

DATABÁZOVÉ ŘEŠENÍ KARTOGRAFICKÉ GENERALIZACE ŘÍČNÍCH SÍTÍJan POPELÍNSKÝ¹, Karel STANĚK²

Geografický ústav, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 611 37, Brno, ČR

¹184443@mail.muni.cz, ²karst@mail.muni.cz**Abstrakt**

Článek hodnotí možné využití hydrologických klasifikací vodních toků pro účely automatizované kartografické generalizace. Říční síť resp. jednotlivé segmenty toků jsou zde chápány jako prvky databáze. Proto jsou hydrologické klasifikace implementovány do databázového prostředí PostGIS. V tomto open-source nástroji je pak proveden i výběr pro kartografickou generalizaci z měřítka 1:10 000 do 1:50 000 a následné zjednodušení vodních toků. Jako nejvhodnější kritérium výběru je zvolena Hortonova klasifikace. Vhodnými doplňujícími kritérii jsou délka toku, křivolakost toku a existence názvu toku. Výsledky generalizace jsou porovnány se Základní mapou ČR 1:50 000.

Abstract

This paper evaluates a possible use of stream labeling methods for automated cartographic generalization. Stream networks or rather the segments of streams are taken as the elements of a database. Stream labelling methods are implemented into PostGIS database system. This open-source tool is used for selection method of cartographic generalization as well. Subsequently, it is used for simplification of stream network. Horton's classification is chosen as the main criterion of selection. Length of stream segment, sinuosity of stream segment are additional criteria, named streams are considered more important. The results of generalization are compared with Základní mapa ČR 1:50 000.

Klíčová slova: Kartografická generalizace; hydrologie; říční síť; řád toku; PostGIS; PL/pgSQL**Keywords: Cartographic generalization; hydrology; river network; stream order; PostGIS; PL/pgSQL****1. ÚVOD**

Článek vychází z diplomové práce *Automatizovaná kartografická generalizace říčních sítí* zpracované na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity (Popelínský, 2011). Jejím cílem byla automatizace výběru vodních toků pro kartografickou generalizaci založená na využití klasifikací říčních sítí používaných převážně v hydrologii. Neznámějšími a nepoužívanějšími z nich jsou klasifikace Hortonova a Strahlerova. Tyto metody byly implementovány do prostředí PostGIS. Hortonova klasifikace byla dále využita jako základ schématu pro výběr vodních toků ze zdrojových dat v měřítku 1:10 000 do měřítka 1:50 000.

Kromě shrnutí nejdůležitějších bodů diplomové práce jsou ve článku prezentovány upravené algoritmy pro Hortonovu a Strahlerovu klasifikaci, jež dokáží provést ohodnocení sítě i v případě, že se v ní vyskytuje kružnice. Toto byl nejvýznamnější problém, na který diplomová práce narazila. Při hledání řešení bylo využito především odborných prací Gleyzer *et al.* (2004) a Touya (2007). Přičemž první z nich každé hraně (toku) v kružnici připojuje identifikaci uzlu, z něhož pochází její Strahlerův řád; řád se pak nezvyšuje, pokud se stékají toky vycházející ze stejného uzlu. Touya kružnice označil pomocnou proměnou a do výpočtu Strahlerova řádu je nezahrnul. Zde prezentovaná úprava tvoří další možnost, jak tento problém řešit.

2. HYDROLOGICKÉ KLASIFIKACE VODNÍCH TOKŮ

Dnes používané hydrologické klasifikace vodních toků ve valné většině využívají modifikací postupu, který navrhl R. E. Horton: „Řády toků jsou určeny tak, že nerozvětvené přítoky (zdrojnice) jsou prvního řádu; toky, které přijímají pouze přítoky prvního řádu, jsou druhého řádu; toky třetího řádu přijímají přítoky prvního a druhého řádu a tak dále. Hlavní tok je pak ten s nejvyšším řádem a určuje řád celého povodí.“ (Horton, 1945).

