



MUNI

Kartografické modelování V – Hydrologické modelování

jaro 2023

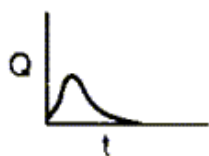
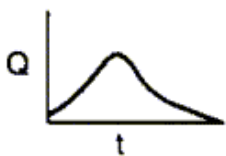
Petr Kubíček

kubicek@geogr.muni.cz

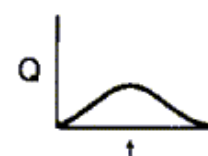
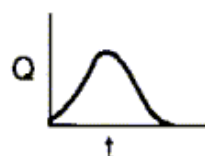
**Laboratory on Geoinformatics and Cartography (LGC)
Institute of Geography
Masaryk University
Czech Republic**

Vliv topografie na odtokové poměry

Area

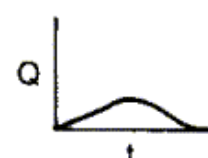
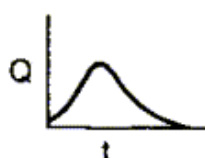
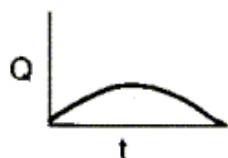
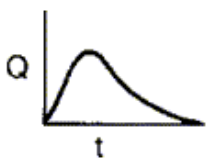


Slope



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 (Pro)** určuje jako základní nastavení **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

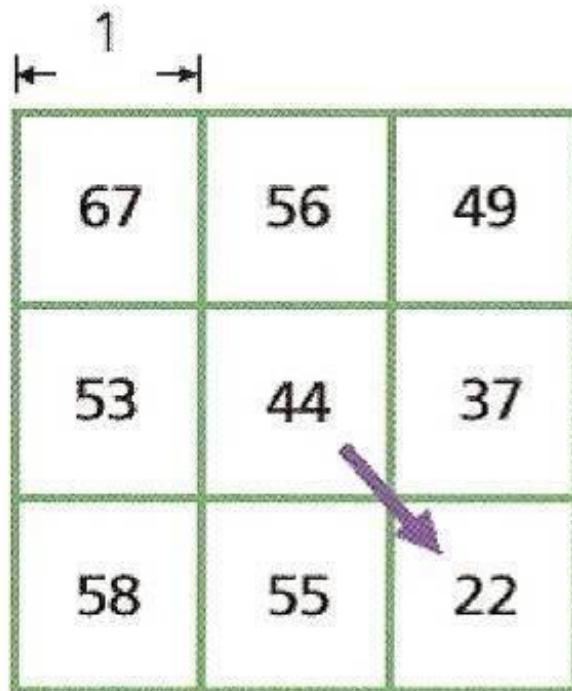
$\varphi(i) = 1$ for N, S, E, W neighbours

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

λ is cell spacing

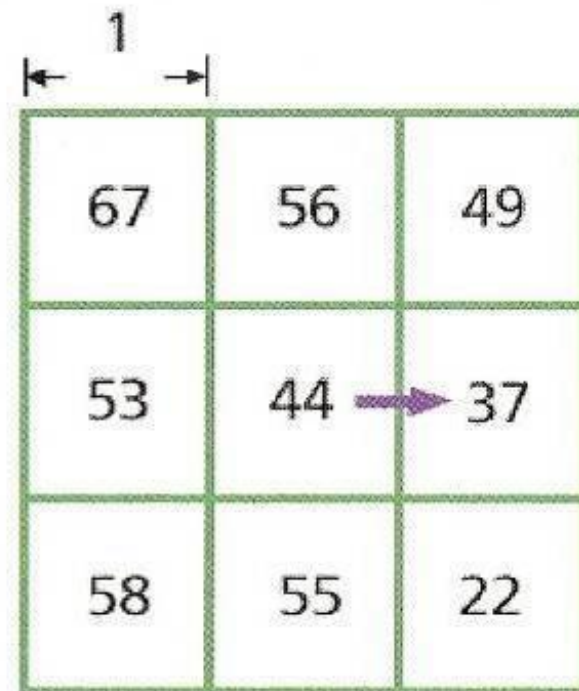
Výpočet směru odtoku

Maximální spád = změna v hodnotě_z / vzdálenost * 100



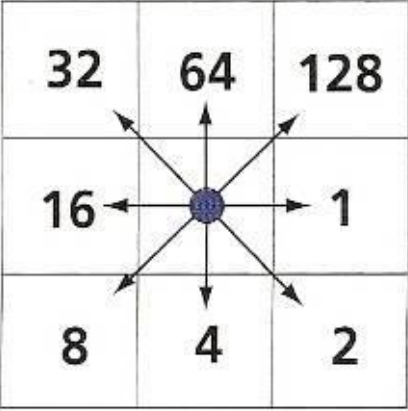
Slope :

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



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

Příklad



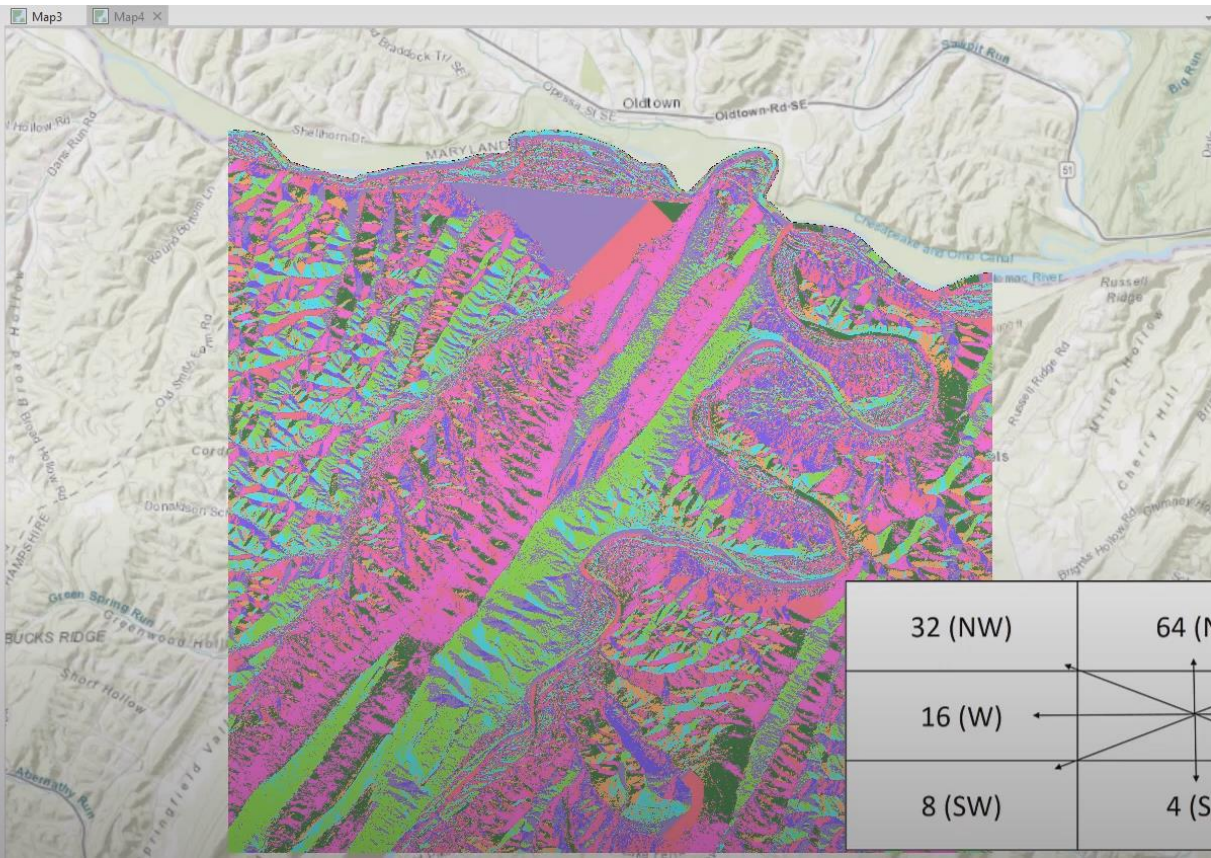
| | | | | |
|----|----|----|----|----|
| 67 | 56 | 49 | 46 | 50 |
| 53 | 44 | 37 | 38 | 48 |
| 58 | 55 | 22 | 31 | 24 |
| 61 | 47 | 21 | 16 | 19 |
| 53 | 34 | 12 | 11 | 12 |

| | | | | |
|-----|---|---|---|----|
| 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 |

