

**Univerzita Karlova**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Aplikovaná geografie

Studijní obor: Fyzická geografie a geoinformatika



Eliška Pospěchová

**Analýza šířky vodního toku a její kartografická vizualizace v různých měřítcích**

Analysis of the river width and its cartographic representation

Bakalářská práce

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

Praha 2024

### **Prohlášení**

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

V Praze dne 25. července

Eliška Pospěchová

**Poděkování:**

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu doc. Ing. Tomáši Bayerovi, Ph.D za ochotu a trpělivost. Dále chci poděkovat své rodině a přátelům za morální podporu při zpracování bakalářské práce.

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Eliška Pospěchová**

Studijní obor: **Fyzická geografie a geoinformatika**

Garant studijního programu/oboru vám schválil přidělení této bakalářské práce:

Název práce:

### **Analýza šířky vodního toku a její kartografická vizualizace v různých měřítcích**

#### **Předběžná náplň práce:**

Cílem bakalářské práce bude navrhnout metodu pro výpočet šířky vodního toku z jeho plošné kartografické reprezentace. Tento parametr bude následně pro vybrané vodní toky vizualizován vhodnými metodami. Dílčím cílem bude ověřit, zda šířka vodního toku a hodnoty z ní odvozené se mění napříč měřítkovou řadou map, a může být použita pro porovnání míry generalizace vodního toku.

**Rozsah průvodní zprávy:** cca 50 stran.

**Rozsah grafických prací:** cca 30 stran.

**Seznam odborné literatury:**

MAZUR, D. (2020): Generalizace vodních toků metodou částečné prostorové redukce. Diplomová práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PŘF UK, Praha.

PAVELSKY, T. M., SMITH, L. C. (2008): RivWidth: a software tool for the calculation of river widths from remotely sensed imagery. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 5(1), 70–73.

SCHERELIS, V., DOERING, M., LAUBE, P. (2023): HydroWidth: a small-scale approach to calculate river width and its variability. Transactions in GIS, 27(5), 1503–1525.

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

Datum zadání bakalářské práce: 26. 1. 2023

Termín odevzdání bakalářské práce: 31. 7. 2024

doc. Ing. Tomáš Bayer, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

doc. RNDr. Lucie Kupková, Ph.D.

Vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Tato bakalářská je zaměřena na automatizované měření šířky vodního toku, její analýzu s cílem ověřit, zda tento parametr může být použit pro hodnocení míry kartografické generalizace a následnou kartografickou vizualizaci. Zkoumány byly vektorové kartografické reprezentace řek Labe, Orlice a Vltava v měřítcích 1 : 25 000, 1 : 100 000 a 1 : 250 000. V rámci bakalářské práce byla navržena vlastní metoda měření šířky vodního toku, využívající kombinaci metody nejbližšího souseda a bipartitního párování. Jedná se o metody, které dosud nebyly v tomto kontextu společně použity, navrženou metodu lze považovat za inovativní. Naměřené šířky byly vizualizovány pomocí grafu, histogramu a metodami tematické kartografie. Při vizualizaci šířek dlouhých vodních toků (Labe, Vltava) docházelo k overplottingu. Histogram a metody tematické kartografie se ukázaly být vhodnými pro porovnání dat v různých měřítkách. Jako statistické parametry šířky v závislosti na kilometrů byla spočtena první a druhá derivace. Počet změn znaménka první, resp. druhé derivace se ukázaly být dobrými identifikátory pro zjištění míry generalizace, jelikož se podle předpokladu se zmenšujícím se měřítkem mapy jejich hodnoty klesaly.

**Klíčová slova:** šířka vodního toku, vizualizace, tematická kartografie, měřítko mapy, kartografická reprezentace vodního toku, kartografická generalizace

## **Abstract**

This bachelor thesis focuses on the automated measurement of river width and its analysis to verify whether this parameter can be used to evaluate the cartographic generalization rate and the subsequent cartographic visualization. Vector cartographic representations of Elbe, Orlice, and Vltava rivers at scales 1 : 25 000, 1 : 100 000, and 1 : 250 000 were examined. Within the framework of the bachelor thesis, a method of measuring the width of the watercourse was proposed, using a combination of the nearest neighbor method and bipartite matching. These methods have not been used together in this context before, and the proposed method can be considered innovative. The measured widths were visualized using graph, histogram, and thematic cartography methods. Overplotting occurred when visualizing the widths of long watercourses (Elbe, Vltava). Histogram and thematic cartography methods proved to be suitable for comparing data at different scales. The first and second derivatives were calculated as statistical parameters of width as a function of kilometrage. The number of changes in the signs of the first and second derivatives, respectively, proved to be good identifiers for determining the degree of generalization. As expected, their numbers decreased with decreasing map scale.

**Keywords:** river width, visualization, thematic cartography, map scale, cartographic representation of rivers, cartographic generalization

# Obsah

Seznam obrázků .....	11
Seznam tabulek .....	14
1 Úvod .....	15
2 Rešerše .....	17
2.1 Parametry vodních toků ve fyzické geografii .....	17
2.2 Šířka vodního toku .....	18
2.3 Kartografická generalizace vodních toků .....	19
2.3.1 Prostorová redukce .....	20
2.3.2 Ostatní metody generalizace .....	21
3 Vodní toky a jejich šířka .....	23
3.1 Vodní toky a jejich reprezentace v mapě .....	23
3.2 Základní pojmy .....	25
3.2.1 Vodní tok a jeho reprezentace .....	25
3.2.2 Příčka .....	25
3.2.3 Vzdálenost dvou bodů .....	25
3.2.4 Nejbližší sused .....	25
3.2.5 Vzájemná poloha bodu a přímky .....	26
3.2.6 Orientované hledání .....	26
3.2.7 Minimum cost bipartite matching .....	27
3.2.7.1 Úplný bipartitní graf .....	27
3.2.7.2 Maximální párování grafu .....	28
3.2.7.3 Hungarian algorithm .....	28
3.2.8 První diference .....	29
3.2.9 Druhá diference .....	29
3.2.10 Numerická derivace funkce .....	29
3.3 Šířka vodního toku .....	30
3.4 Analýza změny šířky vodního toku .....	33
3.4.1 První derivace .....	33
3.4.2 Druhá derivace .....	33
3.5 Vizualizace naměřených šířek .....	34
3.5.1 Graf .....	34
3.5.2 Histogram .....	34



3.5.3	Metody tematické kartografie .....	35
4	Výpočet šířky vodního toku .....	37
4.1	Metody využívající pomocnou strukturu .....	37
4.1.1	Metoda kolmic.....	37
4.1.2	Nejkratší vzdálenost mezi osou a břehy .....	39
4.2	Metoda nejbližších vrcholů na protilehlém břehu.....	39
4.3	Vylepšení s využitím bipartitního párování .....	43
4.4	Navržená metoda pro výpočet šířky vodního toku.....	45
4.4.1	Hledání nejbližších vrcholů na protilehlém břehu .....	45
4.4.2	Odstranění nevhodných příček.....	46
4.4.2.1	Ponechání pouze nejkratší příčky ze shluku v jednom vrcholu .....	46
4.4.2.2	Orientované hledání .....	46
4.4.3	Výběr dvojitých příček.....	46
4.4.4	Bipartitní párování.....	47
4.4.5	Výběr vedlejších příček.....	47
4.4.6	Odečtení šířky ostrova.....	48
4.5	Hodnocení metody .....	48
4.6	Základní informace o implementaci.....	51
5	Výsledky.....	52
5.1	Analyzované vodní toky.....	52
5.2	Předzpracování dat .....	54
5.3	Formát výsledků .....	55
5.4	Vstupní parametry .....	56
5.5	Vizualizace parametrů.....	57
5.5.1	Šířka .....	57
5.5.1.1	Graf.....	57
5.5.1.2	Histogram .....	62
5.5.1.3	Metody tematické kartografie .....	66
5.5.2	První derivace a její vlastnosti.....	78
5.5.2.1	Graf.....	79
5.5.2.2	Metody tematické kartografie .....	83
5.5.3	Druhá derivace .....	84
5.5.3.1	Graf.....	84

6	Závěr.....	88
7	Zdroje .....	90

## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Konvenční metody měření šířky vodního toku.....	18
Obr. 3.1: Část řeky Sázava, vlevo ZTM25, uprostřed ZTM100, vpravo ZTM250.....	24
Obr. 3.2: Ukázka reprezentace vodního toku v tematické mapě.....	24
Obr. 3.3: Poloha přímky a bodu. ....	26
Obr. 3.4: Znázornění orientovaného hledání.....	27
Obr. 3.5: Úplný bipartitní graf. ....	28
Obr. 3.6: Maximální párování (červeně) obecného bipartitního grafu. ....	28
Obr. 3.7: Šířka vodního toku na pravidelném úseku.....	31
Obr. 3.8: Šířka vodního toku na úseku s ostrovy. ....	32
Obr. 3.9: Šířka vodního toku na nepravidelném úseku. ....	32
Obr. 3.10: Šířka vodní nádrže. ....	33
Obr. 3.11: Průměrná šířka vodního toku na segmentu.....	34
Obr. 3.12: Ukázka histogramu šířky vodního toku. ....	35
Obr. 3.13: Ukázka barevné škály pro znázornění šířky vodního toku v mapě.....	36
Obr. 4.1: Metoda kolmic. ....	38
Obr. 4.2: Vygenerované kolmice před odstraněním (vlevo), po odstranění (vpravo).....	38
Obr. 4.3: Metoda nejkratší vzdálenosti mezi osou a břehy. ....	39
Obr. 4.4: Vygenerované příčky před odstraněním shluků (vlevo), po odstranění shluků (vpravo) .....	40
Obr. 4.5: Vygenerované příčky před odstraněním shluků a orientovaným hledáním (vlevo), po odstranění shluků a orientovaném hledání (vpravo) .....	41
Obr. 4.6: Dvojité příčky. ....	42
Obr. 4.7: Nevhodně vygenerované příčky (nahore), vhodně vygenerované příčky (dole). ....	43
Obr. 4.8: Ukázka úseku, kde se příčky nevhodně generují z obou břehů. ....	43
Obr. 4.9: Ukázka užití bipartitního párování na celém vodním toku. ....	44
Obr. 4.10: Ukázka bipartitního párování na úseku.....	45
Obr. 4.11: Úplný bipartitní graf znázorněný na vodním toku.....	47
Obr. 4.12: Mezery mezi příčkami. ....	48
Obr. 4.13: Příčky vzniklé při hledání nejbližšího vrcholu na pravém břehu pro vrcholy levého břehu (vlevo), příčky vzniklé při hledání nejbližšího vrcholu na levém břehu pro vrcholy pravém břehu (uprostřed), příčky vzniklé bipartitním párováním (vpravo). ....	48

Obr. 4.14: Ukázka vynechaných vrcholů. ....	49
Obr. 4.15: Ukázka konvexních vrcholů. ....	50
Obr. 4.16: Ukázka nepřesného měření šířky vodní nádrže Lipno. ....	50
Obr. 5.1: Mapa pokrytí analyzovaných vodních toků v ZTM25. ....	52
Obr. 5.2: Mapa pokrytí analyzovaných vodních toků v ZTM100. ....	53
Obr. 5.3: Mapa pokrytí analyzovaných vodních toků v ZTM250. ....	53
Obr. 5.4: Značkový klíč ZTM – vodstvo. ....	54
Obr. 5.5: Sjednocení bufferu liniové reprezentace a polygonu. ....	55
Obr. 5.6: Břehy před převzorkováním (nahore), po převzorkování (dole). ....	57
Obr. 5.7: Šířky vodního toku Labe zakreslené v grafu společně se střední hodnotou (medián). .....	59
Obr. 5.8: Šířky vodního toku Orlice zakreslené v grafu společně se střední hodnotou (medián). .....	60
Obr. 5.9: Šířky vodního toku Vltava zakreslené v grafu společně se střední hodnotou (medián). .....	61
Obr. 5.10: Histogram naměřených šířek řeky Labe. ....	63
Obr. 5.11: Histogram naměřených šířek řeky Orlice. ....	64
Obr. 5.12: Histogram naměřených šířek řeky Vltavy. ....	65
Obr. 5.13: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM25. ....	67
Obr. 5.14: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM100. ....	67
Obr. 5.15: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM250. ....	68
Obr. 5.16: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM25. ....	68
Obr. 5.17: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM100. ....	69
Obr. 5.18: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM250. ....	69
Obr. 5.19: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM25. ....	70
Obr. 5.20: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM100. ....	71
Obr. 5.21: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM250. ....	72
Obr. 5.22: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná barvou ze ZTM25. ....	73
Obr. 5.23: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná barvou ze ZTM100. ....	73
Obr. 5.24: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná barvou ze ZTM250. ....	74
Obr. 5.25: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná barvou ze ZTM25. ....	74
Obr. 5.26: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná barvou ze ZTM100. ....	75
Obr. 5.27: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná barvou ze ZTM250. ....	75
Obr. 5.28: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná barvou ze ZTM25. ....	76

Obr. 5.29: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná barvou ze ZTM100.....	77
Obr. 5.30: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná barvou ze ZTM250.....	78
Obr. 5.31: Hodnoty první derivace šířky Labe.....	80
Obr. 5.32: Hodnoty první derivace šířky Orlice.....	81
Obr. 5.33: Hodnoty první derivace šířky Vltavy.....	82
Obr. 5.34: Hodnoty první derivace, úsek Orlice ZTM25.....	83
Obr. 5.35: Hodnoty první derivace, úsek Orlice ZTM100.....	83
Obr. 5.36: Hodnoty první derivace, úsek Orlice ZTM250.....	84
Obr. 5.37: Hodnoty druhé derivace šířky Labe.....	85
Obr. 5.38: Hodnoty druhé derivace šířky Orlice.....	86
Obr. 5.39: Hodnoty druhé derivace šířky Vltavy.....	87

## Seznam tabulek

Tab. 5.1: Počet měřených délek pro vybrané vodní toky.....	57
Tab. 5.2: Počet změn znaménka první derivace.....	79
Tab. 5.3: Počet inflexních bodů. ....	84

# 1 Úvod

Vodní toky jsou významným topografickým prvkem, jejich šířka je důležitým parametrem často používaným v hydrologii nebo v jiných fyzicko-geografických disciplínách. Tato práce se zaměřuje na návrh metody pro výpočet šířky vodního toku z plošné kartografické reprezentace v různých mapových dílech a její následnou analýzu. Cílem bude ověřit, zda šířka vodního toku může být použita jako identifikátor míry kartografické generalizace.

Aby mapa zůstala přehledná, je potřeba tomuto požadavku přizpůsobit i kartografickou reprezentaci vodního toku. Není proto možné zakreslit všechny objekty zemském nebo jiném povrchu podle skutečnosti, dochází tak k jejich zjednodušování a zobecňování. Tento proces se nazývá kartografická generalizace. Metody a míra generalizace se volí podle účelu mapy a jejího měřítka. V této práci se budeme věnovat analýze kartografické generalizace v závislosti na měřítku mapy, zprostředkujícím parametrem bude lokální hodnota šířky vodního toku.

Zatímco u map většího měřítka jsme schopni objekty zakreslit s vyšší mírou detailu, v mapách menšího měřítka často musíme využívat metod generalizace ve větší míře. Kartografická reprezentace vodních toků, kterou se v této práci budeme zabývat, se mění napříč různými měřítky. Meandrující řeky nebo řeky s umělými kanály mohou mít složité tvary a v menších měřítkách musí být generalizovány. Obecně platí, že čím menší měřítko mapy, tím jednodušší tvar a průběh vodní tok má. Můžeme tedy předpokládat, že variabilita šířky se bude v závislosti zmenšujícím se měřítkem snižovat. Problematika automatizovaného výpočtu šířky vodního toku z vektorových dat je v literatuře velmi málo řešena, proto jí bude věnována teoretická část práce. Dalším cílem práce je potvrdit nebo vyvrátit, zdali se šířka napříč měřítka mění, a dochází ke kresbě přes míru.

Tato bakalářská práce je zaměřena na výpočet šířky třech vodních toků (Labe, Orlice a Vltava) v měřítkách 1 : 25 000 (ZTM25), 1 : 100 000 (ZTM100) a 1 : 250 000 (ZTM250), výpočtu vybraných statistických parametrů, jejich vizualizaci a následně porovnání napříč měřítka. Byla použita data ze Základních topografických map ČR ve výše zmíněných měřítkách.

Druhá kapitola zahrnuje rešerši literatury o kartografické generalizaci vodních toků a metodám pro automatizovaný výpočet šířky. Třetí kapitola bude věnována problematice týkající se kartografické reprezentace a šířky vodního toku, souvisejícím statistickým parametrům a metodám vizualizace. Ve čtvrté kapitole budou představeny metody automatizovaného výpočtu šířky vodního toku včetně popisu metody užitě pro účely této práce. V páté kapitole budou

prezentovány výsledky. Předpokládá se, že pomocí vizualizace šířky vodního toku a její první a druhé derivace budeme schopni identifikovat rozdíly mezi jednotlivými měřítky, např. že v menším měřítku mapy bude pozorovatelná kresba přes míru. Výsledky budou interpretovány a doprovozeny obrazovými a tabulkovými výstupy.



## 2 Rešerše

Tato kapitola je věnována rešerši literatury o problematice související s tématem práce. Je rozdělena na část věnující se významu geometrie vodního toku ve fyzické geografii, dále metodám a přístupům použitých při výpočtu šířky vodního toku a kartografické generalizaci, konkrétně pak vodních toků.

### 2.1 Parametry vodních toků ve fyzické geografii

Analýza geometrie vodního toku může mít význam v hledání souvislostí mezi jednotlivými fyzicko-geografickými, potažmo jinými vědními disciplínami. Ta pak může v kombinaci s jinými daty poskytnout komplexnější informaci o propojení jednotlivých složek krajiny. Meissner et al. (2016) využili analýzy geometrie vodního toku při vytváření geoprostorového modelu pro nalezení souvislosti mezi fluviální geomorfologií a výskytem makrobezobratlých, který je vhodný pro zhodnocení zdraví vodního toku. S využitím digitálního modelu terénu byla zjištěna koeficient křivolakosti, fraktální rozměr, sklon a šířka pro každých 50 metrů vodního toku. Na základě těchto parametrů byly vymezeny čtyři typologie, které byly přiřazeny k jednotlivým částem toku. Souvislost těchto geomorfologických typologií a výskytu makrobezobratlých byla prokázána a metoda tak může sloužit jako predikční model.

Lze také zkoumat změny vodního toku, sezónní nebo dlouhodobé. Kang, Kanniah (2022) zkoumali změny polohy vodního toku v závislosti na změně krajinného využití a pokryvu s využitím Channel Migration Toolbox (Legg 2014). Jedná se o sadu nástrojů pro vyhodnocení změn v geometrii vodního toku (šířka, posun). Zhou et al. (2024) se zaměřili na změny šířek vodních toků v povodí Aralského moře v souvislosti s geomorfologií, klimatickými změnami a aktivitami člověka.

Znalost šířky vodního toku, společně s hloubkou a rychlostí, je v hydrologii významná pro výpočet průtoku (Leopold, Maddock 1953). Mungen et al. (2020), Rao et al. (2020) a Du et al. (2023) se věnují odhadu říčního průtoku na základě šířek vodních toků, které jsou odvozeny pouze ze satelitních snímků. Jejich hlavním záměrem je obdržení hodnoty průtoku bez nutnosti terénního výzkumu a měřících stanic. De Moraes Frasson et al. (2019) pak zkoumají vzájemné souvislosti parametrů vodního toku (šířky, sklonu, plochy povodí, délky meandrů, sinuozity a průtoku). Studie utvrdila přímou souvislost šířky vodního toku a průtoku i ve světovém měřítku. Právě šířce vodního toku se bude tato bakalářská práce věnovat.

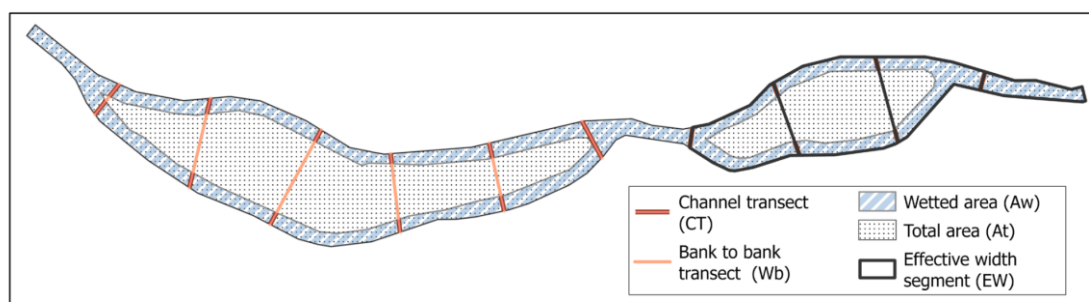
## 2.2 Šířka vodního toku

Tato podkapitola se bude věnovat rešerši metod pro její automatický výpočet šířky vodního toku.

Scherelis et al. (2023) uvádějí dvě konvenční metody výpočtu šířky, a to metodu příček (pojem příčka vysvětlen v kap. 3.2.2) a segmentů. První metoda počítá šířku řeky jako délku příčky s koncovými body na obou březích a kolmé na osu toku, druhá metoda počítá efektivní šířku segmentu podle vztahu (Yamazaki 2014)

$$W_e = W_b \frac{A_w}{A_t}, \quad (2.1)$$

kde  $W_b$  je šířka vodního toku od břehu k břehu,  $A_t$  je obsah vodní plochy (bez ostrovů) a  $A_w$  je celkový plošný obsah segmentu včetně ostrovů (viz Obr. 2.1). Ve své publikaci také prezentují algoritmus *HydroWidth*, který každému pixelu masky vodního toku připíše hodnotu nejkratší vzdálenosti ke břehu a z těch pixelů, které reprezentují osu vodního toku, je šířka odvozena. Metodu využitou v *HydroWidth* porovnává s konvenčními metodami. Tvrdí, že „konvenční metody jsou dostačující pro měření variability šířky v (člověkem) modifikovaných nebo meandrujících řekách, ale nedokážou zachytit variabilitu šířky u složitějších typů řek“ a „*HydroWidth* poskytuje mnohem podrobnější informace díky tomu, že přistupuje k šířce vodního toku jako ke spojitě veličině“ (Scheleris et al. 2023, s. 1522).



Obr. 2.1: Konvenční metody měření šířky vodního toku.

Zdroj: (Scheleris et al. 2023)

Metodu příček využívá software *RivWidth* (Pavelsky, Smith 2008), který byl využit při tvorbě *North American River Width* datasetu (NARWidth) (Allen, Pavelsky 2015), modelu pro odhad říčního průtoku (Mengen 2020), pro účely zjištění souvislostí mezi jednotlivými parametry vodního toku (De Moraes Frasson et al. 2019) nebo pro validaci dat šířek ze *Simple Global River Bankfull Width and Depth Database* (Andreadis 2013). Yang et al. (2020) implementovali

*RivWidthCloud* algoritmus jakožto adaptaci *RivWidth* pro Google Earth Engine. *GrabRiver* (Wang et al. 2022), který využívá metodu příček, jako první přistupuje k vodnímu toku jako ke grafu a zachovává tak informaci o jeho topologii. Metodu segmentů představil Yamazaki (2014) využívá ji při implementaci *The Global River Width Algorithm* (GRW).

Mazur (2020) ve své práci, která se věnuje kartografické generalizaci vodních toků, použil metodu měření délky kolmic, která je založená na podobném principu jako již zmíněné konvenční metody, tzn. musí být nejdříve nalezena osa vodního toku, podél níž se následně umístí kolmice pro určení šířky vodního toku. Dále popisuje metodu maximální vepsané kružnice, kdy je lokální šířka odvozena z jejího průměru, metodu negativního bufferu, kdy je šířka určena dvojnásobkem jeho prahové hodnoty (při které se buffery dotknou), a nakonec metody využívající převzorkování břehů. Ty dále rozděluje na měření vzdálenosti mezi jednotlivými body obou břehů, kde body na břehovkách byly identifikovány s využitím straight skeletonu, a měření minimální vzdálenosti mezi břehy, kdy jsou jako body brány vrcholy břehových linií. Kromě metody kolmic není žádná z uvedených v literatuře explicitně řešena a diskutována. Poslední zmíněné metodě se bude věnovat tato práce, viz kap. 4.4.

## 2.3 Kartografická generalizace vodních toků

Vodní toky jsou významným topografickým prvkem, je proto důležité je vhodně kartograficky reprezentovat, linií nebo břehovkami (polygonem), aby byly v souladu s ostatními objekty v mapě, což může být náročné při mapách menších měřítek. Pro lepší přehlednost pak musí být vodní toky generalizovány.

Existuje několik různých definic kartografické generalizace. V českých učebních textech se často cituje definice ČSN 73046, která zní: „*Kartografická generalizace spočívá ve výběru, geometrickém zjednodušení a zevšeobecnění objektů, jevů a jejich vzájemných vztahů pro jejich grafické vyjádření v mapě, ovlivněné účelem, měřítkem mapy a vlastním předmětem kartografického znázorňování.*“

ICA (1967) definuje kartografickou generalizaci jako „*výběr a zjednodušení reprezentace detailu vhodné vzhledem k měřítku a/nebo účelu mapy*“.

McMaster, Shea (1992) popisují těchto 10 metod generalizace:

- zjednodušení (*simplification*) – snížení počtu vrcholů při zachování charakteristik objektu

- vyhlazení (*smoothing*) – snížení velikosti úhlu mezi liniiovými segmenty (přidání vertexů)
- agregace (*aggregation*) – reprezentace několika blízkých prvků se stejným typem geometrie a jejich reprezentace jedním prvkem
- sloučení (*amalgamation*) – sloučení blízkých uzavřených oblastí do jednoho prvku
- prostorová redukce (*collapse*) – změna dimenze prvku
- spojení (*merging*) – sloučení blízkých prvků do jednoho
- zdokonalení (*refinement*) – odstranění příliš malých částí objektu, ponechání pouze těch důležitých při zachování charakteristik objektu
- kresba přes míru (*exaggeration*) – zvětšení části objektu, který by byl jinak v mapě špatně viditelný
- zdůraznění (*enhancement*) – zvýraznění prvku symbolem
- posun (*displacement*) – přesun prvku

Li (2006) rozdělil metody podle typu geometrie, na které se používá, a podle toho, jestli se jedná o jeden prvek nebo skupinu prvků. Kromě již zmíněných metod jmenuje např. typifikaci, rozdělení, eliminaci aj. Autor také poukazuje na to, že rozdělení a terminologie generalizačních metod nejsou úplně jednoznačné.

### 2.3.1 Prostorová redukce

U vodních toků se velmi často užívá prostorová metoda prostorové redukce, kdy se plošná kartografická reprezentace převádí na liniiovou, pro tyto účely lze zvolit skeletonizaci. Tento koncept jako první prezentoval Blum (1967), který představil Medial Axis. Kromě Medial Axis existují i další typy skeletonů a příslušné algoritmy k jejich konstrukci, mezi nejčastěji využívané patří Straight Skeleton (Aichholzer, Aurenhammer 1996), Linear Axis (Tănase, Veltkamp 2004) a Chordal Axis (Prasad 1998). Li (2006) dále zmiňuje metodu *thinning* pro skeletonizaci binárních rastrů, která patří mezi základní morfologické operátory.

Základním parametrem pro rozhodnutí o prostorové redukci je šířka toku. Podle Li (2006) by minimální vzdálenost mezi dvěma objekty (v tomto případě mezi břehovými liniemi) v mapě měla být minimálně 2 mm. Pokud lokální šířka polygonu vodního toku po odečtení tloušťky jeho obrysové linie je menší než tato hodnota, mělo by dojít k prostorové redukci nebo kresbě přes míru. Musí se ale brát v potaz geografické charakteristiky a prostorové vztahy vodního toku (Zhang et al. 2022).

Jiang et al. (2011) se zabývá prostorovou redukcí vodních toků na mapách územního využití, kde využívají konstrukce Medial Axis s pomocí Voronoi teselace/Delaunay triangulace, metodu představenou Ai, Guo (2000), a následně řeší expanzi okolních land-use polygonů pro zachování topologie. Delaunay triangulaci také využívají Zhang et al. (2022), kteří se věnují generalizaci vodního toku částečnou prostorovou redukcí nebo kresbou přes míru na základě lokální šířky vodního toku a šířky okolních segmentů. Mazur (2020) se ve své práci detailněji věnuje kritériím pro prostorovou redukcí, kde bere v potaz i ostrovy. Na samotnou prostorovou redukcí využívá straight skeleton.

Problematice prostorové redukce se věnují také Lewandowicz, Flisek (2020), kteří navrhli algoritmus pro získání střední osy podlouhlých polygonů s využitím Chordal Axis. Jako vzorová data využili polygon vodního toku a jimi navržený algoritmus generuje osu pouze hlavního toku a ne jejich ramen. Autoři tvrdí, že „navržený algoritmus představuje alternativu ke stávajícím řešením a jeho hlavní výhodou je, že je jednodušší než ostatní metody“ (Lewandowicz, Flisek 2020, s. 17).

Schaefer, Pelletier (2020) prezentují algoritmus pro prostorovou redukcí říčních sítí, potažmo jiných složitých polygonů. Pro získání skeletonu opět využívají metody Voronoi teselace. Jejich algoritmus také řeší prodloužení aproximované střední osy tak, aby se dotýkala okraje polygonů.

### **2.3.2 Ostatní metody generalizace**

Při generalizaci vodních toků se musí počítat i s ostrovy. Pokud ostrovy výrazně nemění šířku vodního toku, mohou být odstraněny, případně agregovány s jiným blízkým ostrovem, jestliže je vodní tok mezi nimi úzký (Mazur 2020).

Velký význam při generalizaci vodních toků má kresba přes míru. Podobně jako u prostorové redukce, hlavní podmínka pro použití této metody se řídí lokální šířkou vodního toku reprezentovaného polygonem. Kresbu přes míru řeší Zhang et al. (2022) ve své publikaci, zmíněný v kap. 2.3.1.

Na meandrující řeky reprezentované linií (nebo pro břehové linie při reprezentaci polygonem) při zmenšujícím se měřítku mapy jsou často aplikovány algoritmy na zjednodušení tvaru linie. Mezi nejznámější patří např. Douglas-Peuckerův (1973) nebo Visvalingam-Whyattův (1993).

Při generalizaci vodních toků se pro zlepšení čitelnosti často nevyhneme posunutí, obzvláště, když je v mapě zakresleno mnoho prvků. Podle Badera a Barraulta (2001, s. 1) „posunutí

jakožto generalizační operace musí řešit vznikající konflikty, ale také provádět tyto posuny tak, aby nevznikaly konflikty nové a byly zachované konkrétní prostorové vztahy“.

Procesem kartografické generalizace prochází i celé říční sítě a povodí. Provádí se výběr toků na základě důležitosti, která může být určena jeho např. délkou, řádovostí nebo podle charakteru celého povodí. Jiang et al. (2014) se věnují výběru vodních toků na základě řádovosti podle Strahlera v rámci dílčích povodí. Došli k závěru, že řešení výběru toků regionálně zlepšuje konektivitu a hustotu říční sítě.

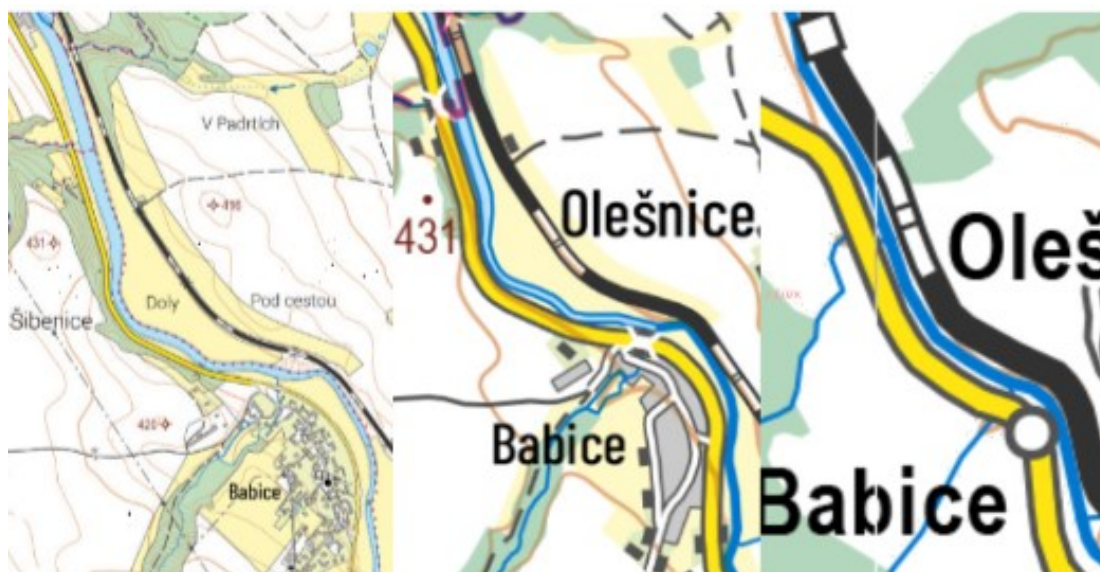
## 3 Vodní toky a jejich šířka

V této kapitole je představena problematika kartografické reprezentace a šířky vodních toků v různých typech map a různých měřítcích. Dále jsou popsány důležité pojmy využitě při návrhu metody pro výpočet šířky vodního toku, její implementaci a výpočtu odvozených statistických parametrů. Nakonec jsou diskutovány možnosti vizualizace šířky vodního toku a jejích parametrů metodami tematické kartografie.

