



Kartografické modelování VI – Hydrologické modelování

jaro 2021

Petr Kubíček

kubicek@geogr.muni.cz

**Laboratory on Geoinformatics and Cartography (LGC)
Institute of Geography
Masaryk University
Czech Republic**



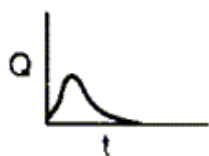
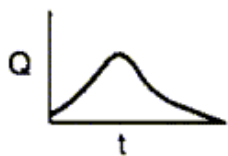
Pro zajímavost se můžete podívat na video, kde se řeší:

VIESHED IN REAL TIME

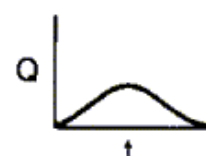
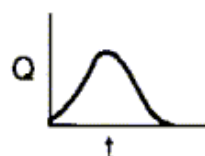
<https://www.youtube.com/watch?v=OrM2EDjT8ZM&feature=youtu.be>

Vliv topografie na odtokové poměry

Area

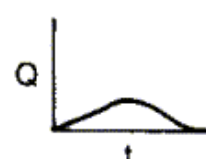
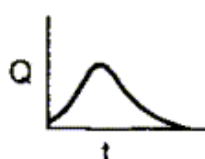
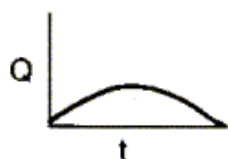
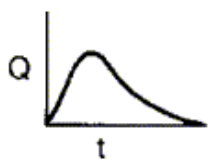


Slope



Drainage density

Shape







Terminologie

- **Povrchový odtok** - jednoduché přiřazení směru odtoku z dané buňky do jedné či více sousedních buněk.
- **Směr odtoku** (*flow direction*)- *směr, kterým při simulaci povrchového odtoku odtéká voda z dané buňky.*
- **Přítok, odtok, odtoková trasa** - uspořádaný řetězec buněk, který vznikne postupným sledováním směrů odtoku.
- **Konvergence, divergence** (disperze), **paralelní odtoková síť.**

78	72	69	71	58	49
74	67	56	49	46	50
69	53	44	37	38	48
64	58	55	22	31	24
68	61	47	21	16	19
74	53	34	12	11	12



2	2	2	4	4	8
2	2	2	4	4	8
1	1	2	4	8	4
128	128	1	2	4	8
2	2	1	4	4	4
1	1	1	1	4	16

Elevation surface

Flow direction

32	64	128
16	1	1
8	4	2

Direction coding

Směr odtoku

- Směr odtoku je takový směr, kterým při simulaci povrchového odtoku odtéká voda z dané buňky.
- Podle toho, zda je pro danou buňku povolen pouze jeden směr odtoku (směr odpovídající největšímu spádu) či směrů více, jedná se buď o **jednosměrný** (single flow) či **vícsměrný** (multiple flow) **odtok**.
- **ArcGIS určuje pouze jednosměrný odtok pomocí algoritmu SFD8 (Single Flow 8-Direction), též nazývaný D8 – fokální analýza.**

Směr odtoku

- Výpočet **největšího spádu** a přiřazení hodnoty 2^n , kde $0 \leq n \leq 7$.

$$\text{FlowDirection} = 2^{j-1} \text{ where } j = i \text{ for } \left\{ \max_{i=1,8} \left\{ \varphi(i) \frac{z_9 - z_i}{\lambda} \right\} \right\}$$

z_6	z_7	z_8
z_5	z_9	z_1
z_4	z_3	z_2

Cell addressing
(z_i)

32	64	128
16		1
8	4	2

Flow directions

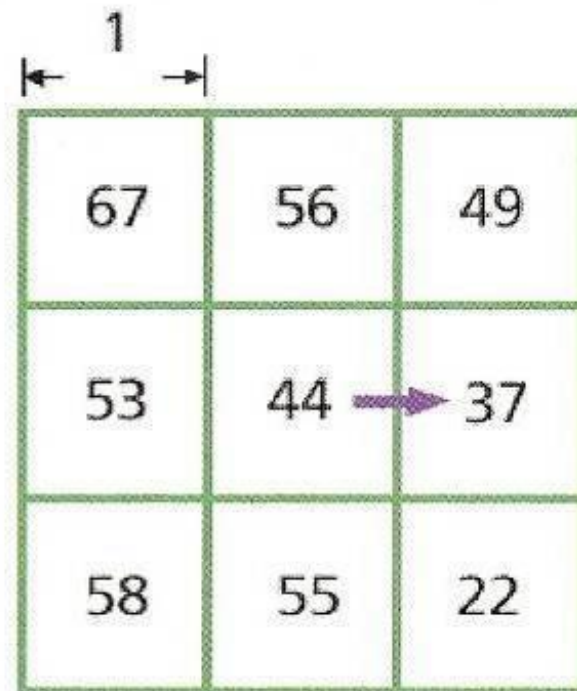
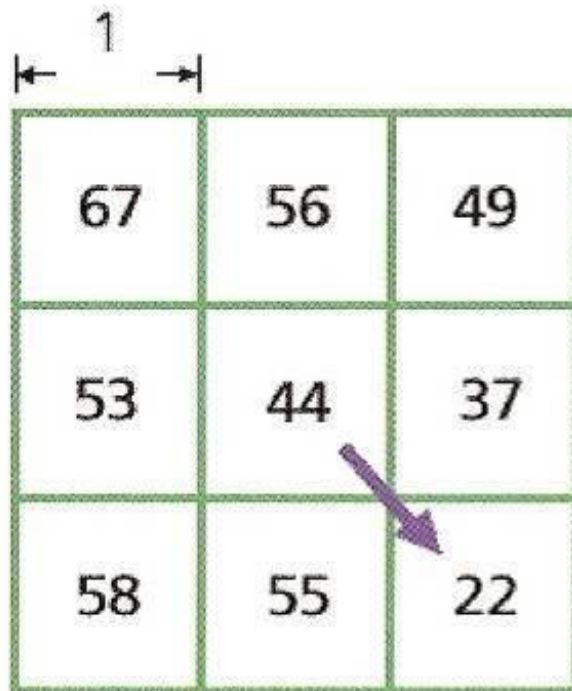
$\varphi(i) = 1$ for N, S, E, W neighbours

$= 1/\sqrt{2}$ for NE, SE, NW, SW neighbours

λ is cell spacing

Výpočet směru odtoku

Maximální spád = změna v hodnotě_z / vzdálenost * 100

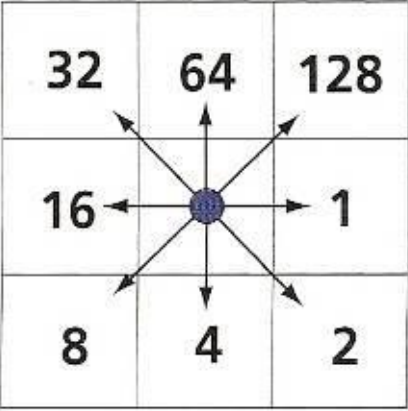


Slope :