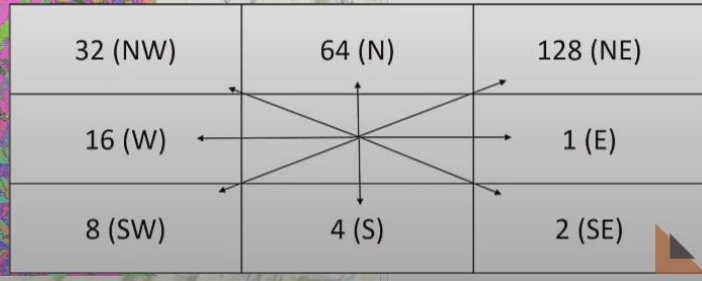


Flow_Dir
 Value
 1
 2
 4
 8
 16
 32
 64
 128

Contents
 Search
 Drawing Order
 Map4
 Flow_Dir
 Value
 1
 2
 4
 8
 16
 32
 64
 128
 Fill_DEM
 Value
 570.825
 156.38
 DEM_USGS_1m_WV
 Value
 570.825
 156.38
 Topographic



Geoprocessing
 Flow Direction
 Parameters Environments
 Input surface raster
 Fill_DEM
 Output flow direction raster
 Flow_Dir
 Force all edge cells to flow outward
 Output drop raster
 Flow direction type
 D8



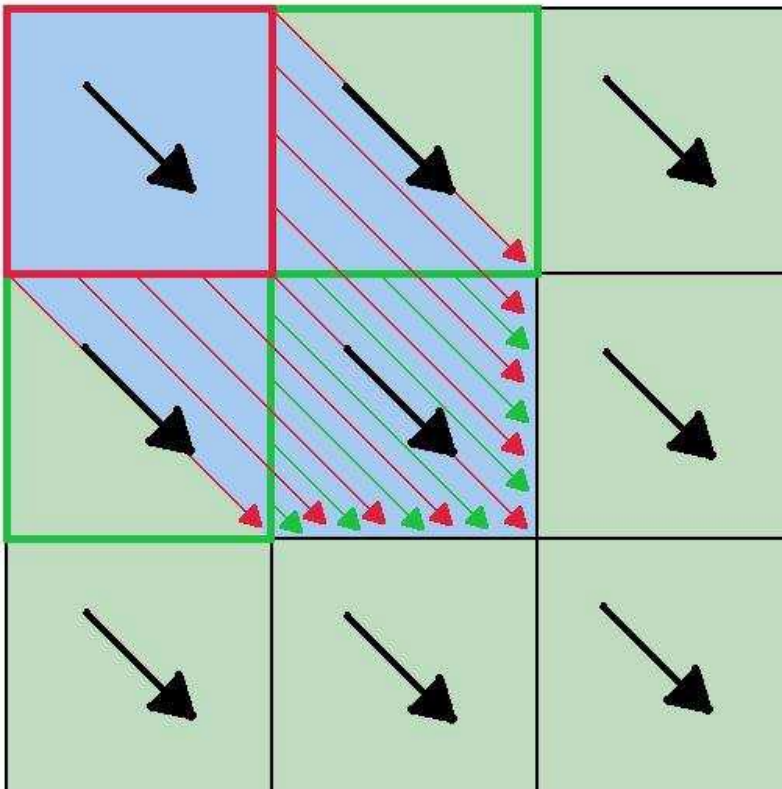
Více o D8

- 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



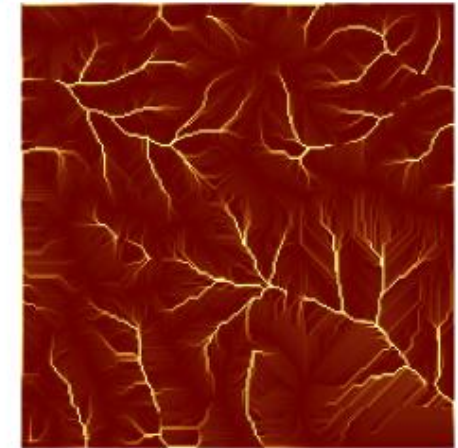
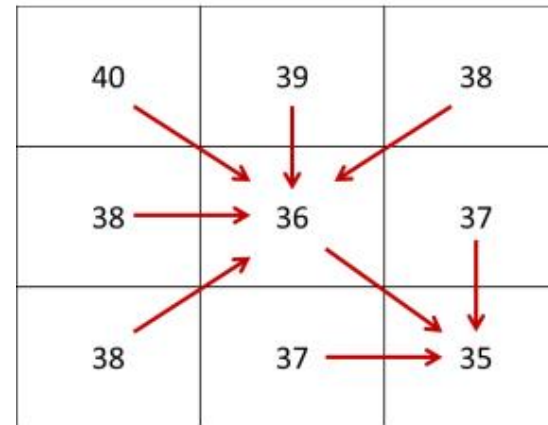
- Odtok simulovaný D8 algoritmem na nakloněné rovině. Při diagonálním **směru odtoku** (tlusté černé šipky) převádí D8 algoritmus do středové buňky pouze vodu z červeně zvýrazněné buňky v levém horním rohu (**červené šipky**).
- Přitom ve **skutečnosti** do buňky teče i voda z buněk zeleně označených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



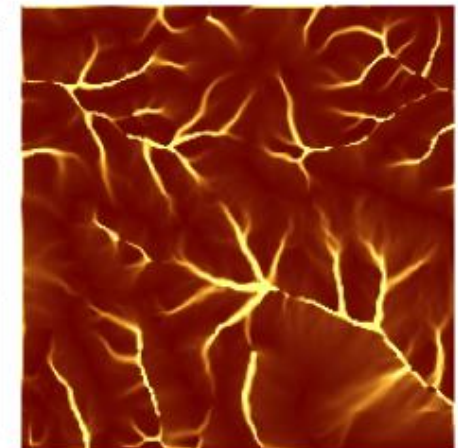
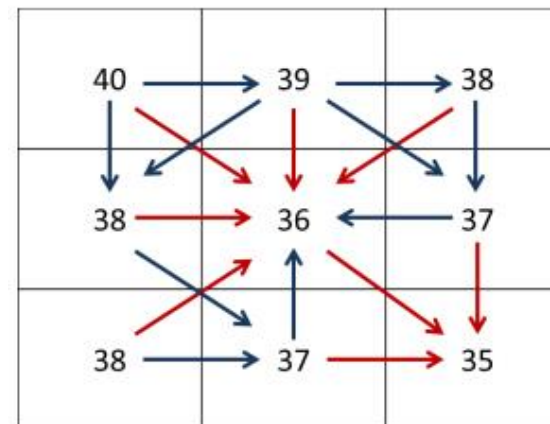
Multiple flow direction (MFD) ArcGIS Pro

- Algoritmus Multiple Flow Direction (MFD) popsaný Qinem et al. (2007), rozděluje odtok z buňky do všech sousedících, které jsou níže, a to proporčně dle sklonu.
- Výsledný rastr směru odtoku MFD po přidání do mapy zobrazuje pouze směry toku D8. Vzhledem k tomu, že směry toku MFD mají potenciálně více hodnot vázaných na každou buňku nelze je snadno vizualizovat.
- Výstupní rastr směru toku MFD je však vstupem rozpoznávaným nástrojem Flow Accumulation, který by využíval směry toku MFD k proporcionalitě a akumulaci toku z každé buňky ke všem sousedům s nižší výškou.

