složitostí. Mezi tyto algoritmy patří například Jarvis Scan, Graham Scan, Quick Hull, Zametací přímka, Divide and Conquer nebo Inkrementální vkládání. Pro její konstrukci byla v diplomové práci použita knihovna CGAL.

### 4.1.7 Obdélník s minimální plochou

Obdélník s minimální plochou je v průběhu generalizačního procesu použit pro detekci hlavního směru ostrova, viz kapitolu 4.4.

Vlastnost obdélníku s minimální plochou (Minimum-area enclosing rectangle) definovali jako první Freeman a Shapira (1975):

*„Existuje (alespoň) jedna hrana konvexního polygonu H, která je kolineární s obdélníkem ρ s minimální plochou.“*

Tento obdélník je nejmenší možný obdélník, který je opsán konvexnímu polygonu. Je možné ho zkonstruovat v lineárním čase pomocí metody „rotating calipers“ (Toussaint 1983).

Ne všechny polygony jsou konvexní. Je tedy možné použít konvexní obálku jako pomocnou strukturu pro konstrukci obdélníku s minimální plochou. Pro jeho konstrukci byla v diplomové práci použita knihovna CGAL.

### 4.1.8 Plocha polygonu

Při znalosti všech vrcholů polygonu, je možné pro výpočet plochy použít L´Huillierův vzorec

$$2A = \sum_{i=1}^{n} x_i \, (y_{i+1} - y_{i-1}) \,, \tag{11}$$

kde $A$ je plocha polygonu, $n$ je počet vrcholů polygonu a $p_i = (x_i, y_i)$, $i = 1, 2, \ldots, n$ jsou vrcholy polygonu.

## 4.2 Základní terminologie spojená s implementací

Před analýzou jednotlivých kroků je nutné vysvětlit některé často používané pojmy znázorněné při implementaci algoritmu, viz Obr. 29 a Obr. 30.

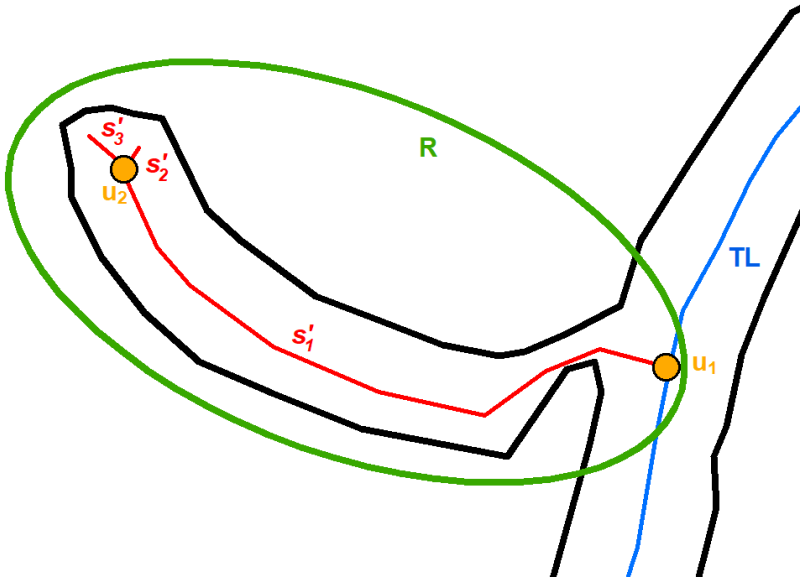
Množina **vnitřních segmentů** *S* straight skeletonu představuje takové segmenty straight skeletonu, jejichž koncové body neincidují s žádným z vrcholů původní oblasti (polygonu). Vnitřní segmenty tvoří osu původní oblasti. Jeden vnitřní segment $s(v_1, v_2)$, $s \in S$, odpovídá liniovému segmentu, který je tvořen body $v_1$, $v_2$.

Množina **uzlů** *U* představuje takové body, které jsou společné více než dvěma vnitřním segmentům. V uzlech dochází ke větvení zjednodušeného vodního toku. Pokud je dále v této práci odkazováno na uzel *u*, tak je vždy myšlen tento termín. Pokud je uveden bod straight skeletonu, tak se jedná o jakýkoliv bod vnitřních segmentů, který nemusí být uzlem.

**Skupina vnitřních segmentů** *s'* je tvořena všemi vnitřními segmenty, které se nachází mezi dvěma uzly nebo mezi uzlem a bodem vnitřního segmentu, který není uzlem. Počáteční bod skupiny vnitřních segmentů je tedy vždy uzel a koncový bod může být uzel či bod společný jen jednomu vnitřnímu segmentu. Množina skupin vnitřních segmentů je označena jako *S'*.

**Zjednodušený vodní tok** *T* je tvořen skupinami vnitřních segmentů straight skeletonu. Představuje ho hlavní tok *TL*, a ramena hlavního toku.

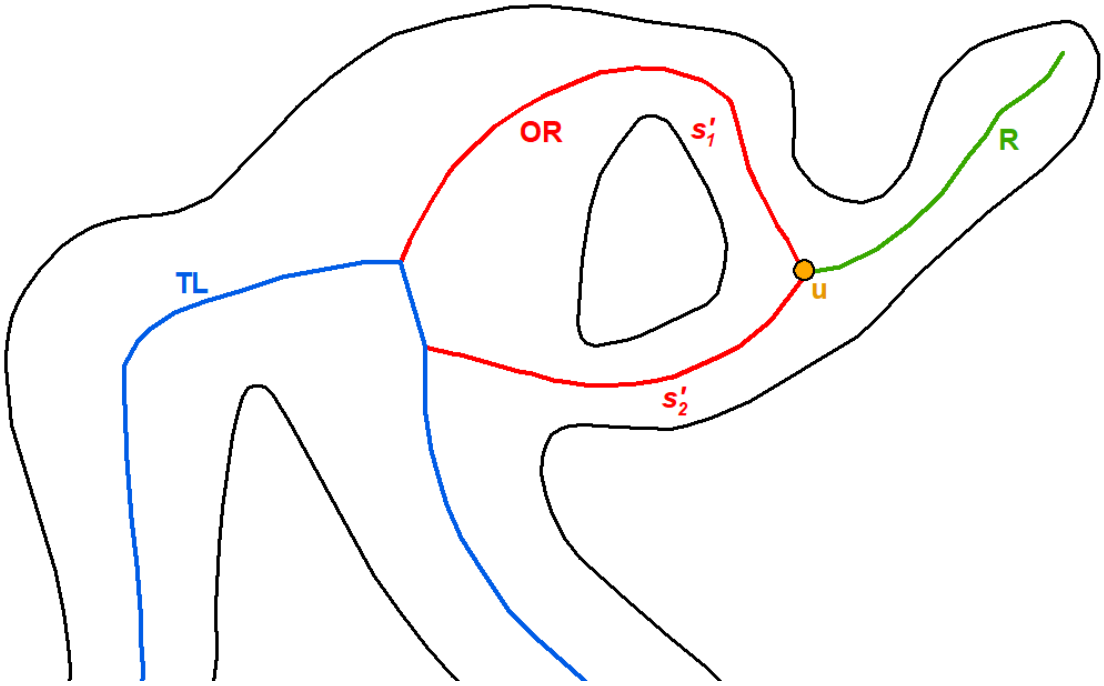
**Rameno** *R* se napojuje na hlavní tok v uzlech. Ramena jsou tvořena skupinami vnitřních segmentů. Pokud jsou ramena slepá, tak počáteční bod ramene je tvořen uzlem, koncový neuzlovým bodem.




*Obr. 29 Znázornění skupin vnitřních segmentů ($s'_1$, $s'_2$, $s'_3$), uzlů ($u_1$, $u_2$), ramene R a hlavního toku TL.*

Jestliže se jedná jen o rozdvojení vodního toku, tak počáteční i koncový bod skeletonu je tvořen uzlem. Pokud je dané rozdvojení na hlavním vodním toku, tak delší z ramen je **ostrovní rameno** *OR* a je bráno jako část hlavního vodního toku, toto je detailněji vysvětleno v kapitole 4.6.3.

Na Obr. 30 je možné vidět ostrovní rameno *OR* složené ze dvou skupin vnitřních segmentů $s_1'$ a $s_2'$, které se napojují na hlavní tok *TL*. Skupiny $s_1'$ a $s_2'$ jsou rozděleny v uzlu *u*, kde se na *OR* napojuje rameno *R*.




*Obr. 30 Modře vyznačený hlavní vodní tok TL, červeně ostrovní rameno OR a zeleně rameno R.*

## 4.3 Koncept generalizačního algoritmu

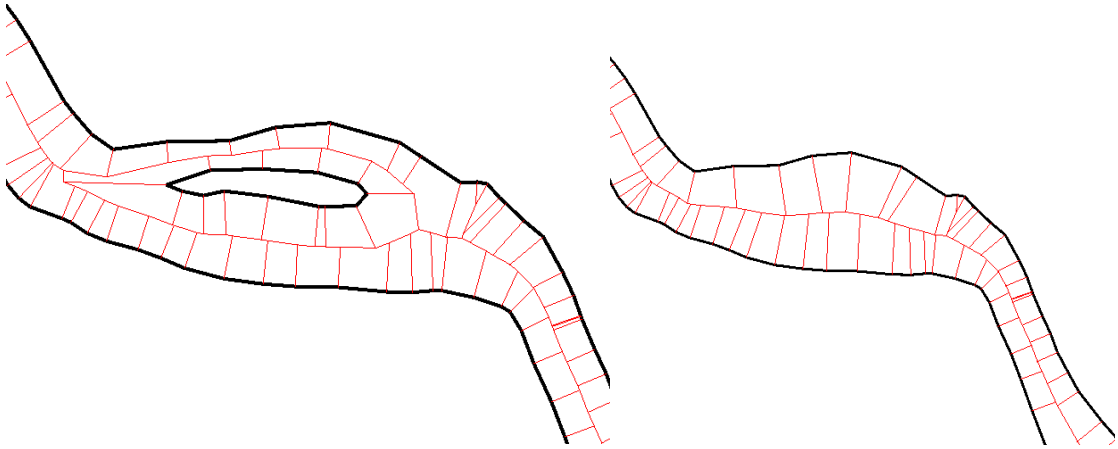
Generalizační algoritmus vychází z kartografických pravidel popsaných v kapitole 3.3. Vlastní implementace algoritmu se od jeho obecného schématu v kapitole 3.3 drobně liší, a to převážně v pořadí jednotlivých kroků. V této práci je generalizační algoritmus navržen tak, aby vycházel z geometrických vlastností straight skeletonu, a proto musí být straight skeleton vytvořen na začátku celého procesu. Dochází k modifikaci postupu, který je pospán v kapitole 3.3. Prostorová redukce je provedena pro celý vodní tok již v úvodní fázi a úseky, které mají zůstat zachovány, jsou následně zrekonstruovány. Jednotlivé fáze generalizačního algoritmu tvoří:

- eliminace ostrovů (viz kapitolu 4.4),
- vytvoření datové struktury straight skeleton (viz kapitolu 4.5),

- seřazení vnitřních segmentů a rozdělení skeletonu na jednotlivé skupiny vnitřních segmentů (viz kapitolu 4.6),
- odstranění výběžků skeletonu (viz kapitolu 4.7),
- úprava struktury skeletonu v okolí počátečního a koncového bodu vodního toku (viz kapitolu 4.8),
- určení šířky vodního toku (viz kapitolu 4.9),
- identifikace a rekonstrukce úseků vodního toku (viz kapitolu 4.10),
- aplikace doplňkových kritérií z kapitoly 3.2.1 (viz kapitolu 4.11).

## 4.4 Eliminace ostrovů

Prvním krokem je detekce ostrovů na vodním toku a vyřešení otázky, zdali ostrov zachovat, či odstranit. Tento krok odpovídá kartografickému pravidlu P1 a topologickému pravidlu T1, která byla představena v kapitole 3.3. Tuto operaci je nutné provést jako první, jelikož přítomnost ostrovů ovlivňuje vytvoření datové struktury straight skeleton, jak je možné vidět na Obr. 31.



*Obr. 31 Na levé straně straight skeleton s ostrovem a na pravé straně bez ostrovu.*

Jak již bylo zmíněné v kapitole 3.2.3, ostrovy na vodním toku mohou ovlivňovat nejen tvorbu datové struktury straight skeleton, ale také výsledek prostorové redukce. Je tedy nutné rozhodnut o jejich odstranění, či zachování.

V kapitole 3.2.3 byl představen teoretický základ pro řešení problematiky přítomnosti ostrovů. Byla zde navržena tři kritéria. První kritérium uvažuje lokální šířku řeky (6), druhé kritérium plochu ostrova (7) a třetí kritérium velký skok mezi měřítky (8). Aplikace těchto kritérií na ostrov rozhoduje o jeho zachování či odstranění.

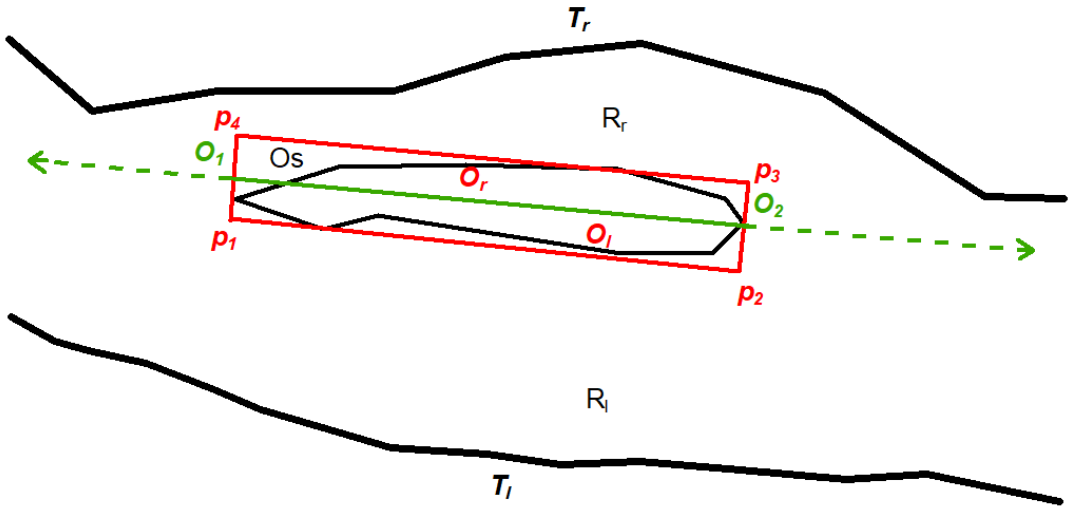
Detekovat ostrov je jednoduché, jedná se o polygon uvnitř polygonu. Ostrov tedy reprezentuje „díru“ v polygonu vodního toku. Pro implementaci kritéria pro měření lokální šířky je nutné získat šířku mezi ostrovem a oběma břehy vodního toku v místě, kde se ostrov nachází. Tento problém je možné řešit s využitím detekce hlavního směru (tj. dominantního ve směru vodního toku) ostrova a jeho rozdělením na dvě části $O_r$ a $O_l$ viz Obr. 32. Po rozdělení ostrova je možné měřit šířku jednotlivých ramen $R_r$, $R_l$ vodního toku pomocí bodů, které leží v části $O_r$ a $O_l$. Naprostá většina menších ostrovů má v důsledku vodní eroze protáhlý tvar ve směru vodního toku. Je tedy možné rozdělit ostrůvek na základě jeho dominantního tvaru.

Pro určení dominantního směru ostrova je možné využít obdélník $\rho$ s nejmenší plochou, který byl definován v kapitole 4.1.7. Jako pomocná datová struktura pro jeho konstrukci je využita konvexní obálka $H$. S využitím této struktury je možné nalézt dominantní směr ostrova $Os$, jeho přibližnou osu $O_1$, $O_2$ tvořící příčku kratších stran obdélníku, kde

$$O_1 = \frac{p_1 + p_4}{2}, \tag{12}$$

$$O_2 = \frac{p_2 + p_3}{2}. \tag{13}$$

Osa $O_1$, $O_2$ rozdělí vodní tok $T$ na dvě pomyslné poloviny $T_r$, $T_l$ a ostrov $Os$ na dvě části $O_r$ a $O_l$. Obr. 32 zobrazuje ohraničující obdélník s nejmenší plochou a jeho osu $O_1$, $O_2$, podle které dojde k rozdělení.




*Obr. 32 Ohraničující obdélník s nejmenší plochou (červeně) a jeho osa (zeleně).*

Výpočet šířky vodního toku bude probíhat pro levé $R_l$ i pravé $R_r$ rameno vodního toku zvlášť. Pro všechny body ostrova $o_r \in O_r$ je spočtena minimální vzdálenost $d_{min}$

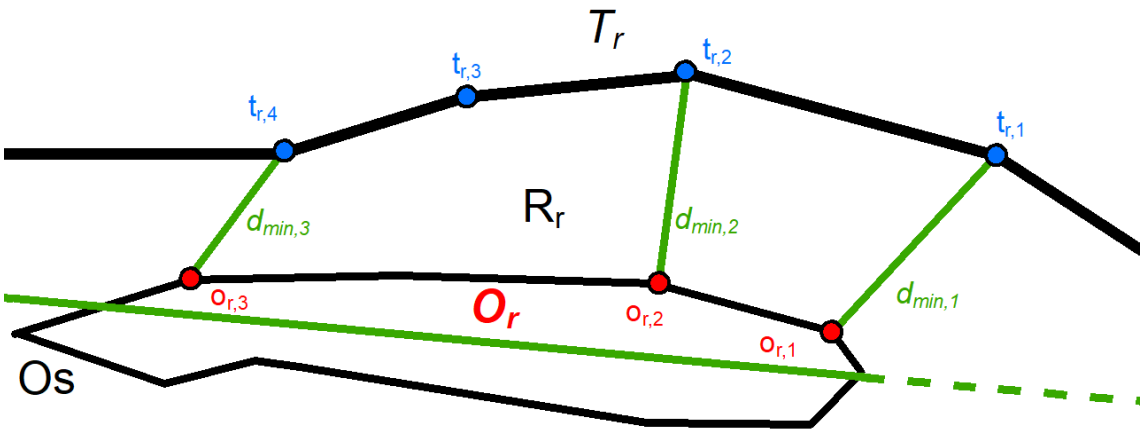
k bodům vodního toku $t_r \in T_r$ viz Obr. 33. Šířka $w(R_r)$ ramene $R_r$ vodního toku $T$ je spočítána jako

$$w(R_r) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \min_{\forall\, t_r \in T_r} \{d(o_{r,i}, t_r)\}}{n}, \tag{14}$$

kde $n$ je počet bodů $o_r \in O_r$. Šířka $w(R_r)$ je tedy průměr minimálních vzdáleností $d_{min}$. Pro rameno $R_l$ je proces identický, šířka $w(R_l)$ je spočítána jako

$$w(R_l) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \min_{\forall\, t_l \in T_l} \{d(o_{l,i}, t_l)\}}{n}, \tag{15}$$

kde $n$ je počet bodů $o_l \in O_l$.




*Obr. 33 Znázornění výpočtu šířky ramene $R_r$.*

Se známou lokální šířkou a plochou ostrova je možné aplikovat kritéria, která budou rozhodovat při eliminaci ostrova. Vybraná kritéria jsou:

- Kritérium uvažující šířku obou ramen, které porovnává prahovou hodnotu šířku $w_{max}$ s šířkou $w(R_r)$ *a* $w(R_l)$ (6).
- Plošné kritérium, které porovnává plochu ostrova $A$ s maximální plochou pro zachování $A_{max}$ (7).
- Kritérium uvažující šířku obou ramen, které porovnává prahovou hodnotu šířku $w_{max}$ s šířkou $w(R_r)$ *a* $w(R_l)$ (8).

Pro účely diplomové práce a zpracovávaný vodní tok byla zvolena hodnota $A_{max}$ = 5000 m$^2$ a $e_{max}$ = 8. Hodnota $w_{max}$ je proměnlivá, závisí na šířce vodního toku, viz kapitolu 5. Výše uvedené hodnoty byly zvoleny na základě testování, jelikož dosahovaly dobrých výsledků.

Vstupní parametry pseudokódu pro eliminaci ostrovů jsou: ostrov *Os,* vodní tok *T*, prahová hodnota šířky $w_{max}$, maximální plocha $A_{max}$ a prahová hodnota $e_{max}$. Pseudokód vypadá následovně:

$EliminaceOstrova(Os, T, w_{max}, A_{max}, e_{max})$

1: $H = konvexní\ obálka(Os)$
2: $\rho =$ $obdélník\ s\ nejmenší\ plochou(H)$
3: $O =$ $určení\ středové\ osy\ podle$ (12) $a$ (13)
4: $O_r\ a\ O_l =$ $rozdělit\ body\ Os\ na\ dvě\ poloviny\ podle\ O$
5: $T_r\ a\ T_l =$ $rozdělit\ body\ T\ na\ dvě\ poloviny\ podle\ O$
6: $d_{\min}(l) =$ $minimální\ vzdálenosti\ mezi\ O_l\ a\ T_l$
7: $w(R_l) =$ $provedení\ korekce\ d_{\min}(l)\ a\ výpočet\ průměru\ podle$ (15)
8: $d_{\min}(r) =$ $minimální\ vzdálenosti\ mezi\ O_r\ a\ T_r$
9: $w(R_r) =$ $provedení\ korekce\ d_{\min}(r)\ a\ výpočet\ průměru\ podle$ (14)
10: $A =$ $výpočet\ plochy\ Os\ podle$ (11)
11: $Pokud\ je$ (8) $> e_{max}$:
    12: $Odstranit\ Os$
    13: $return$
14: $Pokud\ je\ A > A_{max}$ :
    15: $return$
16: $Pokud\ je\ w(R_r) < w_{max}$ && $w(R_l) < w_{max}$:
    17: $Odstranit\ Os$
    18: $return$
18: $return$

*Alg. 3: Eliminace ostrova s využitím kritérií.*

## 4.5 Vytvoření datové struktury straight skeleton

Datová struktura straight skeleton je popsána v kapitole 4.1.2. V důsledku obtížnosti implementace straight skeletonu je v této práci použita verze, která je implementována v rámci knihovny geometrických algoritmů CGAL. Tato verze podporuje také polygony s dírou, což je pro tuto práci zásadní. Vytvoření straight skeletonu je druhou fází algoritmu.

Tento krok provádí úplnou prostorovou redukci celého vodního toku. Postup implementace generalizačního algoritmu se liší od kartografických pravidel v kapitole 3.3 (viz kapitolu 4). Jak již bylo uvedeno výše, těžištěm diplomové práce je částečná prostorová redukce, bude tedy nutné provést kroky popsané v dalších kapitolách. Tento

krok společně s krokem popsaným v kapitole 4.10 reprezentují pravidla P2 a P3, jelikož dochází k rekonstrukci polygonu.

## 4.6 Seřazení vnitřních segmentů a rozdělení skeletonu na jednotlivé skupiny vnitřních segmentů

V tomto kroku dochází k rozdělení a seřazení jednotlivých skupin vnitřních segmentů, aby bylo možné nalézt nejkratší cestu z počátečního do koncového bodu vodního toku. Jednotlivé části vodního toku jsou tedy zpracovány samostatně. Tento krok reprezentuje kartografická pravidla P4 a P5. Dochází zde dočasně k převodu straight skeletonu na grafovou reprezentaci. Nejkratší cesta slouží jako výchozí struktura pro seřazení skupin vnitřních segmentů, jednotlivé vnitřní segmenty $s$ jsou orientovány ve směru počáteční bod $v_1$, koncový bod $v_2$.

Po vytvoření straight skeletonu není možné s jeho datovou strukturou efektivně pracovat, protože nemá vhodné topologické uspořádání. Je tedy nutné provést seřazení vnitřních segmentů. V průběhu řazení segmentů dochází k jejich rozdělování do skupin vnitřních segmentů (4.2) podle jednotlivých uzlů.

Z polygonu nelze jednoduše odvodit začátek a konec budoucí osy vodního toku, obzvlášť pokud má tok dlouhé přítoky. Nejjednodušší řešení je přidání počátečního a koncového bodu pro daný segment vodního toku do algoritmu viz Obr. 34, popřípadě tento atribut nastavit u vstupních dat. Tímto je zajištěna správnost orientace vodního toku.

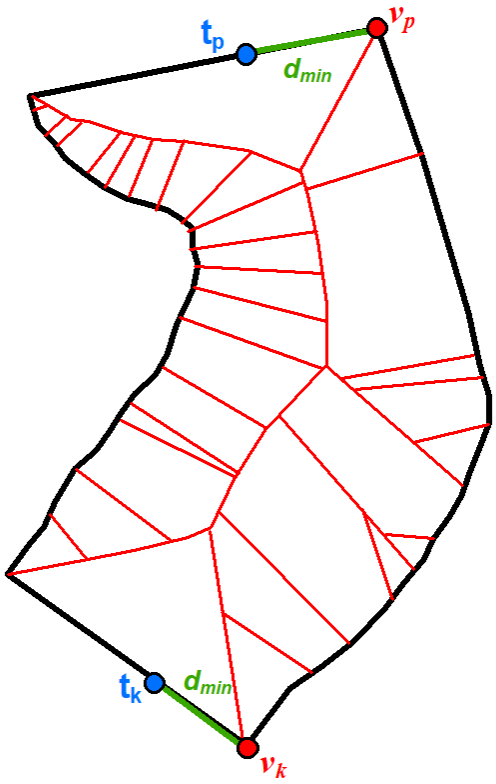
Celý proces seřazení vnitřních segmentů a jejich rozdělení na skupiny je možné rozdělit do tří kroků:

- nalezení nejkratší cesty mezi počátečním a koncovým bodem vodního toku,
- seřazení a rozdělení vnitřních segmentů straight skeletonu,
- nalezení ostrovních ramen.

### 4.6.1 Nalezení nejkratší cesty

V tomto kroku dochází k nalezení nejkratší cesty $C$ mezi počátečním bodem $v_p$ a koncovým bodem $v_k$ budoucí osy segmentu vodního toku. Její segmenty jsou orientovány ve směru $v_p$, $v_k$ a umožní následné řazení a rozdělování vnitřních segmentů

straight skeletonu. Tato cesta je současně jedinou cestou mezi oběma body za předpokladu, že se v grafu neobjevují cykly (tedy ramena).




*Obr. 34 Hledání počátečního bodu $v_p$ a koncového bodu $v_k$.*

Označme $t_p$, $t_k$ jako počáteční a koncový bod segmentu vodního toku $T$. Tyto body jsou manuálně přidány k vstupním datům jako atribut nesoucí informaci o začátku a konci segmentu vodního toku. Pomocí těchto bodů je možné nalézt počáteční bod $v_p$ a koncový bod $v_k$ budoucí osy vodního toku. Tyto hledané body jsou součástí vnitřních segmentů straight skeletonu. Bod $v_p$

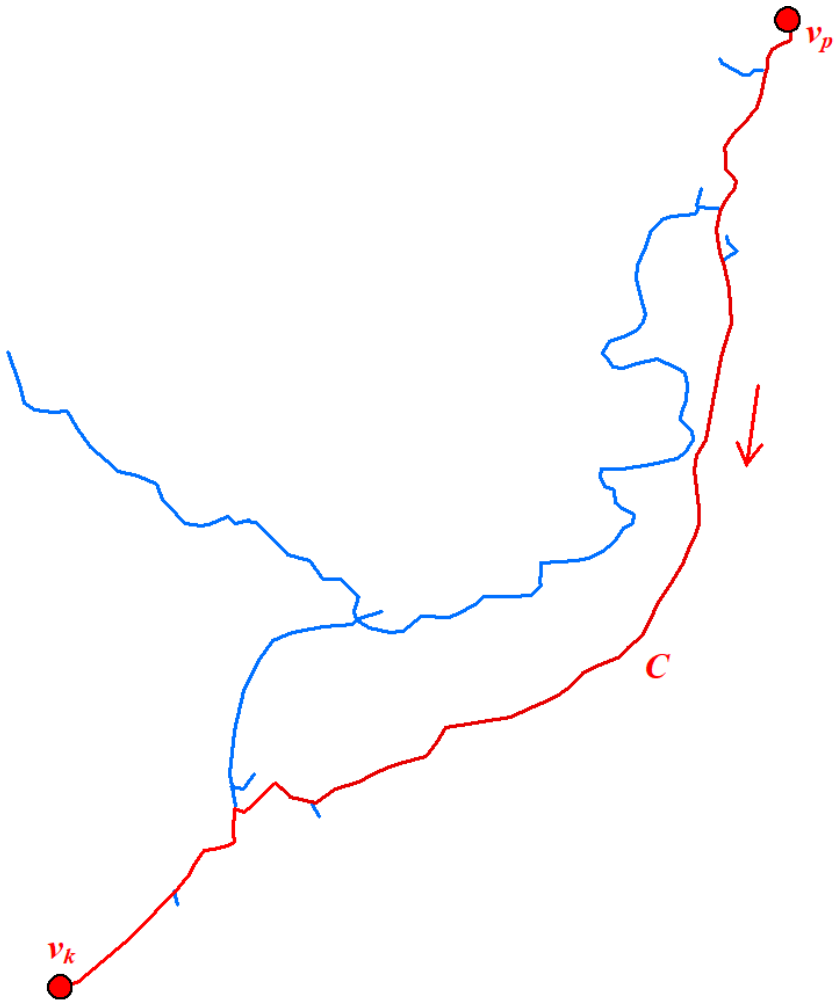
$$v_p = \min_{\forall\, v \in V} \{d\,(v, t_p)\}\,, \tag{16}$$

je tedy bod s minimální vzdáleností $d_{min}$ k bodu $t_p$ ze všech bodů $v \in V$, které tvoří vnitřní segmenty straight skeletonu viz Obr. 34. Identicky je bod $v_k$

$$v_k = \min_{\forall\, v \in V} \{d\,(v, t_k)\}\,, \tag{17}$$

bod s minimální vzdáleností $d_{min}$ k bodu $t_k$. Mezi body $v_p$ *a* $v_k$ je možné najít nejkratší cestu několika způsoby. Jedním z řešení je vytvořit z vnitřních segmentů skeletonu grafovou strukturu.

Na grafovou strukturu se aplikuje algoritmus BFS, který byl popsán v kapitole 4.1.5. Obr. 35 zobrazuje nejkratší cestu od počátečního bodu ke koncovému bodu budoucí osy vodního toku.




*Obr. 35 Nejkratší cesta C (červeně vyznačená) z počátečního bodu $v_p$ ke koncovému bodu $v_k$.*

Vstupní parametry pseudokódu pro nalezení nejkratší cesty jsou: množina všech vnitřních segmentů $S$, počáteční bod $t_p$ a koncový bod $t_k$ vodního toku. Pseudokód vypadá následovně:

$NejkratšíCesta(S, t_p, t_k)$

1: $Inicializace\ grafu\ G = \{\}$
2: $v_p = (16)$
3: $v_k = (17)$
4: $Opakovat\ pro\ každý\ vnitřní\ segment\ s\ z\ S$:
    5: $Přidat\ hranu\ vedoucí\ z\ v_1(s)\ do\ v_2(s)\ do\ grafu\ G$
    6: $Přidat\ hranu\ vedoucí\ z\ v_2(s)\ do\ v_1(s)\ do\ grafu\ G$
    7: $P = BFS(G, v_p, v_k)$ (Alg.1)

8: $C = RekonstrukceNejkratšíCesty(P, v_k)$ (Alg.2)

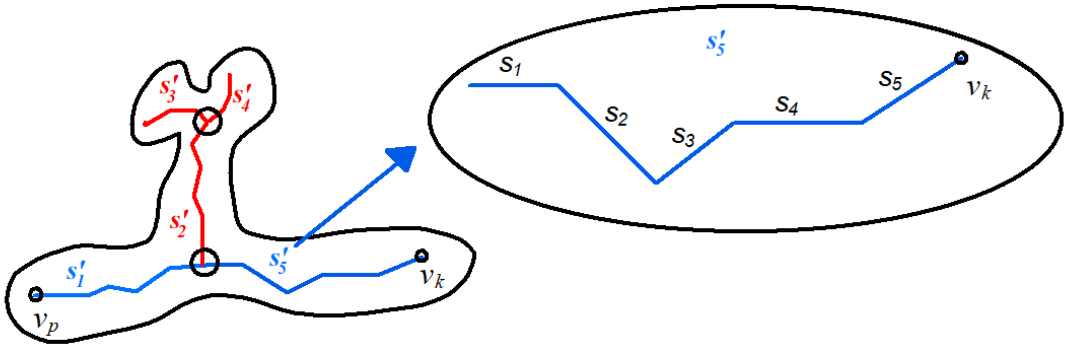
9: $return\ C$

*Alg. 4: Nalezení nejkratší cesty z počátečního ke koncovému bodu budoucí osy vodního toku.*

### 4.6.2 Seřazení a rozdělení vnitřních segmentů straight skeletonu

Jelikož je v této práci řešena částečná prostorová redukce, je nutné také rozdělit strukturu straight skeletonu na jednotlivé skupiny vnitřních segmentů *s'* (4.2), aby mohly být dále zpracovávány samostatně. V tomto kroku dochází k řazení a orientování veškerých vnitřních segmentů skeletonu. Zpracování jednotlivých skupin vnitřních segmentů samostatně výrazně zjednodušuje práci v dalších krocích.

Na Obr. 36 je znázorněná struktura straight skeletonu od počátečního bodu $v_p$ ke koncovému bodu $v_k$. Struktura se skládá z pěti skupin vnitřních segmentů *s'*. V tomto kroku se řadí tyto skupiny a zároveň jednotlivé vnitřní segmenty *s*, které je tvoří. Obr. 36 znázorňuje pořadí, kterého je nutné dosáhnout pro seřazení struktury straight skeleton.

