

## HYDROLOGICKÁ BILANCE ELEMENTÁRNÍ ODTOKOVÉ PLOCHY LESNÍHO POVODÍ V ORLICKÝCH HORÁCH

### HYDROLOGICAL BALANCE OF ELEMENTARY RUNOFF AREA WITHIN FOREST WATERSHED IN THE ORLICKÉ HORY MTS.

VLADIMÍR ŠVIHLA<sup>1</sup> - VLADIMÍR ČERNOŠUS<sup>2</sup> - FRANTIŠEK ŠACH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Fügnerova 809, Beroun*

<sup>2</sup>*Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti Strnady, v. v. i., VS Opočno*

#### ABSTRACT

The article deals with analysis of precipitation-runoff relationship using hydrological balance within elementary runoff area of forest watershed in the Orlické hory Mts. The variables of hydrological balance are related to amounts of throughfall; the study deals with their relationships. A method by Kněžek was verified to separate components of runoff. We confirmed a regulation function of underground soil water reservoir in the rainfall-runoff process. Calculated evapotranspiration mean value (1.65 mm per day) seems to be comparable to values under similar conditions. We proved that forest stands do not suffer from drought within the elementary runoff area (EOP) and maximal real water retention of soil is high (75 mm) which leads to minimum surface-runoff occurrence in forest. Soil water constants (hydrolimits) help us to get information on water component in soil water. Accuracy of results describing rainfall-runoff relationships using hydrological balance within EOP proves the analysis is correct.

**Klíčová slova:** hydrologická bilance, srážko-odtokový proces, podkorunové srážky, celkový odtok, evapotranspirace, retenční kapacita půdy, retenze půdní vody, průsak do hydrogeologických struktur, na geologické podloží

**Key words:** hydrological balance, rainfall-runoff process, throughfall, total runoff, evapotranspiration, soil retention capacity, soil water retention, percolation to hydrogeological structure, to bedrock

#### ÚVOD

Cílem práce je poznání hydrodynamických procesů v horském mikropovodí (elementární odtokové ploše, dále EOP) ze 70 % plochy kryté lesními porosty. Poznání těchto procesů má význam pro samotné lesní hospodářství, kterému dává údaje o hospodaření vodou lesními porosty, pro vodní hospodářství, kterému poskytuje data pro kvantifikaci vodní komponenty v horském masivu, který je základním zdrojem vod, a pro ochranu přírody, které poskytuje cenné informace o zákonitostech procesů ve vodním režimu v lesních ekosystémech našich hor. Pro splnění cíle byla autory práce zvolena metoda hydrologické bilance. Důvodem je vysoká nehomogenita horských lesních půd, která zpochybňuje použití známých hydrodynamických modelů, jejichž aplikace by vyžadovala mnohem hustší měrnou síť a kontinuální měření, což je nad možnosti aplikovaného výzkumu. Na druhé straně výzkum potvrdil, že zvolené intervaly měření sacích tlaků a hydraulických výšek hydrologické bilanci vyhovují (ŠVIHLA, ČERNOŠUS, ŠACH 2010). Metoda hydrologické bilance dává logické a použitelné výsledky, které jsou v souladu s dosavadními studiemi v Orlických horách (KANTOR 1995), Jizerských horách (ŠANDA et al. 2006, 2009) i na Šumavě (MRÁZ et al. 1990, TESAŘ et al. 1992). Experimentální plocha U Dvou louček má charakter EOP, dobře vystihuje dynamické procesy v mikropovodí a reprezentuje vodní komponentu hřebenu Orlických hor.

#### MATERIÁL A METODA

Základem výpočtů hydrologické bilance EOP je kontinuální měření odtoků v závěrečném profilu EOP, režimní měření sacích tlaků v 36 profilech ve 4 hloubkách, hydraulických výšek v 52 jehlových vrtech a denních úhrnů srážek v 8 srážkoměrech. Režimní měření byla prováděna v roce 2007 v časovém intervalu 6 – 10 dní od 22. 5. do 17. 10., celkem 17 měření v průběhu 148 dní. Evapotranspirace byla vypočtena na základě hydrologické bilance (HB) tenzometrického pole 10 x 10 m. Veličiny a závislosti potřebné k výpočtům hydrodynamiky v půdním profilu byly laboratorně stanoveny na základě terénního průzkumu. Podrobnosti obsahuje publikace ŠVIHLA, ČERNOŠUS, ŠACH (2010). Intercepce byla stanovena na základě měření na experimentální ploše VÚLHM, výzkumná stanice Opočno Deštnská stráň (KANTOR 1995, KANTOR et al. 2006, 2007). Pro výpočet byla použita základní rovnice modelu hydrologické bilance EOP.

$$HS(p) - Q(c) - E(t,s) - Q(gr) + \Delta W(p) + \varepsilon = 0 \quad [mm] \quad (1)$$

|               |   |
|---------------|---|
| HS(p)         | podkorunové srážky (srážky volné plochy snížené o intercepce) |
| Q(c)          | celkový odtok v závěrečném profilu povodí                     |
| E(t,s)        | evapotranspirace  |
| $\Delta W(p)$ | přírůstek, resp. úbytek zásoby vody v povodí                  |
| Q(gr)         | průsak do geologického podloží                                |
| $\varepsilon$ | rozdíl naměřených a modelem vypočtených parametrů             |

HS(p), Q(c), E(t,s), Q(gr),  $\Delta W(p)$  jsou veličiny známé,  $\varepsilon$  je odchylka modelu a měření.

Povodí EOP tvoří ucelenou část ve vrcholové partii hor, přítok cizích vod do povodí je vyloučen. Podrobný popis povodí obsahují publikace ŠEDA (2003), ŠVIHLA, ČERNOŠOUS, KULHAVÝ, ŠACH (2005), ČERNOŠOUS (2006a), ČERNOŠOUS, ŠACH (2007).

## VÝSLEDKY A KOMENTÁŘ

Sumární výsledek práce obsahuje tabulka 1 a obrázek 1. Jasně ukazují způsob regulace srážek lesní půdou. Závislost celkových odtoků v závěrečném profilu EOP a srážek je jasně prokázána celkovými tendencemi obou veličin a průběhem srážek. Maxima i minima srážkových úhrnů odpovídají stejným bodům odtoků a evapotranspirace. V suchých periodách uvolňuje lesní půda vodu pro evapotranspiraci a odtok, ve vlhkých periodách se srážkovou vodou sytí (obdobně TESAŘ et al. 1992).