Single Flow Direction Illustration



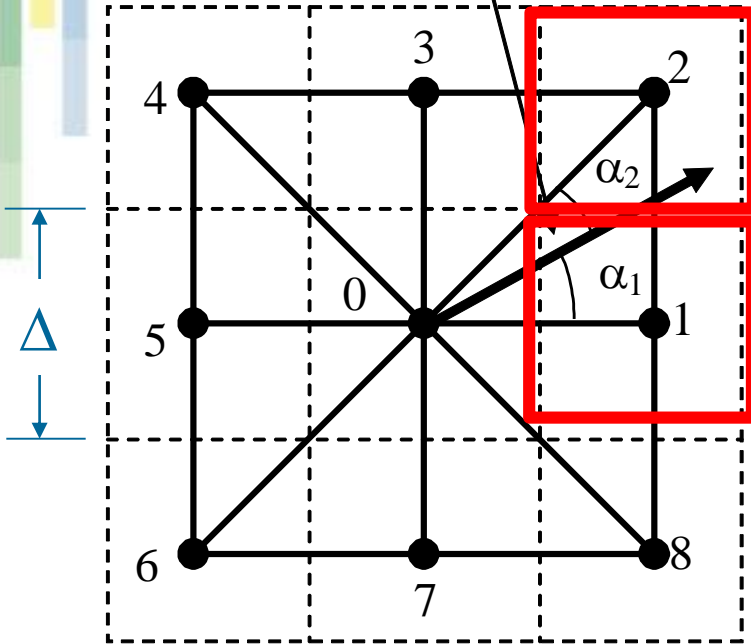
Multi-Flow Direction Illustration





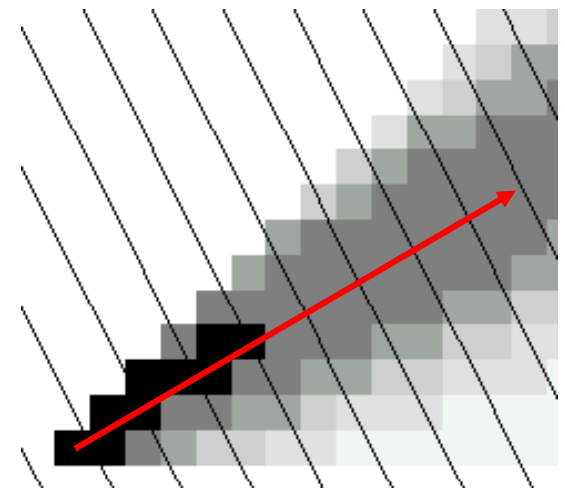
D_{∞} D-Infinity (DINF) (ArcGIS Pro)

Steepest direction
downslope



Proportion flowing to
neighboring grid cell 2 is
 $\alpha_1 / (\alpha_1 + \alpha_2)$

Proportion flowing to
neighboring grid cell 1 is
 $\alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2)$



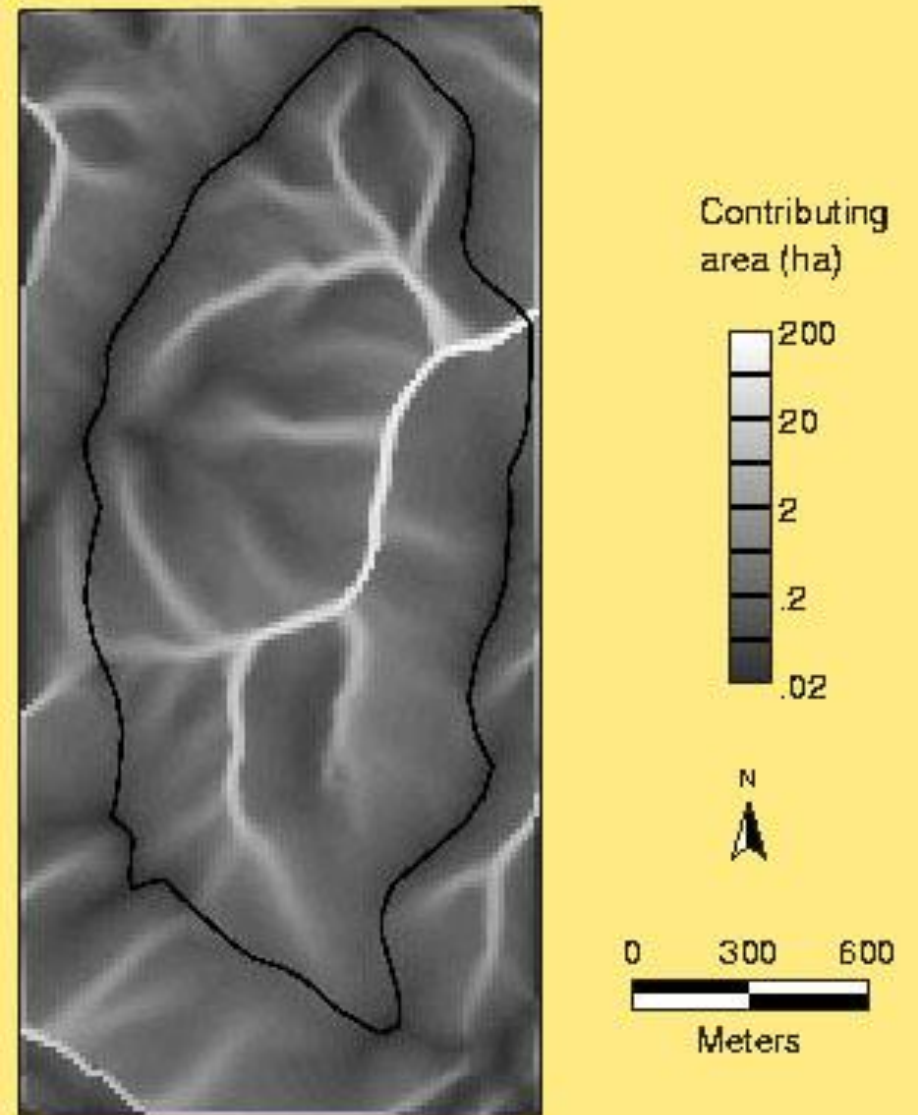
Flow direction as a single angle taken as the steepest downward slope on the eight triangular facets centered at each pixel.

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 „Dinf“

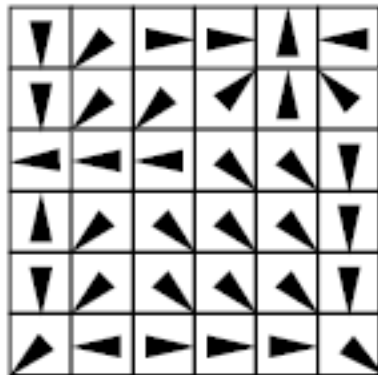
- Rozděluje odtok na svahu do všech níže položených buněk (downslope neighbor) podle váhy.
- V údolí je omezen prahovou hodnotou.





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*.