$$\frac{44 - 22}{\sqrt{2}} = 15.56$$

$$\frac{44 - 37}{1} = 7$$

Příklad



67	56	49	46	50
53	44	37	38	48
58	55	22	31	24
61	47	21	16	19
53	34	12	11	12

2	2	4	4	8
1	2	4	8	4
128	1	2	4	8
2	1	4	4	4
1	1	1	2	16

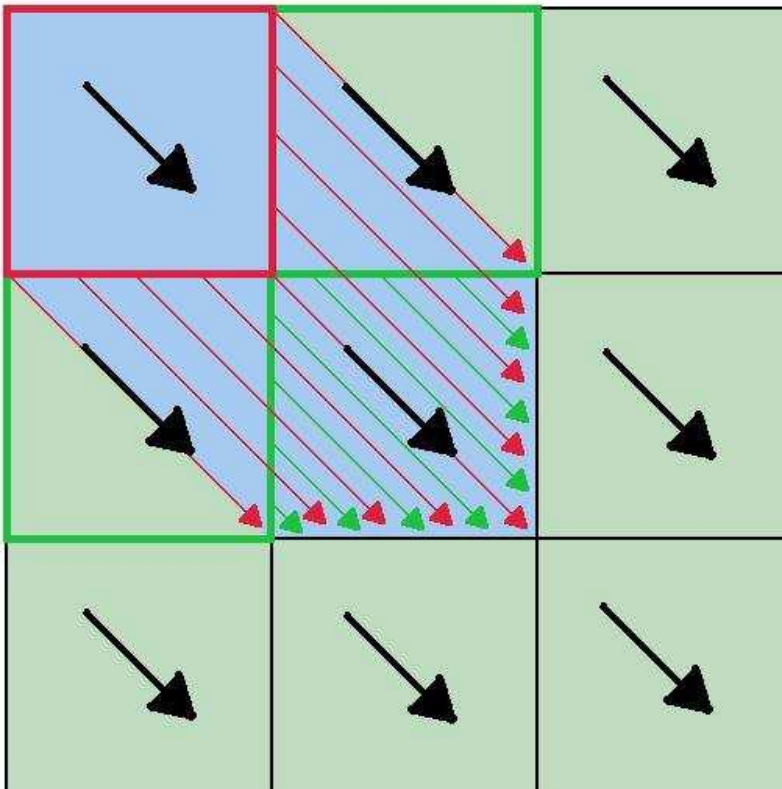
Více o D8

- Možnost výskytu více směrů odtoku se stejnou hodnotou:
 - Přiřadit **obě hodnoty a sečíst** jejich směry (ArcGIS je později vyhodnotí jako bezodtoké oblasti).
 - Použít první směr.
 - Označit buňku jako nedefinovanou.
- **Směry odtoku mají rozlišení pouze 45°** - problémy s orientací svahu, špatně znázorňuje disperzní odtok a má **tendenci vytvářet paralelní linie typické pro ploché svahy.**

Parallel
streams on
planar
slopes
(at 45°
increments)



D8 - slabiny



- Odtok simulovaný D8 algoritmem na nakloněné rovině. Při diagonálním **směru odtoku** (tlusté černé šipky) převádí D8 algoritmus do středové buňky pouze vodu z červeně zvýrazněné buňky v levém horním rohu (**červené šipky**).
- Přitom ve **skutečnosti** do buňky teče i voda z buněk zeleně označených (nahore a vlevo, **zelené šipky**).
- **Skutečné množství vody vtékající do středové buňky je tak dvojnásobné oproti množství simulovanému D8 algoritmem.**



Alternativní výpočet - Rho8

- Částečně řeší paralelní odtok
- Stále neřeší divergentní odtok a případně povrchový odtok (plošný odtok například v oblastech rozvodnic).
- Pokaždé dodá odlišný výsledek

$$\text{FlowDirection} = 2^{j-1} \text{ where } j = i \text{ for } \left\{ \max_{i=1,8} \left\{ \varphi(i) \frac{z_9 - z_i}{\lambda} \right\} \right\}$$

$\varphi(i) = 1$ for N, S, E, W neighbours

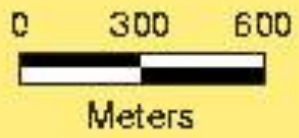
$\varphi(i) = 1/(2 - r)$ for diagonals where

r is a **random variable** between 0 and 1

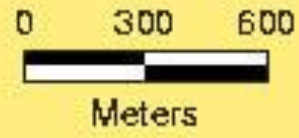
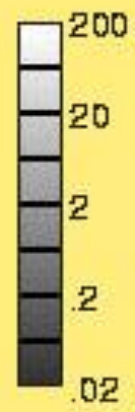
Srovnání D8 a Rho8



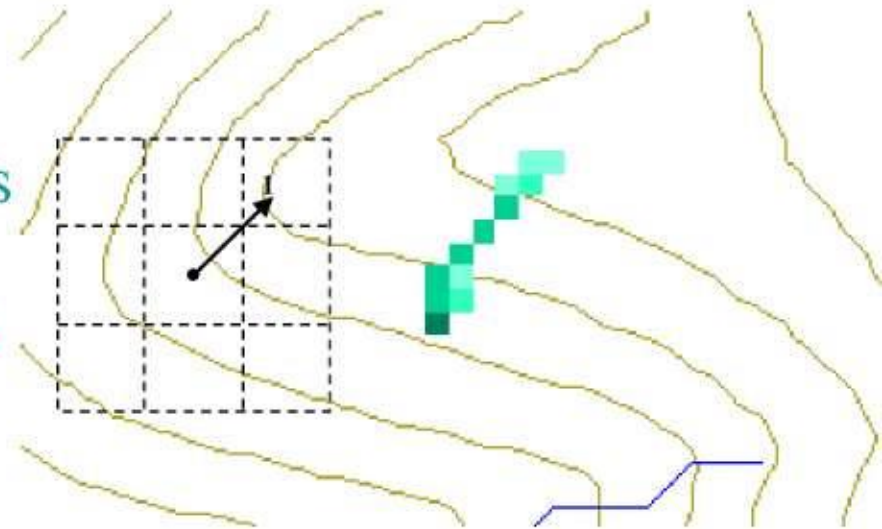
Contributing area (ha)



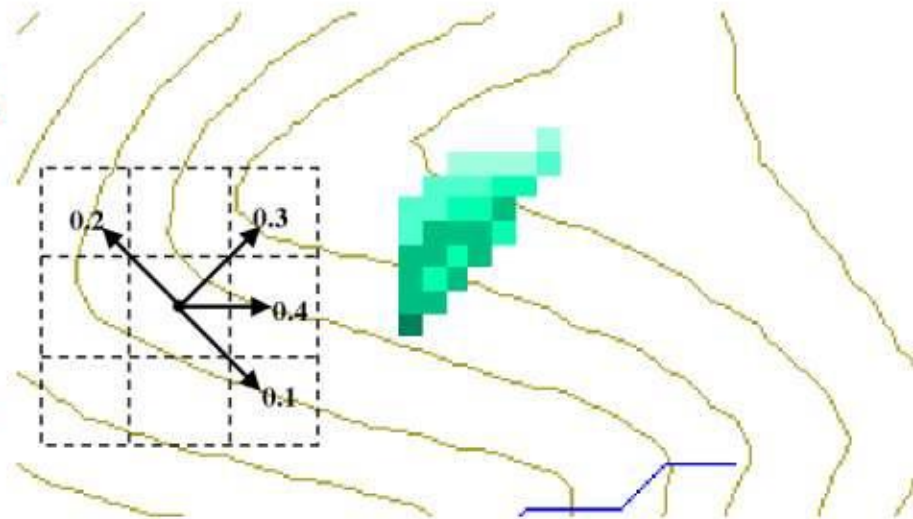
Contributing area (ha)



Single Flow Direction Grid — A numerical representation of the flow direction field in which each cell takes on one of eight values depending on which of its eight neighboring cells is in the direction of steepest descent

