

TVORBA HYDROLOGICKÝCH PODKLADOV PRE NÁVRH PROTIERÓZNYCH OPATRENÍ V KRAJINE V PROSTREDÍ GIS

Karol Šinka¹

¹ Katedra krajinného plánovania a pozemkových úprav, Fakulta záhradníctva a krajinného inžinierstva, Slovenská poľnohospodárska univerzita, Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra, Slovakia, karol.sinka@unaig.sk

Abstract

The software HydroTools (HTools) is an add-in program for ArcView GIS 3.x by Holger Schäuble and provides various hydrological functions which were unavailable in most GIS-Systems up to now. HTools is capable to analyze many important hydrological properties (flow length, flow accumulation, flow maximum) of big catchments and generate representative /average/ values of slope, curve number, depth of flow ... etc. with the help of raster calculator for every cells of grid.

Kľúčové slová

Geographic information system, catchment, flow accumulation, flow maximum, curve number

1 Úvod

Riešenie pozemkových úprav, organizácie využívania pôdy, a celkovo priestorové plánovanie nezaobíde bez vytvárania hydrologických podkladov pre návrh protierózných a protipovodňových opatrení v krajine. Veľký význam pri vytváraní týchto podkladov (priestorovo) zohráva prostredie geografických informačných systémov (GIS) práve prostredníctvom svojich hydrologických rozšírení

Cieľom príspevku je preto stanovenie výšky a objemu povrchového odtoku z návrhového dažďa na základe CN metódy ([10]), ako aj doby koncentrácie (NRCS Lag method; Bransby-Williams) a kulminačného (maximálneho) prietoku použitím hydrologického rozšírenia.

2 Materiál a metódy

Tvorbu hydrologických podkladov uskutočňujeme v ArcView GIS 3.x (vrátane Spatial Analyst 1.1) s použitím prídavného programu, t.j. rozšírenia HydroTools 1.0 (© Holger, Schäuble).

1. Prípravné hydrologické modelovanie

Hydrologicky korektný DMR

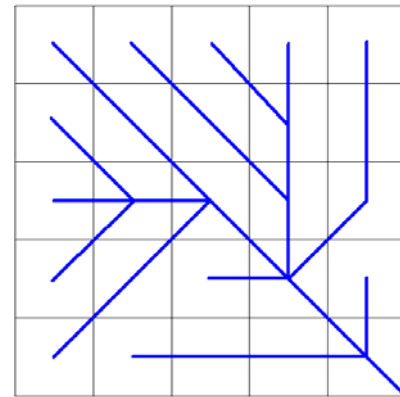
178	172	169	171	158
174	167	156	149	146
169	153	144	137	138
164	158	155	122	131
168	161	147	121	116

Kód	Smer odtoku
1	Východ
2	Juhovýchod
4	Juh
8	Juhozápad
16	Západ
32	Severozápad
64	Sever
128	Severovýchod

Smer odtoku (Flow Direction D8)

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

Riečna sieť



Z hydrologicky korektného DMR (vytvoreného interpoláčnou metódou Topo to Raster) sa odvodí mapa smeru odtoku, t.j. mapa smeru najstrmšieho spádu každej bunky k susednej, nižšie položenej bunke. Bližšie túto skutočnosť znázorňuje odvodená riečna sieť.

V ďalšom kroku určíme akumuláciu odtoku. Keďže v rastrovom dátovom modeli každá bunka je zároveň výtokovým profilom, môžeme určiť akumuláciu **k výtokovému profilu** (Hydrologic modeling), alebo **k výtokovému profilu vrátane** (Hydrotools). Pre naše potreby vyhovuje jedine akumulácia odtoku k výtokovému profilu vrátane. Podmieňuje to vytváranie reprezentatívnych (spriemerených) dát.