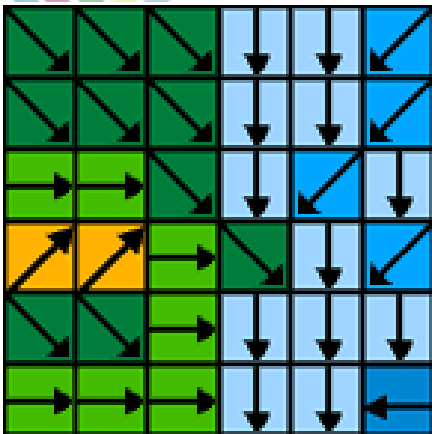


← směr odtoku
vody z buňky

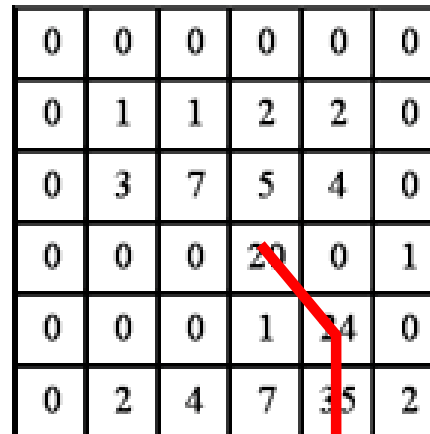
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|----|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 6 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 5 |
| 4 | 0 | 0 | 2 | 5 | 14 |

← Počet buněk
které do dané
buňky vtékají

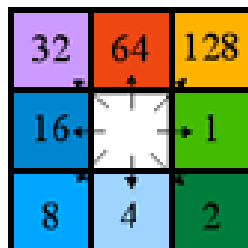
Užití akumulace odtoku



Flow direction



Flow accumulation



Direction coding

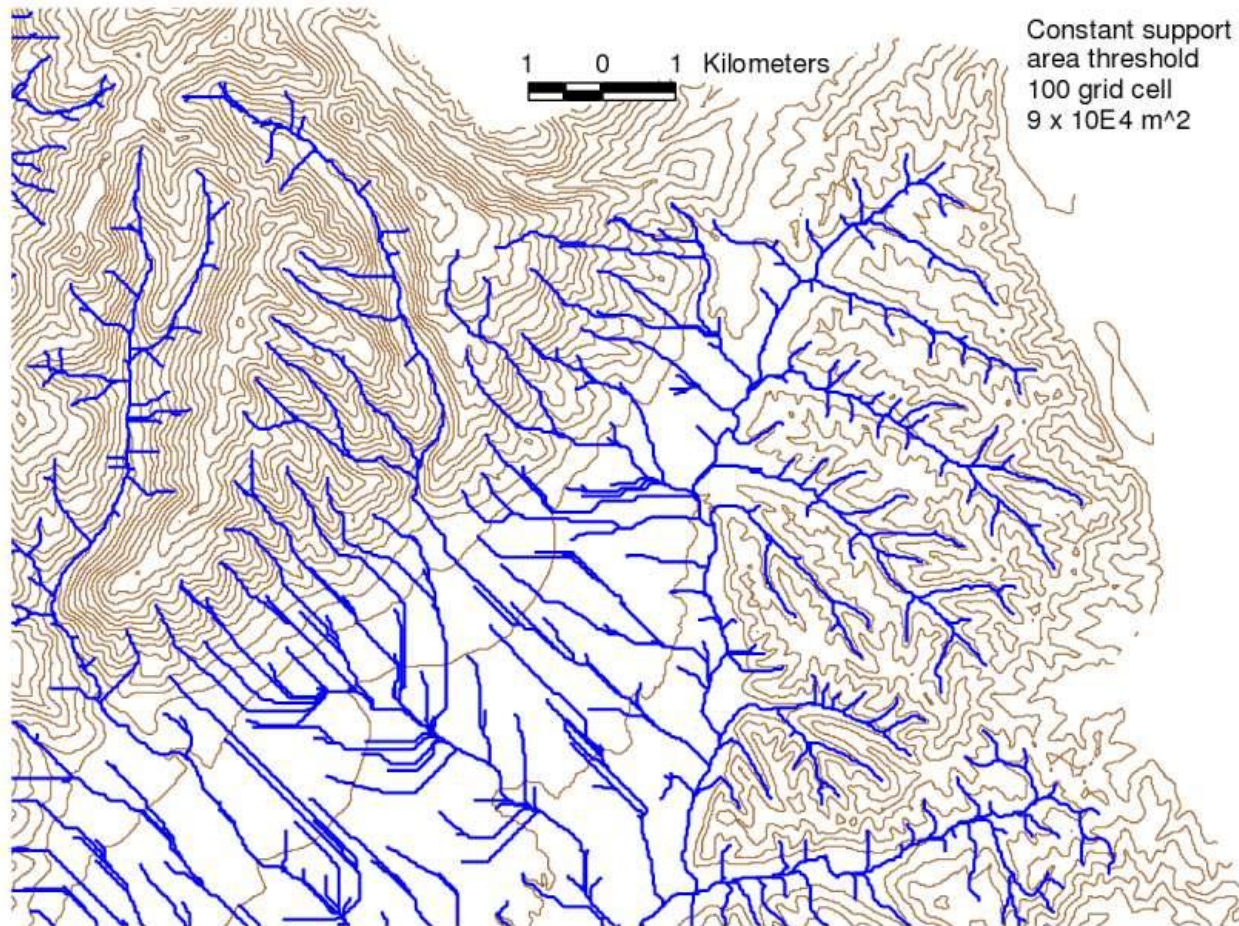
- Údolnice (max)
- Hřbetnice (0)
- Možnost užití rastru vah (například rozložení srážek, či drsnosti povrchu), který ovlivní výpočet akumulace.



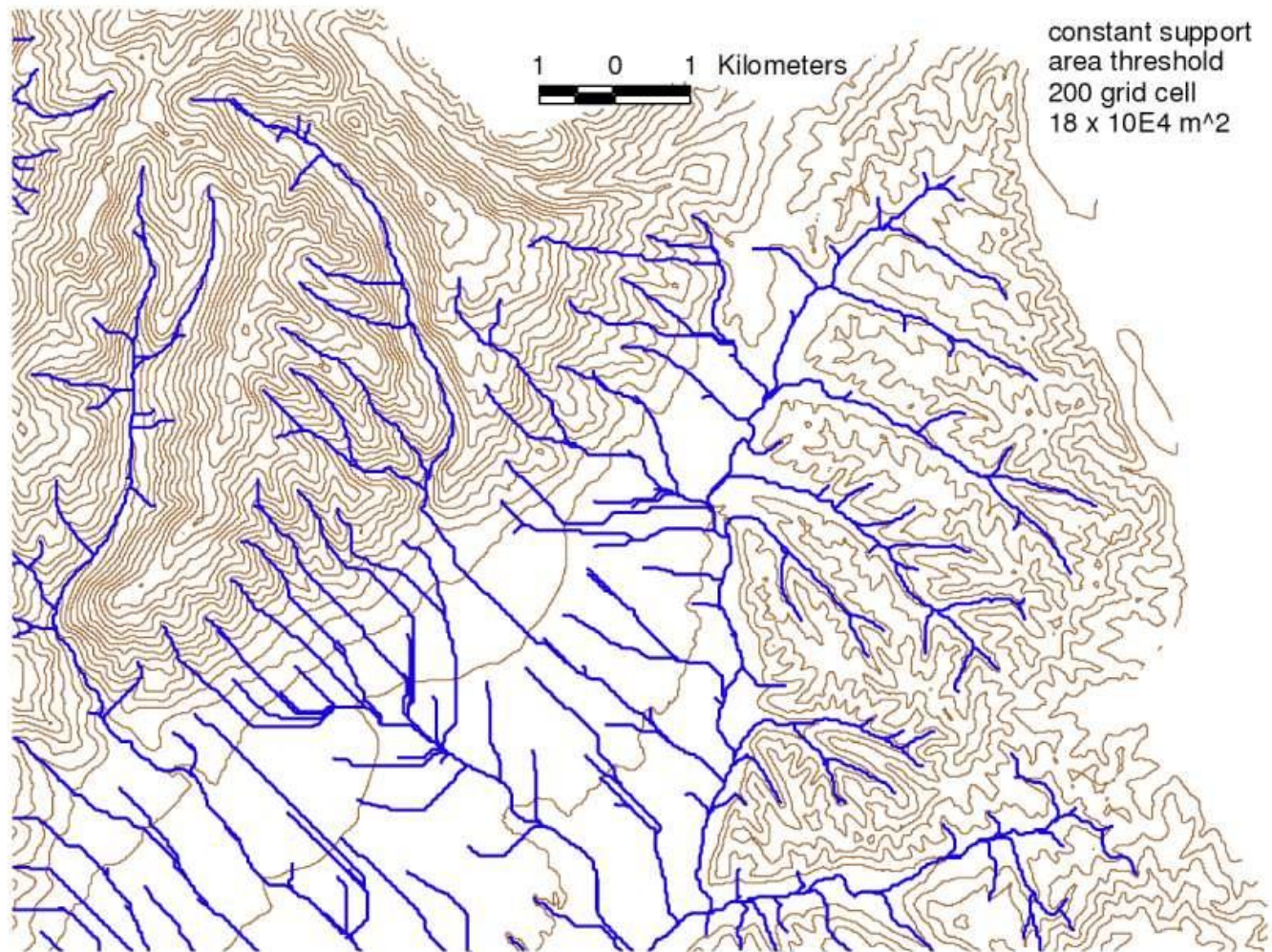
Příklad – užití prahu pro tvorbu říční sítě