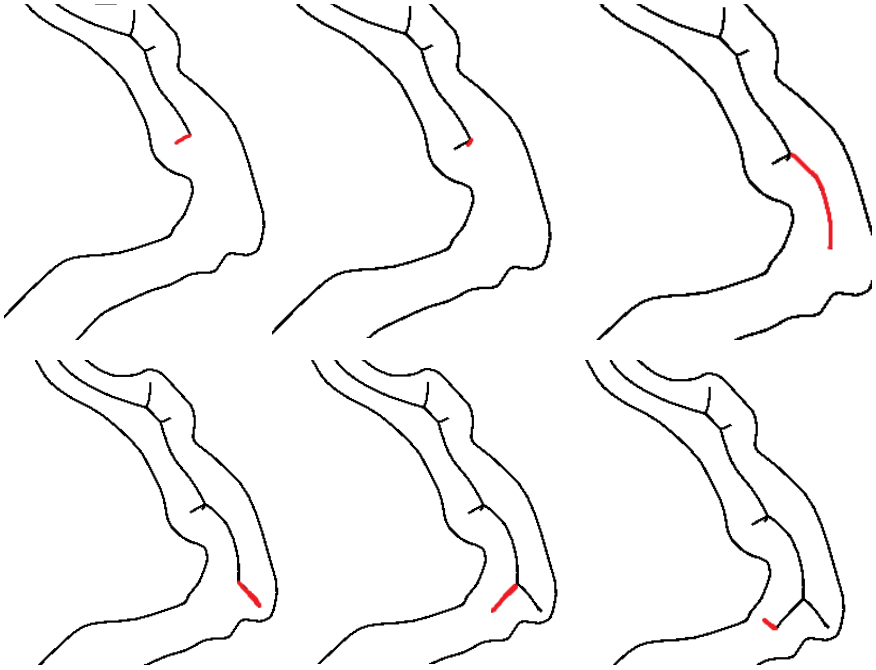



*Obr. 36 Vlevo pořadí jednotlivých skupin (modře označený hlavní tok, červeně rameno), vpravo pořadí vnitřních segmentů skupiny $s'_5$.*

Rozdělení straight skeletonu do skupin vnitřních segmentů je možné provádět pomocí uzlů. Uzly naznačují možnost větvení skeletonu v daném místě, což by reálně mělo způsobovat větvení vodního toku v důsledku přítomnosti ostrova či přítoku. Nemusí to být ale vždy tento případ. Nepatrný rozdíl v šířce vodního toku spolu s vysokou hustotou bodů, může způsobit větvení skeletonu v místech, kde to z pohledu reprezentace vodního toku liniovým prvkem není žádoucí. Tento problém je detailně rozebrán v kapitole 4.7.

Nyní již k vlastnímu algoritmu. Nejdříve je nutné identifikovat všechny uzly $U$ straight skeletonu. Po jejich nalezení je možné provést řazení vnitřních segmentů straight skeletonu.

Seřazení lze provést modifikovanou verzí algoritmu BFS, algoritmus postupuje od počátečního vnitřního segmentu ve směru nejkratší cesty podél vnitřních segmentů tvořící nejkratší cestu $C$ a řadí jednotlivé vnitřní segmenty $s$. Po nalezení uzlu $u$ dochází k ukončení řazení dané skupiny vnitřních segmentů $s'$ a začíná řazení skupiny nové. Postup na další segment nejkratší cesty se uskuteční, až po seřazení všech vnitřních segmentů ramene $R$. Ramena jsou dělena na jednotlivé skupiny vnitřních segmentů v místech uzlů, stejně jako v případě nejkratší cesty.



*Obr. 37 Postupné vykreslování již seřazených skupin vnitřních segmentů (barevně vyznačená aktuální skupina).*

Tento postup výrazně zjednoduší další zpracování, jelikož je možné postupovat od začátku vodního toku a pracovat s jednotlivými skupinami vnitřních segmentů samostatně. Na Obr. 37 je možné vidět postupné vykreslování jednotlivých skupin vnitřních segmentů po dokončení procesu řazení.

Vstupní parametry pseudokódu pro seřazení a rozdělení vnitřních segmentů jsou: nejkratší cesta $C$, grafová reprezentace straight skeletonu $G$ a uzly ležící na nejkratší cestě $U_C$. Pseudokód vypadá následovně:

$SeřazeníVnitřníchSegmentů(C, G, U_C)$

1: $Inicializace\ skupin\ vnitřních\ segmentů\ S' = \{\}, jedné\ skupiny\ \ s' = \{\}, ramene\ R = \{\}$

2: *Inicializace bodů značících ostrov na nejkratší cestě* $V_{oc} = \{\}$

3: *Opakovat pro každý bod* $v$ *z* $C$:

4: *Přidat* $v$ *do* $s'$ *a označit ho jako prošlý*

5: *Pokud* $V_{oc}$ *obsahuje* $v$:

6: *Přidat* $s'$ *do* $S'$, *reset* $s'$; *přidat* $v$ *do* $s'$; *continue*

7: *Pokud* $U_C$ *obsahuje* $v$:

8: *Označit* $v$ *jako prošlý uzel a přidat do* $R$

9: *Přidat* $s'$ *do* $S'$; *reset* $s'$; *přidat* $v$ *do* $s'$

10: *Opakovat dokud neprojdeme celé* $R$:

11: *Opakovat pro každého souseda* $w$ *bodu* $v$ *z* $G$:

12: *Pokud* $v$ *je uzel, který jsme ještě neprošli*:

13: *Označit* $v$ *jako prošlý uzel a přidat do* $R$

14: *Přidat* $s'$ *do* $S'$, *reset* $s'$; *přidat* $v$ *do* $s'$

15: *Pokud* $v$ *nemá dalšího jiného souseda než* $w$:

16: $v =$ *poslední* $v$ *z* $R$; *označit* $v$ *jako prošlý*

17: *Odstranit* $v$ *z* $R$; *přidat* $s'$ *do* $S'$; *reset* $s'$

18: *Přidat* $v$ *do* $s'$; *break*

19: *Pokud jsme ještě neprošli* $w$:

20: *Pokud* $w$ *není součástí* $C$:

21: *Označit* $w$ *jako prošlý*; *přidat* $w$ *do* $s'$

22: $v = w$; *break*

23: *Pokud* $w$ *je součástí* $U_C$:

24: *Označit* $w$ *jako prošlý*; *přidat* $w$ *do* $s'$

25: *Přidat* $w$ *do* $V_{oc}$; $v =$ *poslední* $v$ *z* $R$

26: *Odstranit* $v$ *z* $R$ *a označit* $v$ *jako prošlý*

27: *Přidat* $s'$ *do* $S'$; *reset* $s'$; *přidat* $v$ *do* $s'$; *break*

28: *Pokud* $w$ *je uzel* $v$ $R$ *a není posledním prošlým uzlem*:

29: *Přidat* $w$ *do* $s'$; *odstranit* $w$ *z* $R$; $v =$ *poslední* $v$ *z* $R$

30: *Odstranit* $v$ *z* $R$; *přidat* $s'$ *do* $S'$

31: *Reset* $s'$; *přidat* $v$ *do* $s'$; *break*

32: *Přidat ss do* $S'$; *return* $S'$

*Alg. 5: Seřazení vnitřních segmentů a jejich rozdělení na skupiny.*

### 4.6.3 Nalezení ostrovních ramen

V tomto kroku dochází k hledání ostrovních ramen *OR*, tento termín byl představen v kapitole 4.2. Ostrovní ramena jsou ramena, která nejsou součástí nejkratší cesty, ale jejich počáteční a koncový bod je součástí nejkratší cesty. Představují tedy podstromy grafu reprezentujícího straight skeleton.

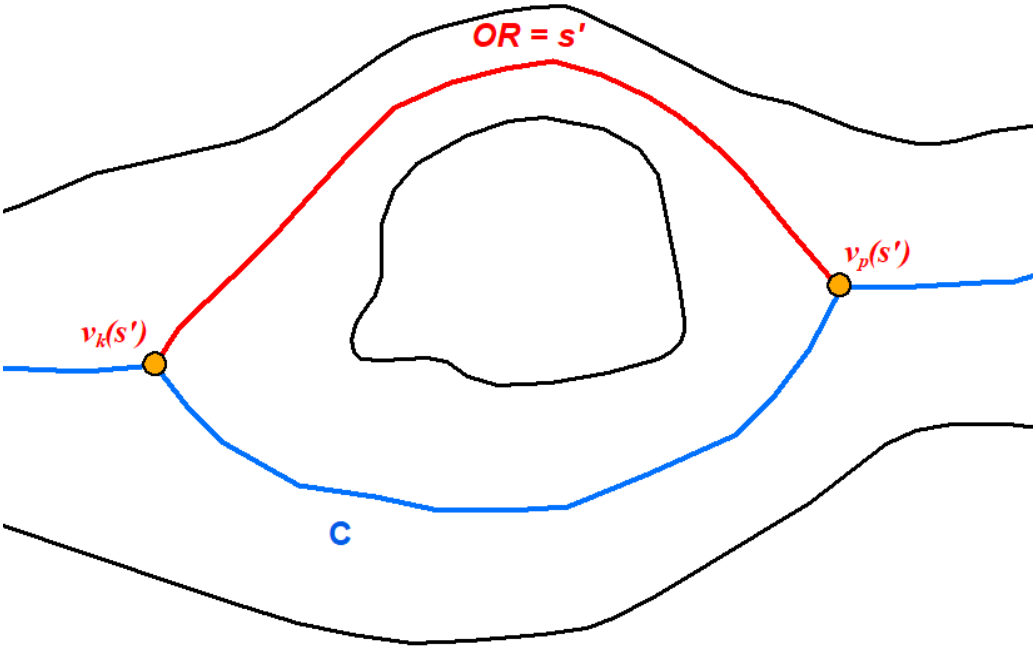
Tato ramena vznikají přítomností ostrovů na vodním toku v místech, kde vede nejkratší cesta. Ostrovní ramena je nutné zachovat, jelikož určují tvar hlavního vodního toku *TL* (tok bez ramen viz kapitolu 4.2). Tato ramena jsou tedy součástí hlavního vodního toku a je nutné je identifikovat, aby bylo možné najít všechna ostatní ramena, která vycházejí z hlavního vodního toku. Rameno *R* je možné identifikovat nalezením uzlu *u* ležícím na nejkratší cestě *C* nebo ostrovním rameni *OR*. Uzel *u* reprezentuje počáteční bod $v_p(R)$ ramene R. Platí tedy

$$v_p(R) \in U_{OR} \vee v_p(R) \in U_C\,, \tag{18}$$

kde $U_{OR}$ jsou uzly ležící na ostrovním rameni a $U_C$ jsou uzly ležící na nejkratší cestě.

V praxi se můžeme setkat se dvěma typy situací:

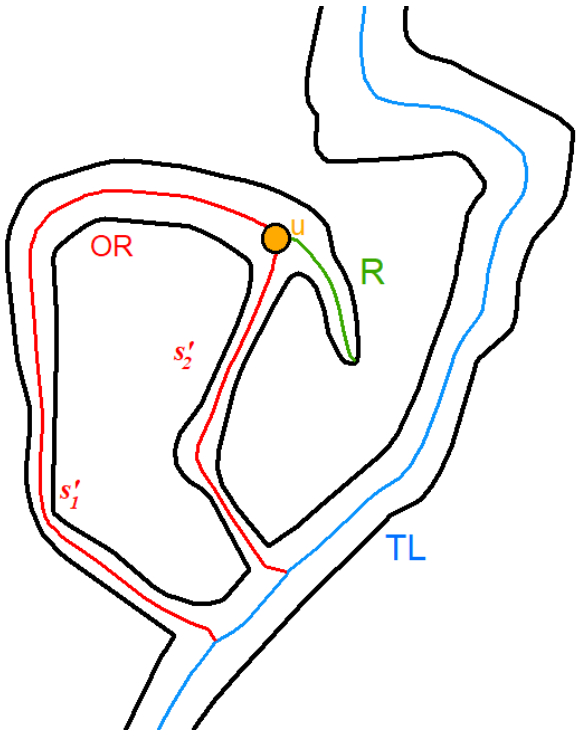
1) Pokud je ostrovní rameno *OR* tvořeno jen jednou skupinou vnitřních segmentů *s'*, tak koncový bod $v_k(s')$ i počáteční bod $v_p(s')$ skupiny vnitřních segmentů leží na nejkratší cestě *C*. Tato ramena není nutné identifikovat, jelikož jejich součástí není další uzel, který by naznačoval nové rameno. Takové rameno je možné vidět na Obr. 38.




*Obr. 38 Rameno OR, které je tvořeno jen jednou skupinou vnitřních segmentů.*

2) Pokud je ostrovní rameno *OR* tvořeno více než jednou skupinou vnitřních segmentů, tak v *OR* existuje další uzel *u*, který značí rozvětvení v daném místě. Takový případ je zobrazen na Obr. 39. *OR* je zde tvořeno skupinami vnitřních

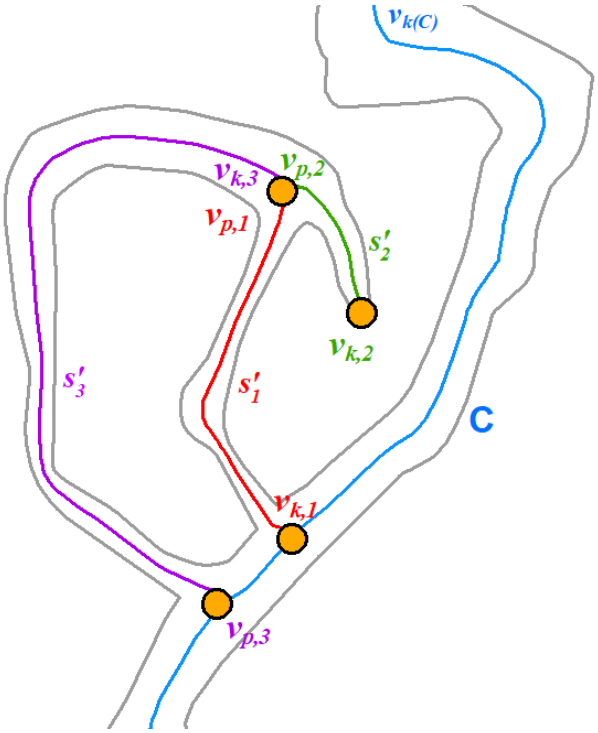
segmentů $s'_1$, $s'_2$, kde počáteční bod první skupiny (první od počátku vodního toku) leží na nejkratší cestě *C* (resp. na hlavním vodním toku) a koncový bod poslední skupiny leží také na nejkratší cestě *C*. Identifikace *OR* je tedy nezbytná, aby bylo možné identifikovat rameno *R* a provést další krok algoritmu.




*Obr. 39 Využití ostrovního ramene OR jako součást hlavního vodního toku TL pro identifikaci ramene R.*

Zaveďme následující symboliku. Označme $v_k(C)$ jako koncový bod nejkratší cesty, $v_{p,i}$ jako počáteční bod skupiny vnitřních segmentů $s'_i$ a $v_{k,i}$ jako koncový bod skupiny vnitřních segmentů $s'_i$ viz Obr. 40.

Pro nalezení ostrovních ramen použijeme následující postup: Ostrovní ramena je možné identifikovat procházením nejkratší cesty od koncového bodu $v_k(C)$ a porovnáváním koncových bodů skupin vnitřních segmentů *S'* s uzly $U_C$ na nejkratší cestě *C*. Po nalezení skupiny vnitřních segmentů $s'_1$, která je součástí ostrovního ramene, ale její počáteční bod $v_{p,1}$ není součástí nejkratší cesty, je nutné prohledávat její sousedící skupiny $s'_2$, $s'_3$ dokud není nalezena cesta zpět na nejkratší cestu *C* (popřípadě prohledávat sousedy $s'_2$ a $s'_3$). Tzn. dokud není nalezena skupina $s'_n$, jejíž počáteční bod $v_{p,n}$ je součástí nejkratší cesty *C* viz Obr. 40. Situace na obrázku znázorňuje proces hledání ostrovního ramene *OR*. V tomto případě je výsledné *OR* tvořeno skupinou $s'_1$ a $s'_3$. Tento proces je možné použít i na více se větvící ramena vodního toku.




*Obr. 40 Znázornění procesu hledání ostrovního ramene.*

Vstupní parametry pseudokódu pro hledání ostrovních ramen jsou: setříděné skupiny vnitřních segmentů *S'*, uzly na nejkratší cestě $U_C$, počáteční a koncový bod nejkratší cesty $v_p(C)$ a $v_k(C)$. Pseudokód vypadá následovně:

$HledáníOstrovníchRamen(S', U_C, v_p(C), v_k(C))$

1: *Inicializace ostrovního ramene* $OR = \{\}$
2: *Přidat* $v_p(C)$ *a* $v_k(C)$ *do* $U_C$
3: *Opakovat dokud neprojdeme všechny skupiny* $S'$, *index* $i$: (*od konce*)
    4: *Pokud poslední bod* $S'[i]$ *je součástí* $U_C$:
        5: *Pokud první bod* $S'[i]$ *není součástí* $U_C$:
            6: *Přidat* $S'[i]$ *do* $OR$
            7: $v =$ *první bod* $S'[i]$
            8: *Opakovat dokud neprojdeme* $S'$, *index* $j = i - 1$: (*od konce*)
                9: *Pokud poslední bod* $S'[j] ==$ $v$:
                    10: *Přidat* $S'[j]$ *do* $OR$
                    11: *Pokud* $U_C$ *obsahuje první bod* $S'[j]$:
                        12: *break*
                    13: $v =$ *první bod* $S'[j]$
14: *return* $OR$

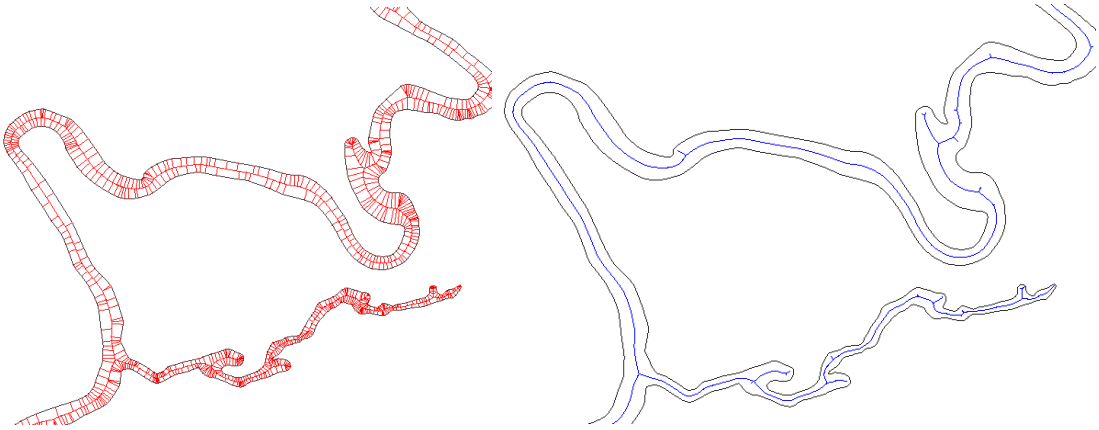
*Alg. 6: Hledání ostrovních ramen.*

## 4.7 Odstranění výběžků skeletonu

V tomto kroku dochází k odstranění výběžků skeletonu, které nejsou vhodné pro liniovou reprezentaci vodního toku. Tyto výběžky připomínají přítoky v místech, kde se žádný vodní tok nenachází. Pokud by byly zachovány všechny výběžky skeletonu, tak by výsledná liniová reprezentace nebyla kartograficky správná.

Jak bylo možné vidět v kapitole 4.4 na Obr. 31, výsledná struktura straight skeletonu není bez úpravy vhodná pro reprezentaci vodního toku, jelikož je tvořena i segmenty, jejichž koncové body incidují s vrcholy původní oblasti. Pro vodní toky s malou hustotou bodů je obecně možné říct, že pokud jsou ze struktury tyto segmenty odstraněny, tak zbytek struktury straight skeleton odpovídá liniové reprezentaci vodního toku.

Jak je možné vidět na Obr. 41, odstranění těchto segmentů pro nepravidelné polygony s vysokou hustotou bodů není dostatečné, jelikož výsledná reprezentace vodního toku není z kartografického hlediska správná. V pravé části obrázku je možné vidět segmenty, které mohou v některých případech působit jako přítoky, ale ve skutečnosti tomu tak není. Dále jsou tam vidět velice krátké výběžky, které se tvoří z důvodu vysoké hustoty bodů tvořící hranici polygonu vodního toku. Na Obr. 37 jsou tyto malé výběžky znázorněny detailněji. Takové výběžky do liniové reprezentace vodního toku nepatří.



*Obr. 41 Vlevo celá struktura straight skeletonu, vpravo struktura straight skeletonu po odstranění segmentů, jejichž koncové body incidují s vrcholy původního polygonu.*

Tyto výběžky je nutné odstranit, aby výsledná struktura odpovídala liniové reprezentaci vodního toku. Přirozeně se nabízí odstranit všechny skupiny vnitřních segmentů, které jsou kratší než hodnota $d_{max}$ a jejich koncový bod není uzel. Z důvodu vysoké hustoty

bodů v určitých částech vodního toku není tento postup možný, jelikož mohou existovat místa, kde je více než pět uzlů v řadě s velmi malou celkovou délkou. Na těchto místech vzniká výběžek spojený z několika skupin vnitřních segmentů a vytváří tak složitější strukturu pro odstranění.

V této práci je problém řešen pomocí navržených kritérií, které rozhodují o odstranění jednotlivých výběžků skeletonu. Těmito kritérii jsou:

1) **Délka skupiny vnitřních segmentů**

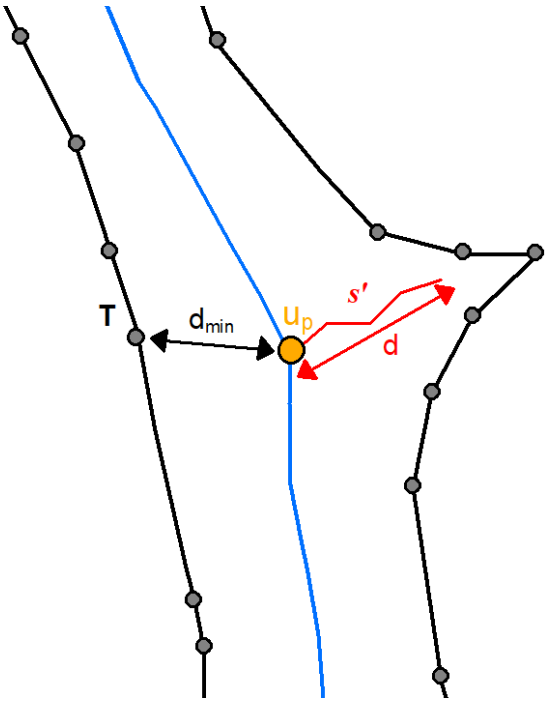
   Toto kritérium porovnává délku $d$ skupiny vnitřních segmentů $s'$ s odhadovanou šířkou $w_o$

$$w_o = d_{min} \cdot \kappa_1 , \tag{19}$$

   vodního toku v místě větvení vodního toku (v místě uzlu $u_p$), $\kappa_1$ je koeficient, $d_{min}$

$$d_{min} = \min_{\forall\, t \in T} \{d\,(u_p, t)\} , \tag{20}$$

   je minimální vzdálenost mezi uzlem $u_p$, který je zároveň počátečním bodem skupiny vnitřních segmentů, a body $t$ vodního toku $T$. Hodnota $\kappa_1$ byla určena experimentálně (dosahovala nejlepších výsledků). Na Obr. 42 jsou znázorněny jednotlivé proměnné figurující v tomto kritériu.




*Obr. 42 Znázornění parametrů pro kritérium 1) délka skupiny vnitřních segmentů.*

### 2) Délka ramene

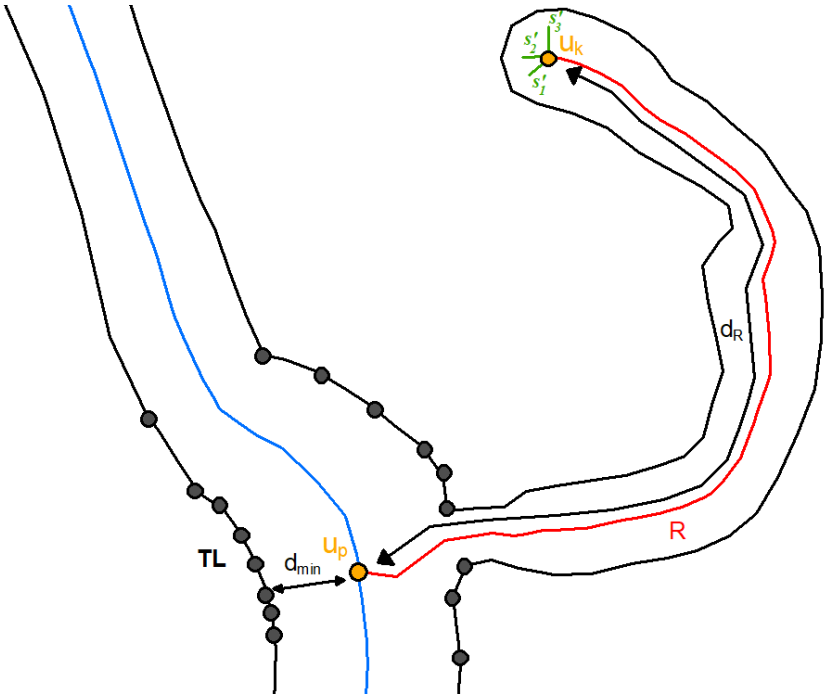
Na stejném principu jako první kritérium pracuje i kritérium druhé. Kritérium bere v úvahu délku celého ramene $d_R$ a porovnává ji s odhadovanou šířkou vodního toku $w_o(R)$. Pro každé rameno $R$, které vychází z hlavního vodní toku $TL$, je měřena délka po jednotlivých vnitřních segmentech $s$ (skládá se z nich rameno R)

$$d_R = d(u_p, u_k, s)\,, \tag{21}$$

od počátečního uzlu $u_p$ (nacházející se na hlavním vodním toku $TL$) až ke koncovému uzlu $u_k$ (vedou z něj už jen skupiny vnitřních segmentů, jejichž koncový bod není uzel). Odhadovanou šířku $w_o(R)$ v místě počátečního uzlu $u_p$ je možné spočítat ze vztahu

$$w_o(R) = d_{min} \cdot \kappa_2\,, \tag{22}$$

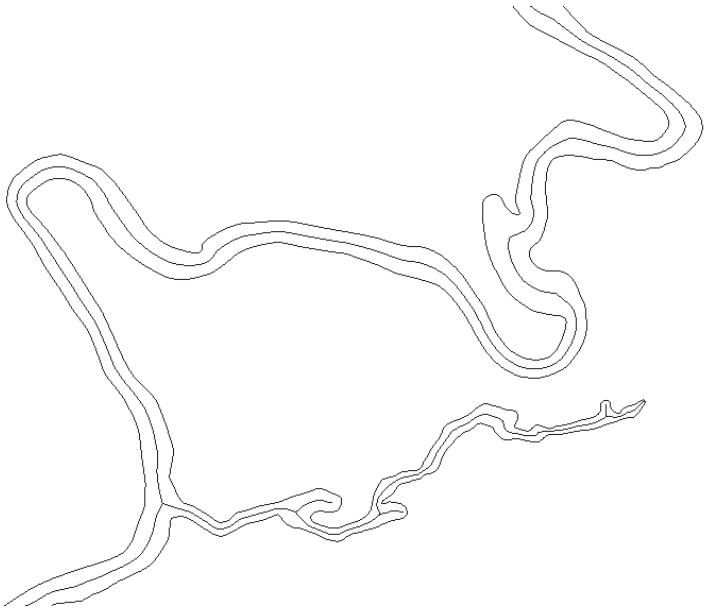
kde $\kappa_2$ je koeficient a $d_{min}$ je minimální vzdálenost mezi uzlem $u_p$, který je zároveň počátečním bodem ramene $R$, a body $t$ vodního toku $T$ viz (20). Hodnota $\kappa_2$ byla určena experimentálně (při testování dosahovala dobrých výsledků). Na Obr. 43 jsou znázorněny jednotlivé proměnné figurující v tomto kritériu.




*Obr. 43 Znázornění parametrů pro kritérium 2) délka ramene.*

Pro účely diplomové práce a zpracovávaný vodní tok byla zvolena hodnota $\kappa_1 = 1.3$ a $\kappa_2 = 1.6$. Hodnoty byly zvoleny na základě testování, jelikož dosahovaly dobrých výsledků, tzn. byly odstraněny všechny problémové výběžky. Pro vodní tok jiné šířky by zřejmě hodnoty koeficientů byly jiné.

V případě znázorněném na Obr. 43 by bylo kritérium 2) aplikováno na rameno *R* a kritérium 1) na jednotlivé skupiny vnitřních segmentů *s'*, které jsou zvýrazněny zeleně. Kombinaci obou kritérií je možné aplikovat na všechny skupiny vnitřních segmentů *S'* opakovaně do doby, kdy se již nebudou měnit (počet uzlů se po aplikaci kritérií nezmění). Výsledná upravená struktura je z kartografického pohledu mnohem vhodnější pro liniovou reprezentaci vodního toku než původní struktura. Nově vzniklá struktura je vidět na Obr. 44.



*Obr. 44 Seřazená struktura straight skeleton po odstranění nepodstatných výběžků.*

Vstupní parametry pseudokódu pro odstranění výběžků skeletonu jsou: setříděné skupiny vnitřních segmentů *S'*, uzly na nejkratší cestě $U_C$, uzly na ostrovních ramenech $U_{OR,}$ všechny uzly $U$ a vodní tok $T$. Pseudokód vypadá následovně:

$OdstraněníVýběžkůSkeletonu(S', U_C, U_{OR}, U, T)$

1: $Inicializace\ n = 0$

2: $U_{CO} = U_C \cup U_{OR}$

3: $Opakovat\ dokud\ n\ != \ počet\ uzlů\ v\ U$:

4: $n \ = \ počet\ uzlů\ v\ U$

5: $Opakovat\ dokud\ neprojdeme\ celou\ S', index\ i$:

6: $Pokud\ poslední\ bod\ S'[i]\ není\ součástí\ U_{CO}\ a\ první\ bod\ S'[i]\ je$:

7: $w_o(R) = (22)$; *inicializace dlouhého segmentu* $DS = false$

8: *Opakovat dokud poslední bod* $S'[i]$ *není součástí* $U_{CO}$:

9: $d =$ *suma délek všech segmentů* $S'[i]$

10: *Pokud poslední bod* $S'[i]$ *je součástí* $U$:

11: *Zapamatovat si* $d$ *a* $S'[i]$

12: *Jinak*:

13: $w_o = (19)$

14: *Pokud* $d < w_o$

15: *Odstranit* $S'[i]$

16: *Jinak*

17: $DS = true$

18: $i = i + 1$

19: *Pokud počet skupin v* $S' =< i$:

20: *break*

21: *Pokud* $DS == false$:

22: $d_R =$ *suma všech zapamatovaných* $d$

23: *Pokud* $d_R < w_o(R)$:

24: *Opakovat pro všechny zapamatované* $S'[i]$

25: *Odstranit* $S'[i]$

26: $U =$ *najít všechny uzly v* $S'$

27: $S' =$ *spojit* $S'$ *podle uzlů* $U$

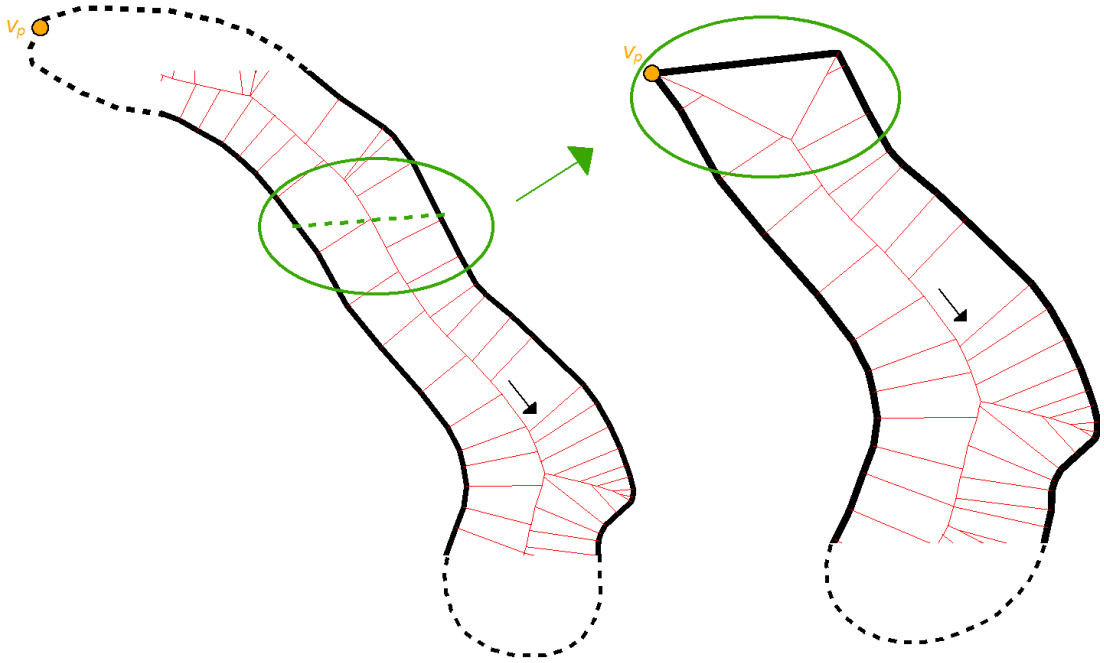
28: *return* $S'$

*Alg. 7: Odstranění výběžků skeletonu.*

# 4.8 Úprava struktury skeletonu v okolí počátečního a koncového bodu vodního toku

V tomto kroku dochází k odstranění bodů a segmentů skeletonu, které se nacházejí v okolí (dané hodnotou $d_{min}$) počátečního nebo koncového bodu zpracovávaného úseku vodního toku. V těchto místech může vznikat skeleton, který nemá vhodné geometrické vlastnosti. Jelikož nevede v místě osy polygonu (tj. v ose segmentu s počátečním bodem $v_p$), může dojít k nesprávné liniové reprezentaci polygonu v těchto místech.

Pokud dochází ke zpracování jen určitého úseku vodního toku, tak daný úsek musí být od zbytku polygonu oddělen. Taková situace je vidět na Obr. 45. V levé části obrázku je vidět celý vodní tok s jeho počátečním bodem $v_p$. V pravé části je zobrazen jen úsek vodního toku s počátečním bodem $v_p$ tohoto úseku. Straight skeleton je vygenerovaný na začátku odděleného úseku v pravé části jinak, než v levé části obrázku (zeleně vyznačeno).