Shreve (1966) postup zjišťování Hortonova řádu interpretuje takto:

- zdrojové toky mají řád 1,
- pokud se stékají toky stejného řádu i , potom po soutoku bude řád roven $i+1$, současně dojde k přečíslování na $i+1$ toho z přítoků, který má (a) nejmenší úhel soutoku, (b) je nejdelší, (c) použije se jiné kritérium,
- pokud se stékají toky různého řádu i, \dots, n , po soutoku bude řád $H = \max(i, \dots, n)$, k přečíslování nedochází.

V praxi se dnes využívá téměř výhradně Strahlerova modifikace (Strahler, 1957):

- zdrojové toky mají řád 1,
- pokud se stékají toky stejného řádu i , potom po soutoku bude řád roven $i+1$,
- pokud se stékají toky různého řádu i, \dots, n , po soutoku bude řád $S = \max(i, \dots, n)$.

Dalšími, méně používanými, klasifikacemi jsou Shrevova (Shreve, 1967), nebo Scheideggerovy CSO a CAI (Scheidegger and Ranalli, 1968). Tyto postupy mají společné to, že řeší nedokonalosti, které jejich autoři vidí ve Strahlerově klasifikaci. Hlavními nedostatky jsou: toky nižšího řádu připojující se k toku řádu vyššího nemají vliv na jeho řád a neplatnost asociativního zákona.

3. IMPLEMENTACE

Algoritmy byly testovány na vektorové vrstvě vodních toků A02_Vodni_tok_JU, což je nejpodrobnější datová sada databáze DIBAVOD (1:10 000).

Pro zajištění správné funkčnosti klasifikačních algoritmů bylo nutné nejprve určit vzdálenost jednotlivých segmentů sítě od ústí, tedy jejich hloubku v grafu = topologickou vzdálenost. Tohoto bylo docíleno pomocí *indexovací funkce*, jež zároveň sestavuje pracovní tabulku *ricni_sit* a upravuje ji přidáním potřebných sloupců a vypočtením dále využívaných charakteristik. K algoritmizaci v prostředí PostGIS vybráno celkem 5 schémat: Strahlerovo, Hortonovo, Scheideggerovy CSO a CAI a Shrevovo. Tento článek se zaměří na dvě z nich: funkce *strahler* a *horton*.

3.1 Funkce *strahler*

Pomocí hloubky sítě zjištěné indexovací funkcí je vytvořen kurzor *str* sloužící ke správnému průchodu sítí – algoritmus bude nejprve procházet neklasifikované segmenty s největší hloubkou, čímž se zajistí návaznost na již klasifikované segmenty:

```
-----
str CURSOR FOR

    SELECT startpoint
    FROM ricni_sit
    WHERE strahler IS NULL

    ORDER BY hloubka DESC;
-----
```

Nalezení zdrojových toků a jejich ohodnocení řádem 1:

```
-----
UPDATE ricni_sit
```

```
SET strahler = '1'

WHERE startpoint NOT IN (
  SELECT endpoint
  FROM ricni_sit);
```

Příkazy v hlavním cyklu budou prováděny tak dlouho, dokud nebude všem segmentům přiřazen řád:

```
LOOP
  k = (SELECT COUNT (gid)
        FROM ricni_sit
        WHERE strahler IS NULL);
  IF k = 0 THEN EXIT;
  END IF;
```

Nejprve je otevřen kurzor a je tedy možné pracovat s hodnotami v něm uloženými. Následně začíná vnořený cyklus. S každým průchodem cyklu se z kurzoru vloží do proměnné **x** nová hodnota, pokud je kurzor (tedy i proměnná **x**) prázdný, cyklus se již neprovádí:

```
OPEN str;
LOOP
  FETCH FORWARD
  FROM str INTO x;
  IF x IS NULL THEN EXIT;
  END IF;
```

V proměnné **y** je uložen počet segmentů se Strahlerovým řádem **a**, které se vlévají do zkoumaného segmentu:

```
y = (SELECT COUNT (gid)
      FROM ricni_sit
      WHERE endpoint = x
      AND strahler = a);
```