- 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

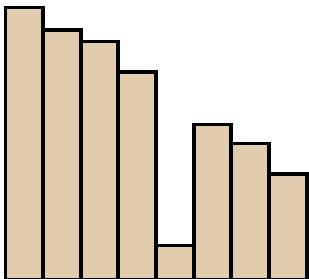


200 grid cell constant support area based stream delineation

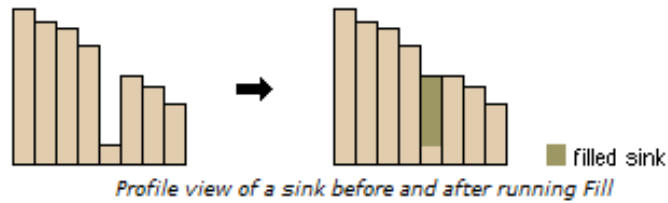


Uzavřené deprese – bezodtoké oblasti (Sink)

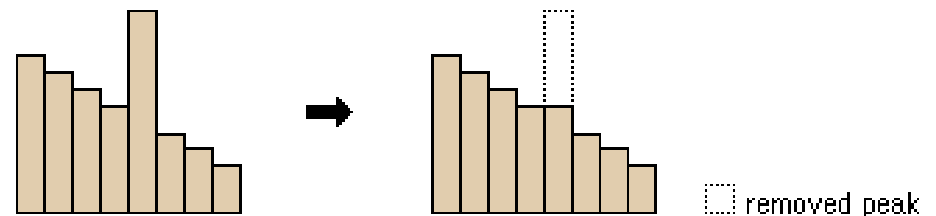
- **Bezodtoká oblast (angl. sink), je taková oblast, kdy buňka má všech 8 sousedních buněk vyšších nebo pokud jsou dvě buňky vedle sebe se stejnou nejnižší výškou.**
- **Buňky ve kterých nelze určit směr odtoku**
- **Chyby x přirozené oblasti**
- **Pro realizaci směru odtoku a akumulace vody je potřeba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

The screenshot displays the ArcGIS interface with a map showing a watershed analysis. The map features a topographic background with a watershed boundary overlaid in dark grey. Two red dots on the boundary indicate pour points. The watershed is divided into two main areas: a purple area on the left and a teal area on the right. The software interface includes a top toolbar with various tools, a left-hand 'Contents' panel, and a right-hand 'Geoprocessing' panel.

Contents Panel:

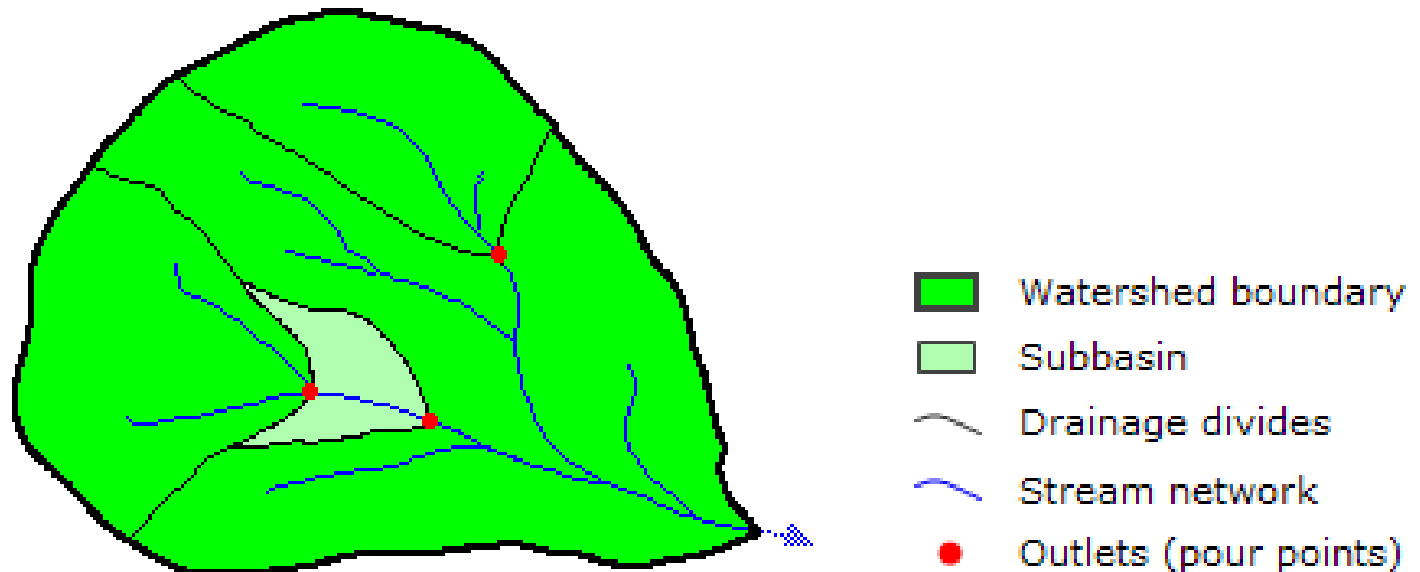
- Map6
- point
- watershed_test_2_EW
 - Value
 - 2
 - 3
- snap_pour_pt_test_5
 - Value
 - 2
 - 3
- FlowAcc_Flow2
- Flow_Dir
- hsd_wv
- DEM_USGS_1m_WV
- Topographic

Geoprocessing Panel:

- Watershed
 - Parameters
 - Input D8 flow direction raster: Flow_Dir
 - Input raster or feature pour point data: snap_pour_pt_test_5
 - Pour point field: Value
 - Output raster: Watersh_Flow4