### 3.1 Vodní toky a jejich reprezentace v mapě

Definice vodních toků podle § 43 zákona č. 254/2001 Sb. zní: „*Vodní toky jsou povrchové vody tekoucí vlastním spádem v korytě trvale nebo po převažující část roku, a to včetně vod v nich uměle vzdutých. Jejich součástí jsou i vody ve slepých ramenech a v úsecích přechodně tekoucích přirozenými dutinami pod zemským povrchem nebo zakrytými úseky.*“ Mezi vodní toky tak patří řeky, potoky, bystřiny a veletoky.

Reprezentace vodního toku v mapě závisí na jeho vlastnostech (lokální šířka, význam, řádovost), na měřítku a účelu mapy. Plošnou reprezentaci využijeme obecně v topografických mapách (velká až střední měřítko, např. Základní topografické mapy ČR existující v měřítkách 1 : 5 000 až 1 : 250 000), případně kombinaci plošné a liniové reprezentace, kdy na vodním toku došlo k částečné prostorové redukci. Vodní tok se zpravidla směrem od pramene k ústí rozšiřuje. Bývá reprezentován linií až do místa, kdy jeho šířka není v mapě zanedbatelná, pak se symbolizuje plošným znakem (tj. břehovkou). Změna kartografické reprezentace vodního toku ve třech měřítkách topografických map je znázorněna na Obr. 3.1. Reprezentaci liniovým prvkem po celé délce toku využijeme na mapách malých měřítek, (např. na obecně geografických mapách), kde je skutečný rozměr vodních toků v měřítku mapy zanedbatelný, nebo na politických či některých tematických mapách (viz Obr. 3.2), kde vodní tok má spíše orientační funkci. Na mapách různých měřítek a účelů se bude lišit i podrobnost zákresu říční sítě, vodní toku zde podléhají cenzálnímu nebo normativnímu výběru.



Obr. 3.1: Část řeky Sázava, vlevo ZTM25, uprostřed ZTM100, vpravo ZTM250.

Zdroj: <https://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/>



Obr. 3.2: Ukázka reprezentace vodního toku v tematické mapě.

Zdroj: [https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/js17/cesko\\_atlas/web/pages/uvod.html](https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/js17/cesko_atlas/web/pages/uvod.html)



## 3.2 Základní pojmy

V této kapitole budou představeny základní matematické, statistické pojmy a metody, které byly využity při návrhu metody automatizovaného výpočtu šířky vodního toku, její implementaci a výpočtu odvozených statistických ukazatelů.

### 3.2.1 Vodní tok a jeho reprezentace

Uvažujme plošnou reprezentaci vodního toku břehovkou tvořenou dvěma polyliniemi. Levý břeh  $L = \{v_{l,1}, \dots, v_{l,m}\}$  bude tvořen  $m$  vrcholy  $v_{l,i} = (x_i, y_i)$ , pravý břeh  $R = \{v_{r,1}, \dots, v_{r,n}\}$  bude tvořen  $n$  vrcholy  $v_{r,j} = (x_j, y_j)$ .

### 3.2.2 Příčka

Příčkou označujeme úsečku, která je definovaná dvěma vrcholy  $(v_{l,i}, v_{r,j})$ , z čehož jeden leží na levém břehu  $L$  a druhý na pravém  $R$ , tedy  $v_{l,i} \in L, v_{r,j} \in R$ .

Délka příčky je využita při odvozování šířky vodního toku.

### 3.2.3 Vzdálenost dvou bodů

Euklidovská vzdálenost bodů  $p_1(x_1, y_1)$  a  $p_2(x_2, y_2)$  je v prostoru dimenze  $E^2$  definována jako

$$d(p_1, p_2) = \|P_1 - P_2\|_2 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (3.1)$$

Byla použita pro odvození šířky vodního toku při měření vzdálenosti vrcholů na protilehlých březích.

### 3.2.4 Nejbližší soused

Nechť  $P$  je množina bodů v  $E^2$  a  $q, q \in Q$ , je libovolný bod  $q$  nazývaný *query point*. Nejbližším bodem množiny  $P$  ke  $q$  je bod

$$p_n = \underset{p_i \in P}{\operatorname{argmin}}(d(q, p_i)), \quad (3.2)$$

kde  $d$  je euklidovská vzdálenost.

Metoda nejbližšího souseda byla využita při hledání nejbližších vrcholů na protilehlém břehu za účelem měření šířky vodního toku (viz kap. 4.2).

### 3.2.5 Vzájemná poloha bodu a přímky

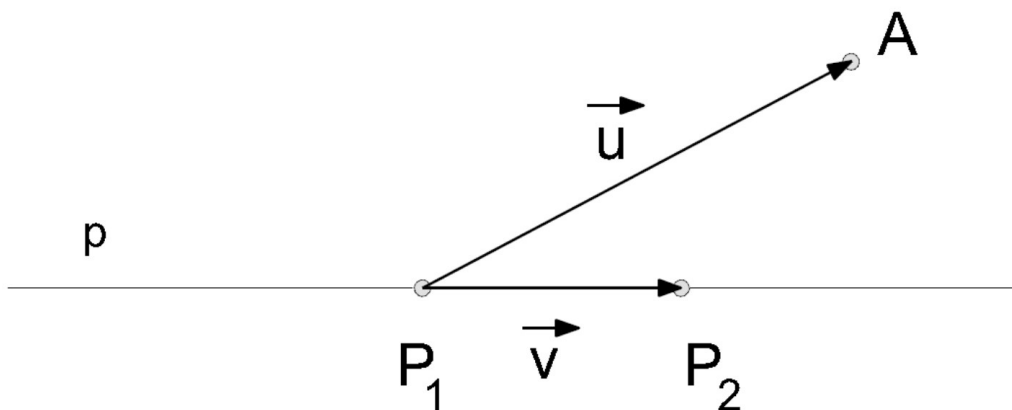
Pro určení, zda bod leží  $A$  v pravé, resp. levé polorovině  $\sigma_p$  resp.  $\sigma_l$  vzhledem k přímce  $p$  (viz Obr. 3.3), se používá test orientace vektorů

$$t = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{vmatrix} u_x & u_y \\ v_x & v_y \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{cases} t < 0, & A \in \sigma_l, \\ t = 0, & A \in p, \\ t > 0, & A \in \sigma_p, \end{cases} \quad (3.3)$$

kde

$$\vec{u} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1) \quad (3.4)$$

$$\vec{v} = (x_A - x_1, y_A - y_1). \quad (3.5)$$



Obr. 3.3: Poloha přímky a bodu.

Zdroj: <https://web.natur.cuni.cz/~bayertom/images/courses/Adk/adk2.pdf>

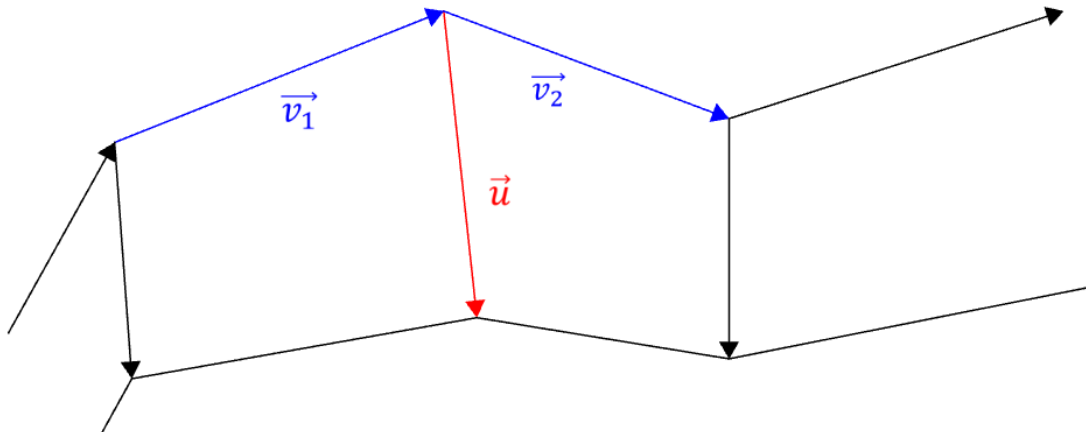
### 3.2.6 Orientované hledání

Při orientovaném hledání bodů z množiny  $P$  vzhledem k přímce  $p(a, b)$  prohledáváme pouze takové body  $p_i \in P$ , které leží v konkrétní polorovině  $\sigma_p$  resp.  $\sigma_l$  definované touto přímkou. Orientované hledání bylo využito při testování, zda se vrchol příčky na pravém břehu nachází napravo od levého břehu; situace je znázorněna na Obr. 3.4. Musí tedy platit, že

$$\vec{u} \times \vec{v}_1 > 0 \wedge \vec{u} \times \vec{v}_2 > 0. \quad (3.6)$$

Pokud se vrchol příčky na levém břehu nachází nalevo od pravého břehu, pak musí platit

$$\vec{u} \times \vec{v}_1 < 0 \wedge \vec{u} \times \vec{v}_2 < 0. \quad (3.7)$$



Obr. 3.4: Znáznornění orientovaného hledání.

### 3.2.7 Minimum cost bipartite matching

V této podkapitole bude představeno *minimum cost bipartite matching* a pojmy s ním související.

#### 3.2.7.1 Úplný bipartitní graf

Graf je datová struktura popisující vztahy mezi objekty. Nezáleží na poloze objektů, ale na jejich vzájemném vztahu. Graf je tvořen uzly a hranami. Neorientovaný graf je uspořádaná trojice disjunktních množin

$$G = \langle H, U, \rho \rangle, \quad (3.8)$$

kde  $H$  představují hrany,  $U$  uzly,  $\rho$  incidenci grafu  $G$ . Incidence

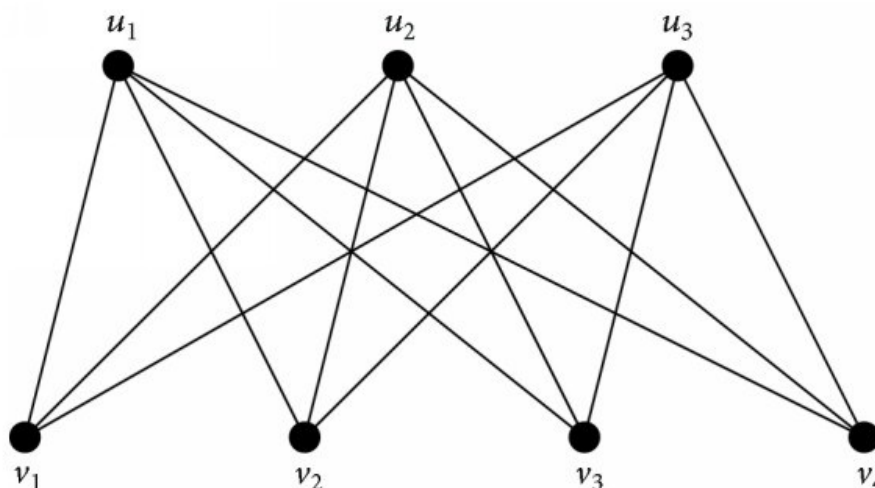
$$\rho: H \rightarrow U \otimes U, \quad (3.9)$$

přirazuje každé hraně z množiny  $H$  neprázdnou množinu dvojic z uzlů.

Hrany grafu mohou být ohodnocené (vážené).

Bipartitní graf je graf takový, jehož množinu vrcholů lze rozdělit na dvě disjunktní množiny (žádná hrana nemá oba vrcholy pouze v jedné z množin).

Úplný bipartitní graf (viz Obr. 3.5) je takový bipartitní graf, kde každý vrchol z první množiny je spojen hranou s každým vrcholem z druhé množiny.

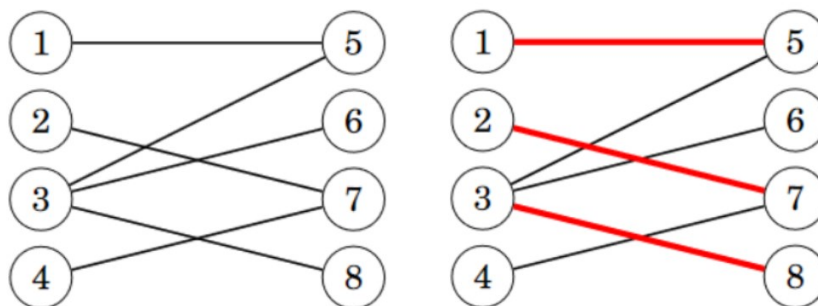


Obr. 3.5: Úplný bipartitní graf.  
Zdroj: (Unnithan et al. 2014)

### 3.2.7.2 Maximální párování grafu

Párování grafu je podmnožina hran grafu  $M \subseteq H$  taková, že žádné dvě hrany z této podmnožiny nemají společný uzel.

Maximální párování grafu (viz Obr. 3.6) je párování, které má největší možný počet hran. Pro párování úplného bipartitního grafu to znamená, že počet hran je roven počtu vrcholů v množině s méně prvky.



Obr. 3.6: Maximální párování (červeně) obecného bipartitního grafu.  
Zdroj: (Laaksonen 2018)

### 3.2.7.3 Hungarian algorithm

*Hungarian algorithm* se využívá při hledání optimálního párování dvou množin objektů takového, aby součet vah hran byl minimální (*minimum cost*), resp. maximální (*maximum cost*). Párování zároveň musí být maximální.

Algoritmus byl využit při hledání optimálních příček pro měření šířky vodního toku (viz kap. 4.3).

### 3.2.8 První diference

Uvažujme funkci jedné proměnné danou předpisem  $y = f(x)$ .

S využitím centrálních diferencí lze první zpětnou a dopřednou diferenci v bodě  $(x, y)$  zapsat jako

$$\nabla_h(x) = \frac{f(x) - f(x - h)}{h}, \quad (3.10)$$

$$\Delta_h(x) = \frac{f(x + h) - f(x)}{h}, \quad (3.11)$$

kde  $h$  představuje zvolený krok. První centrální diference má tvar

$$\delta_h^1(x) = \frac{\Delta_h(x) + \nabla_h(x)}{h} = \frac{f(x + h) - f(x - h)}{h}. \quad (3.12)$$

Pro jednotkový krok volíme  $h = 1$ .

### 3.2.9 Druhá diference

Druhá centrální diference je rozdílem prvních diferencí

$$\delta_h^2(x) = \frac{\Delta_h(x) - \nabla_h(x)}{h} = \frac{\frac{f(x+h) - f(x)}{h} - \frac{f(x) - f(x-h)}{h}}{h} = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2}, \quad (3.13)$$

pro jednotkový krok volíme  $h = 1$ .

### 3.2.10 Numerická derivace funkce

Uvažujme trojici za sebou následujících bodů  $p_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ ,  $p_i(x_i, y_i)$ ,  $p_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ .

První derivaci funkce lze vyjádřit s využitím první centrální diference

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1})}{x_{i+1} - x_{i-1}}, \quad (3.14)$$

analogicky určíme i druhou derivaci

$$f''(x_i) \approx \frac{f'(x_{i+1}) - f'(x_{i-1}))}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (3.15)$$

Derivaci v krajním bodě  $x_1$ , lze určit jako první dopřednou diferenci

$$f'(x_1) \approx \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}, \quad (3.16)$$

analogicky určíme i druhou dopřednou diferenci

$$f''(x_1) \approx \frac{f'(x_2) - f'(x_1)}{x_2 - x_1}. \quad (3.17)$$

Derivaci v krajním bodě  $x_n$ , lze určit jako druhou zpětnou diferenci

$$f'(x_n) \approx \frac{f(x_n) - f(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}}, \quad (3.18)$$

analogicky určíme i druhou zpětnou diferenci

$$f''(x_n) \approx \frac{f'(x_n) - f'(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}}. \quad (3.19)$$

Vztahy lze použít i pro nerovnoměrně rozmístěná data, kterými jsou právě naměřené šířky na vodním toku.

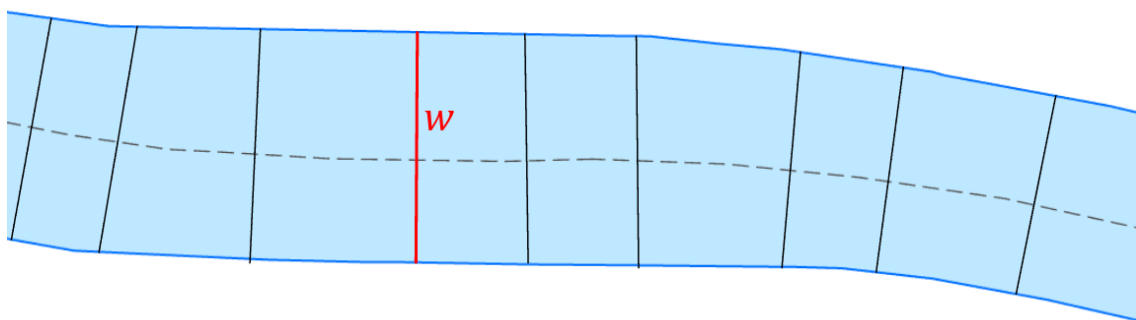
Hodnota první derivace bude ukazovat míru změny šířky vodního toku v daném místě, druhá derivace potom, jak moc se tato míra mění, resp. jak plynule vodní tok mění svou šířku.

### 3.3 Šířka vodního toku

Pavelsky a Smith (2008, s. 70) definují šířku koryta řeky jako „nejkratší příčnou vzdálenost od břehu k břehu, kolmou na koryto řeky“. Takto definovaná šířka často vyžaduje, aby se nejprve vytvořila osa vodního toku, na které se posléze vytvoří kolmice, s jejichž pomocí lze šířku lokálně určit.

Osa se dá získat pomocí skeletonizace, při níž se redukuje tvar polygonu na svoji **topologickou kostru** tzv. skeleton. Skeletony jsou v oblasti kartografické generalizace velmi významné, využívají se při prostorové redukci (viz kap. 2.3.1). Další způsob, jak měřit šířku vodního toku, využívá nejbližší vrcholy na obou březích k vrcholům skeletonu vodního toku, jejich vzdálenost představuje šířku vodního toku.

Pro účely této práce byla navržena metoda, která pomocné struktury nevyužívá, ale kombinuje hledání nejkratší vzdálenosti mezi vrcholy břehů (metoda nejbližšího souseda) a bipartitní párování. Podrobnější popis jednotlivých metod bude proveden v kap. 4.2. a 4.3.



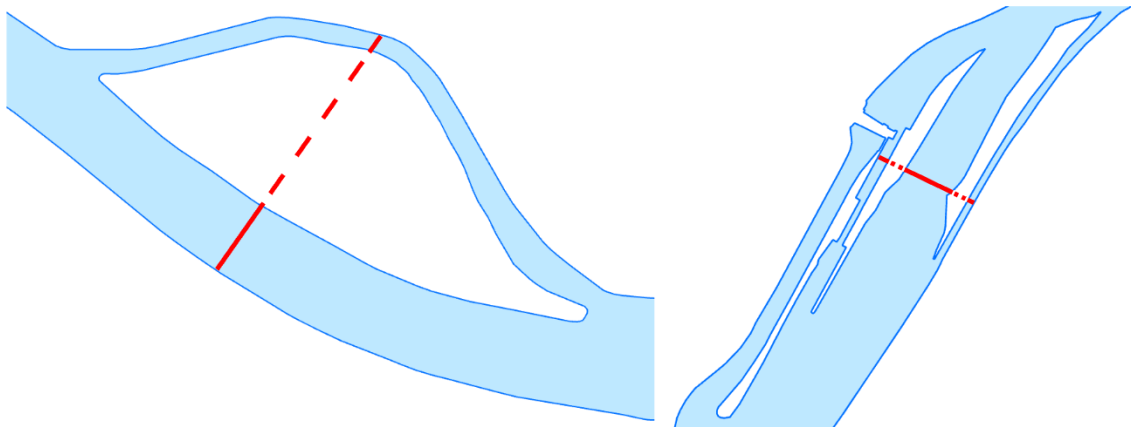
Obr. 3.7: Šířka vodního toku na pravidelném úseku.

Na pravidelných úsecích je určení šířky vodního toku poměrně jednoduché a intuitivní, jak je znázorněno na Obr. 3.7. Existují však situace, kdy vypočtená šířka více závisí na vstupních datech, způsobu měření a požadavcích uživatele. Jelikož vodní tok je přírodní prvek, nemá jednoznačně vymezené hranice. Jedním z příkladů jsou například úseky vodních toků s ostrovy, kdy není vždy jasné, jestli započítat šířku všech ramen nebo jen některá. Šířku těchto úseků lze pak odvodit:

- 1) sečtením vzdáleností mezi ostrovem a oběma břehy, případně i příčné vzdálenosti mezi ostrovy, pokud jich je na úseku více,
- 2) změřením délky příčky spojující oba břehy a odečtení délky jejího průniku s jedním nebo více ostrovy.

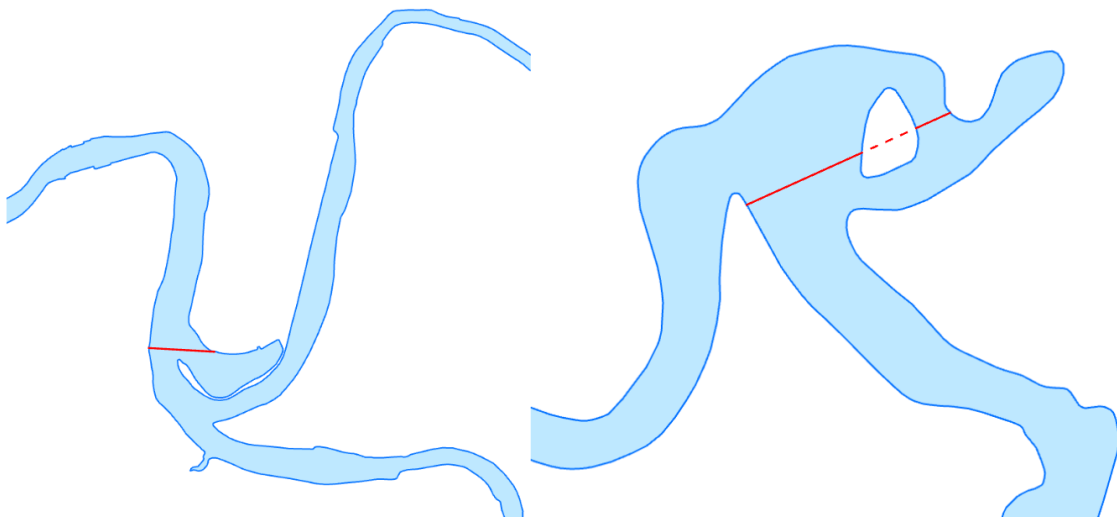
Druhý způsob byl zvolen k výpočtu šířky vodního toku v této práci.

**Problematická místa.** Problematickým místem mohou být také velmi **úzké ostrovy**, které šířku vodního toku zásadně neovlivňují. Mohou být problematické v případě, že by se šířka jednotlivých ramen okolo ostrova měřila jako parametr prostorové redukce. Šířka jednotlivých ramen kolem ostrova by mohla být dostatečně nízká pro prostorovou redukci, ale okolní úseky bez ostrovů nikoli. Problém lze vyřešit odstraněním těchto ostrovů ještě před měřením šířky. Šířka vodního toku na úseku s ostrovy je znázorněna na Obr. 3.8.



*Obr. 3.8: Šířka vodního toku na úseku s ostrovy.*

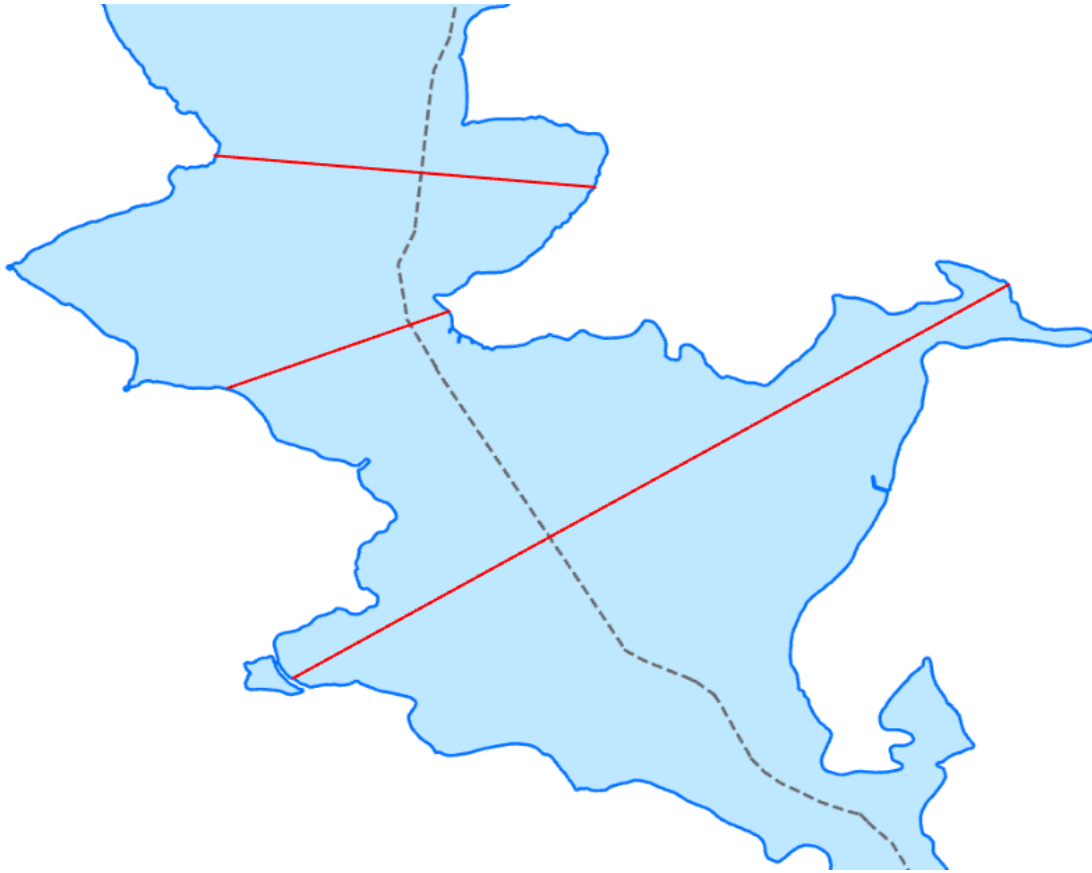
Nejednoznačné situace mohou také vznikát v blízkosti **slepých ramen** nebo zátok, kdy není jasné, kde je ještě měřený vodní tok, a kde začíná slepé rameno nebo zátoka. Naměřené šířky jsou zde zpravidla větší a mohou výsledná data zkreslovat (viz Obr. 3.9), proto se tyto příčky mohou odstranit nebo upravit metodu tak, aby se příčky na těchto místech netvořily.



*Obr. 3.9: Šířka vodního toku na nepravidelném úseku.*

Dalším komplikovaným případem jsou **vodní nádrže**, které se na vodním toku nachází. Jejich šířku můžeme také chápat jako vzdálenost břehů kolmou na osu vodního toku. Avšak nádrže často mívají komplikovaný tvar, tudíž navržená metoda pro výpočet šířky vodního toku nemusí být vhodná. Možné výsledné šířky vodních nádrže jsou znázorněny na Obr. 3.10.





Obr. 3.10: Šířka vodní nádrže.

### 3.4 Analýza změny šířky vodního toku

Pro sledování změn šířky vodního toku napříč měřítky můžeme použít řadu matematických/statistických ukazatelů. Po vizualizaci změn těchto parametrů bude možné zjistit, které části vodního toku generalizaci nejvíce podléhají. Pro analýzu byla použita první a druhá derivace.

#### 3.4.1 První derivace

První derivace udává míru změny. Když její absolutní hodnota vysoká, znamená to, že se vodní tok v tomto místě rychle zužuje nebo rozšiřuje. Pokud je hodnota derivace blízká nule, šířka vodního toku je na tomto úseku konstantní. Výpočet první derivace byl popsán v kap. 3.2.8.

#### 3.4.2 Druhá derivace

Druhá derivace vyjadřuje plynulost změny. V kombinaci s hodnotami první derivace mohou nastat čtyři případy:

- kladná první i druhá derivace – rozšiřování šířky vodního toku zrychluje,
- kladná první a záporná druhá derivace – rozšiřování vodního toku zpomaluje,

- záporná první a kladná druhá derivace – zužování vodního toku zpomaluje,
- záporná první i druhá derivace – zužování vodního toku zrychluje.

Výpočet druhé derivace byl popsán v kap. 3.2.9.

### 3.5 Vizualizace naměřených šířek

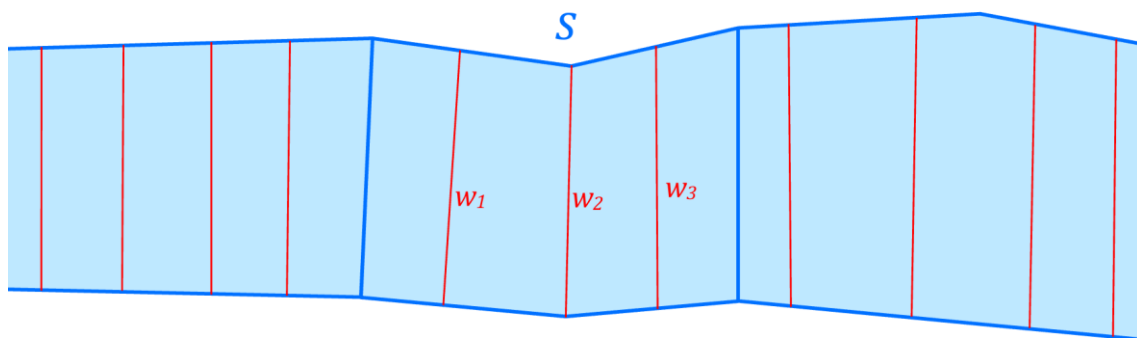
V následující podkapitole budou představeny metody vizualizace vhodné pro šířku vodního toku, a to graf, histogram a metody tematické kartografie (reprezentace barevnou škálou a tloušťkou linie).

#### 3.5.1 Graf

Jednoduchým způsobem lze vizualizovat šířku vodního toku napříč jeho délkou s využitím spojnicového nebo plošného grafu. Osa  $x$  reprezentuje kilometráž toku a osa  $y$  naměřené hodnoty šířky pro příslušnou kilometráž. Lze také vizualizovat hodnoty klouzavého průměru nebo šířky agregovat a průměrovat na předem definovaných intervalech kilometráže. Pro tři hodnoty viz Obr. 3.11, bude šířka segmentu vypočtena jako

$$w(s) = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3}. \quad (3.20)$$

Graf tak bude méně oscilovat a bude lépe reprezentovat trend změn v šířce vodního toku.



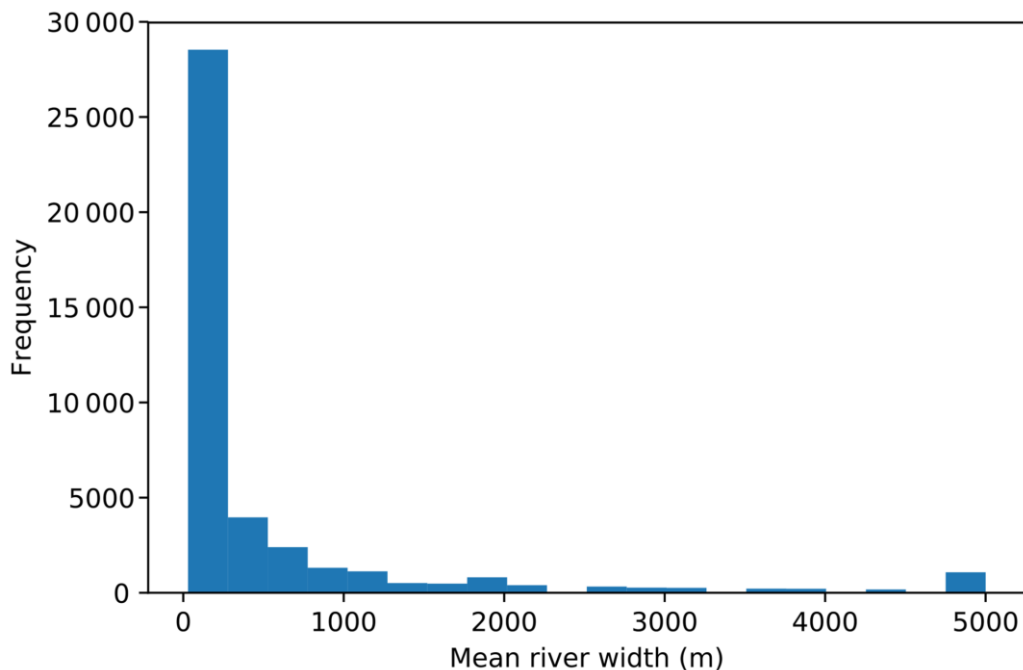
Obr. 3.11: Průměrná šířka vodního toku na segmentu.