*Obr. 45 Vlevo obvyklý průběh straight skeletonu nad celým vodním tokem, vpravo straight skeleton úseku vodního toku v místě rozdělení vodního toku.*

Výše zmíněný problém má několik možných řešení. V této práci je problém řešen následovně. Všechny body $v \in V$ tvořící vrcholy první skupiny vnitřních segmentů $s_1'$, jsou odstraněny pokud

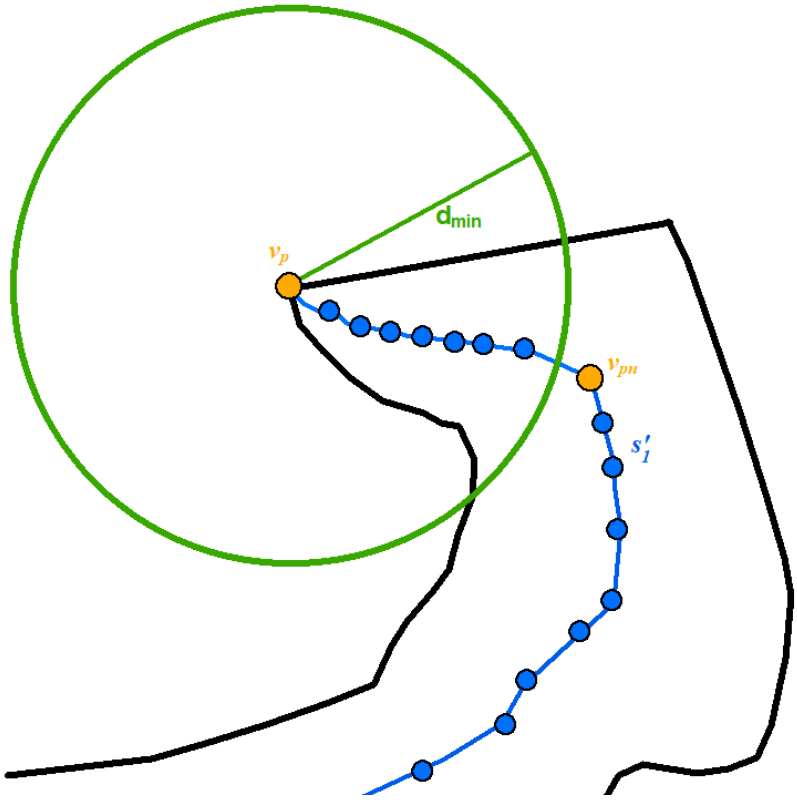
$$d(v, v_p) < d_{min}\,, \qquad \forall\, v \in V\,, \tag{23}$$

kde $v_p$ je počáteční bod orientované struktury straight skeletonu vygenerovaného nad úsekem. Odstraněny jsou tedy i segmenty, které tyto body spojují. Dále je nutné najít nový počáteční bod $v_{pn}$, pro který platí

$$d(v_p, v_{pn}) = \min_{\forall\, v \in V}\{d\,(v, v_p)\}. \tag{24}$$

Počáteční bod $v_{pn}$ reprezentuje nový počátek části osy vodního toku. Jelikož je skupina vnitřních segmentů $s_1'$ seřazená, tak $v_{pn}$ je zároveň první neodstraněný bod v $s_1'$. Pokud byly odstraněny všechny body v $s_1'$, tak $v_{pn}$ je počáteční bod skupiny vnitřních segmentů $s_2'$.

Stejný proces je nutné opakovat i pro koncový bod $v_k$ a poslední skupinu vnitřních segmentů $s_n'$, kde $n$ je počet skupin v $S'$. Obr. 46 znázorňuje okolí (dané hodnotou $d_{min}$) bodu $v_p$ a nový bod $v_{pn}$ po odstranění bodů skupiny vnitřních segmentů.




*Obr. 46 Znázornění procesu odstranění bodů v rámci skupiny vnitřních segmentů $s'_1$.*

Pro účely diplomové práce a zpracovávaný vodní tok byla zvolena hodnota $d_{min}$ = 20 m. Hodnota byla zvolena na základě testování, dosahovala dobrých výsledků.

Vstupní parametry pseudokódu pro úpravu struktury skeletonu v okolí počátečního a koncového bodu vodního toku jsou: setříděné skupiny vnitřních segmentů *S'*, počáteční bod $v_p$ a koncový bod $v_k$ orientované struktury straight skeletonu. Pseudokód vypadá následovně:

$\acute{U}pravaSkeletonuVOkol\acute{i}Bod\mathring{u}PaK(S', v_p, v_k)$

1: *Opakovat pro každý bod v z* $S'[0]$:
    2: *Pokud vzdálenost v a* $v_p < d_{min}$:
        3: *Odstranit v z* $S'[0]$
4: *Pokud je* $S'[0]$ *prázdná*:
    5: *Odstranit* $S'[0]$
6: *Opakovat pro každý bod v z* $S'[S'.size() - 1]$:
    7: *Pokud vzdálenost v a* $v_k < d_{min}$:
        8: *Odstranit v z* $S'[S'.size() - 1]$:
9: *Pokud je* $S'[S'.size() - 1]$ *prázdná*:
    10: *Odstranit* $S'[S'.size() - 1]$

*Alg. 8: Úprava struktury skeletonu v okolí počátečního a koncového bodu vodního toku.*

## 4.9 Určení šířky vodního toku

Šířka vodního toku v daném místě je klíčový parametr pro prostorovou redukci. Na základě určené šířky je rozhodováno o zachování či odstranění úseků vodního toku v dalším kroku (kapitola 4.10).

Určení šířky vodního toku je problém, který by mohl být řešen v samostatné diplomové práci. V práci je navrhnuto několik metod, pomocí kterých lze stanovit šířku vodního toku:

- maximální vepsaná kružnice,
- negativní buffer,
- metody využívající převzorkování břehů,
    - měření vzdálenosti mezi jednotlivými body obou břehů,
    - měření minimální vzdálenosti z jednoho břehu k druhému břehu,
- měření délky kolmic.

V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé navržené metody. V práci byla nakonec vybrána metoda měření délky kolmic, která je popsaná detailně. Ostatní metody byly jen analyzovány, jsou popsány obecněji a je upozorněno na jejich nedostatek, kvůli kterému nebyly vybrány.

### 4.9.1 Maximální vepsaná kružnice

Metoda využívá kružnice vepsané vodnímu toku reprezentovaného uzavřenou oblastí. Lokální šířku vodního toku je možné zjistit jako průměr maximální vepsané kružnice dotýkající se uzavřené oblasti nejvýše ve třech bodech. Tato metoda vychází z konstrukce chordal axis, která byla popsána v kapitole 4.1.1.

Tato metoda nebyla v práci testována, jelikož pro její použití je nutné zkonstruovat další pomocnou geometrickou strukturu chordal axis. Vzhledem k faktu, že práce využívá straight skeleton, nebyla tato metoda dále analyzována.

### 4.9.2 Negativní buffer

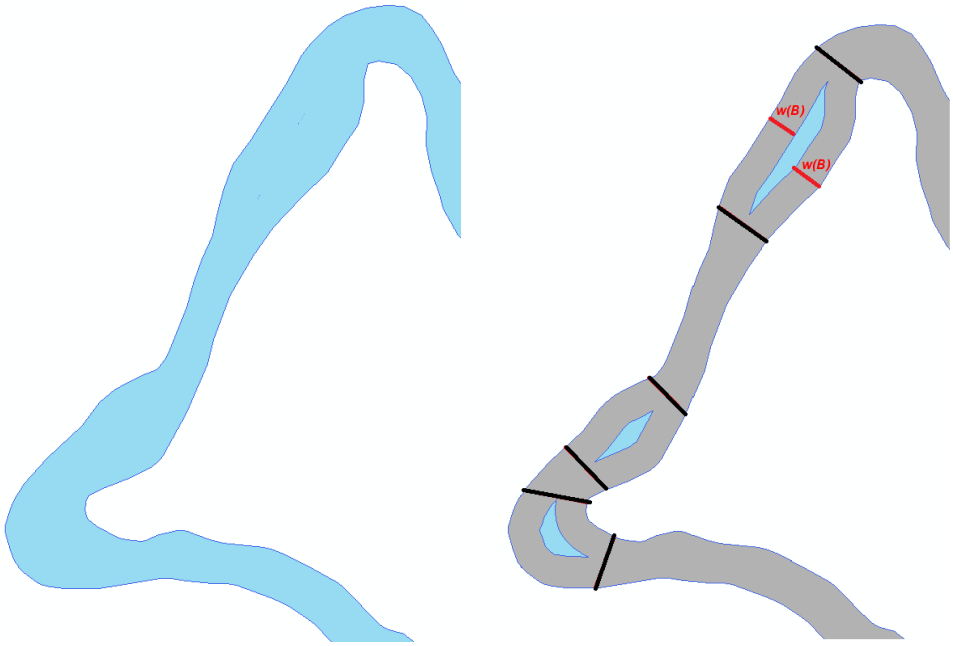
Metoda spočívá v aplikaci negativního bufferu na vodní tok. Buffer lze vytvořit v GIS software, v praxi je konstrukce bufferu výpočetně velmi náročný proces. Šířku bufferu *w(B)* můžeme určit ze vztahu

$$w(B) = -\frac{w_{max}}{2}, \tag{25}$$

kde $w_{max}$ je prahová hodnota šířky. Hodnota - znamená, že buffer bude konstruován směrem dovnitř. Tato metoda neurčuje jen šířku vodního toku, ale zároveň i rozhoduje, zdali vodní tok zachovat či generalizovat. V místech, kde výsledkem není prázdná množina, pro šířku *w(T)* vodního toku *T* platí

$$w(T) > 2w(B), \tag{26}$$

zůstane příslušný úsek vodního toku zachován. Může se však stát, že v místě krátkého rozšíření vodního toku dojde ke špatnému rozhodnutí o generalizování daného úseku vodního toku. Na Obr. 47 je tento problém názorně zobrazen.

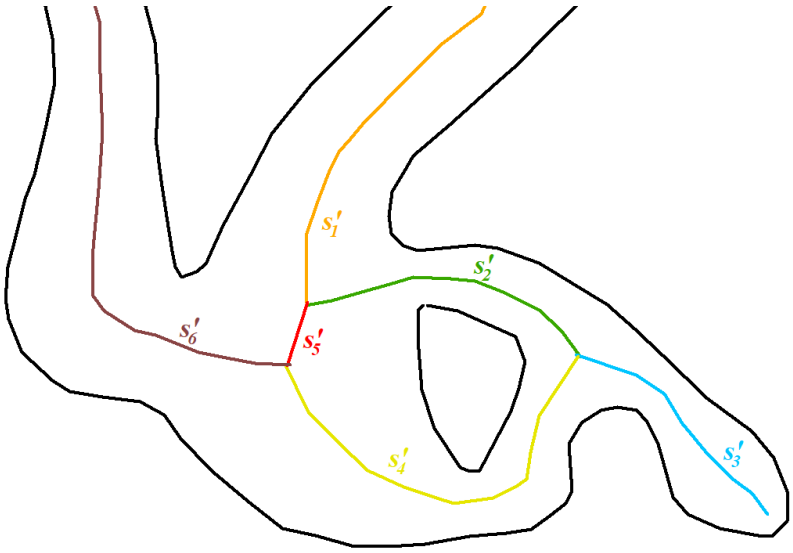



*Obr. 47 Levá část znázorňuje vodní tok před aplikací negativního bufferu, pravá část znázorňuje vodní tok po aplikaci negativního bufferu (šedá barva)*

### 4.9.3 Metody využívající převzorkování břehů

Břehovka vodního toku je tvořena lomovými body, jejich počet se na obou březích může výrazně lišit. Existují místa na vodním toku, kde je tento nepoměr velmi výrazný. Může se lišit až o půl řádu, typickým příkladem jsou meandrující místa. Klasické metody založené na měření vzdálenosti mezi body na obou březích nepřinášejí dobré výsledky, jelikož předpokládají konstantní hustotu vzorkování. Pokud by dodatečné převzorkování s konstantním krokem bylo provedeno ještě před vytvořením straight skeletonu, došlo by ke změně struktury a výpočetní čas pro tvorbu straight skeletonu by

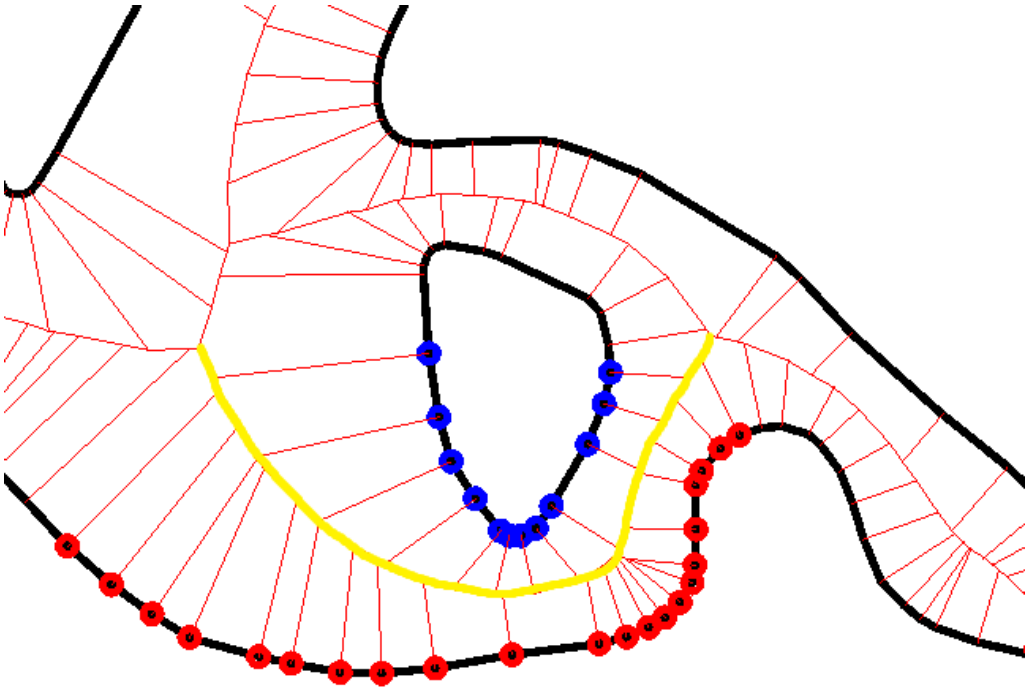
se značně navýšil. Pro navržené metody by tedy musel být použití jiný přístup a k převzorkování by docházelo až po vytvoření straight skeletonu.




*Obr. 48 Jednotlivé skupiny vnitřních segmentů barevně.*

Problémem při vzorkování je správná identifikace břehů pro jednotlivé skupiny vnitřních segmentů. Tento problém je nejzávažnější hlavně u ostrovů. Obr. 48 zobrazuje barevně jednotlivé skupiny vnitřních segmentů. Určení počátku a konce části břehu vodního toku, který odpovídá dané skupině vnitřních segmentů je složitý proces. S využitím struktury straight skeletonu je ale možné identifikovat jednotlivé části břehů pomocí segmentů, jejichž koncové body incidují s hranicí polygonu vodního toku. Koncový bod takového segmentu lze přiřadit jednotlivým skupinám vnitřních segmentů již při procesu řazení. Dochází tedy k segmentaci bodů břehovky do skupin dle příslušnosti k vnitřním segmentům straight skeletonu.

Vazba segmentů, jejichž koncové body incidují s hranicí polygonu vodního toku na skupinu vnitřních segmentů je vidět na Obr. 49. Body jsou barevně odlišené podle jejich orientace vůči vyznačené skupině vnitřních segmentů.

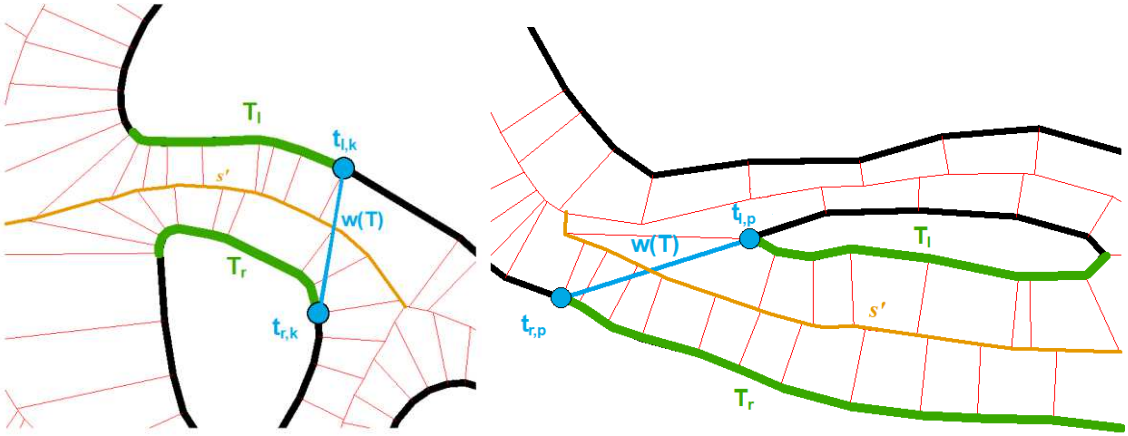


*Obr. 49 Vazba segmentů, jejichž koncové body (modře a červeně) incidují s hranicí polygonu vodního toku na skupinu vnitřních segmentů (žlutě).*

### Vzdálenost mezi jednotlivými body obou břehů

Po správné identifikaci bodů břehovky s využitím straight skeletonu je možné aplikovat jednotlivé metody měření šířky vodního toku. Metoda měření vzdálenosti mezi jednotlivými body obou břehů vypadá na první pohled jako účinná a přesná metoda, ale existuje případ, kdy neposkytuje dobré výsledky. Tento případ je popsán v následujícím textu.

Jelikož segmentace bodů probíhá dle příslušnosti ke straight skeletonu, záleží na rozmístění počátečního a koncového bodu dané části břehu. Pokud se počáteční body $t_{l,p}$, $t_{r,p}$ či koncové body $t_{l,k}$, $t_{r,k}$ břehů $T_l$, $T_r$ nebudou nacházet naproti sobě, délka částí obou břehů se může lišit, a to může způsobit, že naměřená šířka $w(T)$ vodního toku $T$ mezi břehy bude zavádějící. Tato situace je znázorněna na Obr. 50. Oba břehy zde mají rozdílnou hustotu vzorkování. Výsledek bude podobný i při stejné hustotě vzorkování.

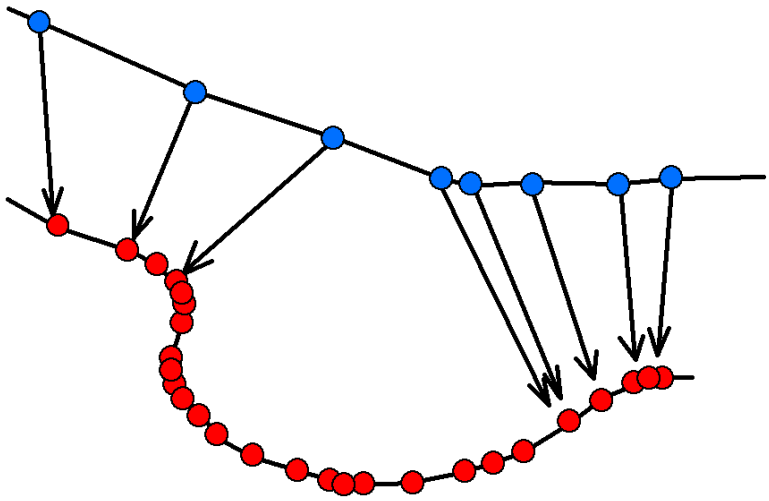



*Obr. 50 Problematika počátečních a koncových bodů při měření šířky pomocí metody měření vzdálenosti mezi jednotlivými body obou břehů.*

**Minimální vzdálenost mezi břehy**

Metoda minimální vzdálenosti (měřena z bodu na levém břehu k bodům na pravém břehu vodního toku či naopak) naráží na stejný problém, jako výše popsaná metoda. Minimální vzdálenost se často může jevit jako logický postup, který by mohl fungovat správně, ale má více nedostatků než ostatní metody. Obr. 51 zobrazuje očividný problém minimální vzdálenosti, na který je možné při měření šířky narazit.

Pokud je hledána minimální vzdálenost z každého bodu na jednom břehu vzhledem k bodu na břehu druhém, tak se může stát, že více bodů na jednom břehu bude mít stejný nejbližší bod na břehu druhém. Pokud toto nastane, veškerá rozšíření vodního toku budou s největší pravděpodobností ignorována a výsledná naměřená šířka bude zavádějící. Podobná situace nastane i v případě, kdy mají oba břehy různou hustotu vzorkování, viz Obr. 51. Červené body nacházející se v rozšířené oblasti by stejně nebyly použity pro měření šířky.



*Obr. 51 Problém metody minimální vzdálenosti mezi břehy.*

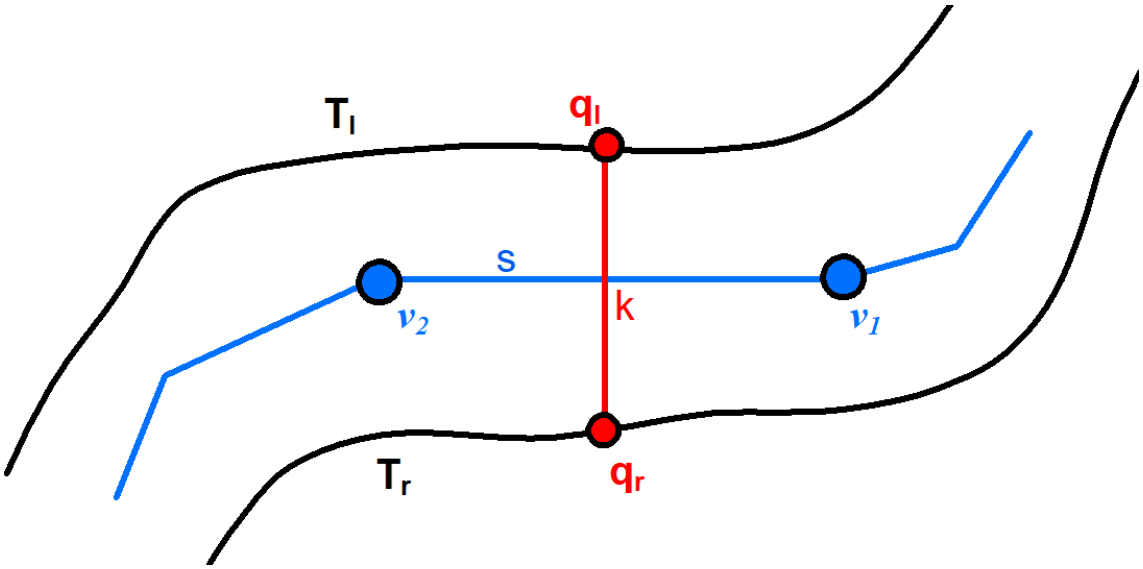
### 4.9.4 Měření délky kolmic

Nově navržená metoda je založena na využití segmentů struktury straight skeletonu, která vznikla v předchozích fázích. Metoda využívá osy úseček konstruovaných k vnitřním segmentům straight skeletonu. Tato metoda byla vybrána a použita v této práci.

Ke každému vnitřnímu segmentu *s* je zkonstruována jeho osa k oběma břehům vodního toku *T*. Osa (v této práci dále označována jako **kolmice**) *k* vnitřního segmentu *s* protne levou břehovku vodního toku $T_l$ v bodě $q_l$, pravou břehovku vodního toku $T_r$ v bodě $q_r$. Šířku vodního toku *w(T)* určíme

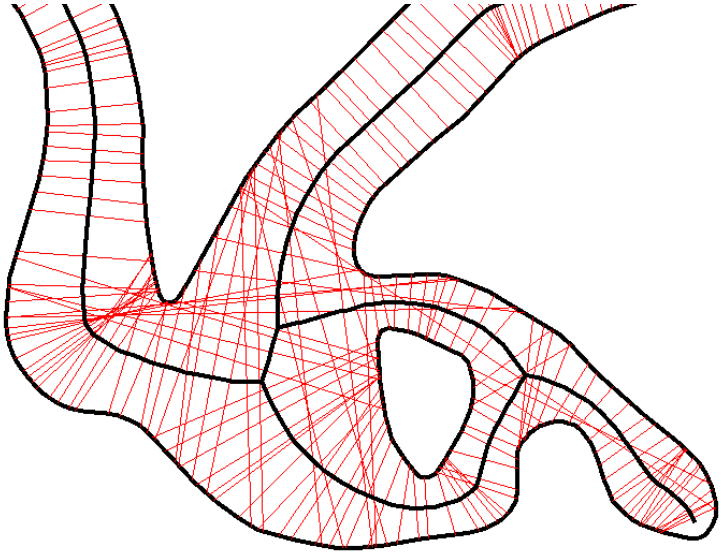
$$w(T) = d(q_l, q_r)\,. \tag{27}$$

Obr. 52 znázorňuje vytvořenou kolmici *k* vedenou z vnitřního segmentu *s* ke břehům vodního toku $T_r$ a $T_l$.




*Obr. 52 Kolmice k vedená ke břehům vodního toku $T_r$, $T_l$.*

Tato metoda měří šířku vodního toku v daném bodě kolmo na předpokládanou osu vodního toku, která je reprezentována skupinami vnitřních segmentů. Představuje podobný přístup, kterým by člověk měřil šířku vodního toku v praxi.



*Obr. 53 Kolmice (červeně) pro měření šířky vodního toku.*

Vstupní parametry pseudokódu pro vytvoření kolmic jsou: skupina vnitřních segmentů *s'* (bez výběžků) a vodní tok (množina bodů tvořící hranici polygonu) *T*. Pseudokód vypadá následovně:

$VytvořeníKolmic(s', T)$

1: $Inicializace\ kolmic\ K = \{\}, průsečíků\ I = \{\}$

2: $TL = vytvořit\ liniové\ segmenty\ z\ T$

3: *Opakovat pro každý vnitřní segment s z s′*:

4: $v_o$ = *středový bod s*

5: $p$ = *přímka vedená z* $v_o$ *kolmá na s*

6: *Opakovat pro všechny segmenty tl z TL*:

7: $q$ = *přímka z tl*

8: $i$ = *průsečík p a q*

9: *Pokud i leží na tl*:

10: *Přidat i do I*

11: *Inicializace bodu* $b = \{\}$, *průsečíku* $i_{min} = \{\}$

12: *Opakovat dvakrát*:

13: *Pokud iterujeme podruhé*:

14: $Io$ = *průsečíky z I ležící na opačné starně segmentu s než b*

15: $i_{min}$ = *nejbližší průsečík z Io k bodu* $v_o$ ; *reset I*

16: *Jinak*:

17: $i_{min}$ = *nejbližší průsečík z I k bodu* $v_o$

18: $l$ = *linie* $(i_{min}, v_o)$; *přidat l do K*

19: $b = i_{min}$

20: $K$ = *spojit linie z K vedené ze stejného bodu do jedné linie*

21: *return K*

*Alg. 9: Vytvoření kolmic vedených ke břehům vodního toku.*

Jak je možné vidět na Obr. 53, kolmice jedné skupiny vnitřních segmentů se v určitých úsecích protínají s kolmicemi z jiných skupin, popřípadě protínají vnitřní segmenty jiné skupiny. Protínající se kolmice nejsou chybně vytvořeny, ale při dalším zpracování v této práci mohou vytvářet potenciální problémy. Pro rekonstrukci úseků vodního toku, které budou nakonec zachovány, je počáteční a koncový bod kolmic zásadní. Tento problém je v práci řešen s využitím **jednoduché heuristiky**. Je založena na myšlence: čím delší segment tím menší významnost, tím více průsečíků s ostatními segmenty. Jinak řečeno, jsou preferovány krátké segmenty s malým počtem průsečíků. Vlastní algoritmus je tvořen 3 fázemi:

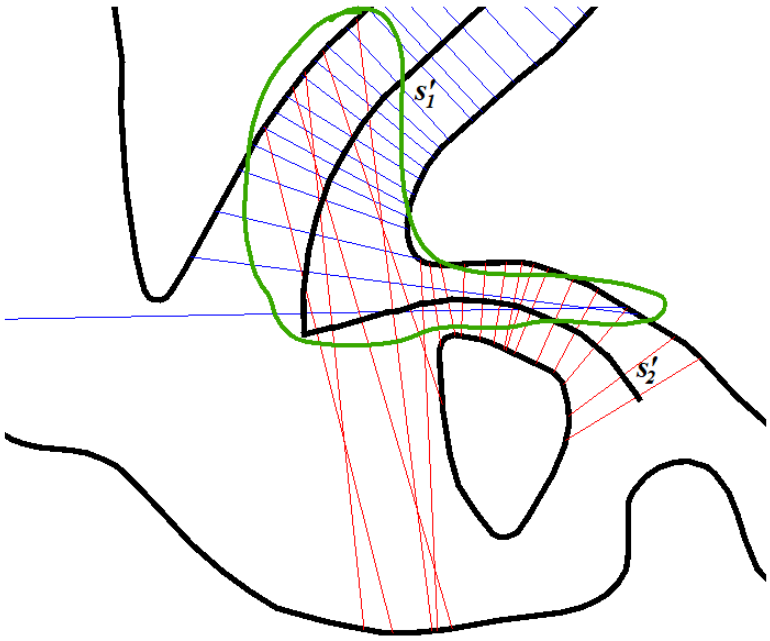
1) Odstranění kolmic dle počtu průsečíků s ostatními skupinami vnitřních segmentů (viz kapitolu 4.9.4.1)
2) Odstranění kolmic dle počtu průsečíků s vnitřními segmenty (viz kapitolu 4.9.4.2)
3) Odstranění kolmic dle počtu průsečíků v rámci jedné skupiny vnitřních segmentů (viz kapitolu 4.9.4.3)

#### 4.9.4.1 Odstranění kolmic dle počtu průsečíků s ostatními skupinami vnitřních segmentů

Kolmice skupiny vnitřních segmentů, které se protínají s kolmicemi z ostatních skupin, je možné zredukovat na základě počtu průsečíků. Implementace heuristiky je velmi jednoduchá. Kolmice $K$ je nutné seřadit od nejdelší po nejkratší. Delší kolmice bude pravděpodobně protnuta více kolmicemi než kolmice kratší, a proto by měla být odstraněna dříve. Kratší kolmice totiž pravděpodobně nebude vytvářet problémová místa. Pro každou kolmici $k$ skupiny vnitřních segmentů $s'$ je počítán počet průsečíků $I$ s kolmicemi z ostatních skupin vnitřních segmentů. Pokud

$$I \geq I_{max}\,, \tag{28}$$

tak dojde k odstranění porovnávané kolmice $k_i$. Na Obr. 54 je znázorněna situace, kde kolmice (modře) skupiny vnitřních segmentů $s'_1$, protínají kolmice (červeně) skupiny vnitřních segmentů $s'_2$. Veškeré kolmice, pro které je nutné porovnat počet průsečíků se nacházejí v zeleně vyznačené oblasti.




*Obr. 54 Znázornění protnutí kolmic (modře) skupiny $s'_1$ s kolmicemi (červeně) skupiny $s'_2$.*

V praxi byla použita hodnota $I_{max}$ = 1, tj. byl povolen maximálně jeden průsečík. Tato varianta poskytovala dobré výsledky.

Vstupní parametry pseudokódu pro odstranění kolmic dle počtu průsečíků s ostatními skupinami vnitřních segmentů jsou: všechny kolmice $K$ a kolmice $S'_K$ rozdělené podle jednotlivých skupin vnitřních segmentů. Pseudokód vypadá následovně:

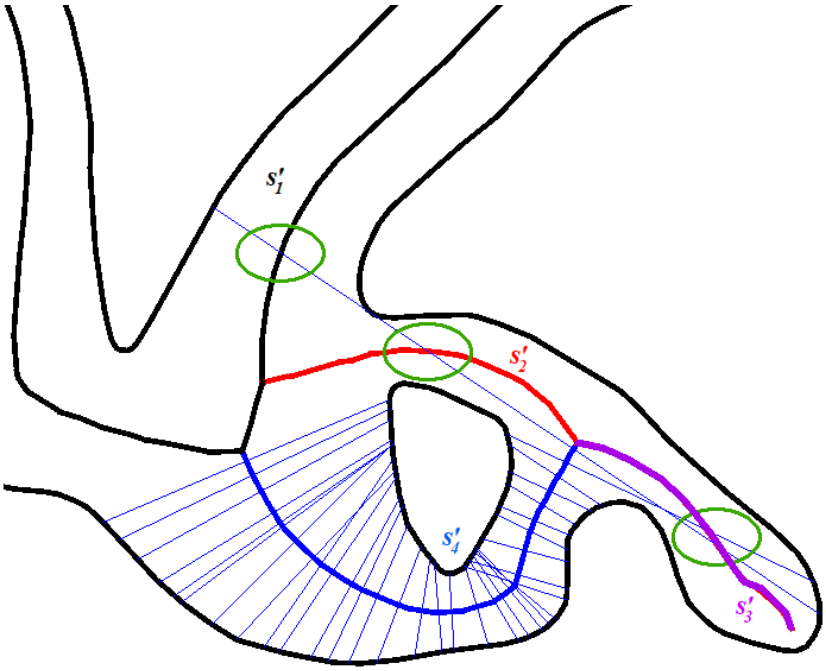
$RedukceKolmic1(K, S'_K)$

1: $Inicializace\ počtu\ průsečíků\ I = 0, break\ hodnoty\ bV = 0$
2: $Opakovat\ pro\ každou\ kolmici\ k\ z\ K$:
3: $Opakovat\ pro\ každou\ skupinu\ s'_K\ z\ S'_K$:
4: $Pokud\ s'_K\ obsahuje\ k$:
5: $continue$
6: $Opakovat\ pro\ všechny\ kolmice\ s'_k\ z\ s'_K$:
7: $Pokud\ délka\ k < délka\ s'_k$:
8: $continue$:
9: $Pokud\ se\ k\ a\ s'_k\ protínají$:
10: $I = I + 1$
11: $Pokud$ (28):
12: $Odstranit\ k\ z\ K$
13: $bV = 1; break$
14: $Pokud\ bV == 1$:
15: $bV = 0; break$
16: $return\ K$

*Alg. 10: Redukce kolmic dle počtu průsečíků s ostatními skupinami vnitřních segmentů.*

#### 4.9.4.2 Odstranění kolmic dle počtu průsečíků s vnitřními segmenty

V tomto kroku dochází k odstranění kolmic, které protínají vnitřní segmenty více než jedné skupiny vnitřních segmentů. Každá kolmice protíná vnitřní segmenty skupiny, ze které byla vytvořena. Pokud tedy kolmice protíná vnitřní segmenty jiné skupiny, musí být odstraněna. Tímto krokem se výrazně zredukuje počet zbylých kolmic. Na Obr. 55 je znázorněna situace, kde kolmice (modře) skupiny vnitřních segmentů $s'_4$, protínají vnitřní segmenty skupiny $s'_1$, $s'_2$ a $s'_3$. Místa protnutí vnitřních segmentů jsou zeleně vyznačena.