Kvantifikace těchto procesů byla realizována statistickým rozbořem vztahů jednotlivých proměnných veličin hydrologické bilance s využitím statistických metod v zemědělském a lesnickém

výzkumnictví (MYSLIVEC 1957). Předně byl analyzován vztah celkových odtoků v závěrečném profilu EOP a hydraulické výšky (Hv) v jehlových vrtech (JV). Výsledky analýzy jsou uvedeny v tabulce 2 a na obrázku 2. Empirická čára odtoků Q(c) jako funkce hydraulické výšky v jehlových vrtech (JV) byla upravena scalingem a porovnána s teoretickou křivkou

$$Q(c) = f(Hv) = 0,1425 \cdot e^{0,0747Hv} \quad (2)$$

odvozenou z empirických dat. Rovnice (2) byla odvozena HOPMANSEM (1988). Shoda obou čar je jasně patrná až do odtoku povrchového, kde se zřejmě mění charakter závislosti. Odtok základní a podpovrchový má zřejmě jiný charakter závislosti Q – Hv než odtok povrchový. Tuto skutečnost potvrdil i ČERNOŠOUS (2006b). Lomové body na empirické čáře Q(c) – Hv signalizují separaci jednotlivých druhů odtoku. Pro Hv = 22 cm a Q(c) = 9,8 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> je to dělící bod mezi odtokem základním a podpovrchovým, pro dělící bod Hv = 37,2 cm a Q(c) = 33,7 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> platí hranice odtoků podpovrchového a povrchového. Tím je dáno přibližné měřítko pro kvalifikaci odtoků na hydrogramech odtoků v roce 2007.

**Tab. 1.**

Hydrologická bilance povodí U Dvou louček v roce 2007

Hydrological balance of watershed U Dvou louček in 2007

| Datum/Date        | HS(p) | Q(c)   | E(t,s) | Q(gr) | $\Delta W(p)$ | $\varepsilon$ |
|-------------------|-------|--------|--------|-------|---------------|---------------|
| 147 dnů/days      |       |        | mm     |       |               |               |
| 22. 5. – 31. 5.   | 8,0   | -8,3   | -7,4   | 0,0   | 7,7           | 0,0           |
| 31. 5. – 14. 6.   | 37,5  | -17,5  | -21,1  | 0,0   | 0,1           | -1,0          |
| 14. 6. – 21. 6.   | 5,0   | -3,0   | -15,2  | 0,0   | 13,2          | 0,0           |
| 21. 6. – 3. 7.    | 61,6  | -7,3   | -17,1  | -8,3  | -28,1         | 0,8           |
| 3. 7. – 19. 7.    | 90,3  | -31,4  | -41,2  | -3,0  | -17,7         | -3,0          |
| 19. 7. – 25. 7.   | 0,8   | -2,4   | -17,2  | -6,1  | 24,9          | 0,0           |
| 25. 7. – 8. 8.    | 7,7   | -4,6   | -19,5  | -5,6  | 22,0          | 0,0           |
| 8. 8. – 15. 8.    | 18,0  | -2,2   | -6,6   | 0,0   | -9,2          | 0,0           |
| 15. 8. – 22. 8.   | 21,3  | -2,7   | -9,5   | -1,0  | -8,1          | 0,0           |
| 22. 8. – 29. 8.   | 0,0   | -1,8   | -21,2  | 0,0   | 23,0          | 0,0           |
| 29. 8. – 25. 9.   | 123,5 | -37,5  | -46,2  | -1,9  | -26,1         | 11,8          |
| 25. 9. – 2. 10.   | 42,2  | -15,7  | -1,4   | 0,0   | -25,1         | 0,0           |
| 2. 10. – 10. 10.  | 15,3  | -7,5   | -10,3  | 0,0   | 2,5           | 0,0           |
| 10. 10. – 17. 10. | 1,6   | -3,9   | -8,9   | 0,0   | 11,2          | 0,0           |
| $\Sigma$          | 432,8 | -145,8 | -242,8 | -25,9 | -9,7          | 8,6           |
| %                 | 100,0 | -33,7  | -56,1  | -6,0  | -2,2          | 2,0           |

HS(p) podkorunové srážky/throughfall

Q(c) odtok v závěrečném profilu povodí/discharge from watershed in closing profile

E(t,s) evapotranspirace/evapotranspiration (transpirace lesního porostu Et a výpar z povrchu půdy a přizemní vegetace Es/transpiration of tree crowns Et and evaporation from forest floor and ground vegetation Es)

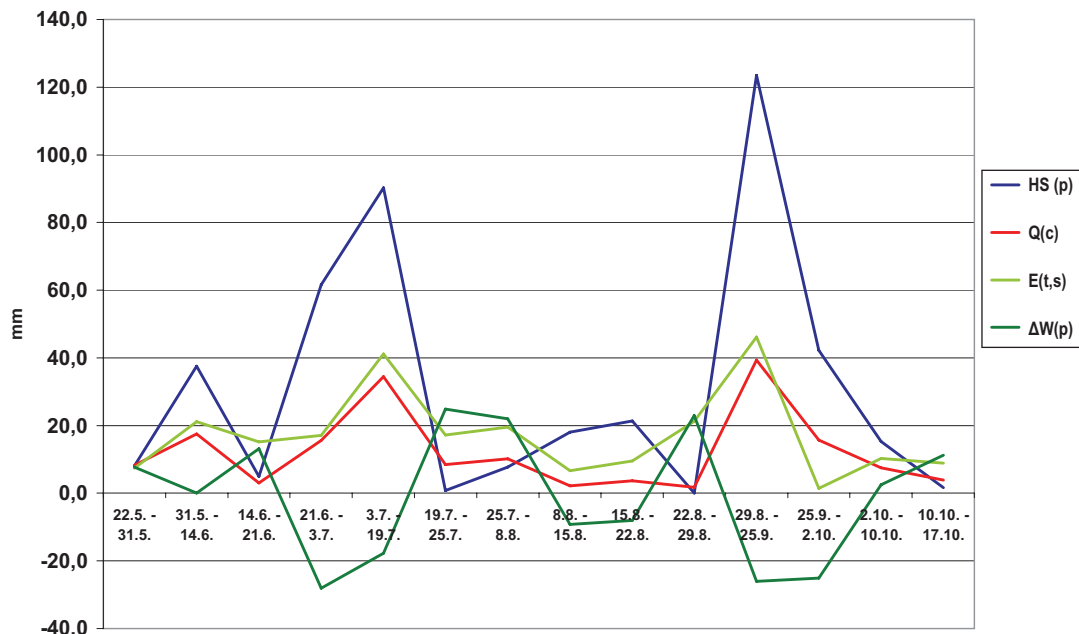
Q(gr) průsak do geologického podloží/percolation to bedrock

$\Delta W(p)$  změna zásoby vody v povodí [ $\Delta W(k) + \Delta W(g)$ ]/change of water storage in watershed