Obdobně lze vizualizovat i další ukazatele, zejména první a druhou derivaci. Grafy první nebo druhé derivace šířek vodního toku v různých měřítkách lze porovnávat a zkoumat rozdíly v průběhu těchto funkčních závislostí.

#### 3.5.2 Histogram

Pro vizualizaci distribuce naměřených šířek lze použít histogram (viz ukázka na Obr. 3.12). Na ose  $x$  budou znázorněny intervaly šířek se zadaným krokem, a na ose  $y$  absolutní či relativní

četnosti šířek spadajících do intervalu. Histogramy šířek vodních toků lze porovnávat a sledovat rozdíly mezi nimi. Nevýhodou tohoto způsobu vizualizace je ztráta prostorové informace.

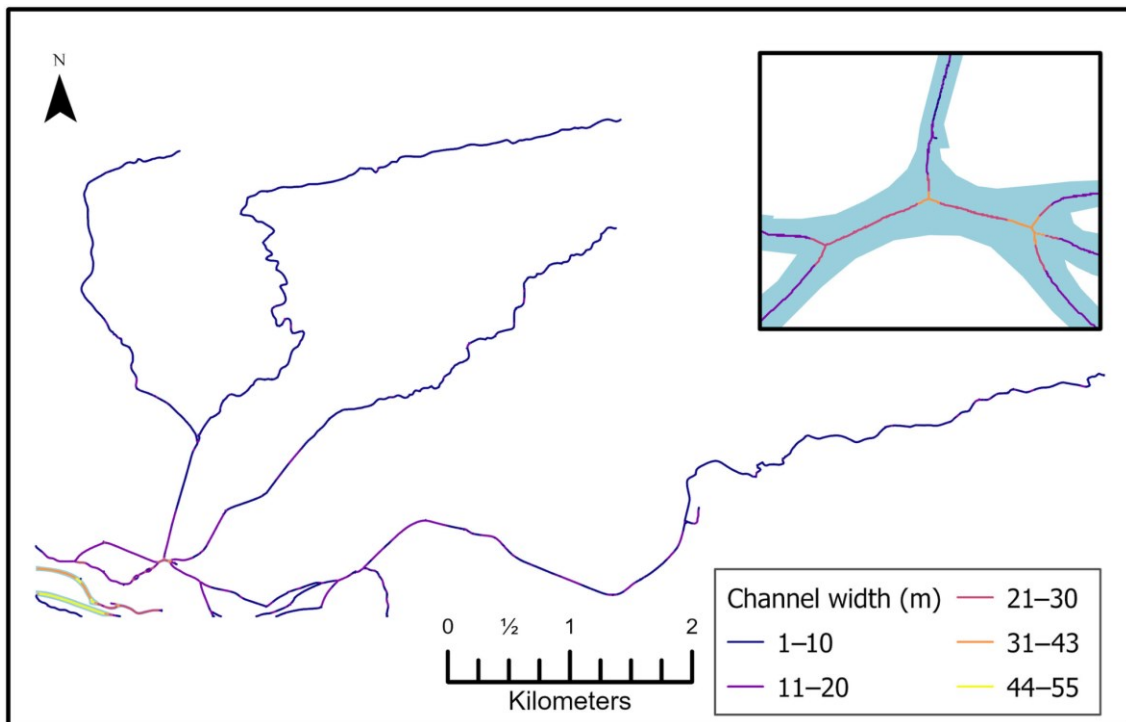


Obr. 3.12: Ukázka histogramu šířky vodního toku.

Zdroj: (Armitage 2019)

### 3.5.3 Metody tematické kartografie

Pro vizualizaci šířky vodního toku v mapě lze použít metody tematické kartografie. Liniový kartografický znak reprezentující vodní tok může měnit svou tloušťku nebo barvu jednotlivých segmentů na základě lokální šířky. Vzhledem k tomu, že data šířky vodního toku lze považovat za spojitá, je vhodné pro její vizualizaci použít spojitou škálu tlouštěk nebo barev. Pro zdůraznění rozdílů lze použít jiné než lineární měřítko. Šířku vodního toku reprezentovat liniovým kartografickým znakem s tloušťkou volenou jako druhou mocninu lokální šířky. Před samotnou vizualizací je potřeba linii vodního toku rozdělit na segmenty a ke každému z nich přidat atribut jeho průměrné šířky (viz Obr. 3.11). Vizualizovat lze i hodnoty první derivace napříč tokem, kdy je vhodné reprezentovat znaménka první derivace různými barvami. Na Obr. 3.13 lze vidět ukázkou diskrétní barevné škály. Výhodou metod tematické kartografie je zachování prostorové informace.



Obr. 3.13: Ukázka barevné škály pro znázornění šířky vodního toku v mapě.

Zdroj: (Scheleris et al. 2023)

## 4 Výpočet šířky vodního toku

Existuje několik základních strategií určování šířky vodního toku (Pavelsky, Smith 2008; Yamazaki 2014; Scheleris 2023). V této kapitole budou popsány následující metody:

- metody využívající pomocnou strukturu
  - metoda kolmic,
  - metoda nejkratší vzdálenosti od osy,
- hledání nejbližších vrcholů na protilehlém břehu,
- bipartitní párování.

Pro návrh vlastní metody zaměřené na výpočet šířky vodního toku byla v práci využita kombinace hledání nejbližších vrcholů na protilehlém břehu a bipartitního párování. Metoda dosáhla velmi dobrých výsledků, viz kap. 4.4.

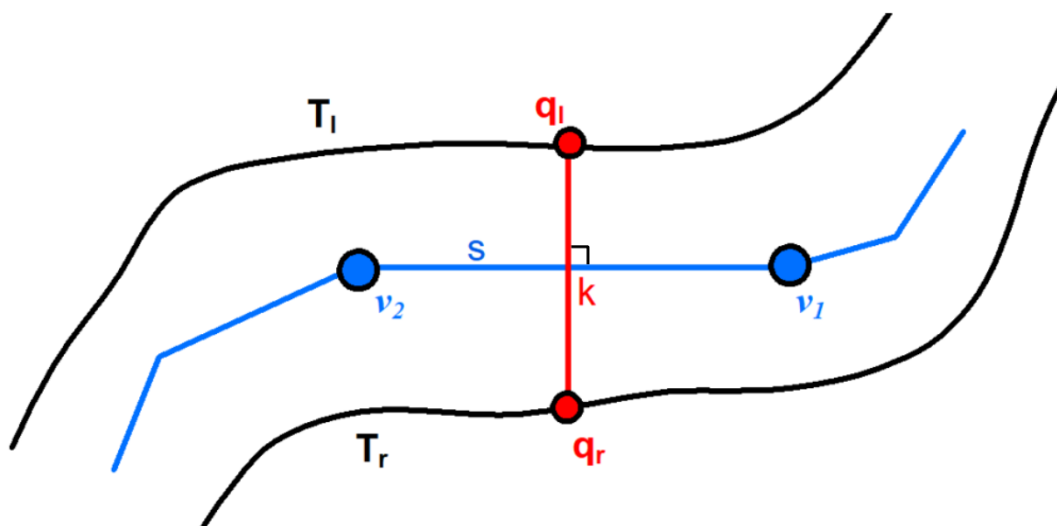
### 4.1 Metody využívající pomocnou strukturu

V následující kapitole budou představeny metody pro měření šířky vodního toku, které využívají jako pomocnou strukturu osu vodního toku. Pro aproximaci osy vodního toku lze použít skeleton. Nevýhodou těchto metod je jak závislost odvozených šířek na tom, jakým způsobem byla osa vodního toku aproximována, tak i výpočetní náročnost.

#### 4.1.1 Metoda kolmic

Pro užití této metody je třeba podél každého bodu osy vodního toku zkonstruovat linie, které jsou na ní kolmé. Lokální šířka vodního toku  $T$  je pak odvozena ze vzdálenosti průsečíků s oběma břehy (viz Obr. 4.1) jako

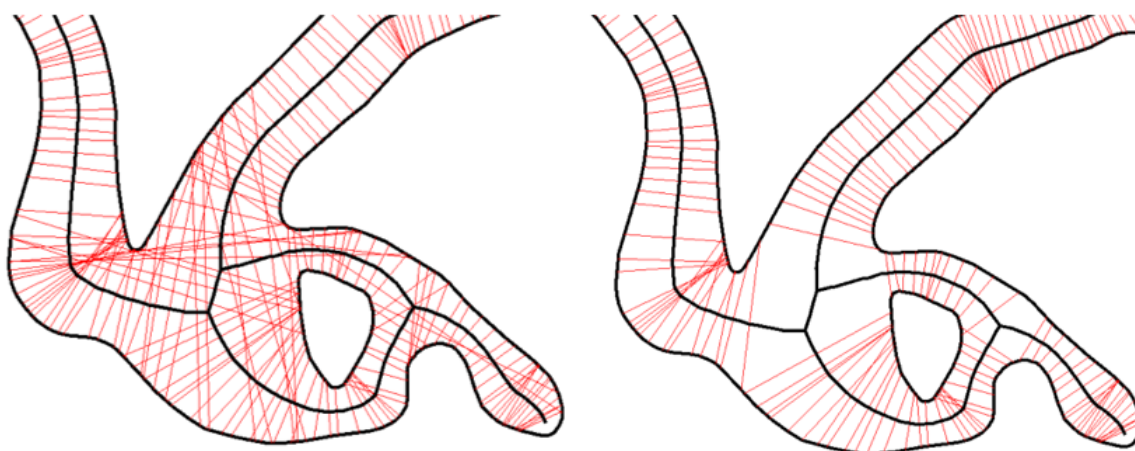
$$w(T) = d(q_l, q_r). \quad (4.1)$$



Obr. 4.1: Metoda kolmic.

Zdroj: (Mazur 2020), upraveno

Na Obr. 4.2 lze vidět, že ne všechny vygenerované kolmice správně reprezentují lokální šířku vodního toku. Tyto nevhodné kolmice je potřeba odstranit. Pro tento účel existuje několik postupů, např. odstranění těch kolmic, které protínají hodně jiných kolmic nebo osy jiných částí vodního toku (Mazur 2020).



Obr. 4.2: Vygenerované kolmice před odstraněním (vlevo), po odstranění (vpravo).

Zdroj: (Mazur 2020)

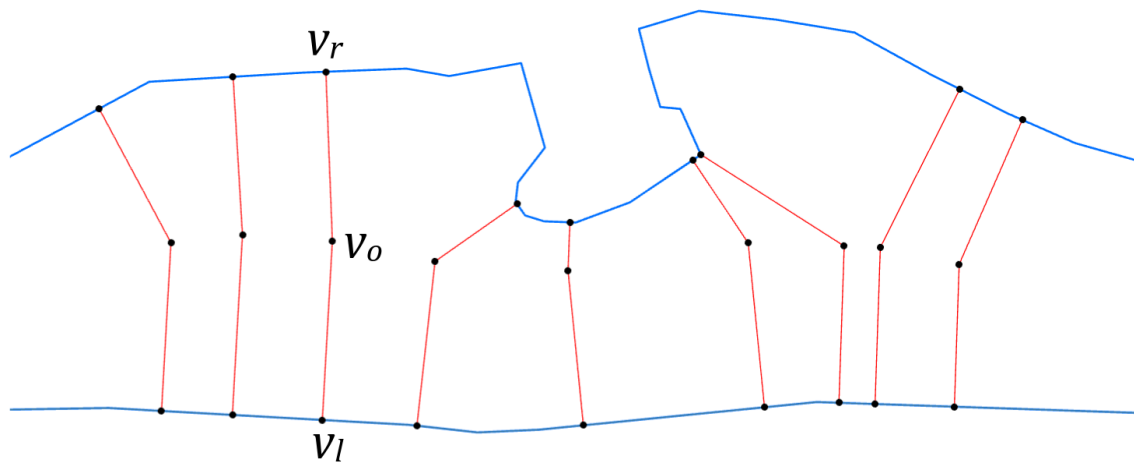
Měření touto metodou odpovídá definici šířky vodního toku podle Pavelskyho a Smitha (2008). Mazur (2020) umisťoval kolmice do středu každého segmentu osy vodního toku a následně některé neperspektivní odstranil. Kolmice tak nejsou rozmístěny pravidelně, což by se dalo zlepšit umisťováním kolmic v pravidelném délkovém intervalu podél osy. Metoda jinak poskytuje dobré výsledky.

### 4.1.2 Nejkratší vzdálenost mezi osou a břehy

Metoda spočívá v hledání nejkratší vzdálenosti mezi vrcholy osy toku a jednotlivými břehy (potažmo vrcholy břehů). Lokální šířka vodního toku  $T$  je pak součet vzdáleností vrcholu osy od levého a pravého břehu

$$w(T) = d(v_o, v_l) + d(v_o, v_r). \quad (4.2)$$

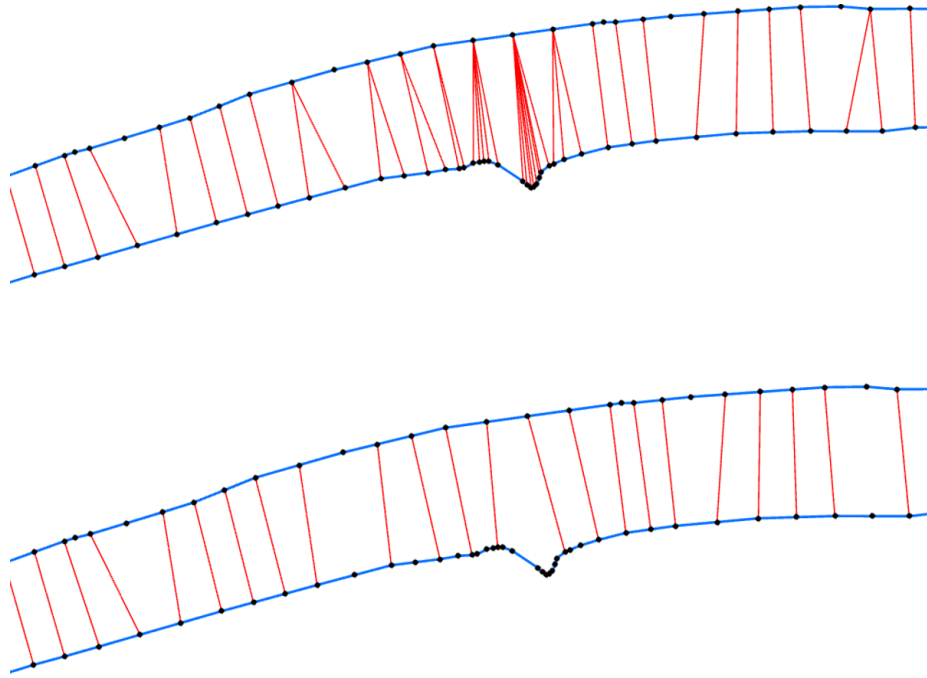
Metoda je poměrně jednoduchá a poskytuje dobré výsledky, až na úseky, kde se tok zužuje nebo má jiné nepravidelnosti. Situace je znázorněna Obr. 4.3.



Obr. 4.3: Metoda nejkratší vzdálenosti mezi osou a břehy.

### 4.2 Metoda nejbližších vrcholů na protilehlém břehu

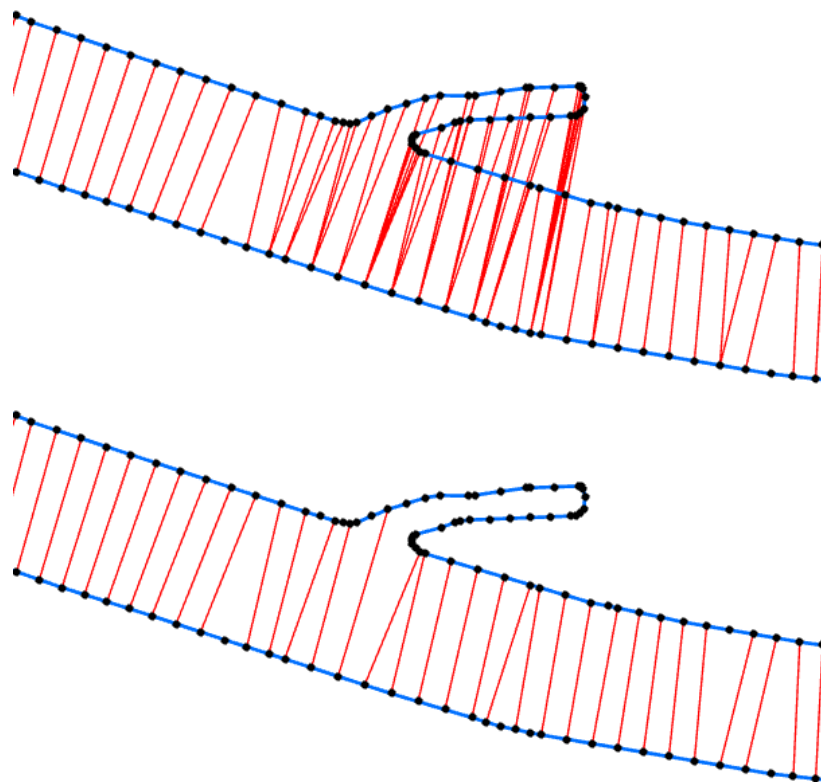
Tato metoda spočívá v hledání nejbližšího vrcholu na pravém břehu pro vrcholy levého břehu nebo naopak, a to s využitím metody nejbližšího souseda (viz kap. 3.2.4). Tato metoda byla využita v první fázi navrhované metody pro výpočet šířky vodního toku. Jelikož se počty vrcholů na složitějších úsecích toku liší, pro zlepšení výsledku je třeba břehy převzorkovat s pravidelným intervalem. I po převzorkování může nastat nevhodná situace (viz Obr. 4.4), kdy více vrcholů jednoho břehu má společný nejbližší vrchol na břehu protilehlém, což lokální šířku zkresluje. Z každého „shluku“ byla ponechána pouze nejkratší příčka.



*Obr. 4.4: Vygenerované příčky před odstraněním shluků (vlevo), po odstranění shluků (vpravo)*

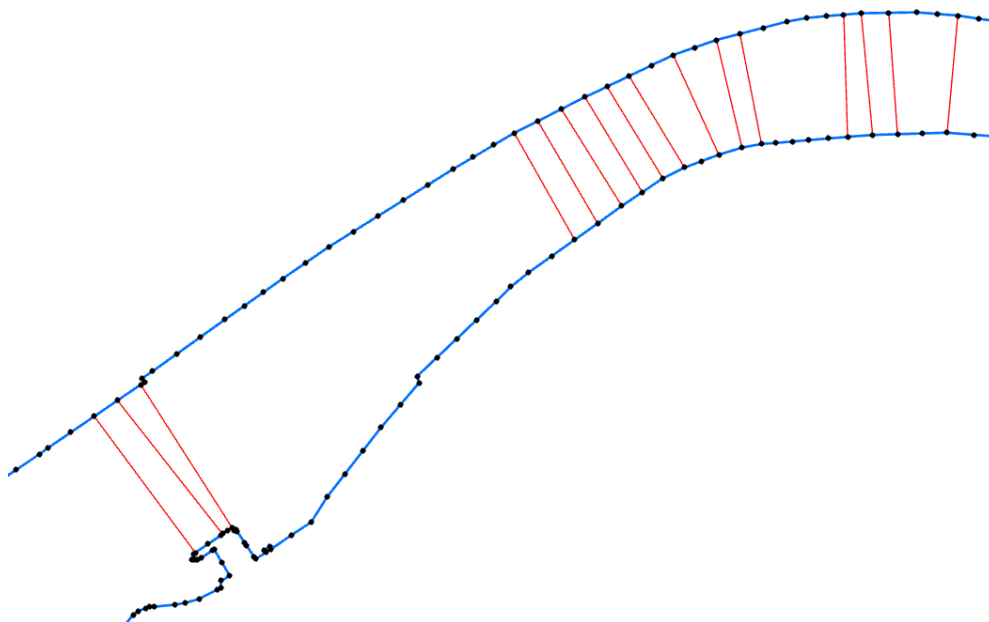
V případě, že ve vstupních datech jsou součástí břehovky slepá ramena, která by do výsledné šířky neměla být započítána, musí být odstraněny příčky vycházející z těchto ramen. Většina z nich je odstraněna v předchozím kroku, ostatní pak s pomocí orientovaného hledání popsaného v kapitole 3.2.6. Situace je znázorněna na Obr. 4.5.





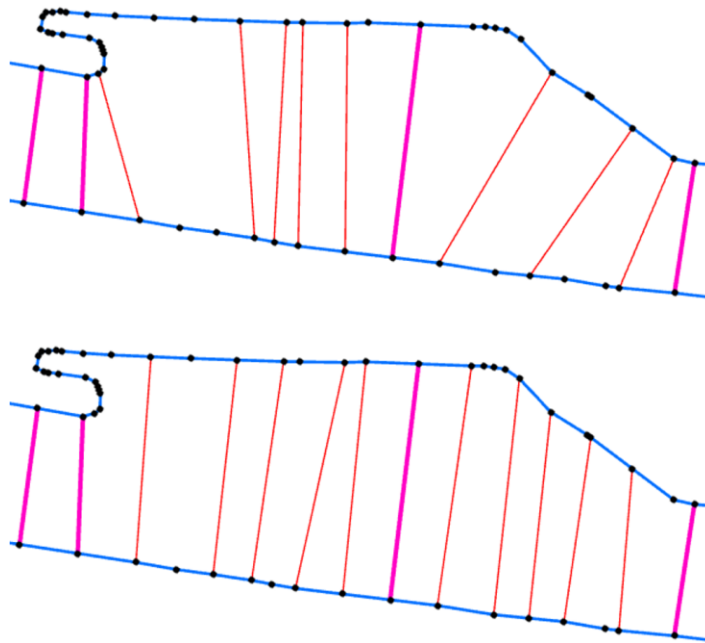
Obr. 4.5: Vygenerované příčky před odstraněním shluků a orientovaným hledáním (vlevo), po odstranění shluků a orientovaném hledání (vpravo)

**Dvojité příčky.** Existují dvojice vrcholů na protilehlých březích takové, že vrchol na pravém břehu je nejbližším vrcholem pro vrchol levého břehu a naopak. Tyto dvojice zpravidla vznikají na pravidelných úsecích a zúžených místech toku. Na Obr. 4.6 lze vidět, že délka těchto příček reprezentuje šířku velmi dobře. Nadále tyto příčky budou označovány jako dvojité.

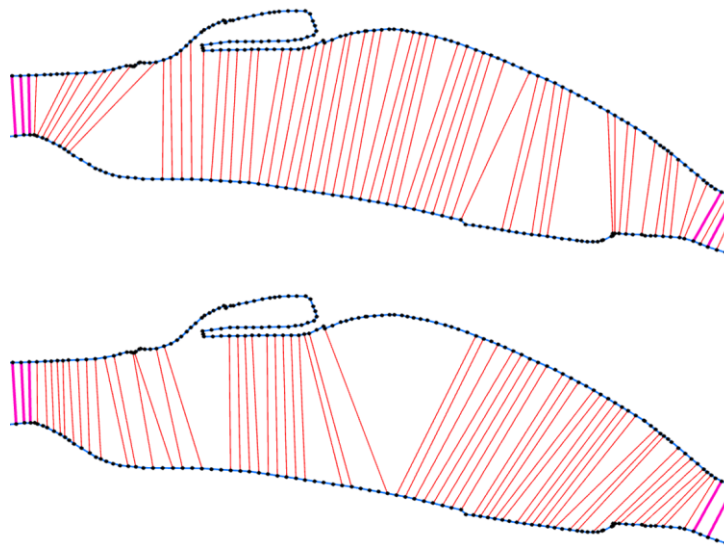


*Obr. 4.6: Dvojité příčky.*

Úseky mezi dvojitými příčkami jsou často nepravidelné, břehy mají výrazný rozdíl v délce anebo v počtu vrcholů, popř. je tok nesymetrický. Experimentálně bylo zjištěno, že v mnoha případech jedna z množin příček vygenerovaná metodou nejbližších vrcholů reprezentuje na úseku velmi dobré výsledky. Situace je znázorněna na Obr. 4.7, ze kterého je zřejmé, že příčky zobrazené dole reprezentují šířku toku lépe a v pravidelnějších intervalech. Existují však i případy, kdy ani jeden ze setů příček není pro reprezentaci šířky vhodný, a to zpravidla na oboustranně se rozšiřujících úsecích, viz Obr. 4.8.



Obr. 4.7: Nevhodně vygenerované příčky (nahore), vhodně vygenerované příčky (dole).



Obr. 4.8: Ukázka úseku, kde se příčky nevhodně generují z obou břehů.

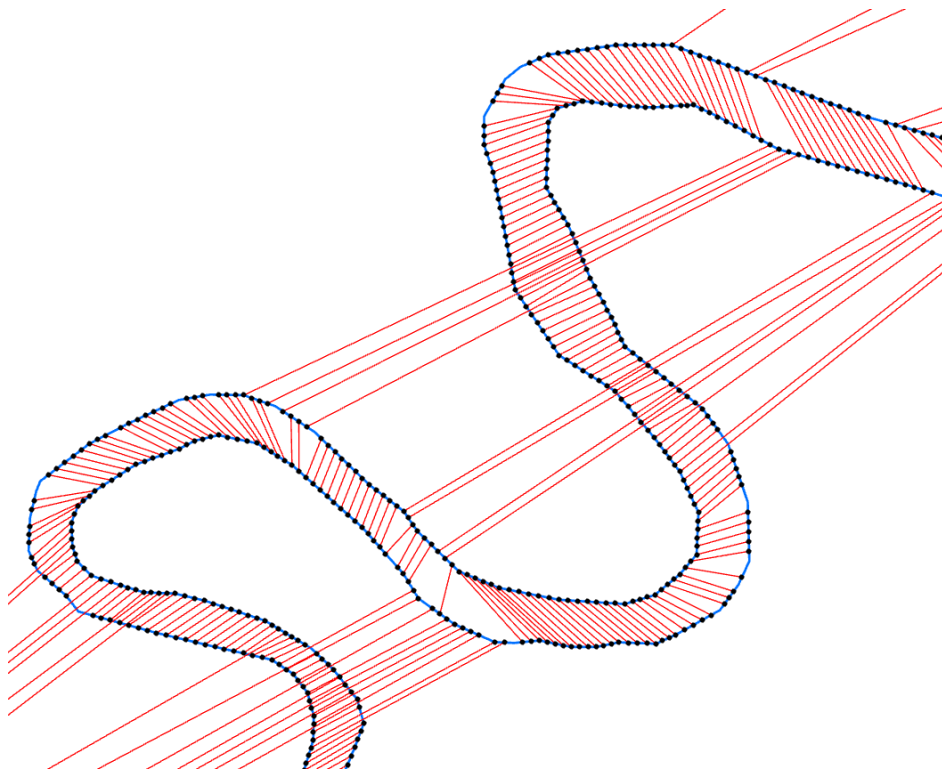
Z obrázků je patrné, že tato metoda má potenciál generovat dobré výsledky. Její konkrétní užitá podoba bude popsána v kap. 4.4, kde byla použita v kombinaci s bipartitním párováním (viz kap. 4.3).

### 4.3 Vylepšení s využitím bipartitního párování

Bipartitní párování (popsané v kap. 3.2.7) má smysl použít na párování vrcholů protilehlých břehů v případě, že byly odstraněny vrcholy nechtěných výběžků. Obecně ho nelze použít na

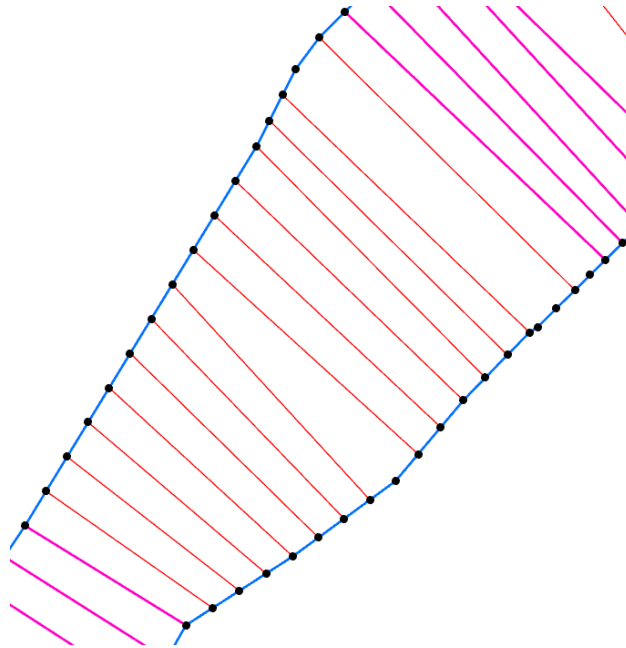
celé toky vzhledem k tomu, že metoda je ovlivněna tvarem toku, což při měření lokální šířky může zkreslovat výsledky, obzvlášť u meandrujících vodních toků, viz Obr. 4.9. Další nevýhodou je, že bipartitní párování je výpočetně náročné, tudíž není vhodné ho používat na velké množiny dat.

Můžeme uvést příklad, že levý břeh má méně vrcholů než břeh pravý, tudíž všechny vrcholy levého břehu musí být přiřazeny některým vrcholům pravého břehu. Na toku se ale nachází pravotočivý meandr, jehož vnitřní oblouk na pravém břehu má méně vrcholů než jeho vnější oblouk na levém břehu. Lokálně je tedy více vrcholů na levém břehu, které se nemají kam přiřadit v rámci meandru, musí se tak přiřadit jinam. Příčky spojující tyto dvojice vrcholů nejsou bez dalších úprav pro výpočet šířky použitelné.



*Obr. 4.9: Ukázka užití bipartitního párování na celém vodním toku.*

Použití této metody lokálně v některých případech vrací dobré výsledky, viz obr 4.10, často velmi podobné nebo identické jako při použití metody nejbližších vrcholů (viz kap. 4.2). Konkrétní využití bipartitního párování ve výsledném algoritmu je popsáno v kap. 4.4.4.



Obr. 4.10: Ukázka bipartitního párování na úseku.

## 4.4 Navržená metoda pro výpočet šířky vodního toku

Jak bylo uvedeno v kapitolách 4.2 a 4.3, základní princip měření šířky spočívá v hledání nejkratší vzdálenosti mezi břehy, respektive hledání nejbližšího vrcholu na protilehlém břehu. Následně bude pro vylepšení výsledků využito bipartitního párování. V této části bude představena konkrétní podoba metody pro výpočet šířky.

Vlastní algoritmus lze rozdělit do několika fází:

- 1) hledání nejbližších vrcholů na protilehlém břehu pro levý a pravý břeh,
- 2) odstranění nevhodných příček zahrnující:
  - a) odstranění shluků,
  - b) orientované hledání,
- 3) nalezení dvojitých příček,
- 4) provedení bipartitního párování na úsecích vodního toku,
- 5) závěrečný výběr příček,
- 6) odečtení šířky ostrova.

### 4.4.1 Hledání nejbližších vrcholů na protilehlém břehu

V této fázi bylo využito metody nejbližšího souseda, která je blíže popsána v kap. 4.2. Byla implementována s využitím knihovny *scikit-learn*. Úsečku spojující dvojici nejbližších vrcholů budeme nadále označovat jako příčka. Jedinými vstupními parametry pro funkci jsou

souřadnice vrcholů (seřazené podle směru toku) na obou březích, kde  $Q$  (*query points*) jsou vrcholy břehu, pro které hledáme nejbližší vrcholy v množině  $P$  (*points*). Metoda byla aplikována oboustranně, tzn. byly hledány nejbližší vrcholy pravého břehu pro každý vrchol levého břehu a naopak. Funkce pro každé  $q$  vrací index nejbližšího bodu  $p$  a jejich vzájemnou vzdálenost  $d$ .

#### 4.4.2 Odstranění nevhodných příček

Problém sbíhajících se příček v jednom vrcholu a příček vycházejících z ramen byl vysvětlen v kap. 4.2. Téměř všechny tyto příčky byly odstraněny aplikováním těchto dvou metod:

- a) ponechání pouze nejkratší příčky ze shluku v jednom vrcholu,
- b) využití orientovaného hledání.

##### 4.4.2.1 Ponechání pouze nejkratší příčky ze shluku v jednom vrcholu

Cílem tohoto kroku je, aby žádný vrchol na břehu nebyl při tvorbě příček použit více než jednou. Tento krok odstraní většinu příček vycházejících z říčních ramen a zálivů, které jsou součástí břehu, a příčky spojující břehy hlavního toku tak, aby byla ponechána pouze nejkratší příčka ze shluku. Tento krok je potřebný pro aplikaci další fáze algoritmu založené na bipartitním párování.

Pro provedení tohoto kroku je třeba znát dvojice vrcholů  $p_i$  a  $q_j$  tvořící příčku  $(p_i, q_j)$  a jejich vzdálenost  $d_{i,j}$  (délku příčky), které byly získány v předchozím kroku. Pro každé unikátní  $p_i$  existuje množina  $Q_i$ , jejíž prvky tvoří s vrcholem  $p_i$  příčku. Z množiny  $Q_i \in q$  je vybrán ten vrchol, který je danému vrcholu  $p_i$  nejbližší (viz Obr. 4.5).

##### 4.4.2.2 Orientované hledání

V tomto kroku se odstraní ty příčky, které neprocházejí napříč tokem, ale vně toku. Bylo využito orientovaného hledání popsaného v kap. 3.2.6.