*Obr. 55 Znázornění protnutí kolmic a vnitřních segmentů ostatních skupin.*

Vstupní parametry pseudokódu pro odstranění kolmic dle počtu průsečíků s vnitřními segmenty jsou: všechny kolmice $K$ a skupiny vnitřních segmentů $S'$ (bez výběžků). Pseudokód vypadá následovně:

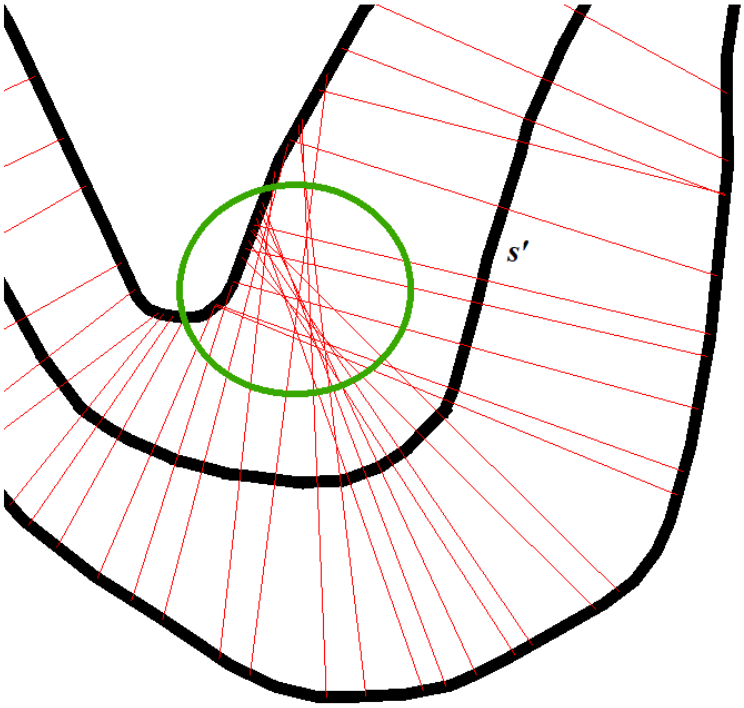
$RedukceKolmic2(K, S')$
1: $Inicializace\ break\ hodnoty\ bV = 0$
2: $Opakovat\ pro\ každou\ kolmici\ k\ z\ K$:
3: $Opakovat\ pro\ všechny\ skupiny\ s'\ z\ S'$:
4: $Pokud\ byla\ k\ vytvořena\ z\ s'$:
5: $continue$
6: $Opakovat\ pro\ každý\ vnitřní\ segment\ s\ z\ s'$:
7: $Pokud\ se\ s\ a\ k\ protínají$:
8: $Odstranit\ k\ z\ K$
9: $bV = 1; break$
10: $Pokud\ bV == 1$:
11: $bV = 0; break$
12: $return\ K$

*Alg. 11: Redukce kolmic dle počtu průsečíků s vnitřními segmenty.*

První z redukcí, která byla popsána v kapitole 4.9.4.1, odstraní většinou všechny problémové kolmice mezi skupinami vnitřních segmentů. Druhá redukce slouží už jen jako doplnění. Zhruba v 80 % případech by nebylo nutné používat druhou redukci, jelikož první redukce odstraní všechny problémové kolmice.

#### 4.9.4.3 Odstranění kolmic dle počtu průsečíků v rámci jedné skupiny vnitřních segmentů

V rámci jedné skupiny vnitřních segmentů *s'* mohou vznikat podobná problémová místa z důvodu zakřivení vodního toku (např: meandry). Dochází tedy k tvorbě míst, kde se protíná velké množství kolmic. Tato situace je znázorněna na Obr. 56. Cílem je zredukovat množství kolmic v těchto místech pro zjednodušení následné rekonstrukce polygonu (kapitola 4.10).




*Obr. 56 Znázornění místa, kde se protíná velké množství kolmic z jedné skupiny vnitřních segmentů s'.*

Tento problém je možné vyřešit stejným způsobem jako v kapitole 4.9.4.1. Jediný rozdíl je, že dochází k hledání průsečíků kolmic *K* v rámci jedné skupiny vnitřních segmentů *s'*.

V praxi byla použita hodnota $I_{max}$ = 9, tj. bylo povoleno maximálně devět průsečíků. Tato varianta poskytovala dobré výsledky. Nižší hodnoty odstraňují příliš mnoho kolmic a vyšší hodnoty odstraňují příliš málo kolmic.

Vstupní parametry pseudokódu pro odstranění kolmic dle počtu průsečíků v rámci jedné skupiny vnitřních segmentů jsou: všechny kolmice *K* a kolmice $S'_K$ rozdělené podle jednotlivých skupin vnitřních segmentů. Pseudokód vypadá následovně:

$RedukceKolmic3(K, S'_K)$

1: $K =$ *seřadit kolmice k z K podle délky*

2: *Inicializace počtu průsečíků* $I = 0$, *break hodnoty* $bV = 0$

3: *Opakovat pro každou kolmici* $k$ *z* $K$, *index* $i$:

4: *Opakovat pro každou skupinu* $s'_K$ *z* $S'_K$:

5: *Pokud* $s'_K$ *neobsahuje* $k$:

6: *continue*

7: *Opakovat pro každou kolmici* $s'_k$ *z* $s'_K$, *začít od* $i + 1$:

8: *Pokud se* $k$ *a* $s'_k$ *protínají*:

9: $I = I + 1$;

10: *Pokud* (28) :

11: *Odstranit* $k$ *z* $K$

12: $bV = 1$; *break*

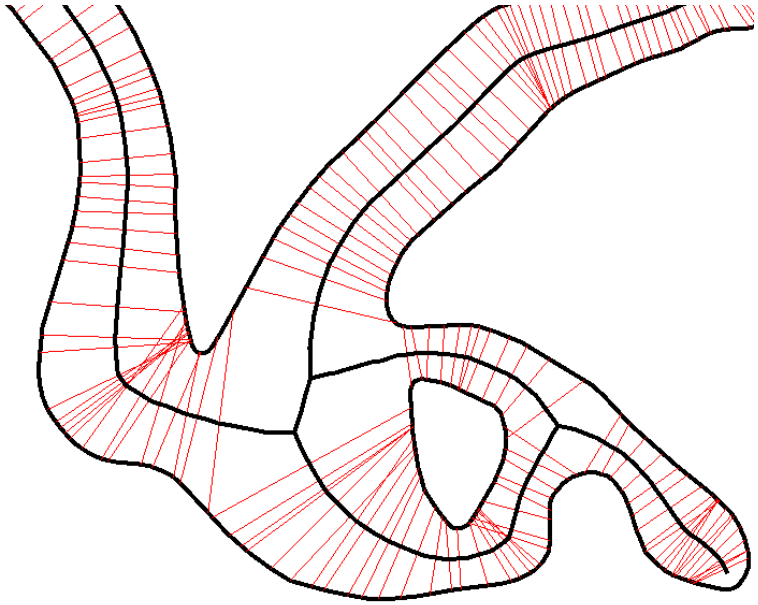
13: *Pokud* $bV == 1$:

14: $bV = 0$; *break*

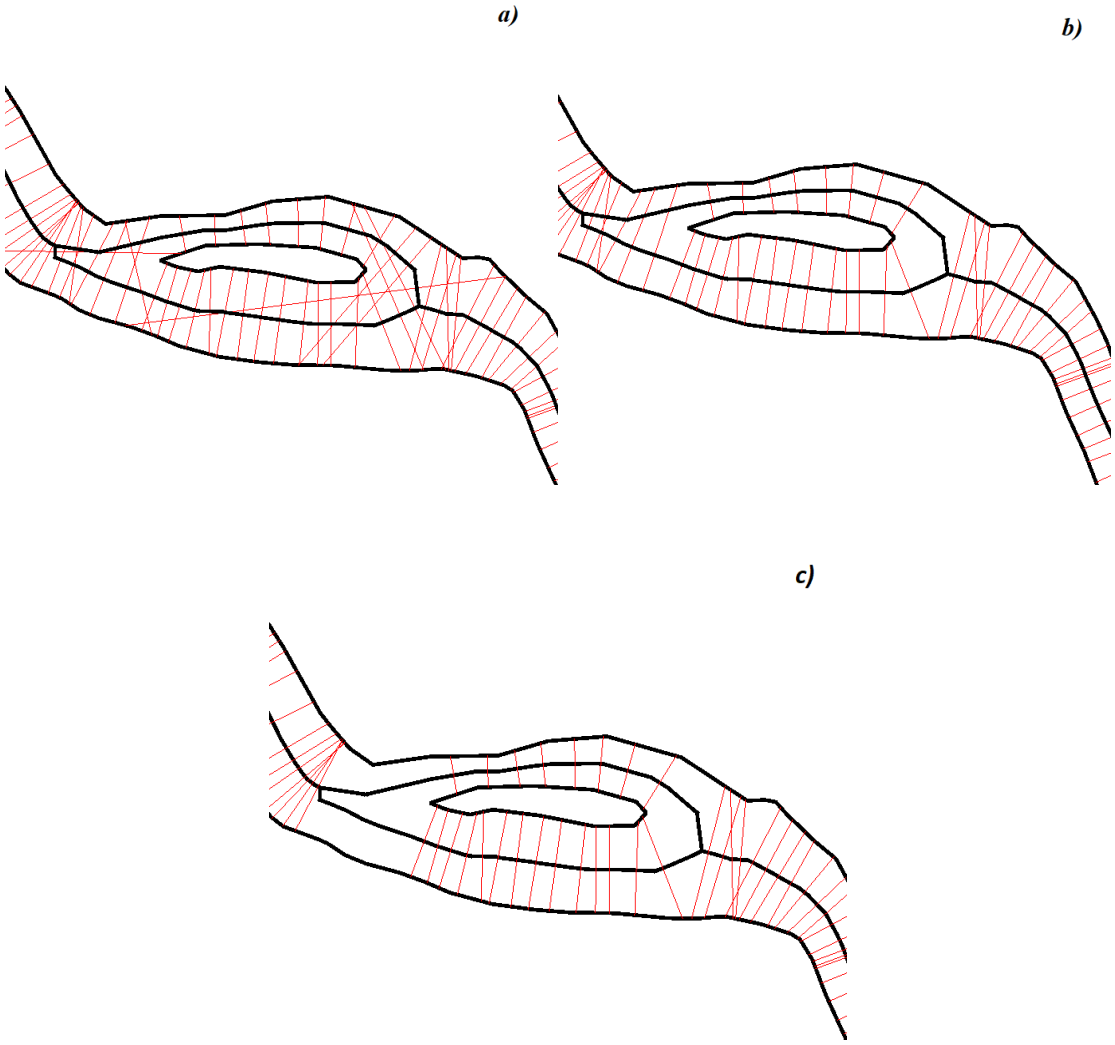
15: *return* $K$

*Alg. 12: Redukce kolmic dle počtu průsečíků v rámci jedné skupiny vnitřních segmentů.*

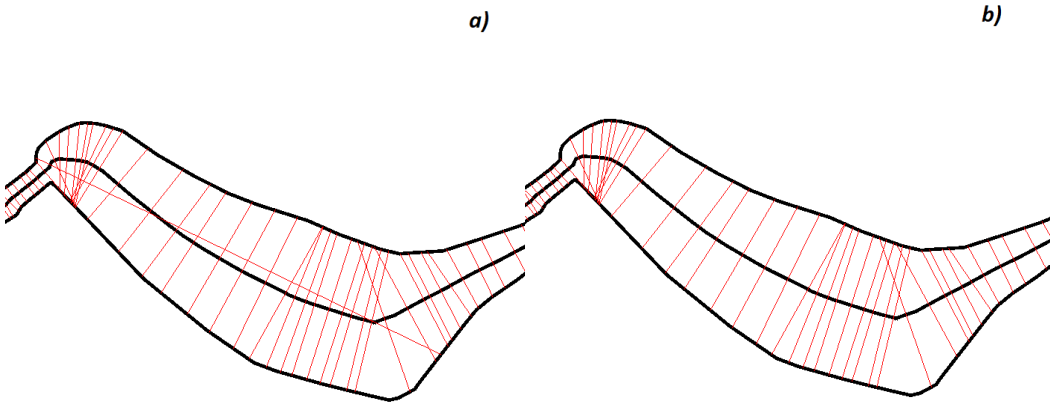
Výsledné redukce kolmic je možné vidět na Obr. 57, původní stav na Obr. 53. Z obrázku je patrné, že použité redukce dávají velice dobré výsledky, jelikož uspořádání kolmic je možné použít pro určení šířky a další zpracování. Na Obr. 58 a Obr. 59 je znázorněn vliv jednotlivých fází odstranění kolmic.



*Obr. 57 Výsledné kolmice po provedení všech redukcí kolmic, původní Obr. 53.*




*Obr. 58 Znázornění redukce kolmic mezi skupinami vnitřních segmentů a) původní stav b) odstranění podle 4.9.4.1 c) odstranění podle 4.9.4.2.*




*Obr. 59 Znázornění redukce kolmic v rámci jedné skupiny vnitřních segmentů a) původní stav b) odstranění podle 4.9.4.3.*

## 4.10 Identifikace a rekonstrukce úseků vodního toku

V tomto kroku dochází k identifikaci úseků vodního toku, u kterých by měla být zachována reprezentace břehovkou, a to na základě hodnoty prahové šířky $w_{max}$. Následně dochází k jejich rekonstrukci do polygonové reprezentace.

Pokud dojde k rekonstrukci jen části vodní toku, tak tento krok spolu s krokem 4.5 reprezentuje kartografické pravidlo P3 (částečná prostorová redukce). Pokud dojde k úplné rekonstrukci vodního toku, je tímto krokem eliminováno kartografické pravidlo P2 (prostorová redukce), které bylo aplikováno v kapitole 4.5.

Celý proces identifikace a rekonstrukce úseků vodního toku je možné rozdělit do tří kroků:

- hledání úseků vodního toku určených k zachování (viz kapitolu 4.10.1),
- rekonstrukce nalezených úseku vodního toku (viz kapitolu 4.10.2),
- spojení zrekonstruovaných úseků vodního toku (viz kapitolu 4.10.3).

### 4.10.1 Hledání úseků vodního toku určených k zachování

V tomto kroku dochází k hledání úseků určených k zachování reprezentace břehovkou dle hodnoty prahové šířky $w_{max}$. Tento krok je nutné provést, aby byly identifikovány veškeré potenciálně zachované úseky, a bylo možné přejít k jejich rekonstrukci.

Pro každou část vodního toku (reprezentovanou jednou skupinou vnitřních segmentů) existuje množina vytvořených kolmic *K*. Jednotlivé kolmice je možné rozdělit do dvou skupin podle jejich délky. Kolmice *KL*

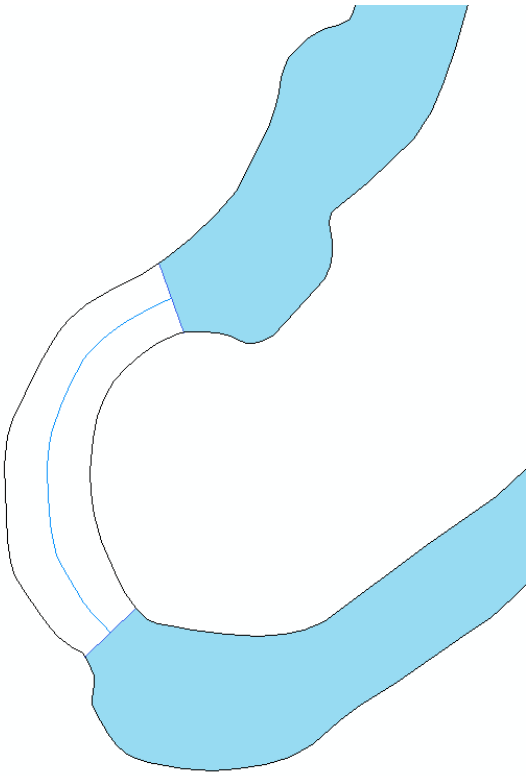
$$KL = \{K, \|k\| > w_{max}\}, \tag{29}$$

jejichž délka je větší než prahová hodnota šířky $w_{max}$ a na kolmice *KS*

$$KS = \{K, \|k\| \leq w_{max}\}, \tag{30}$$

jejichž délka je menší než prahová hodnota šířky $w_{max}$.

Kolmice *KL* by tedy měly reprezentovat úseky, které jsou určeny k zachování. Pokud by tomu opravdu tak bylo, tak by v místech krátkého zúžení vodního toku mezi úseky určenými k zachování, docházelo k vytváření krátkých úseků, určených ke generalizaci. Takový případ by tedy způsobil nesouvislost v plošné reprezentaci vodního toku, viz Obr. 60.



*Obr. 60 Krátký úsek určený ke generalizaci mezi dvěma úseky určenými k zachování.*

Proces hledání úseků se zachovanou reprezentací pomocí břehovky musí tedy kromě délky kolmic zohledňovat i okolí (dané hodnotou $d_{max}$) jednotlivých dlouhých kolmic $k$ z $KL$. Proces hledání může být na první pohled složitý, a proto je nutné přehledně popsat fakta, která hrají roli při vyhledávání:

- Proces hledání probíhá pro každou část (reprezentovanou skupinou vnitřních segmentů) vodního toku zvlášť.
- Pro každou část vodního toku existuje množina kolmic $K$.
- Každá část vodního toku může obsahovat několik množin dlouhých $KL$ (reprezentující široké úseky) i krátkých kolmic $KS$ (reprezentující úzké úseky).

Celý vyhledávací proces je možné rozdělit do několika fází:

- Postupně jsou procházeny jednotlivé kolmice $k_i$ z $K$. Proces začíná od počáteční kolmice $k_p$ a končí u koncové kolmice $k_k$.
- Pokud pro aktuální kolmici $k_i$ platí, že

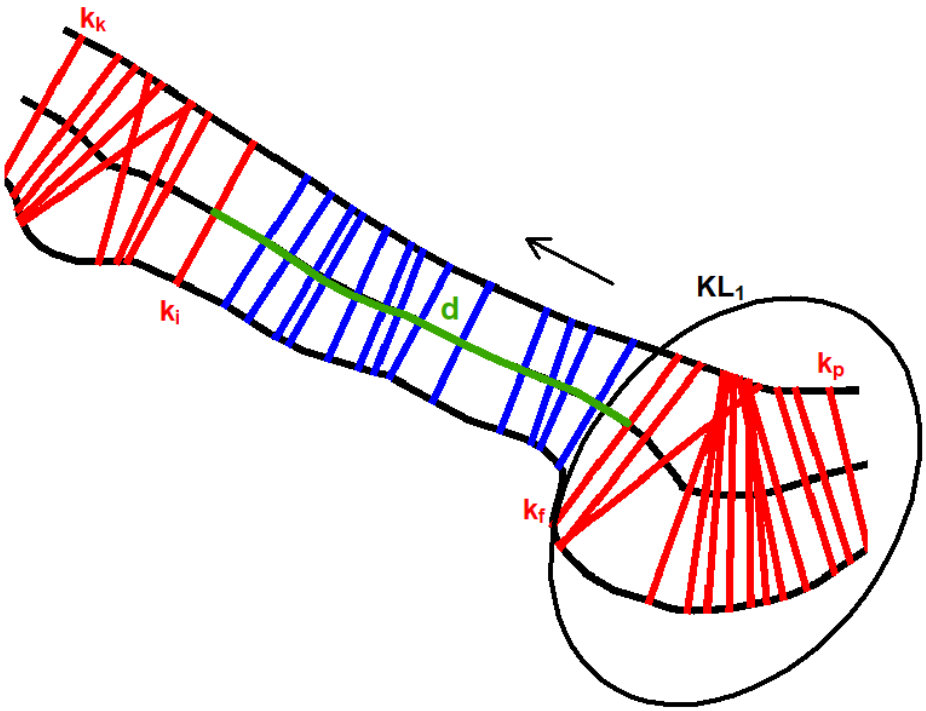
$$\|k_i\| > w_{max}\,, \tag{31}$$

tak je $k_i$ přiřazena do první množiny dlouhých kolmic $KL_1$. Kolmice $k_i$ se stává naposled prošlou dlouhou kolmicí. Tato kolmice je označena jako $k_f$.

- Pokud pro aktuální kolmici $k_i$ neplatí (31), tak je $k_i$ přiřazena do množiny krátkých kolmic *KS*.
- Pokud pro aktuální kolmici $k_i$ platí (31) a zároveň již existuje kolmice $k_f$ (tzn. již byla přidána nějaká kolmice $k$ do $KL_1$), je nutné zjistit, jestli se kolmice $k_i$ nachází v dostatečné vzdálenosti $d$ od kolmice $k_f$ (vzdálenost měřena po jednotlivých vnitřních segmentech $s$). Pokud tedy platí, že

$$d(k_i, k_f, s) < d_{max}\,, \tag{32}$$

tak jsou do $KL_1$ přidány všechny krátké kolmice z *KS*, které se nachází mezi $k_i$ a $k_f$ (jedná se jen a krátké zúžení). Kolmice $k_i$ je označena jako $k_f$ a je také přidána do $KL_1$. Pokud (32) neplatí, tak je kolmice $k_i$ označena jako $k_f$, ale je přidána do nové množiny $KL_2$, která reprezentuje nový široký úsek v dané části vodního toku. Vyhledávací proces je znázorněn na Obr. 61.




*Obr. 61 Znázornění situace při hledání úseků určených k zachování, krátké kolmice (modré) a dlouhé kolmice (červené).*

Výsledkem vyhledávacího procesu je tedy množina $L_{KL}$, která obsahuje množiny dlouhých kolmic *KL* (reprezentují úseky určené pro zachování, ale mohou obsahovat i krátké kolmice. Z tohoto důvodu je množina dále označena jako $L_{KZ}$)

$$L_{KZ} = \{KZ_1, KZ_2, \dots, KZ_n\}\,, \tag{33}$$

kde $n = ||KZ||$.

Po konci vyhledávacího procesu je nutné provést kontrolu, zdali jednotlivé úseky určené pro zachování $KZ_i$ neobsahují více krátkých kolmic než dlouhých kolmic, respektive zdali délka všech krátkých úseků je větší než délka všech dlouhých úseků. $KZ_i$ je možné opět rozdělit podle $w_{max}$ stejným způsobem jako (29) a (30) na *KL* (jen dlouhé kolmice) a *KS* (jen krátké kolmice). Pokud tedy po rozdělení platí, že

$$\sum_{j=1}^{||KS||} \sum_{i=1}^{||KS_j||-1} d(KS_{j,i}, KS_{j,i+1}) > \sum_{j=1}^{||KL||} \sum_{i=1}^{||KL_j||-1} d(KL_{j,i}, KL_{j,i+1}) \ , \tag{34}$$

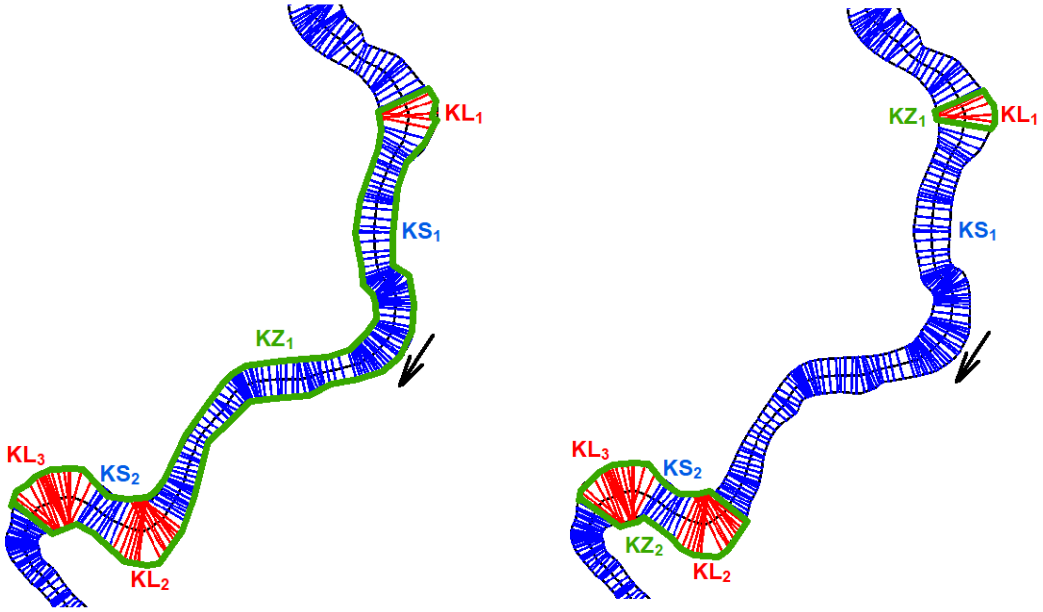
kde *KS* je množina úzkých úseků a *KL* je množina širokých úseků, tak není potřeba udržovat souvislost plošné reprezentace vodního toku, jelikož v dané části vodního toku převažují úseky s menší šířkou než $w_{max}$.

V tomto případě je nutné opět přistoupit k vyhledávacímu procesu popsanému výše. Tentokrát je nutné hodnotu $d_{max}$ zvolit

$$d_{max} = c \cdot d_{max} \ , \tag{35}$$

kde *c* zmenšuje hodnotu $d_{max}$, aby byly spojovány opravdu jen skupiny kolmic s velmi malou vzdáleností mezi sebou. Také by krátký úsek neměl být delší než délka sousedních dlouhých úseků dohromady.

Obr. 62 znázorňuje situaci, kde úzké úseky (modře) převažují nad širokými (červeně), a proto bylo nutné přistoupit k druhé iteraci vyhledávacího procesu s menší hodnotou $d_{max}$. Na levé straně obrázku je zeleně vyznačený úsek určený pro zachování $KZ_1$ po první iteraci vyhledávacího procesu a na pravé straně jsou zeleně vyznačeny úseky určené pro zachování $KZ_1$, $KZ_2$ po druhé iteraci.




*Obr. 62 Vlevo situace po první iteraci vyhledávacího procesu, vpravo situace po druhé iteraci vyhledávacího procesu.*

Pro účely diplomové práce a zpracovávaný vodní tok byla zvolena hodnota $d_{max}$ = 200 m pro první iteraci vyhledávacího procesu a hodnota $c$ = 0.2 tzn. pro druhou iteraci vyhledávacího procesu je $d_{max}$ = 40 m. Hodnoty byly zvoleny na základě testování, jelikož dosahovaly dobrých výsledků.

V této práci jsou jednotlivé iterace vyhledávacího procesu napsány odděleně, jelikož druhá iterace vychází z datových struktur vzniklých při první iteraci. Z tohoto důvodu jsou pro každou iteraci samostatné pseudokódy.

Vstupní parametry pseudokódu pro první iteraci vyhledávacího procesu jsou: množina kolmic $K$ odpovídající jedné skupině vnitřních segmentů a prahová hodnota šířky $w_{max}$. Pseudokód vypadá následovně:

$VyhledávacíProces1(K, w_{max})$

1: *Inicializace úseků určených pro zachování* $L_{KZ} = \{\}$, *jednoho úseku* $KZ = \{\}$
2: *Inicializace dlouhých kolmic* $KL = \{\}$, *krátkých kolmic* $KS = \{\}$
3: *Inicializace vzdálenosti* $d = 0$
4: *Opakovat pro každou kolmici* $k$ *z* $K$:
    5: *Pokud* $k$ *není první kolmicí z* $K$:
        6: $d = d +$ *vzdálenost mezi* $k$ *a* $k - 1$ (*předešlá* $k$)
    7: *Pokud* (31):
        8: *Pokud* $d <$ $d_{max}$ *nebo je KS prázdná*:
            9: *Pokud KL a KS nejsou prázdné*:
                10: *Přidat všechny* $ks \in KS$ *do* $KZ$

11: $KL = \{\}$

12: $KS = \{\}; d = 0$

13: $Přidat\ k\ do\ KL$

14: $Jinak$:

15: $Pokud\ KL\ neni\ prázdná$:

16: $Pokud\ KS\ je\ prázdná$:

17: $Přidat\ všechny\ kl \in KL\ do\ KZ$

18: $Přidat\ KZ\ do\ L_{KZ}; KZ = \{\}$

19: $KL = \{\}$

20: $Přidat\ k\ do\ KL$

21: $KS = \{\}; d = 0$

21: $Jinak$:

22: $Pokud\ KS\ je\ prázdná\ a\ zároveň\ KL\ není\ prázdná$:

23: $Přidat\ všechny\ kl \in KL\ do\ KZ$

24: $Přidat\ k\ do\ KS$

25: $Pokud\ KS\ je\ prázdná$:

26: $Přidat\ všechny\ kl \in KL\ do\ KZ$

27: $Přidat\ KZ\ do\ L_{KZ}$

28: $return\ L_{KZ}$

*Alg. 13: První iterace vyhledávacího procesu.*

Vstupní parametry pseudokódu pro druhou iteraci vyhledávacího procesu jsou: úseky určené pro zachování $L_{KZ}$ odpovídající jedné skupině vnitřních segmentů a prahová hodnota šířky $w_{max}$. Pseudokód vypadá následovně:

$VyhledávacíProces2(L_{KZ}, w_{max})$

1: $Pokud\ (34)$:

2: $Inicializace\ vzdáleností\ D = \{\}, množin\ kolmic\ L_K = \{\}$

3: $Opakovat\ pro\ každý\ úsek\ KZ\ z\ L_{KZ}$:

4: $Inicializace\ KL = \{\}, KS = \{\}$

5: $Opakovat\ pro\ každou\ kolmici\ k\ z\ KZ$:

6: $Pokud\ délka\ k\ > w_{max}$ :

7: $Přidat\ k\ do\ KL$

8: $Pokud\ KS\ není\ prázdná$:

9: $Přidat\ KS\ do\ L_K;\ KS = \{\}$

10: $Jinak$:

11: $Přidat\ k\ do\ KS$

12: $Pokud\ KL\ není\ prázdná$:

13: $Přidat\ KL\ do\ L_K;\ KL = \{\}$

14: $Opakovat\ pro\ každou\ množinu\ K\ z\ L_K$:

15: $Přidat\ celkovou\ délku\ úseku\ K\ do\ D$

16: $L_{KZ} = \{\}$
17: $Opakovat\ pro\ každou\ vzdálenost\ d\ z\ D, index\ i$:
18: $Pokud\ d\ vznikla\ z$ úzkého úseku:
19: $Pokud\ d < (35)$ :
20: $Pokud\ d < D[i-1] + D[i+1]$:
21: $Přidat\ L_K[i]\ do\ L_{KZ}$
22: $Přidat\ L_K[i+1]\ do\ L_{KZ}$
23: $i = i + 1; continue$
24: $continue$
25: $Jinak$:
26: $Přidat\ L_K[i]\ do\ L_{KZ}$
27: $return\ L_{KZ}$

*Alg. 14: Druhá iterace vyhledávacího procesu.*

### 4.10.2 Rekonstrukce úseků vodního toku

Základní myšlenkou navrženého řešení je fakt, že pro rekonstrukci bodů břehovek lze použít vytvořené kolmice, jelikož body ($q_r$, $q_l$) tvořící kolmici $k$ leží na pravé a levé břehovce vodního toku. V tomto kroku tedy dochází k rekonstrukci pravého a levého břehu polygonu (úseku) $P$ z množiny kolmic, která byla identifikována jako úsek určený k zachování.

Tento krok je důležitý pro částečnou a úplnou prostorovou redukci a reprezentuje pravidlo P3 a P2. Z předchozí fáze jsou známy množiny kolmic $L_{KZ}$ (reprezentují úseky) pro každou část vodního toku, které by měly být zachovány na základě šířkového kritéria. Níže popsaný postup je identický pro všechny množiny $KZ$ z $L_{KZ}$.

Cílem tohoto kroku je z množiny kolmic $KZ$ vytvořit úsek $P$, který je složený z levého břehu $T_l$ a pravého břehu $T_r$ vodního toku $T$. Rekonstrukce úseku $P$ je možné dosáhnout pomocí bodů $q_r$, $q_l$ jednotlivých kolmic $k_i$ z množiny $KZ$ a bodů vodního toku $t_l$, $t_r$.

Celou rekonstrukci úseku $P$ je možné rozdělit do několika fází:

- Nejprve je nutné nalézt všechny body kolmic $Q_r$, $Q_l$ ležící na pravém břehu $T_r$ a levém břehu $T_l$.
- Pro rekonstrukci pravého břehu $P_r$ musí být nalezen počáteční bod (po směru vodního toku) $q_{r,p}$ a koncový bod $q_{r,k}$ z množiny bodů $Q_r$.
- Po nalezení bodů $q_{r,p}$, $q_{r,k}$ dochází k hledání bodů $T_r(P)$. $T_r(P) \in T_r$ a nachází se mezi body $q_{r,p}$, $q_{r,k}$.