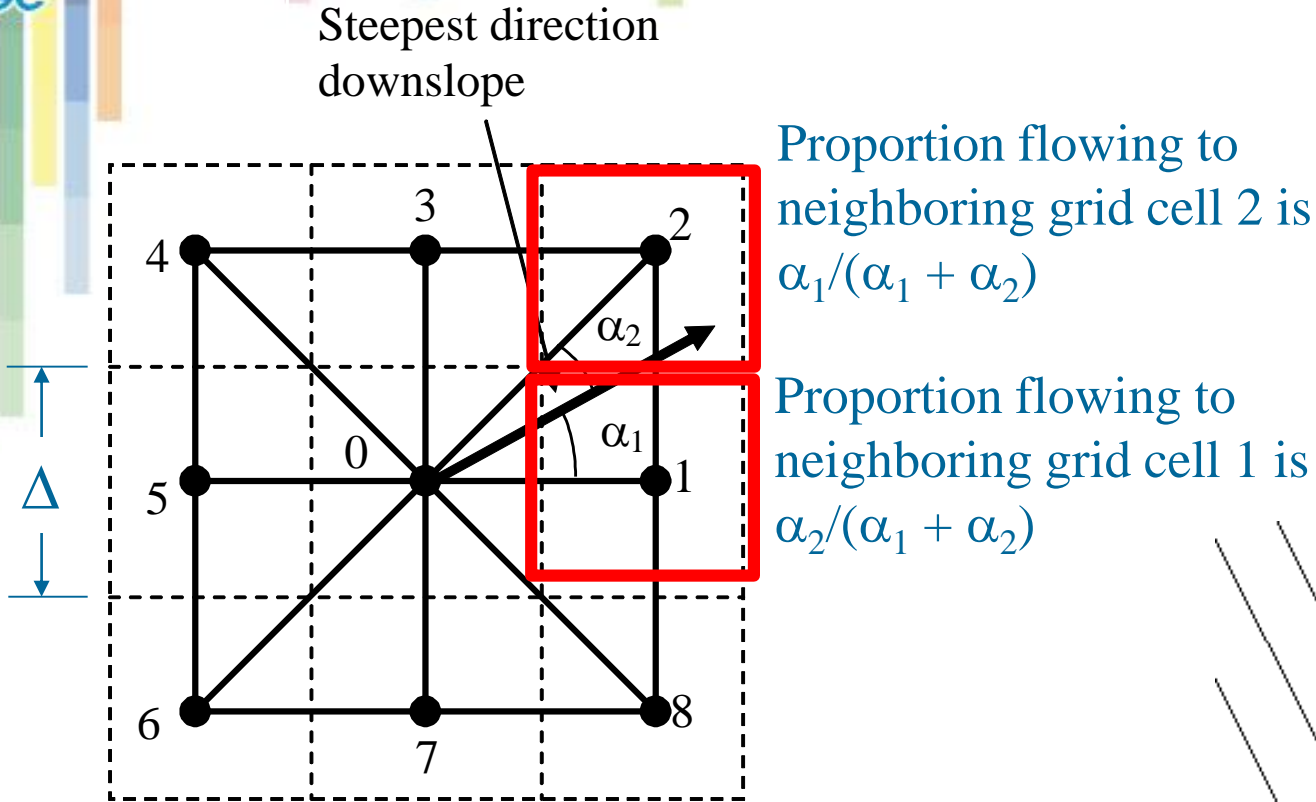


Multiple Flow Direction Grid — A numerical representation of the flow direction field in which flow is partitioned between one or more of the eight neighboring cells such that proportions add up to one

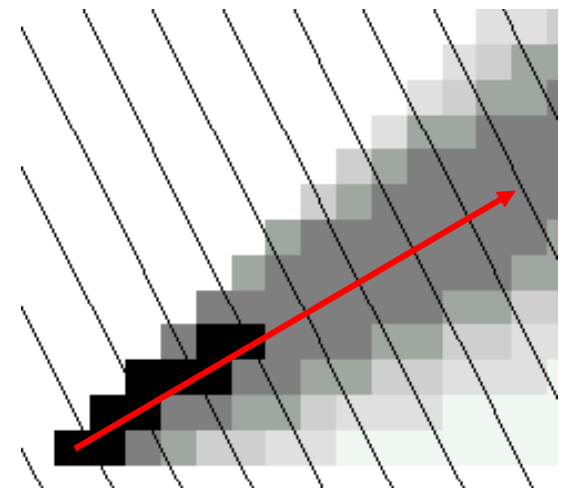




D_{∞} (infinity) Multiple flow direction model



Flow direction as a single angle taken as the steepest downward slope on the eight triangular facets centered at each pixel.

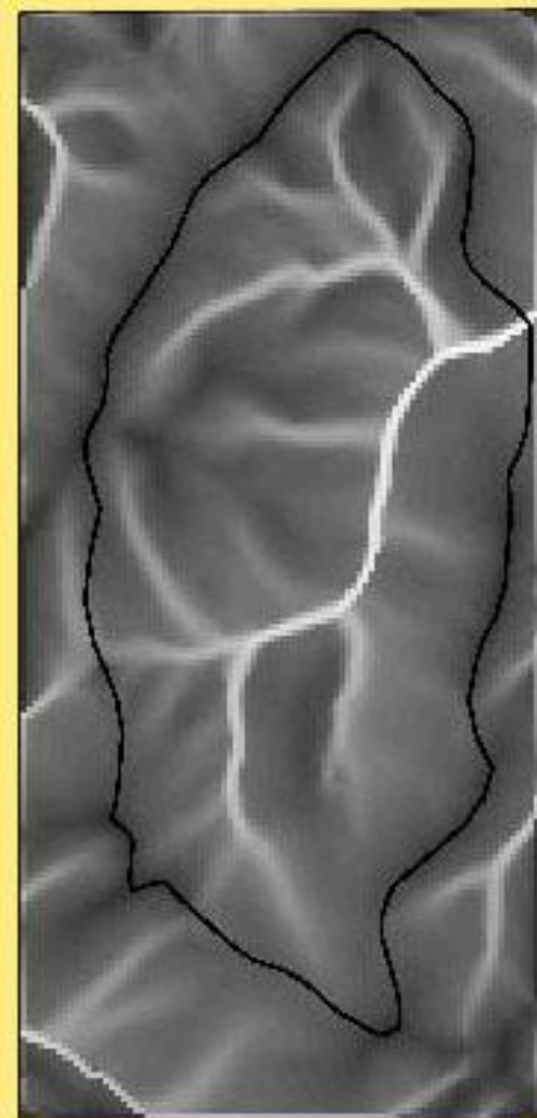


Tarboton, D. G., (1997), "A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models," *Water Resources Research*, 33(2): 309-319.)
(<http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/dinf.pdf>)

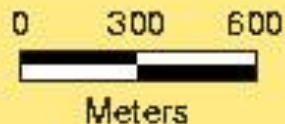
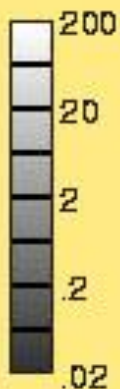


Příklad „multiple flow direction“

- Rozděluje odtok na svahu do všech níže položených buněk (downslope neighbor) podle váhy.
- V údolí je omezen prahovou hodnotou.



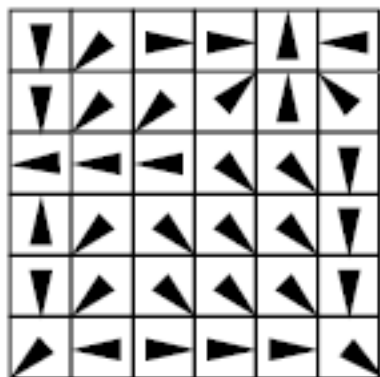
Contributing area (ha)





Akumulace odtoku (flow accumulation)

- Akumulace vody v buňce neboli akumulace odtoku je dána **součtem hodnot buněk**, které **přispívají do dané buňky**.
- Akumulace odtoku je vytvořena jako rastr pomocí funkce *Flow Accumulation*.
- Vstupním rastrem je rastr směru odtoku vody z buněk, který je vytvořen funkcí *Flow Direction*.