Akumulácia odtoku (Flow accumulation D8)

a) k výtokovému profilu

0	0	0	0	0
0	1	1	2	1
0	3	8	5	2
0	1	0	19	0
0	0	1	2	24

b) k výtokovému profilu vrátane

1	1	1	1	1
1	2	2	3	2
1	4	9	6	3
1	2	1	20	1
1	1	2	3	25

2. Stanovenie mapy odtokových čísiel (CN – metóda) a jeho využitie

Pre použitie CN – metódy potrebujeme **priestorovo** identifikovať (minimálne prvé dva)

- hydrologickú charakteristiku vlastností pôd
- využívanie pôdy
- hydrologickú charakteristiku (kvalitu) pôdneho krytu
Velké rezervy na určenie kvality – vitality pôdneho krytu má diaľkový prieskum zeme prostredníctvom vytvárania vegetačných indexov. Žiaľ, v súčasnosti využiteľné družicové snímky majú malé priestorové rozlíšenie (Landsat 30 m , SPOT a IRS 20 m).
- hydrologickú charakteristiku jednotlivých spôsobov obrábania pôdy

K dosiahnutiu CN – hodnôt je potrebné pristúpiť k ich prekrytiu. Rozlišujeme:

- prekrytie vektorových dátových modelov (X-tools, Intersect)
- prekrytie rastrových dátových modelov (Spatial Analyst, Combine)

Použitím príkazu Combine môžeme prekryť naraz až 20 rastrov (X-tools iba 2 vektory), resp. každá kombinácia je zapísaná iba raz v atribútovej tabuľke (pri vektore je zapísaná toľko krát, koľko krát sa vyskytuje).

Mapa odtokových čísiel

55	60	65	60	72
55	68	73	75	80
65	75	80	83	83
70	72	73	85	85
65	70	78	86	86

Mapa odtokových čísiel reprezentatívnych

55	60	65	60	72
55	61.5	66.5	66.67	76
65	66.25	67.22	69.33	78.33
70	68.5	73	70.7	85
65	70	74	78	72.76

$$\text{Mapa odtokových čísiel reprezentatívnych} = \frac{\text{Akumulácia odtoku D8; váha: Mapa odtokových čísiel}}{\text{Akumulácia odtoku D8; bez váhy}}$$

Akumulácia odtoku D8
váha: Mapa odtokových čísiel

55	60	65	60	72
55	123	133	200	152
65	265	605	416	235
70	137	73	1414	85
65	70	148	234	1819

Akumulácia odtoku D8
bez váhy

1	1	1	1	1
1	2	2	3	2
1	4	9	6	3
1	2	1	20	1
1	1	2	3	25

Po určení mapy odtokových čísiel reprezentatívnych môžeme pristúpiť za pomoci mapového (raster) kalkulátora k výpočtu:

- mapy potenciálnej retencie – A [mm]
 $A = 25.4 * [(1000 / CN_{REP}) - 10]$
- mapy výšky povrchového odtoku – $H_{o,p}$ [mm]
 $H_{o,p} = (H_{D,N} - 0.2 * A)^2 / (H_{D,N} + 0.8 * A)$
- mapy prispievajúcich plôch (povodí) – S_p [km²]
 $S_p = (\text{akumulácia odtoku bez váhy} * \text{rozlíšenie rastra}^2) / 1\,000\,000$
- mapy objemu povrchového odtoku – $O_{o,p}$ [m³]
 $O_{o,p} = 1000 * H_{o,p} * S_p$

Zároveň treba zdôrazniť, že **výšku povrchového odtoku** na základe CN – metódy dostávame vo výtokovom profile (ktorou je v rastrovom modeli každá bunka) vždy v milimetroch vodného stĺpca pre jeho prispievajúcu plochu (povodie) za celú dobu trvania dažďa, nikdy nie skutočnú výšku povrchového odtoku, ktorá sa v príslušnom výtokovom profile vytvorí.