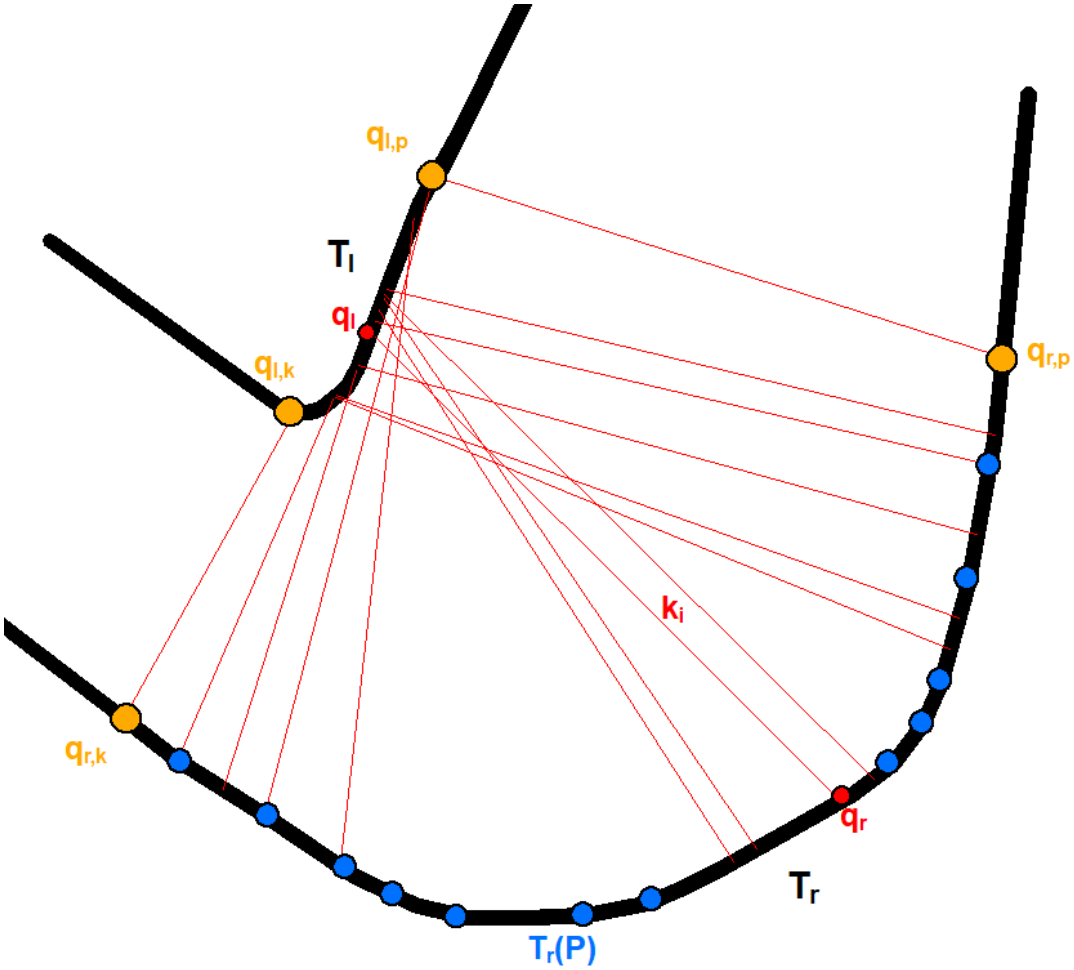
- Pro nalezení bodů $T_r(P)$ je nutné postupovat po pravé břehovce vodního toku od bodu $q_{r,p}$ až k bodu $q_{r,k}$.
- Sjednocením $q_{r,p}$, $T_r(P)$ a $q_{r,k}$ vznikne břeh $P_r$

$$P_r = q_{r,p} \cup T_r(P) \cup q_{r,k}\,, \tag{36}$$

zachovaného úseku $P$. Identický postup je uplatněn i pro levý břeh $P_l$

$$P_l = q_{l,p} \cup T_l(P) \cup q_{l,k}\,, \tag{37}$$

viz Obr. 63. Obrázek znázorňuje situaci při rekonstrukci úseku vodního toku.




*Obr. 63 Znázornění rekonstrukce břehů daného úseku vodního toku.*

Vstupní parametry pseudokódu pro rekonstrukci úseku vodního toku jsou: množina kolmic reprezentující úsek určený k zachování $KZ$ a vodní tok $T$. Pseudokód vypadá následovně:

$RekonstrukceÚsekuVodníhoToku(KZ, T)$

1: *Inicializace úseku* $P = \{\}$, *bodů kolmic* $Q_r = \{\}$ *a* $Q_l = \{\}$

2: *Pro každou kolmici* $k$ *z* $KZ$:

3: *Přidat bod kolmice k ležící na pravém břehu vodního toku do* $Q_r$

4: *Přidat bod kolmice k ležící na levém břehu vodního toku do* $Q_l$

5: $q_{r,p} =$ *počáteční bod ve směru T z* $Q_r$; $q_{r,k} =$ *koncový bod ve směru T z* $Q_r$

6: $q_{l,p} =$ *počáteční bod ve směru T z* $Q_l$; $q_{l,k} =$ *koncový bod ve směru T z* $Q_l$

7: *Inicializace bodů* $T_r(P) = \{\}$ *a* $T_l(P) = \{\}$

8: *Opakovat pro každý bod t z T (postupovat po břehovce)*:

9: *Pokud se t nachází mezi* $q_{r,p}$ *a* $q_{r,k}$

10: *Přidat t do* $T_r(P)$

11: *Pokud se t nachází mezi* $q_{l,p}$ *a* $q_{l,k}$:

12: *Přidat t do* $T_l(P)$

13: $P_r = (36)$; $P_l = (37)$

14: *Přidat* $P_r$ *a* $P_l$ *do P*

15: *return P*

*Alg. 15: Rekonstrukce úseku vodního toku.*

### 4.10.3 Spojení zrekonstruovaných úseků vodního toku

V tomto kroku dochází ke vzájemnému napojení zrekonstruovaných úseků vodního toku. Jelikož v předchozích fázích algoritmu docházelo k rozdělení a následnému zpracování jednotlivých částí vodního toku samostatně, tak v místech rozdělení vodního toku nejsou zrekonstruované úseky spojené. Úseky na sebe musí navazovat, jak již bylo zmíněné v kapitole 3.3. Návaznost úseků vodního toku vyjadřuje kartografické pravidlo P6.

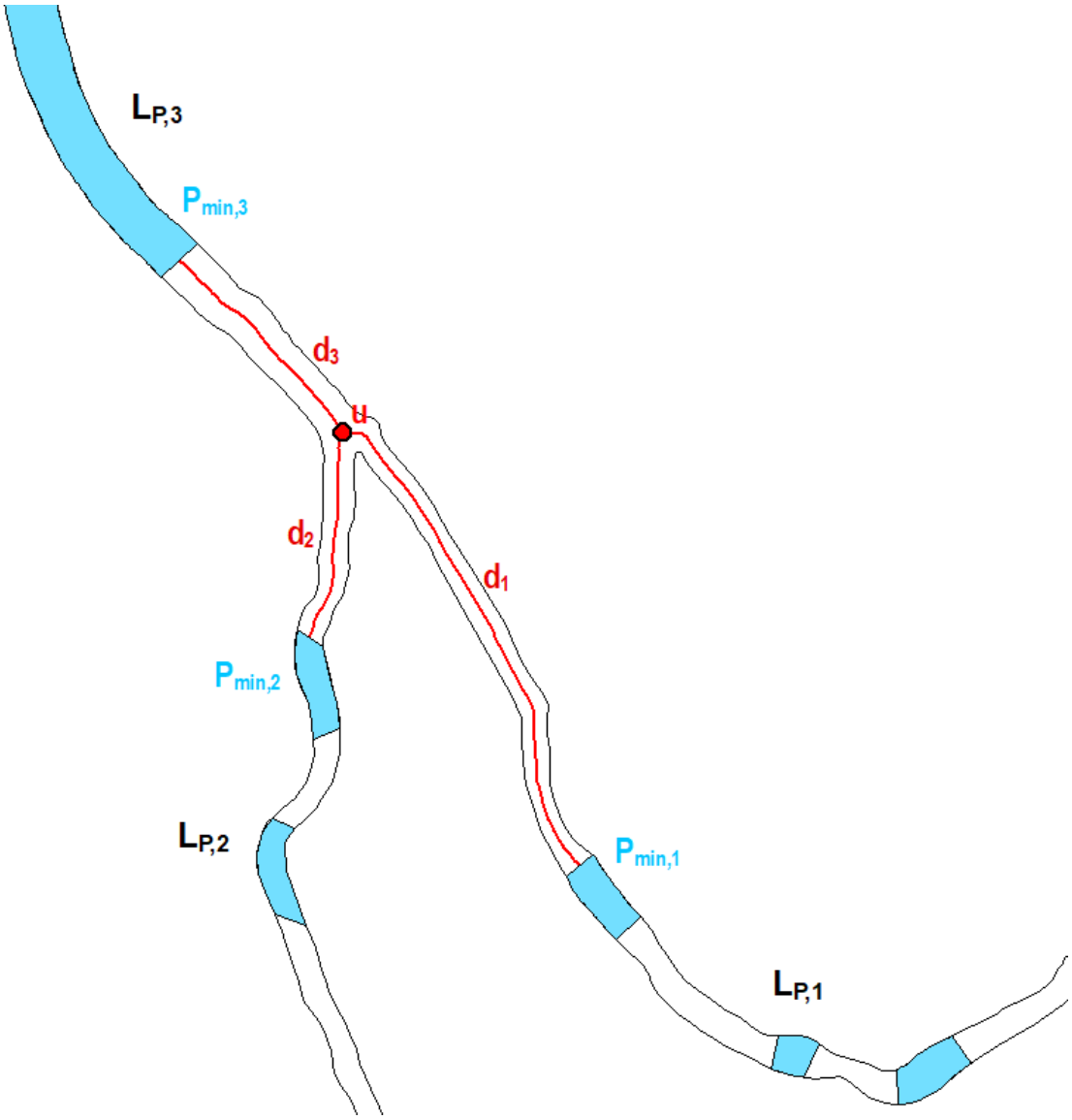
Místa rozdělení vodního toku, kde je nutné provést spojení zrekonstruovaných polygonů, jsou místa, kde se nachází uzel. Pro každý uzel *u* ve skeletonu, je nejprve nutné provést kontrolu, zdali je vůbec možné spojit zrekonstruované úseky.

Při kontrole dochází nejdříve k dohledání všech tří sousedících částí vodního toku, tzn. jsou dohledány sousední skupiny vnitřních segmentů $s_1'$, $s_2'$ a $s_3'$. Každá tato skupina obsahuje uzel *u*. Skupiny reprezentují části vodního toku, pro které existuje množina zrekonstruovaných úseků $L_P$. Procesu spojení se účastní pouze úsek $P_{min}$, který je uzlu *u* nejblíže ze všech úseků *P* z množiny $L_P$. Tato situace je znázorněna na Obr. 64.

Pokud platí že,

$$d(p_{min}, u, s) > d_{max}\,, \tag{38}$$

kde $p_{min}$ je nejbližší bod uzlu *u* z $P_{min}$, tak úsek $P_{min}$ nebude použit v procesu spojení, jelikož se nachází daleko od místa rozdělení.




*Obr. 64 Kontrola spojení zrekonstruovaných úseků v místě rozdělení vodního toku.*

Při volbě hodnoty $d_{max}$ by měla být brána v úvahu šířka vodního toku. Čím širší vodní tok, tím větší hodnota $d_{max}$ by měla být zvolena. V důsledku redukce kolmic v kapitole 4.9 došlo k vytvoření imaginární obalové zóny okolo uzlu $u$, ve které se nenachází žádný zrekonstruovaný úsek. Tento fakt je nutné brát v úvahu při volbě hodnoty $d_{max}$.

Po provedení kontroly v daném uzlu $u$, mohou nastat tři situace.

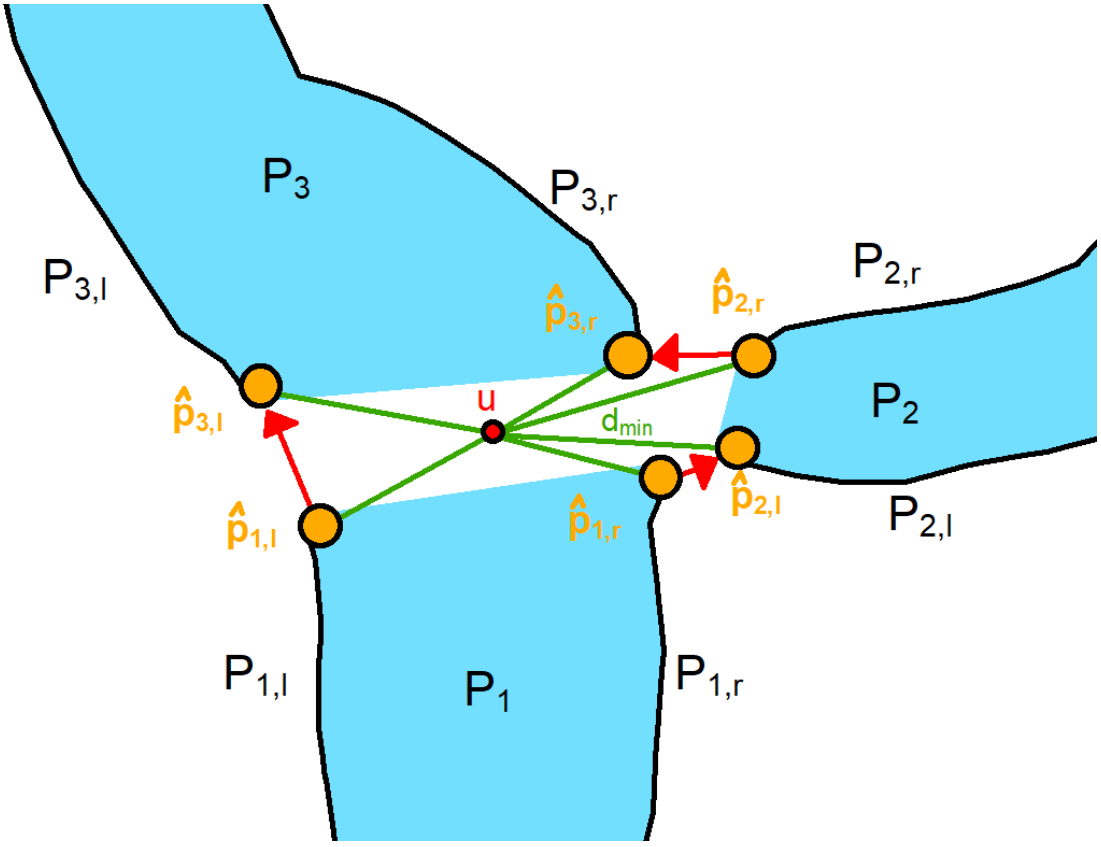
- Do vzdálenosti $d_{max}$ se nachází pouze jeden nebo žádný zrekonstruovaný úsek $P$, v takovém případě se proces spojení nekoná.
- Do vzdálenosti $d_{max}$ se nachází dva zrekonstruované úseky $P_1$, $P_2$.
- Do vzdálenosti $d_{max}$ se nachází tři zrekonstruované úseky $P_1$, $P_2$ a $P_3$.

Každý úsek $P$ je tvořen levým břehem $P_l$ a pravým břehem $P_r$. Pro každý břeh je tedy možné nalézt spojovací bod $\hat{p}$, který je nejblíže uzlu $u$

$$d(\hat{p}_r, u) = \min_{\forall\, p \in P_r} \{d(p, u)\}\,, \tag{39}$$

$$d(\hat{p}_l, u) = \min_{\forall\, p \in P_l} \{d(p, u)\}\,. \tag{40}$$

Pokud dochází ke spojení úseků $P_1$, $P_2$ a $P_3$, tak je možné dohledat spojovací body $\hat{p}_{r,1}$, $\hat{p}_{l,1}$, $\hat{p}_{r,2}$, $\hat{p}_{l,2}$, $\hat{p}_{r,3}$, $\hat{p}_{l,3}$ pro všechny břehy tvořící úseky $P_1$, $P_2$ a $P_3$. Po nalezení spojovacích bodů dochází ke sjednocení jednotlivých břehů, viz Obr. 65.




*Obr. 65 Znázornění procesu spojení tří úseků $P_1$, $P_2$ a $P_3$.*

Nový úsek $P$ vznikající sjednocením dílčích segmentů (břehů), může obsahovat jak levé, tak pravé segmenty. Úsek $P$ se nyní skládá ze tří segmentů $P_{S,1}$, $P_{S,2}$, $P_{S,3}$

$$P_{S,1} = P_{1,l} \cup P_{3,l}\,, \tag{41}$$

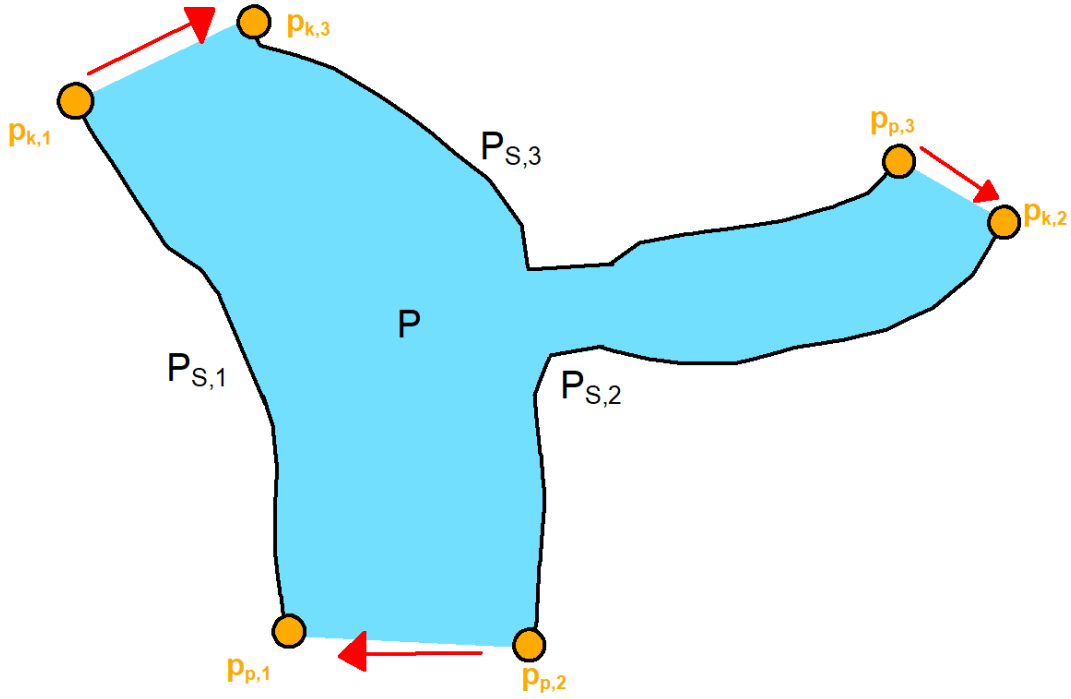
$$P_{S,2} = P_{1,r} \cup P_{2,l}\,, \tag{42}$$

$$P_{S,3} = P_{3,r} \cup P_{2,r}\,. \tag{43}$$

Pokud by byl úsek $P$ dále spojován s dalšími úseky, počet segmentů se ještě zvýší. Při spojení tří úseků, je počet segmentů výsledného úseku vždy o 3 menší než celkový počet segmentů spojovaných úseků.

Pokud již pro úsek $P$ nedochází k dalším spojováním, tak je nutné úsek uzavřít a vytvořit finální polygon. Vytvoření finálního polygonu je možné provést pomocí počátečního bodu $p_p$ a koncového bodu $p_k$ jednotlivých segmentů $P_S$. Jednotlivé počáteční a koncové body je nutné spojit mezi sebou a vytvořit tak výsledný polygon $P$, viz Obr. 66

$$P = P_{S,1} \cup P_{S,2} \cup P_{S,3} . \tag{44}$$




*Obr. 66 Znázornění procesu spojení tří břehů $P_{S,1}$, $P_{S,2}$, $P_{S,3}$ a vytvoření finálního polygonu.*

Při spojení dvou úseků $P_1$, $P_2$ je celá situace zjednodušena, jelikož není nutné uvažovat úsek $P_3$. Celkový proces je tedy identický.

Pro účely diplomové práce a zpracovávané části vodního toku „*prvni_cast*“, „*druha_cast*“ a „*treti_cast*“ (názvy zpracovávaných částí vodního toku) byla zvolena hodnota $d_{max}$ = 50 m, pro „*ctvrta_cast*“ byla zvolena hodnota $d_{max}$ = 60 m a pro „*pata_cast*“ byla zvolena hodnota $d_{max}$ = 200 m. Hodnoty byly zvoleny na základě testování, jelikož dosahovaly dobrých výsledků.

Vstupní parametry pseudokódu pro spojení zrekonstruovaných úseků jsou: všechny uzly $U$, skupiny vnitřních segmentů $S'$ (bez výběžků) a všechny zrekonstruované úseky celého vodního toku $L_L(P)$. Pseudokód vypadá následovně:

$SpojeníZrekonstruovanýchÚseků(U, S', L_L(P))$

1: $Inicializace\ spojených$ úseků $PS = \{\}, finálních$ úseků $PF = \{\}$
2: $Opakovat\ pro\ všechny\ uzly\ u\ z\ U$:
3: $S'_u = skupiny\ obsahující\ u\ z\ S'$
4: $Inicializace\ nejbližších$ úseků $L(P_{\min}) = \{\}$
5: $Opakovat\ pro\ každou\ skupinu\ s'\ z\ S'_u$:
6: $L_P = úseky\ ze\ stejné$ části $vodního\ toku\ jako\ s'\ z\ L_L(P)$
7: $P_{min} = nejbližší$ úsek $k\ uzlu\ u\ z\ L_P$
8: $Přidat\ P_{min}\ do\ L(P_{min})$
9: $Opakovat\ pro\ každý$ úsek $P_{min}\ z\ L(P_{min})$:
10: $p_{min} = nejbližší\ bod\ k\ uzlu\ u\ z\ P_{min}$
11: $Pokud$ (38):
12: $Odstranit\ P_{min}\ z\ L(P_{min})$
13: $Pokud\ L(P_{min}).size() < 2$:
14: $continue$
15: $Jinak$:
16: $Inicializace\ spojovacích\ bodů\ L_{\hat{p}} = \{\}$
17: $Pro\ každý$ úsek $P_{min}\ z\ L(P_{min})$:
18: $P_l, P_r = břehy\ P_{min}$
19: $\hat{p}_l = nejbližší\ bod\ k\ uzlu\ u\ z\ P_l$
20: $\hat{p}_r = nejbližší\ bod\ k\ uzlu\ u\ z\ P_r$
21: $Přidat\ \hat{p}_l\ a\ \hat{p}_r\ do\ L_{\hat{p}}$
22: $P = spojit\ břehy\ všech\ P_{min}\ z\ L(P_{min})\ na\ základě\ bodů\ z\ L_{\hat{p}}$
23: $Přidat\ P\ do\ PS$
24: $Pro\ každý\ spojený$ úsek $P\ z\ PS$:
25: $n = počet\ segmentů\ P$
26: $P = spojit\ segmenty\ P_{S,1}, P_{S,2}, \dots, P_{S,n}\ z\ P$
27: $Přidat\ P\ do\ PF$
28: $return\ PF$

*Alg. 16: Proces spojení zrekonstruovaných úseků.*

# 4.11 Aplikace doplňkových kritérií

Poslední krok algoritmu představuje výběr z kartografického pohledu důležitých úseků vodního toku, které budou ve finální kartografické reprezentaci reprezentovány břehovkami. O výběru rozhodují zvolená doplňková kritéria, která jsou aplikována na zachované spojené úseky vodního toku. Aplikace kritérií by měla řešit problém parametru šířky, jako samostatného kritéria diskutovaného v kapitole 3.

Zvolená doplňková kritéria jsou aplikována na jednotlivé rekonstruované polygony, respektive zachované úseky vodního toku podle samotného šířkového kritéria. Pokud daný polygon nevyhovuje soustavě doplňkových kritérií, musí být odstraněn. Takový polygon by totiž neměl být zachován, ačkoliv je širší než prahová hodnota šířky. Stanovená doplňková kritéria by měla reprezentovat lidskou složku při rozhodování, zdali je zachování polygonu kartograficky správné či ne.

Doplňková kritéria by teda měla hodnotit podobné vlastnosti úseků vodního toku, které by při rozhodování hodnotil kartograf. V této práci byly jako důležité vlastnosti zvoleny: délka úseku vodního toku a výraznost daného úseku vodního toku.

Na základě zvolených vlastností pro hodnocení byla vybrána tři doplňková kritéria. Vybraná doplňková kritéria byla navrhnuta v kapitole 3.2.1. Tato kritéria jsou:

- poměr délky a průměrné šířky polygonu $\alpha$ (1),
- poměr průměrné šířky polygonu a prahové hodnoty šířky $\delta$ (4),
- poměr maximální šířky polygonu a okrajové šířky polygonu $\varepsilon$ (5).

Kritérium (1) bylo vybráno, jelikož hodnotí délku daného úseku. Kritérium je aplikováno na úseky jako první a zajistí, že další kritéria jsou aplikována jen na zbylé úseky. Pokud platí, že

$$\alpha < \alpha_{min}\,, \tag{45}$$

kde $\alpha_{min}$ je prahová hodnota, tak je polygon odstraněn, jelikož je vůči svojí šířce krátký.

Kritéria (4), (5) hodnotí výraznost úseku vodního toku. Kritérium (4) zajišťuje, že daný úsek je výrazný vůči rozhodovací prahové hodnotě šířky. Kritérium hodnotí výraznost úseku z globálního hlediska. Kritérium (5) zajišťuje, že daný úsek je výrazný ve svém okolí. Kritérium tedy hodnotí výraznost úseku z lokálního pohledu. Obě kritéria jsou aplikována na daný úsek společně. Pokud platí, že

$$\delta < \delta_{min} \wedge \varepsilon < \varepsilon_{min}\,, \tag{46}$$

kde $\delta_{min}$ a $\varepsilon_{min}$ jsou prahové hodnoty, tak je polygon odstraněn, jelikož není výrazný lokálně ani globálně.

Pro účely diplomové práce a zpracovávaný vodní tok byla zvolena hodnota $\alpha_{min}$ = 3.5, $\delta_{min}$ = 1.5 a $\varepsilon_{min}$ = 2.1. Hodnoty byly zvoleny na základě testování, jelikož dosahovaly dobrých výsledků.

Vstupní parametr pseudokódu pro aplikaci doplňkových kritérií je: finální zachované úseky vodního toku $PF$. Pseudokód vypadá následovně:

$AplikaceKritérií(PF)$

1: $Opakovat\ pro\ každý$ úsek $P\ z\ PF$:

2: $Pokud$ (45):

3: $Odstranit\ P\ z\ PF; continue$

4: $Pokud$ (46) :

5: $Odstranit\ P\ z\ PF$

6: $return\ PF$

*Alg. 17: Aplikace zvolených doplňkových kritérií na zachované úseky vodního toku.*

# 5.Výsledky

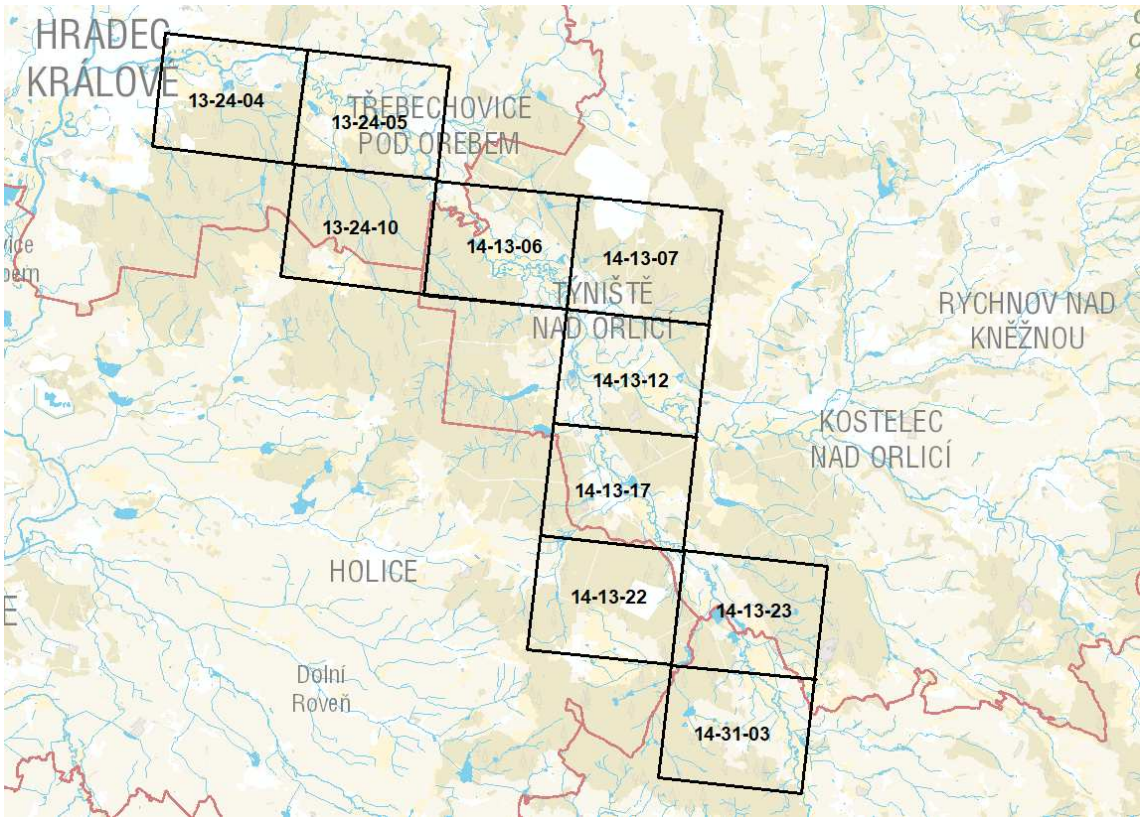
Tato kapitola představuje výsledky dosažené pomocí vytvořeného generalizačního algoritmu. Úvodní část se věnuje popisu dat využitých pro testování generalizačního algoritmu. Dále je zde uveden výstupní formát dat představujících výstupy generalizačního algoritmu. V závěru kapitoly jsou zhodnoceny dosažené výsledky a jsou zmíněna slabá místa vytvořeného generalizačního algoritmu.

Výsledky jsou v práci prezentovány ve formě tří testů:

1) **Vliv doplňkových kritérií (viz kapitolu 5.3.1)**
   Výsledky prezentované v této kapitole ukazují vliv doplňkových kritérií (viz 4.11) na výsledky generalizačního algoritmu.
2) **Vliv hodnoty $w_{max}$ (viz kapitolu 5.3.2)**
   Kapitola je zaměřena na několik, z kartografického hlediska problémových situací (míst) na vodním toku, které jsou zobrazeny pro konkrétní hodnoty $w_{max}$.
3) **Porovnání výsledků s vybraným mapovým portálem (viz kapitolu 5.4)**
   Poslední test zahrnuje porovnání výsledků algoritmu s digitálními mapami vybraného webového mapového portálu.

## 5.1 Vstupní data

Použitá data jsou tvořena vrstvou „VodniPlocha“ ze ZABAGED (Základní báze geografických dat České republiky) v rozsahu deseti mapových listů, které poskytl Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK). Geograficky lze území vymezit od vesnice Chloumek v okresu Ústí nad Orlicí až po Hradec Králové. Data zahrnují řeku Tichou Orlici od 22. říčního kilometru až po soutok s Divokou Orlicí i řeku Orlice, která pokračuje od soutoku Divoké a Tiché Orlice až do 3. říčního kilometru. Tato oblast byla vybrána z důvodu velkého výskytu míst s rozdílnou šířkou, a tudíž je vhodným územím pro testování. Data jsou uložena ve formátu shapefile a je možné je najít na přiloženém CD ve složce „data“.




*Obr. 67 Mapové listy zájmového území.*

Poskytnutá data bylo nutné manuálně editovat, jelikož obsahovala i vodní plochy, které nijak nesouvisely s vodním tokem. Tyto plochy tedy byly ze vstupních dat odstraněny. Vodní tok se původně skládal z několika různě velkých polygonů, které měly mezi sebou malé mezery. Bylo tedy nutné tyto topologické chyby odstranit a spojit jednotlivé polygony v jeden polygon. Na přiloženém CD je možné najít originální poskytnutá dat v „data/original.shp“, upravená data (jeden polygon) v „data/poly.shp“ a jednotlivé části vodního toku v:

- „data/prvni_cast.shp“,
- „data/druha_cast.shp“,
- „data/treti_cast.shp“,
- „data/ctvrta_cast.shp“,
- „data/pata_cast.shp“.

## 5.2 Formát výsledků

Algoritmus exportuje výsledky v textové podobě do tří textových souborů. První soubor obsahuje výsledky kartografických generalizačních operací pro polygonová data, druhý

pro liniová data a třetí název dané části vodního toku. Výsledky pro polygonová data reprezentují části vodního toku se zachovanou reprezentací břehovkami a výsledky pro liniová data liniovou reprezentaci vodního toku, která by nahradila polygon vodního toku v případě generalizace. Textové soubory obsahují souřadnice lomových bodů jednotlivých polygonů či linií.

Pro vizualizaci výsledků byl použit script „Source/script.py“ vytvořený v jazyce Python 2.7, který využívá knihovnu ArcPy. Skript převede souřadnice z textové podoby do odpovídající třídy prvků, kterou následně uloží do ESRI geodatabáze. Veškeré výsledky jsou tedy uložené v ESRI geodatabázi jako jednotlivé třídy prvků. Výsledky je možné zobrazit v aplikaci ArcMap, která je součástí software ArcGIS Desktop. Geodatabázi obsahující výsledky je možné najít na přiloženém CD v „výsledky/results.gdb“. Všechny třídy prvků jsou pojmenovány v následujícím tvaru: „část řeky“_“prahová hodnota šířky“_“kritéria“_“id“. Například označení „ctvrtacast_25_bez_0“ je čtvrtá část řeky s prahovou hodnotou šířky 25 m (vše pod 25 m by mělo být generalizováno) vytvořeno bez aplikace doplňkových kritérií. Příklad označení třídy prvků s aplikovanými doplňkovými kritérii je „prvnicast_18_kriteria_0“. Pokud se jedná o liniovou třídu prvků, tak identifikátor je zakončen „_lines“.

**Poznámka.** Výsledky pro liniová data prochází místy se zachovanou reprezentací břehovkami (linie vede skrze polygon), ačkoliv by těmito místy v konečné kartografické reprezentaci neměly procházet (na tomto místě je vodní tok reprezentovaný polygonem). Tento případ nebyl v rámci navrhovaného algoritmu řešen. Výsledky byly importované do prostředí ESRI geodatabáze a je tedy možné je dále zpracovávat a upravovat v aplikaci ArcMap. Například použití funkce *Erase* by odstranilo linie procházející polygony zachovaných úseků.

## 5.3 Vstupní parametry algoritmu

V kapitole 4 bylo v průběhu konstrukce zavedeno mnoho parametrů. Pro naprostou většina z nich byly hledány optimální hodnoty pomocí testování. Vzhledem k faktu, že testování proběhlo nad jedním vodním tokem s určitou geometrickou charakteristikou (šířka, klikatost, ...) považujme jejich hodnoty pro toto testování za konstantní. Jediný parametr, který se zde bude testovat je prahová šířka $w_{max}$, která je vázána na měřítkové číslo M mapy. Zvolme minimální šířku vodního toku v mapě reprezentovaného

břehovkami 0.4 mm (hodnota kdy nedochází ke slévání břehovek v jednu linii). Prahovou hodnotu šířky je možné určit jako

$$w_{max} = 0.4 \cdot M\,. \tag{47}$$

Z důvodu velké výpočetní náročnosti při konstrukci straight skeletonu došlo v rámci předzpracování dat k rozdělení vodního toku do pěti samostatných částí. Tento krok výrazně snížil čas pro vytvoření straight skeletonu, což umožnilo znatelně jednodušší a rychlejší testování. Jednotlivé části vodního toku se přes sebe překrývají v řádech metrů, aby bylo možné získat výsledky i z oblastí, kde dochází k vytvoření skeletonu s nevhodnými geometrickými vlastnostmi, tzn. v místech přechodu jednotlivých částí vodního toku. Tento problém byl popsán v kapitole 4.8.