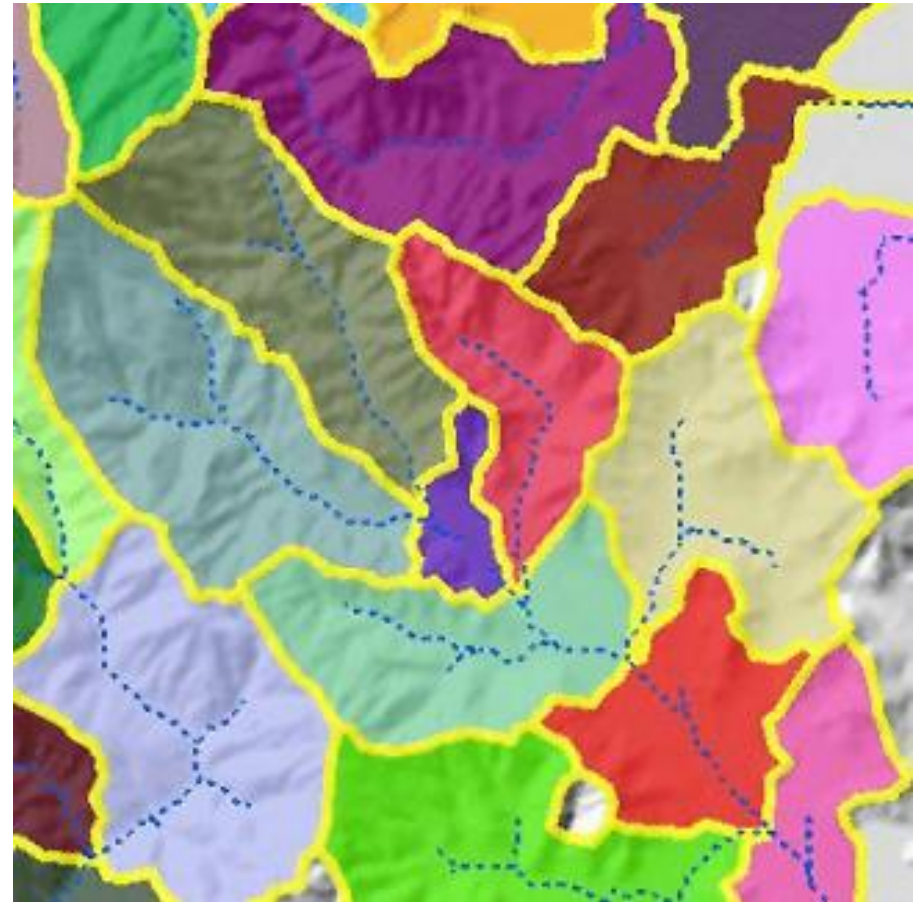
Povodí - terminologie

- 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.



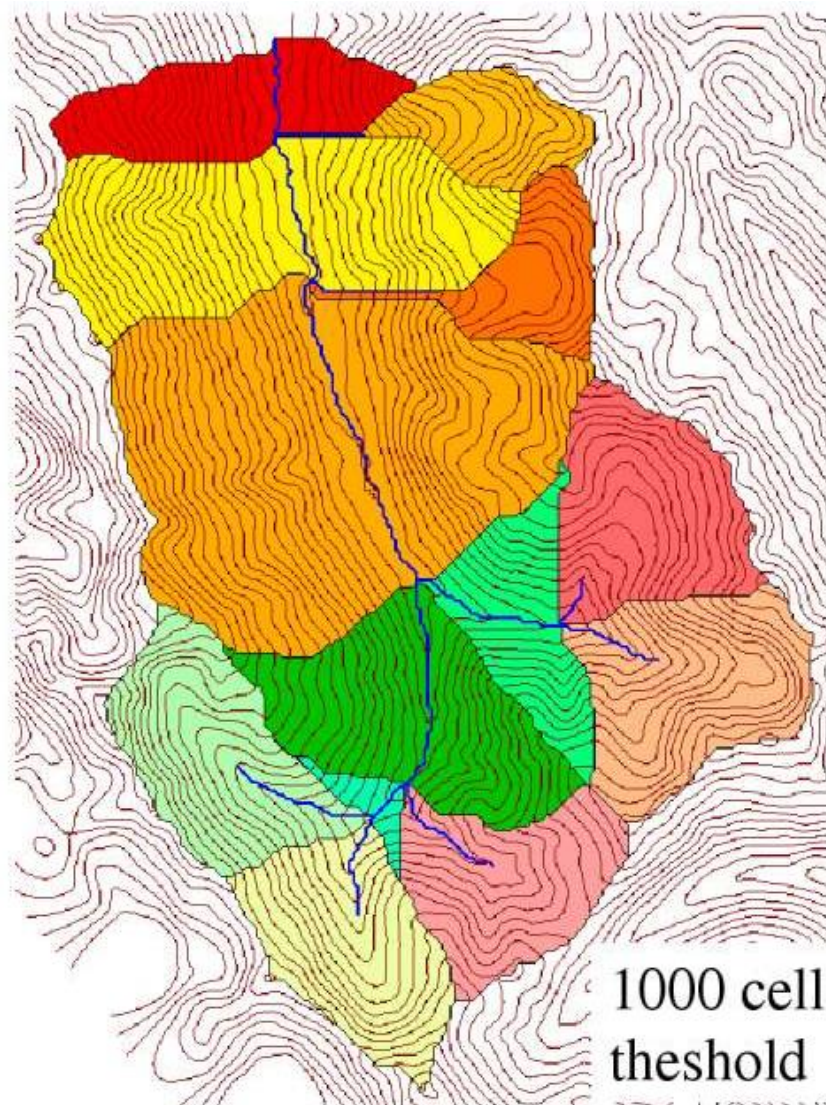
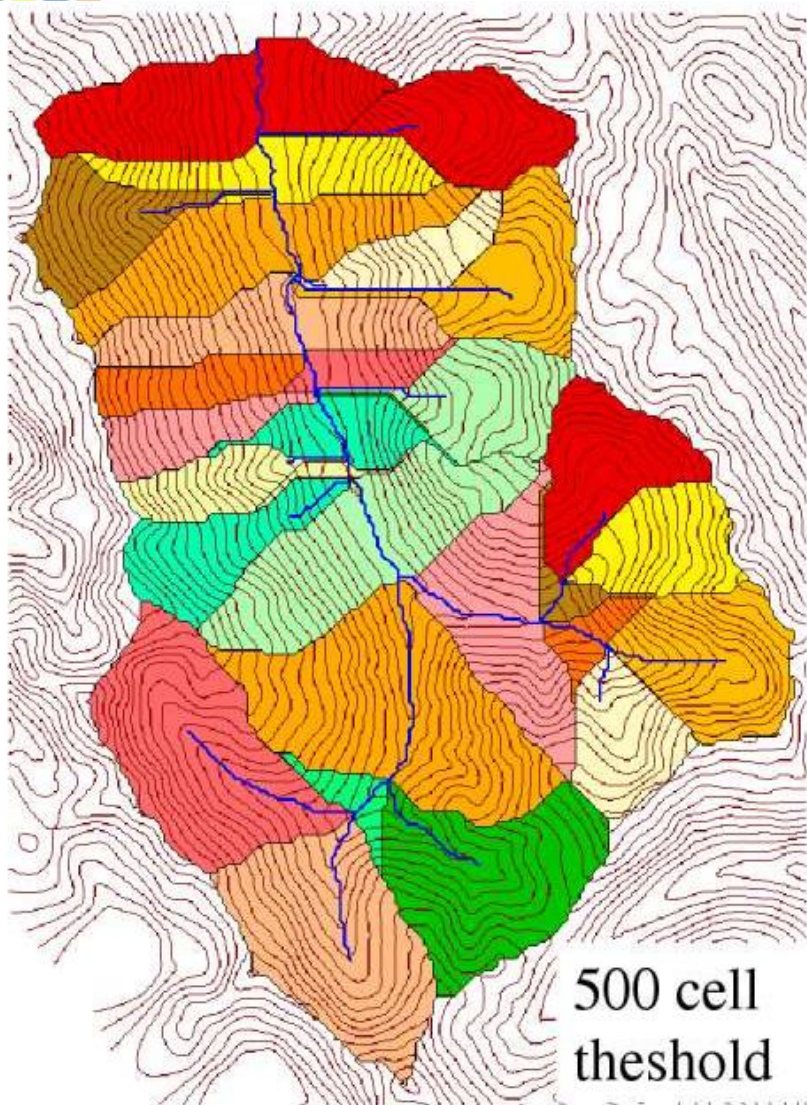
- Pomocí funkce *Watershad* lze vytvořit rastr zobrazující plochu odvodňované oblasti k uzávěrovému profilu.
- **Vstupními** daty jsou rastr směru odtoku (vytvořený pomocí *Flow Direction*) a hodnota prahu pro minimální rozměr povodí (v buňkách).
- **Výstupem** je rastr povodí.