Vektorový součin  $\vec{u} \times \vec{v}$  vektoru příčky  $\vec{u}$  a vektoru segmentu  $\vec{v}$  je proveden jen pro ty segmenty břehu, se kterými příčka sdílí vrchol (viz. Obr. 3.4). Jsou vybrány ty příčky, pro které platí vztah (3.6) v případě, že příčka vychází z levého břehu, a (3.7) v případě, že příčka vychází z levého břehu.

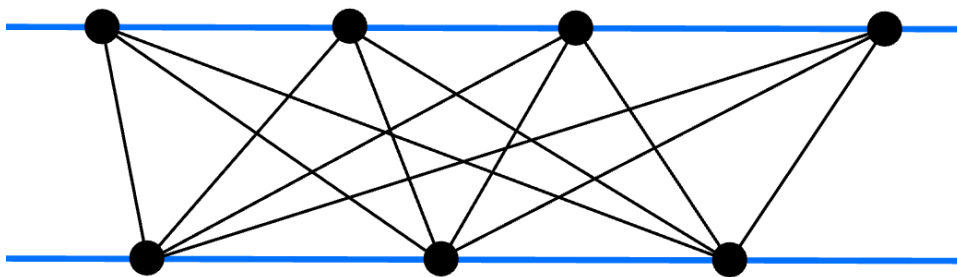
#### 4.4.3 Výběr dvojitých příček

Význam tohoto kroku je popsán v kap. 4.2. Po získání obou setů příček metodou nejbližšího souseda lze nalézt dvě příčky z různých setů, které jsou identické. Ty zpravidla vznikají na

pravidelných částech nebo v zužujících se místech vodního toku (viz Obr. 4.6). Kromě získání šířky, kterou na daných místech délka  $d$  těchto příček reprezentuje poměrně dobře, tyto příčky budou dále sloužit k rozdělení toku na části, ve kterých proběhne výběr vedlejších příček odděleně. Všechny dvojité příčky byly ponechány pro zjištění výsledné šířky.

#### 4.4.4 Bipartitní párování

Potenciální příčku si můžeme představit jako hranu úplného bipartitního grafu (viz kap. 3.2.7.1), kde disjunktními množinami jsou vrcholy na levém břehu a vrcholy na pravém břehu (viz Obr. 4.11). Na tomto grafu pak proběhne *minimum cost bipartite matching* (viz 3.2.7.3), kde vahou jednotlivých hran je jejich délka (délka potenciální příčky).



Obr. 4.11: Úplný bipartitní graf znázorněný na vodním toku.

Bipartitní párování proběhlo zvláště na úsecích mezi dvojitými příčkami. Pracovalo se pouze s těmi vrcholy, které tvoří alespoň jednu příčku, která vznikla během metody nejbližšího souseda.

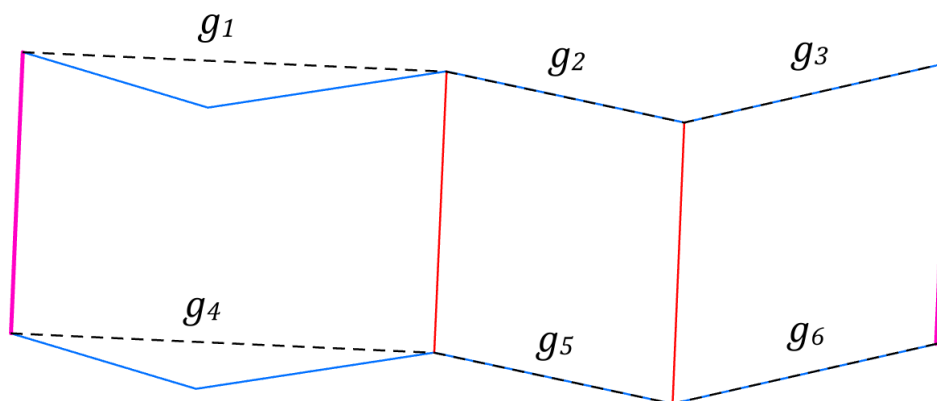
#### 4.4.5 Výběr vedlejších příček

V tomto kroku jsou vybrány příčky pro každý segment mezi dvojitými příčkami. Vybírá se mezi třemi sety příček:

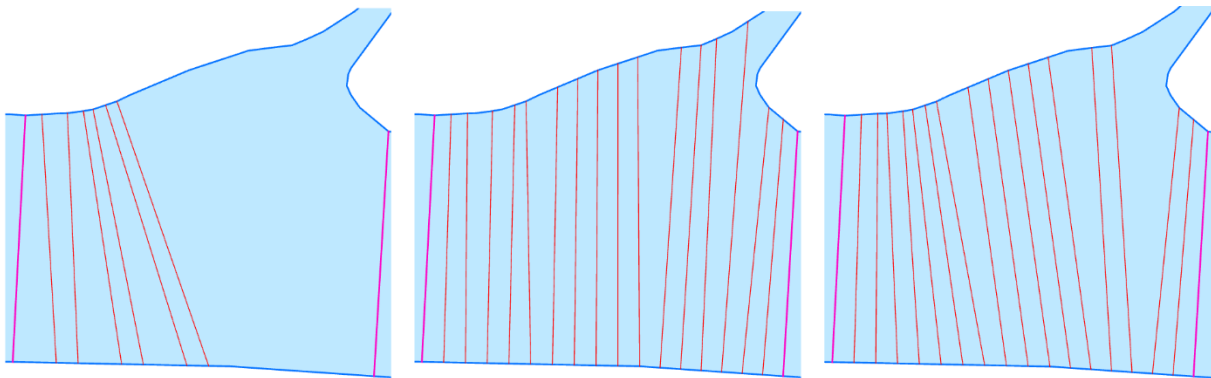
- příčky vzniklé při hledání nejbližšího vrcholu na pravém břehu pro vrcholy levého břehu (po odstranění shluků a orientovaném hledání),
- příčky vzniklé při hledání nejbližšího vrcholu na levém břehu pro vrcholy pravého břehu (po odstranění shluků a orientovaném hledání),
- příčky vzniklé bipartitním párováním.

Výběr probíhá na základě vzdálenosti vrcholů po sobě jdoucích příček na jednom břehu. Mezery ( $g_1, g_2, \dots, g_6$ ) jednoho úseku jsou znázorněny na Obr. 4.12. Tyto mezery jsou spočteny pro každý set na obou březích a následně jsou porovnány největší mezery každého setu. Ten set, který má tuto mezeru nejmenší je vybrán do finálních příček. V případě, že jsou mezery

stejně, porovnávají se druhé největší mezery atd. V situaci na Obr. 4.13 by tak byla zvolena prostřední varianta, jelikož jsou příčky rozmístěny nejpravidelněji resp. mají nejmenší mezery.



Obr. 4.12: Mezery mezi příčkami.



Obr. 4.13: Příčky vzniklé při hledání nejbližšího vrcholu na pravém břehu pro vrcholy levého břehu (vlevo), příčky vzniklé při hledání nejbližšího vrcholu na levém břehu pro vrcholy pravém břehu (uprostřed), příčky vzniklé bipartitním párováním (vpravo).

#### 4.4.6 Odečtení šířky ostrova

Před uložením délek příček (lokálních šířek) je od nich odečtený případný průnik s ostrovy, pokud nějaký ostrov protínají. Situace je znázorněná na Obr. 3.8.

### 4.5 Hodnocení metody

Z předběžných testů je patrné, že metoda poskytuje dobré výsledky dostačující pro účely této práce. Na většině úsecích jsou získaná měření pravidelně rozmístěna a jsou „přesná“ s ohledem na definici šířky. Avšak na některých složitých úsecích algoritmus poskytuje zkreslené hodnoty. Za tato slabá místa navržené metody můžeme považovat:



### 1) Vynechané vrcholy

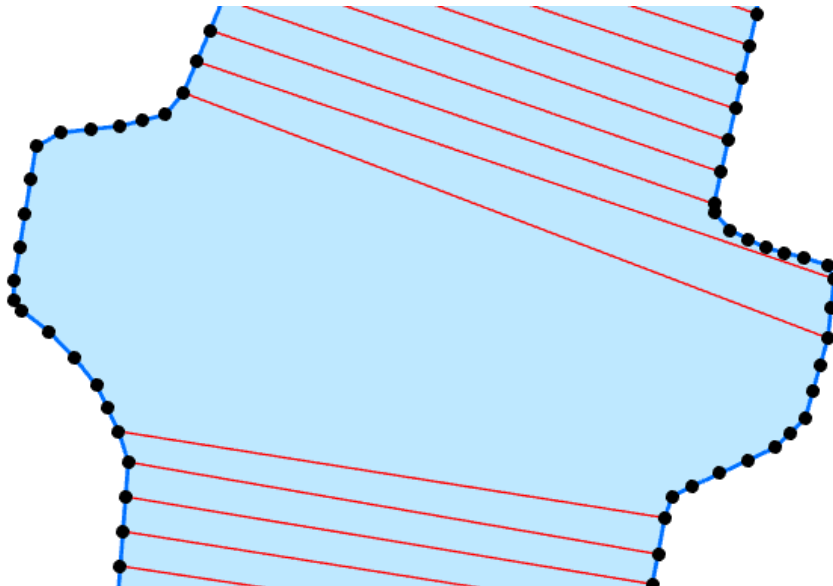
Jelikož metoda před finálním výběrem příček provádí bipartitní párování pouze těch vrcholů, které byly před tím použity v hledání nejbližšího souseda (celý postup byl popsán v kap. 4.2), některé vrcholy jsou zbytečně vynechány a nemohou být vrcholem příčky. Situaci lze vidět na Obr. 4.14. Tento způsob byl zvolen z důvodu vyfiltrování vrcholů ležících na slepých ramenech nebo zátokách, kde by měření bylo výrazně zkresleno (viz kap. 3.3). Tuto fázi metod by šlo vylepšit, pokud by celá ramena a zátoky byly identifikovány na základě geometrických vlastností břehů.

### 2) Citlivost na ostré konvexní vrcholy

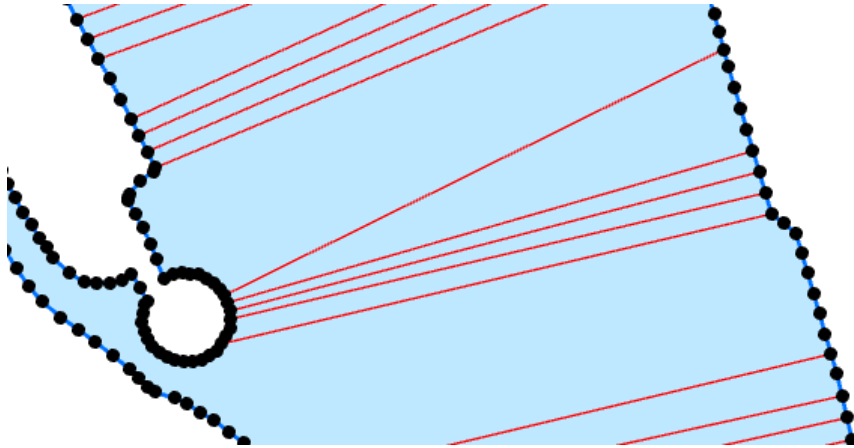
Na úsecích, kde se vyskytují konvexní vrcholy, se příčky často tvoří nevhodně. Důvodem je fakt, že tyto vrcholy jsou zpravidla nejbližší vrcholům protilehlého břehu. Situace je znázorněna na Obr. 4.15.

### 3) Výpočet šířky vodních nádrží

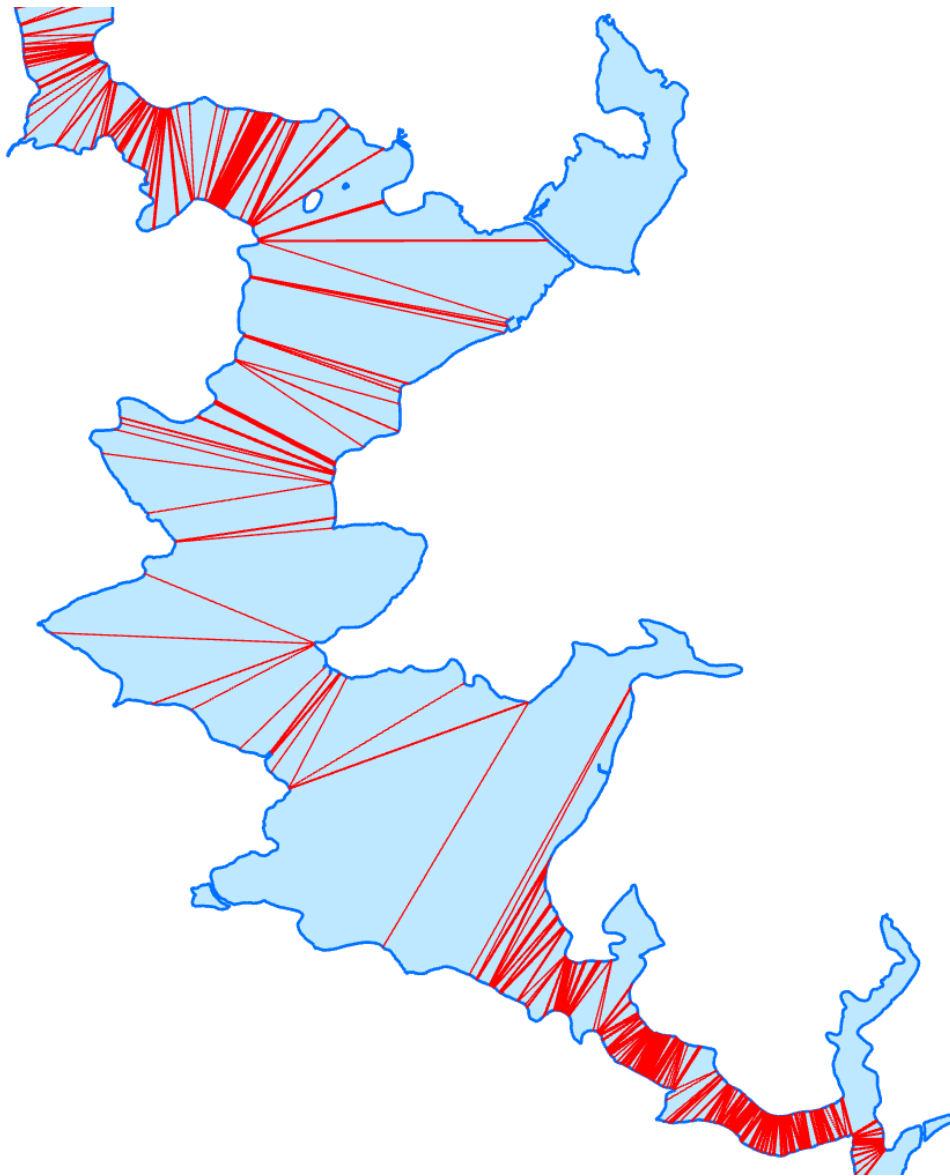
Jelikož vodní nádrže mohou mít velmi nepravidelné tvary, výsledné šířky jsou nepřesné a příčky nejsou umístěny pravidelně (viz Obr. 4.16). Metoda s těmito nepravidelnostmi nepočítá, její rozšíření pro vodní plochy by bylo výrazně složitější než na pravidelné vodní toky.



Obr. 4.14: Ukázka vynechaných vrcholů.



Obr. 4.15: Ukázka konvexních vrcholů.



Obr. 4.16: Ukázka nepřesného měření šířky vodní nádrže Lipno.

## 4.6 Základní informace o implementaci

Algoritmus byl implementován v programovacím jazyce Python, verze 3.11.6. Metoda nejbližšího souseda byla implementována za pomoci knihovny *scikit-learn*. Pro bipartitní párování (*hungarian algortihm*) bylo využito knihovny *scipy*. Šířka ostrova byla odečtena s využitím funkcí *shapely*. Zbylé operace (např. odstranění shluků, vektorový součin, dvojité příčky) byly implementovány s využitím kombinace funkcí knihovny *numpy*. Konkrétní skript *final\_widths.py* lze najít v příloze.

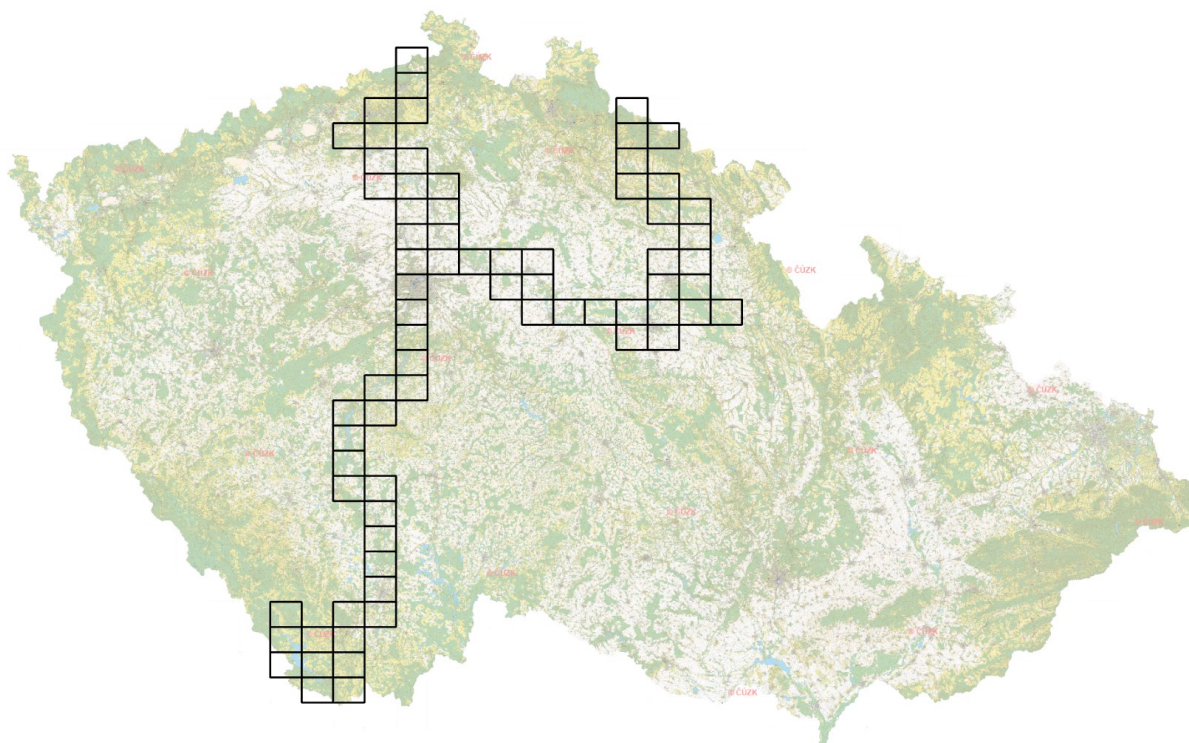
Algoritmus byl implementován s využitím vývojovém prostředí Visual Studio Code. Veškeré experimenty byly provedeny na zařízení Acer Swift SF315-51, Procesor Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz, 8 GB RAM s operačním systémem Windows 11.

## 5 Výsledky

V této kapitole budou prezentovány výsledky získané pomocí algoritmu na výpočet šířky vodního toku. Následně budou diskutovány možnosti vizualizace spočtené šířky a z nich odvozených statistických parametrů.

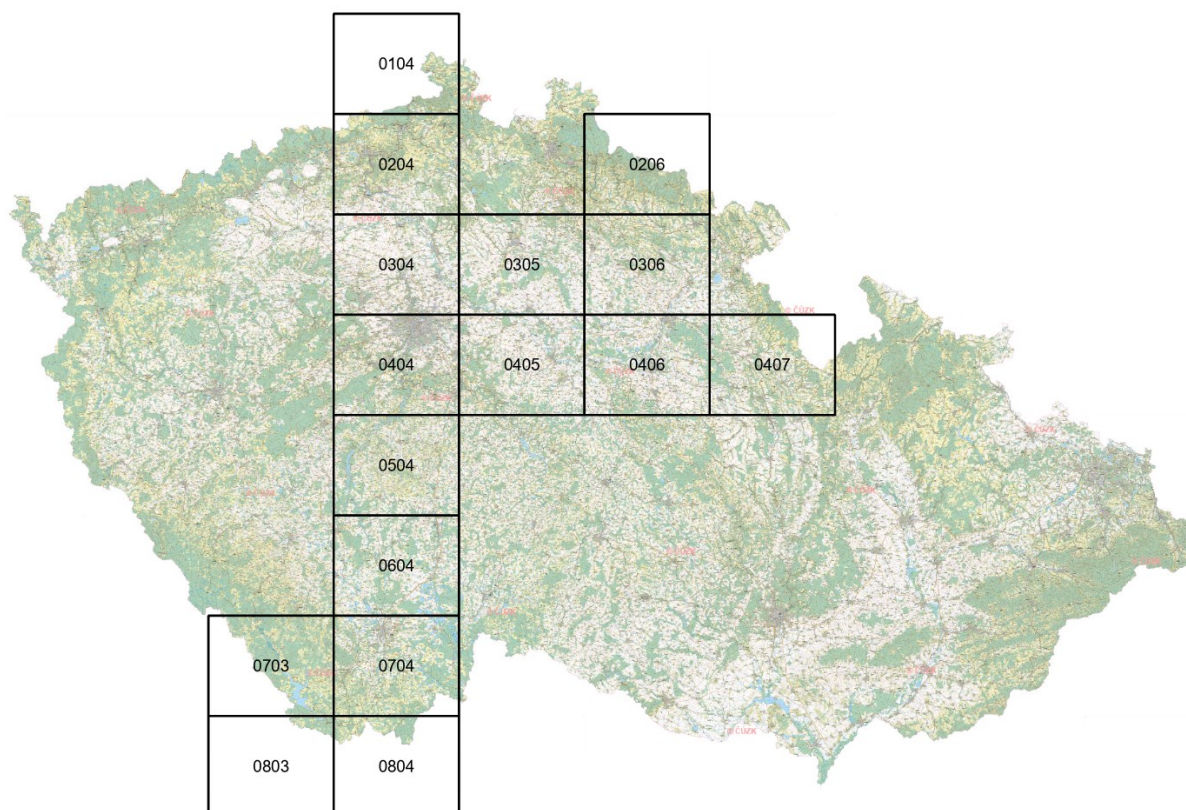
### 5.1 Analyzované vodní toky

Pro analýzu byly vybrány vodní toky Labe, Orlice a Vltava. Použitá data jsou ze Základní topografické mapy ČR v měřítcích 1 : 25 000 (ZTM25), 1 : 100 000 (ZTM100) a 1 : 250 000 (ZTM250). Datasets jednotlivých listů podle kladu se soubory formátu *shapefile* jsou volně ke stažení ze stránek ČÚZK. Pro další zpracování musely být staženy ty datasety, na jejichž příslušných listech je zakreslena alespoň část ze zkoumaných vodních toků. Mapu pokrytí pro jednotlivá měřítka lze vidět na Obr. 5.1–5.3.

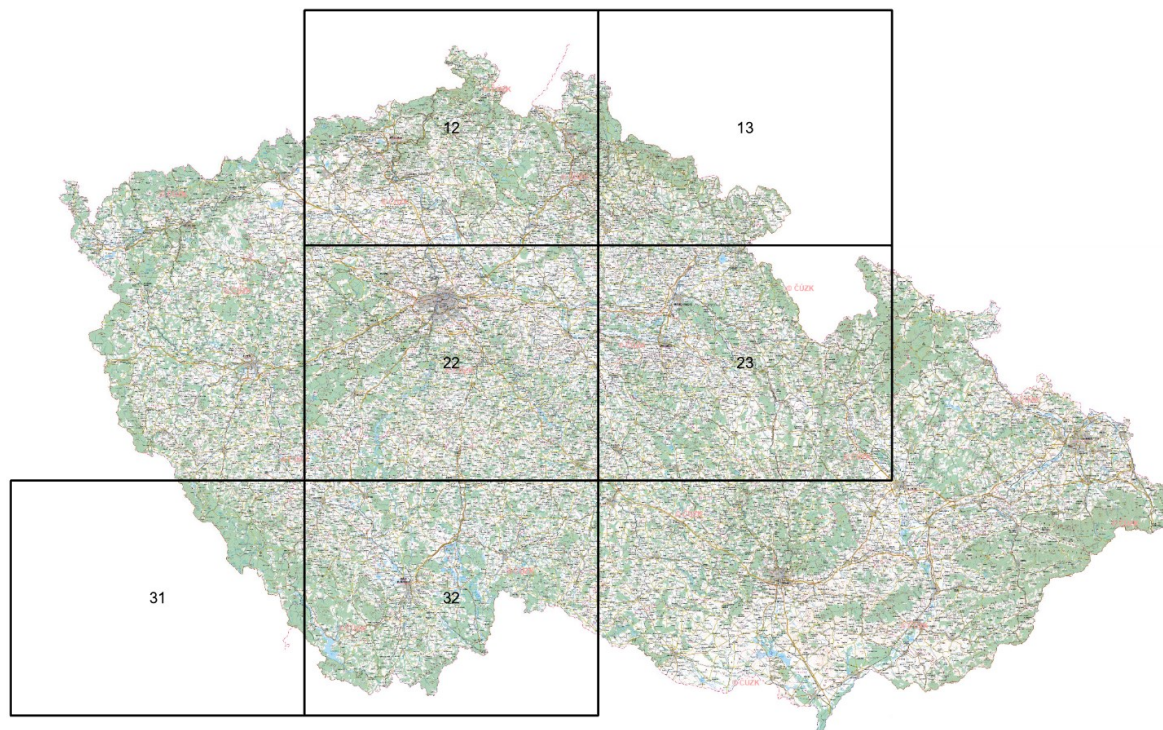


Obr. 5.1: Mapa pokrytí analyzovaných vodních toků v ZTM25.





Obr. 5.2: Mapa pokrytí analyzovaných vodních toků v ZTM100.
















































Obr. 5.3: Mapa pokrytí analyzovaných vodních toků v ZTM250.

## 5.2 Předzpracování dat

Data byla předzpracována v softwaru ArcGIS Pro. Pro ZTM25 a ZTM100 se jednalo o soubory *Z\_Voda\_P.shp*, které obsahují vodní plochy reprezentované polygonem (včetně vybraných částí vodních toků) a *Z\_Voda\_L.shp*, které obsahují veškeré vodní toky reprezentované linií (nezáleží, zda je vodní tok ve výsledné mapě reprezentován linií nebo polygonem), obdobně v ZTM250 soubor *WatercrsL.shp*. V ZTM250 jsou vodní plochy reprezentované polygonem rozděleny do dvou souborů, *WatercrsA.shp* s vodními toky a *LakeresA.shp* se zbylými vodními plochami (jezera, vodní nádrže atd.).

Následně byla manuálně vybrána liniová data pro každý ze zkoumaných toků, jednoduše vyfiltrovaná podle atributu s názvem toku. Jelikož polygony vodních toků v ZTM25 a ZTM100 nemají atributy s názvy vodních toků, popř. vodních nádrží, musely být vybrány za použití *Select By Location*, kde podmínkou výběru byl průnik s vyfiltrovanou liniovou vrstvou vodních toků. Pro finální výběr musely být provedeny drobné manuální úpravy. Liniová reprezentace je uložena v souboru *line.shp* a byla využita při vizualizaci šířky vodního toku a parametrů z ní odvozených.

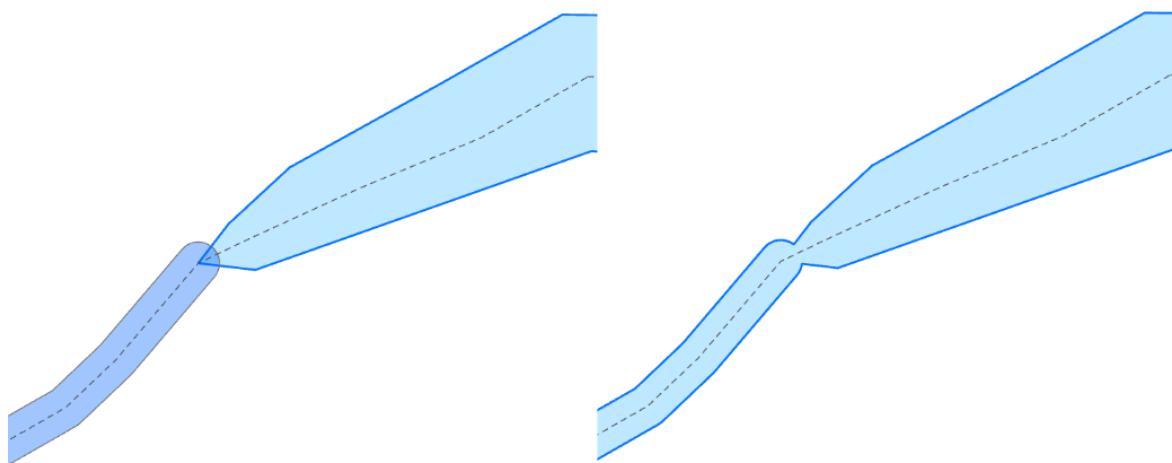
Číslo značky	Podlomení	Předmět	Blížeší určení	Kód typu objektu (feature kód ft_)	Grafické znázornění						
					ZTM5	ZTM10	ZTM25	ZTM50	ZTM100	ZTM 250	
301		pramen, studánka		BH170				–	–	–	
					<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>				
	01	vodní tok stálý povrchový	do 4 m šířky	BH140							
					<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	
	02		4–10 m šířky	BH000 BH140 BH080 NF120							
									<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	
	03		10–15 m šířky								
									<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	
	04	15–20 m šířky									
				<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>		
	05	20–50 m šířky									
							<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>		
	06	≥ 50m šířky									
					<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>		
303		vodní tok stálý podzemní nebo ponorný	do 4 m šířky	BH140							
						<i>jméno</i>					
			nad 4 m šířky								
					<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	
304		vodní tok občasný povrchový		BH140							
					<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	<i>jméno</i>	
306	01	břehová čára	povrchová	BH000							
	02		podzemní	BH000		–	–	–	–	–	

Obr. 5.4: Značkový klíč ZTM – vodstvo.

Zdroj: [https://geportal.cuzk.cz/Dokumenty/Znackovy\\_klic\\_ZTM\\_CR.pdf](https://geportal.cuzk.cz/Dokumenty/Znackovy_klic_ZTM_CR.pdf)

Pro snadnější zpracování musely být části vodních toků, které jsou reprezentovány linií, převedeny na polygonovou reprezentaci se stejnou šířkou. Každý liniový segment má pod

atributem *ZNACKA* kód, který v *Značkovém klíči Základních topografických map* (viz Obr. 5.4) odpovídá kartografickému znaku, kterým je v mapě reprezentován (tj. plošně nebo liniově), popř. jaká je tloušťka tohoto liniového kartografického znaku, jímž je vodní tok v mapě reprezentován. Kolem liniového segmentu byl poté vytvořen buffer o velikosti poloviny tloušťky příslušného liniového kartografického znaku vynásobené měřítkovým číslem tak, aby polygon bufferu odpovídal kartografické reprezentaci v původní mapě. Polygony tohoto bufferu a polygony plošně reprezentovaných vodních toků byly sjednoceny do jednoho s využitím funkce *Merge* (viz Obr. 5.5). Následně byl tento polygon převeden na polylinii, ze které byl manuálně vybrán levý břeh, pravý břeh a ostrovy, které byly zvlášť exportovány do souborů *left.shp*, *right.shp* a *islands.shp* (v případě, že vodní tok ostrovy má).



Obr. 5.5: Sjednocení bufferu liniové reprezentace a polygonu.

### 5.3 Formát výsledků

Navržená metoda pro výpočet šířky vodního toku (skript *final\_widths.py*) exportuje vygenerované příčky do souboru *final\_transects.shp*, který je uložený ve složce příslušného vodního toku a měřítka. V souborech *widths.npy* a *kilometrages.npy* jsou uloženy lokální šířky a kilometráže vodního toku. Šířky jsou odvozeny z délky příček a kilometráže podle průsečíku příslušné příčky a liniové reprezentace vodního toku v daném měřítku.

Skript *stats.py* slouží k výpočtu statistických parametrů a vizualizaci dat. Na vstupu používá soubory *line.shp*, *widths.npy* a *kilometrages.npy* vždy pro všechna tři měřítka jednoho vodního toku. Výstupem skriptu jsou grafy a histogramy vytvořené za pomoci knihovny *matplotlib*.

Pro vizualizaci metodami tematické kartografie je exportována bodová vrstva *river\_points.shp*, souřadnice bodů jsou odvozeny z kilometráže podél liniově reprezentovaného vodního toku. Každý z těchto bodů má uložené hodnoty statistických parametrů.