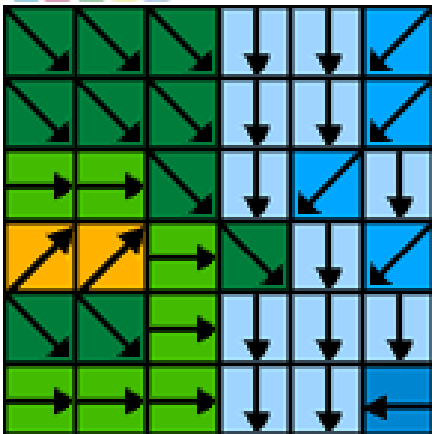


← směr odtoku
vody z buňky

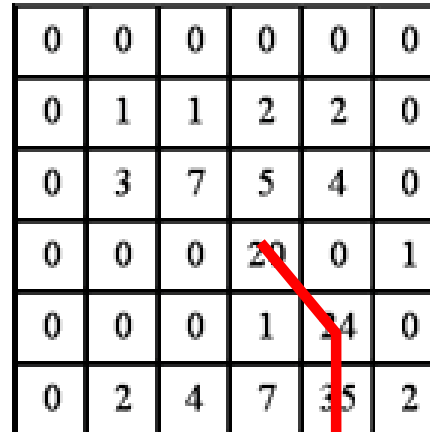
0	0	0	1	6	0
2	0	0	0	0	0
8	2	0	0	0	0
0	0	0	0	1	2
2	0	0	1	1	5
4	0	0	2	5	14

← Počet buněk
které do dané
buňky vtékají

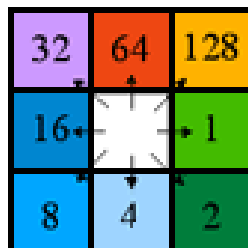
Užití akumulace odtoku



Flow direction



Flow accumulation



Direction coding

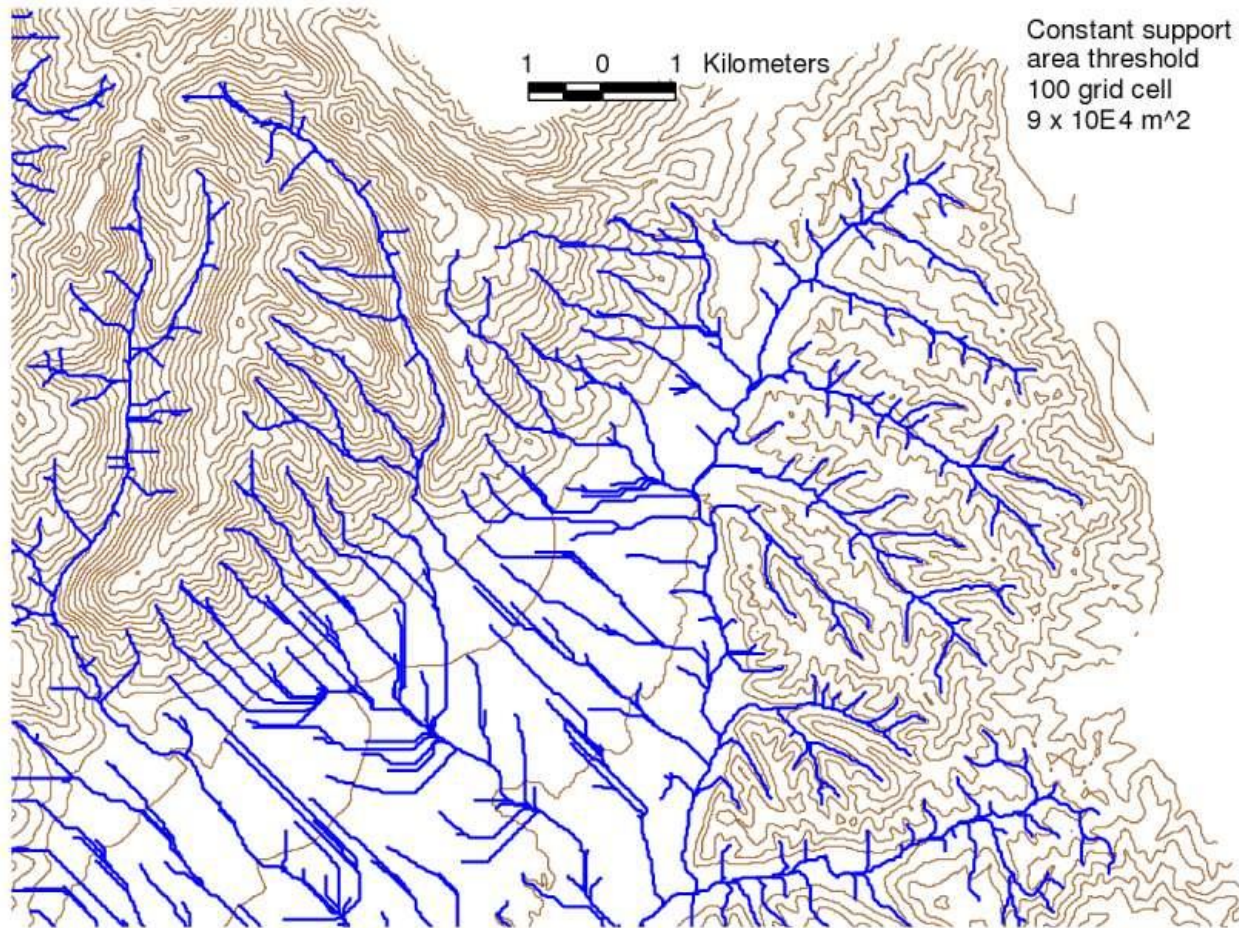
- Údolnice (max)
- Hřbetnice (0)
- Možnost užití rastru vah (například rozložení srážek, či drsnosti povrchu), který ovlivní výpočet akumulace.