Vytvoření povodí





Vliv prahu akumulčních buněk na velikost povodí



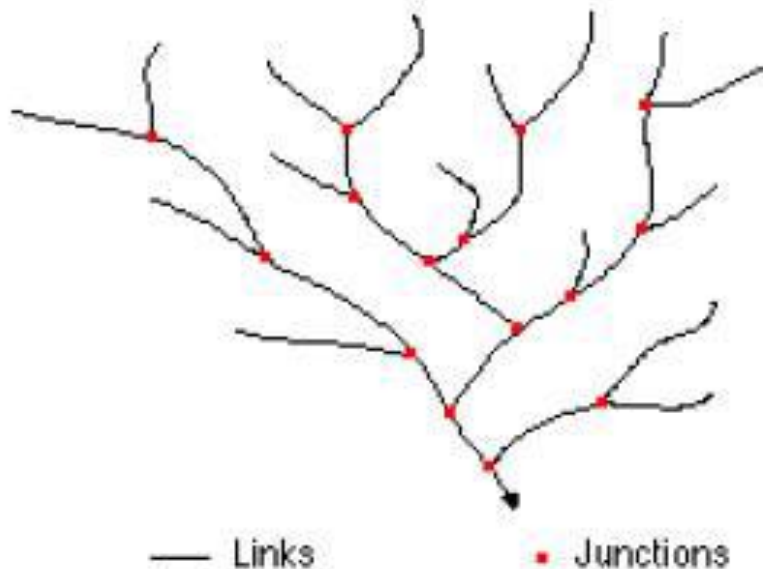


Stanovení charakteristik povodí

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

Segmentace vodního toku

- Funkce *Stream Link* přiřazuje unikátní hodnoty částem (úsekům) rastru, který znázorňuje liniovou vrstvu 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



Co je to „rastr vodního toku“?



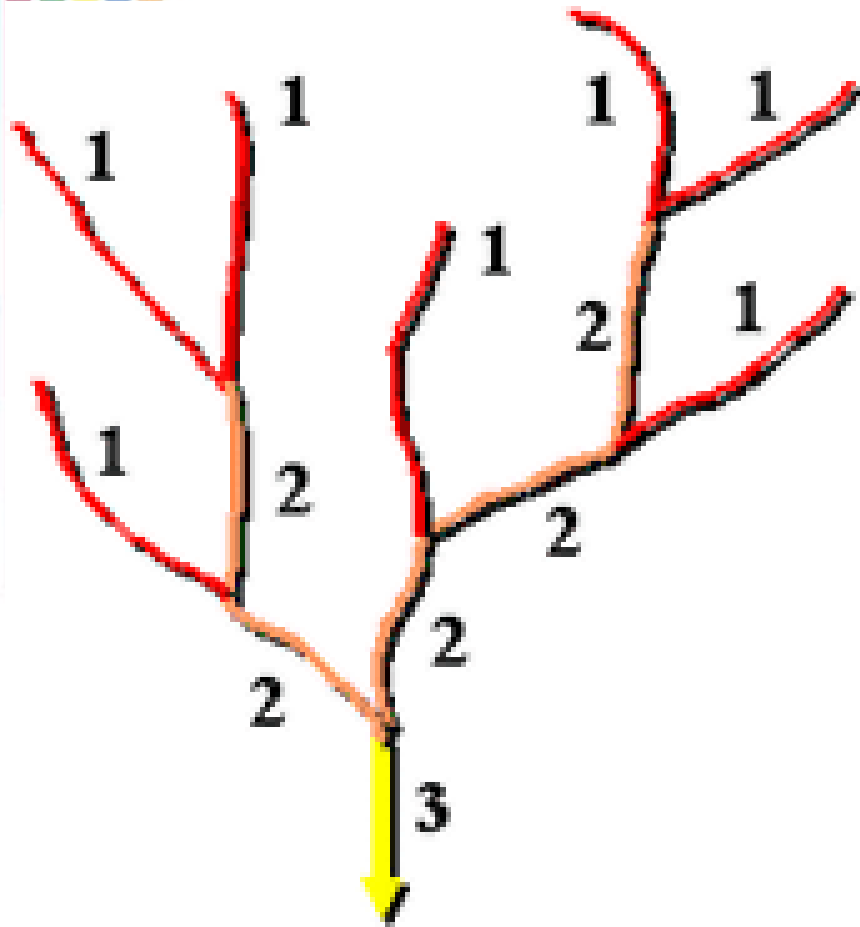
Stream link ArcGIS pro

The screenshot displays the ArcGIS Pro interface with the Stream Link tool parameters panel open on the right. The map in the background shows a stream network with various colored lines representing different stream orders. The parameters panel is titled 'Stream Link' and includes the following settings:

- Input stream raster:** flow_accu_50000
- Input flow direction raster:** Flow_Dir
- Output raster:** stream_link_50000

The 'Parameters' tab is selected, and the 'Environments' tab is also visible. The map shows a network of streams with different colors representing different stream orders, ranging from 1 (red) to 5 (dark blue). The map also shows a flow accumulation raster and a flow direction raster.