V proměnné **z** je uložen počet segmentů bez ohodnocení Strahlerovým řádem, které se vlévají do zkoumaného segmentu:

```
z = (SELECT COUNT (gid)
      FROM ricni_sit
      WHERE endpoint = x
      AND strahler IS NULL);
```

V proměnné **v** je uložen počet segmentů se Strahlerovým řádem větším než **a**, které se vlévají do zkoumaného segmentu:

```
v = (SELECT COUNT (gid)
      FROM ricni_sit
      WHERE endpoint = x
```

```
AND strahler > a);
```

Pokud se do segmentu vlévá 1 a více toků s řádem větším než **a**, cyklus se přeruší a pokračuje od začátku s další hodnotou proměnné **x**:

```
CONTINUE WHEN (v >= 1);
```

Pokud se stéká právě jeden segment řádu **a** s libovolným počtem segmentů nižšího řádu (a všechny jsou již klasifikované, tedy žádný segment nemá *strahler = null*), výsledný segment bude mít řád roven **a**:

```
IF (y = 1 and z = 0) THEN
    UPDATE ricni_sit
    SET strahler = a
    WHERE startpoint = x;
END IF;
```

Pokud se stéká 2 a více segmentů řádu **a** s libovolným počtem segmentů nižšího řádu (a všechny jsou již klasifikované, tedy žádný segment nemá *strahler = null*), výsledný segment bude mít řád roven (**a + 1**):

```
IF (y >= 2 and z = 0) THEN
    UPDATE ricni_sit
    SET strahler = (a + 1)
    WHERE startpoint = x;
END IF;
```

Ukončení vnořeného cyklu, uzavření kurzoru, přechod na další iteraci hlavního cyklu a jeho ukončení:

```
END LOOP;

CLOSE str;

a = a + 1;

END LOOP;
```

3.2 Funkce *horton*

Hortonovo schéma se od ostatních implementovaných přístupů poměrně výrazně odlišuje. Pro ohodnocení segmentů totiž nestačí samotná struktura sítě, je jí nutné doplnit charakteristikou schopnou rozlišit hlavní tok od jeho přítoků. Pro tento účel neexistuje obecně platné kritérium, používají se například průtok, plocha povodí a další. Zde bylo užito délky toku, která většinou pozitivně koreluje jak s průtokem, tak s plochou povodí a ovlivňuje i jiné vlastnosti vodního toku. Navíc hodnoty délky jsou snadno zjistitelné – také přímo v PostGIS je implementována funkce pro její výpočet.

Podmínkou pro zjištění Hortonova řádu je předchozí očíslování segmentů řádem podle Strahlera. Algoritmus pak postupuje proti směru toku a tento řád přepisuje, z toho plyne, že kurzor musí být definován odlišně oproti předchozímu algoritmu:

```
hor CURSOR FOR
    SELECT startpoint
    FROM ricni_sit
    ORDER BY hloubka;
```

Hlavní tok je definován od ústí povodí, má tedy hloubku 1 a jeho Hortonův řád je roven řádu podle Strahlera:

```
-----
UPDATE ricni_sit
SET horton = strahler
WHERE hloubka = 1;
-----
```

Přerušení cyklu je opět definováno pomocí hodnot kurzoru v proměnné **x**:

```
-----
LOOP
    FETCH FORWARD
    FROM hor INTO x;
    IF x IS NULL THEN EXIT;
    END IF;
-----
```

V proměnné **z** je uloženo *gid* segmentu:

- [1] jehož koncový bod je roven **x**,
- [2] jenž má ze segmentů vybraných v [1] nejvyšší řád podle Strahlera,
- [3] jenž je nejdelší ze segmentů vybraných v [2].