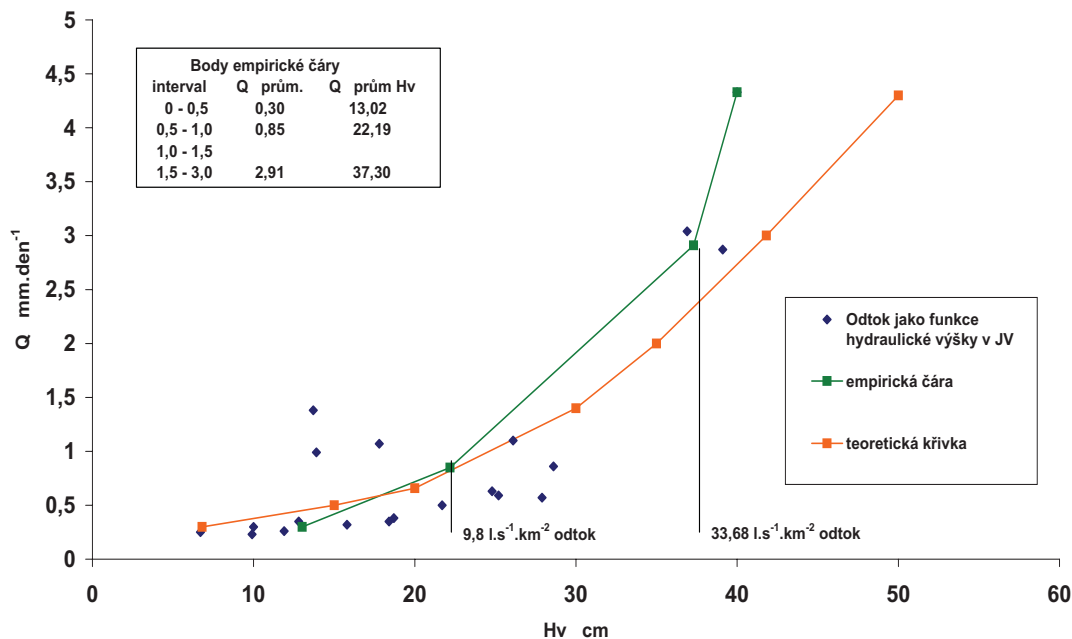
$\Delta W(k)$  změna zásoby vody kapilární/change of capillary water storage

$\Delta W(g)$  změna zásoby vody gravitační/change of gravitation water storage

$\varepsilon$  odchylka modelu a měření/deviation of model and measurement



**Obr. 1.**  
Hydrologická bilance EOP U Dvou louček ve vegetačním období 2007  
Hydrological balance EOP U Dvou louček in growing season 2007



**Obr. 2.**  
Odtok jako funkce hydraulické výšky v jehlových vrtech ve vegetačním období 2007  
Discharge as function of hydraulic head in auger holes in growing season 2007

Konečně obrázek 3 výstižně demonstruje trendy vyjádřený vztah  $Q(c)$  a  $H_v$  v denních hodnotách. Tato závislost byla jasně prokázána statistickým t testem korelace  $Q(c)$  a  $H_v$ , který ukázal mezi oběma veličinami vztah s pravděpodobností větší než 0,999 (tab. 2).

Závislost průměrných hodnot  $Q(c)$  a  $HS(p)$  – průměry za intervaly měření – v obrázku 4 výstižně charakterizuje růst odtoků s růstem srážek. Korelační analýza prokázala statisticky významný vztah ( $P > 0,999$ ), tabulka 3.

**Tab. 2.**

Vztah odtoků a hydraulické výšky na povodí U Dvou louček v roce 2007 (denní hodnoty)  
Relationship between discharge and hydraulic head in watershed U Dvou louček in 2007 (daily values)

| $y_i$       | 0,0    | 0,5    | 1,0    | 1,5  | 2,0  | 2,5     | 3,0     | 3,5     | 4,0     | $t_j$  | $t_j x_j$ | $x_j^2$   | $t_j x_j^2$ |
|-------------|--------|--------|--------|------|------|---------|---------|---------|---------|--------|-----------|-----------|-------------|
|             | 0,25   | 0,75   | 1,25   | 1,75 | 2,25 | 2,75    | 3,25    | 3,75    | 4,25    |        |           |           |             |
| $x_i$       | 0,99   | 0,99   | 1,49   | 1,99 | 2,49 | 2,99    | 3,49    | 3,99    | 4,49    |        |           |           |             |
| 5           |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 7,5         |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 9,9         | 3,750  |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 10          |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 12,5        |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 14,9        | 9,375  | 15,625 |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 15          |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 17,5        |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 19,9        | 13,125 |        | 21,875 |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 20          |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 22,5        |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 24,9        |        | 33,750 |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 25          |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 27,5        |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 29,9        |        | 61,875 | 34,375 |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 30          |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 32,5        |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 34,9        |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 35          |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 37,5        |        |        |        |      |      |         |         |         |         |        |           |           |             |
| 39,9        |        |        |        |      |      | 206,25  | 121,875 | 159,375 | 4       | 150,0  | 1.406,25  | 5.625,00  |             |
| $f_i$       | 8      | 6      | 3      |      |      | 2       | 1       | 1       | 21      | 452,50 | –         | 11.781,25 |             |
| $f_i y_i$   | 2,0    | 4,5    | 3,75   |      |      | 5,50    | 3,25    | 4,25    | 23,25   |        |           |           |             |
| $y_i^2$     | 0,0625 | 0,5625 | 1,5625 |      |      | 7,5625  | 10,5625 | 18,0625 | –       |        |           |           |             |
| $f_i y_i^2$ | 0,500  | 3,375  | 4,6875 |      |      | 15,1250 | 10,5625 | 18,0625 | 52,3125 |        |           |           |             |