Řády toků - Strahler

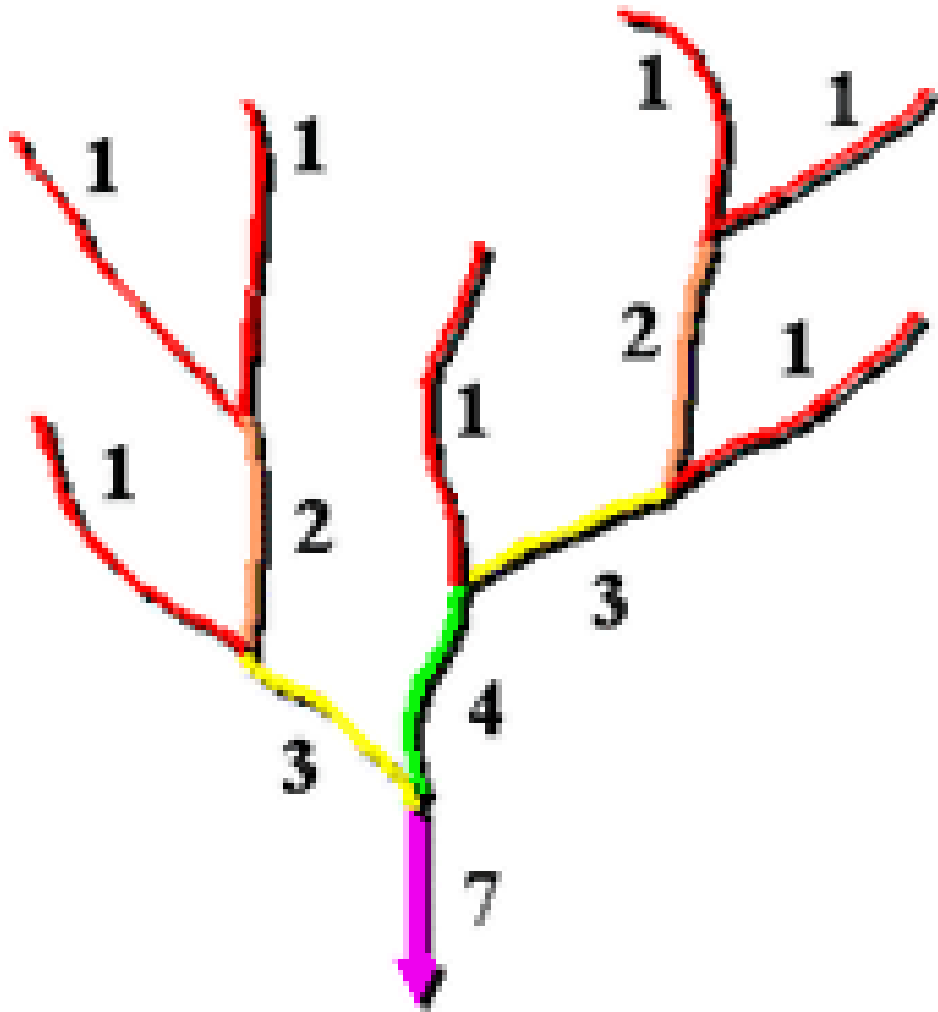


Strahler

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.

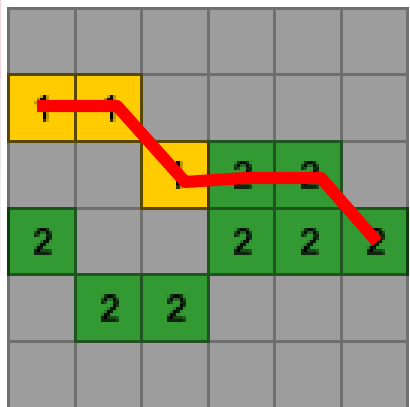
Řády toků – Shreve



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

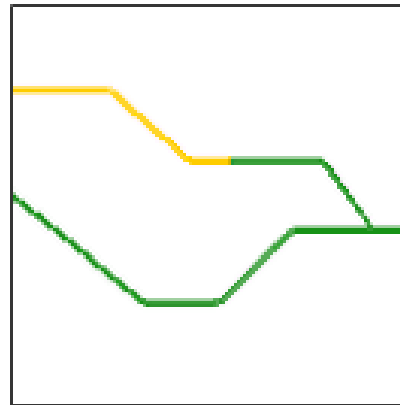


Vytvoření linie vodního toku z rastru vodního toku

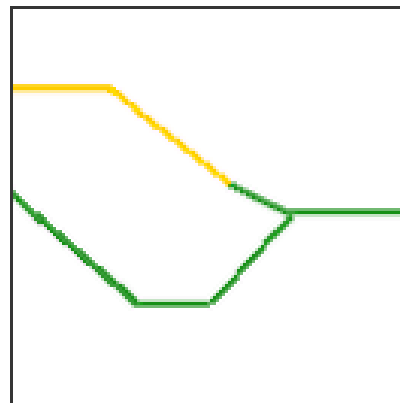


Input network raster

■ Value = NoData



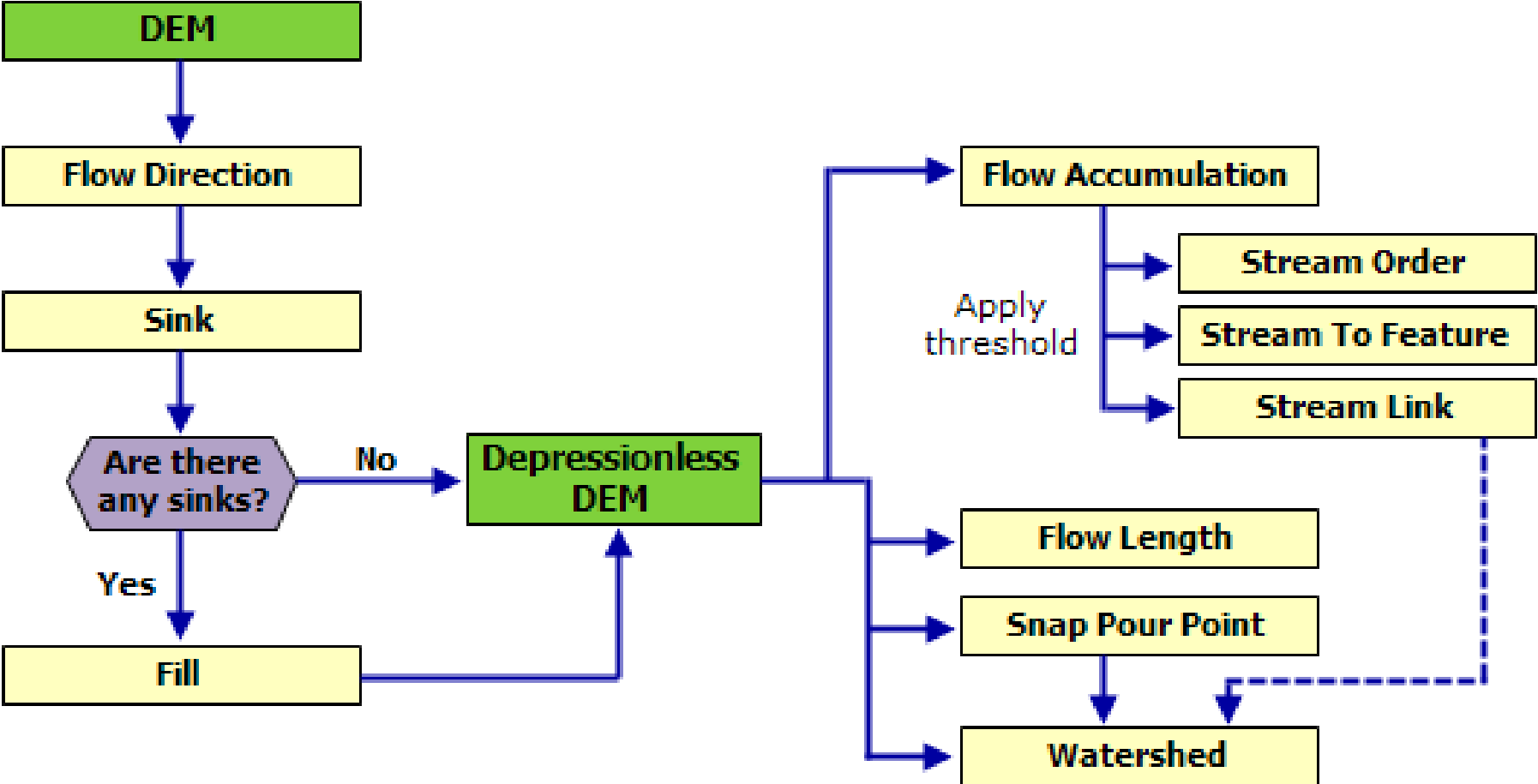
Stream to Feature output



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.**

Celkový postup v ArcGIS



- Qin, C., Zhu, A. X., Pei, T., Li, B., Zhou, C., & Yang, L. 2007. "An adaptive approach to selecting a flow partition exponent for a multiple flow direction algorithm." *International Journal of Geographical Information Science* 21(4): 443-458.
- Tarboton, D. G. 1997. "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models." *Water Resources Research* 33(2): 309-319.