POSÚDENIA VPLYVU LESA NA ODTOKOVÉ PROCESY V POVODIACH

Marcela Bulantová

Anotácia: Predmetom tohto príspevku je zhrnutie poznatkov o vplyve typu vegetácie s dôrazom na les, na hydrologickú bilanciu povodia a zhrnutie metód modelovania odtoku z povodia hydrologickými modelmi. Článok popisuje aj posúdenie vplyvu citlivosti parametrov a miery, akou sa tieto parametre podieľajú na modelovaných výsledkoch odtoku.
Kľúčové slová: les, hydrologická bilancia, zrážkovo–odtokové modelovanie, parametre využívania krajiny

ESTIMATION OF EFFECT OF FOREST ON RUNOFF PROCESSES IN BASINS

Annotation: The purpose of this paper is a summary of knowledge on the effects of vegetation type, with an emphasis on the forest, on the basin water balance and a summary of methods for modelling runoff from catchment using a hydrological model. The article describes of hydrological model the sensitivity analysis of model parameters and assessment of their impact on simulated runoff.
Key words: forest, hydrological balance, rainfall-runoff modelling, catchment model parameters

1. Úvod

V posledných rokoch (a zvlášť po veternej kalamite v Tatrách v roku 2004) sa problematike posúdenia vplyvu lesa na odtokové procesy v povodí venuje zvýšená pozornosť.

Les je výnimočné spoločenstvo, ktoré svojimi nenahraditeľnými prírodnými funkciami predstavuje základnú podmienku existencie a vývoja organizmov, vrátane človeka. Les a lesné organizmy sú priamo, ale aj nepriamo ovplyvnené fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami pôdotvornej horniny, orientáciou a sklonom svahov, hĺbkou, výživnosťou a vlhkosťou pôdy i vlastnosťami prízemnej vrstvy ovzdušia.

„Práca“ lesa pri zlepšení vlahových podmienok krajiny v suchých obdobiach začína v zime, keď si les vytvára väčšie zásoby vody v snehu oproti vyrúbanej ploche. Je to dané menším vplyvom teploty vzduchu na topenie snehu, vylúčením odviatia snehu i pomalšie prebiehajúcou premenou snehu na iné skupenstvá. Snehová a neskôr i dažďová voda doplňuje zásoby podzemných vôd, a vďaka tomu les zmenšuje povrchový odtok a premieňa ho na podpovrchový odtok. Tieto zásoby pomáhajú udržať primerané prietoky vody v tokoch v období sucha. Les navyše zachytáva hmly, ktoré sa zrážajú v korunách stromov a týmito „horizontálnymi” zrážkami dopĺňa klasické zrážky a umožňuje krajine lepšie prežiť suché obdobia. Lesnatosť v jednotlivých regiónoch Slovenska je veľmi rozdielna. Najnižšiu lesnatosť majú nížiny a urbanisticky intenzívne využívané územia ako napr. Podunajská a Východoslovenská nížina, naproti tomu vysokou lesnatosťou sa vyznačujú územia napr. Vihorlatských vrchov, Nízke Tatry, Spišsko–gemerský kras.

Les, dnes už často umelé spoločenstvo, je nevyhnutnou a nenahraditeľnou súčasťou krajiny. Rozsiahle povodne môžu vznikať pôsobením dlhotrvajúcich dažďov alebo prívalových zrážok v malých, ale aj v rozľahlých povodiach. Vo všetkých prípadoch je les v našich podmienkach tým najprirodzenejším prostriedkom na zadržanie vody v povodí.

Posúdenie vplyvu lesa na hydrologický cyklus je stále aktuálnou otázkou riešenou hydrológmi a vodohospodármi. Rozdielnosť stanovištných podmienok i samotných lesných

porastov a rôzne metódy skúmania podmienili to, že stále neexistuje jednoznačná odpoveď, akou mierou je lesný porast schopný zabrániť povrchovému odtoku alebo ho minimalizovať.

Článok je zložený z niekoľkých častí. V prvej je popísaná významná úloha, ktorú zohrávajú lesné porasty v kolobehu vody v prírode a zároveň poukazuje na výsledky niektorých (aj) protichodných štúdií, ktoré sa touto problematikou zaoberali, či už u nás alebo v zahraničí. Druhá časť je venovaná vodnej bilancii a funkciám lesných ekosystémov, v ktorej sú opísané procesy ako evapotranspirácia, výpar, transpirácia, infiltrácia. Ďalšia časť je zameraná na odtok vody z lesného porastu a priebehu vodnej bilancie u bukových a smrekových porastov. Posledná časť tohto článku je venovaná distribuovaným modelom a parametrom využívania krajiny, ktoré vstupujú do týchto modelov.

2. Vplyv lesa na hydrologický cyklus

Les pokrýva približne jednu tretinu zemského pevninového povrchu. Je všeobecne známe, že lesy majú významný vplyv na hydrologický cyklus. Napriek tomuto faktu, miera vplyvu lesov, ako aj efekty ľudskej aktivity v lesoch vyvolávajú veľa rôznych otázok a sporov. Debaty o tejto problematike trvajú už viac ako 100 rokov. Na scéne sa pravidelne objavujú problémy hydrológie lesa a rôzne teórie o vplyve lesa na odtokové procesy. Väčšina z nich sa sústreďuje na vplyv lesa na celkový odtok napr. Bosch a Hewlett (1982), Seuna (1999), Best et al. (2003), MacDonald a Stednick (2003), Andreassian (2004), Jones a Post (2004), Pekárová et al. (2005), Hegg et al. (2006). Niektoré štúdie spomínajú aj úlohu lesov pri erózii, intercepcii, evapotranspirácii, infiltrácii, hromadení snehu a kvality vody, ako napr. McCulloch a Robinson (1993), Buttle et al. (2000), Valtýni (2001), Minďáš a Čaboun (2002), MacDonald a Stednick (2003), Pike a Scherer (2003), Forsyth (2005), Raev (2005), Bíba et al. (2006), Kostka a Holko (2006, 2008).