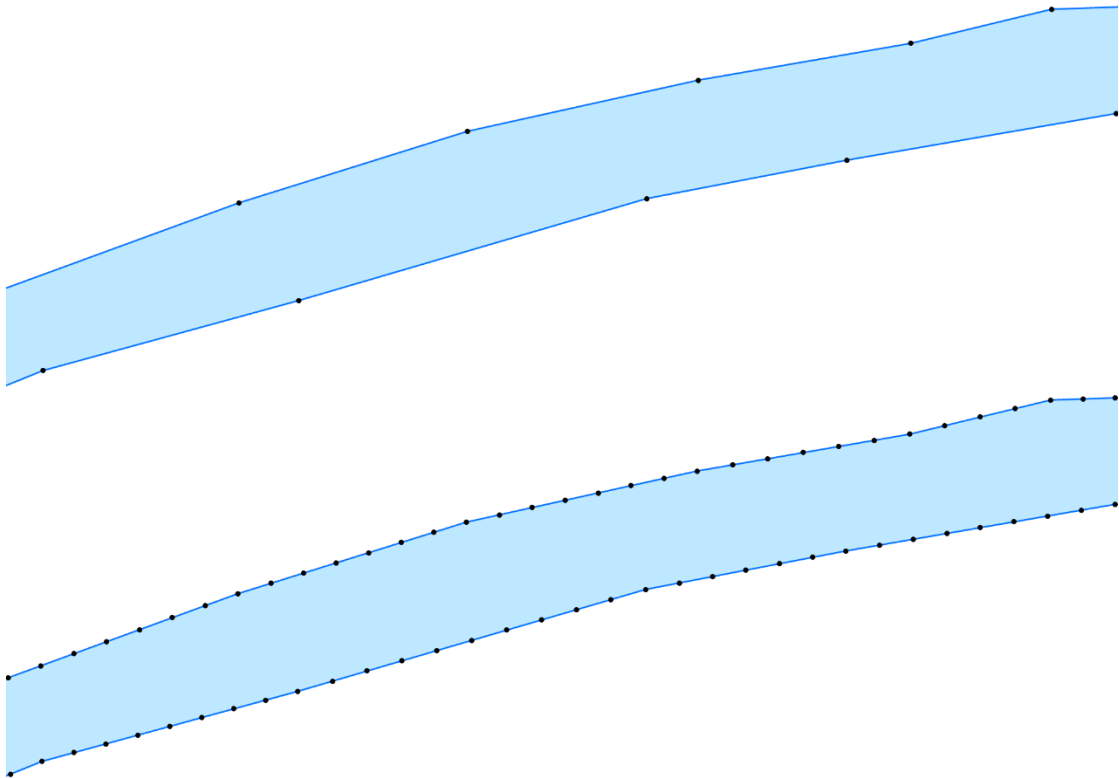
Dalším výstupem je liniová vrstva *segmented\_line.shp*, která obsahuje liniově reprezentovaný vodní tok (*line.shp*) rozdělený na segmenty o pravidelné délce. Ke každému segmentu je přidán atribut průměrné šířky, viz Obr. 3.11. Soubory *river\_points.shp* a *segmented\_line.shp* jsou využity pro vizualizaci dat metodami tematické kartografie, konkrétní reprezentace hodnot jednotlivých parametrů je nastavena v softwaru ArcGIS Pro.

Veškeré zpracování formátu *shapefile* (.shp) bylo provedeno s využitím knihovny *fiona*. Geometrické operace jako rozdělení linie na segmenty nebo nalezení průsečíku bylo implementováno s využitím knihovny *shapely*.

## 5.4 Vstupní parametry

Jediným vstupním parametrem algoritmu je maximální vzdálenost mezi vrcholy na břehové linii představující krok vzorkování. Experimentálně bylo zjištěno, že tato vzdálenost by měla být alespoň 4–5× menší, než je šířka úseku vodního toku, jinak jsou vygenerované příčky často šikmé a z nich odvozenou šířku zkreslují. Situace před převzorkováním a po něm je znázorněna na Obr. 5.6. Pro zjednodušení byla tato hodnota nastavena na 5 metrů pro všechny vodní toky a měřítko.





Obr. 5.6: Břehy před převzorkováním (nahore), po převzorkování (dole).

## 5.5 Vizualizace parametrů

V této kapitole budou prezentovány výsledky naměřených šířek vodního toku a statistických parametrů z ní odvozených, a to s využitím vizualizačních metod diskutovaných v kap. 3.5. Výsledky vizualizace budou analyzovány a zhodnoceny.

### 5.5.1 Šířka

Šířka vodního toku byla změřena pomocí navrženého algoritmu využívajícího metodu popsanou v kap. 4.4. Počet měřených šířek pro každý dataset je uveden v Tab. 5.1. Šířka byla následně vizualizována pomocí grafu, histogramu a metodami tematické kartografie, konkrétně tloušťkou linie a barevnou stupnicí.

	Labe	Orlice	Vltava
ZTM25	73 763	6 906	58 082
ZTM100	71 578	6 372	59 267
ZTM250	69 810	5 615	61 844

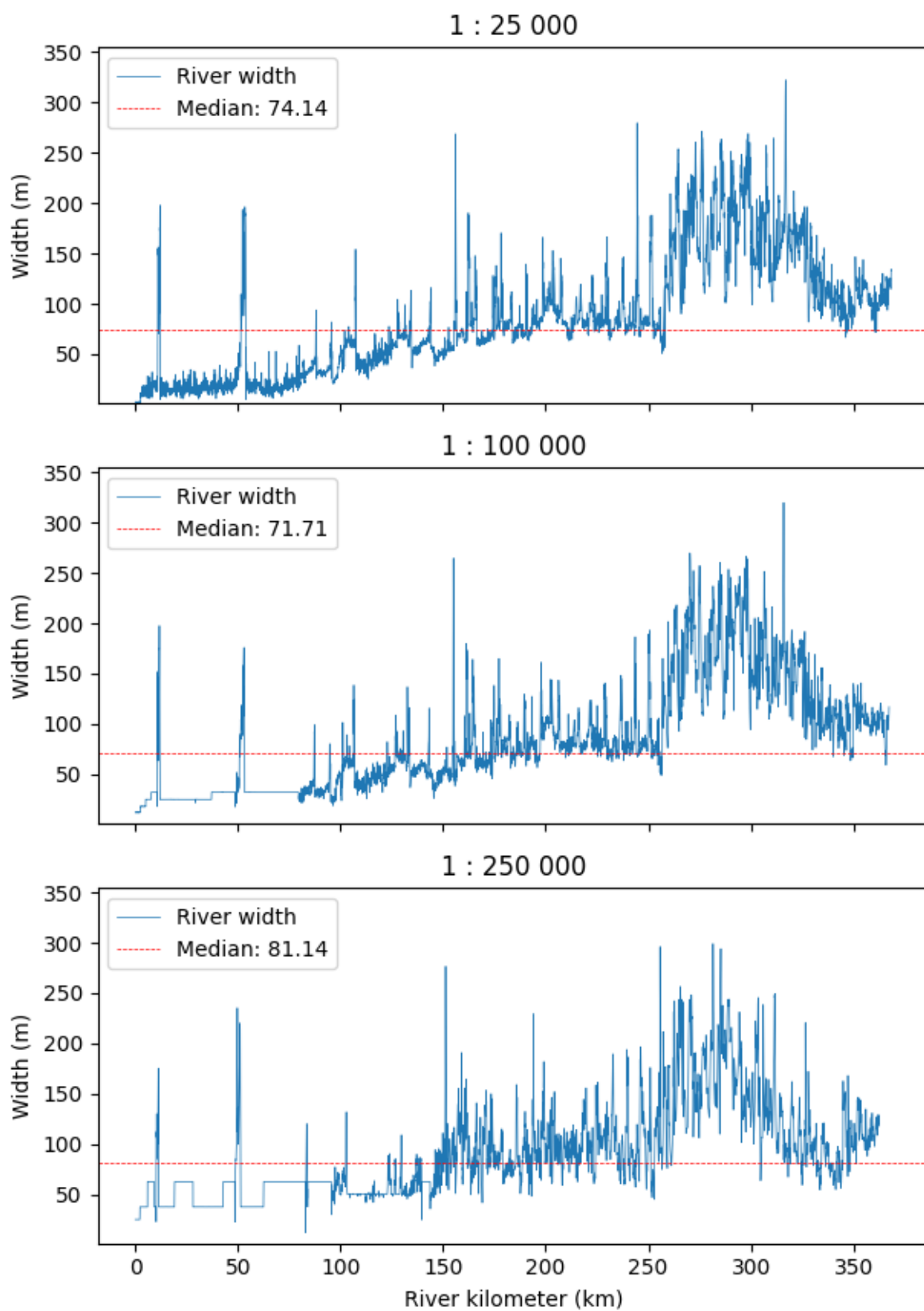
Tab. 5.1: Počet měřených délek pro vybrané vodní toky.

#### 5.5.1.1 Graf

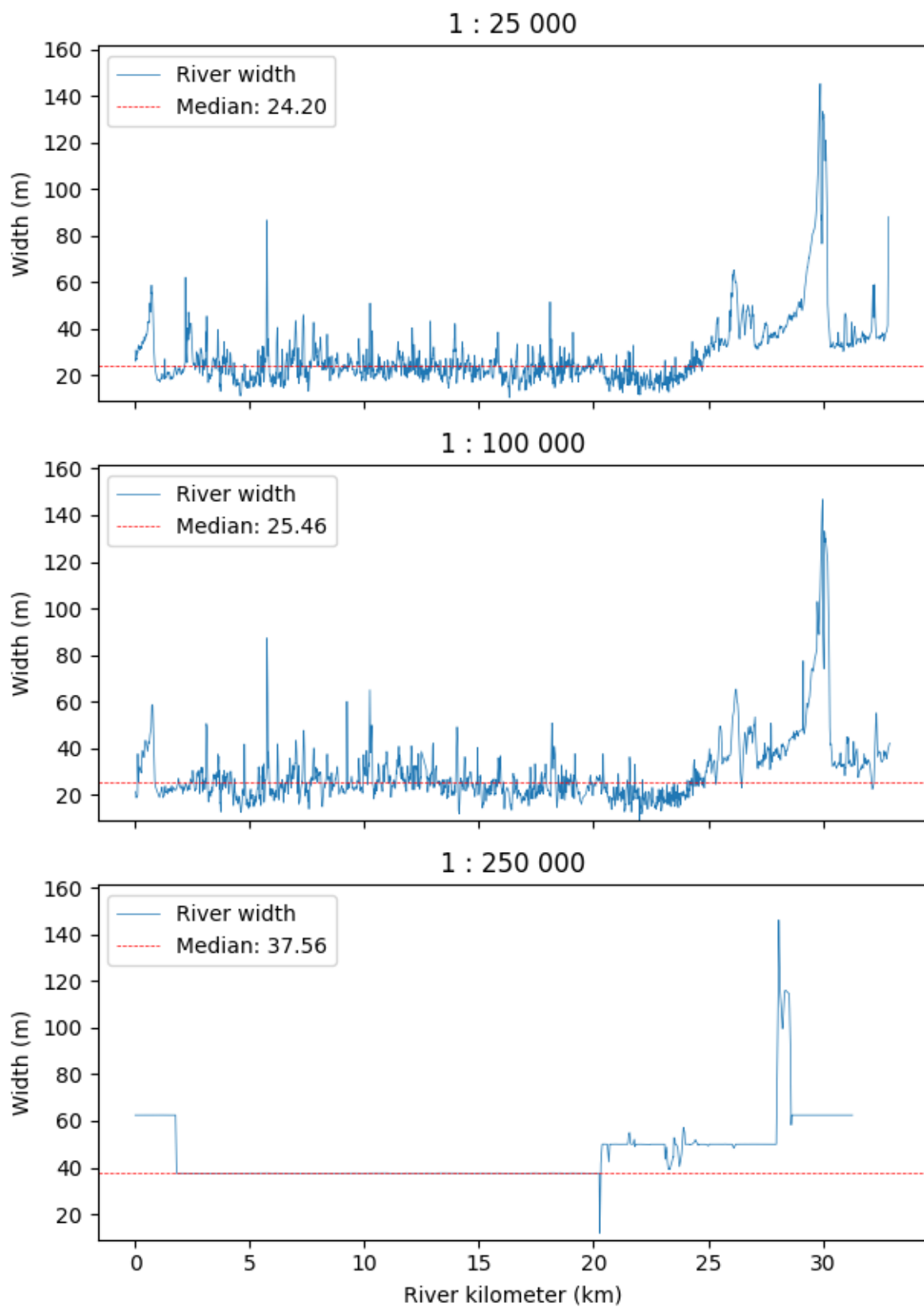
Do grafů byly zaneseny hodnoty naměřených šířek analyzovaných vodních toků Labe (Obr. 5.7), Orlice (Obr. 5.8) a Vltavy (Obr. 5.9) z mapových podkladů ZTM25, ZTM100 a ZTM250.

Rozdíly mezi jednotlivými měřítky jsou vidět zejména v místech, kde je vodní tok reprezentován linií. Šířka je zde konstantní, na grafu lze tyto úseky dobře identifikovat. Nejvíce je tento fakt patrný u Orlice v ZTM250, kde se šířka opakovaně mění skokově, avšak mezi těmito skoky je na celém úseku konstantní. Výsledná šířka (37,56 m) má výrazně vyšší hodnotu mediánu než data ze ZTM25 (24,2 m) a ZTM100 (25,46 m), což naznačuje, že byla zakreslena přes míru. U Labe a Vltavy je situace analogická, hodnota mediánu šířky je nejvyšší pro data ze ZTM250, rozdíl oproti zbylým dvěma měřítkům není ale tak výrazný.

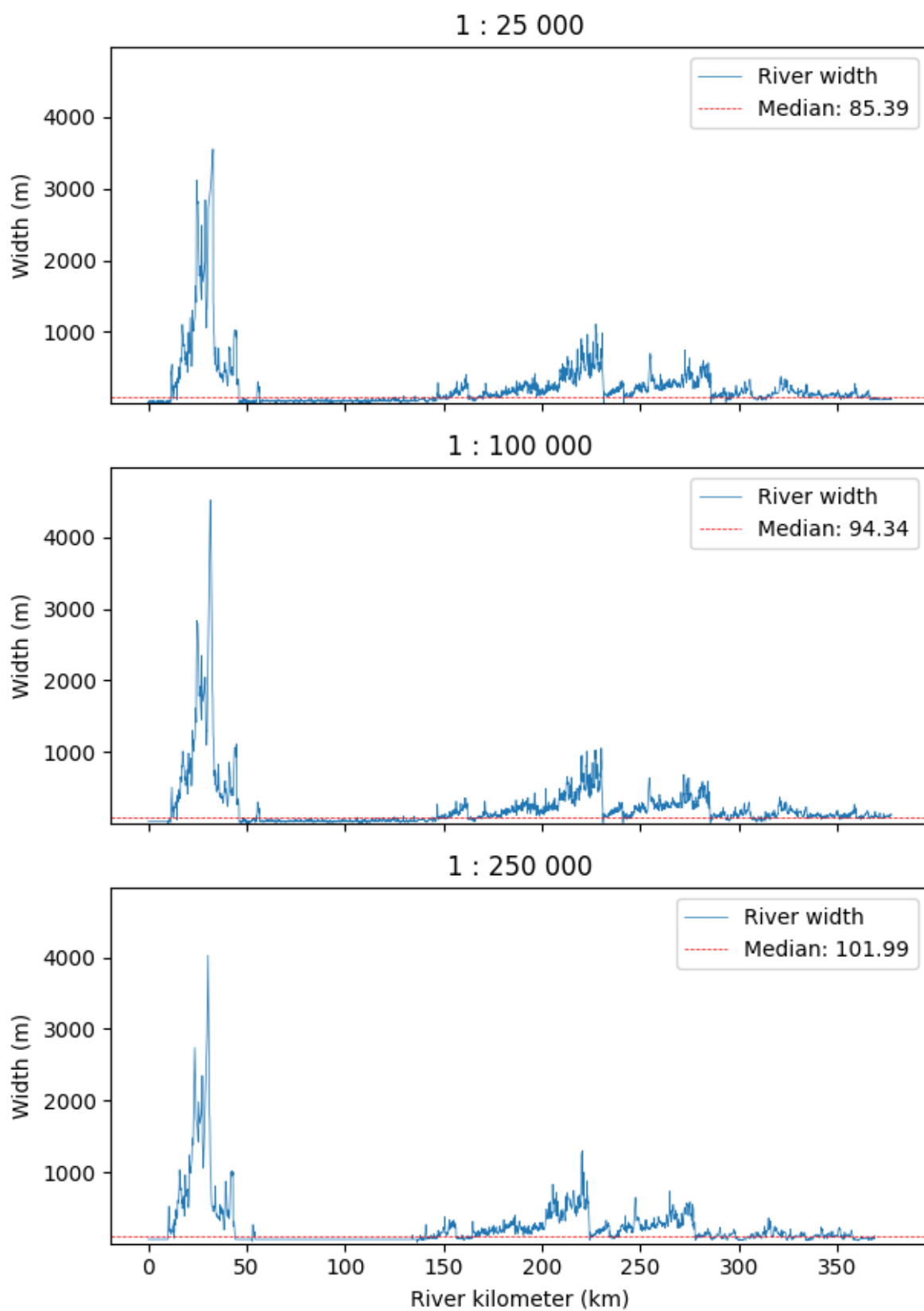
Vzhledem k množství vstupních dat (viz Tab. 5.1), obzvlášť u dlouhých toků (Labe a Vltava) dochází k tzv. *overplottingu*, kdy se vizualizovaná data slévají, jsou tedy špatně čitelná. Možností je tedy data agregovat na intervalech (viz kap. 3.2.7) nebo vizualizovat kratší úseky vodních toků. Dalším nedostatkem je, že při extrémně velkých šířkách (např. vodní nádrž Lipno na Vltavě) muselo být měřítko osy  $y$  zmenšeno tak, že rozdíly mezi ostatními hodnotami jsou těžko viditelné. Řešením je tato data vynechat (tj. nezapočítávat velmi široké nádrže do výsledných dat), nebo použít např. logaritmickou škálu na ose  $y$ . Graf však působí méně intuitivně, proto tato varianta nebyla použita pro vizualizaci dat.



Obr. 5.7: Šírky vodního toku Labe zakreslené v grafu společně se střední hodnotou (medián).



Obr. 5.8: Šírky vodního toku Orlice zakreslené v grafu společně se střední hodnotou (medián).



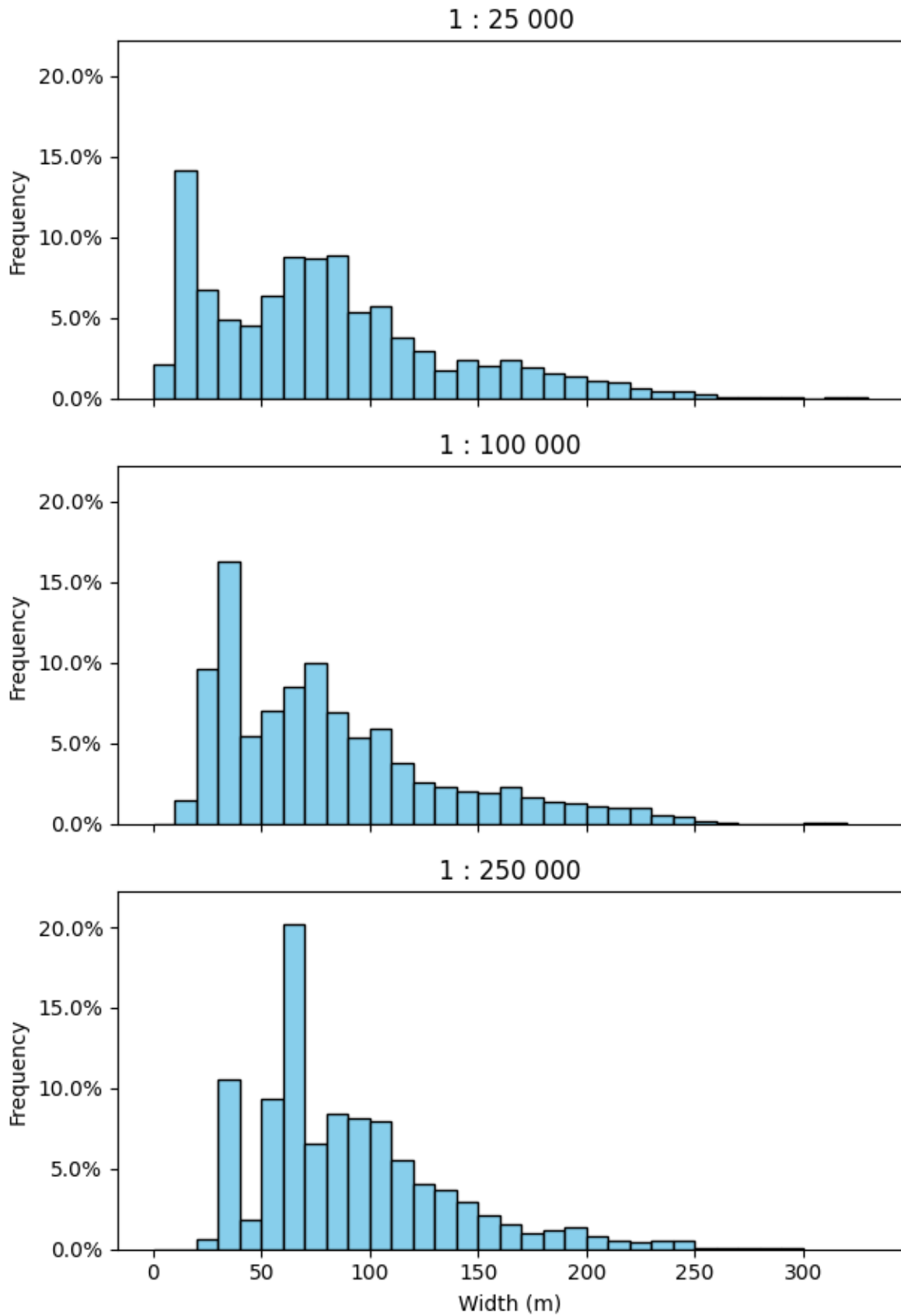
Obr. 5.9: Šírky vodního toku Vltava zakreslené v grafu společně se střední hodnotou (medián).

### 5.5.1.2 Histogram

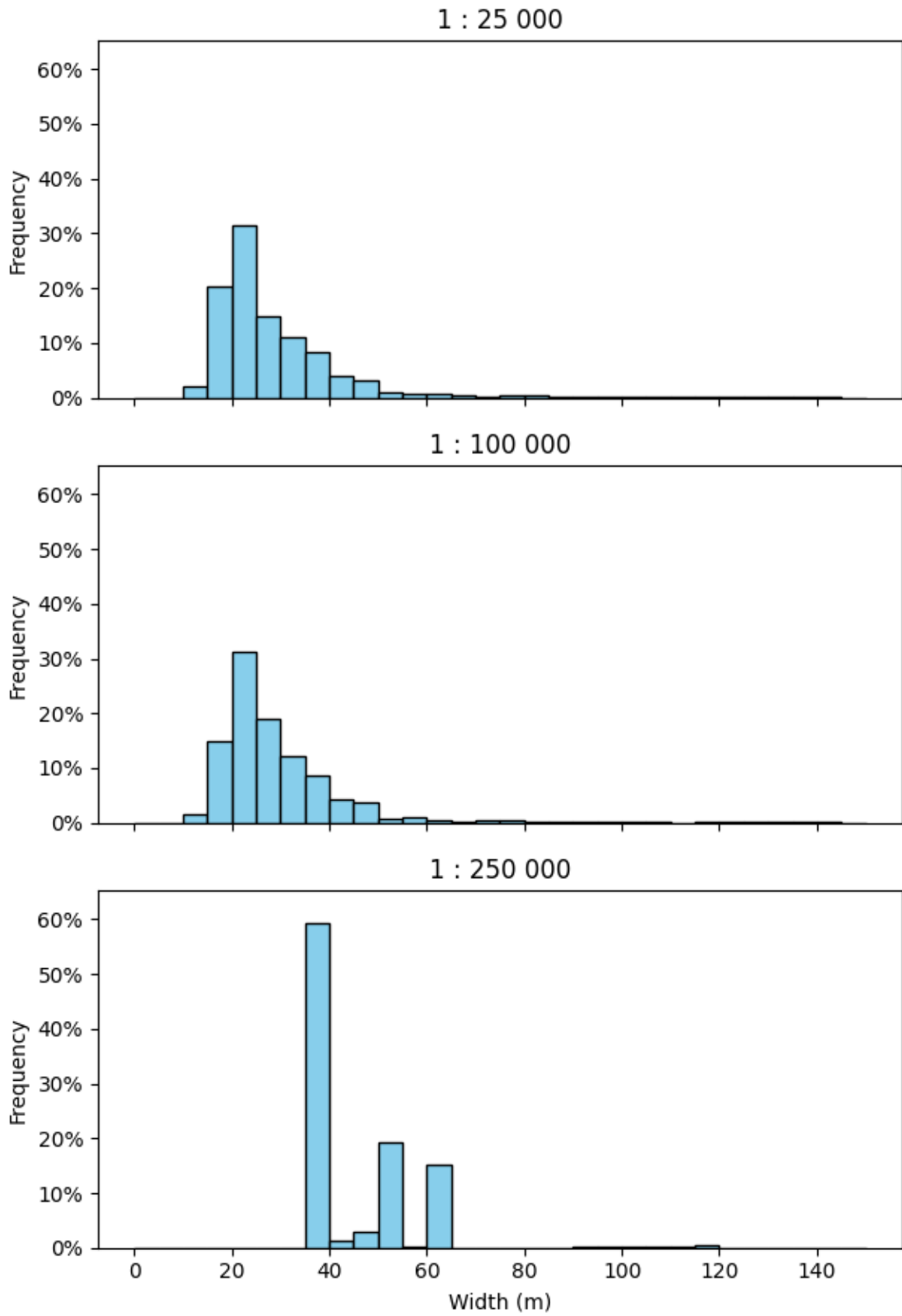
Histogram poskytuje přehled četností naměřených hodnot. V této bakalářské práci byl použit pro vizualizaci rozložení šířek vodních toků. Pro Labe byla zvolena šířka intervalu 10 m, pro Orlici 5 m a pro Vltavu 25 m. U Vltavy byly zobrazeny šířky pouze do 800 m, jelikož je ve výsledcích zanedbatelně extrémních hodnot (např. šířka vodní nádrže Lipno) a histogram pak znepřehledňuje.

Na histogramu šířky Labe (viz. Obr. 5.10) si lze všimnout, že čím menší měřítko, tím je minimální naměřená hodnota větší. V ZTM100 nejsou šířky 0–10 m zastoupeny vůbec, v ZTM250 dokonce 0–20 m, jelikož tyto šířky by při těchto měřítkách byly na mapě velmi špatně čitelné, muselo zde tedy dojít ke kresbě přes míru. Na histogramu šířky Orlice (viz. Obr. 5.11) v ZTM250 dochází ke skokům mezi četnostmi, což naznačuje, že se šířka měnila skokově. Podobně jako u Labe, nízké hodnoty šířky (do 35 m) nebyly naměřeny. Na histogramu šířky Vltavy (viz. Obr. 5.12) lze pozorovat, že cca 30 % naměřených hodnot v ZTM25 a ZTM100 je v intervalu 25–50 m, kdežto v ZTM250 je cca 40 % naměřených hodnot v intervalu 50–75 m, což opět naznačuje kresbu přes míru.

Oproti grafu je histogram přehlednější způsob, jak data vizualizovat, díky agregaci hodnot. Poskytuje lepší přehled naměřených šířek a rozdíly mezi měřítky jsou lépe pozorovatelné. Nevýhodou histogramu je ztráta prostorové informace.

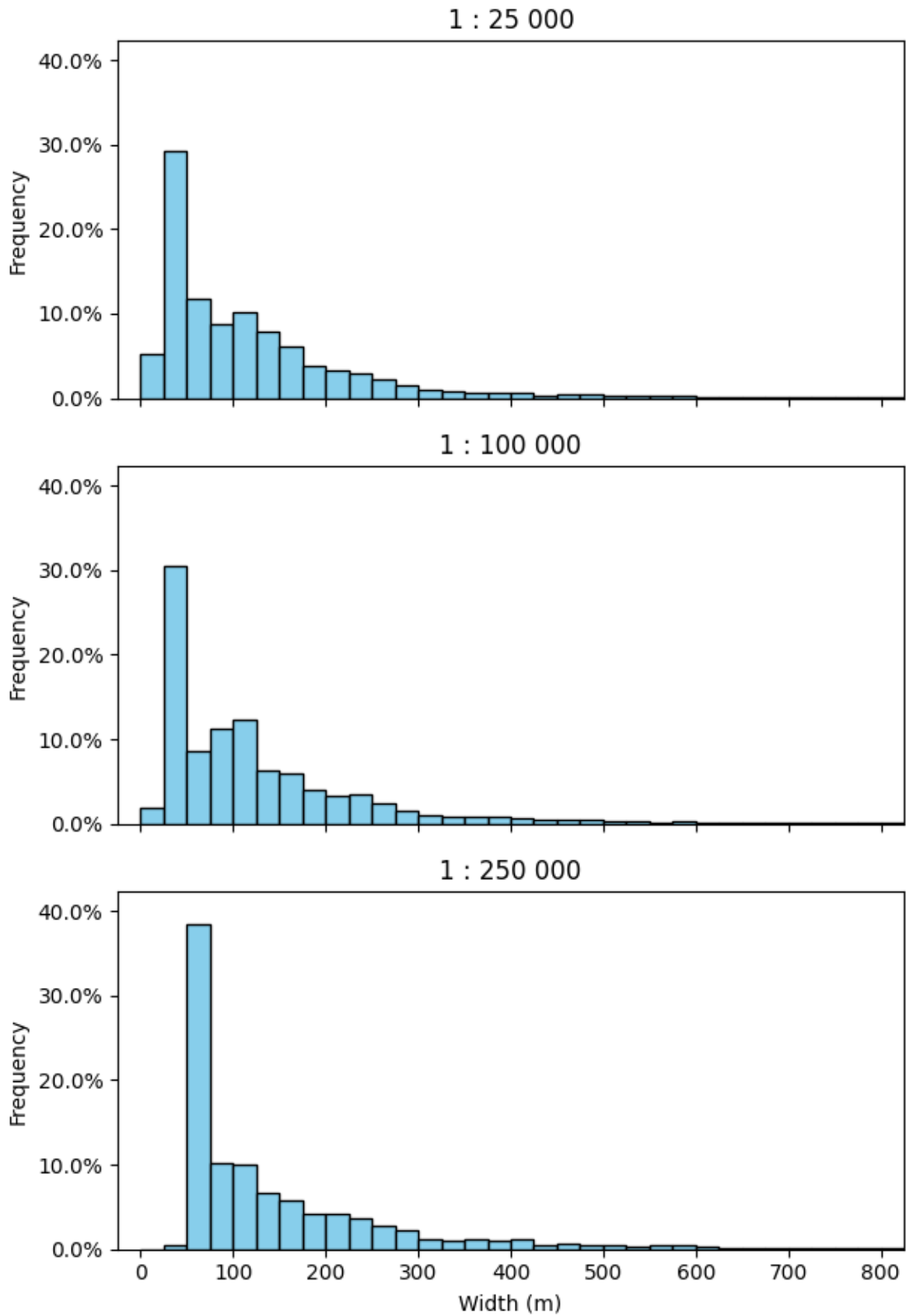


Obr. 5.10: Histogram naměřených šířek řeky Labe.



Obr. 5.11: Histogram naměřených šířek řeky Orlice.





Obr. 5.12: Histogram naměřených šířek řeky Vltavy.

### 5.5.1.3 Metody tematické kartografie

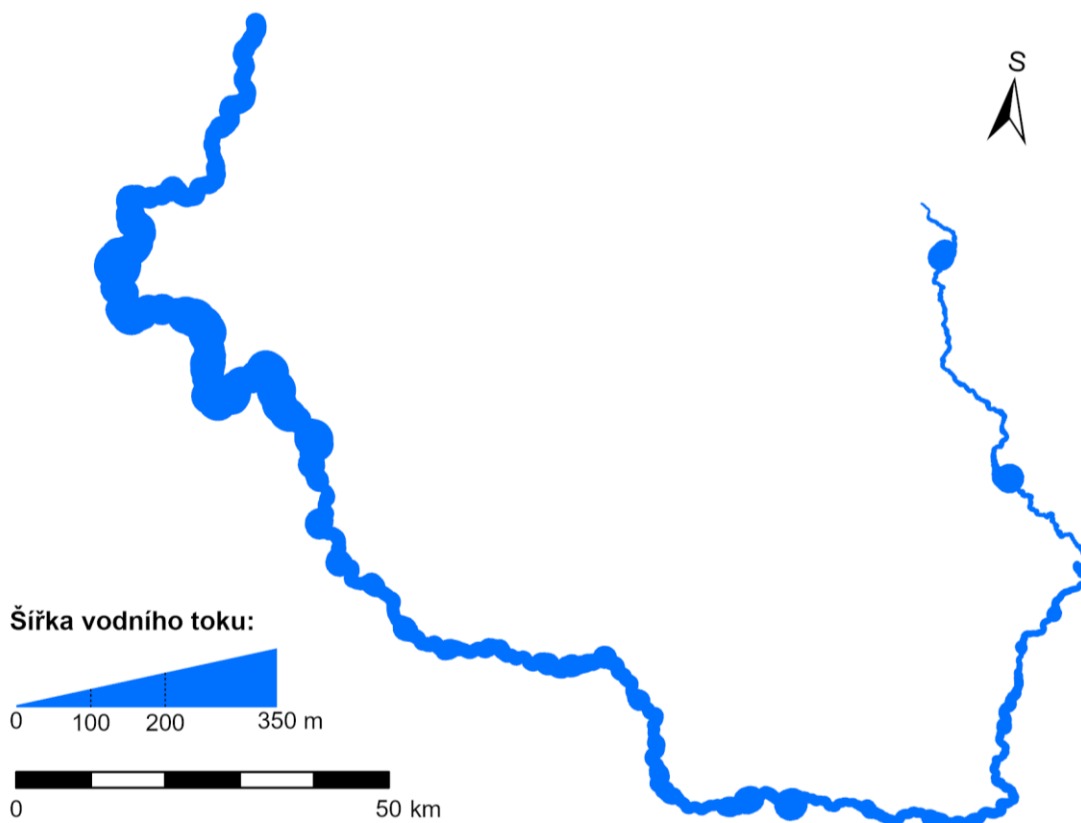
Pro vizualizaci metodami tematické kartografie musel být vodní tok rozdělen na segmenty o délce 200 m, kdy každému segmentu byla přiřazena jeho průměrná šířka (viz Obr. 3.11), aby byla vizualizovaná šířka v mapě lépe čitelná. Šířka vodního toku byla reprezentována barevnou stupnicí nebo tloušťkou linie. Pro všechna měřítka byly použity stejné stupnice, aby bylo možné naměřené hodnoty lépe porovnat mezi měřítky.