Jinak řečeno: ze všech segmentů, které se stékají v bodě **x**, bude do **z** uložena identifikace toho, který má nejvyšší Strahlerův řád. Pokud se bude stékat více segmentů se stejným řádem, bude do **z** uložena identifikace nejdelšího z nich.

```
-----
z = (SELECT gid
    FROM ricni_sit
    WHERE endpoint = x
    AND strahler = (SELECT MAX (strahler)
        FROM ricni_sit
        WHERE endpoint = x)
    ORDER BY delka DESC
    LIMIT 1);
-----
```

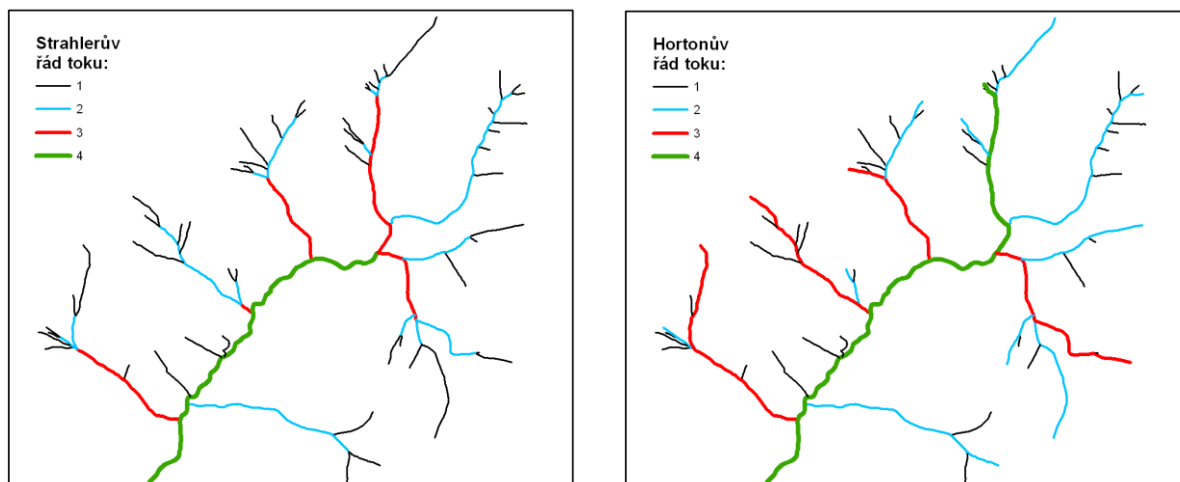
Segment, jehož identifikace je rovna **z**, se stává (dílčím) hlavním tokem a jeho Hortonův řád tedy bude roven Hortonovu řádu segmentu, do kterého se vlévá. Ostatní segmenty budou mít Hortonův řád roven svému Strahlerovu řádu.

```
-----
UPDATE ricni_sit
SET horton = (SELECT MAX (horton)
    FROM ricni_sit
    WHERE startpoint = x)
WHERE gid = z;

UPDATE ricni_sit
SET horton = strahler
WHERE endpoint = x
-----
```

```
AND gid <> Z;
```

```
END LOOP;
```



Obr. 1. Část povodí klasifikovaná Strahlerovým (vlevo) resp. Hortonovým řádem (vpravo).

Výběr vodních toků je proveden censálním způsobem, tzn. jsou předem stanoveny podmínky, které prvky budou do výsledné mapy zahrnuty (Lauerma, 1974: 87). Podle Lauerma (1974: 266) je základním censem pro vodní toky minimální délka, její hodnota se pak pohybuje mezi 5 mm a 10 mm. Všechny 6 hodnot (po 1 mm) z tohoto rozmezí bylo vyzkoušeno jako jedno z kritérií výběru společně s níže uvedenými. Na základě zhodnocení výsledků z hlediska zachování typu sítě a rozložení toků v částech sítě byla jako nejvhodnější vybrána minimální délka rovna 7 mm, což v měřítku 1:50 000 odpovídá 350 m.

Dalšími kritérii byly zvoleny Hortonův řád, křivolakost (délka toku dělena vzdáleností počátečního a koncového bodu) a existence názvu toku. Hortonův řád byl vybrán navzdory tomu, že nedokázal v několika případech přesně rozhodnout o hlavním toku (viz obr. 1 vpravo), protože jako jediný z klasifikačních postupů umožňuje rozlišit podle významu mezi zdrojovými toky (ostatní klasifikace dávají všem zdrojovým tokům stejnou hodnotu – 1, resp. 2 u Scheideggerovy CAI). Opomenutí jakéhokoliv důležitého toku by mělo zabránit kritérium existence názvu toku (název toku využil též Touya (2007)). Zde se vycházelo z předpokladu, že toky, mající v databázi DIBAVOD zanesené jméno, jsou důležitější než ostatní. Kritérium křivolakosti by mělo zohledňovat funkci vodního toku jako topografického referenčního prvku, tedy zabránit odstranění tvarově unikátních vodních toků, které by mohly sloužit k orientaci v terénu.