Vodní tok se rozšiřuje od pramene k ústí. První část vodního toku (blíže k prameni) dosahuje v nejširších místech cca 30 m, zatímco poslední (pátá) část dosahuje více než 50 m. Z tohoto důvodu byl parametr prahové hodnoty šířky $w_{max}$ volen různě s ohledem na šířku dané části vodního toku. Prahová hodnota šířky $w_{max}$ určuje, zdali je daná část vodního toku určena ke generalizaci, či nikoliv. Pro každou část vodního toku bylo vytvořeno několik výsledků s různě nastavenou šířkou $w_{max}$. Šířka $w_{max}$ byla volena tak, aby co nejlépe vystihovala rozdíl mezi výsledkem bez aplikace doplňkových kritérií a výsledkem s aplikovanými doplňkovými kritérii (viz kapitolu 4.11). Výsledky pro každou část vodního toku začínají s nízkou hodnotou $w_{max}$ (nejvíce vodního toku reprezentováno břehovkami) a postupně přecházejí až do bodu, kdy je hodnota $w_{max}$ natolik velká, že v dané části vodního toku nebude zachovaná reprezentace břehovkami téměř pro žádný úsek.

Veškeré prezentované výsledky nejsou nijak dále generalizovány či upravovány, jelikož v této diplomové práci není další kartografické zpracování výsledků řešeno. Je nutné si tedy uvědomit, že výsledné polygonové úseky by bylo nutné kartograficky resymbolizovat tak, aby působily na vodním toku přirozeněji (plynulý přechod mezi polygonovou reprezentací a liniovou reprezentací vodního toku). V prezentovaných výsledkách je šířka liniových výsledků upravena vzhledem k aktuální šířce vodního toku na prezentovaném úseku.

Jak již bylo psáno výše, hodnota $w_{max}$ byla volena na základě šířky daného úseku vodního toku od hodnoty, při které nedojde k žádné nebo pouze velmi malé generalizaci, až po hodnotu, která představuje generalizaci celého úseku vodního toku.

Všechny testované hodnoty pro každou část vodního toku je možné najít v Tab. 2 v kapitole 5.5.

### 5.3.1 Vliv doplňkových kritérií

Výsledky prezentované v této kapitole ukazují vliv doplňkových kritérií na výslednou kartografickou reprezentaci vodního toku. Vybraná doplňková kritéria byla popsána v kapitole 4.11. Jsou porovnávána vůči stanoveným prahovým hodnotám poměrů, které se pro zpracovávaný vodní tok nemění. Vliv doplňkových kritérií se mění jen v závislosti na hodnotě $w_{max}$. Vybraná doplňková kritéria a jejich prahové hodnoty jsou přehledně zobrazeny v Tab. 1.

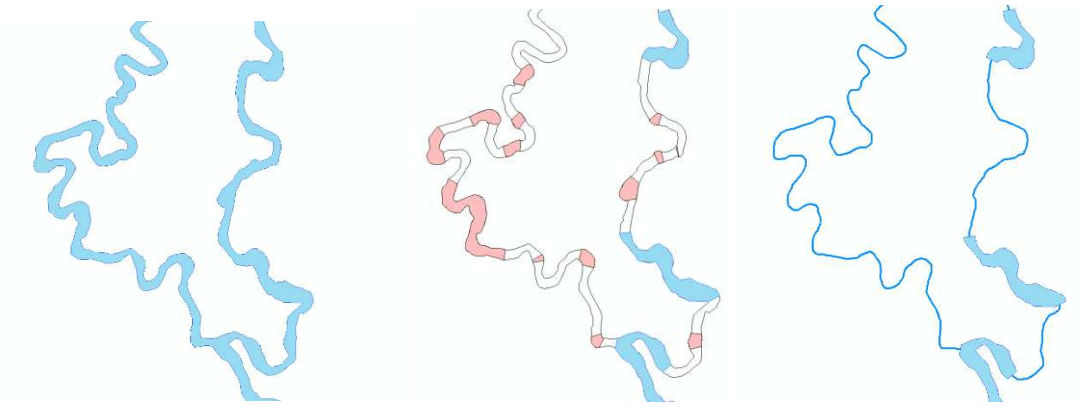
| Kritérium | Označení | Prahová hodnota |
|---|---|---|
| poměr délky a průměrné šířky polygonu | $\alpha$ | 3.5 |
| poměr průměrné šířky polygonu a prahové hodnoty šířky | $\delta$ | 1.5 |
| poměr maximální šířky polygonu a okrajové šířky polygonu | $\varepsilon$ | 2.1 |

*Tab. 1 Zvolená doplňková kritéria a jejich prahové hodnoty.*

Doplňková kritéria rozhodují, zdali daný úsek vodního toku (identifikovaný na základě hodnoty $w_{max}$) generalizovat či zachovat jeho reprezentaci břehovkami. Doplňková kritéria se snaží do rozhodovacího procesu, při kterém je ověřováno, zda bude úsek vodního toku generalizován, vnést další parametry. Jinak řečeno, nejprve jsou identifikovány úseky vhodné ke generalizaci s využitím $w_{max}$, poté jsou využita doplňková kritéria.

Hodnoty $w_{max}$ v této kapitole byly vybrány tak, aby dobře znázornily rozdíl mezi výsledky dosaženými bez aplikace doplňkových kritérií a s následnou aplikací doplňkových kritérií. Ukázka vlivu hodnoty $w_{max}$ na jednom konkrétním místě vodního toku se nachází dále v kapitole 5.3.2.

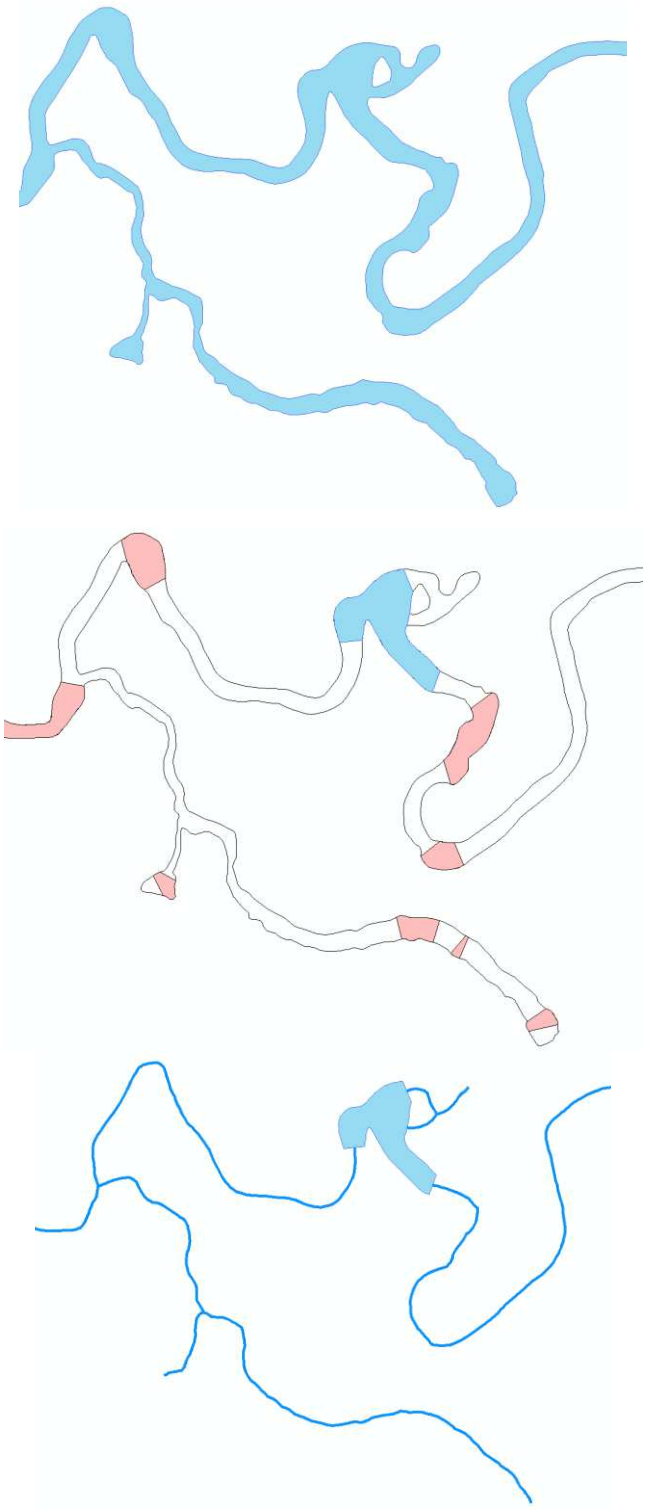
Pro každý následující obrázek v této kapitole platí, že v levé části je zobrazen původní stav vodního toku, uprostřed jsou zobrazeny úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně, po aplikaci doplňkových kritérií jsou odstraněny) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře), v pravé části je zobrazena finální kartografická reprezentace. Toto zobrazení je pro některé obrázky změněno (postup ze shora dolů).



*Obr. 68 Část první části vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 12 m, vlevo původní stav, uprostřed úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře), vpravo finální kartografická reprezentace.*

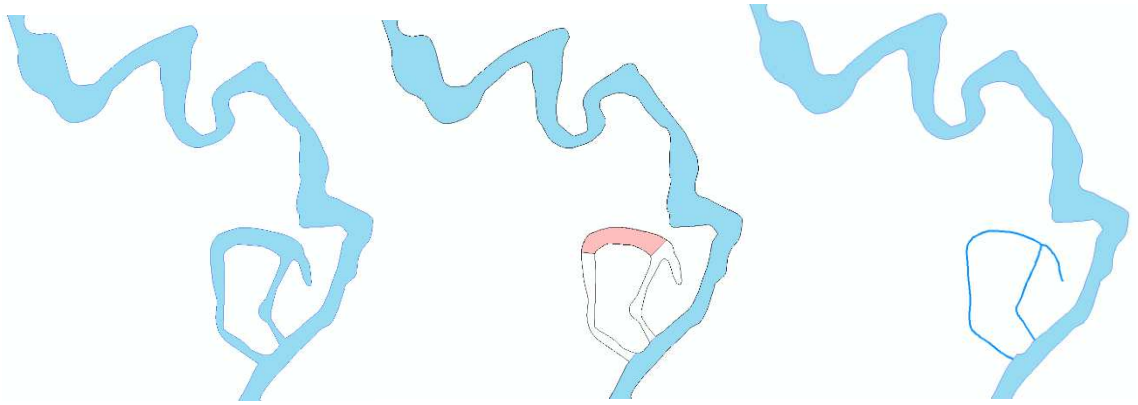
Na Obr. 68 je možné vidět část první části vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 12 m. Z červených úseků je zřejmé, že takováto generalizace by byla kartograficky nevhodná. Střídání úseků reprezentovaných břehovkami a úseků reprezentovaných liniemi působí dojmem soustavy jezer, rybníků či nádrží, které jsou propojeny krátkými kanály. V tomto případě tomu samozřejmě tak není. Doplňková kritéria tyto úseky odstraní a výsledná reprezentace vypadá mnohem lépe.

Obr. 69 zobrazuje část čtvrté části vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 25 m. Opět je možné pozorovat, že generalizace podle $w_{max}$ (červené úseky) by nebyla kartograficky správná. Některé úseky reprezentované břehovkami jsou téměř stejně široké jako jejich okolí, přesto by podle tohoto kritéria měly zůstat v generalizované mapě reprezentovány právě břehovkami, ačkoliv okolní úseky by byly generalizovány, přestože mezi jejich šířkou není vizuální rozdíl.



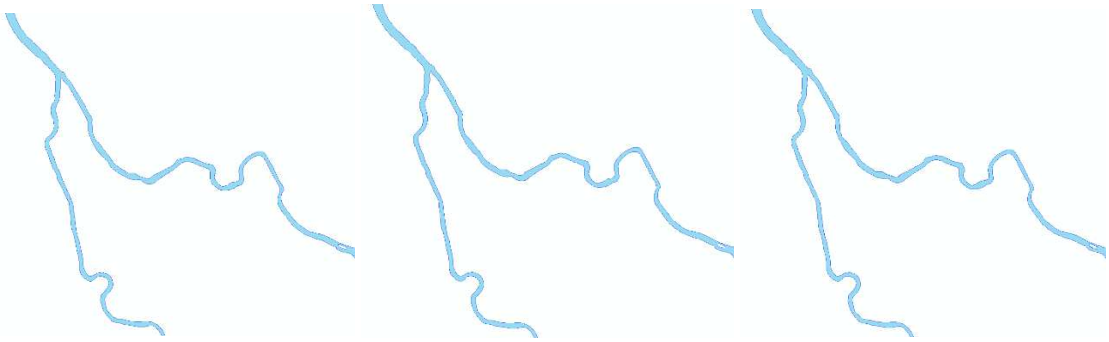
*Obr. 69 Část čtvrté části vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 25 m, nahoře původní stav, uprostřed úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře), dole finální kartografická reprezentace.*

Na Obr. 70 je zobrazena další část první části vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 12 m. V této situaci je vliv doplňkových kritérií minimální, jelikož je většina vodního toku reprezentována břehovkami.



*Obr. 70 Část první části vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 12 m, vlevo původní stav, uprostřed úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře), vpravo finální kartografická reprezentace.*

Obr. 71 zobrazuje třetí část vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 1 m. Při takto nízké hodnotě šířkového parametru by mělo dojít k reprezentaci břehovkami celé části vodního toku. Aplikace doplňkových kritérií by neměla ovlivnit kompletní reprezentaci břehovkami vodního toku. Jak je možné vidět na Obr. 71, doplňková kritéria neovlivňují reprezentaci břehovkami vodního toku v případě velmi nízké hodnoty šířkového parametru.

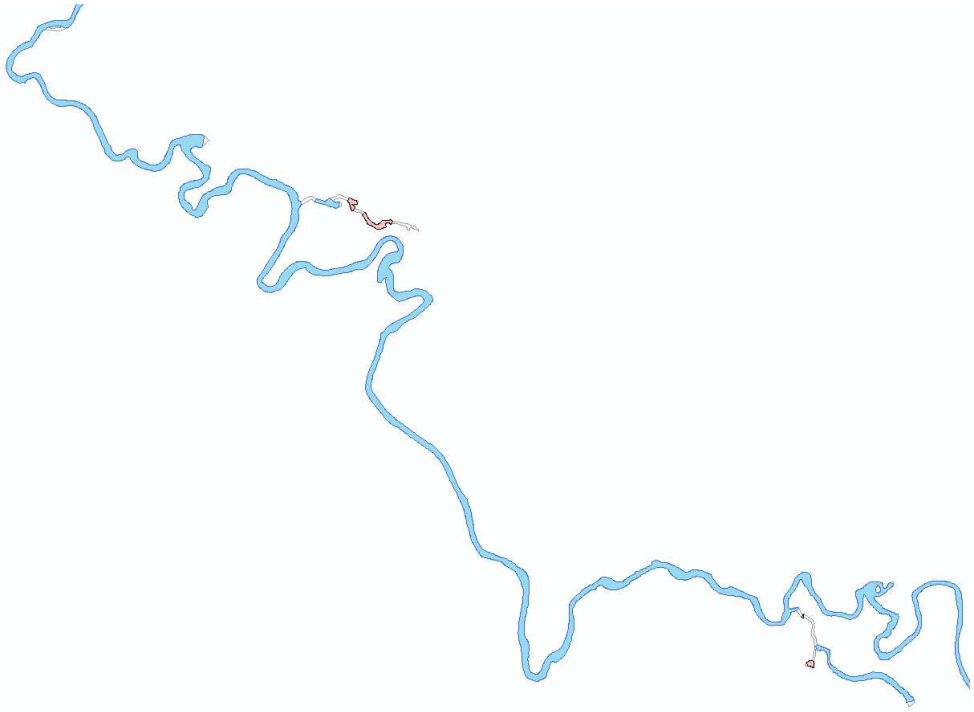


*Obr. 71 Třetí část vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 1 m, vlevo původní stav, uprostřed úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě wmax (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře), vpravo finální kartografická reprezentace.*

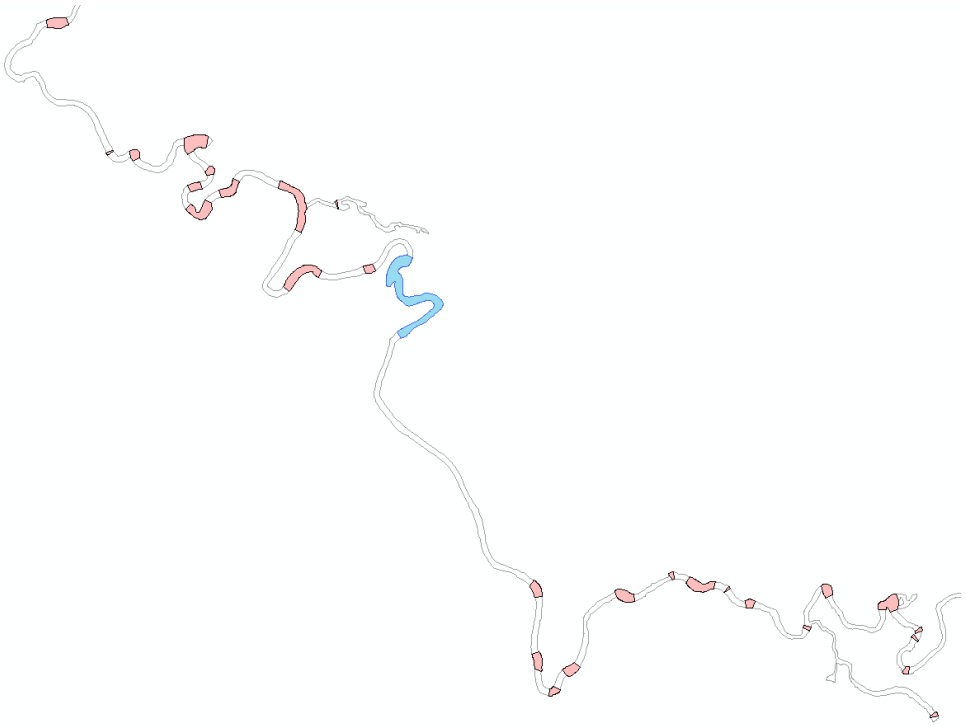
Na Obr. 72 je vidět čtvrtá část vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 15 m. Z důvodu velikosti úseku je zobrazená jen prostřední fáze procesu, tzn. červeně jsou

zobrazeny úseky, které budou smazány po aplikaci doplňkových kritérií a modře jsou zobrazeny úseky reprezentované břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií. Na obrázku je možné pozorovat reprezentaci břehovkami téměř celého vodního toku, ačkoliv se v částech reprezentovaných břehovkami vyskytují i užší úseky. Tyto úseky ale nebyly smazány, jelikož by tato akce narušila souvislost reprezentace vodního toku břehovkami.

Obr. 73 zobrazuje stejnou část vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 30 m. Na obrázku je vidět, že doplňková kritéria zachovala reprezentaci břehovkami jen pro jeden nejvýraznější úsek ze všech 34 úseků, které byly generalizovány pouze s využitím kritéria $w_{max}$.



*Obr. 72 Čtvrtá část vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 15 m, úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře).*



*Obr. 73 Čtvrtá část vodního toku s nastavenou hodnotou kritéria $w_{max}$ = 30 m, úseky se zachovanou reprezentací břehovkami na základě $w_{max}$ (červeně) a úseky se zachovanou reprezentací břehovkami po aplikaci doplňkových kritérií (modře).*

### 5.3.2 Vliv hodnoty $w_{max}$

V této kapitole jsou prezentovány výsledky generalizačního algoritmu pro konkrétní hodnoty $w_{max}$. Hodnota $w_{max}$ je prahová hodnota šířky, která rozhoduje, zdali úsek vodního toku reprezentovat břehovkami, či liniemi. S její změnou dochází ke změně počtu a velikosti úseků vodního toku, na kterých bude prováděna generalizace (počet úseků je následně upraven aplikací doplňkových kritérií).

Z celého vodního toku bylo vybráno pět z kartografického pohledu problematických situací (míst). Tato místa jsou generalizována pro tři hodnoty $w_{max}$ = 10 m, $w_{max}$ = 20 m a $w_{max}$ = 30 m. Každý obrázek je podobně jako v kapitole 5.3.1 složen ze tří situací, původní stav, úseky reprezentované břehovkami podle $w_{max}$ (červeně) a doplňkových kritérií (modře), a finální kartografická reprezentace. Zatímco v kapitole 5.3.1 byl kladen důraz na vliv doplňkových kritérií (pro různé $w_{max}$), v této kapitole je testována hodnota $w_{max}$ na konkrétním místě, aby byl znázorněn vliv tohoto parametru.

Všechny výsledky jsou zasazeny do mapy, jako podklad slouží rastrová vrstva ZABAGED poskytovaná ČÚZK. Tento topografický podklad neodpovídá „měřítku“, do kterého je daná část vodního toku generalizovaná.

**Situace 1: Ostrov a rameno**

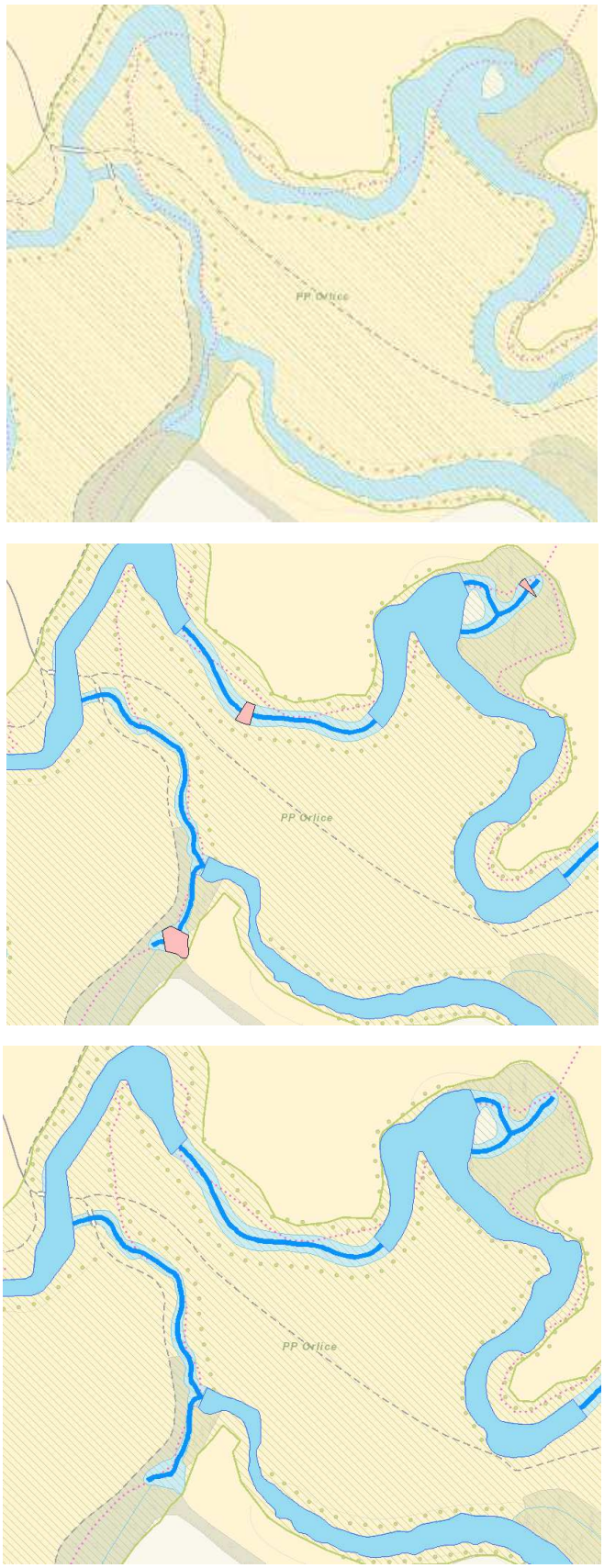
Situace znázorňuje část vodního toku, která obsahuje ostrov se značně rozdílnou šířkou ramen, které ho obklopují, a slepé rameno, které značně mění svoji šířku. Z kartografického hlediska je toto problémová situace, jelikož se zde nachází zúžení a rozšíření vodního toku. V tomto případě je nutné otestovat, zdali algoritmus vyhodnotí toto rozšíření jako podstatné a zachová zde reprezentaci břehovkami.

Pro hodnotu $w_{max}$ = 10 m (viz Obr. 74) nedošlo téměř k žádné generalizaci vodního toku. Generalizována byla jen část slepého ramene, což je z kartografického pohledu korektní. Výsledná kartografická reprezentace je tedy velmi dobrá.

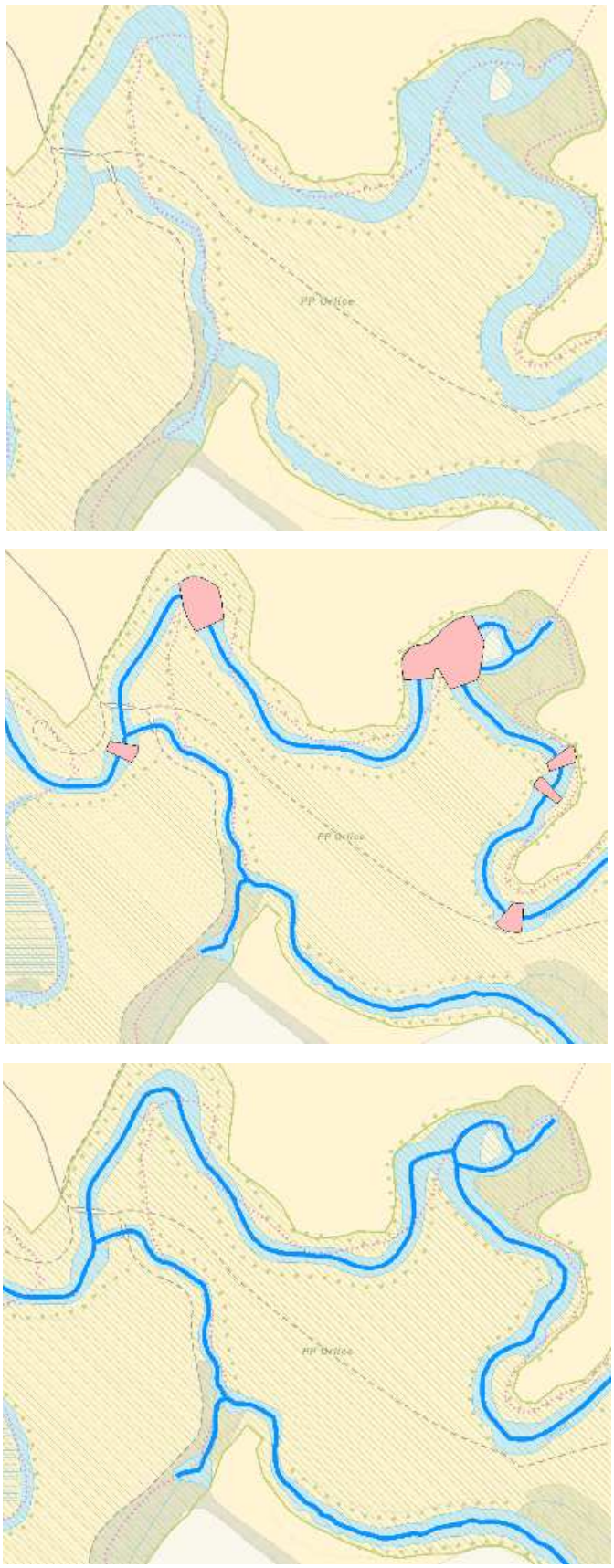
Pro hodnotu $w_{max}$ = 20 m (viz Obr. 75) došlo ke generalizaci dlouhých a úzkých úseků. Tyto výsledky nejsou moc povedené, jelikož dochází k tvorbě střídavé reprezentace břehovkami a liniemi. Tento problém je vidět na hlavním vodním toku, kde je úzký úsek natolik dlouhý, že došlo k jeho generalizaci (chybně).

Pro hodnotu $w_{max}$ = 30 m (viz Obr. 76) došlo k úplné generalizaci úseku vodního toku. Výsledná reprezentace je pro tuto hodnotu nejlepší, jelikož z kartografického pohledu není důvod zachovávat reprezentaci břehovkami krátkého rozšířeného úseku (u ostrova), který je ze všech stran obklopený podobně širokými úseky.

*Obr. 74 Ostrov a rameno $w_{max}$ = 10 m, generalizace části ramene.*




*Obr. 75 Ostrov a rameno $w_{max}$ = 20 m, střídavá reprezentace vodního toku liniemi a břehovkami.*



*Obr. 76 Ostrov a rameno $w_{max}$ = 30 m, úplná generalizace vodního toku, reprezentace linií.*

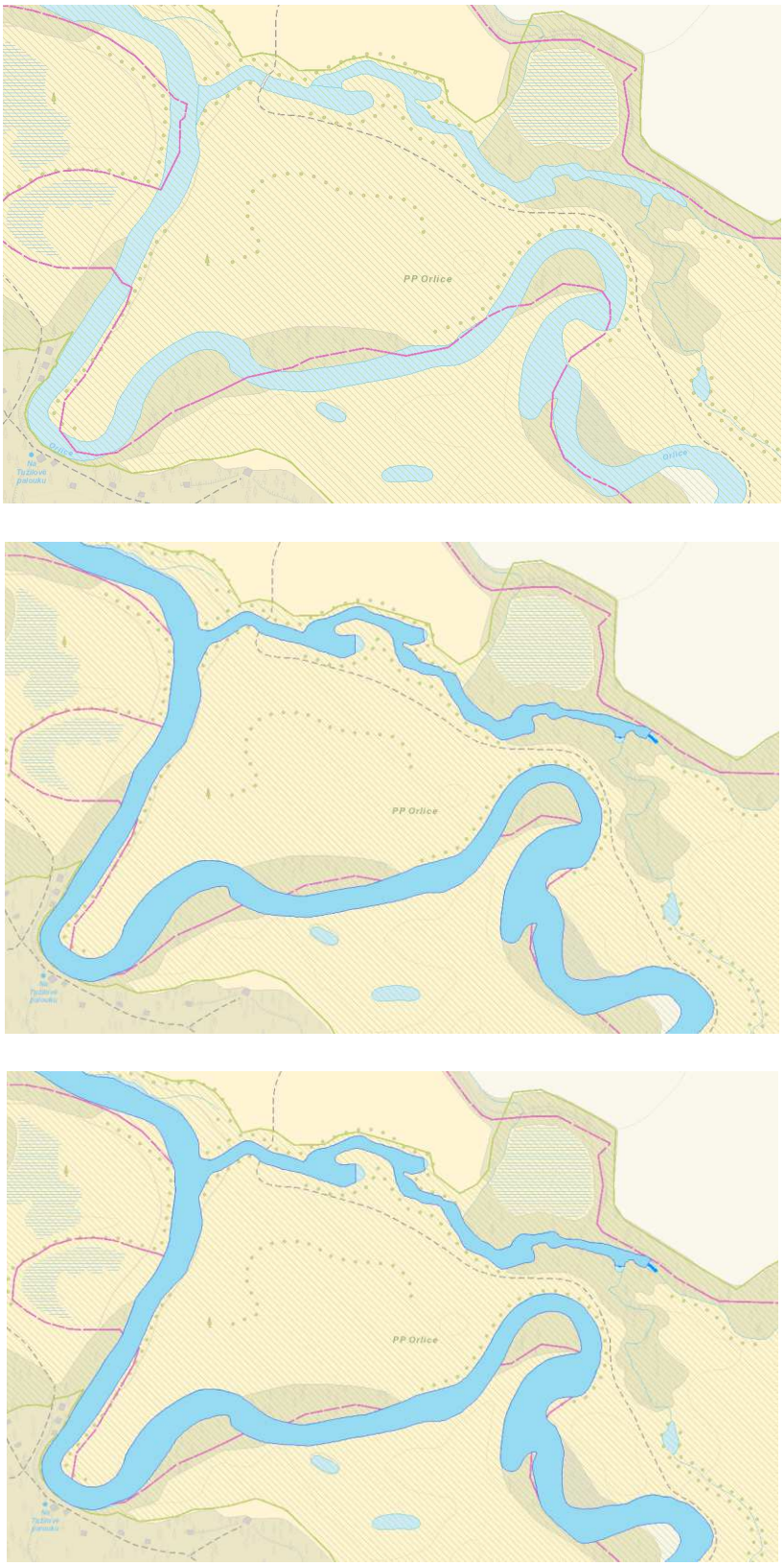
**Situace 2: Rozšíření a rameno**

Situace znázorňuje úsek vodního toku, který je zpočátku znatelně širší než na konci, kde se do něj vlévá úzké rameno. Z kartografického pohledu je rameno tohoto úseku problémové, jelikož obsahuje další malá slepá ramena s různou šířkou. Pro tuto situaci je nutné otestovat, zdali bude toto rameno generalizováno celé, popřípadě jen jeho část nebo nebude generalizováno vůbec.

Pro hodnotu $w_{max}$ = 10 m (viz Obr. 77) nedošlo téměř k žádné generalizaci vodního toku. Generalizována byla jen koncová část ramene, což je z kartografického pohledu korektní.