Pro reprezentaci šířky vodního toku tloušťkou linie byla zvolena lineární stupnice, kdy tloušťka linie je přímo úměrná šířce vodního toku. Vzhledem k tomu, že vizualizovaná data naměřených šířek Labe (Obr. 5.13–Obr. 5.15) a Vltavy (Obr. 5.19–Obr. 5.21) jsou v menším měřítku než ta, pro která je původní kartografická reprezentace určena (cca 1 : 1 000 000), dochází často ke slévání meandrujících úseků. Stejný problém lze vidět na u Orlice v ZTM250 (Obr. 5.18).

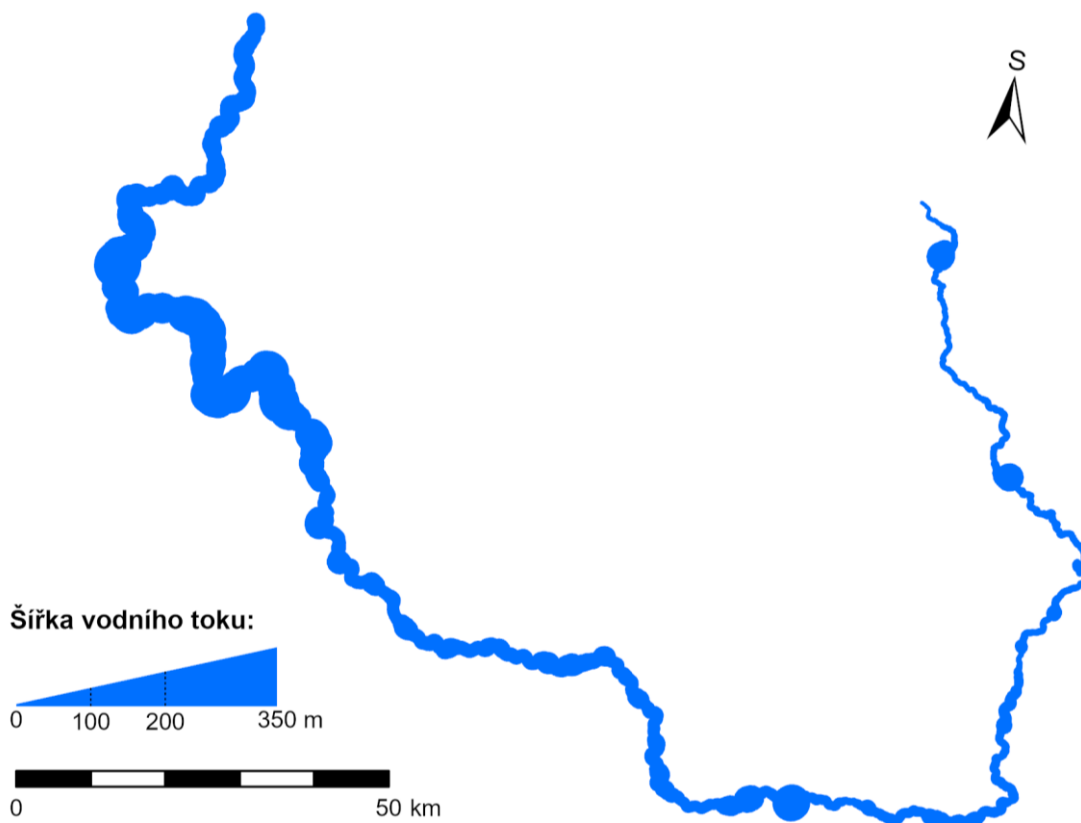
Na řece Orlici lze pozorovat změnu reprezentace v závislosti na měřítku, v ZTM250 můžeme identifikovat kresbu přes míru a šířka vodního toku méně fluktuuje. Kresby přes míru si lze všimnout u Labe, kdy se šířka reprezentace vodního toku poblíž pramene s menším měřítkem zvětšuje. U ústí tyto rozdíly pozorovat nelze, jelikož vodní tok je sám o sobě dostatečně široký na to, aby byl viditelný i v malém měřítku, není tedy třeba kreslit tok přes míru. Na Vltavě mezi měřítka nelze pozorovat zásadní rozdíly, což je způsobeno charakterem dat. Pár extrémních hodnot (šířka Lipna) posune celou stupnici a rozdíly mezi šířkami na zbytku vodního toku nejsou dobře viditelné. I přesto tato metoda poskytuje dobrý přehled naměřených hodnot a lze vidět trend.

Pro Labe a Orlici byla zvolena spojitá barevná stupnice, avšak pro Vltavu z důvodu naměřených extrémních hodnot šířek v místě nádrže Lipno byla použita škála diskrétní, aby byly lépe pozorovatelné rozdíly v šířce na zbytku vodního toku. Lze si všimnout podobných fenoménů jako u reprezentace tloušťkou linie, kdy se šířka Labe poblíž pramene se zmenšujícím se měřítkem zvětšuje nebo výrazné kresby přes míru u Orlice. Na rozdíl od reprezentace tloušťkou linie nedochází ke slévání vodního toku tak často. U Vltavy lze pozorovat, že v ZTM250 není téměř nikde šířka vodního toku nižší než 50 m na rozdíl od ZTM25 a ZTM100, což naznačuje, že byl vodní tok v ZTM250 na vybraných kreslen přes míru.

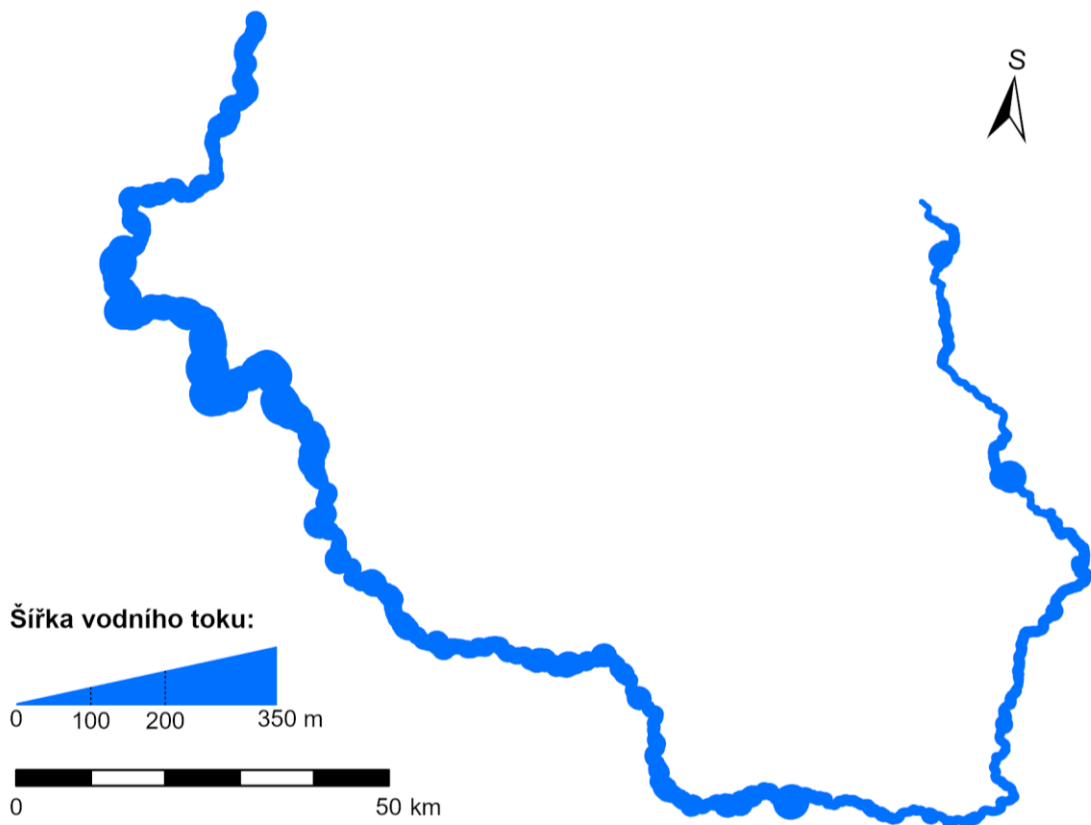
Celkově lze metody tematické kartografie pro vizualizaci dat šířek vodního toku považovat za úspěšné. Uživatel získá celkový přehled o naměřených datech a metody jsou dobrým základem pro zpracování tematických map.



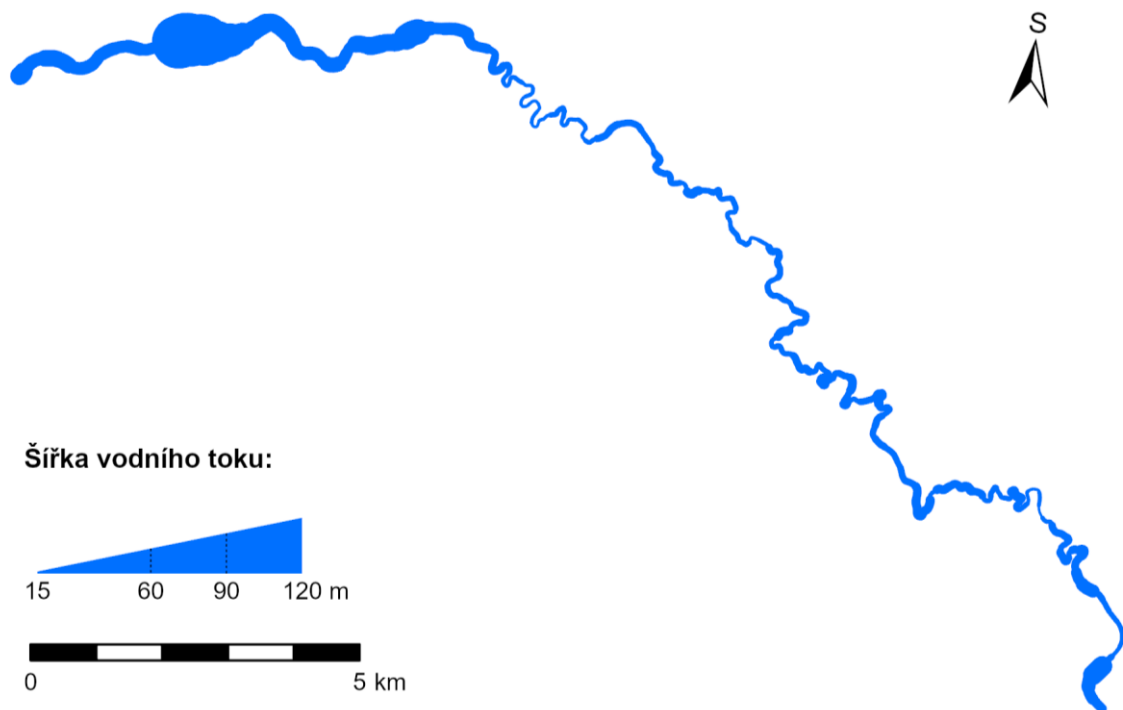
Obr. 5.13: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM25.



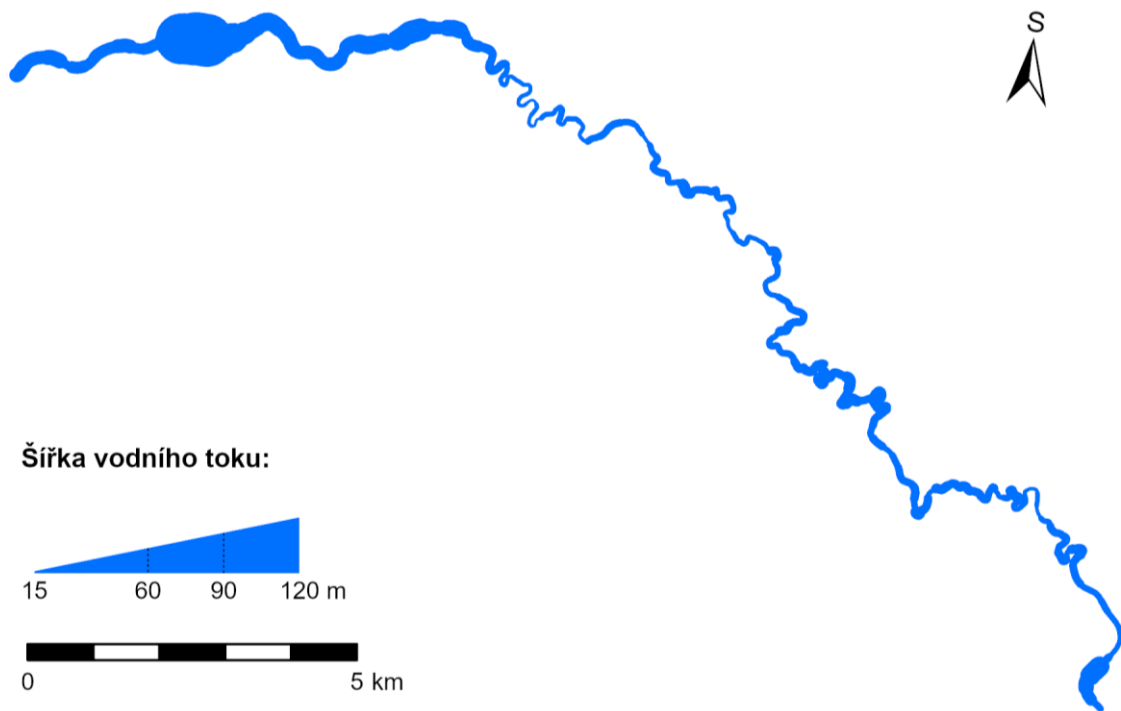
Obr. 5.14: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM100.



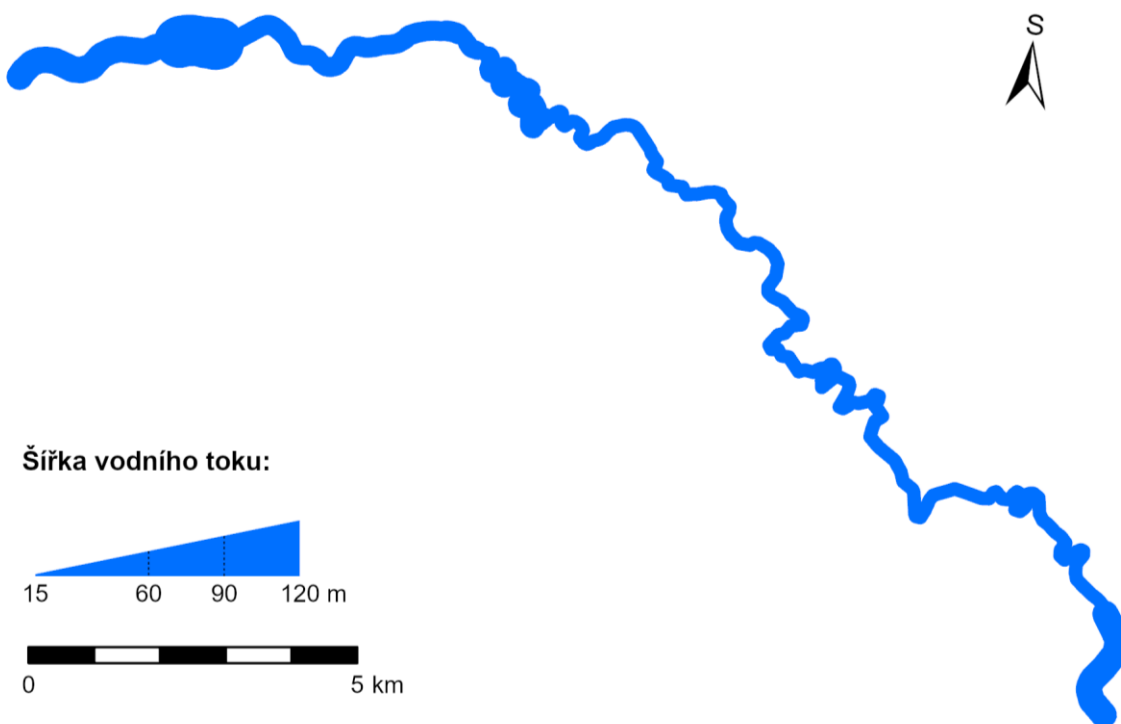
Obr. 5.15: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM250.



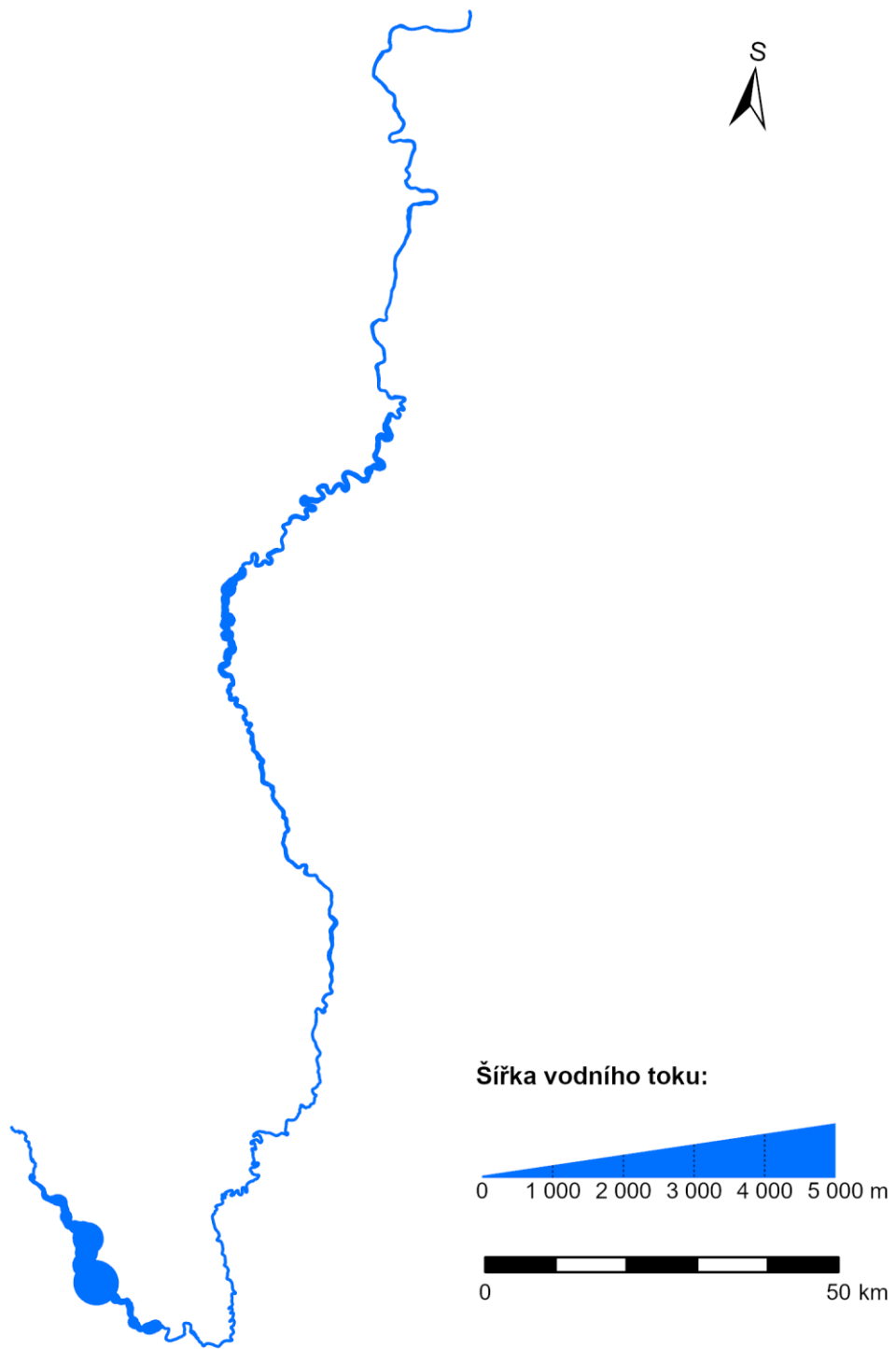
Obr. 5.16: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM25.



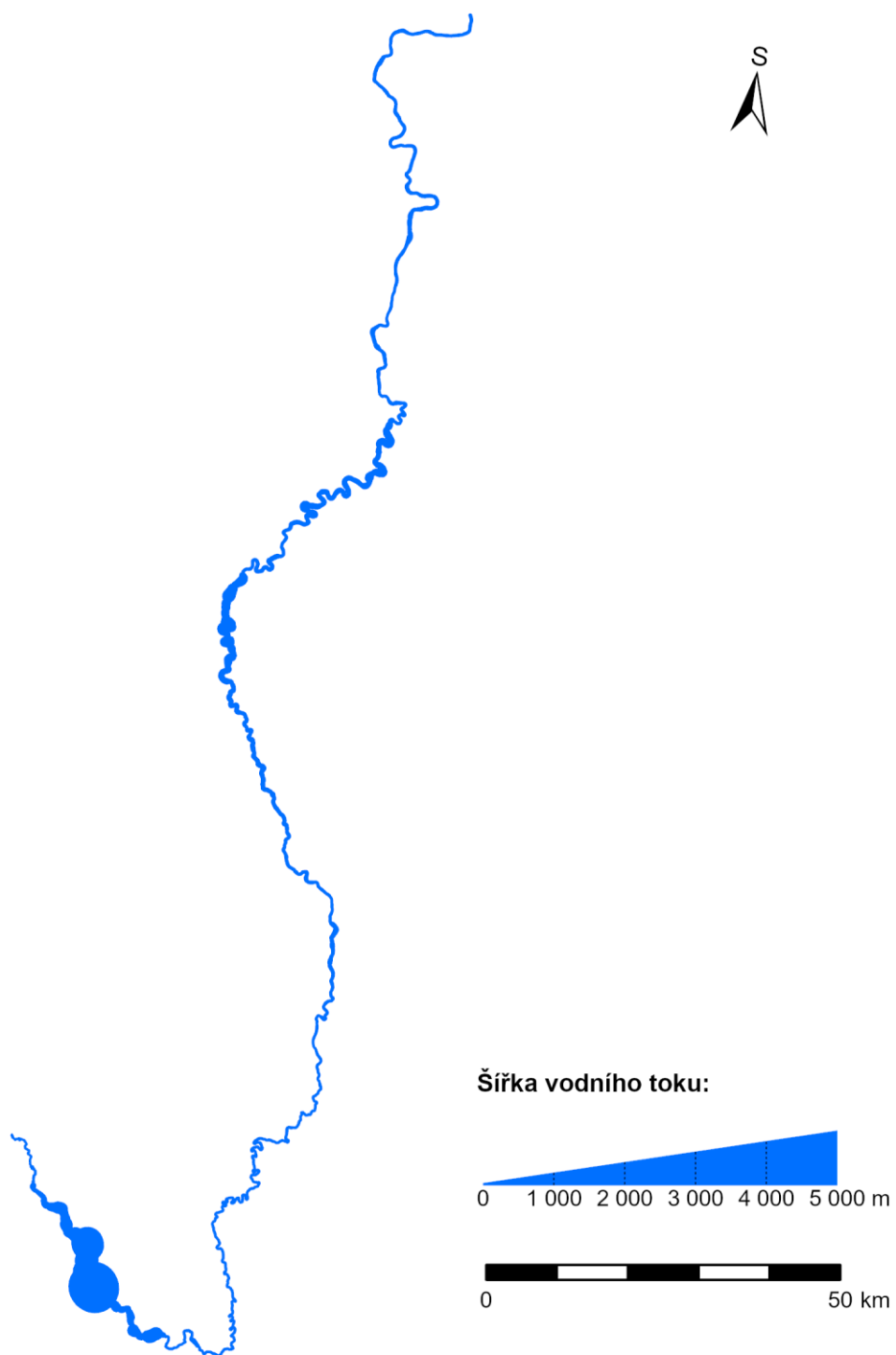
Obr. 5.17: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM100.



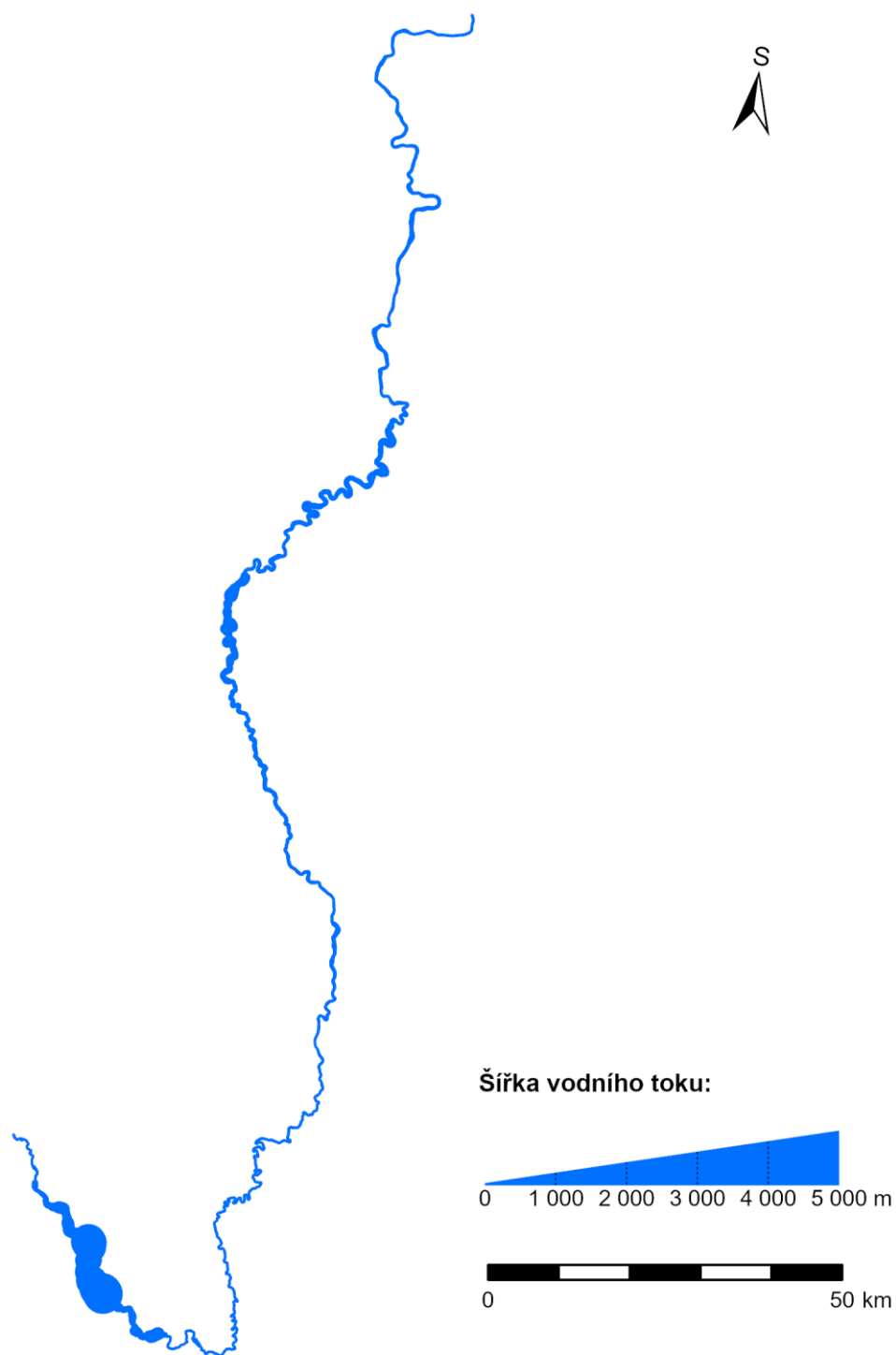
Obr. 5.18: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM250.



Obr. 5.19: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM25.

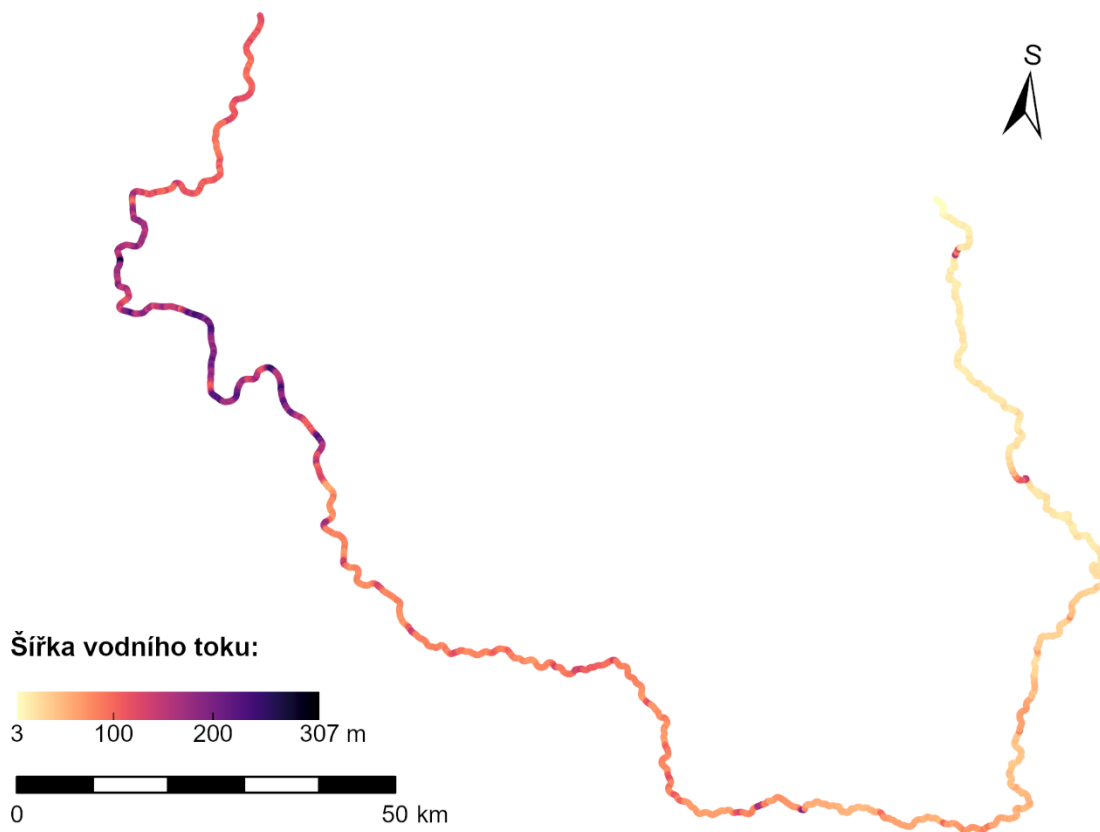


Obr. 5.20: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM100.

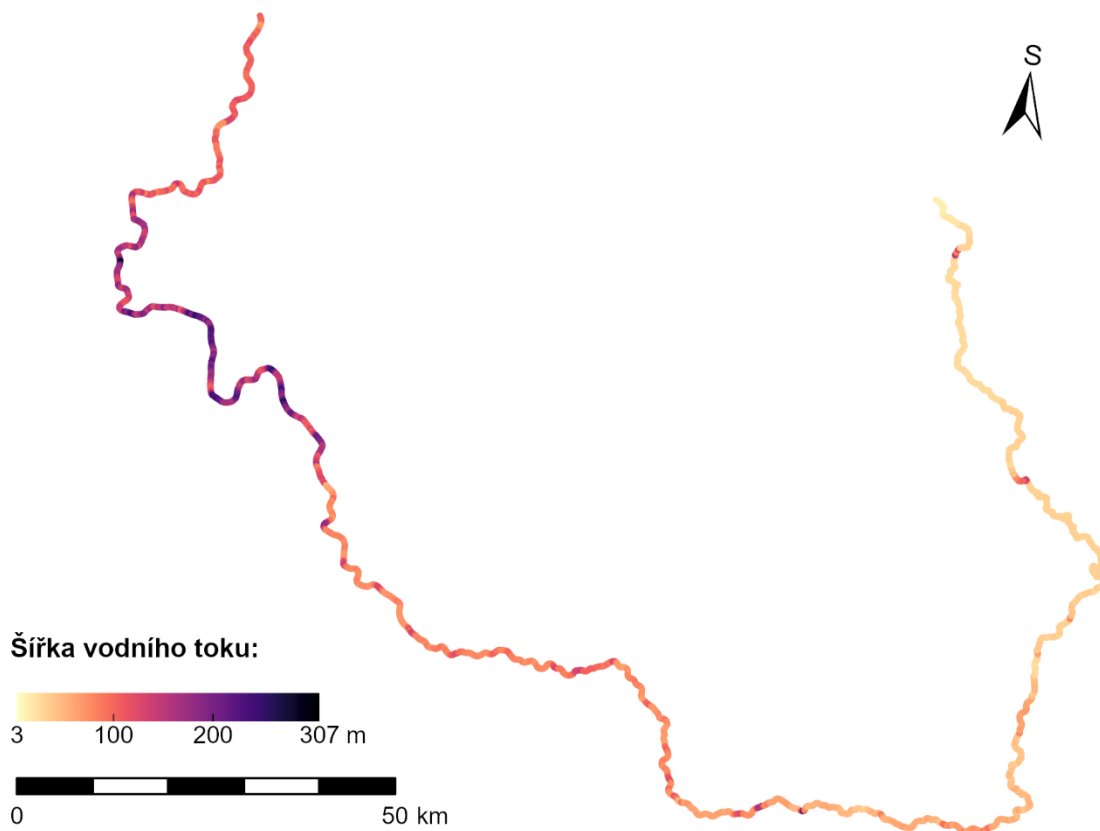


Obr. 5.21: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná tloušťkou linie ze ZTM250.