Všechna čtyři kritéria mají stejnou váhu, to znamená, že segment se objeví ve výsledné mapě, když splňuje alespoň jedno z nich. Do výběru tedy byly zahrnuty:

- [1] všechny segmenty delší než 350 m (7 mm na mapě),
- [2] všechny segmenty s Hortonovým řádem větším než 1,
- [3] všechny segmenty s křivolakostí větší než 1,4,
- [4] všechny segmenty, u kterých existuje název toku.

Realizace výběru proběhla jednoduchým SQL příkazem (*gener50*):

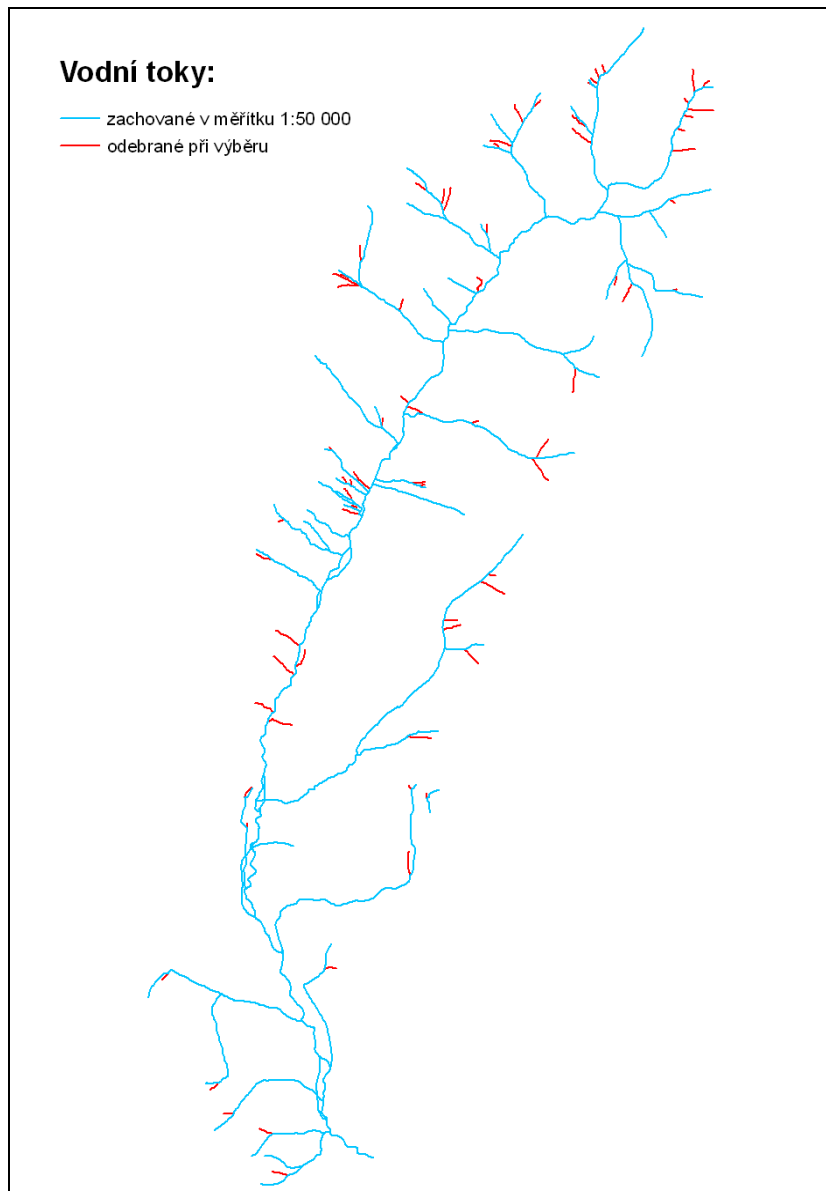
```
CREATE TABLE vyber50 AS
SELECT gid, the_geom, nazev, strahler, horton
FROM ricni_sit
WHERE delka > 350
```

```
OR krivolakost > 1.4
```

```
OR horton <> 1
```

```
OR nazev IS NOT NULL
```