Vplyv lesa na hydrologický cyklus poznali ľudia už veľmi dávno. Jedna z prvých porovnávajúcich štúdii vplyvu povrchu zeme na hydrologický cyklus bola uskutočnená na dvoch malých povodiach vo Švajčiarsku v roku 1900 (Engler, 1919). Odvtedy bolo uskutočnených veľa podobných experimentálnych štúdii. K autorom zaoberajúcimi sa touto problematikou patrí aj McCulloch a Robinson (1993), ktorí roztriedili štúdie povodí venované vplyvu lesa na kvantitatívne aspekty hydrologického cyklu na tri hlavné typy:

- ***Korelačné štúdie*** – založené na porovnaní odtokov medzi dvoma rozdielnymi povodiami s rôznou vegetáciou a inými charakteristikami. Nevýhodou tohto prístupu je, že neexistujú úplne identické povodia, ktoré by sa líšili iba vegetáciou.
- ***Štúdie jedného povodia*** – tvorba odtoku v povodí štatisticky súvisí so stavom vegetačného povrchu (odlesnenie, zalesnenie). V tomto type štúdie sa vyskytuje aj otázka vplyvu premenlivosti klímy na kolobeh vody v prírode.
- ***Experimentálne štúdie zdvojeného povodia*** – hydrologické podmienky sú pozorované v dvoch podobných povodiach počas kalibračnej periódy, pričom jedno z povodí podlieha zmene vo vegetačnom povrchu a druhé ostáva nezmenené. Porovnanie výsledkov z týchto dvoch povodí, a to pred a po vegetačnej zmene poskytuje možnosť identifikovať efekty premenlivosti odtokových procesov.

Ďalší autor, ktorý sa zaoberal podobnými štúdiami je Hibbert (1967), ktorý zovšeobecnil výsledky 37 celosvetových experimentov nasledovne:

- odlesňovanie spôsobuje zvýšenie odtoku,
- zalesňovanie naopak znižuje odtok,
- reakcie povodia sú premenlivé a často nepredvídateľné.

Bosh a Hewlett (1982) podporili prvé dva Hibbertove výsledky. Uviedli však, že reakcia povodia na vegetačné zmeny je predpovedateľná. Zvýšenie odtokov počas odlesnenia a zníženie odtokov počas zalesnenia bolo pozorované počas periódy niekoľkých rokov.

Štúdie o odlesňovaní hovoria o tom, že maximálny prejav zmeny v odtoku sa objaví už po niekoľkých rokoch, v priemere už po 2 až 3 rokoch (Kostka, Holko, 2006). Podľa Andreassiana (2004) majú lesy bezpochybne veľkú zásluhu na vodnej rovnováhe v povodí, ale majú väčšiu spotrebu vody ako iné typy vegetácie. Výsledkom odlesňovania je zvýšenie odtokov a naopak zalesňovanie vedie k ich zníženiu. Avšak, stále nie sú dostatočne známe dôsledky starnutia lesných porastov alebo zhusťovania lesnej pokrývky. Vertessy et al. (1998, 2001) zdokumentoval, že 48 % zmien v odtoku je prisudzovaných zmenám v transpirácii, 45 % prináleží zmenám intercepcie a 7 % je vďaka vyparovaniu z pôdy v lesoch. Podľa Jewitta (2005) existujú konflikty medzi vedou a verejným vnímaním využívania pôdy a lesov, a tým pádom aj na dopad na celkový hydrologický kolobeh vôd v prírode. Ako príklad uvádza dve navzájom odporujúce si štúdie. Prvá zdôrazňuje, že lesy vrátané pôdy a koreňov sa chovajú ako „špongia" nasávajúca vodu počas zrážok a uvoľňujúca ju v období sucha. Podľa tejto štúdie, by mali lesy prispieť k zlepšovaniu vodných zásob prostredníctvom dopĺňania podzemnej vody, mali by udržiavať základný odtok a zmierňovať záplavy. Tu treba spomenúť aj druhú štúdiu, ktorá hovorí o tom, že lesy nepôsobia ako „špongia", ale skôr ako „pumpa", a že korene neuvoľňujú vodu počas suchých období, ale ju z pôdy pohlcujú (Hamilton a King, 1983 Jewitt, 2005).

Otázky vodohospodárskeho významu lesných ekosystémov presahujú prakticky v celej strednej Európe rezortné medze a stávajú sa závažným celospoločenským problémom. Je to pochopiteľné, pretože lesy výrazne ovplyvňujú kolobeh vody v prírode.

Častá nejednotnosť pohľadov, protichodnosť názorov i značná odlišnosť interpretácie hypotéz a výsledkov pozorovania má celý rad príčin. K najčastejším príčinám patrí výnimočná zložitosť a rôznorodosť jednotlivých ekosystémov lesa, metodická náročnosť hydrologických experimentov a pomerne ťažké získavanie jednotlivých výsledkov (Kantor, 1990).

Konkrétny účinok lesných porastov v určitom povodí môže byť veľmi špecifický, nakoľko odtok je determinovaný komplexom faktorov, z ktorých viaceré môžu pôsobiť protichodne a komplikujú tak správanie sa celého zrážkovo-odtokového systému v danom povodí. Určujúcimi faktormi výsledného odtokového množstva a jeho časových zmien sú najmä:

- *geomorfologická charakteristika reliéfu* (sklonitosť, reliéfová členitosť a pod.),
- *hydrogeologická stavba povodia* (charakter priepustnosti hornín, prítomnosť zvodnených vrstiev a pod.),
- *meteorologické podmienky* (dĺžka trvania a intenzita zrážok, spolupôsobenie horizontálnych zrážok a pod.),
- *vodná bilancia lesných porastov* (intercepcia, zásoby pôdnej vody, stav lesnej cestnej siete vo vzťahu k povrchovému odtoku a pod.),
- *celková lesnatosť povodia a štruktúra nelesnej krajiny povodia* (Minďáš a kol., 1998).