 $\sum \sum = 690,625$  $\sigma_y = 1,107$  $\sigma_x = 21,548$  $\delta_y^2 = 1,266$  $\delta_y = 1,125$  $\delta_x^2 = 96,696$  $y_i =$  odtok $x_i =$  hydraulická výška $\delta_x = 9,833$ 

$$r_{x,y} = \frac{690,625 - 21 \cdot 1,107 \cdot 21,548}{21 \cdot 1,125 \cdot 9,833} = 0,816$$

$$t = \frac{0,816}{0,578} \cdot 4,359 = 6,154$$

 $P(t) < 0,001$ 

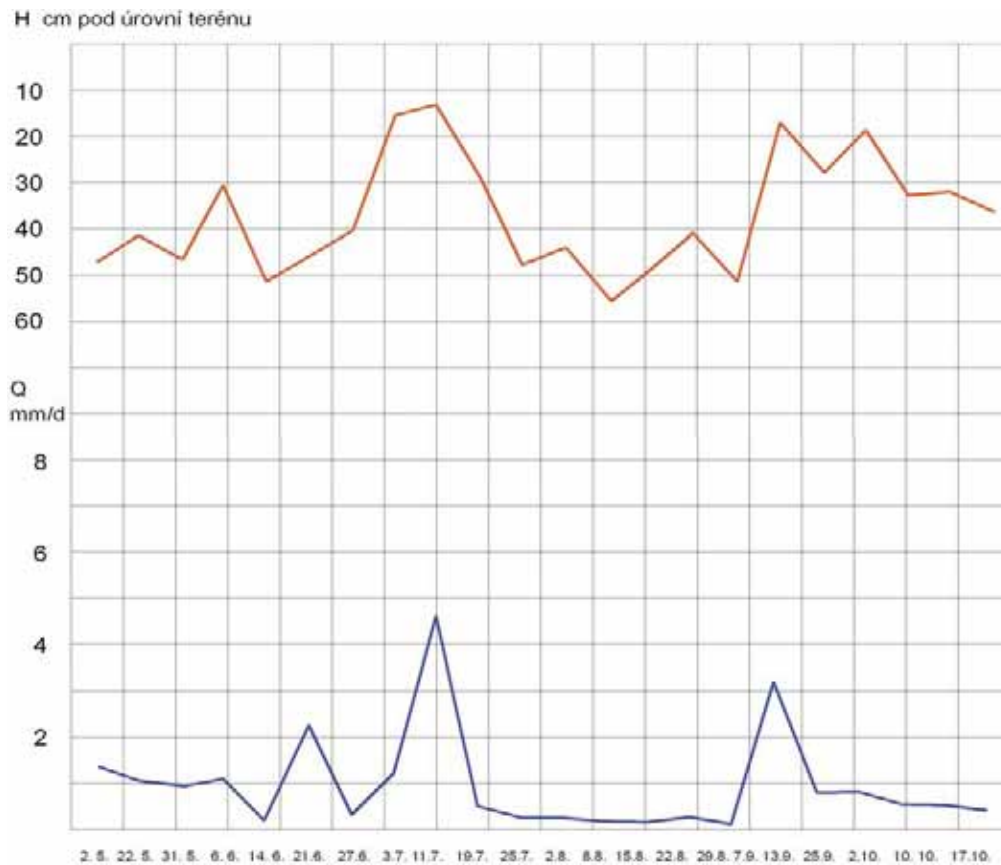
S pravděpodobností větší než 0,999 je závislost potvrzena.

Dynamiku gravitační vody v půdě dobře vystihuje vztah přírůstků – úbytku hydraulické výšky v měrném intervalu ( $\Delta H_v$ ) a lineari-zované hodnoty HS(p) [ $\sigma$ HS(p)] (obr. 5, tab. 4). Závislost je s pravděpodobností 0,992 potvrzena, ale graf naznačuje tři případy, kdy při vyšších hodnotách HS(p) došlo k úbytku vody v JV. Rovněž rozptýl hodnot  $\Delta H_v$  při nízkých hodnotách HS(p) ukazuje na vliv vlhkosti půdy na odtok gravitační vody z půdy (obdobně HORTON, HAWKINS 1965, ŠANDA et al. 2006).

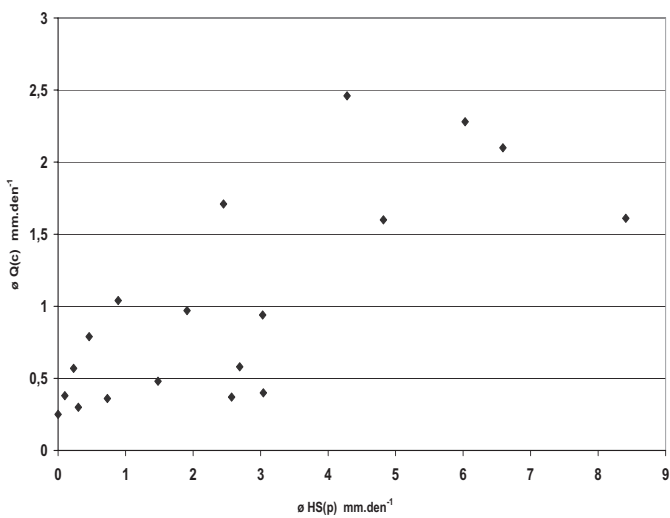
Vztah evapotranspirace a podkorunových srážek (tab. 5, obr. 6) je vysoce průkazný. S pravděpodobností 0,994 je závislost potvrzena. Obrázek 6 ukazuje proměnlivost tohoto vztahu. Po vysokých srážkách nemusí být maximum evapotranspirace, a naopak při nulové srážce je úhrn evapotranspirace (21,2 mm za 7 dní = 3,0 mm.den<sup>-1</sup>) vysoký. To ukazuje, že vysoká srážka může odtéct a naopak v období sucha je evapotranspirace dotována ze zásob půdní vody (obr. 1) (obdobně TESAŘ et al. 1992).

Protože jistě souvisí celkový odtok Q(c) v závěrečném profilu EOP a rovněž evapotranspirace s podkorunovými srážkami, platí zprostředkovaně i vztah mezi celkovým odtokem a evapotranspirací.

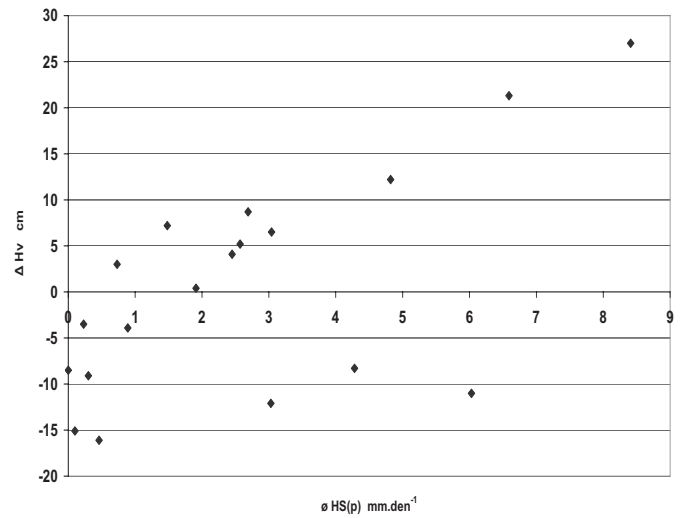
Cenné informace o hydrodynamických procesech v lesní půdě poskytují vlhkosti půdy (celkem 2 160 měření). Maximální vodní kapacita (MKVK podle NOVÁKA 1954) je v 60cm půdním profilu 248,2 mm (87 % PVK), plná vodní kapacita (PVK) 284,5 mm. Retenční kapacita dynamická [RK(d)] je potom 36,3 mm. Bod snížené dostupnosti (BSD), při kterém přestává kapilární pohyb vody v půdě, je 151,5 mm, tj. zásoba vody v půdě při sacím tlaku pF = 2,8 (60 % PVK). Retenční kapacita půdy statická [RK(st)] je 248,2 – 151,5 = 96,7 mm. Retenční kapacita celková [RK(c)] 60 cm hlubokého profilu lesní půdy v EOP U Dvou louček je 36,3 + 96,7 mm = 133,0 mm (46,7 % PVK).