Mapa potenciálnej retencie [mm]

207.8	169.3	136.8	169.3	98.8
207.8	159.0	128.0	127.0	80.2
136.8	129.4	123.9	112.3	70.3
108.9	116.8	93.9	105.3	44.8
136.8	108.9	89.2	71.6	95.1

Mapa výšky povrchového odtoku [mm]

3.42	6.35	10.14	6.35	16.94
3.42	7.40	11.44	11.59	21.70
10.14	11.22	12.10	14.13	24.80
14.81	13.31	18.07	15.54	35.19
10.14	14.81	19.24	24.34	17.79

Mapa prispievajúcich plôch [km²]

0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
0.0025	0.005	0.005	0.0075	0.005
0.0025	0.01	0.0225	0.015	0.0075
0.0025	0.005	0.0025	0.05	0.0025
0.0025	0.0025	0.005	0.0075	0.0625

Objem povrchového odtoku [m³]

8.6	15.9	25.3	15.9	42.4
8.6	37.0	57.2	86.9	108.5
25.3	112.2	272.2	212.0	186.0
37.0	66.5	45.2	776.8	88.0
25.3	37.0	96.2	182.60	1112.1

3. Výpočet doby koncentrácie - τ_{max} (určíme ako maximálnu hodnotu súčtu 3 položiek)

A) **Plošný povrchový odtok** (s dĺžkou do 100 m, nad 100 m - No Data) – NRCS Lag method:

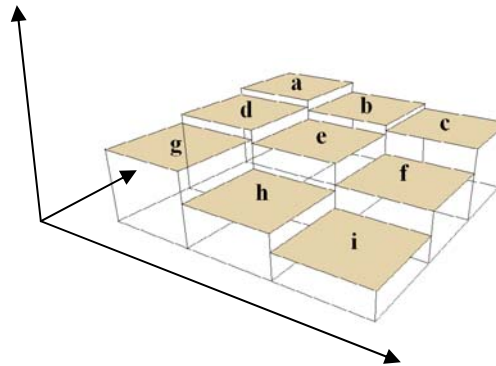
$$t_{sv} = \frac{1,67 * [(3,278 * L_{sv})^{0,8} * ((1000/CN_{REP}) - 9)^{0,7}]}{1900 * I_{sv}^{0,5}} \quad [h]$$

- a) L_{sv} - Dĺžka svahu (0 až 100 [m]) – odvodením z mapy smeru odtoku.
b) CN_{REP} - Reprézentaívna hodnota CN [-]

Mapa dĺžky svahu [m]

0	0	0	0	0
0	70.71	70.71	70.71	50
0	70.71	No Data	No Data	100
0	70.71	0	No Data	0
0	0	50	100	No Data

Maska 3x3 bunky pre výpočet sklonu



- c) I_{sv} - Priemerný sklon svahu [%]

Aby sme mohli stanoviť hodnotu priemerného sklonu svahu, musíme poznať princíp výpočtu sklonu v prostredí GIS.

Algoritmus výpočtu sklonu v prostredí GIS.

Výpočet sklonu sa uskutočňuje z digitálneho modelu reliéfu v maske 3 x 3 bunky. Hodnota sklonu centrálnej bunky masky je kalkulovaná z 8 susedných buniek použitím metódy priemerného maxima (Burrough, McDonell 1998).

Pre centrálnu bunku e sa určí:

1. miera zmeny (sklon) povrchu – masky [m. m⁻¹] v horizontálnom, x-ovom smere (dz/dx)
 $[dz / dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / 8 * \text{rozlíšenie bunky}$

2. miera zmeny (sklon) povrchu – masky [m. m⁻¹] vo vertikálnom, y-ovom smere (dz/dy)
 $[dz / dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / 8 * \text{rozlíšenie bunky}$

Hodnota sklonu centrálnej bunky je potom determinovaná mierou zmeny povrchu v horizontálnom aj vertikálnom smere, t.j. maximálnou mierou zmeny povrchu, pričom môže byť vyjadrená v rôznych jednotkách.

sklon v percentách = $(\sqrt{[dz / dx]^2 + [dz / dy]^2}) * 100$

sklon v stupňoch = $\text{arctang}(\sqrt{[dz / dx]^2 + [dz / dy]^2}) * (180/\pi)$

Takto získaná hodnota sklonu má však charakter „bodového“, a teda nie nami hľadaného priemerného sklonu. Priemerný sklon však dokážeme určiť spôsobom, akým boli vypočítané odtokové čísla reprézentaívne.