Z hľadiska účinku vegetácie a osobitne lesov v hydrologickom režime krajiny je určujúci predovšetkým ich transformačný účinok na atmosférické zrážky a celkovú vodnú bilanciu lesných porastov a lesných pôd. Výsledky výskumu vzťahu medzi lesom a odtokom vody z povodia, získané už počiatkom 20. storočia, potvrdili priaznivý vplyv lesa na odtok vody, prejavujúci sa vo vyrovnávaní odtokových extrémov, predovšetkým v znižovaní extrémne veľkých povodňových prietokov. Rozdielnosť stanovištných podmienok i samostatných lesných porastov a rôzne metódy skúmania však podmienili rozdielnosť názorov na niektoré výsledky lesnícko–hydrologického výskumu i rozdielne názory na ovplyvňovanie jednotlivých zložiek kolobehu vody lesom.

V súčasnosti prevláda názor, že lesné hospodárstvo môže vhodným obhospodarovaním lesov, teda cieľavedomou činnosťou zameranou na plnenie vodohospodárskej

a vodoochrannej funkcie lesa, priaznivo ovplyvniť proces odtoku zo zalesneného povodia, i akosť vody v tokoch a vodných nádržiach. Ale môže zapríčiniť taktiež aj opačný efekt (Čaboun, Minďáš, 2003).

2.1 Vodná bilancia a funkcie lesných ekosystémov

Bilancia vody v lesnom ekosystéme vyjadruje vzájomný vzťah medzi príjmovými (atmosférické zrážky) a výdajovými zložkami vody (evapotranspirácia, odtok do povrchových a podzemných vôd). V prípade, že atmosférické zrážky (Z) sú jediným zdrojom vody pre lesný porast, môžeme všeobecnú rovnicu vodnej bilancie vyjadriť nasledovne:

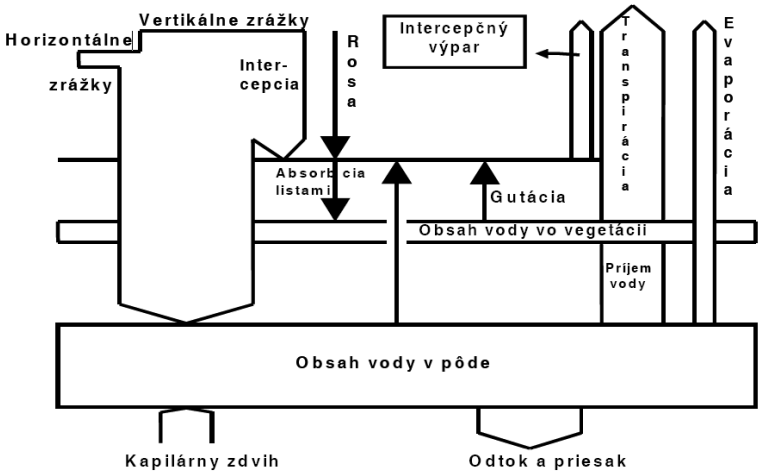
$$Z = \Delta W + ET + O$$

Z dlhodobého hľadiska preto platí, že priemerný úhrn zrážok sa rovná evapotranspirácii (ET) a odtoku (priesaku) vody (O). ΔW je zmena zásob vody v pôde a fytomase (Čaboun, Minďáš, 2003).

Les zadržuje, hromadí a pomaly uvoľňuje veľké zásoby vody. Väčšina našich potokov a riek má preto dosť vody aj v období extrémneho sucha. V prípade veľmi dobrej štruktúry a bohatého prekorenenia dokážu lesné pôdy akumulovať mesačne až 200 l vody na 1m^2, ktorá pomaly a rovnomerne odteká. Les preto podstatne znižuje nebezpečenstvo povodní, čo je v hornatých krajinách, ako je Slovensko, obzvlášť významné. Zo zrážok, ktoré sa dostávajú do lesného porastu, 20% sa zachytí v korunách ako tzv. intercepčná strata a 2% steká po kmeňoch stromov k povrchu pôdy. Fyzikálny výpar a transpirácia bylinnej vegetácie tvorí 19% a povrchový odtok po nenarušenej pôde len menej ako 1 %. Veľmi vysoké je množstvo vody transpirované hlavným porastom, čiže spotreba vody lesnými drevinami dosahuje až 43%. Na odtok do spodín alebo podzemných vôd zostáva potom zvyšných 17%. Z lesných drevín je najviac zastúpený buk (31,2%) a lesné ekosystémy s jeho pôvodným zastúpením v slovenských lesoch, dosahujú dokonca 86%. Každý štvrtý strom v slovenských lesoch je smrek (26,1%). Smrek je teda našou najrozšírenejšou ihličnatou drevinou (Bublinec, 2008).

Z hľadiska posudzovania účinku lesa na transformáciu zrážok do povrchového odtoku musíme osobitne zohľadňovať dva prípady. V prvom prípade ide *o hodnotenie vplyvu lesa na celkovú vodnosť povrchových tokov*, kedy rozhodujúcu úlohu zohráva veľkosť celkovej evapotranspirácie (celkový výpar) lesných ekosystémov, ktorá vo vzťahu k množstvu spadnutých zrážok udáva, koľko vody opúšťa lesný ekosystém vo forme povrchového resp. podzemného odtoku. V druhom prípade ide *o hodnotenie vplyvu lesa z hľadiska jeho protipovodňovej účinnosti*, a to najmä vo vzťahu k tvorbe povrchového odtoku (stekanie zrážkovej vody po povrchu pôdy), kedy rozhodujúci význam má hodnotenie okamžitého záchytu zrážok v korunách lesných porastov (intercepcia) a stav bylinnej vrstvy a vrstvy nadložného humusu, ktoré majú rozhodujúci podiel na infiltráciu padajúcich dažďových kvapiek do pôdneho prostredia (Minďáš et al., 2001).

Evapotranspirácia lesných ekosystémov zahŕňa tri dôležité zložky: tzv. intercepčný výpar (výpar zachytenej zrážkovej vody, najmä v korunách lesných drevín), ďalej výpar z pôdy a napokon výpar z lesných drevín, krovín a bylín (výdaj vody rastlinami prevažne cez prieduchy listov a ihlíc - transpiráciu). Ako uvádza Kantor (1990), v strednej Európe sa podiel evapotranspirácie z celkového množstva zrážok odhaduje asi na 40 – 90 %. Z hľadiska hodnotenia vplyvu lesov na evapotranspiráciu a bilanciu vody v povodí nie sú ani také dôležité absolútne hodnoty, ako porovnanie evapotranspiračných tokov z lesa, z trávnatých povrchov a z povrchov s poľnohospodárskymi plodinami.