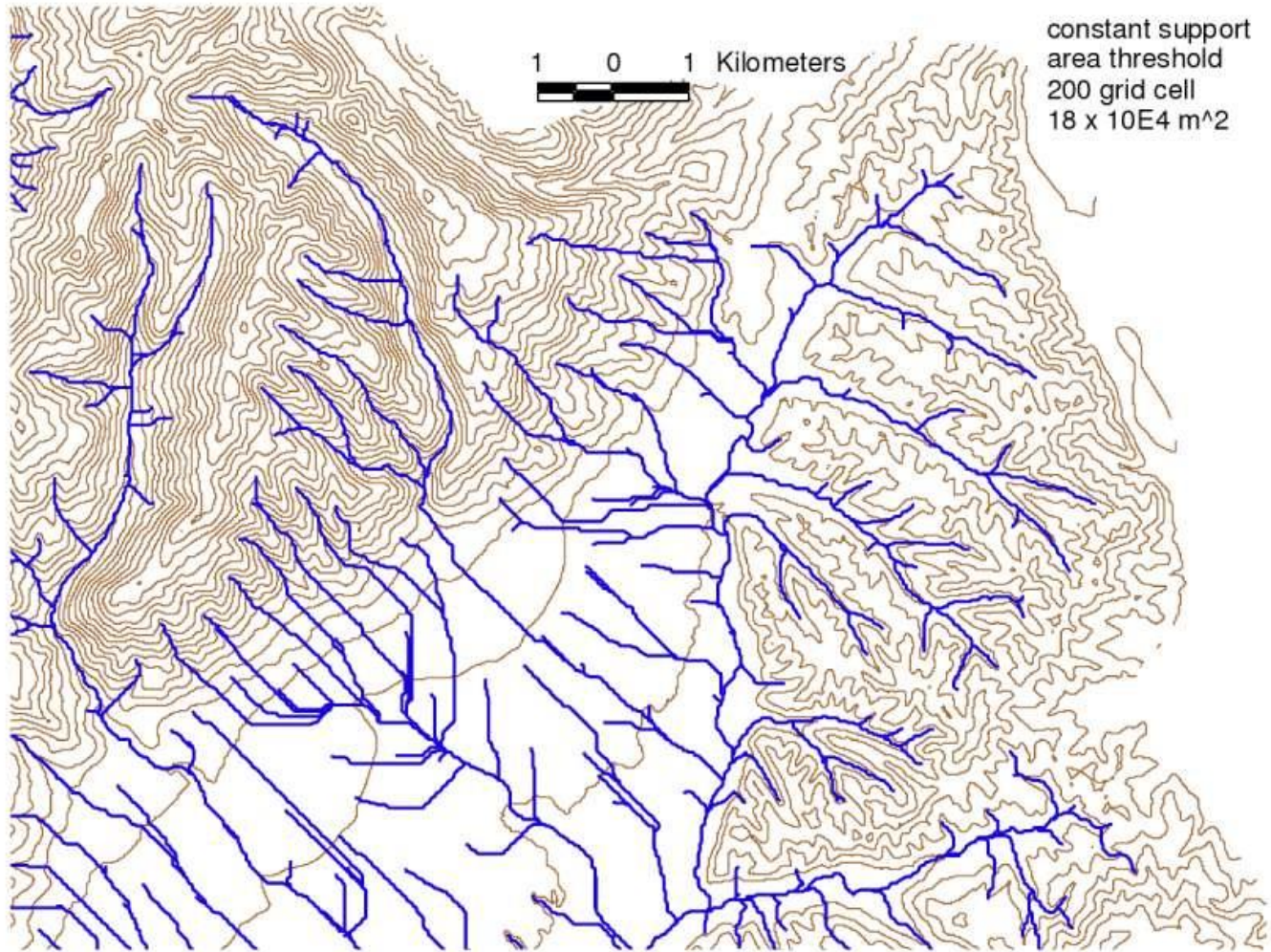
Příklad – užití prahu pro tvorbu říční sítě

- Využití spodního prahu akumulace pro výběr buněk s hromaděním vody.
- Vytvoření podmíněného rastru (binární) s hodnotou 1 pro říční síť a Nodata pro ostatní:
- **Využití nástroje Con s následujícím vstupem:**
 - Input conditional raster : Flowacc
 - Expression : **Value > 100**
 - Input true raster or constant : 1
- **Alternativně lze využít nástroj Set Null s nastavením:**
 - Input conditional raster: : Flowacc
 - Expression: : **Value <= 100**
 - Input false raster or constant: 1

100 grid cell constant support area threshold stream delineation

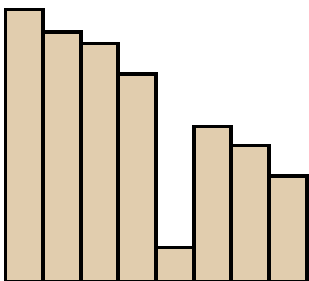


200 grid cell constant support area based stream delineation

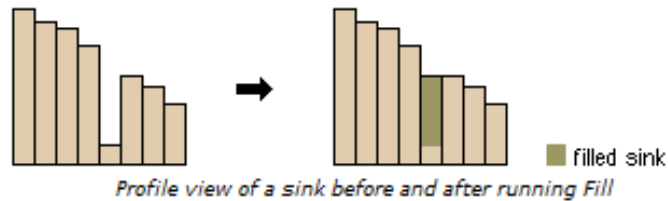


Uzavřené deprese – bezodtoké oblasti (Sink)

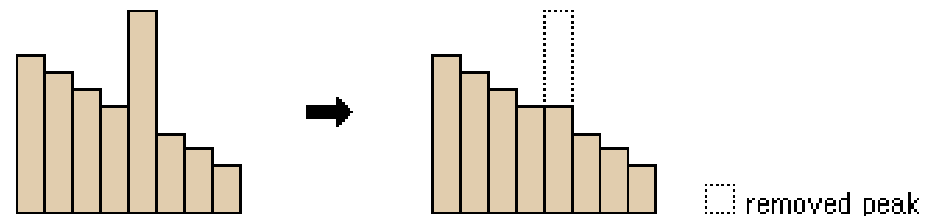
- **Bezodtoká oblast (angl. sink), je taková oblast, kdy buňka má všech 8 sousedních buněk vyšších nebo pokud jsou dvě buňky vedle sebe se stejnou nejnižší výškou.**
- **Buňky ve kterých nelze určit směr odtoku**
- **Chyby x přirozené oblasti**
- **Pro realizaci směru odtoku a akumulace vody je potřeba tyto oblasti odstranit.**



Odstranění depresí



- Funkce *Fill* umožňuje vyplnění bezodtokých oblastí.
- Vstupem je rastrová vrstva povrchu (DEM) a výstupem je upravená rastrová vrstva povrchu bez bezodtokých oblastí.
- Podél hranic vyplněných oblastí se mohou vytvořit nové bezodtoké oblasti, které opět potřebují vyplnit, proto funkce *Fill* provádí vyplnění opakovaně, dokud nejsou všechny odstraněny.