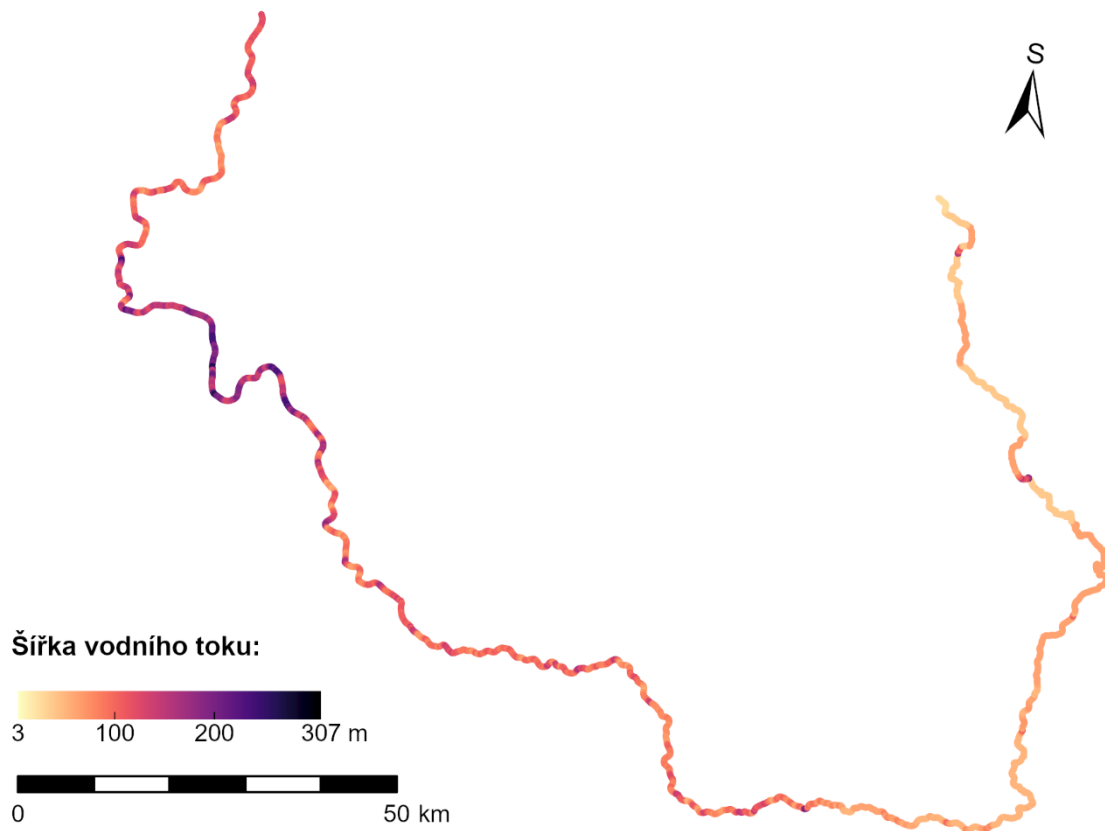




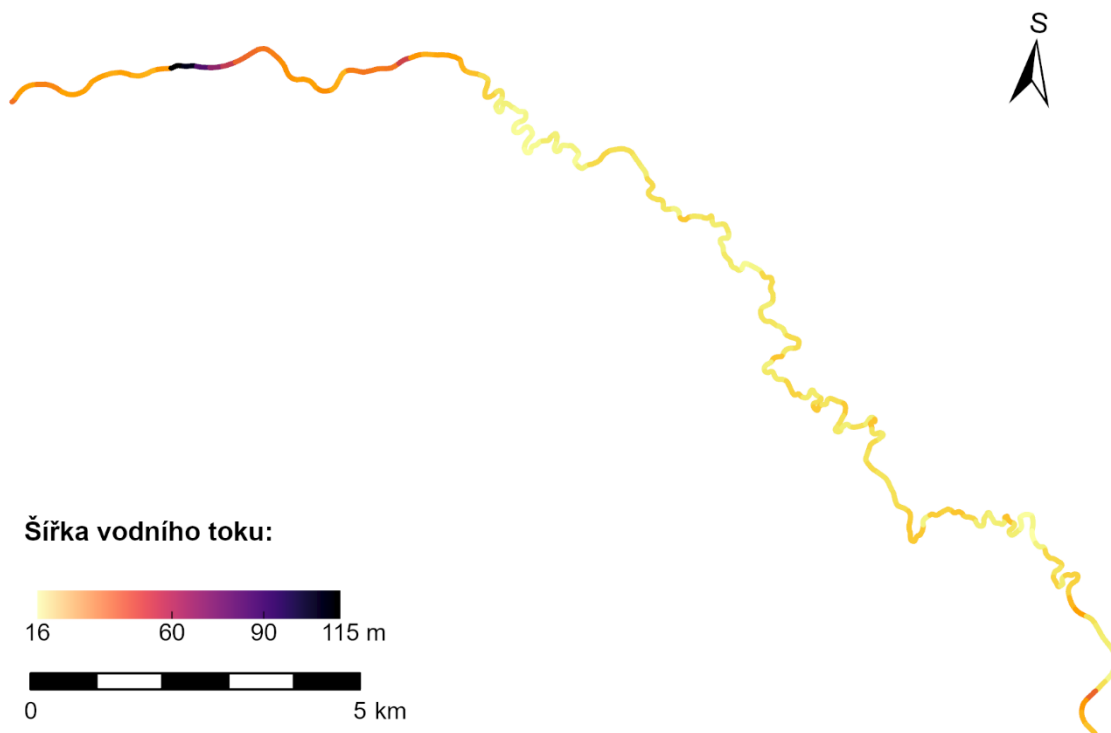
*Obr. 5.22: Šírka vodního toku Labe reprezentovaná barvou ze ZTM25.*



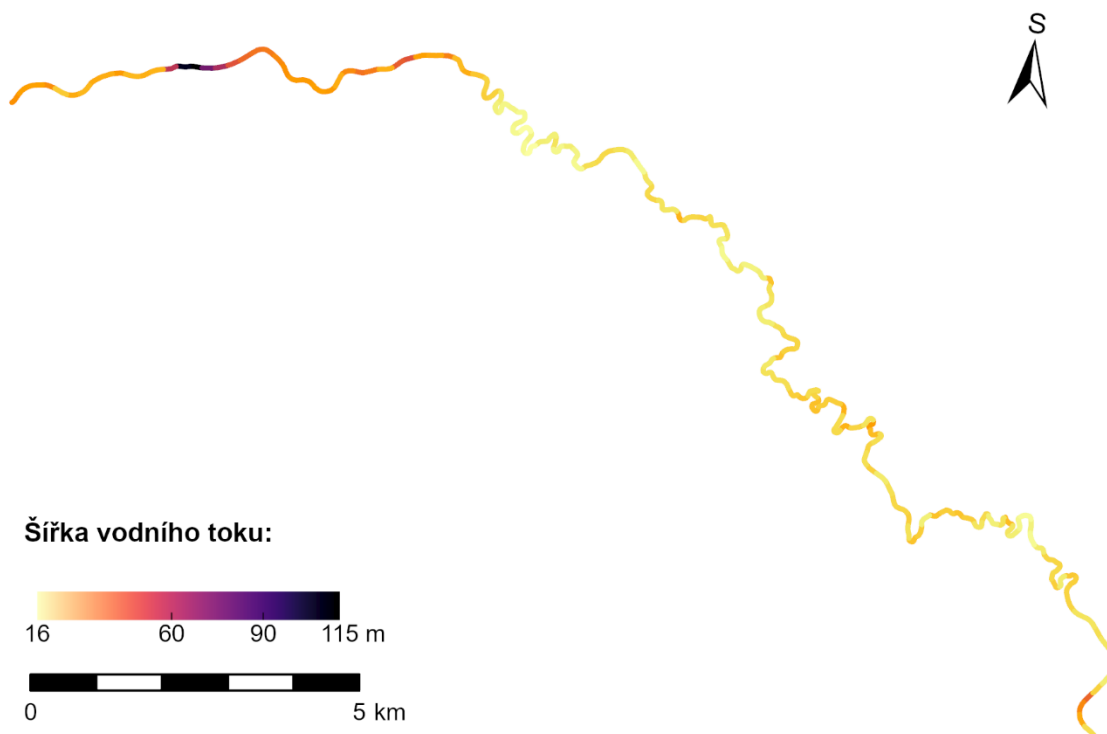
*Obr. 5.23: Šírka vodního toku Labe reprezentovaná barvou ze ZTM100.*



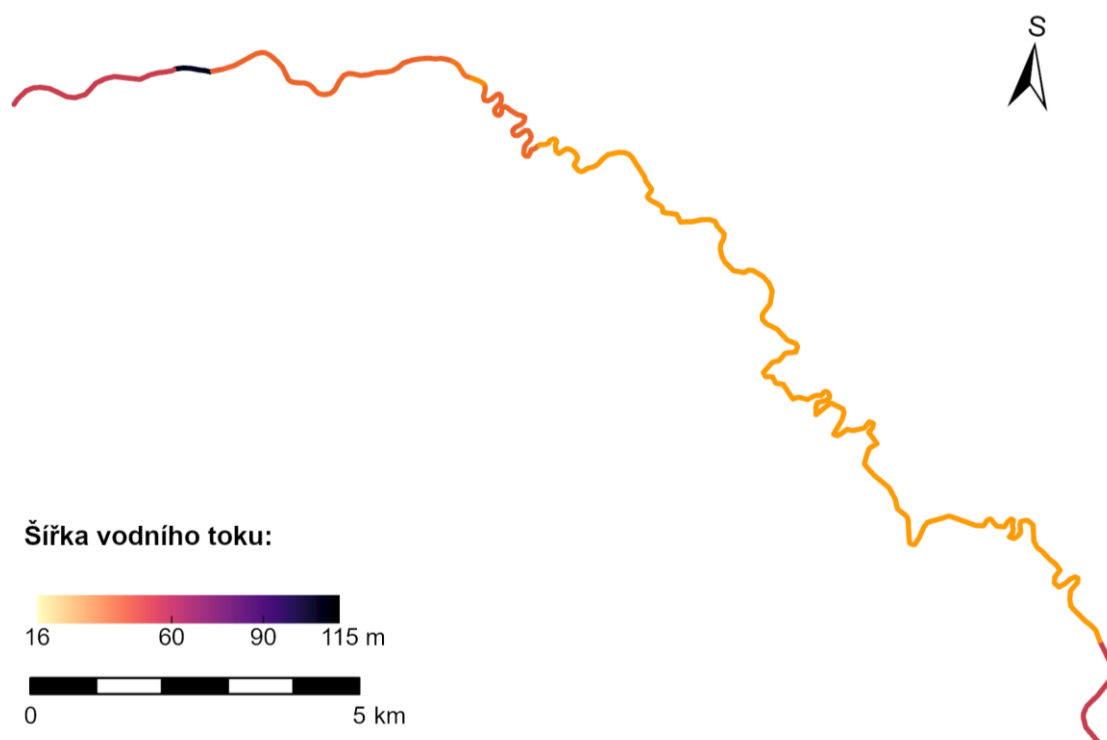
Obr. 5.24: Šířka vodního toku Labe reprezentovaná barvou ze ZTM250.



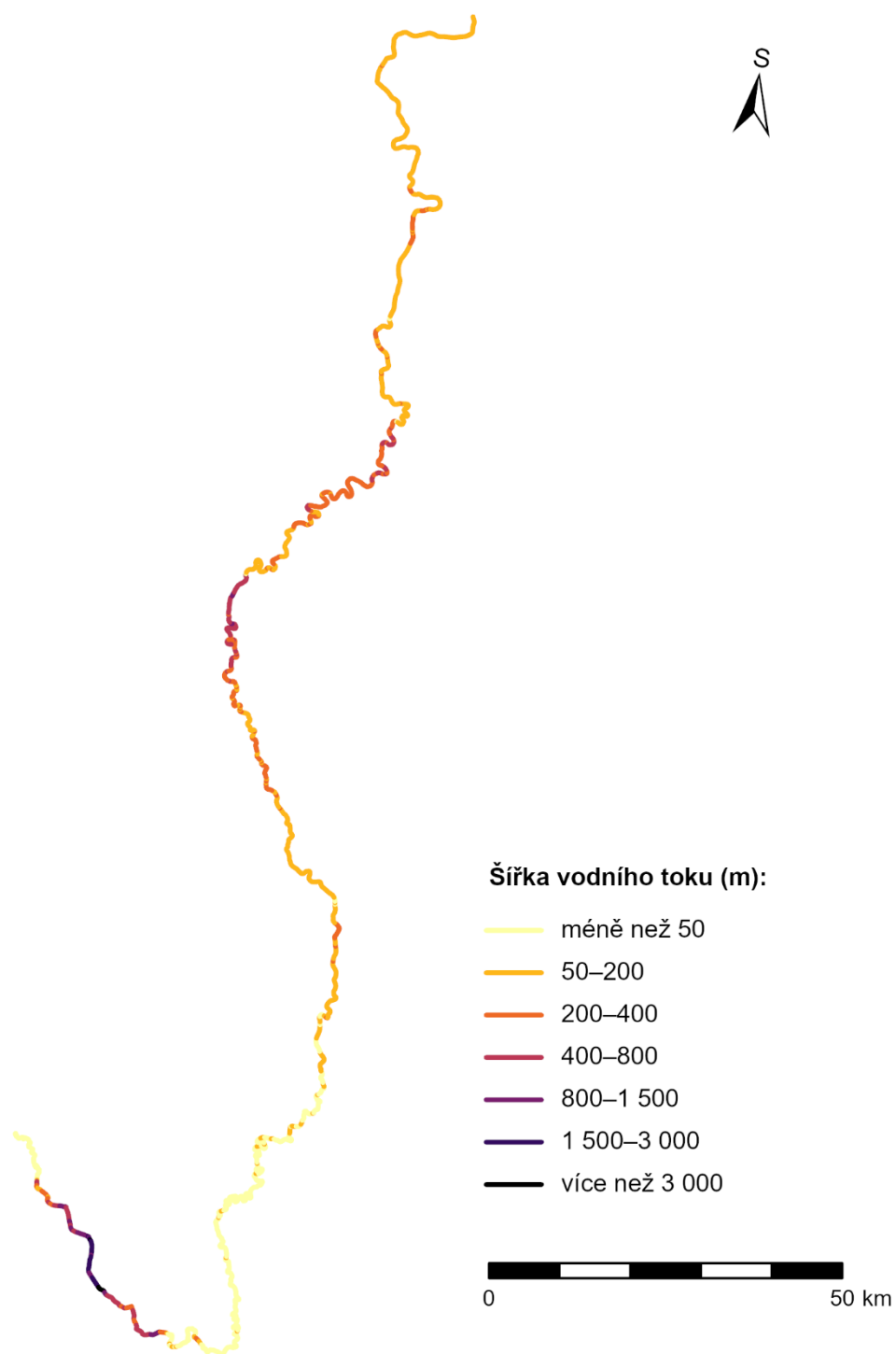
Obr. 5.25: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná barvou ze ZTM25.



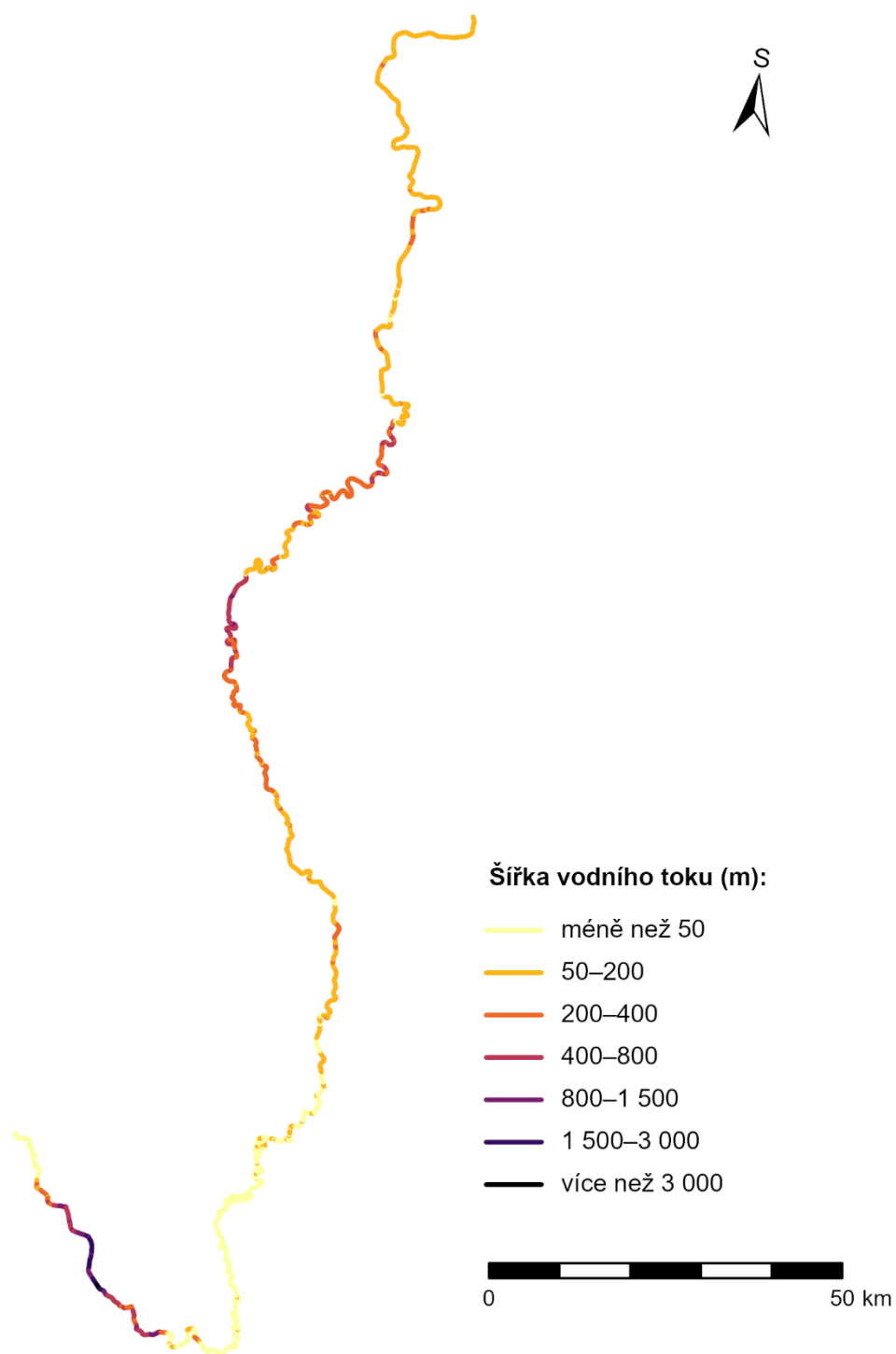
*Obr. 5.26: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná barvou ze ZTM100.*



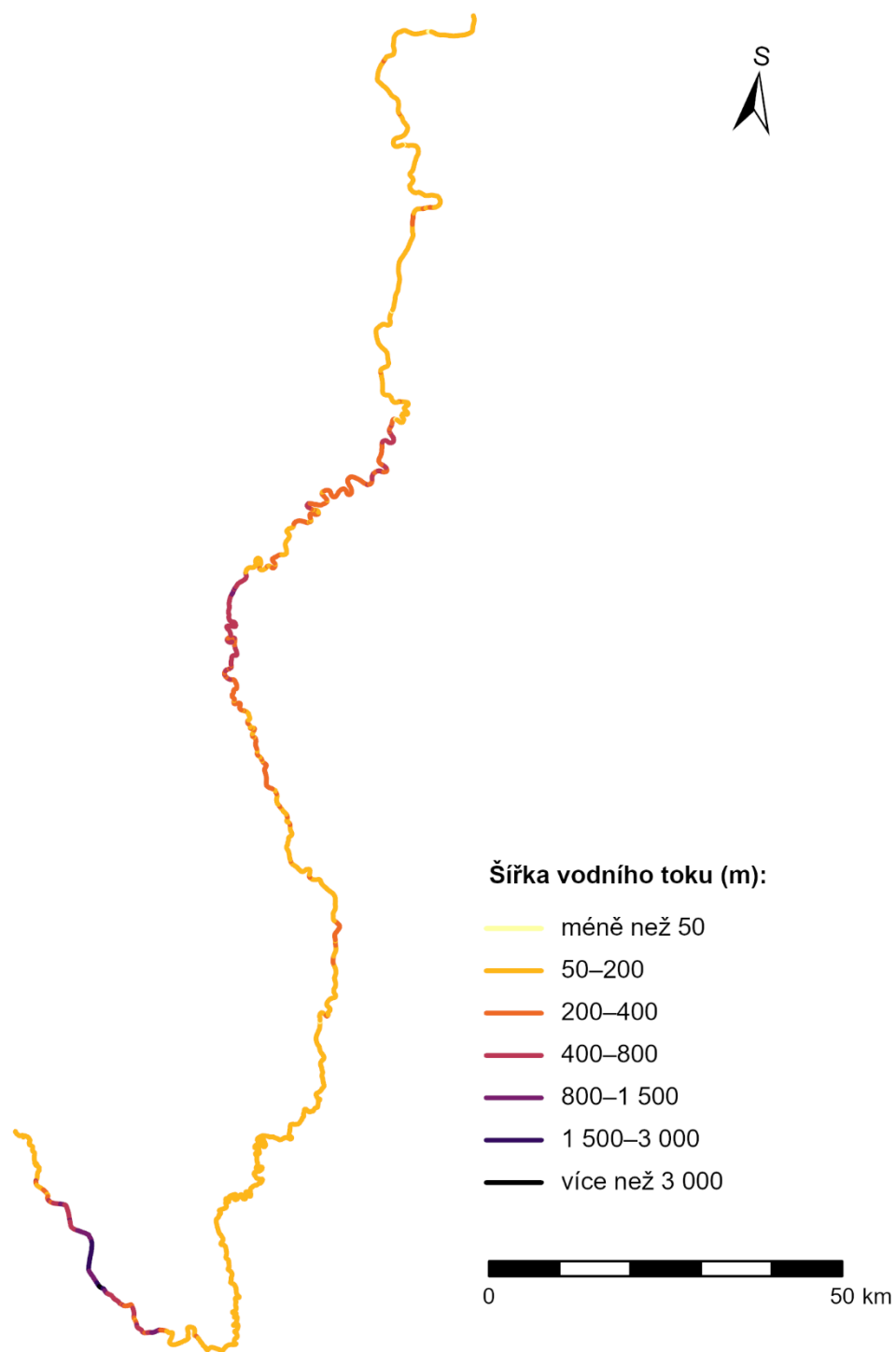
*Obr. 5.27: Šířka vodního toku Orlice reprezentovaná barvou ze ZTM250.*



Obr. 5.28: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná barvou ze ZTM25.



Obr. 5.29: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná barvou ze ZTM100.



Obr. 5.30: Šířka vodního toku Vltava reprezentovaná barvou ze ZTM250.

### 5.5.2 První derivace a její vlastnosti

Zajímavým parametrem vhodným pro analýzu může být lokální změna šířky vodního toku vyjádřená první derivací. Hodnoty derivací v krajních bodech jsou spočteny dopřednou (3.16),

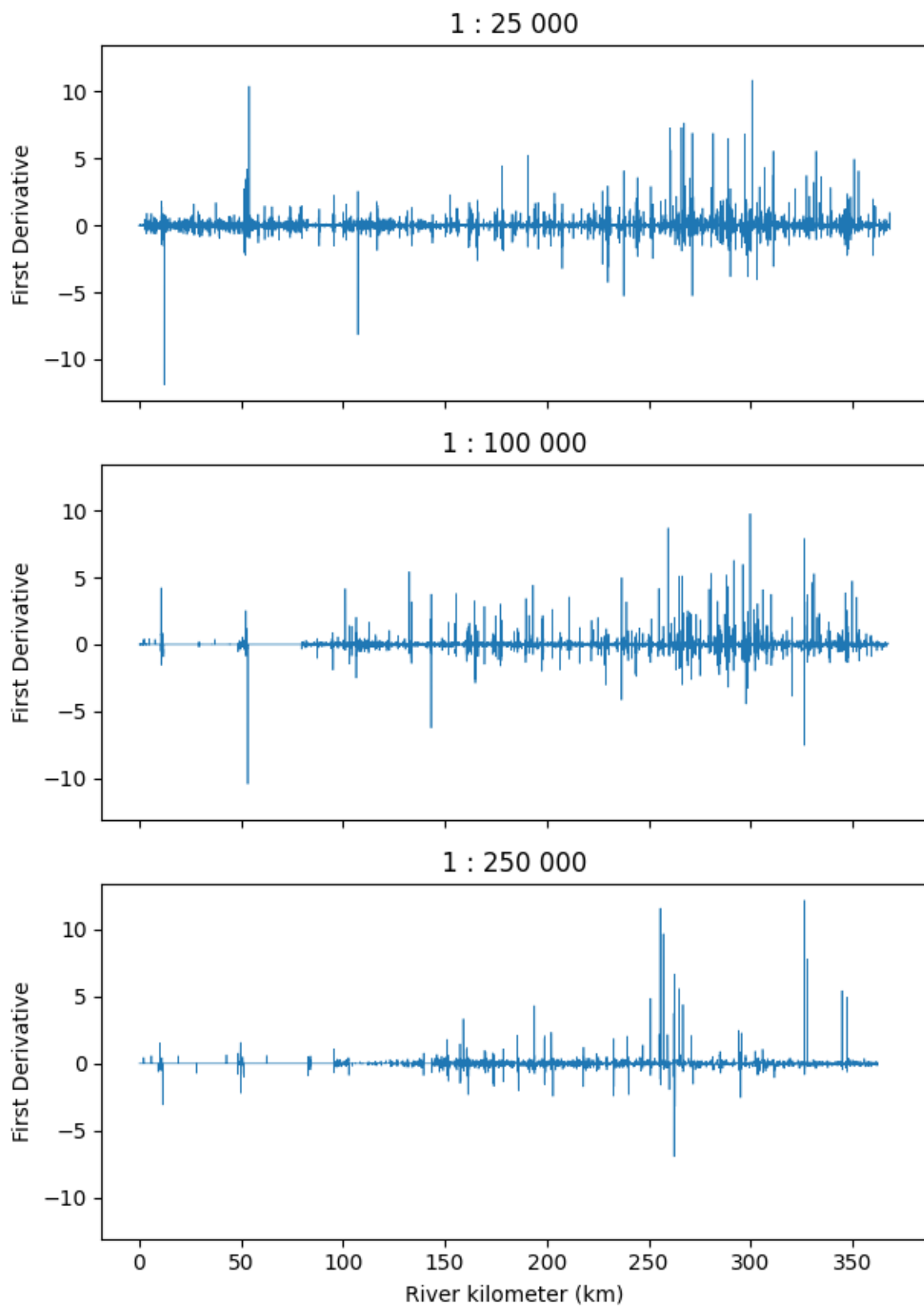
resp. zpětnou diferencí (3.18), zbylé hodnoty centrální diferencí (3.14). Kromě samotných hodnot derivace můžeme zkoumat i znaménka derivací vyjadřující monotonii, tj., jestli se vodní tok na intervalu rozšiřuje, zužuje nebo je šířka konstantní. Předpokládá se, že čím menší měřítko mapy, tím méně bude šířka vodního toku fluktuovat. Pro každý dataset byl detekován počet změn znaménka, (viz Tab. 5.2). Výsledky potvrdily zmíněnou hypotézu a počet změn znaménka první derivace můžeme považovat za vhodný parametr k zjištění míry generalizace.

	Labe	Orlice	Vltava
ZTM25	8 479	1 115	6 816
ZTM100	5 482	897	4 898
ZTM250	2 503	389	2 372

*Tab. 5.2: Počet změn znaménka první derivace.*

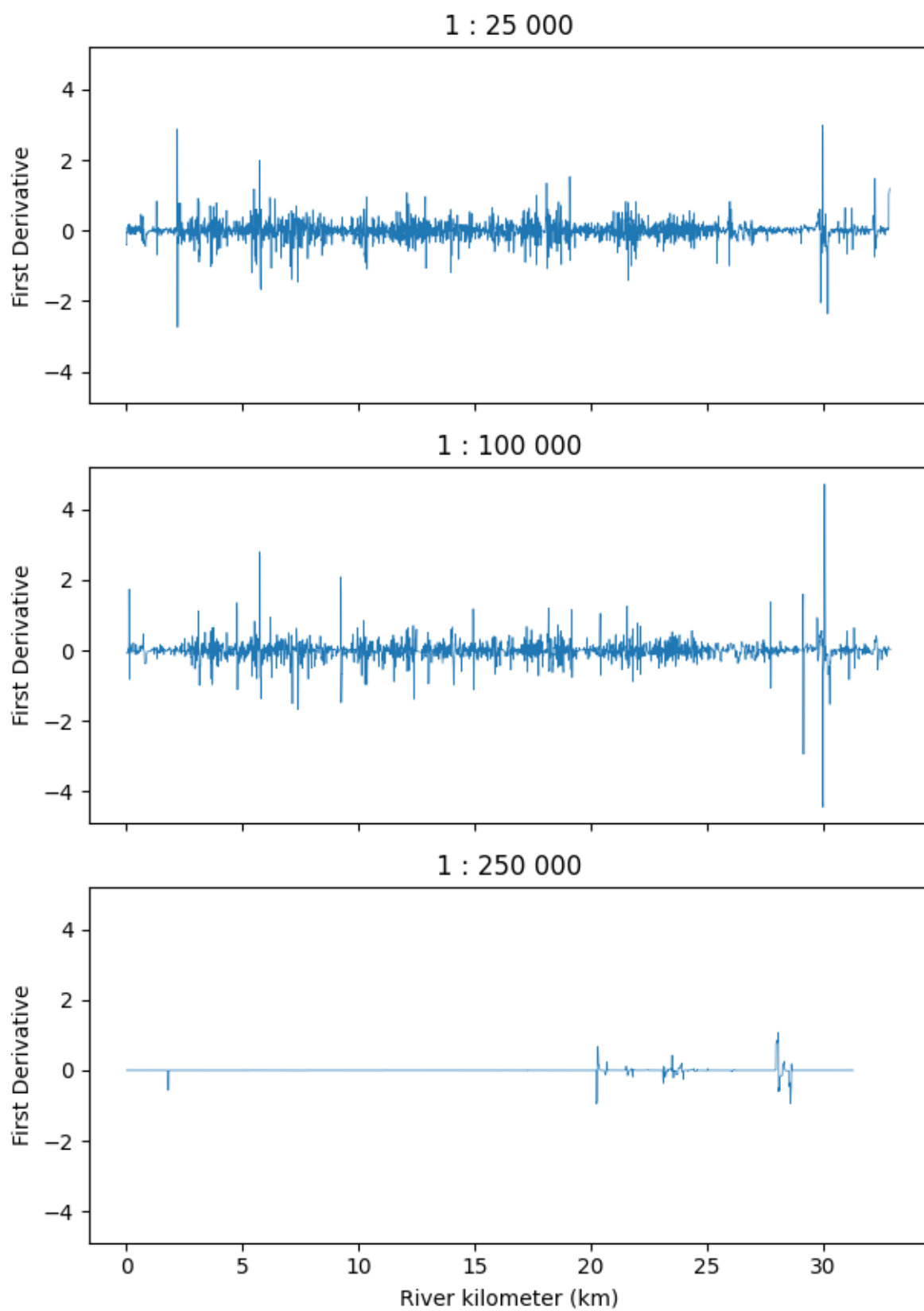
### 5.5.2.1 Graf

Graf vizualizující průběh derivace v závislosti na kilometrůžích naráží na stejný problém s čitelností jako graf šířky vodního toku, a to je velké množství dat. Při porovnání grafů v různých měřících lze pozorovat, že vodní tok reprezentovaný v měřítku 1 : 250 000 má méně lokálních extrémů; celkově křivka působí jako hladší. Hodnoty první derivace šířky Orlice v ZTM250 jsou velmi blízké nule téměř po celé své délce, reprezentace tohoto vodního toku v menším měřítku méně fluktuuje, což odpovídá předpokladu. Rozdíly mezi měřítky 1 : 25 000 a 1 : 100 000 nejsou u žádného z toků příliš výrazné. Grafy lze vidět na Obr. 5.31–5.33.