Mapa „bodového“ sklonu [%]

7.46	10.82	13.00	22.47	9.28
13.08	25.10	28.96	29.73	19.30
13.38	20.57	No Data	No Data	14.36
6.67	16.62	32.00	No Data	15.98
7.50	12.95	29.00	24.38	No Data

Mapa priemerného sklonu [%]

7.46	10.82	13.00	22.47	9.28
13.08	16.28	19.89	21.73	14.29
13.38	13.43	No Data	No Data	14.31
6.67	12.06	32.00	No Data	15.98
7.5	12.95	20.98	22.11	No Data

Doba dobehu t_{sv} [h]

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.068	0.054	0.052	0.037
0.000	0.066	No Data	No Data	0.060
0.000	0.066	0.000	No Data	0.000
0.000	0.000	0.033	0.049	No Data

Maximálna hodnota t_{sv} [h]

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.068	0.054	0.052	0.037
0.000	0.066	0.068	0.054	0.060
0.000	0.066	0.000	0.068	0.000
0.000	0.000	0.033	0.049	0.068

B) *Sústredný odtok údolnicou* (s dĺžkou nad 100 m, do 100 m No Data) – Bransby-Wiliams:

- $L_{\dot{u}}$ - Dĺžka pretečeného úseku údolnice [km]
Východiskovým – nulovým - bodom pre meranie dĺžky je miesto transformácie plošného odtoku na sústredný.
- $I_{\dot{u}}$ - Priemerný sklon údolnice [-]
- S_p - Plocha povodia [km²]
- d - Priemer kruhu, ktorého plocha sa rovná ploche povodia [km]

$$t_{\dot{u}} = \frac{L_{\dot{u}}}{1,5 * d} * \sqrt[5]{\frac{S_p^2}{I_{\dot{u}}}} ; [h]$$

Dĺžka údolnice [km]

No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	0.000	0.000	No Data
No Data	No Data	No Data	0.071	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	0.141

„Bodový“ sklon [%]

No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	23.51	20.94	No Data
No Data	No Data	No Data	24.78	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	9.85

Priemerný sklonu [%]

No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	23.51	20.94	No Data
No Data	No Data	No Data	23.08	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	19.77

Priemer kruhu [km]

No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	0.0577	0.0577	No Data
No Data	No Data	No Data	0.1000	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	0.1155

Plocha povodia [km²]

No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	0.0025	0.0025	No Data
No Data	No Data	No Data	0.0075	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	0.01

Doba dobehu t_u [h]

No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	No Data
No Data	No Data	0.000	0.000	No Data
No Data	No Data	No Data	0.036	No Data
No Data	No Data	No Data	No Data	0.071

Doba koncentrácie τ_{max}

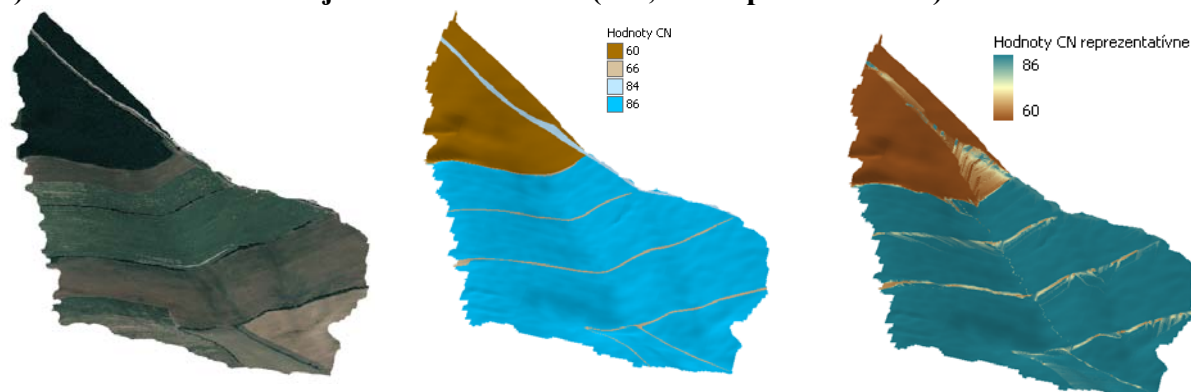
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.068	0.054	0.052	0.037
0.000	0.066	0.068	0.054	0.060
0.000	0.066	0.000	0.104	0.000
0.000	0.000	0.033	0.049	0.139

Pred súčtom maximálnej hodnoty t_{sv} a t_u je potrebné upraviť No Data mapy t_u na hodnotu 0 (merge grid mapy t_u s nulovým rastrom).