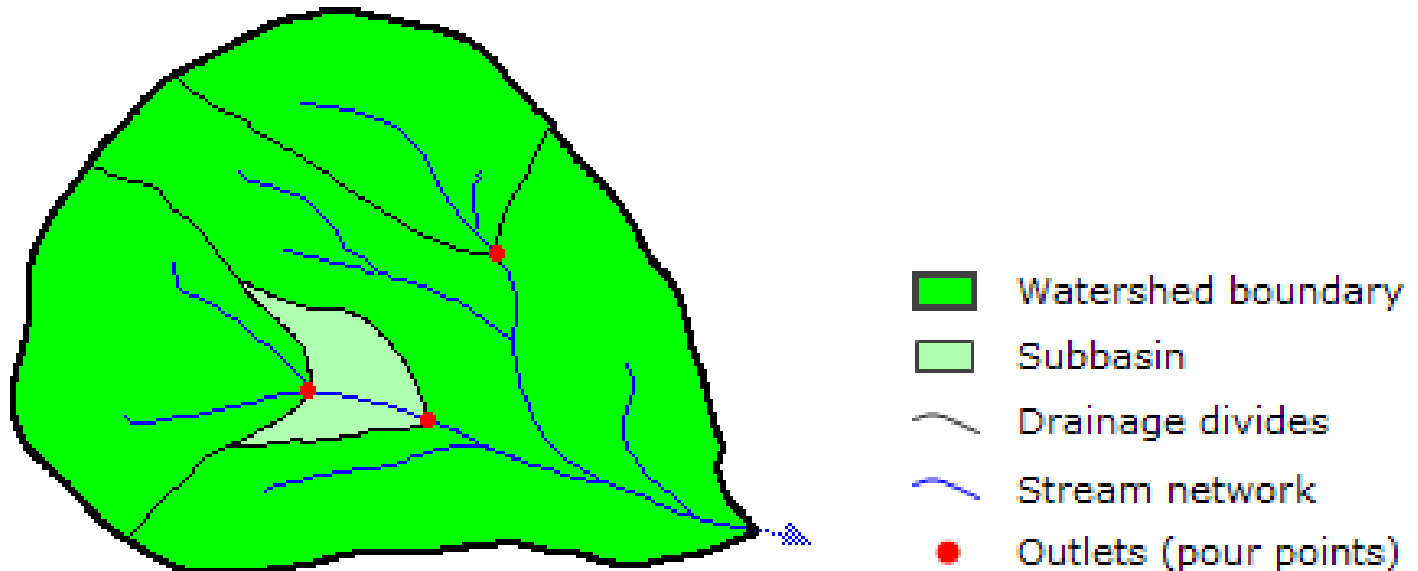


Identifikace uzávěrového profilu

- Identifikace přesné polohy **uzávěrového profilu** je velmi důležitým krokem ke správnému vykreslení povodí.
- Funkce **Snap Pour Point** vyhledává buňku s nejvyšší akumulací vody v zadané vzdálenosti od uzávěrového profilu povodí.
- **Vstupními** daty je **rastr akumulovaného odtoku** a bodová nebo rastrová vrstva vyjadřující **uzávěrový profil** povodí tzv. „pour point“.
- **Výstupem** je rastr vyjadřující buňku s nejvyšší akumulací odtoku, která je při vykreslování povodí považována za uzávěrový profil povodí.
- Pokud by nebyla využita tato funkce a uzávěrový profil by nebyl na místě buňky s nejvyšší akumulací odtoku, nebo-li nebyl by na místě buňky do které přitéká voda z celého povodí, vykreslí se pouze malá odvodňovaná část povodí a ne celé povodí.

Povodí - terminologie

- Povodí (**Watershed**) je plocha, ze které odtéká voda do uzávěrového profilu na vodním toku.
- Dalšími anglickými termíny pro povodí jsou **Basin**, **Catchment** a **Contributing area**.
- Hranice povodí neboli rozvodnice se nazývají **Watershad boundaries** či **divides** a hranice odvodňovaných částí **Dranaige divides**.
- **Subbasin** znázorňuje dílčí povodí a **stream network** představuje vodní tok.
- Uzávěrový profil (**pour point** či **outlet**) je nejnižše položeným místem na rozvodnici a může jím být přehrada, hráz, vodočet nebo místo před silničním propustkem, apod.





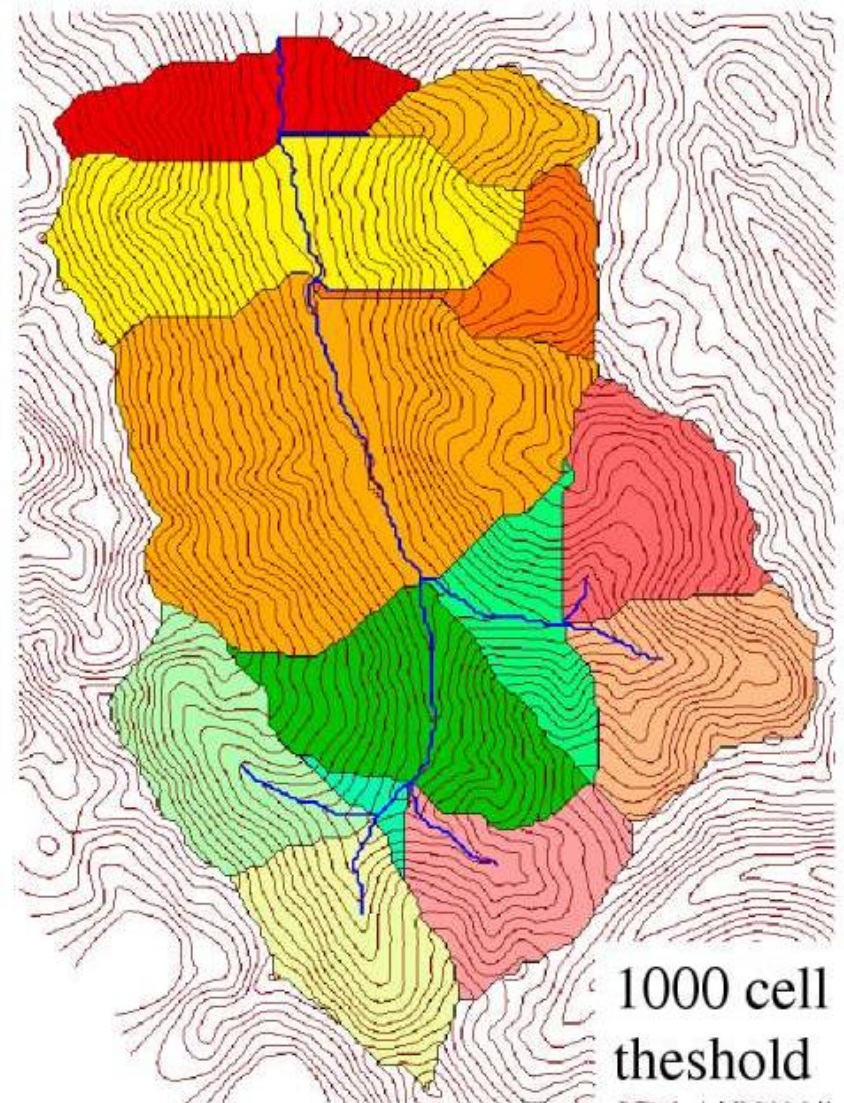
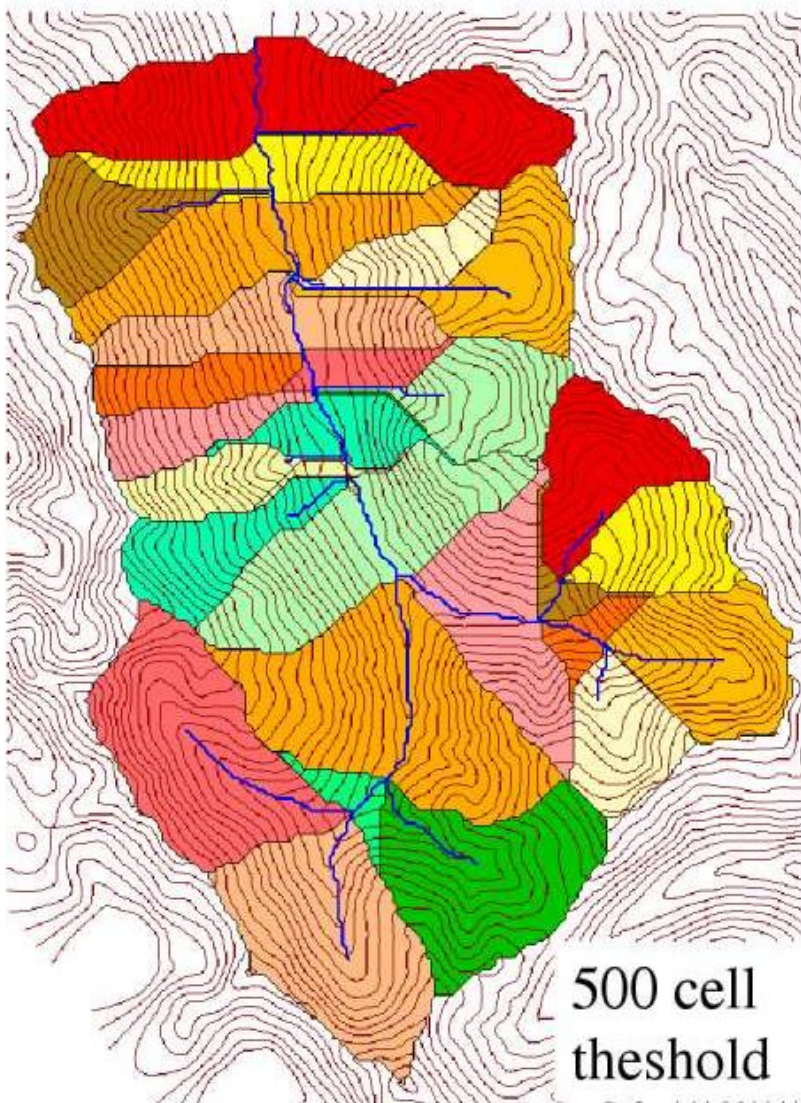
- Pomocí funkce *Watershad* lze vytvořit rastr zobrazující plochu odvodňovanou oblastí k uzávěrovému profilu.
- **Vstupními** daty jsou rastr směru odtoku (vytvořený pomocí *Flow Direction*) a hodnota prahu pro minimální rozměr povodí (v buňkách).
- **Výstupem** je rastr povodí.