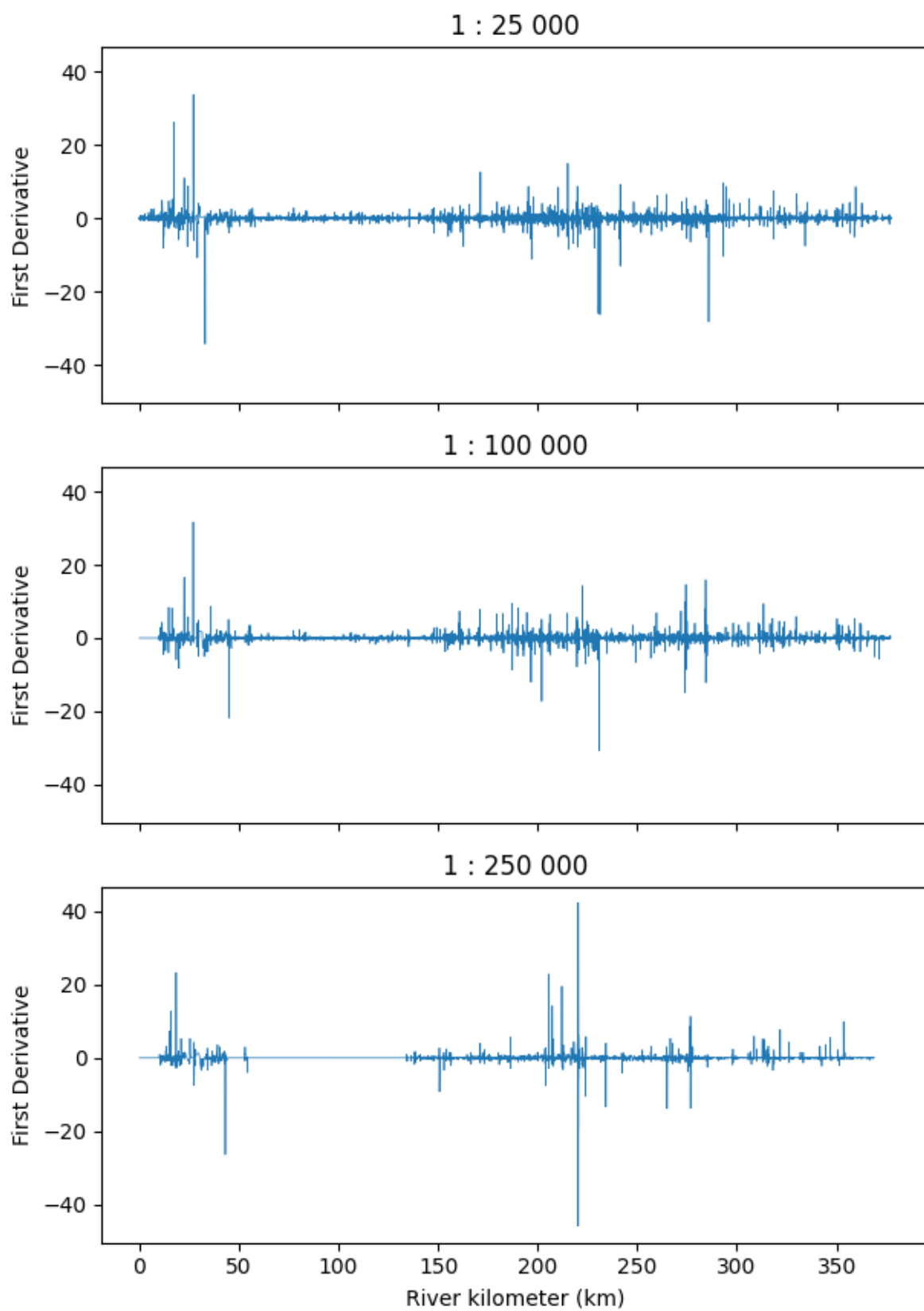


*Obr. 5.31: Hodnoty první derivace šířky Labe.*





*Obr. 5.32: Hodnoty první derivace šířky Orlice.*

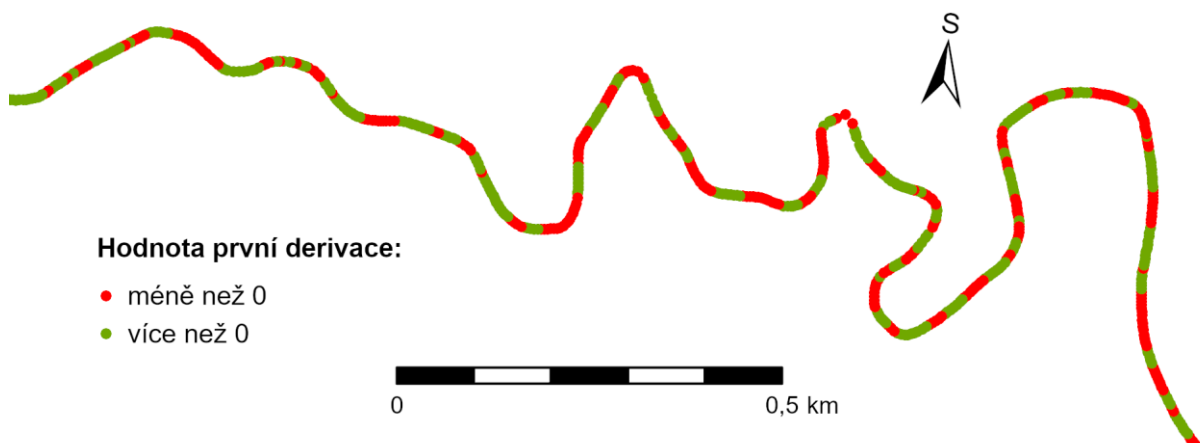


*Obr. 5.33: Hodnoty první derivace šířky Vltavy.*

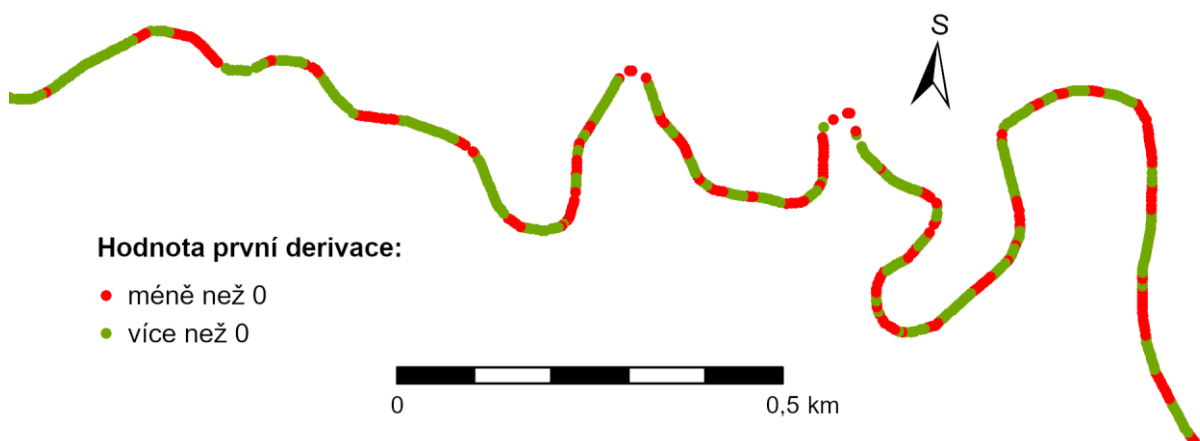
### 5.5.2.2 Metody tematické kartografie

Pro vizualizaci byla použita vrstva *river\_points.shp*, její vytvoření je popsáno v kap. 5.3. Vzhledem k množství dat u Labe a Vltavy lze jen těžko získat přehled o hodnotách první derivace na celém vodním toku, opět dochází k *overplottingu* (jednotlivé prvky bodové vrstvy se překrývají), je tedy třeba se podívat na kratší úseky ve větším mapovém měřítku.

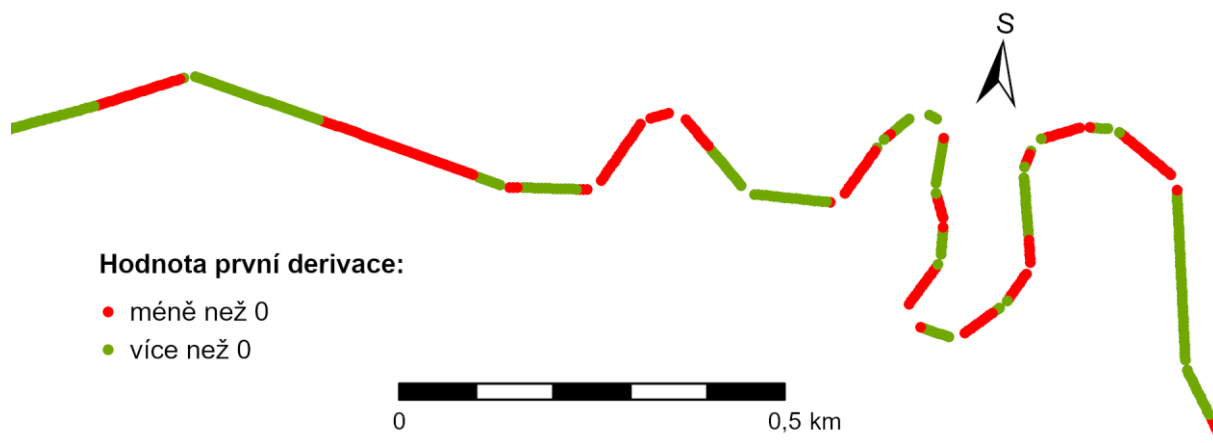
Na Obr. 5.34–Obr. 5.36 jsou znázorněny hodnoty kladné/záporné první derivace pomocí barevné stupnice. Lze tak dobře vidět, na kterých úsecích se tok rozšiřuje a zužuje. Lze pozorovat, že se monotonie šířky se zdaleka nejméně mění při datech ze ZTM250, což se předpokládalo.



Obr. 5.34: Hodnoty první derivace, úsek Orlice ZTM25.



Obr. 5.35: Hodnoty první derivace, úsek Orlice ZTM100.



Obr. 5.36: Hodnoty první derivace, úsek Orlice ZTM250.

### 5.5.3 Druhá derivace

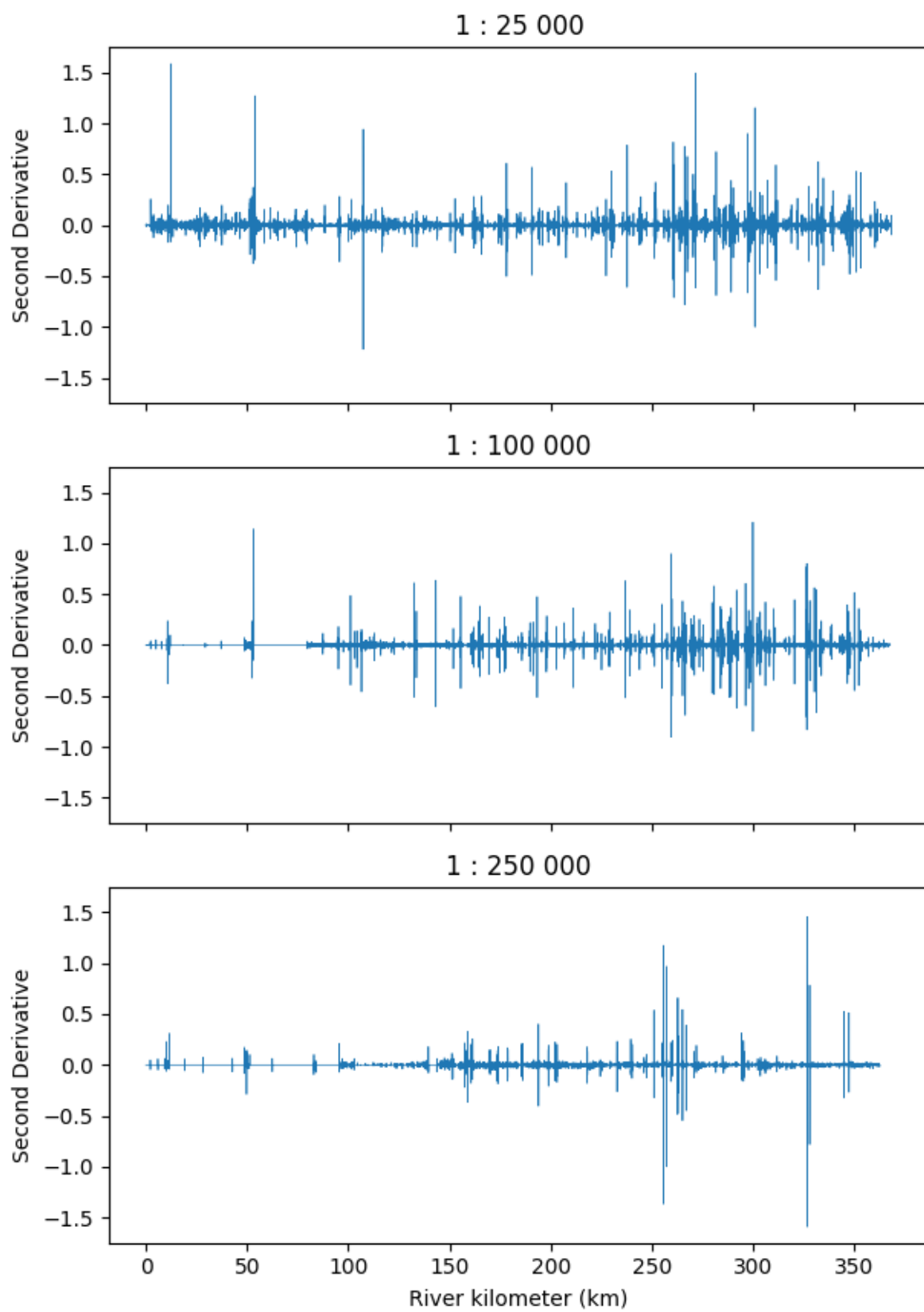
Druhá derivace vyjadřuje plynulost změny. Její význam je popsán v kap. 3.4.2. Hodnoty druhých derivací v krajních bodech jsou spočteny dopřednou (3.17), resp. zpětnou diferencí (3.18), zbylé hodnoty centrální diferencí (3.15). Analogicky jako u první derivace lze sledovat změnu znaménka, která vyjadřuje výskyt inflexních bodů, resp. kde funkce mění svoji konvexitu. Předpokládá se, že čím menší měřítko mapy, tím méně inflexních bodů, což potvrzují počty inflexních bodů uvedené v Tab. 5.3. Podobně jako u první derivace lze změnu znaménka druhé derivace použít jako parametr míry generalizace.

	Labe	Orlice	Vltava
ZTM25	18 158	1 901	15 174
ZTM100	11 814	1 631	12 583
ZTM250	6 776	592	6 864

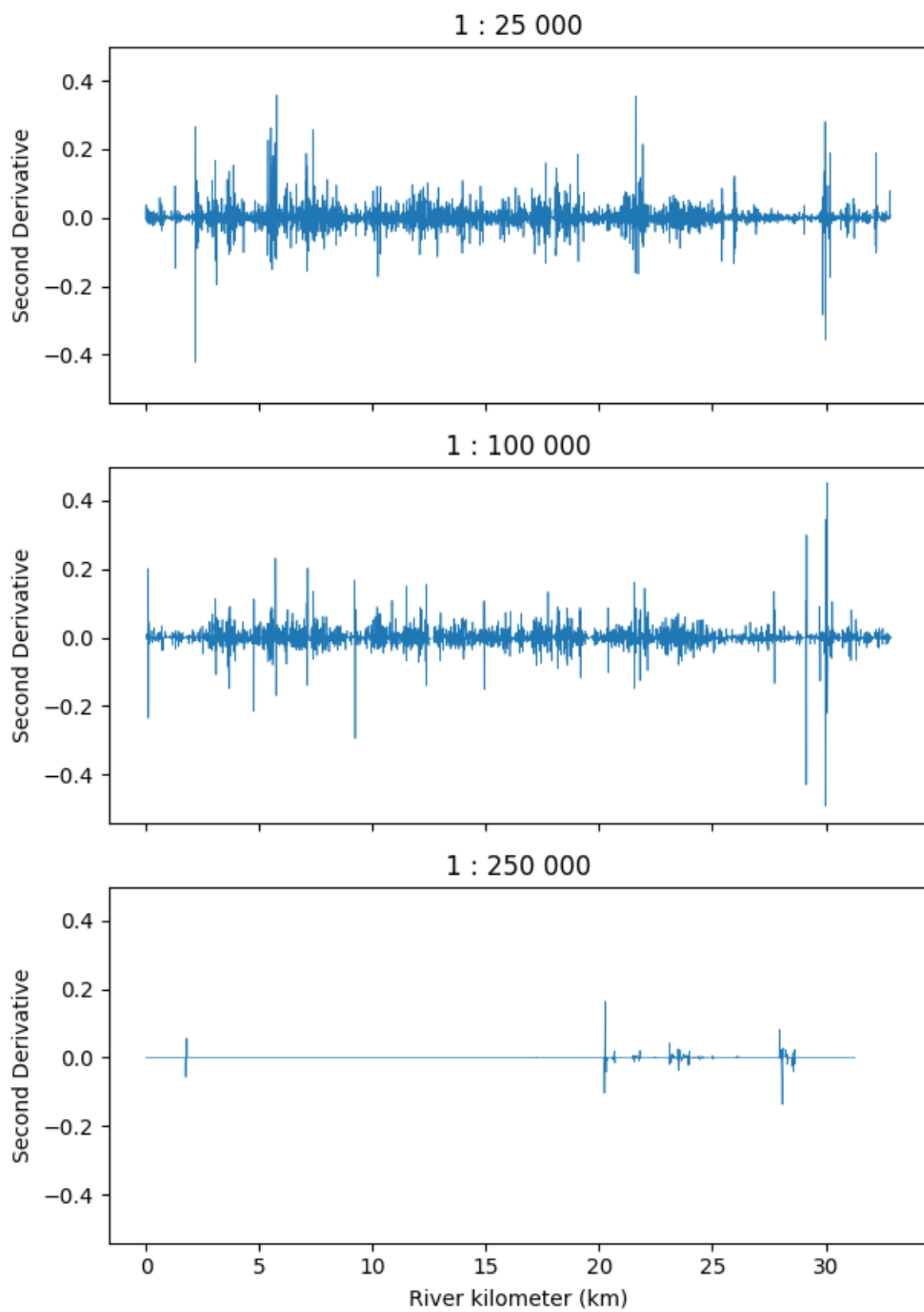
Tab. 5.3: Počet inflexních bodů.

#### 5.5.3.1 Graf

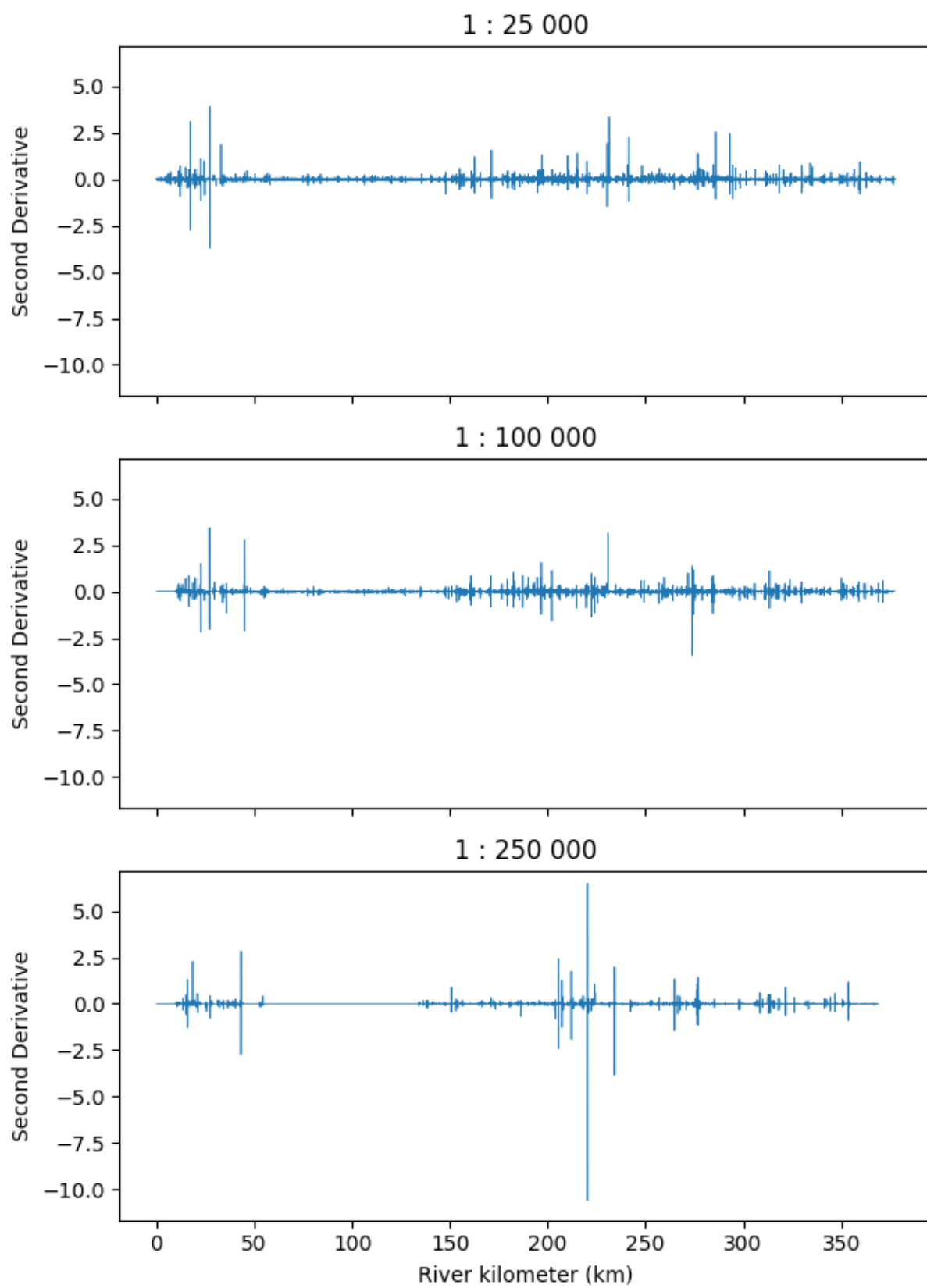
Podobě jako na grafech šířky a první derivace lze dobře identifikovat úseky, kde je šířka vodního toku konstantní, tj. vodní tok je reprezentován liniovým kartografickým znakem. Nejvíce lze tento fenomén pozorovat u měřítka 1 : 250 000, které má více hodnot druhé derivace blízké nule než zbylá dvě měřítka. Mezi měřítka 1 : 25 000 a 1 : 100 000 nelze pozorovat výrazné rozdíly. Grafy jsou znázorněny na Obr. 5.37–5.39.



Obr. 5.37: Hodnoty druhé derivace šířky Labe.



*Obr. 5.38: Hodnoty druhé derivace šířky Orlice.*



Obr. 5.39: Hodnoty druhé derivace šířky Vltavy.

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a implementovat metodu pro automatizovaný výpočet šířky vodního toku, výsledky následně vizualizovat a vzájemně porovnat napříč měřítky. Zkoumány byly řeky Labe, Orlice a Vltava, použitá data byla ze ZTM25, ZTM100 a ZTM250.

Navržená metoda pro výpočet šířky kombinuje metodu nejbližšího souseda a bipartitní párování. Tato metoda není pro účel měření šířky v literatuře téměř vůbec diskutována. Metoda poskytla dobré výsledky a má potenciál být využita pro hydrologické účely nebo v jiné fyzicko-geografické disciplíně.

Naměřené šířky byly vizualizovány pomocí grafu, histogramu a metodami tematické kartografie. Graf poskytl přehled naměřených hodnot v závislosti na kilometrůžce, vzhledem k množství dat byly grafy, obzvláště Labe a Vltavy, špatně čitelné. Na grafech šlo dobře identifikovat úseky, kde je šířka konstantní, tj. ty úseky, které jsou v původních datech reprezentovány liniovým kartografickým znakem.

Histogram poskytl přehled naměřených hodnot, ale bez prostorové informace. Rozdíly mezi měřítky byly však lépe viditelné než na grafu. Šlo dobře pozorovat, že čím menší měřítko, tím méně jsou nízké hodnoty šířek zastoupeny, jelikož by byly v daném měřítku na mapě špatně viditelné.

Metody tematické kartografie, konkrétně vizualizace šířky pomocí tloušťky nebo barvy linie, jsou vhodné pro ponechání prostorové informace. Byla patrná změna napříč měřítky v užších úsecích, které musely být zakresleny přes míru. Obě metody poskytují dobrý základ pro tematické mapy.

Jako statistické ukazatele byly spočteny první a druhá derivace. Ukázalo se, že počet změn znaménka první i druhé derivace se zmenšujícím se měřítkem snižuje, což splnilo předpoklad, že šířka řeky s menším měřítkem méně fluktuuje. Lze je tak použít jako parametr ke zjištění míry generalizace.

Graf první a druhé se neukázal být příliš názorný, podobně jako u šířky docházelo k *overplottingu*. Pouze data ze ZTM250 měla křivku první, resp. druhé derivace hladší než data ze ZTM25 a ZTM100.

Znaménko první derivace bylo vizualizováno pomocí barvy bodového znaku. Nebylo možné zobrazit celý vodní tok, jelikož by znázorněná data nebyla čitelná, proto byl vybrán pouze úsek



Orlice. Na příslušných obrázcích lze vidět, že čím menší znaménko, tím méně se střídá znaménko derivace, což se z celkového počtu změn dalo předpokládat.

V budoucnu je možné vylepšovat metodu pro měření šířek vodního toku, jelikož metody pro její automatizovaný výpočet z vektorových dat nejsou v literatuře prakticky vůbec řešeny. Vizualizaci pomocí grafu nebo metodami tematické kartografie by bylo možné využít v nějaké interaktivní aplikaci, popř. v mapě, aby si uživatel mohl zobrazit konkrétní úsek a naměřená data byla čitelnější.

## 7 Zdroje

### Literatura

ABU-AIN, W., ABDULLAH, S. N. H. S., BATAINEH, B., ABU-AIN, T., OMAR, K. (2013): Skeletonization algorithm for binary images. *Procedia Technology*, 11, 704–709.

AI, T., GUO, R. (2000): A Constrained Delaunay Partitioning of Areal Objects to Support Map Generalization. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 25(1), 35–41.

AICHHOLZER, O., AURENHAMMER, F. (1996): Straight skeletons for general polygonal figures in the plane. In *Lecture Notes in Computer Science*, 117–126.

ANDREADIS, K. M., SCHUMANN, G. J., PAVELSKY, T. (2013): A simple global river bankfull width and depth database. *Water Resources Research*, 49(10): 7164–7168.

ARMITAGE, J. J. (2019): Short communication: flow as distributed lines within the landscape. *Earth Surface Dynamics*, 7(1), 67–75.

BADER, M., BARRAULT, M. (2001): Cartographic Displacement in Generalization: Introducing Elastic Beams. In *proceedings of 4th workshop on progress in automated map generalisation, commission on map generalisation ICA, Beijing*.

BAYER, T. (2008): *Algoritmy v digitální kartografii*. Karolinum, Praha.

BLUM, H. (1967). *A transformation for extracting new descriptors of shape*. MIT Press, Cambridge

DE MORAES FRASSON, R. P., PAVELSKY, T. M., FONSTAD, M. A., DURAND, M. T., ALLEN, G. H., SCHUMANN, G., LION, C., BEIGHLEY, R. E., YANG, X. (2019): Global relationships between river width, slope, catchment area, meander wavelength, sinuosity, and discharge. *Geophysical Research Letters*, 46(6), 3252–3262.

DOUGLAS, D. H., PEUCKER, T. K. (1973): Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *Cartographica*, 10(2), 112–122.

DU, B., JIN, T., LIU, D., WANG, Y., WU, X. (2023): Accurate discharge estimation based on river widths of SWOT and constrained At-Many-Stations hydraulic geometry. *Remote Sensing*, 15(6), 1672.

ICA, 1967. Hundred Technical Terms in Cartography. International Association of Cartography, Bern

KANG, C. S., KANNIAH, K. D. (2022): Land use and land cover change and its impact on river morphology in Johor River Basin, Malaysia. *Journal of Hydrology. Regional Studies*, 41, 101072.

JIANG, B., XIE, Z., WU, X., WU, L., ZHOU, L. (2011): Topology constrain for river dimension-reducing generalization in land-use map. 19th International Conference on Geoinformatics, Shanghai, China, 1–4.

LAAKSONEN, A. (2018). *Guide to Competitive Programming: Learning and Improving Algorithms Through Contests*. Springer, Berlin

LEGG, N. T., HEIMBURG, C., COLLINS, B. D., OLSON, P. L. (2014): *The Channel Migration Toolbox: ArcGIS® Tools for Measuring Stream Channel Migration*. Washington Department of Ecology.

LEOPOLD, L. B., MADDOCK, T. (1953): *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. U.S. Geological Survey Professional Papers/U.S. Geological Survey Professional Paper.

LEWANDOWICZ, E., FLISEK, P. (2020): A method for generating the centerline of an elongated polygon on the example of a watercourse. *ISPRS International Journal of Geo-information*, 9(5), 304.

LI, Z. (2006). *Algorithmic foundation of Multi-Scale spatial representation*. CRC Press, Boca Raton

MAZUR, D. (2020): *Generalizace vodních toků metodou částečné prostorové redukce*. Diplomová práce. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie PŘF UK, Praha.

MCMASTER, R. B., SHEA, K. S. (1992). *Generalization in digital cartography*. Association of American Geographers, Washington.

MEISSNER, A. G. N., CARR, M. K., PHILLIPS, I. D., LINDENSCHMIDT, K. (2016): Using a Geospatial Model to Relate Fluvial Geomorphology to Macroinvertebrate Habitat in a Prairie River—Part 1: Genus-Level Relationships with Geomorphic Typologies. *Water*, 8(2), 42.

MENGEN, D., OTTINGER, M., LEINENKUGEL, P., RIBBE, L. (2020): Modeling river discharge using automated river width measurements derived from Sentinel-1 time series. *Remote Sensing*, 12(19), 3236.

PAVELSKY, T. M., SMITH, L. C. (2008): RivWidth: a software tool for the calculation of river widths from remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(1), 70–73.

PRASAD, Lakshman. (1998). Morphological Analysis of Shapes. *CNLS Newsletter*. 139.

RAO, K. D., SHRAVYA, A., DADHWAL, V. (2020): A novel method of satellite-based river discharge estimation using river hydraulic geometry through genetic algorithm technique. *Journal of Hydrology*, 589, 125361.

SCHAEFER, E., PELLETIER, J. (2020): An algorithm to reduce a river network or other graph-like polygon to a set of lines. *Computers & Geosciences*, 145, 104554.

SCHERELIS, V., DOERING, M., LAUBE, P. (2023): HydroWidth: a small-scale approach to calculate river width and its variability. *Transactions in GIS*, 27(5), 1503–1525.

TĂNASE, M., VELTKAMP, R. C. (2004): A straight skeleton approximating the medial axis. In *Lecture notes in computer science*, 809–821.

UNNITHAN, S. K. R., KANNAN, B., JATHAVEDAN, M. (2014): Betweenness centrality in some classes of graphs. *International Journal of Combinatorics*, 2014, 1-12.

VISVALINGAM, M., WHYATT, J. D. (1993): Line generalisation by repeated elimination of points. *Cartographic Journal*, 30(1), 46-51.

WANG, Z., LI, J., LIN, Y., MENG, Y., LIU, J. (2022): GrabRiver: Graph-Theory-Based river width extraction from remote sensing imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1-5.

YAMAZAKI, D., O'LOUGHLIN, F., TRIGG, M. A., MILLER, Z. F., PAVELSKY, T. M., BATES, P. D. (2014): Development of the Global Width Database for large rivers. *Water Resources Research*, 50(4), 3467-3480.

YANG, X., PAVELSKY, T. M., ALLEN, G. H., DONCHYTS, G. (2020): RivWidthCloud: an automated Google Earth engine algorithm for river width extraction from remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(2), 217–221.

ZHANG, F., SUN, Q., MA, J., LYU, Z., WEN, B. (2022): Progressive collapse of dual-line rivers based on river segmentation considering cartographic generalization rules. *ISPRS International Journal of Geo-information*, 11(12), 609.

ZHOU, J., KE, L., DING, X., WANG, R., ZENG, F. (2024): Monitoring spatial–temporal variations in river width in the Aral Sea Basin with Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 16(5), 822.

### **Zdroje dat**

ČÚZK (2023): Základní topografická mapa ČR 1 : 25 000 v S-JTSK (ZTM25), Základní topografická mapa ČR 1 : 100 000 v S-JTSK (ZTM100), Základní topografická mapa ČR 1 : 250 000 v S-JTSK (ZTM250). Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální. [www.cuzk.cz](http://www.cuzk.cz) (cit. 5. 10. 2023).

### **Ostatní zdroje**

Česká republika, zákon č. 254/2001 Sb. In *Sbírka zákonů České republiky*. 2001.