Pokiaľ by sa vyskytoval aj odtok v koryte, postupovali by sme obdobným spôsobom.

3 Výsledky a záver

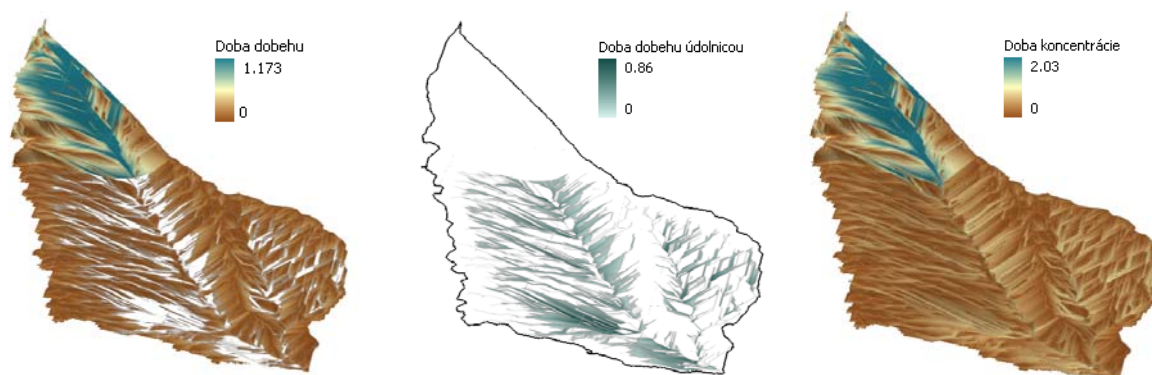
a) Modelové územie a jeho odtokové čísla (CN, CN reprezentatívne)