Vytvoření povodí





Vliv prahu akumulačních buněk na velikost povodí



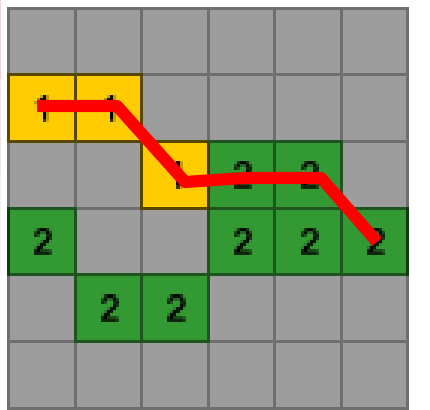


Stanovení charakteristik povodí

- **Identifikace vodního toku – viz výše (SetNul, Con)**
- **Vytvoření linie vodního toku z rastru vodního toku**
- **Segmentace vodního toku**
- **Pořadí vodního toku**

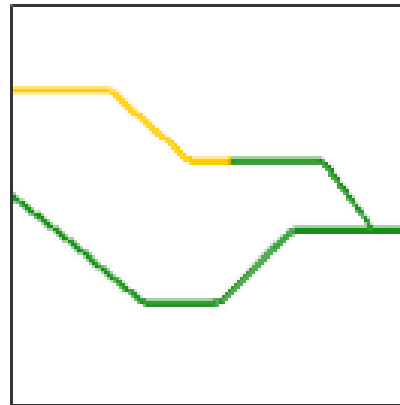


Vytvoření linie vodního toku z rastru vodního toku

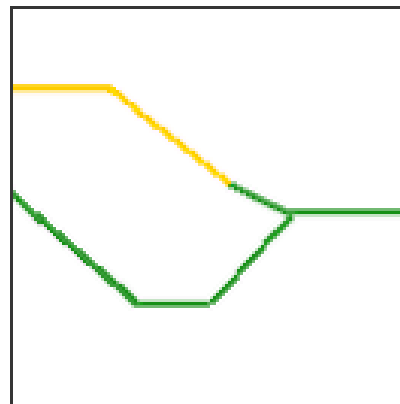


Input network raster

Value = NoData



Stream to Feature output

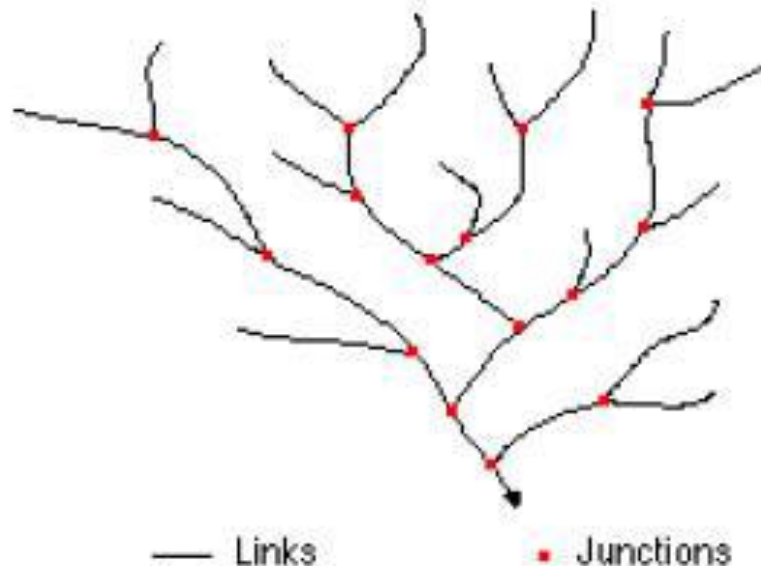


Raster To Polyline output

- **Odlišný přístup pro algoritmus Stream to Feature.**
- **Bere do úvahy směrový rastr a pracuje s ním ve smyslu průběžných a přiléhajících buněk.**
- **Možnost mít paralelní linie toků.**

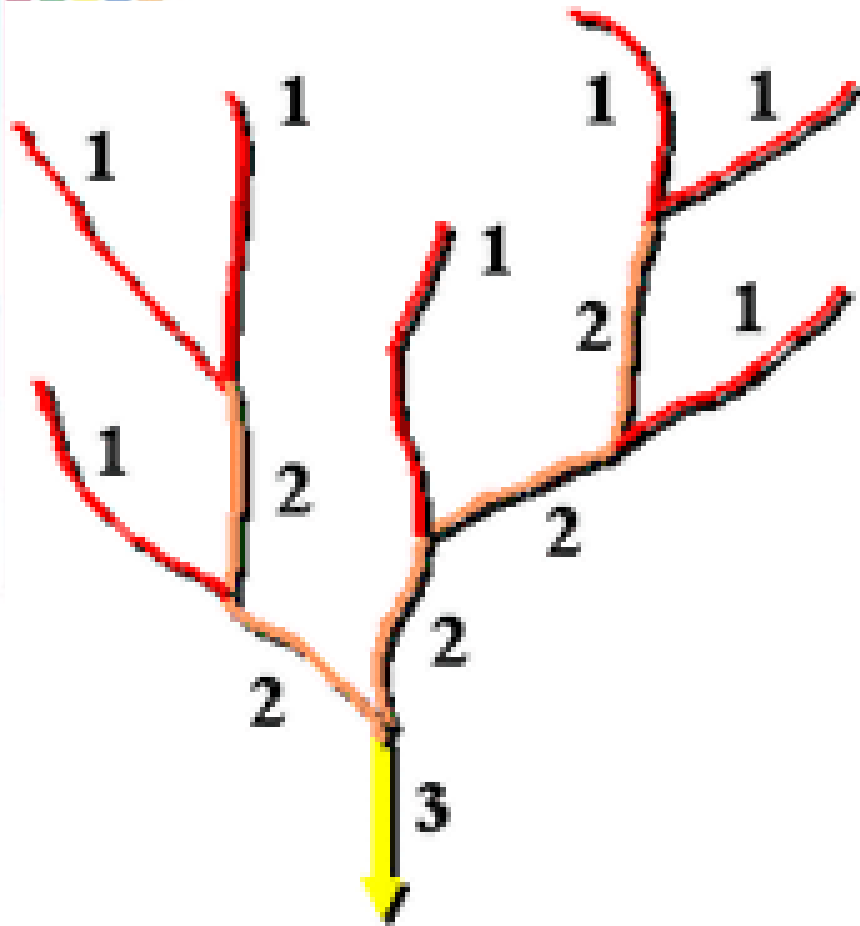
Segmentace vodního toku

- Funkce *Stream Link* přiřazuje unikátní hodnoty částem (úsekům) rastru, který znázorňuje liniovou vrstvou vodních toků.
- Jednotlivé úseky (**Links**) vodního toku jsou vymezeny průsečíky nebo křižovatkami (**Junctions**) na vodním toku.
- Vstupními daty jsou rastr vodního toku a rastr směru odtoku a výstupem je rastr jednotlivých úseků