**Obr. 3.**  
Vztah mezi polohou výšky hladiny podzemní vody a odtoků ve vegetačním období 2007  
Relationship between depth of groundwater table and discharge in growing season 2007



**Obr. 4.**  
Průměrné denní průtoky jako funkce podkorunových srážek ve vegetačním období 2007  
Mean daily discharge as function of throughfall in growing season 2007



**Obr. 5.**  
Změny (přírůstky, úbytky) hydraulické výšky v jehlových vrtech jako funkce podkorunových srážek ve vegetačním období 2007  
Changes (increase, decrease) of hydraulic head in auger holes as function of throughfall in growing season 2007

**Tab. 3.**

Vztah průměrných odtoků ( $\bar{Q}$ ) jako funkce průměrných srážek za interval měření ( $\bar{HSp}$ ) na povodí U Dvou louček v roce 2007 (linearizace)  
Relationship of mean discharge ( $\bar{Q}$ ) as function of mean precipitation per measuring interval ( $\bar{HSp}$ ) in watershed U Dvou louček in 2007 (linearization)

| $y_j$       | 0     | 1,0   | 2,0   | 3,0   | 4,0    | 5,0  | 6,0   | 7,0  | 8,0    |        |           |         |             |
|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------|------|--------|--------|-----------|---------|-------------|
|             | 0,5   | 1,5   | 2,5   | 3,5   | 4,5    | 5,5  | 6,5   | 7,5  | 8,5    | $t_j$  | $t_j x_j$ | $x_j^2$ | $t_j x_j^2$ |
| $x_i$       | 0,99  | 1,99  | 2,99  | 3,99  | 4,99   | 5,99 | 6,99  | 7,99 | 8,99   |        |           |         |             |
| 0           |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| 0,25        | 0,500 | 0,375 | 0,625 | 0,875 |        |      |       |      |        | 7      | 1,75      | 0,0625  | 0,4375      |
| 0,49        |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| 0,5         |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| 0,75        | 0,75  | 1,125 | 1,875 | 2,625 |        |      |       |      |        | 5      | 3,75      | 0,5625  | 2,8125      |
| 0,99        |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| 1           |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| 1,25        | 0,625 |       |       |       |        |      |       |      |        | 1      | 1,25      | 1,5625  | 1,5625      |
| 1,49        |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| 1,5         |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| 1,75        |       |       | 4,375 |       | 7,875  |      |       |      | 14,875 | 3      | 5,25      | 3,0625  | 9,1875      |
| 1,99        |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| 2           |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| 8,25        |       |       |       |       | 10,125 |      | 29,25 |      |        | 3      | 6,75      | 5,0625  | 15,1875     |
| 2,49        |       |       |       |       |        |      |       |      |        |        |           |         |             |
| $f_i$       | 7     | 2     | 3     | 2     | 2      |      | 2     |      | 1      | 19     | 18,75     | -       | 29,1875     |
| $f_i y_i$   | 3,5   | 3,0   | 7,5   | 7,0   | 9,0    | -    | 13,0  | -    | 8,5    | 51,50  |           |         |             |
| $y_i^2$     | 0,25  | 2,25  | 6,25  | 12,25 | 20,25  |      | 42,25 |      | 72,25  | -      |           |         |             |
| $f_i y_i^2$ | 1,75  | 4,50  | 18,75 | 24,50 | 40,50  | -    | 84,50 | -    | 72,25  | 246,75 |           |         |             |

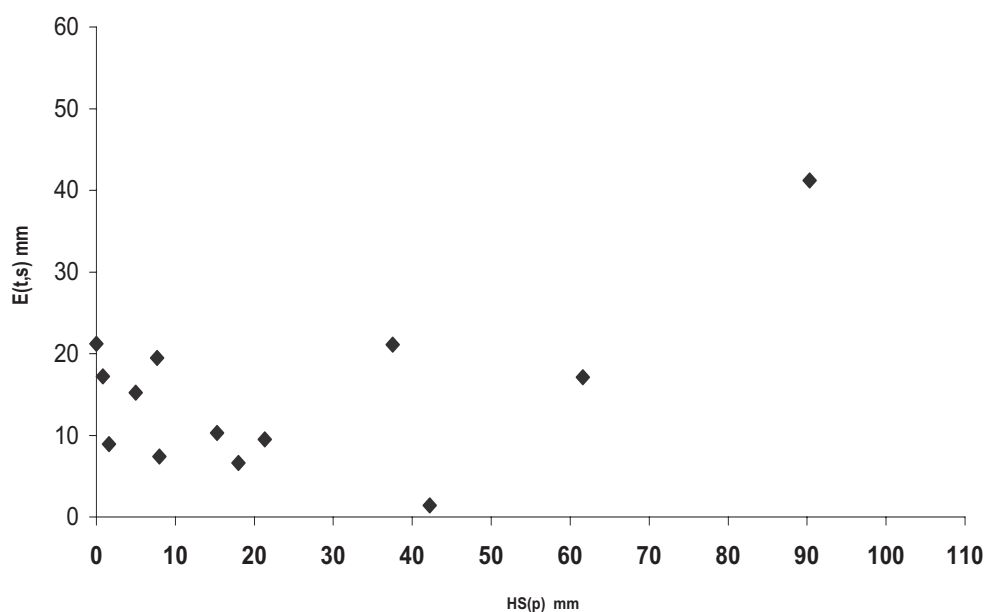
 $\Sigma \Sigma = 75,875$  $\sigma_y = 2,710$  $\sigma_x = 0,987$  $\delta_y = 2,375$  $\delta_x = 0,750$  $\delta_y^2 = 5,643$  $\delta_x^2 = 0,562$  $y = \bar{HSp}$  $x = \bar{Q}$ 

$$r_{x,y} = \frac{75,875 - 19 \cdot 2,710 \cdot 0,987}{19 \cdot 2,375 \cdot 0,750} = \frac{25,054}{33,844} = 0,740$$

$$t = \frac{0,740}{0,672} \cdot 4,123 = 4,540$$

 $P(t) < 0,001$ 

S pravděpodobností větší než 0,999 je závislost potvrzena.