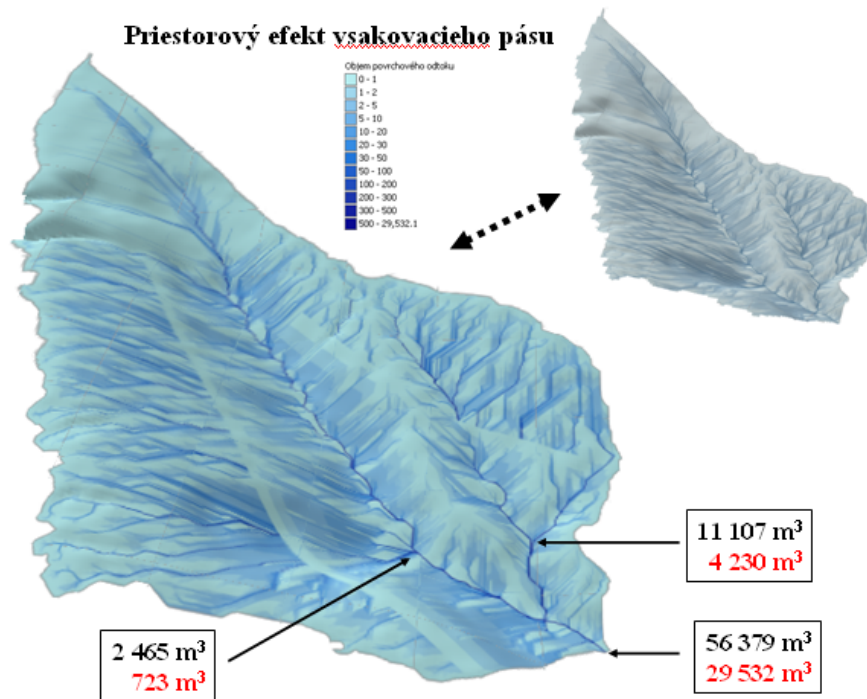
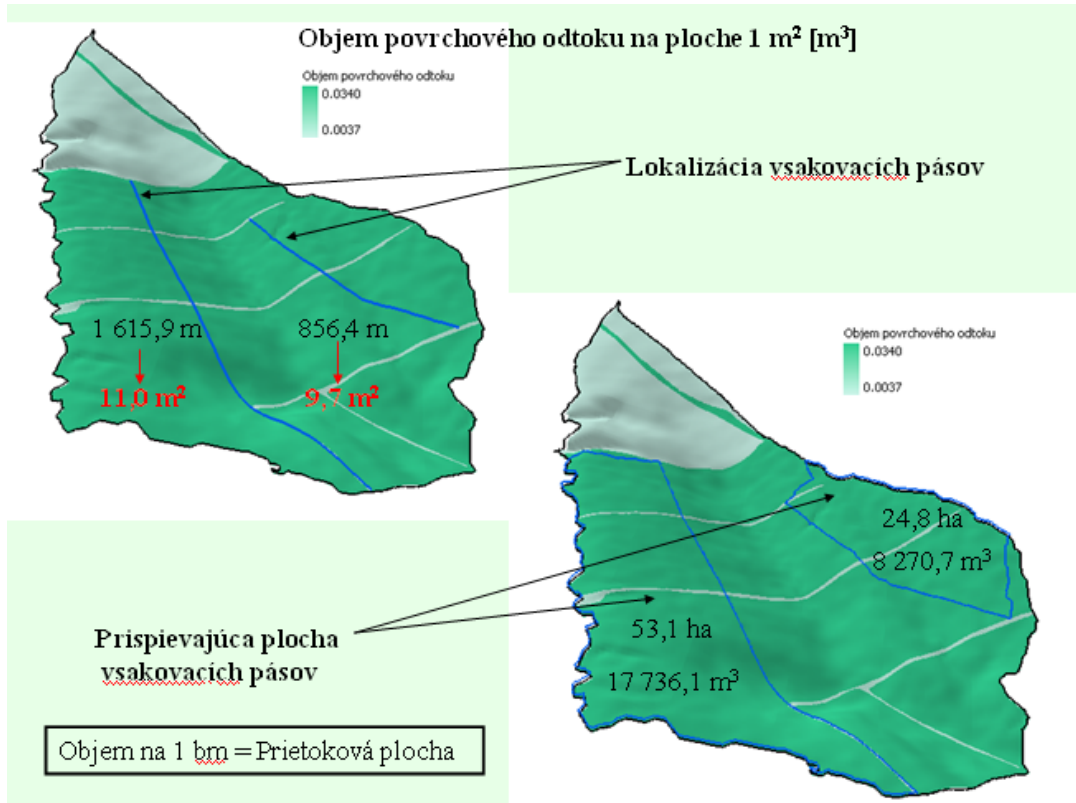
b) Plocha povodia [km²], výška [mm] a objem [m³] povrchového odtoku



c) Doba dobehu po svahu, údolnicou a doba koncentrácie [h]