Výsledná tabulka *vyber50* má 200 záznamů, oproti 271 v tabulce *ricni_sit*. Nutnou úpravou – spojením navazujících segmentů (nástroj *Merge* v ArcMap) – se počet segmentů snížil na 135 v tabulce *vyber50_merge*, jež je výchozí pro zjednodušovací algoritmus. Porovnání původních dat a vodních toků vybraných do měřítka 1:50 000 je možné vidět dále (obr. 2).



Obr. 2. Toky výběrem odebrané a toky zachované.

Ke zjednodušení výsledků byla použita PostGIS implementace algoritmu *Douglase a Peuckera* (*fce st_simplify*). Vytvoření zjednodušené vrstvy *vyber50_merge_DP* bylo docíleno pomocí následující příkazu:

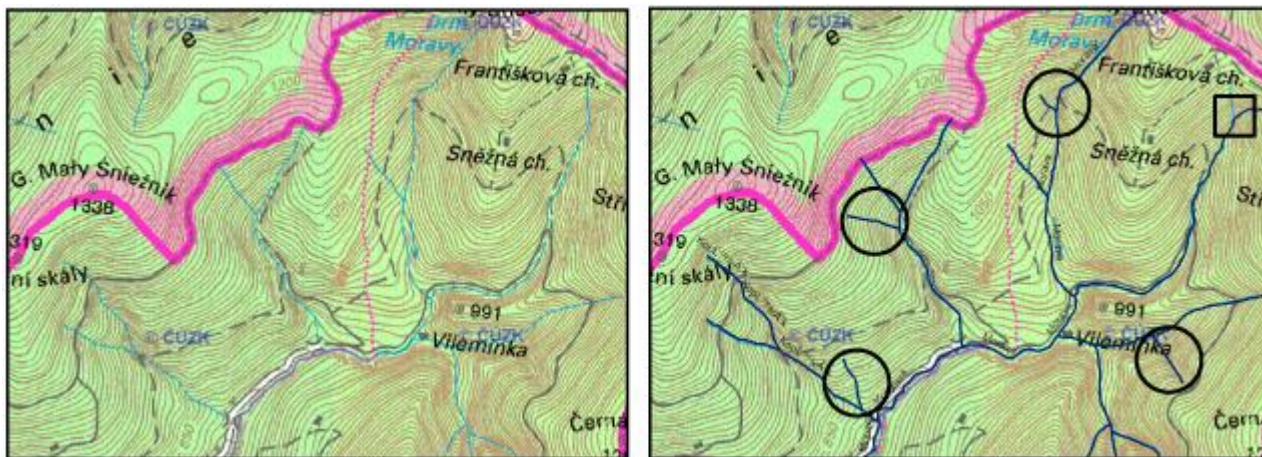
```
CREATE TABLE vyber50_merge_DP AS  
  
SELECT gid, nazev, st_simplify (the_geom, 7.5) AS simpl_reka  
  
FROM vyber50_merge;
```

Zvolená tolerance (7,5 m) vychází ze šířky signatury vodního toku na výsledné mapě – 0,3 mm, což odpovídá 15 m v měřítku 1:50 000. Šířka signatury je určena s ohledem na hodnoty nejmenšího viditelného bodu. U nás se tato hodnota (zjištěná měřením ze základních a topografických map) pohybuje v rozmezí 0,23 až 0,28 mm (Staněk, 2000).