**Obr. 6.**

Vztah evapotranspirace a podkorunových srážek ve vegetačním období 2007  
Relationship between evapotranspiration and throughfall in growing season 2007

**Tab. 4.**

Vztah rozdílů hydraulické výšky  $\Delta H_v$  jako funkce průměrných srážek za interval měření ( $\bar{\sigma}$  HSp) na povodí U Dvou louček v roce 2007  
Relationship of hydraulic head  $\Delta H_v$  differences as function of mean precipitation per measuring interval ( $\bar{\sigma}$  HSp) in watershed U Dvou louček in 2007

| $y_j$       | 0     | 1,0    | 2,0    | 3,0    | 4,0    | 5,0  | 6,0    | 7,0  | 8,0    | 9,0   | $t_j$  | $t_j x_j$ | $x_j^2$ | $t_j x_j^2$ |
|-------------|-------|--------|--------|--------|--------|------|--------|------|--------|-------|--------|-----------|---------|-------------|
| $x_i$       | 0,5   | 1,5    | 2,5    | 3,5    | 4,5    | 5,5  | 6,5    | 7,5  | 8,5    | 9,5   |        |           |         |             |
| -15         | 0,99  | 1,99   | 2,99   | 3,99   | 4,99   | 5,99 | 6,99   | 7,99 | 8,99   | 10,00 |        |           |         |             |
| -17,5       |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 19,99       | 17,5  |        |        |        |        |      |        |      |        |       | 2      | -35,00    | 306,25  |             |
| -10         |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| -12,5       |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 14,99       |       |        |        | -43,75 |        |      | -81,25 |      |        |       | 2      | -25,00    | 156,25  |             |
| -5          |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| -7,5        |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 9,99        | -7,5  |        |        |        | -33,75 |      |        |      |        |       | 3      | -22,50    | 56,25   |             |
| -0,01       |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| -2,5        |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 4,99        | -2,50 |        |        |        |        |      |        |      |        |       | 2      | -5,00     | 6,25    |             |
| 0           |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| +2,5        |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 4,99        | +1,25 | +3,75  | +6,25  |        |        |      |        |      |        |       | 3      | +7,50     | 6,25    |             |
| 5           |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| +7,5        |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 9,99        |       | +11,25 | +37,50 | +26,25 |        |      |        |      |        |       | 4      | 30,0      | 56,25   |             |
| 10          |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 12,5        |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 14,99       |       |        |        |        | +56,25 |      |        |      |        |       | 1      | +12,50    | 156,25  |             |
| 15          |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 17,5        |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 19,99       |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 20          |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 22,5        |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 24,99       |       |        |        |        |        |      | 146,25 |      |        |       | 1      | 22,5      | 506,25  | 506,25      |
| 25          |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 27,5        |       |        |        |        |        |      |        |      |        |       |        |           |         |             |
| 29,99       |       |        |        |        |        |      |        |      | 233,75 |       | 1      | 27,5      | 756,25  | 756,25      |
| $f_i$       | 7     | 2      | 3      | 2      | 2      |      | 2      |      | 1      |       | 19     |           |         |             |
| $f_i y_i$   | 3,5   | 3,0    | 7,5    | 7,0    | 9,0    |      | 13,0   |      | 8,5    |       | 51,5   | 12,50     | -       | 2 768,75    |
| $y_i^2$     | 0,25  | 2,25   | 6,25   | 12,25  | 20,25  |      | 42,25  |      | 72,25  |       | -      |           |         |             |
| $f_i y_i^2$ | 7,25  | 4,50   | 18,75  | 24,50  | 40,50  |      | 84,50  |      | 72,25  |       | 252,25 |           |         |             |

 $\sum \Sigma = 336,25$  $\sigma_y = 2,710$     $\sigma_x = 0,5679$     $\delta_y^2 = 5,932$     $\delta_y = 2,436$     $\delta_x^2 = 145,2908$     $\delta_x = 12,0537$ 

$$r_{x,y} = \frac{336,25 - 19 \cdot 2,710 \cdot 0,6579}{19 \cdot 2,436 \cdot 12,0537} = \frac{302,375}{557,893} = 0,542$$

 $P(t) = 0,008$ 

S pravděpodobností 0,992 je závislost potvrzena

 $x = \Delta H_v$     $y = HSp$ 

$$t = \frac{0,542}{0,706} \cdot 4,1231 = 3,165$$

Maximální naměřená retence skutečná  $R_{sk}(c)$  je 74,6 mm [56 %  $RK(c)$ ] a minimální naměřená  $R_{sk}(c)$  je 5,4 mm [4 %  $RK(c)$ ]. Celkový dynamický obsah vody v lesní půdě se pohybuje v mezích 10 – 36 % PVK. Lesní půda EOP U Dvou louček dokáže zachytit až 75 mm ovzdušných srážek při počáteční dynamické vlhkosti půdy 11,2 % MKVK a 21 %  $RK(c)$ .

Pozornost si zaslouží změna zásoby vody v povodí, která představuje v podstatě souhrn změn zásob vody gravitační a kapilární v povodí. Jsou to veličiny měřené a ukazují na dynamiku půdní

vody, která se pohybuje v mezích -28 až +25 mm, tj. v oboru 53 mm celkových změn. Je to v rozsahu -21 až +19 % oboru potenciální dynamické zásoby vody v půdě. Za vegetační periodu ubylo z lesní půdy 9,7 mm půdní vody, tj. 7 % potenciální retenční kapacity celkové.

Sumární odtok do geologického podloží EOP ve výši 25,9 mm za vegetační periodu – průměrně 0,18 mm.den<sup>-1</sup> – odpovídá průměrné hodnotě 0,22 mm.den<sup>-1</sup> dosahované v horním povodí Divoké Orlice (HORSKÝ et al. 1970). Je to 2,1 l.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>, z plochy EOP 0,7 l.s<sup>-1</sup>.

Tab. 5.