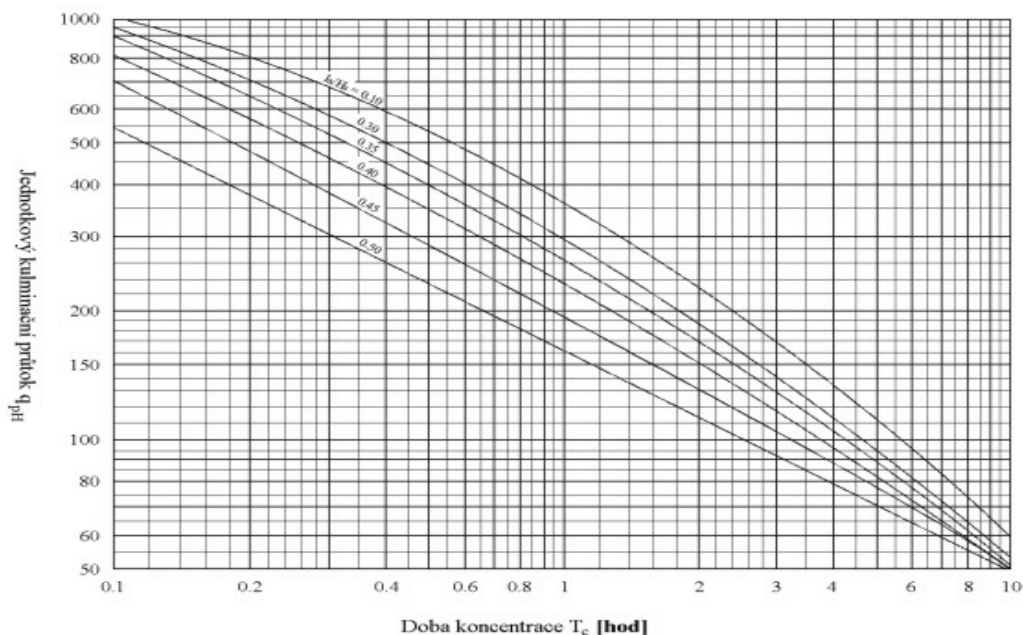
Hydrologické podklady – výšku a objem povrchového odtoku podľa CN metódy - vytvárame za účelom optimálneho návrhu protieróznych, protipovodňových opatrení v krajine, ako sú vsakovacie priekopy, vodné nádrže, poldre,... **Priestorový efekt** týchto opatrení dokážeme veľmi presne vyjadriť pomocou ďalšieho hydrologického rozšírenia od Holgera Schäuble AccumPlus 1.0, v ktorom sa zadáva účinnosť zadržiavania odtoku (ale aj sedimentov) príslušnými opatreniami v percentách.



Dobu koncentrácie sme stanovili ako súčet *plošnej doby dobehu* (podľa NRCS Lag method), ktorá je funkciou charakteristík reliéfu a CN hodnoty, a *doby dobehu údolnicou* (podľa Bransby – Wiliamsa), ktorá je už len funkciou charakteristík reliéfu.

Stanovenie maximálneho (kulminačného) prietoku – Q_{max}

Jeho stanovenie je v porovnaní s objemom povrchového odtoku omnoho problematickejšie. Vysvetlíme si to nižšie.



- určenie výšky odtokovej straty I_a [mm] ($I_a = 0.2 * A$)
- určenie hodnoty $I_a / H_{o,p}$ [-], ktoré reklasifikujeme do 6 tried:

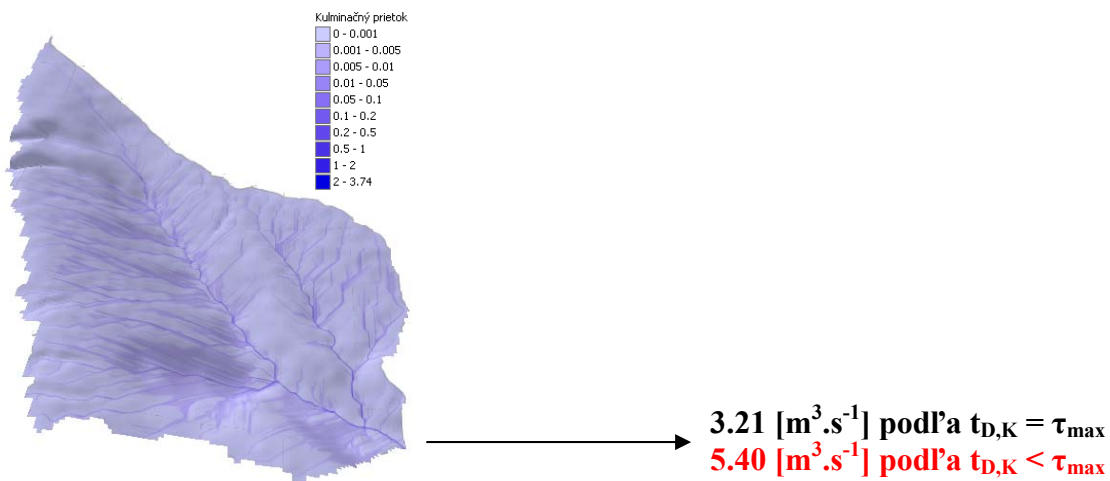
Trieda	$I_a / H_{o,p}$	Rovnica regresie	Rovnica spoľahlivosti
1	0.000 – 0.150	$q_{max} = 165.95 * \tau_{max}^{-0.5208}$	$R^2 = 0.9996$
2	0.150 – 0.325	$q_{max} = 198.74 * \tau_{max}^{-0.5757}$	$R^2 = 0.9980$
3	0.325 – 0.375	$q_{max} = 226.20 * \tau_{max}^{-0.5926}$	$R^2 = 0.9951$
4	0.375 – 0.425	$q_{max} = 248.34 * \tau_{max}^{-0.6027}$	$R^2 = 0.9918$
5	0.425 – 0.475	$q_{max} = 267.84 * \tau_{max}^{-0.6084}$	$R^2 = 0.9896$
6	nad 0.475	$q_{max} = 312.18 * \tau_{max}^{-0.5936}$	$R^2 = 0.9768$