Obr. 1: Schéma vodnej bilancie lesného ekosystému (Čaboun, Minďáš, 2003).

Interakciou korún lesného porastu (napr. krovinového a bylinného podrastu) dochádza k záchytu určitého množstva zrážkovej vody, ktorá sa vyparí a predstavuje stratovú položku v rovnici vodnej bilancie. Tento proces záchytu zrážkovej vody lesným porastom nazývame intercepcia. Intercepcia sa najčastejšie vyjadruje ako rozdiel zrážok voľnej plochy a podkorunových, prípadne porastových zrážok. Spravidla sa zhodnocuje za dlhšie časové obdobie (vegetačné obdobie, rok), vtedy hovoríme o úhrnnej intercepcii, ako o množstve zrážok zadržaných v korunách za určité obdobie (Minďáš et al., 2001).

V dôsledku rozdielnosti intenzity výparu z intercepcie a intenzity transpirácie sa žiada pri sledovaní vývoja bilancie vody v systéme rastlinná pokrývka – pôda skúmať nielen množstvo vody spotrebovanej na výpar z intercepcie, ale aj trvanie tohto výparu a vzájomný vzťah (súčinnosť) oboch druhov výparu. V prírodných, ale aj v laboratórnych podmienkach je ťažko sledovať oba tieto procesy separátne a experimentálne zistené údaje obyčajne predstavujú výslednú (súčtovú) hodnotu oboch procesov (Benetin, 1983).

Pri bilančných hodnoteniach intercepcie nemožno zanedbať význam stekania zrážkovej vody po kmeňoch stromov. Množstvo stečenej vody po kmeňoch určuje v rozhodujúcej miere uhol nasadenia konárov a charakter kôry (nepriamo teda druh a vek dreviny). Markantne to vidieť pri porovnaní stoku po kmeni smreka a buka. Kantor (1983) uvádza pre buk hodnotu stoku po kmeni vo vegetačnom období 19,9 % zo zrážok voľnej plochy, zatiaľ čo pre smrek len 1,4 %. Veľké diferencie v stoku po kmeni pre rôzne dreviny zistil Petrík (1986). Ten istý autor poukazuje aj na výrazné rozdiely v stoku po kmeni buka v rôznom postavení v poraste, kde výrazne dominujú stromy úrovňové a predrastové (Minďáš et al., 2001).

Množstvo vody vyparené z lesných porastov je určované najmä drevinovým zložením, vekom, štruktúrou i zdravotným stavom porastov, t.j. vzájomnými vzťahmi medzi lesným porastom a okolitým prostredím.

2.2 Priebeh vodnej bilancie u bukových a smrekových porastov

Pri zrážkach je automaticky zadržiavaná ich určitá časť aj v korunách stromov, odkiaľ sa neskôr vyparí (intercepcia). Koruny smrekov zadržia podstatne viac zrážok než koruny bukov, čo bolo potvrdené bez nejakej výnimky pri všetkých experimentoch. Ostávajúca časť zrážok prepadne cez koruny stromov k pôde, poprípade stečie po kmeňoch stromov. Ako zaujímavosť možno uviesť, že po jednom kmeni dospelého buku sústredene stečie pri zrážke

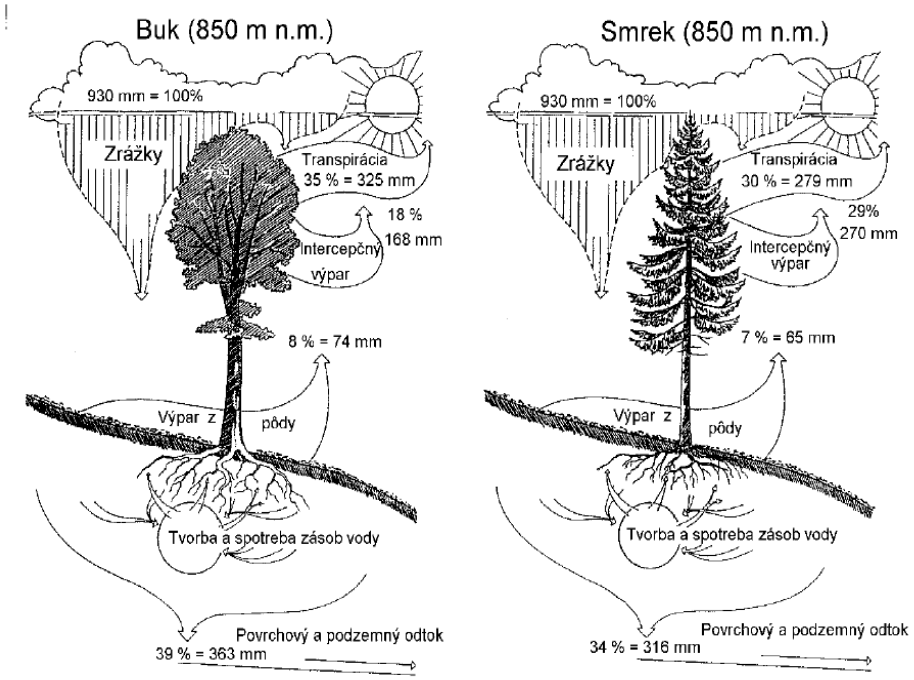
s úhrnom 50 mm až 1 500 litrov vody, naopak u smrekov je tok po kmeni výrazne nižší (pri tej istej zrážke iba 30 až 50 litrov) (Kantor, Šach, 2002).