Vztah podkorunových srážek (HSp) a evapotranspirace (E(t.s)) na povodí U Dvou louček v roce 2007  
Relationship between throughfall (HSp) and evapotranspiration (E(t.s)) in watershed U Dvou louček in 2007

| y           | 0   | 10,1 | 20,1 | 30,1  | 40,1  | 50,1 | 60,1  | 70,1 | 80,1 | 90,1  | 100,1 | 110,1 | 120,1  |        |           |         |             |
|-------------|-----|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|--------|--------|-----------|---------|-------------|
| x           | 5   | 15   | 25   | 35    | 45    | 55   | 65    | 75   | 85   | 95    | 105   | 115   | 125    | $f_j$  | $f_j x_j$ | $x_j^2$ | $f_j x_j^2$ |
| 0           | 10  | 20   | 30   | 40    | 50    | 60   | 70    | 80   | 90   | 100   | 110   | 120   | 130    |        |           |         |             |
| 5           | 50  | 75   | 125  |       | 225   |      |       |      |      |       |       |       |        | 5      | 25        | 25      | 125         |
| 10,1        |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 15          | 150 | 225  |      |       |       |      | 975   |      |      |       |       |       |        | 2      | 75        | 225     | 1 125       |
| 20          |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 20,1        |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 25          | 250 |      |      | 875   |       |      |       |      |      |       |       |       |        | -      | 50        | 625     | 1 250       |
| 30          |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 30,1        |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 35          |     | 525  |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        | 2      | -         |         |             |
| 40          |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 40,1        |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 45          |     |      |      |       |       |      |       |      |      | 4 275 |       |       | 5.625  |        | 90        | 2 025   | 4 050       |
| 50          |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 50,1        |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 55          |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| 60          |     |      |      |       |       |      |       |      |      |       |       |       |        |        |           |         |             |
| $f_i$       | 6   | 2    | 1    | 1     | 1     |      | 1     |      |      | 1     |       |       | 1      | 14     | 240       | -       | 6.550       |
| $f_i y_i$   | 30  | 30   | 25   | 35    | 45    |      | 65    |      |      | 95    |       |       | 125    | 450    |           |         |             |
| $y_i^2$     | 25  | 225  | 625  | 1 225 | 2 025 |      | 4 225 |      |      | 9 025 |       |       | 15.625 | -      |           |         |             |
| $f_i y_i^2$ | 150 | 450  | 625  | 1 225 | 2 025 |      | 4 225 |      |      | 9 025 |       |       | 15.625 | 33.350 |           |         |             |

 $\Sigma \Sigma = 12.800$  $\sigma_y = 32,14$  $\sigma_x = 17,14$  $\delta_y = 36,73$  $\delta_x = 13,19$ 

y = HSp

x = Et

$$r_{x,y} = \frac{12 \cdot 800 - 7 \cdot 712,31}{6 \cdot 782,56} = 0,750$$

$$t = \frac{0,750}{0,661} \cdot 3,464 = 3,930$$

P(t) = 0,006

S pravděpodobností 0,994 je závislost potvrzena

## ZÁVĚRY

Zvolený způsob analýzy srážko-odtokových vztahů na EOP U Dvou louček hydrologickou bilancí otvírá detailní pohled do tohoto procesu. Správnost postupů potvrzuje analýza výsledků HB naměřenými veličinami v závěrečném profilu povodí.

Vztahy celkového odtoku Q(c) v závěrečném profilu EOP a hydraulických výšek Hv v JV je možné použít k separaci odtoku základního, podpovrchového a povrchového (KNĚŽEK et al. 1982). Odtok základní odpovídá  $Q(c) \leq 3,2 \text{ l.s}^{-1}$  (z plochy EOP), pro odtok podpovrchový platí  $Q(c) \leq 11,0 \text{ l.s}^{-1}$ . Hranice odtoku základního se blíží průměrnému průtoku ve vegetační periodě  $\sigma Q(c) = 3,7 \text{ l.s}^{-1}$ . Závislost  $Q(c) \rightarrow H_v$  platí jistě.

Půdní prostředí lesní půdy transformuje infiltrované srážky jako podzemní nádrž. Srážka v určitý den vyvolá odtok v závěrečném profilu povodí s určitým zpožděním. Linearizace hodnot Q(c) a HS(p) tento jev eliminuje. V době sucha dotuje tato nádrž potřebnou vodou na evapotranspiraci.

Závislost přírůstku – úbytku hydraulické výšky v JV, tj. úbytku a přírůstku gravitační vody v půdě a průměru podkorunové srážky v intervalech měření, je jistá. Rozptyl hodnot  $-\Delta H_v$  však ukazuje nezanedbatelný vliv vlhkosti půdy na odtok gravitační vody z půdy.

Metoda hydrologické bilance pro tenzometrické pole umožnila kvantifikaci režimu evapotranspirace. Ta je vysoce závislá na podkorunových srážkách a obsahu vláhy v půdě. Vypočtené hodnoty E(t.s) se střední hodnotou  $1,65 \text{ mm.den}^{-1}$  v období 22. 5. – 17. 10. 2007 s rozptylem  $0,2 - 3,0 \text{ mm.den}^{-1}$  odpovídají obvyklým hodnotám dosahovaným ve srovnatelných podmínkách. Podzemní nádrž půdní vody účinně reguluje vyrovnanost evapotranspirace. V době sucha ji vodou dotuje, přebytek vody jednak akumuluje, jednak odvádí.

Cenné informace o hydrodynamických procesech v lesní půdě poskytují naměřené vlhkosti půdy. Kvalitativní i kvantitativní rozbor vlhkostního režimu půd pomocí hydrolimitů vedl k závěrům, že

- lesní porosty EOP U Dvou louček netrpí suchem;
- maximální naměřená retence ovzdušných podkorunových srážek 75 mm pro profil 60 cm hluboký je vysoká a vysvětluje, proč je v lesním povodí jen minimální povrchový odtok;
- lesní půda na EOP funguje jako podzemní nádrž, která dokáže vyrovnávat maxima a minima ovzdušných srážek a má potenciální retenční kapacitu  $1 330 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ;
- použitý model hydrologické bilance výstižně zobrazuje srážko-odtokový proces v povodí U Dvou louček a vede k závěru o správnosti zvoleného postupu;
- smrkové porosty v povodí U Dvou louček spoluvytvářejí dynamický srážko-odtokový proces. Stadium imisní holiny nezpůsobilo jeho změnu.



- EOP U Dvou louček dotuje hydrogeologické podloží průsakem  $0,7 \text{ l.s}^{-1}$ , tj.  $2,1 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ . Je to příspěvek EOP do zásob podzemních vod v podhůří Orlických hor a pohled na hydrogeologii rul a svorů v podloží vrcholů Orlických hor.

#### Poděkování:

Příspěvek vznikl s podporou výzkumného záměru MZe ČR č. MZE0002070203, výzkumného projektu NAZV č. QH92073.