4 POROVNÁNÍ SE ZÁKLADNÍ MAPOU ČR 1:50 000

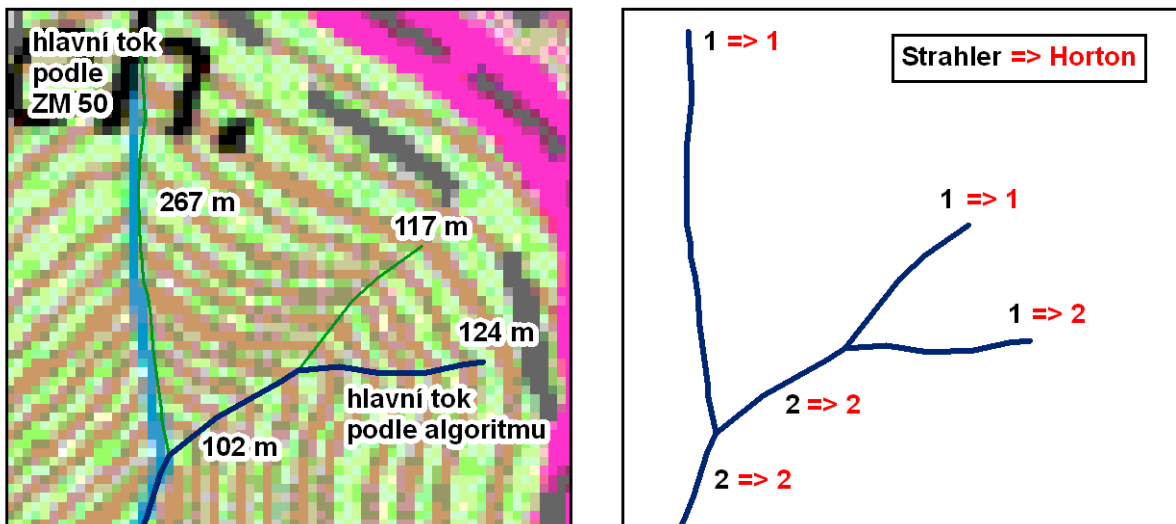
Porovnání bylo provedeno na třech výřezech zájmového území. Jeden z nich je vyobrazen na obr. 3. Použita byla nezjednodušená vektorová vrstva, aby lépe odpovídala tokům na ZM 50. Na první pohled je patrné, že počet toků je na ZM 50 výrazně nižší než ve *vyber50_sjed*. Toky zařazené navíc (zvýrazněné na obr. 4 černými kružnicemi) jsou vesměs segmenty s délkou těsně přesahující zvolenou minimální hodnotu 350 m, případně kratší segmenty Hortonova řádu 2. Parametry křivolakosti a názvu toku žádné další nesrovnalosti nezpůsobily.

Jiným typem odlišnosti mezi srovnávanými daty je rozdílné určení hlavního toku, na obr. 3 označené černým čtvercem. Algoritmus pro určení hlavního toku využívá Hortonovu klasifikaci, kde použitým kritériem byla délka toku. Ze dvou zdrojových toků tedy vybere ten delší, není už ale schopen postihnout případ jako je na obr. 4. Zde je součet délek segmentů hlavního toku kratší než délka připojujícího se segmentu, ten by tím pádem měl být hlavním tokem spíše. Tato nedokonalost algoritmu způsobuje různou lokalizaci některých pramenů oproti ZM 50.



Obr. 3. Porovnání se Základní mapou 1:50 000.

Obr. 4 (vpravo) ukazuje postup přečíslování Strahlerova řádu na řád Hortonův, kdy algoritmus za hlavní tok bere primárně segment s vyšším Strahlerovým číslem. Až pokud je toto kritérium pro oba segmenty stejné, rozhoduje podle délky. Vlevo je vidět z toho pramenící odlišné určení hlavního toku podle algoritmu a podle ZM 50.



Obr. 4. Rozdílné určení hlavního toku na mapě a podle algoritmu (vlevo), postup určení hlavního toku algoritmem (vpravo).