Zvýšený povrchový odtok býva obvykle zaznamenaný len pri jarnom topení snehu v nezmiešanom bukovom poraste, kde uľahnutá vrstva lístia má menšiu vsakovaciu schopnosť než smreková hrabanka. Navyše aj intenzita topenia snehu býva v bezlistých bukových porastoch najmä za slnečného počasia až o 30 % vyššia než v smrekových porastoch. Pri bežnom režime zrážok je voda v pôde čerpaná koreňmi stromov pre zaistenie ich fyziologických procesov (transpirácia). Intenzita transpirácie je u listnatých porastov obvykle 2 až 5 krát vyššia ako u porastov ihličnatých. S ohľadom na výrazne väčšie hodnoty biomasy ihličia smrekových porastov sa ale spravidla rozdiely medzi transpiráciou ihličnatých a listnatých lesov nelíšia. Je zrejmé, že lesné porasty sú značným spotrebiteľom zrážkovej vody. Väčšiu spotrebu zrážkovej vody je však možné pozorovať u smrekových porastov, v priamom porovnaní s porastmi bukovými.

Pretože smrekové a bukové porasty sú najvýznamnejší predstavitelia našich lesných spoločenstiev, na ich príklade bola potvrdená pomerne vysoká spotreba vody lesnými ekosystémami. Dospelé smrekové porasty spotrebujú na svoje fyzikálne a fyziologické procesy v našich podmienkach 440 až 620 mm, dospelé bukové porasty 350 až 610 mm vody za rok. V dospelých bukových porastoch má závislosť celkového výparu na ročných zrážkach mierne klesajúci trend, čo podmieňuje zvlášť odlišná dynamika vodného režimu v mimo vegetačných obdobiach. V nížinách a pahorkatinách spotrebuje buk pri zrážkach 540 až 750 mm . rok^{-1} celkovo 400 až 610 mm vody (v priemere 500 mm), vo vyšších polohách pri zrážkach nad 1050 mm . rok^{-1} už iba 350 až 550 mm (v priemere 460 mm). Pri vzájomnom porovnaní celkového výparu (prípadne odtoku) bola u obidvoch typov porastov vždy vyššia spotreba vody u porastoch smrekových.

Intercepcia sa prejavuje najmä v hustom smrekovom lese, kde sú najmenšie vodné hodnoty snehu. Vodná hodnota snehu na veľkých otvorených plochách je väčšia ako v hustom lese, ale menšia ako na malých čistinách alebo v riedkom lese. Počas topenia snehu sa vplyv lesa prejavuje najmä v tienení pred priamym slnečným žiarením. Koruny stromov síce emitujú dlhovlnné žiarenie, ale vo všeobecnosti je topenie snehu v lese dlhšie tým viac, čím je les hustejší.

Intercepcia snehových zrážok predstavuje z hľadiska vodnej bilancie ochudobnenie ekosystému o časť vody z atmosférických zrážok. Významnú negatívnu úlohu má intercepcia hlavne v smrekových porastoch nižších polôh. Naproti tomu v hrebeňových a svahovo náveterných polohách sú intercepčné straty úplne zanedbateľné, nakoľko sú eliminované tzv. „kladnou“ intercepciou z horizontálnych zrážok, t.j. zachytením určitého množstva vody z hmiel a spodných vrstiev oblačnosti. Tuhé zrážky padajúce v zimnom období vo forme snehu sú v lesných porastoch zadržiavané v korunách stromov v podstate v rovnakej miere ako kvapalné zrážky, a to i napriek faktu, že nielen fyzikálne väzby medzi biomasou korún a snehom, ale aj celý intercepčný proces je do určitej miery odlišný. Zatiaľ čo dažďové kvapky sú viazané adhezívnymi silami na povrchu vegetácie len dočasne, snehové vločky v závislosti na teplote vzduchu a rýchlosti vetra, sa zachytávajú v korune len z malej časti alebo naopak k vegetačnému povrchu primŕzajú a sú zadržiavané dlhodobo a v značnej miere. Dĺžka trvania a intenzita topenia snehu pod korunami lesa závisia na druhovej skladbe, zápoji a veku porastov. Pri druhovej skladbe je rozhodujúci podiel ihličnanov, napr. prímes smreka k listnatým porastom znižuje intenzitu a predlžuje topenie snehu (Pobedinskij, Krečmer, 1984).



Obr. 2: Kolobeh vody a vodná bilancia dospelého bukového a smrekového porastu na príklade stredohorskej lokality Poľana – Hukavský grúň (Střelcová, Minďáš, 2000).

Intercepcia snehových zrážok predstavuje z hľadiska vodnej bilancie ochudobnenie ekosystému o časť vody z atmosférických zrážok. Významnú negatívnu úlohu má intercepcia hlavne v smrekových porastoch nižších polôh. Naproti tomu v hrebeňových a svahovo náveterných polohách sú intercepčné straty úplne zanedbateľné, nakoľko sú eliminované tzv. „kladnou“ intercepciou z horizontálnych zrážok, t.j. zachytením určitého množstva vody z hmiel a spodných vrstiev oblačnosti. Tuhé zrážky padajúce v zimnom období vo forme snehu sú v lesných porastoch zadržiavané v korunách stromov v podstate v rovnakej miere ako kvapalné zrážky, a to i napriek faktu, že nielen fyzikálne väzby medzi biomasou korún a snehom, ale aj celý intercepčný proces je do určitej miery odlišný. Zatiaľ čo dažďové kvapky sú viazané adhezívnymi silami na povrchu vegetácie len dočasne, snehové vločky v závislosti na teplote vzduchu a rýchlosti vetra, sa zachytávajú v korune len z malej časti alebo naopak k vegetačnému povrchu primŕzajú a sú zadržiavané dlhodobo a v značnej miere. Dĺžka trvania a intenzita topenia snehu pod korunami lesa závisia na druhovej skladbe, zápoji a veku porastov. Pri druhovej skladbe je rozhodujúci podiel ihličnanov, napr. prímes smreka k listnatým porastom znižuje intenzitu a predlžuje topenie snehu (Pobedinskij, Krečmer, 1984).

Vo všeobecnosti sa uvádza, že intercepčná kapacita kolíše od 0,5 mm u trávnatých porastov a riedkych lesných bukových spoločenstiev, až po 2 mm u ihličňanov, a až 6 mm u ihličňanov pri snehových zrážkach (Majerčáková, 1983).