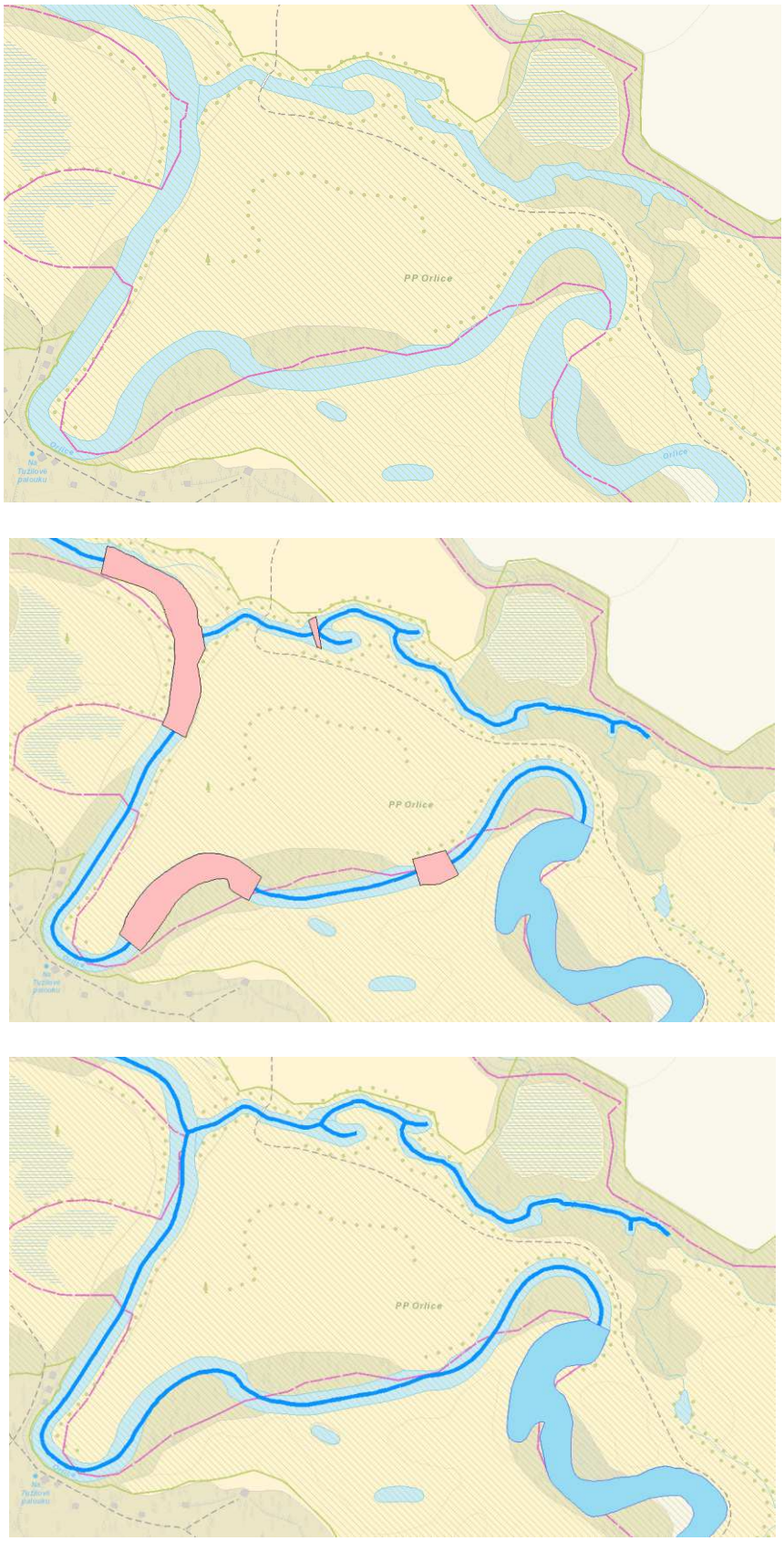
Pro hodnotu $w_{max}$ = 20 m (viz Obr. 78) došlo ke generalizaci celého ramene, což je z kartografického pohledu korektní generalizace. Hlavní tok zůstal reprezentován břehovkami. Výsledná reprezentace pro tuto hodnotu je pro tuto situaci nejlepší.

Pro hodnotu $w_{max}$ = 30 m (viz Obr. 79) došlo ke generalizaci všeho kromě nejširší počáteční části úseku vodního toku. Výsledná reprezentace je nevhodná, protože se jeví, že v místě vodního toku vznikla vodní plocha.




*Obr. 77 Rozšíření a rameno $w_{max}$ = 10 m, generalizace části ramene.*

*Obr. 78 Rozšíření a rameno $w_{max}$ = 20 m, generalizace celého ramene.*




*Obr. 79 Rozšíření a rameno $w_{max}$ = 30 m, generalizace části vodního toku, nejširší úsek vodního toku zachován (reprezentován břehovkami).*

**Situace 3: Rozšíření a ostrov**

Situace znázorňuje úsek vodního toku s velkým ostrovem a znatelným rozšířením, které se nachází ještě před ním. Ramena vedoucí kolem ostrova mají rozdílnou šířku. V tomto případě je tedy nutné otestovat, zdali dojde ke generalizaci obou ramen, jen jednoho nebo žádného. Pokud by došlo ke generalizaci obou ramen, ale úseky před ostrovem a za ostrovem by zůstaly reprezentovány břehovkami, vznikla by z kartografického pohledu nekorektní reprezentace.

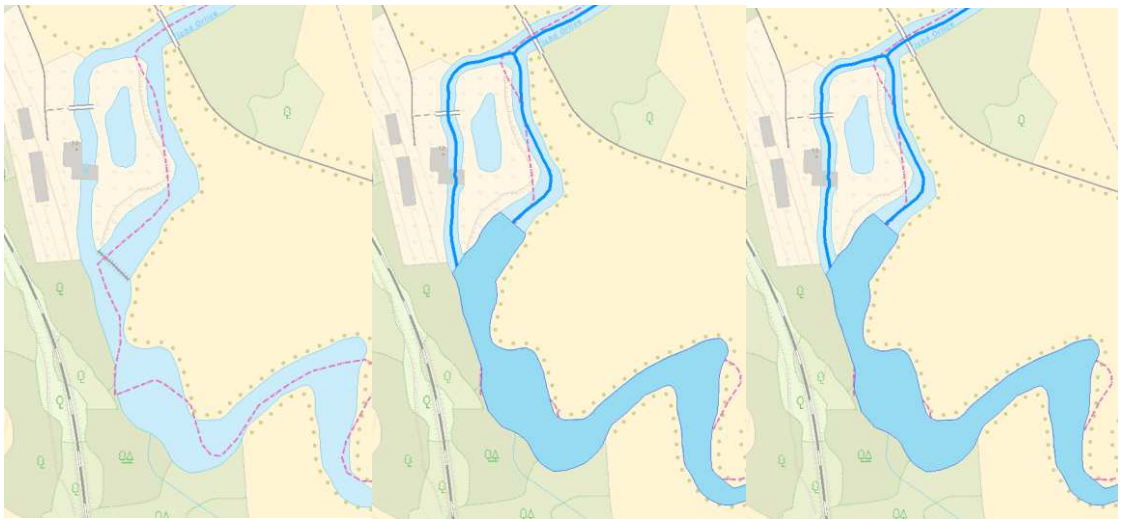
Pro hodnotu $w_{max}$ = 10 m (viz Obr. 80) došlo ke generalizaci jen jednoho (užšího) ramene. Vodní tok si tedy zachoval spojitou reprezentaci břehovkami. Výsledná kartografická reprezentace je tedy velmi dobrá.

Pro hodnotu $w_{max}$ = 20 m (viz Obr. 81) došlo ke generalizaci obou ramen a úseku za ostrovem. V tomto případě je reprezentace vodního toku korektní, jelikož úsek před ostrovem je výrazně širší než generalizované úseky a tento rozdíl by měl zůstat v mapě zachovaný.

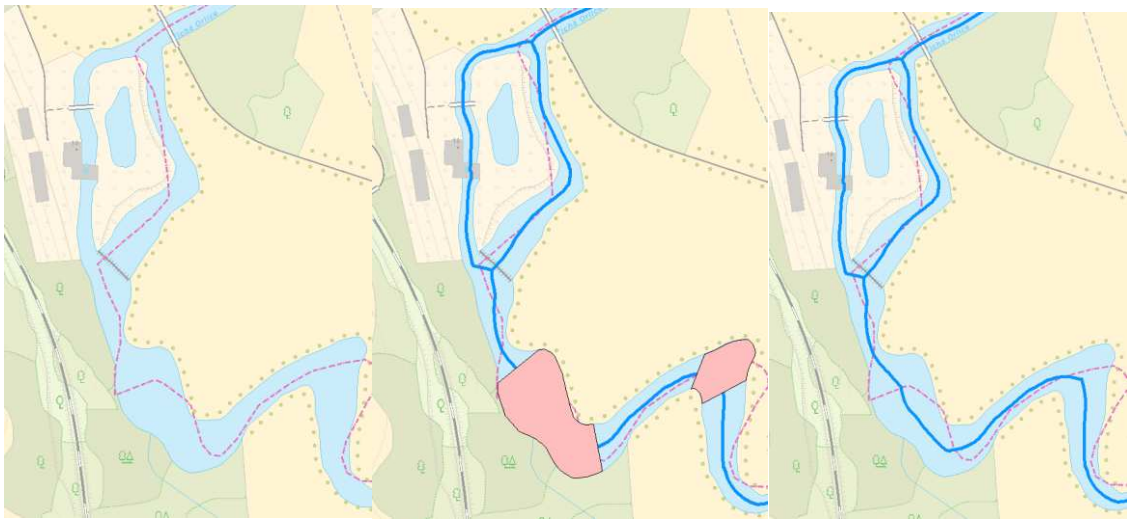
Pro hodnotu $w_{max}$ = 30 m (viz Obr. 82) došlo k úplné generalizaci celého úseku vodního toku, což je korektní kartografická reprezentace, jelikož se zde nevyskytují izolované úseky reprezentované břehovkami (pokud by bylo rozhodováno pouze podle $w_{max}$, izolované úseky by se zde nacházely).

Pro tuto situaci jsou všechny tři výsledné kartografické reprezentace velmi dobré.

*Obr. 80 Rozšíření a ostrov $w_{max}$ = 10 m, generalizace jednoho ramene.*



*Obr. 81 Rozšíření a ostrov $w_{max}$ = 20 m, generalizace části vodního toku, nejširší úsek vodního toku zachován (reprezentován břehovkami).*



*Obr. 82 Rozšíření a ostrov $w_{max}$ = 30 m, úplná generalizace vodního toku, reprezentace linií.*

**Situace 4: Dvě ramena a ostrov**

Situace znázorňuje úsek vodního toku s ostrovem a dvěma malými rameny, která se napojují v krátkém rozšíření úseku vodního toku. Úsek je z počátku výrazně širší než kolem ostrova a za ostrovem. Nejširší je úsek v místě napojení obou ramen. Taková situace je problémová, jelikož by mohlo dojít k zachování reprezentace nejširšího izolovaného úseku břehovkami, zatímco ostatní části by byly generalizovány. Taková reprezentace by nebyla z kartografického pohledu korektní.

Pro hodnotu $w_{max}$ = 10 m (viz Obr. 83) nedošlo téměř k žádné generalizaci vodního toku. Generalizována byly jen koncové části slepých ramen v místě ostrova, což je z kartografického pohledu korektní.

Pro hodnotu $w_{max}$ = 20 m (viz Obr. 84) došlo ke generalizaci obou ramen a úzkých úseků kolem ostrova. Nedošlo k porušení souvislosti reprezentace vodního toku břehovkami. Výsledná reprezentace je z kartografického pohledu korektní.

Pro hodnotu $w_{max}$ = 30 m (viz Obr. 85) došlo k úplné generalizaci celého úseku vodního toku, což je korektní kartografická reprezentace, jelikož se zde nevyskytují izolované úseky reprezentované břehovkami (pokud by bylo rozhodováno pouze podle $w_{max}$, izolované úseky by se zde nacházely).

Pro tuto situaci jsou všechny tři výsledné kartografické reprezentace velmi dobré.

*Obr. 83 Dvě ramena a ostrov $w_{max}$ = 10 m, generalizace části dvou ramen.*

*Obr. 84 Dvě ramena a ostrov $w_{max}$ = 20 m, generalizace ramen a zúžených úseků kolem ostrova, zbytek vodního toku reprezentován břehovkami.*

*Obr. 85 Dvě ramena a ostrov $w_{max}$ = 30 m, úplná generalizace vodního toku, reprezentace linií.*

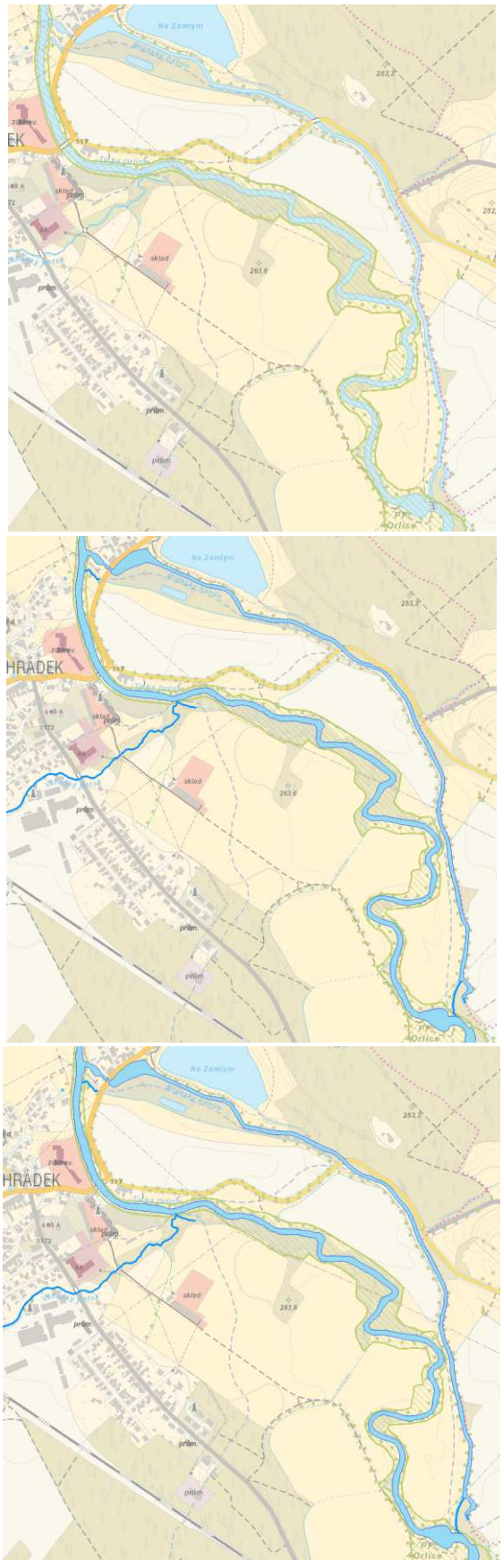
**Situace 5: Rozdvojení toku**

Situace znázorňuje úsek vodního toku, který je rozdvojen z důvodu přítomnosti velkého ostrovu. Jedno z ramen je znatelně širší než druhé. Na širší rameno vodního toku je napojený úzký přítok a obě ramena obsahují znatelná rozšíření. Tato situace je problémová z důvodu délky obou ramen a jejich znatelnému rozšíření vodního toku. V tomto případě je nutné otestovat, jestli generalizace proběhne současně pro obě ramena nebo jen pro jedno z nich. Stále budeme zkoumat, zda jednotlivá rozšíření vodního toku budou generalizována současně, jelikož jsou si velice podobná.

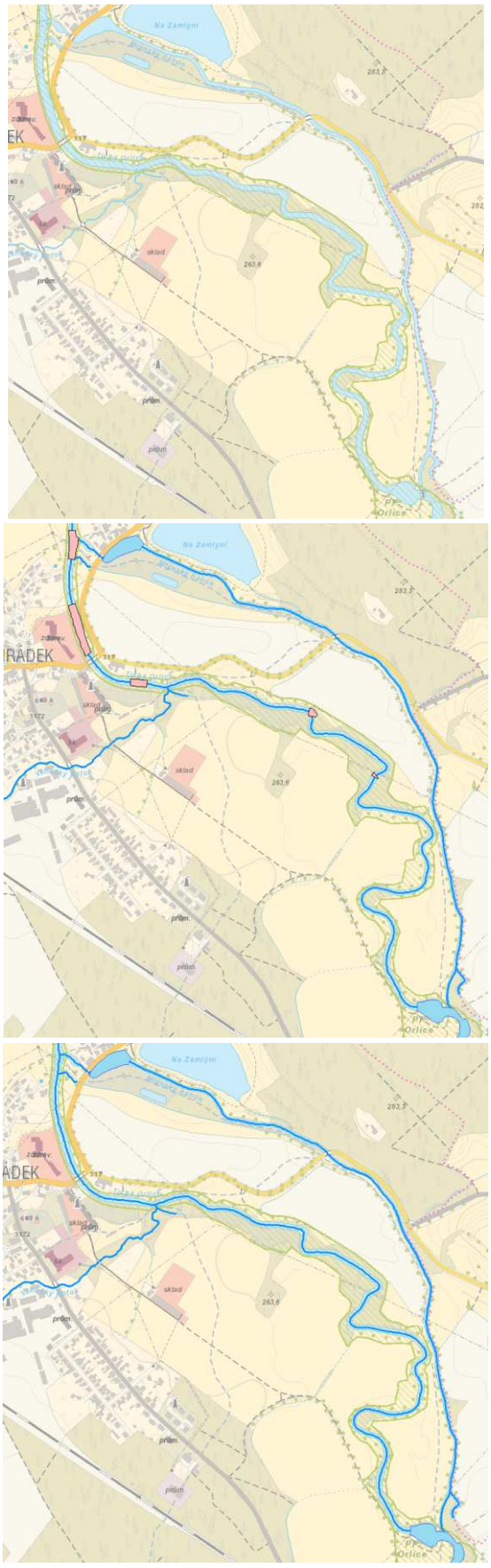
Pro hodnotu $w_{max}$ = 10 m (viz Obr. 86) došlo ke generalizaci úzkého přítoku, krátkého ramene na konci úseku a části úzkého ramene na začátku úseku, což má za následek nesouvislost reprezentace vodního toku břehovkami. Výsledná reprezentace není z kartografického pohledu korektní.

Pro hodnotu $w_{max}$ = 20 m (viz Obr. 87) došlo ke generalizaci většiny úseku vodního toku. Reprezentace vodního toku břehovkami byla zachována jen pro obě rozšíření. Tato rozšíření jsou hodně výrazná oproti svému okolí. Z tohoto důvodu je výsledná kartografická reprezentace korektní.

Pro hodnotu $w_{max}$ = 30 m (viz Obr. 88) došlo k úplné generalizaci celého úseku vodního toku, což je korektní kartografická reprezentace vzhledem ke skutečnosti, že pro hodnotu $w_{max}$ = 20 m byla zachována reprezentace břehovkami jen pro rozšíření vodního toku.




*Obr. 86 Rozdvojení toku $w_{max}$ = 10 m, generalizace přítoku, ramene a nejužšího úseku v místě rozdvojení, střídavá reprezentace vodního toku liniemi a břehovkami.*



*Obr. 87 Rozdvojení toku $w_{max}$ = 20 m, střídavá reprezentace vodního toku liniemi a břehovkami (jen nejvýraznější úseky).*

*Obr. 88 Rozdvojení toku $w_{max}$ = 30 m, úplná generalizace vodního toku, reprezentace linií.*

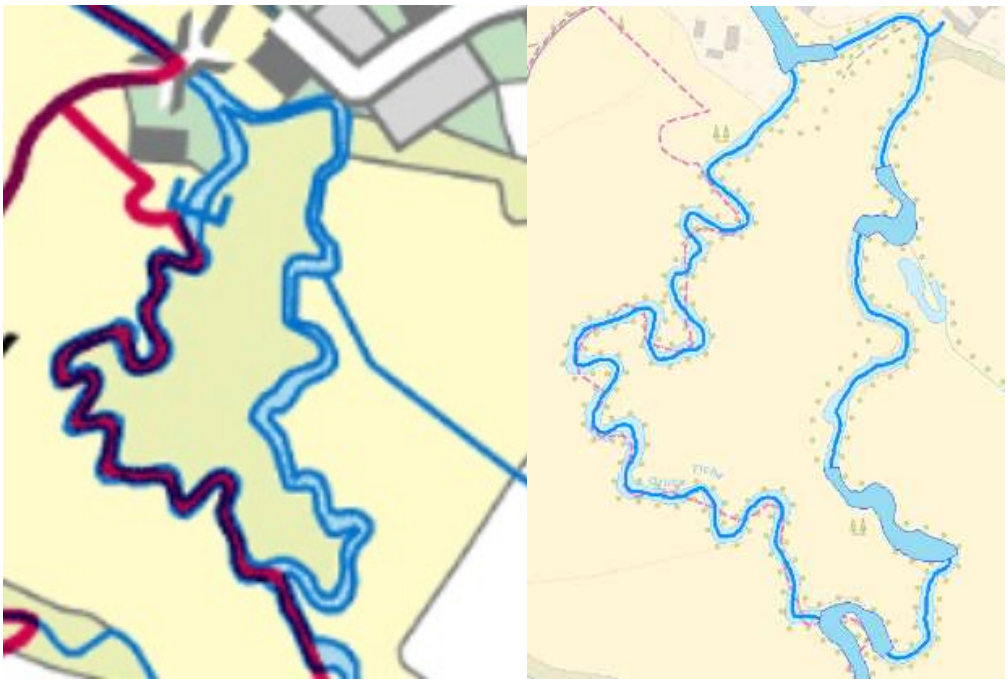
## 5.4 Porovnání výsledků s vybraným mapovým portálem

V této kapitole porovnáme výsledky navrženého generalizačního algoritmu s vybraným mapovým portálem. Téma mapové portály a prostorová redukce již bylo popsáno v kapitole 3.5. Pro mapové portály jako jsou mapy.cz, google.com/maps nebo openstreetmap.org nemá takové srovnání smysl, jelikož portály řeší reprezentaci vodního toku jiným způsobem (např. měnící se tloušťka linie v závislosti na měřítku viz kapitolu 3.5). Pro tyto mapové portály také nelze vytvořit kvalitní obrázek konkrétního krátkého úseku vodního toku pro měřítkové číslo 1 : 50 000 a vyšší, jelikož portály neumožňují přiblížení beze změny měřítkového čísla.

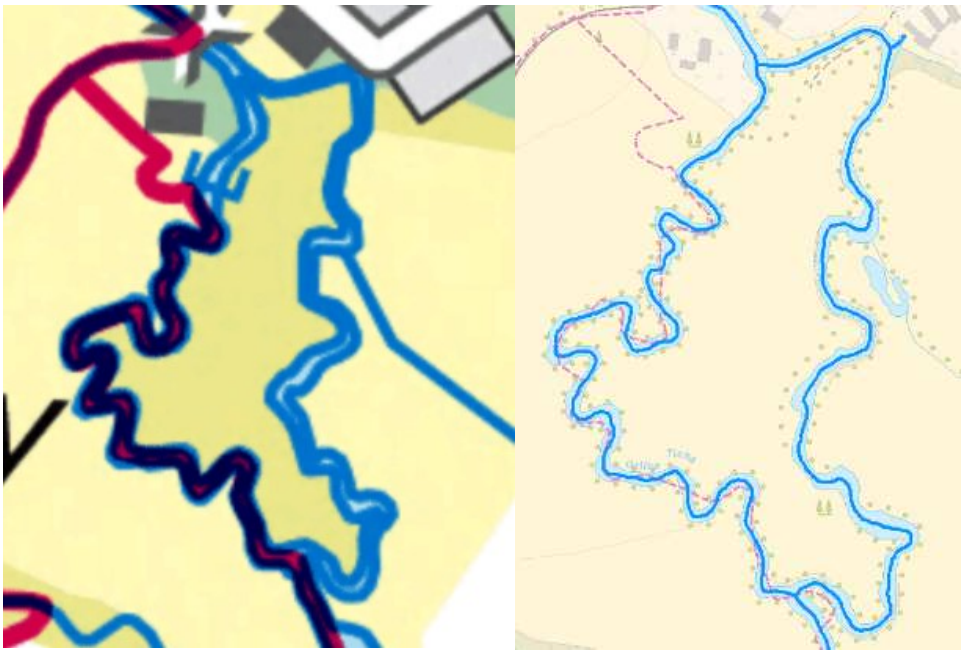
Z těchto důvodů byly pro porovnání vybrány Základní mapy ČR, které poskytuje mapový portál geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec. Všechny dále použité obrazové výstupy jsou převzaty z https://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec. Vzhledem k měřiku Základních map dochází k porovnání v měřítku 1 : 50 000 a 1 : 100 000. Měřítko 1 : 25 000 je vynechané, jelikož na vybraném vodním toku nedochází pro toto měřítko k výrazné generalizaci. Hodnotu $w_{max}$ je možné dopočítat z měřítkového čísla *M,* viz vzorec (47). Pro výsledky generalizačního algoritmu je použita podkladová rastrová vrstva ZABAGED poskytovaná ČÚZK. Tento topografický podklad neodpovídá měřítku, do kterého je daná část vodního toku generalizovaná. V levé části prezentovaných obrázků je vždy základní mapa ČR a v pravé části výsledky generalizačního algoritmu.

Obr. 89 a 90 zobrazují rozdvojení vodního toku. Každé z ramen vodního toku mění v průběhu výrazně svoji šířku, proto je tato situace z kartografického pohledu zajímavá. Úsek vodní tok na ZM 50 je stále reprezentovaný břehovkami, zatímco navržený algoritmus provedl generalizaci velké části úseku vodního toku, viz Obr. 89. Ve výsledné kartografické reprezentaci mají dvě rozšíření úseku vodního toku zachovanou reprezentaci břehovkou. Toto není pro danou situaci ideální reprezentace. Kartografická reprezentace úseku vodního toku ZM 50 je v tomto případě lepší.

Výsledné kartografické reprezentace pro měřítko 1 : 100 000 jsou zobrazeny na Obr. 90. Úsek vodní tok na ZM 100 je stále reprezentovaný břehovkami, ale dochází zde ke slévání břehovek v jednu linii, taková kartografická reprezentace je nevhodná. Navržený algoritmus provedl pro měřítko 1 : 100 000 úplnou generalizaci a výsledná kartografická reprezentace je pro tuto situace mnohem lepší.



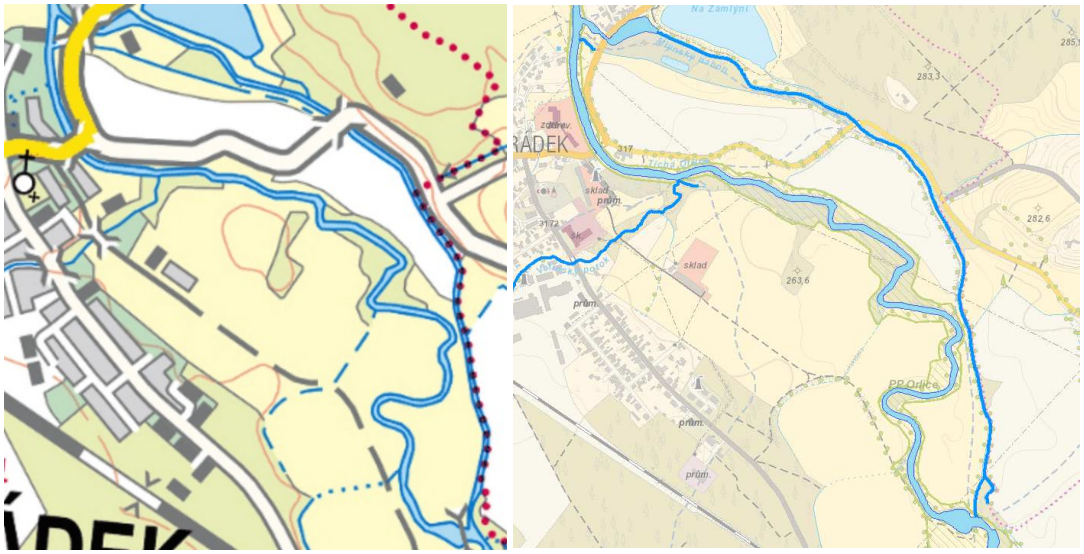
*Obr. 89 Rozdvojení vodního toku v prvním úseku v měřítku 1 : 50 000.*



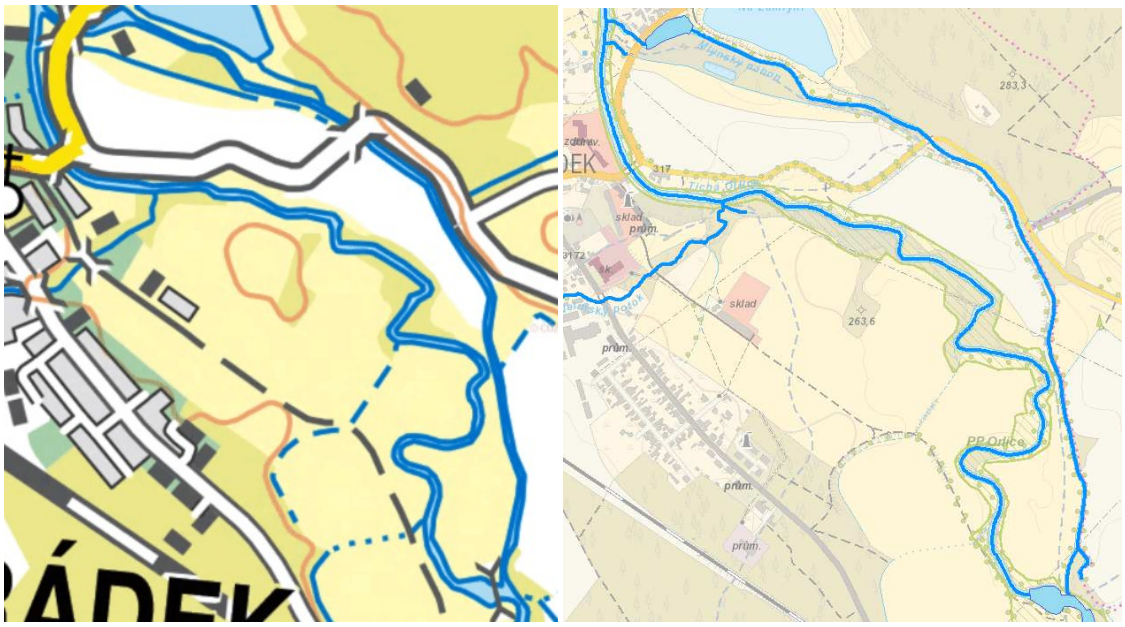
*Obr. 90 Rozdvojení vodního toku v prvním úseku v měřítku 1 : 100 000.*

Obr. 91 a 92 zobrazují rozdvojení vodního toku, které již bylo prezentováno jako situace 5 v kapitole 5.3.2. Výsledné kartografické reprezentace pro měřítko 1 : 50 000 si jsou velmi podobné. Rozdíl mezi kartografickou reprezentací ZM 50 a kartografickou reprezentací navrženého algoritmu je v užším ramenu, viz Obr. 91. Na ZM 50 je rameno reprezentováno břehovkami, zatímco navržený algoritmus rameno generalizoval. Z kartografického pohledu jsou obě reprezentace korektní.

Výsledné kartografické reprezentace pro měřítko 1 : 100 000 jsou zobrazeny na Obr. 92. Na ZM 100 je úsek vodního toku opět reprezentovaný břehovkami, zatímco navržený algoritmus zachoval reprezentaci břehovkami pouze u nejvýraznějších rozšíření vodního toku. Na ZM 100 dochází opět (stejně jako na Obr. 90) ke slévání břehovek v jednu linii, což je důvod, proč je kartografická reprezentace navrženého algoritmu pro tuto situaci vhodnější. Rozšíření vodního toku jsou hodně výrazná oproti svému okolí, a proto je možné zde zachovat reprezentaci břehovkami.



*Obr. 91 Rozdvojení vodního toku v druhém úseku v měřítku 1 : 50 000.*

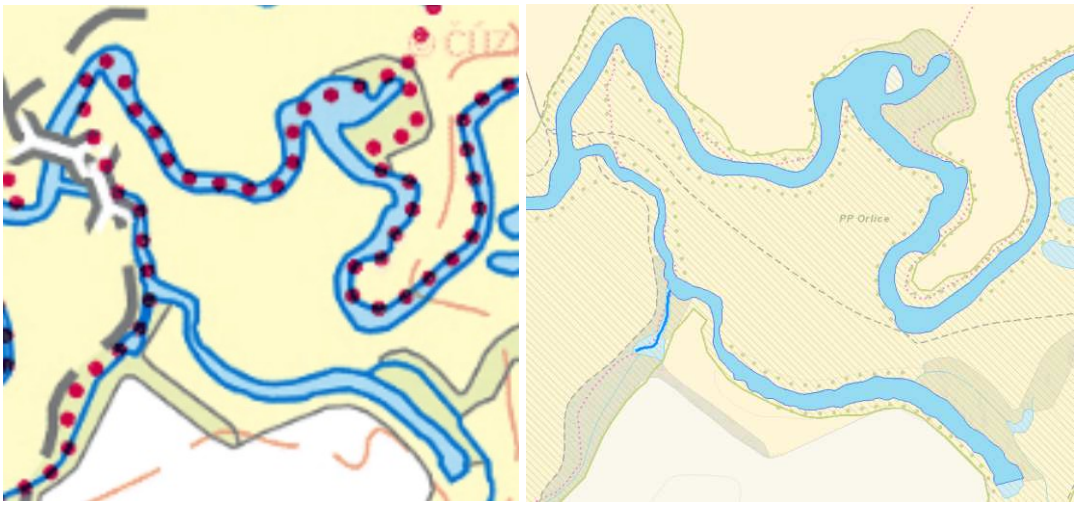


*Obr. 92 Rozdvojení vodního toku v druhém úseku v měřítku 1 : 100 000.*

Obr. 93 a 94 zobrazují ostrov a rameno úseku vodního toku. Tato situace byla prezentována v kapitole 5.3.2 jako situace 1. Výsledné kartografické reprezentace pro

měřítko 1 : 50 000 si jsou velmi podobné. Navržený algoritmus generalizoval nejužší část slepého ramene, zatímco úsek vodního toku zobrazeného na ZM 50 je celý reprezentován břehovkami, viz Obr. 93. Z kartografického pohledu jsou obě reprezentace korektní.

Výsledné kartografické reprezentace pro měřítko 1 : 100 000 jsou zobrazeny na Obr. 94. Na ZM 100 je úsek vodního toku reprezentovaný břehovkami, zatímco navržený algoritmus zachoval reprezentaci břehovkami jen u nejvýraznějšího rozšíření úseku vodního toku v místě ostrova. Zachování reprezentace břehovkami tohoto rozšíření je sporné, jelikož se jedná o široký meandr. Na ZM 100 nedochází ke slévání břehovek v jednu linii, proto je tato kartografická reprezentace pro tuto situaci daleko vhodnější.