- výpočet jednotkového kulminačného prietoku $q_{max} = f(I_a / H_{o,p}, \tau_{max})$
Výočíta sa pre každú zastúpenú triedu samostatne a napokon sa $q_{max 1-6}$ zlúčia do jedného rastra (merge grid).
- výpočet maximálneho kulminačného prietoku $Q_{max} = 0.000431 * q_{max} * H_{o,p} * S_p * f$

Uvedený spôsob stanovenia kulminačného prietoku Q_{max} vychádza z predpokladu, že doba koncentrácie τ_{max} sa rovná kritickej dobe trvania návrhového dažďa $t_{D,K}$ (na tomto princípe sa

zakladá aj tzv. racionálna metóda). V praxi to však mnoho krát neplatí (obzvlášť v mikropovodiach s menším či väčším zastúpením lesa) a je potrebné pristúpiť k určovaniu kritickej doby trvania návrhového dažďa $t_{D,K}$ najčastejšie graficko-analytickou metódou, t.j. vyhodnotením závislosti $q_{100} = f(t_d)$, ktorú zistíme postupným výpočtom hodnôt q_{100} pre rôzne náhradné dažde s dobou trvania t_d rovnvej a menšej než τ_{max} . Výpočet q_{100} vykonáme pomocou nomogramu II. typu k určeniu kulminačného prietoku. Inými slovami povedané, aplikujeme princíp Hrádekovej metódy do nomogramu II. typu, s tým rozdielom, že účinnú plochu určíme ako funkciu doby koncentrácie, svahovej dĺžky a rýchlosti povrchového odtoku. Z tohto pochopiteľne vyplýva, že strácame celopriestorovosť čo sa týka určenia kulminačného prietoku. Tá sa určí pre výtokový profil nami riešeného povodia

Kulminačný prietok Q_{max} [$m^3 \cdot s^{-1}$]



4 Referencie

1. Antal, J.: *Agrohydrologia*. 2. vyd. Nitra: SPU. 168 s. 1999. ISBN 80-7137-610-8
2. Burrough, P. A. and McDonell, R.A.: *Principles of Geographical Information Systems* (Oxford University Press, New York), p. 190. 1998.
3. Greenlee, D. D.: *Raster and Vector Processing for Scanned Linework*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 53 (10): 1383–1387. 1987.
4. Jenson S. K. and J. O. Domingue.: *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11): 1593-1600. 1988.
5. Hudson, N.: *Soil Conservation*. Batsford Ltd. London. 1973
6. Schäuble, H.: *HydroTools 1.0 for ArcView 3.x. Hydrological analysis of catchments and particle movements*. P. 12. 2004.
7. Schäuble, H.: *AccumPlus for ArcView 3.x and ArcGIS 9.x*. Flow accumulation by considering dams and their specific operation time. P. 12. 2008.
8. Šimonides, I.: *Základy geografických informačných systémov*. 2. vyd. Nitra: SPU. 114 s. 2004. ISBN 80-8069-426-5
9. Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe.: *On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data*. Hydrological Processes. 5: 81–100. 1991
10. Wen Te Chow: *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill, Inc, New York. 1964.

Recenzoval: Ing. Andrea Majlingová, PhD.