Je možné konštatovať, že z lesov odteká v priemere len asi 60 - 70 % objemu odtoku v porovnaní s bezlesím. Dolné medze objemu odtoku sa týkajú lesov ihličnatých, ktoré majú všeobecne vyššiu hodnotu územného výparu než lesy listnaté, v priemere o 10 %. Listnaté dreviny sú vzhľadom k bezlistnatým v mimo vegetačných obdobiach v menšej biomase asimilačných orgánov schopné zadržať a odčerpať menej zrážkovej vody než dreviny ihličnaté (najmä smrek).

Na prírastok ročného odtoku má v lesných porastoch veľký význam aj vplyv ťažby. Vplyv ťažby a zakmenenia na ročný odtok z povodia bol sledovaný v ihličnatých aj listnatých

porastoch najmä v USA. Na základe údajov Wilma a Dunforda (1948), Reinharta, Eschnera a Trimbla (1963), ktoré uvádza Brechtel (1970) zostrojili autori Minďáš a Čaboun (2002) graf vplyvu ťažby a hustoty ihličnatého a listnatého porastu na prírastok ročného odtoku.

3. Zrážkovo-odtokové modely s priestorovo-rozčlenenými parametrami

V tejto kapitole sa zaoberám akým spôsobom je možné kvantifikovať vplyv vegetácie na hydrologické procesy. Jedným z používaných nástrojov sú zrážkovo-odtokové modely.

Prednosťou fyzikálne orientovaných modelov s priestorovo-rozčlenenými parametrami je v porovnaní s inými druhmi hydrologických modelov schopnosť opísať priestorovú premenlivosť antropogénnych vplyvov a zmeny priestorových parametrov pre rôzne spôsoby využívania územia (Beven, 2001). Príkladom typickej aplikácie distribuovaných modelov je:

- predpoveď efektov zmien na povodí v dôsledku ľudskej činnosti, ako napr. zmena vo využívaní pôdy vrátane urbanizácie, vplyv závlah, vývoj hladiny podzemnej vody, povrchové a podpovrchové znečistenie, vplyv klimatickej zmeny a pod.,
- stanovenie odtoku z povodia bez pozorovaní a z povodí s krátkymi radmi pozorovaní, predpovede povodní a období sucha,
- modelovanie kvality vody, degradácie a erózie pôdy, pre ktoré je dôležitá detailnejšia a fyzikálne presnejšia simulácia prúdenia vody (Kubeš, 2002).

Distribuované modely sú vhodné aj na simuláciu odtoku z lesného porastu, pretože k ich parametrom patrí aj zohľadnenie parametrov vegetácie, ktoré sú pri modelovaní odtoku z lesa veľmi dôležité. Tieto modely sú založené na veľmi podobnej štruktúre. Patrí sem Model SHE, Model AGNPS, Model WetSpa, Model WaSiM-ETH a Model FRIER. V ďalšej časti sa zameriavam už iba na opis parametrov využívania krajiny, ktoré sa v tých typoch modelov uplatňujú.

3.1 Parametre využívania krajiny

V zrážkovo–odtokových modeloch s priestorovo rozčlenenými parametrami sa vlastnosti vegetácie alebo povrchového krytu väčšinou charakterizujú parametrami porastu (Eckhardt et al., 2003) a spoľahlivosť výsledkov modelovania závisí aj od toho, s akou presnosťou možno tieto parametre odhadnúť. Využitie a pokrytie krajiny priamo i nepriamo ovplyvňuje hydrologické procesy. Rôzne druhy využitia krajiny majú rôznu intenzitu evapotranspirácie kvôli rôznemu vegetačnému pokryvu, indexu listovej pokryvnosti, hĺbke koreňovej zóny a albedu. Využívanie krajiny tiež vplýva na infiltráciu, pretože hlavne nasýtený koeficient filtrácie je ovplyvnený koreňmi rastlín a pórmi vytvorenými pôdnou faunou (Ragab a Cooper, 1993). Drsnosť povrchu ovplyvňuje rýchlosť plošného odtoku a intenzitu povodní. Značný stupeň neistoty v určení týchto parametrov vyplýva najmä z problémov spojených s ich priamym meraním, ako aj s neistotou vyplývajúcou z regionalizácie bodových meraní parametrov, vzhľadom na prirodzenú variabilitu charakteristík vegetácie, súvisiacu s klimatickými a pôdnymi podmienkami, vekom vegetácie a pod. (Breuer et al., 2003). Zároveň môže byť otázne, či vôbec rôzne druhy pôdneho krytu môžu byť výrazne rozlíšené v ich vplyve na výsledky simulácií odtoku (Eckhardt et al., 2003) a diskutuje sa o tom či sú vôbec schopné zrážkovo – odtokové modely vyjadriť zmenené podmienky využitia v zmene tvorby odtoku (Niehoff et al., 2002).

Základné parametre využitia krajiny, ktoré okrem iných taktiež vstupujú do vyššie opísaných modelov (WaSiM, FRIER, WetSpa, AGNPS a SHE) sú: kapacita intercepcie, hĺbka koreňovej zóny, index listovej pokryvnosti (LAI), koeficient drsnosti povrchu, albedo a odpor prieduchov.

Kapacita intercepcie

Intercepčná kapacita I_c vyjadrená v mm je definovaná ako maximálne množstvo vody zachytené vegetáciou na konci zrážkovej udalosti počas podmienok nulovej evapotranspirácie po skončení zrážkovej udalosti. Intercepčná kapacita, v prípade lesov niekedy uvedená aj ako vegetačná kapacita, zohráva dôležitú úlohu vo výpočtoch vodnej rovnováhy v hydrológii a energetickej bilancie okrajových vrstiev v klimatológii. Intercepčná kapacita porastu, t.j. schopnosť rastlín zadržať vodu povrchom ich nadzemnej časti (v mm vodného stĺpca) závisí od druhu porastu (botanickej stavby a povrchu nadzemných orgánov), od jeho vývoja (vek pri lesných porastoch), hustoty a stavu, ktorý sa mení v priebehu roka, či vegetačného obdobia (Benetin et al., 1986).Voda zachytená intercepciou na poraste sa postupne vyparuje a vracia sa tak do hydrologického cyklu spolu s intenzitou potenciálnej evapotranspirácie. Hoci intercepčné straty môžu byť veľmi významné v ročnej hydrologickej bilancii, nie sú dôležité pri búrkach tvoriacich povodne. V závislosti od ročného obdobia sa zrážky môžu vyskytovať v kvapalnej alebo v tuhej fáze. Intercepcia je zvyčajne určovaná odčítaním prepadnutých zrážok od celkových zrážok vstupujúcich do procesu (Gash et al., 1980). Na odhadnutie hodnôt intercepčnej kapacity boli použité rôzne techniky, ktoré sú publikované v práci Dunkerleya (2000), zahŕňajúce aj umelé dažďové experimenty a váženie stromov alebo ich konárov po nasiaknutí zrážkovou vodou (Aston 1979; Teklehaimnot and Jarvis, 1991). Intercepčná kapacita závisí od rôznych faktorov vrátane zrážkovej intenzity, rýchlosti vetra a stavby rastlín.