Řády toků - Strahler

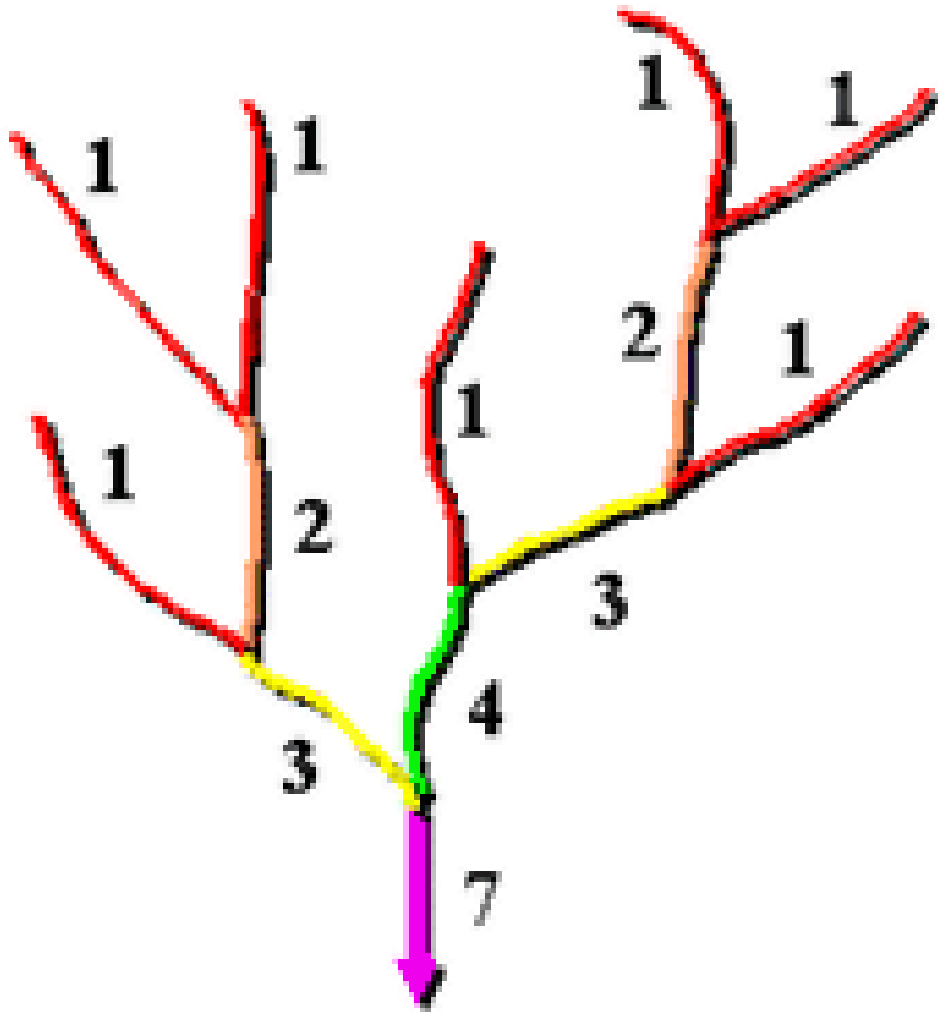


Strahler

1. Všechny vnější úseky sítě mají Strahlerův řád 1.
2. Pokud se stékají dva úseky se stejným řádem, je navazujícímu úseku přiřazen řád o jeden vyšší.
3. Pokud se stékají dva úseky různých řádů, je navazujícímu úseku přiřazen vyšší z těchto dvou řádů.

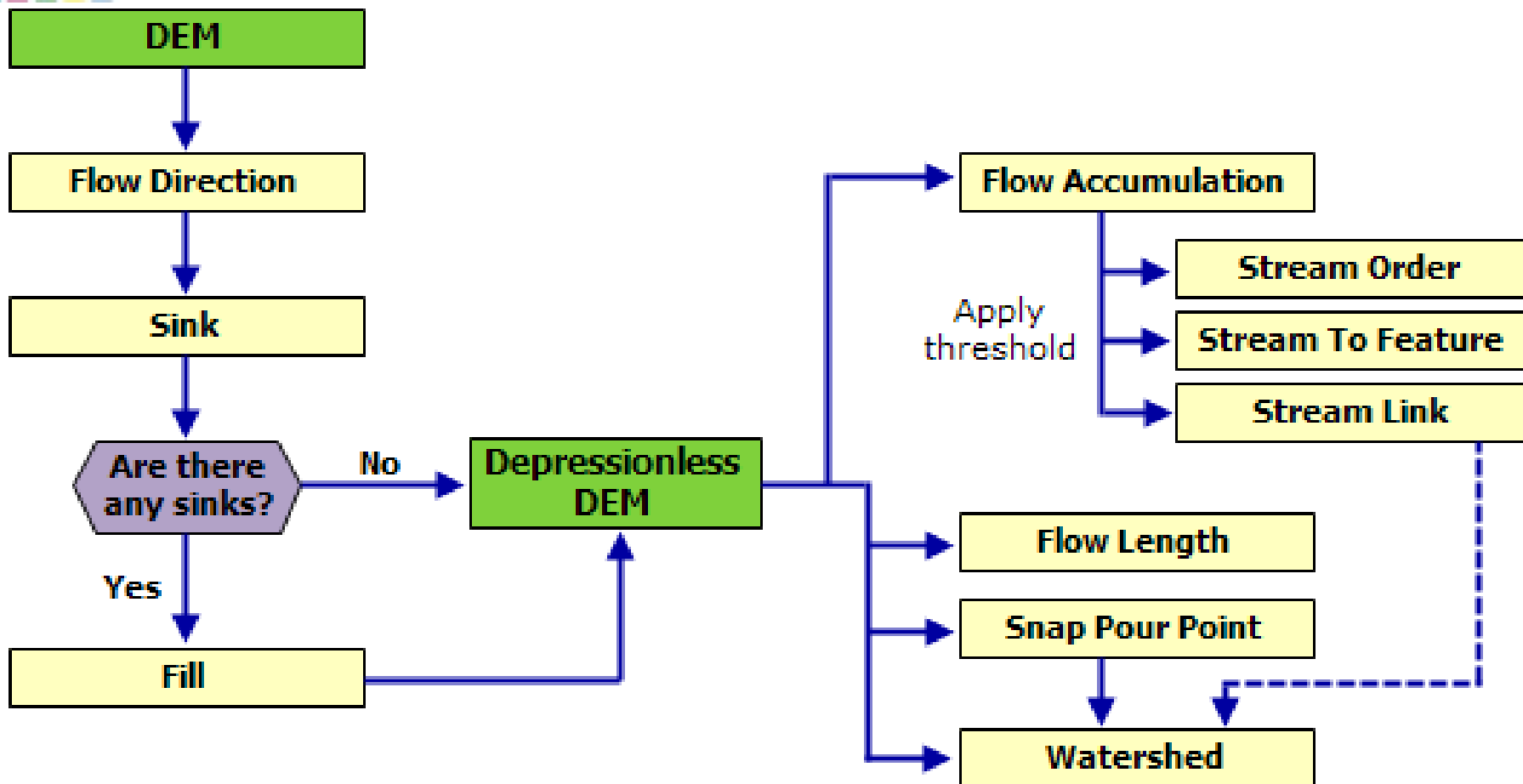
Metoda je citlivá na prahové hodnoty a přidávání či ubírání vodních toků.

Řády toků – Shreve



- Bere do úvahy všechny toky a výsledný řád je vždy součtem dvou stékajících se větví.
- Velikost (řád) toku je zároveň počtem přítoků proti proudu.

Celkový postup v ArcGIS





TauDEM pro ArcGIS

- David Tarboton – multiple path
- <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/>