## LITERATURA

- ČERNOHOUS V. 2006a. Vliv obnovy hydrografické sítě poškozené při imisních těžbách na odtokový proces. Doktorská dizertační práce. Praha, ČZU FLD: 101 s., 14 příloh
- ČERNOHOUS, V. 2006b. Vliv hydromelioračního zásahu na odtok vody z lesního povodí. In: Jurásek J. et al. (eds.): Sborník referátů Stabilizace funkcí lesa v biotopech narušených antropogenní činností. Opočno 5. - 6. 9. 2006. Jíloviště-Strnady, VÚLHM: 545-557. ISBN 80-86461-71-8
- ČERNOHOUS V., ŠACH F. 2007. Vliv obnovy hydrografické sítě poškozené při imisních těžbách na odtokový proces. [Renewal of the hydrographical network damaged by pollution-induced felling and its effect on the runoff process.] In: Vančura K. et al.: Les a voda v srdci Evropy – Forest and water in the heart of Europe. Praha, MZe ČR; Brandýs nad Labem, ÚHÚL: 185-193. ISBN 978-80-7084-634-6
- HOPMANS J. W. 1988. Treatment of spatially variable groundwater levels in one-dimensional stochastic unsaturated water flow modelling. *Agricultural Water Management*, 15/1: 19-36.
- HORSKÝ L. et al. 1970. Hydrologické poměry ČSSR. 3. díl. Praha, Hydrometeorologický ústav: 303 s. + příl.
- HORTON J. H., HAWKINS R. H. 1965. Flow path of rain from the soil surface to the water table. *Soil Science*, 100: 377-383.
- KANTOR P. 1995. Vodní režim smrkových a bukových porostů jako podklad pro návrh druhové skladby vodohospodářsky významných středohorských lesů. Habilitační práce. Brno, MZLU, Lesnická a dřevařská fakulta: 332 s., příl. 32 tab.
- KANTOR P. et al. 2006 a 2007. Srážko-odtokové poměry horských lesů a jejich možnosti při zmírňování extrémních situací – povodní a sucha. Redakčně upravená roční zpráva za projekt NAZV 1G57016. Brno, MZLU Brno, Jíloviště-Strnady, VÚLHM: 54 s. a 62 s.
- KNĚŽEK M. et al. 1982. Odtok podzemní vody na území Československa. Praha, ČHÚ ve SNTL: 52 s., 9 příloh
- MRÁZ K. et al. 1990. Vodní režim půdy, vztah k přírůstu dřevní hmoty a odtok vody v porostech různých dřevin. Závěrečná zpráva. Strnady, VÚLHM: 50 s. + příl.
- MYSLIVEC V. 1957. Statistické metody zemědělského a lesnického výzkumnictví. Praha, ČSAZV ve Státní zemědělské nakladatelství: 555 s.
- NOVÁK V. 1954. Voda v půdě – vodní režim půdní. In: Klika J., Novák V., Gregor A.: Praktikum fytoecologie, ekologie, klimatologie a půdoznalství. Praha, Nakladatelství ČSAV: 440-484.
- ŠANDA M., HRNČÍŘ M., NOVÁK L., CÍSLEROVÁ M. 2006. Vliv půdního profilu na srážkoodtokový proces. *Journal of Hydrology and Hydro-mechanics*, 54: 183-191.
- ŠANDA M., KULASOVÁ A., CÍSLEROVÁ M. 2009. Hydrological processes in the subsurface investigated by water isotopes and silica. *Soil and Water Research*, 4 (Special Issue 2): S83-S92.
- ŠEDA S. 2003. Hydrogeologický průzkum na lokalitě Říčky v Orlických horách – U Dvou louček. Závěrečná zpráva. Ústí nad Orlicí, Orlická hydrogeologická společnost, s. r. o.: 12 s., 20 příloh
- ŠVIHLA V., ČERNOHOUS V., KULHAVÝ Z., ŠACH F. 2005. Příspěvek k hydrologické analýze povodí U Dvou louček v Orlických horách. In: *Soil and Water* 4. Praha, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy: 95-105.
- ŠVIHLA V., ČERNOHOUS V., ŠACH F. 2010. Hydrologická bilance humusového podzolu v lesním povodí v Orlických horách. *Zprávy lesnického výzkumu*, 55: 133-140.
- TESAŘ M., ŠÍR M., KUBÍK F., PRAŽÁK J., STRNAD E. 1992. Transpirace lesního porostu ve vegetačním období při dostatku vody v půdě. *Lesnictví-Forestry*, 38: 877-888.

## HYDROLOGICAL BALANCE OF ELEMENTARY RUNOFF AREA WITHIN FOREST WATERSHED IN THE ORLICKÉ HORY MTS.

### SUMMARY

The study aims to reveal hydrodynamic processes within small mountain watershed (i. e. elementary runoff area, EOP); forest stands cover 70% of its area. Authors choose a hydrological balance method which is based on continuous measurement of discharge from watershed, regimen measurement of tensiometer pressures of soil water at 36 locations at four depths and hydraulic heads at 52 piezometers, and daily precipitation at 4 rain gauges. Regimen measurement was conducted in 6 – 10-day interval between the 22nd May and 17th October in the course of growing season 2007, i. e. 17 times during 148 days. Calculations of evapotranspiration were based on hydrological balance of square plot of one-acre area where hydraulic head was measured. Quantities needed for calculations of hydrodynamics in soil profile were determined in laboratory based on field surveys and collection of soil samples.

The hydrological balance allowed us to quantify the evapotranspiration –  $E(t,s)$  regime. The evapotranspiration is highly dependent on throughfall and soil moisture. Calculated  $E(t,s)$  values having mean  $1.65 \text{ mm.day}^{-1}$  and ranging  $0.2 - 3.0 \text{ mm.day}^{-1}$  during the 22nd May – 17th October 2007 correspond to usual values reported from comparable conditions.

Forest soil transforms infiltrated precipitation like an underground reservoir. Discharge from watershed related to precipitation in given day is somewhat delayed. The reservoir accumulates a surplus of water. On the other hand, the soil supplies plants with water needed for evapotranspiration during periods of drought.

Relationships between total discharge  $Q(c)$  from EOP and hydraulic heads ( $H_v$ ) in auger holes allow us to separate underground, sub-surface and surface flows. The underground flow is  $Q(c) \leq 3.2 \text{ l.s}^{-1}$  (from EOP area), the subsurface flow is  $Q(c) \leq 11.0 \text{ l.s}^{-1}$ . The limit value for underground flow corresponds to mean discharge ( $\bar{Q}(c) = 3.7 \text{ l.s}^{-1}$ ) during growing season.

The water in EOP U Dvou louček feeds hydrogeological structure – bedrocks (gneiss, mica schist) by percolating  $0.7 \text{ l.s}^{-1}$ , i. e.  $2.1 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ . In this way, water of EOP origin recharges groundwater in the Orlické hory Mts. Piedmont.

Recenzováno

---

#### ADRESA AUTORA/CORRESPONDING AUTHOR:

Doc. Ing. Vladimír Švihla, Dr.Sc.  
Fügnerova 809, 266 01 Beroun, Česká republika  
tel.: 311 622 578; e-mail: svihla.vladimir@centrum.cz