Hĺbka koreňovej zóny

Tento parameter udáva, do akej hĺbky dosahujú korene rastlín alebo stromov. Patrí k najvplyvnejším faktorom zásob podzemnej vody. V hydrologických modeloch sa týmto parametrom väčšinou vyjadruje hrúbka pôdnej vrstvy nenasýtenej zóny. Greacen a Williams (1983) poukázali na to, že hlboko zakorenené porasty (napr. stromy) majú celkovo väčšiu úložnú kapacitu vody ako plytko zakorenené porasty (napr. nízke trávy).

Index listovej pokryvnosti (LAI)

Charakteristikou listnatosti je listová pokryvnosť (LAI – leaf area index), t.j. pomer plochy fyziologicky aktívnych listov k celkovej ploche, na ktorej porast rastie. Index listovej pokryvnosti je dôležitý parameter vo väčšine existujúcich hydrologických modeloch, pretože určuje fotosyntézu, transpiráciu, aj intercepciu. V dôsledku toho, nestálosť potenciálneho maxima LAI môže značne ovplyvniť nestálosť celkových modelových výsledkov (Eckhardt et al., 2003). Pri plnom rozvití rastlín vo vegetačnom období podstatnú časť špecifického povrchu porastu tvoria listy. Do listovej pokryvnosti sa teda nezapočítavajú odumreté listy, t.j. listy fyziologicky neúčinné. V prípade intercepcie sú aj tieto listy účinné. Hustota, plošná pokryvnosť a špecifický povrch porastu navzájom súvisia. Plošná pokryvnosť porastu je tým väčšia, čím je väčšia hustota a špecifický povrch porastu. Pritom treba uvážiť, že v riedkych porastoch jednotlivé rastliny sa rozvíjajú viac do šírky ako v hustých porastoch a zvyšujú tým pokryvnosť (Benetin et al., 1986).

Index listovej pokryvnosti (LAI) je teda plocha listov (len vrchná časť) na jednotkovú plochu pôdy pod nimi. Všeobecná rovnica LAI pre pokosenú trávu je:

$$LAI = 24 \, . \, z_c \, ,$$

kde: LAI – index listovej pokryvnosti (plocha listov / plocha povrchu pôdy) [$m^2.m^{-2}$],
z_c – výška porastu [m].

Koeficient drsnosti

Drsnosť povrchu ovplyvňuje rýchlosť plošného odtoku na svahu a sústredeného odtoku v riečnej sieti. Koeficient drsnosti závisí od výšky, hustoty, rozdelenia a typu porastu. Tento

parameter sa meria ťažko v teréne a v našich podmienkach sa používajú iba jeho empirické hodnoty známe z literatúry, najmä pre vodné toky a inundačné územia. Drsnosť môže byť vyjadrená napr. Manningovým koeficientom drsnosti, ktorý sa určuje zvlášť pre svahy a riečnu sieť. Tento parameter využitia krajiny vstupuje napríklad do modelu FRIER a WetSpa.

Albedo

Albedo (odrazivosť) povrchu je potrebné poznať kvôli presnému stanoveniu bilancie krátkovlnného žiarenia, vyžarovaciu schopnosť povrchu zase pre určenie bilancie dlhovlnného žiarenia. Albedo krátkovlnného žiarenia závisí od drsnosti, farby, sklonu povrchu, vlastnostiach porastu, vlhkosti pôdy, existencie snehovej pokrývky i od polohy Slnka, má významný denný i mesačný chod (Lapin a Tomlain, 2001).Ak je povrch pokrytý snehovou pokrývkou odrazivosť tohto povrchu bude závisieť iba od vlastností snehovej pokrývky, tá zase od teploty vzduchu a od jeho starnutia. Preto je vhodné najskôr stanoviť albedo snehu a až potom albedo povrchu.

Odpor prieduchov

Je to ďalší z parametrov vegetácie vstupujúci do hydrologických modelov. Odpor prieduchov zohráva dôležitú úlohu pri výmene vody medzi rastlinstvom a atmosférou, a preto patrí medzi kľúčové parametre rôznych modelov (Chen et al., 1999).

Príklady hodnôt vyššie uvedených parametrov sú dané v tab. 1, 2. V tab.1 je pre hodnoty parametrov využitia krajiny, ktoré sú pre hydrologický model FRIER (Horvát, 2007) a tab.2 uvádza hodnoty parametrov krajiny zadané pre model WetSpa (Liu, De Smedt, 2004).