5. ZÁVĚR

Největšími přednostmi implementovaných algoritmů pro klasifikace Hortona a Strahlera je správné ohodnocování segmentů sítě i v situaci, kdy se spojují v jednom místě více než dva segmenty. Algoritmy se též dokáží vypořádat s přítomností kružnic (ostrovů) v síti. Kromě toho nejsou implementované klasifikace výpočetně náročné – pro vrstvu s 271 záznamy v tabulce byly doby běhu programů následující: *indexovací funkce* 422 ms, funkce *strahler* 464 ms, funkce *horton* 281 ms. Při testování jinak rozsáhlých povodí byla zjištěna lineární složitost algoritmů.

Pro selekci při kartografické generalizaci je nejvhodnější použít Hortonovo schéma oproti Strahlerovu i dalším hydrologickým klasifikacím (Shrevova, Scheideggerovy). Hortonova klasifikace poskytuje nejučinnější nástroj pro rozlišení důležitosti segmentů sítě, i přes nevýhody schématu z hlediska popisu topologie sítě a nedokonalosti v určování hlavního toku povodí. Výhody Hortonova schématu jsou nejvíce patrné při rozhodování o odebrání/zachování zdrojových segmentů.

Vhodnými doplňujícími kritérii k Hortonově klasifikaci jsou délka toku, křivolakost toku a existence názvu toku. Kritérium křivolakosti bylo zvoleno za účelem zachování tvarově unikátních vodních toků, které by mohly sloužit k orientaci v terénu. Hodnota minimální délky toku byla vybrána s ohledem na to, aby se v průběhu generalizace nezměnil typ říční sítě. Kritérium názvu toku vycházelo z atributu podkladové databáze (DIBAVOD) a tím zohlednilo určitou konvenci používanou při pojmenovávání toků. Název toku zároveň korigoval nedostatky Hortonova řádu.

Již bylo zmíněno, že při porovnání výsledků se Základní mapou ČR 1:50 000 byly největší rozdíly nalezeny v určování zdrojnic toků. Aby výsledky lépe odpovídaly tištěné mapě, bylo by nutné změnit (doplnit) kritéria určení hlavního toku. Vhodnou charakteristikou by mohl být například průtok či křivolakost toku. Otázkou však je, zda vůbec existuje objektivní kritérium pro určení hlavního toku, zda v tomto ohledu nehraje důležitější roli konvence (Labe x Vltava). Dalším faktorem, který přispívá k rozdílu mezi oběma mapami, jsou úpravy prováděné kartografy při tvorbě a úpravách Základní mapy ČR 1:50 000. K rozhodnutí o zdrojnicích toků mohlo přispívat zaplnění mapy v daném místě, případné konflikty s ostatními prvky mapy nebo subjektivní rozhodnutí kartografa.

LITERATURA

- Gleyzer, A. et al. (2004) *A fast recursive gis algorithm for computing Strahler stream order in braided and nonbraided networks*. Journal of the American Water resources Association, vol. 40, no. 4, p. 937-946.
- Horton, R. E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin, 1945, vol. 56, no. 3, p. 275-370.
- Lauer mann, L. (1974) *Technická kartografie I*. Vojenská akademie Antonína Zápotockého, Brno. 346 s.
- Popelínský, J. (2011) *Automatizovaná kartografická generalizace říčních sítí*. Masarykova univerzita, Brno.
- Scheidegger, A. E. and Ranalli, G. (1968) Topological significance of stream labelling methods. Hydrological Sciences Journal, vol. 13, no. 4, p. 77-85.
- Shreve, R. L. (1967) Infinite topologically random channel networks. Journal of Geology, no. 2, p. 178-186.
- Shreve, R. L. (1966) Statistical law of stream numbers. Journal of Geology, vol. 74, no. 1, p. 17-37.
- Staněk, K. (2000) *Zjednodušení a zhlazování liniových prvků v automatizované kartografické generalizaci*. Masarykova univerzita, Brno, 129 s.
- Strahler, A. N. (1952) Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, vol. 63, no. 11, p. 1117-1142.
- Strahler, A. N. (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union, vol. 38, no. 6, p. 913 -920.
- Touya, G. (2011) *River networks selection based on structure and pattern recognition*. Proceedings of XXIII International Cartographic Conference Moscow.