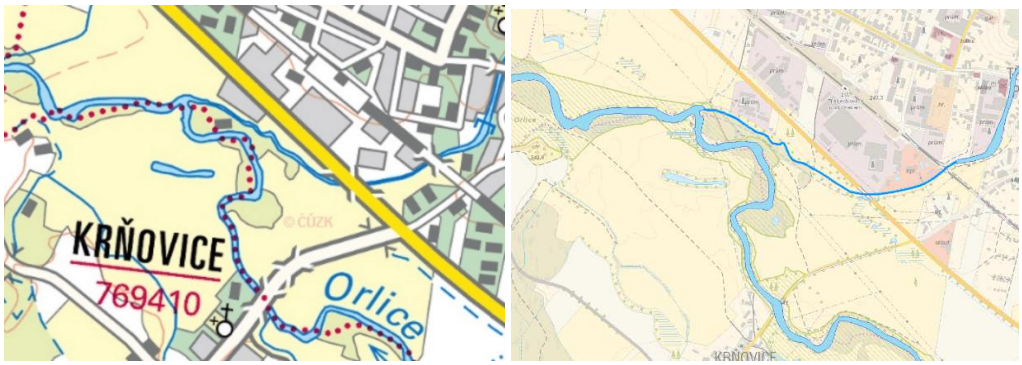
*Obr. 93 Ostrov na vodním toku v měřítku 1 : 50 000.*

*Obr. 94 Ostrov na vodním toku v měřítku 1 : 100 000.*

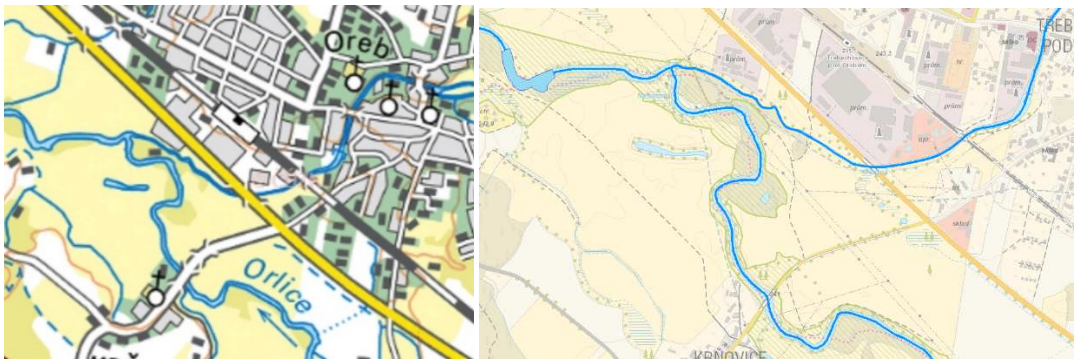
Obr. 95 a 96 znázorňuje úsek vodního toku v místě soutoku s jiným vodním tokem. Výsledné kartografické reprezentace pro měřítko 1 : 50 000 si jsou velmi podobné.

Reprezentace vodního toku břehovkami na ZM 50 je opět zachována na celém úseku vodního toku (i s přítokem), zatímco navržený algoritmus generalizoval nejužší část přítoku, viz Obr. 95. Tato nejužší část se na ZM 50 slévá do jedné linie, ačkoli je místy vidět, že se jedná stále o reprezentaci břehovkami. Tento úsek je velmi dlouhý a po jeho generalizaci nedochází k vytváření dojmu nepřirozeného střídání reprezentace břehovek a linií. Z tohoto důvodu je kartografická reprezentace navrženého algoritmu pro tuto situaci vhodnější.

Výsledné kartografické reprezentace pro měřítko 1 : 100 000 jsou zobrazeny na Obr. 96. Úsek vodní tok na ZM 100 je stále reprezentovaný břehovkami, ale dochází zde k velkému slévání břehovek v jednu linii, taková kartografická reprezentace je nevhodná. Navržený algoritmus zachoval reprezentaci břehovkami jen u nejvýraznějšího rozšíření úseku vodního toku. Zachování reprezentace břehovkami pro tento úsek je sporné rozhodnutí, jelikož se nejedná o velké výrazné rozšíření. V této situaci by byla nejvhodnější liniová kartografická reprezentace celého úseku vodního toku.




*Obr. 95 Přítok v měřítku 1 : 50 000.*




*Obr. 96 Přítok v měřítku 1 : 100 000.*

Vodní toky zobrazené na ZM České republiky se snaží o zachování reprezentace břehovkami, dokud je to vizuálně možné. Jelikož tyto mapy byly vytvářeny ruční činností kartografa-specialisty, není pochyb o tom, že by se algoritmus měl snažit ubírat tímto směrem.

Na druhou stranu je nutné poukázat na několik případů, kdy na Základních mapách dochází k zachování reprezentace břehovkami, zatímco navržený generalizační algoritmus by úsek již generalizoval. Příkladem jsou Obr. 90, 92, 96. V těchto situacích již dochází na Základních mapách ke slévání břehovek v jednu linii, taková kartografická reprezentace je nevhodná. Generalizační algoritmus dosahuje v těchto situacích lepších výsledků. V ostatních prezentovaných situacích dosahuje navržený generalizační algoritmus také velmi dobrých výsledků a výsledná generalizace se často shoduje se Základními mapami České republiky.

## 5.5 Hodnocení doplňkových kritérií

Hodnocení výsledků kartografické generalizace je v určité míře zatěžováno subjektivismem, jelikož každý kartograf může výsledky vnímat jinak. Není možné se tedy úplně vyhnout subjektivnímu pocitu při hodnocení výstupů navrženého generalizačního algoritmu.

Jak bylo možné vidět na obrázkách v kapitole 5.3.1, pokud hodnota $w_{max}$ umožní zachovat reprezentaci většiny vodního toku břehovkou, doplňková kritéria mají daleko menší vliv na celkový výsledek generalizace, než když hodnota $w_{max}$ umožní zachovat reprezentaci břehovkou pouze u izolovaných úseků vodního toku.

Při zachování reprezentace většiny vodního toku břehovkou odstraní doplňková kritéria jen malé izolované úseky, což zachová souvislost reprezentace většiny vodního toku břehovkami. Pokud je ale zachována reprezentace břehovkou pouze u izolovaných úseků vodního toku, jsou zachovány pouze nejvýraznější úseky vodního toku. Tento fakt zase přispívá k souvislosti liniové reprezentace vodního toku, která je stejně významná, jako souvislost plošná (reprezentace břehovkami).

Výše popsané zákonitosti jsou znázorněny na obrázkách v kapitole 5.3.1. Pro exaktnější hodnocení výsledků zavedeme tři pomocná kritéria popisující relativní podíl zachovaných a odstraněných úseků vůči celkové ploše vodního toku. Pro každou část

vodního toku bylo testováno několik různých hodnot $w_{max}$. Pro každou hodnotu $w_{max}$ je vyjádřen:

- Procentuální podíl $\psi$ plochy *A(PF)* úseků reprezentovaných břehovkami (viz kapitolu 4.10.3) na základě identifikace podle šířky ($w_{max}$) vůči celkové ploše *A(T)* části vodního toku

$$\psi = \frac{A(PF)}{A(T)}. \tag{48}$$

- Procentuální podíl $\omega$ odstraněné plochy $A(PF_k)$ po aplikaci doplňkových kritérií vůči ploše *A(PF)* úseků reprezentovaných břehovkami části vodního toku

$$\omega = \frac{A(PF_k)}{A(PF)}. \tag{49}$$

- Procentuální podíl $\tau$ zachovalé plochy reprezentované břehovkami *A(P)*

$$A(P) = A(PF) - A(PF_k), \tag{50}$$

po aplikaci doplňkových kritérií vůči celkové ploše *A(T)* části vodního toku

$$\tau = \frac{A(P)}{A(T)}. \tag{51}$$

Výsledky jsou sumarizovány v Tab. 2. Jak je možné vidět, hodnoty potvrzují výše zmíněný vliv doplňkových kritérií na zachování souvislosti vodního toku až na pár výjimek (např. druhá část 18 m, 20 m a 22 m). Pokud je zachováno hodně plochy vodního toku reprezentovaného břehovkou, tak v takovém případě dojde ke změně na liniovou reprezentaci jen u jeho malé části a naopak.

| Část vodního toku | Říční kilometráž [km] | $w_{max}$ [m] | ψ [%] | ω [%] | τ [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| První | Tichá O. 22 – 12.4 | 5 | 99.06 | 0.00 | 99.06 |
| | | 10 | 95.66 | 0.23 | 95.43 |
| | | 12 | 88.64 | 3.97 | 85.12 |
| | | 18 | 34.59 | 36.20 | 22.07 |
| | | 20 | 26.11 | 44.11 | 14.59 |
| | | 22 | 17.43 | 44.61 | 9.66 |
| | | 28 | 8.37 | 100.00 | 0.00 |
| | | 30 | 7.84 | 100.00 | 0.00 |
| Druhá | Tichá O. 12.4 – 3.2 | 10 | 95.39 | 0.00 | 95.39 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 12 | 86.40 | 0.33 | 86.11 |
| | | 15 | 77.18 | 2.30 | 75.41 |
| | | 18 | 49.14 | 21.94 | 38.36 |
| | | 20 | 38.44 | 37.52 | 24.02 |
| | | 22 | 29.25 | 17.40 | 24.16 |
| | | 30 | 10.97 | 100.00 | 0.00 |
| Třetí | Tichá O. 3.2 – Orlice 29 | 10 | 98.73 | 0.00 | 98.73 |
| | | 15 | 86.91 | 6.54 | 81.23 |
| | | 22 | 35.49 | 46.03 | 19.15 |
| | | 25 | 25.25 | 34.08 | 16.64 |
| Čtvrtá | Orlice 29 – 17.5 | 10 | 98.95 | 0.25 | 98.7 |
| | | 15 | 96.76 | 1.53 | 95.28 |
| | | 20 | 88.92 | 6.67 | 82.99 |
| | | 25 | 63.05 | 49.01 | 32.15 |
| | | 30 | 27.20 | 76.54 | 6.38 |
| Pátá | Orlice 17.5 – 3 | 10 | 96.26 | 0.15 | 96.12 |
| | | 20 | 86.42 | 11.60 | 76.40 |
| | | 25 | 65.60 | 27.80 | 47.36 |
| | | 32 | 51.36 | 46.38 | 27.54 |
| | | 40 | 36.07 | 34.39 | 23.66 |

*Tab. 2 Tabulka znázorňující ψ, ω a τ k jednotlivým $w_{max}$ podle jednotlivých částí vodního toku.*

Ze všech prezentovaných obrázků je možné vidět, že algoritmus bere v úvahu i úzké úseky mezi dvěma širšími úseky. Zajišťuje, aby tyto úzké úseky nebyly určeny pro generalizaci, pokud nejsou příliš dlouhé (řízeno parametrem $d_{max}$ viz kapitolu 4.10.1) a pokud spojují široké úseky, které svojí délkou přesahují tento krátký úsek. Tímto je opět zajištěna větší souvislost reprezentace vodního toku břehovkami, což omezuje vznik soustavy na sebe navazujících ploch a linií. Příklady této reprezentace mohly být vidět na Obr. 8 a 9 v kapitole 3.2.

Navržená doplňková kritéria v této práci dosahují velice dobrých výsledků. Jejich vliv dokázal, že šířka jako jediný parametr rozhodně není dostatečné kritérium pro určovaní, zdali vodní tok generalizovat či zachovat reprezentaci břehovkami. Doplňková kritéria rozhodují ve většině případů kartograficky správně. Chybná rozhodnutí nastávají většinou v případě dlouhých a širokých meandrů. Doplňková Kritéria vyhodnotí tyto

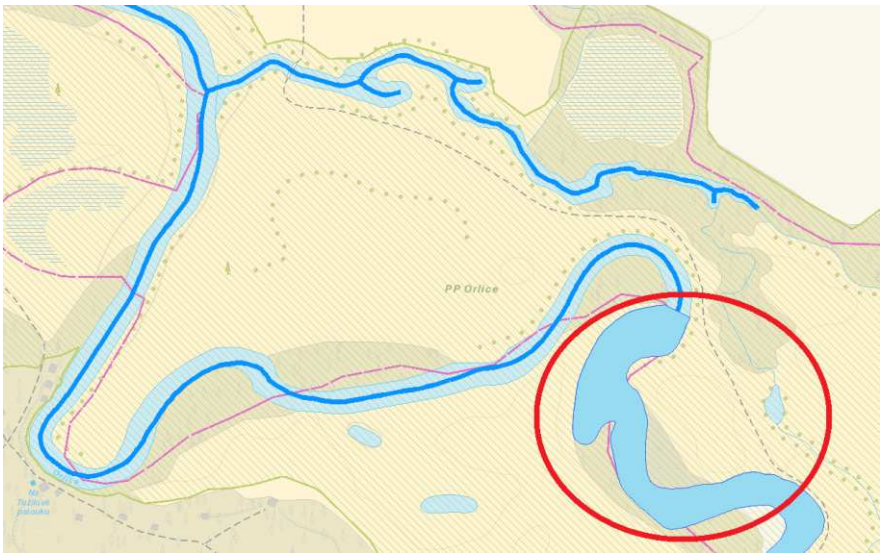
meandry jako výrazné vodní plochy a zachovají jejich reprezentaci břehovkami. Příklady takových situací jsou zobrazeny v kapitole 5.6. Pokud dojde k zachování reprezentace břehovkami pro více takových úseků (meandrů), tak výsledná kartografická reprezentace je tvořena střídáním liniové reprezentace a reprezentace břehovkami. Taková reprezentace působí dojmem soustavy jezer, rybníků či vodních nádrží na vodním toku, což není z kartografického hlediska správné.

## 5.6 Sporná místa

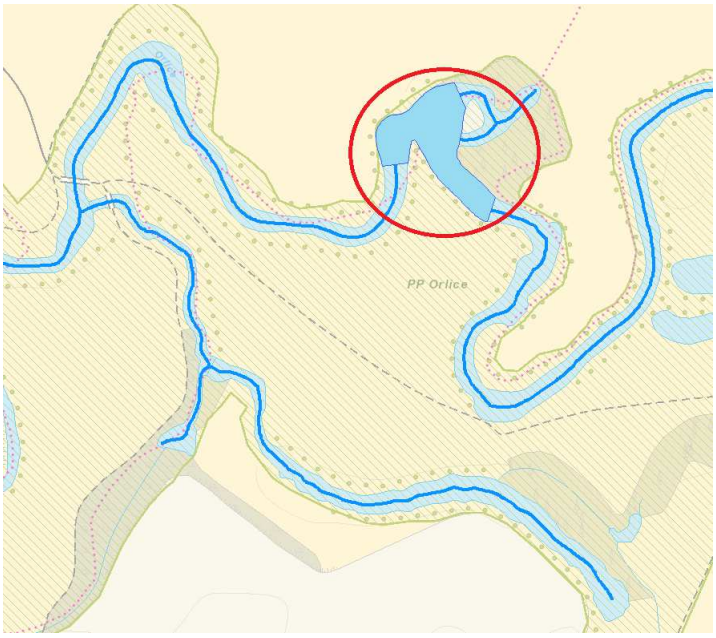
Porovnání výsledků této práce s jinými metodami v odborné literatuře není téměř možné. Stum et al. (2017) a Szombara (2013) prezentovali každý ve svých článcích jen jeden obrázek, na kterém jsou vidět jednotlivá rozšíření vodního toku, jenž nebyly správně ošetřeny. Na tato rozšíření bylo poukázáno již v kapitole 3.1.1. Prezentované výsledky této práce neobsahují žádné takto výrazné a neošetřené rozšíření vodního toku, ale rozhodně je možné najít sporná místa, o kterých nelze jednoznačně tvrdit, že jsou generalizovaná kartograficky správně.

Několik příkladů je možné najít již na obrázkách v kapitole 5.3.2 nebo v kapitole 5.4. Pro ukázku byly vybrány z těchto kapitol tři příklady.

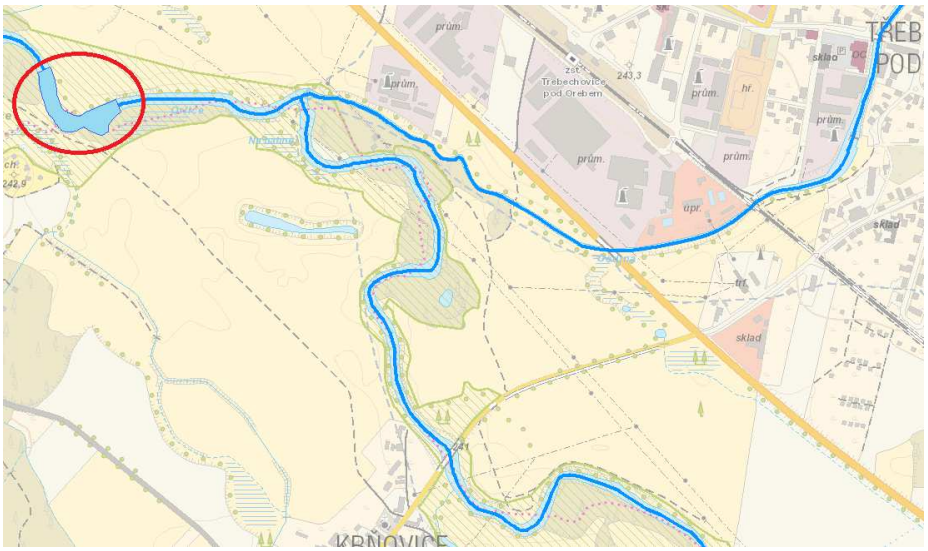
- Prvním příkladem je Obr. 79 (viz Obr. 97). Na tomto obrázku je možné vidět rozšíření vodního toku, které zůstalo reprezentované břehovkami, ačkoliv se nejedná o větší vodní plochu, ale spíše o široký meandr.
- Druhým příkladem je Obr. 94 (viz Obr. 98) z kapitoly 5.4. Na tomto obrázku dochází ke stejnému problému jako na Obr. 96.
- Třetím příkladem je Obr. 96 (viz Obr. 99) z kapitoly 5.4. Opět zde dochází ke stejnému problému, jako v prvním a druhém příkladu.




*Obr. 97 Sporný úsek na Obr. 79.*

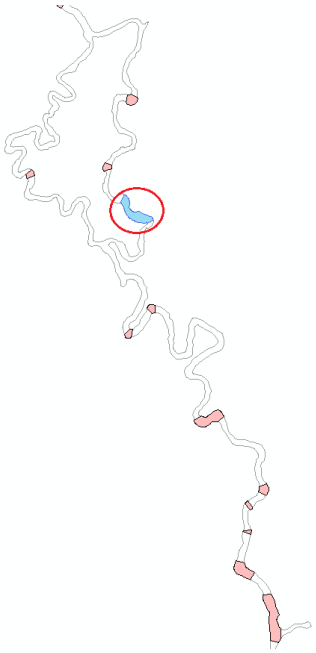



*Obr. 98 Sporný úsek na Obr. 94.*

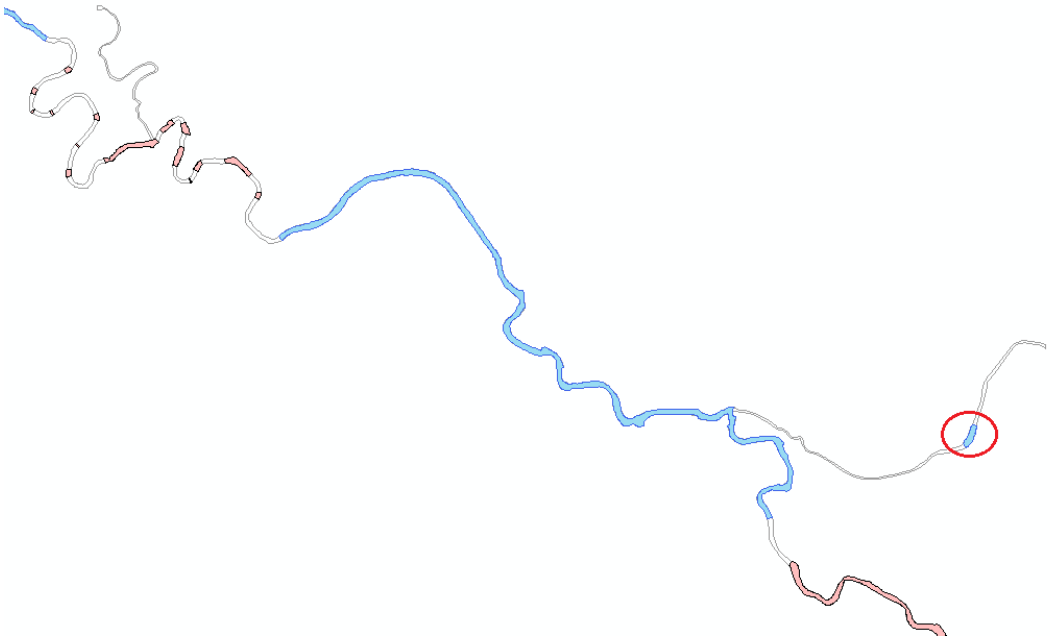



*Obr. 99 Sporný úsek na Obr. 96.*

Další příklad je možné vidět na Obr. 100. Obrázek zobrazuje modrý úsek reprezentovaný břehovkami (v červeném kroužku), který je vizuálně velice podobný ostatním červeným úsekům, které jsou podle doplňkových kritérií odstraněny. V tomto případě se jedná o úsek, jenž byl vyhodnocen jako výrazný, ale po vizuální stránce tomu úplně tak nemusí být. Záleželo by tedy na konkrétním kartografovi, zda by úsek generalizoval či ne. Další příklad je možné vidět na Obr. 101. Jedná se o stejnou situaci jako v případě Obr. 100.



*Obr. 100 Sporný úsek na první části vodního toku s hodnotou $w_{max}$ = 18 m.*



*Obr. 101 Sporný úsek na páté části vodního toku s hodnotou $w_{max}$ = 20 m.*

Je nutné si také uvědomit, že výsledky prezentované v této práci byly vytvářeny za účelem testování algoritmu. Byly proto nastavovány různé hodnoty $w_{max}$, které však není možné porovnat s výsledky jiné generalizace metodu prostorové redukce, jelikož neexistují data ve stejném měřítku.

Z autorova kartografického pohledu lze považovat dosažené výsledky za velice dobré, ačkoliv je zde samozřejmě spousta míst pro další vylepšení. Jak bylo uvedeno výše, existují zde také úseky, u kterých je navržená kartografická reprezentace sporná.

## 5.7 Slabiny algoritmu

Vytvořený algoritmus byl testován jen na specifické skupině dat z určitého geografického území. Má několik slabých míst, které by bylo nutné do budoucna vylepšit, pokud by měl být univerzálně použitelný. Těmito slabými místy jsou:

1) **Měření lokální šířky ramen vodního toku v místě ostrovů**

   V kapitole 4.4 byl tento postup vysvětlen a popsán. V práci se počítá s tím, že ostrovy jsou protáhlé ve směru vodního toku, kvůli působení vodní eroze. Pokud by ale existoval ostrov, který by byl kruhový či protáhlý kolmo na směr vodního toku, metoda prezentovaná v této práci by nefungovala.
2) **Správné seřazení struktury straight skeletonu ve složitých místech (delta vodního toku)**

Seřazení a rozdělení struktury straight skeletonu je popsáno v kapitole 4.6. Pokud by vodní tok měl v daném místě velice složitou strukturu, jako například delta vodních toků, či místa se spoustou ostrovů vedle sebe, nemusela by prezentovaná metoda fungovat správně.

3) **Rekonstrukce polygonu**

Tento proces je řešen v kapitole 4.10.2. Rekonstrukce polygonu je v práci řešena pomocí vytvořených kolmic. Implementace hledání počátečních a koncových bodů úseku na jednotlivých březích s následným hledáním bodů vodního toku mezi nalezeným počátečním a koncovým bodem není v práci řešeno ideálním způsobem. Současná implementace může vést k chybné rekonstrukci břehu daného úseku.

4) **Množství volitelných parametrů**

Podstatná slabina algoritmu je množství numerických parametrů (viz kapitolu 4), jejichž hodnoty byly použity pouze pro řeku Tichá Orlice a Orlice. Pokud by měl být algoritmus použitý pro jiný vodní tok s jinými geometrickými vlastnostmi (než Tichá Orlice), bylo by nutné znovu hledat ideální hodnoty těchto parametrů, což pro automatizovanou generalizaci není vhodné.

# 6 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá kartografickou generalizací vodních toků pomocí metody změny prostorové dimenze. Hlavním cílem této práce bylo navržení a otestování algoritmu pro automatizovanou generalizaci vodních toků metodou změny prostorové dimenze.

Ve třetí kapitole byla popsána problematika prostorové redukce z kartografického pohledu. Aby bylo možno efektivněji rozhodnout, které části vodního toku budou zachovány či generalizovány, byla navržena doplňková kritéria. Tato kritéria by měla sloužit jako částečná náhrada lidského faktoru v procesu generalizace. Klíčovou část celé práce představuje kapitola 4, ve které je představen a podrobně popsán navržený generalizační algoritmus. Algoritmus je vícefázový a vychází z kartografických pravidel, která byla navržena v kapitole 3.3. Řeší problematiku přítomnosti ostrovů na vodním toku, částečnou a úplnou prostorovou redukci vodního toku. Algoritmus byl implementován v programovacím jazyce C++ a byl testován na datech tvořených vrstvou „VodniPlocha“ ze ZABAGED, představujících část toku řeky Orlice. Data byla poskytnuta ČÚZK.

V páté kapitole jsou prezentovány dosažené výsledky. Ze širšího pohledu je lze hodnotit jako velmi dobré, obsahují jen několik sporných míst a nenalezneme v nich úseky, u kterých by navržená kartografická reprezentace byla zcela špatná. Z prezentované rešerše a výsledků vyplývá, že se navržený generalizační algoritmus přibližuje k lidskému rozhodování, ale zatím ho není schopen nahradit, zvlášť u komplikovanějších situací. Automatizovaný přístup ke generalizaci metodou prostorové redukce je v dnešní době rozhodně možné využívat, ale je nutné, aby výsledky byly kontrolovány kartografem, který případně rozhodne, zdali jsou korektní, či nikoliv.

V závěru této práce lze konstatovat, že hlavní cíl práce se podařil splnit, stejně jako jednotlivé dílčí cíle.

Do budoucna je možné na tuto práci navázat a řešit problém velkého množství numerických parametrů, jejichž optimální hodnoty se musí hledat pro každý vodní tok zvlášť. Řešení tohoto problému by umožnilo univerzální využití algoritmu.

Další vylepšení výsledků generalizace by mohlo přinést využití linear axis (viz kapitolu 4.1.4) místo straight skeletonu. Větší pozornost si také zaslouží kritéria pro rozhodování

o odstranění ostrovů. Tento problém se v práci nepodařilo vyřešit pro všechny tvary ostrovů (viz kapitolu 5.7).

Nejdůležitější částí práce jsou doplňková kritéria, která rozhodují o generalizaci vodního toku. V této oblasti existuje potenciál pro další výzkum, lze navrhnout robustnější a efektivnější kritéria vylepšují výslednou kartografickou reprezentaci.

# Seznam použitých zdrojů informací


AICHHOLZER, Oswin a Franz AURENHAMMER, 1996. Straight skeletons for general polygonal figures in the plane. In: *COCOON '96 Proceedings of the Second Annual International Conference on Computing and Combinatorics*. s. 117–126.

AICHHOLZER, Oswin, Franz AURENHAMMER, David ALBERTS a Bernd GÄRTNER, 1995. A Novel Type of Skeleton for Polygons. *Journal of Universal Computer Science* [online]. 752–761. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-80350-5_65

BADER, Matthias a Robert WEIBEL, 1997. Detecting and Resolving Size and Proximity Conflicts in the Generalization of Polygon Maps. *Proceedings 18th International Cartographic Conference*. 23–27.

BAYER, Tomáš. *Kartografické generalizační algoritmy: Generace bodových prvků/skupin. Generalizace liniových prvků/skupin. Generalizace plošných prvků/skupin.* [online]. 2018 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~bayertom/images/courses/Adk/adk8.pdf

BAZARAA, M.S. a C.M. SHETTY, 1976. *Convex Sets* [online]. ISBN 978-3-642-48294-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-48294-6_2

BIEDL, Therese, Martin HELD, Stefan HUBER, Dominik KAASER a Peter PALFRADER, 2015. Reprint of: Weighted straight skeletons in the plane. *Computational Geometry: Theory and Applications* [online]. B.m.: Elsevier B.V., **48**(5), 429–442. IS'N 09257721. Dostupné z: doi:10.1016/j.comgeo.2015.01.004

BLUM, Harry, 1967. A transformation for extracting new descriptors of shape. In: *Models for the Perception of Speech and Visual Form*.

BUCZEK, Michał Mateusz, 2017. Area collapse algorithm computing new curve of 2D geometric objects. *Geodesy and Cartography* [online]. **66**(1), 23–43. IS'N 20297009. Dostupné z: doi:10.1515/geocart-2017-0004

CACCIOLA, Fernando, 2004. A CGAL implementation of the Straight Skeleton of a Simple 2D Polygon with Holes. *2nd CGAL User Workshop* [online]. Dostupné z: doi:10.1.1.103.8910

EDUARD IMHOF, 1982. *Cartographic Relief Presentation*. ISBN 978-3110067118.

EPPSTEIN, David a Jeff ERICKSON, 1999. Raising Roofs, Crashing Cycles, and Playing Pool: Applications of a Data Structure for Finding Pairwise Interactions. *Discrete & Computational Geometry* [online]. **22**(4), 569–592. IS'N 1432-0444. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/PL00009479

FELKEL, Petr a Stepan OBDRZALEK, 1998. Straight Skeleton Implementation. *Proceedings of Spring Conference on Computer Graphics*. 210–218.

FREEMAN, H a R SHAPIRA, 1975. Determining the minimum-area encasing rectangle for an arbitrary closed curve. *Communications of the ACM* [online]. **18**(7). Dostupné z: doi:10.1145/360881.360919

HAUNERT, Jan-Henrik a Monika SESTER, 2004. Using the Straight Skeleton for Generalisation in a Multiple Representation Environment. *Proceeding of I8th ICA Workshop on Generalisation and Multiple Representation*. 1–10.

HAUNERT, Jan Henrik a Monika SESTER, 2008. Area collapse and road centerlines based on straight skeletons. *GeoInformatica* [online]. **12**(2), 169–191. IS'N 13846175. Dostupné z: doi:10.1007/s10707-007-0028-x

HYNKOVÁ, Kateřina. *Generalizace vodstva technikou redukce prostorové dimenze* [online]. Praha, 2014 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://geo.fsv.cvut.cz/proj/dp/2014/katerina-hynkova-dp-2014.pdf. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka.

JIANG, Baode, Zhong XIE, Xincai WU, Liang WU a Lin ZHOU, 2011. Topology constrain for river dimension-reducing generalization in land-use map. *Proceedings - 2011 19th International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2011* [online]. 1–4. Dostupné z: doi:10.1109/GeoInformatics.2011.5980668

JONES, Christopher B., Geraint L. BUNDY a Mark J. WARE, 1995. Map Generalization with a Triangulated Data Structure. *Cartography and Geographic Information Systems* [online]. **22**(4), 317–331. Dostupné z: doi:10.1559/152304095782540221

JONES, Christopher B. a J. Mark WARE, 2005. Map generalization in the Web age. *International Journal of Geographical Information Science* [online]. **19**(8–9), 859–870. IS'N 13658816. Dostupné z: doi:10.1080/13658810500161104

KOLÁŘ, Josef, 2000. *Teoretická Informatika*. 2. vyd. Praha: Česká informatická společnost. ISBN 8090085385.

LI, Chengming, Yong YIN, Pengda WU, Xiaoli LIU a Peipei GUO, 2018. Improved Jitter Elimination and Topology Correction Method for the Split Line of Narrow and Long Patches. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [online]. **7**(10), 402. Dostupné z: doi:10.3390/ijgi7100402

LI, Zhilin, 2006. *Algorithmic Foundation of Multi-Scale Spatial Representation*. ISBN 9780849390722.

MCALLISTER, Michael a Jack SNOEYINK, 2008. Medial Axis Generalization of River Networks. *Cartography and Geographic Information Science* [online]. **27**(2), 129–138. IS'N 1523-0406. Dostupné z: doi:10.1559/152304000783547966

MCMASTER, Robert B. a K. STUART SHEA, 1992. *Generalization in Digital Cartography*. B.m.: As'ociation of American Geographers. ISBN 089291209X.

MIRELA, T a Remco C. VELTKAMP, 2004. A Straight Skeleton Approximating the Medial axis. *Lecture Notes in Computer Science*. **3221**, 809–821. IS'N 03029743.

MITROPOULOS, Vasilis, Androniki XYDIA, Byron NAKOS a Vasilis VESCOUKIS, 2005. The use of epsilon-convex area for attributing bends along a cartographic line. *In Proceedings of the 22nd International Cartographic Conference, La Corona, Spain*.

PETZOLD, Ingo, Dirk BURGHARDT a Matthias BOBZIEN, 2005. Automated derivation of town plans from large scale data – on an example of area to line simplification. *Conference Paper, ICA Conference*.

PRASAD, Lakshman, 1997. Morphological Analysis of Shapes. *CNLS Newsletter*. **139**.

Qt Documentation. Qt [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://doc.qt.io/

SHEA, K Stuart a Robert B MCMASTER, 1989. Cartographic generalization in a digital environment: when and how to generalize. *Computer Science*. 56–67.

STEINIGER, Stefan, Dirk BURGHARDT a Robert WEIBEL, 2007. Recognition of island structures for map generalization. *14th ACM International Symposium on Geographic Information Systems* [online]. 67. Dostupné z: doi:10.1145/1183471.1183484

STUM, Alexander K., Barbara P. BUTTENFIELD a Lawrence V. STANISLAWSKI, 2017. Partial polygon pruning of hydrographic features in automated generalization. *Transactions in GIS* [online]. **21**(5), 1061–1078. IS'N 14679671. Dostupné z: doi:10.1111/tgis.12270

SZOMBARA, Stanisław, 2013. Unambiguous Collapse Operator of Digital Cartographic Generalisation. *Proceedings of 16th ICA Workshop on Generalisation and Map Production*. 1–10.

ŠÍP, Marcel. *Topologická kostra polygonu a její využití při kartografické generalizaci*. Praha, 2007. Diplomová práce. Univerzita Karlova. Vedoucí práce Ing. Tomáš Bayer, Ph.D.

The Computational Geometry Algorithms Library [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://www.cgal.org/

TOUS'AINT, Godfried, 1983. Solving Geometric Problems with the Rotating Calipers. (May), 1–8.

VAN DER POORTEN, P. M. a Christopher B JONES, 2002. Characterisation and generalisation of cartographic lines using Delaunay triangulation. *International Journal of Geographical Information Science* [online]. **16**(8), 773–794. IS'N 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/13658810210149434

ZUSE, Konrad, 1972. Der Plankalkül.

# Seznam příloh

Příloha 1 CD obsahující elektronickou verzi práce, poskytnutá data, upravená data, zdrojové kódy vytvořeného algoritmu a geodatabázi obsahující veškeré výsledky