Parametre využitia krajiny		Hĺbka koreňovej zóny	Intercepcia	Manningov koeficient	PET koeficient	Vyžarovacia schopnosť povrchu	Albedo	Index listovej pokryvnosti
Kategória ↓	Jednotky →	mm	mm	$m^{-1/3}.s$		-	-	-
1	Vodné plochy	0	0.00 - 0.00	0.04	1.30	0.950	0.07 - 0.11	0.0 - 0.0
2	Močiare, rašeliniská	1000	0.00 - 0.50	0.20	1.20	0.910	0.07 - 0.14	0.5 - 2.0
3	Nepriepustné plochy	500	0.00 - 0.50	0.02	0.85	0.910	0.11 - 0.30	0.5 - 2.0
4	Holá pôda	0	0.00 - 0.20	0.10	0.70	0.890	0.08 - 0.30	0.0 - 0.0
5	Orná pôda	1000	0.00 - 1.00	0.15	1.10	0.890	0.11 - 0.25	0.5 - 6.0
6	Nízka tráva	1000	0.10 - 1.00	0.20	1.00	0.980	0.16 - 0.27	0.5 - 2.0
7	Vysoká tráva	1000	0.15 - 1.50	0.40	1.05	0.970	0.22 - 0.31	1.0 - 6.0
8	Vždyzelené kríky	1000	0.15 - 1.50	0.40	1.15	0.980	0.07 - 0.19	5.0 - 6.0
9	Prechodné lesokroviny	1000	0.05 - 1.50	0.40	1.15	0.975	0.16 - 0.27	1.0 - 6.0
10	Vždyzelené listnaté lesy	1500	0.20 - 2.00	0.60	1.20	0.970	0.22 - 0.27	5.0 - 6.0
11	Opadavé listnaté lesy	2000	0.05 - 2.00	0.80	1.20	0.970	0.16 - 0.27	1.0 - 6.0
12	Zmiešané lesy	2000	0.15 - 3.00	0.60	1.20	0.975	0.11 - 0.22	3.0 - 6.0
13	Vždyzelené ihličnaté lesy	1500	0.30 - 4.00	0.40	1.15	0.980	0.07 - 0.19	5.0 - 6.0
14	Opadavé ihličnaté lesy	1500	0.15 - 4.00	0.40	1.15	0.975	0.11 - 0.19	1.0 - 6.0

Tab.1: Ukážka hodnôt parametrov využívania krajiny v modeli FRIER (Horvát, 2007).

Parametre využitia územia	Vegetačný podiel (%)	LAI (-)	Hĺbka koreňovej zóny (m)	Manningov koeficient ($m^{-1/3}s$)	kapacita intercepcie (mm)
orná pôda	85	0.5 – 6.0	1.0	0.15	0.05 – 1.00
nízka tráva	80	0.5 – 2.0	1.0	0.20	0.05 – 1.00
vždy zelené ihličnaté lesy	80	5.0 – 6.0	1.5	0.40	0.10 – 0.80
opadavé ihličnaté lesy	80	1.0 – 6.0	1.5	0.40	0.05 – 0.80
opadavé listnaté lesy	80	1.0 – 6.0	2.0	0.80	0.05 – 2.00
vždy zelené lesy	90	5.0 – 6.0	1.5	0.60	0.15 – 2.00
vysoká tráva	80	0.5 – 6.0	1.0	0.40	0.10 – 1.50
zavlažované plochy	80	0.5 – 6.0	1.0	0.20	0.05 – 1.00
močiare, rašeliniská	80	0.5 – 6.0	1.0	0.20	0.05 – 1.00
vždy zelené kríky	80	0.5 – 6.0	1.0	0.40	0.10 – 1.50
opadavé kroviny	80	1.0 – 6.0	1.0	0.40	0.05 – 1.50
holé pôdy	5	0.5 – 2.0	1.0	0.10	0.05 – 1.00
nepriepustné pôdy	0	0.0 – 0.0	0.0	0.02	0.00 – 0.00
vodné plochy	0	0.0 – 0.0	0.0	0.02-0.05	0.00 – 0.00

Tab.2: Ukážka hodnôt parametrov využívania krajiny v modeli WetSpa (Liu, De Smedt, 2004).

Záver

Lesy na Slovensku tvoria dôležitý krajinný prvok. Už v minulosti sa mnohokrát osvedčila obnova lesného porastu, pretože pri správnej skladbe lesa môžeme výrazne ovplyvniť plošný odtok zrážkovej vody a tým značne zredukovať alebo znížiť povodňovú vlnu. Vplyv lesa na hydrologický režim vodných tokov je mimoriadne veľký, a preto si treba uvedomiť, že lesný porast nám ponúka obrovské výhody. Najmenej je odtok vody ovplyvnený tam, kde rozhodujúcu úlohu zohráva horninové prostredie a transformácia atmosferických zrážok do podzemných vôd. Tam je účinok zmeny v lesnom poraste na odtok vody asi polovičný ako vo flyšových oblastiach. Dôležitým činiteľom pri odtoku vody z lesných porastov je infiltrácia lesných pôd. Čím má pôda väčšiu zrnitosť tým je aj hodnota koeficientu infiltrácie väčšia. Zrnitostná štruktúra pôd takto môže výrazným spôsobom ovplyvniť distribúciu atmosferických zrážok v lesnom ekosystéme. Ochranný účinok lesného porastu nespočíva len v zachytení, prípadne spomalení plošného odtoku, ale aj spevňuje pôdu čím následne zabraňuje erózii.

Odhad vplyvu využívania krajiny na odtokové procesy by mal byť nevyhnutnou súčasťou integrovaného manažmentu vodných zdrojov v povodiach. Na Slovensku sa v poslednom období hydrologické modely použili najmä na zhodnotenie dôsledkov zmeny využívania krajiny a klímy na odtok a procesy topenia snehu a na simulovanie transportu sedimentov.

Zrážkovo-odtokové modely s rozčlenenými parametrami sú teda perspektívnym nástrojom, ktorý môže byť veľmi dobre využiteľný v integrovanom manažmente vodných zdrojov v povodiach, aj pri rozhodovaní o spôsobe využívania krajiny a jej plánovania. Pre posudzovanie vplyvu spôsobu využívania krajiny je však nevyhnutné uvedomovať si limity a problémy, ktoré by sa mohli vyskytnúť pri interpretácii výsledkov. Stále sa pracuje s modelmi, v ktorých sa parametre modelu nastavujú na základe porovnávania zhody medzi simulovanými a meranými prietokmi pri súčasnom stave, a rozloženie odtoku na jednotlivé zložky, ktoré sú iba výsledkom simulácie modelu, tak nevieme porovnať so skutočným stavom. Jednotlivé porasty a kryt krajiny je vyjadrený v simulovaných procesoch pomocou parametrov, ktoré tak isto môžu byť zaťažené značnou mierou neurčitosti. Ďalšia neistota

môže vyplývať z rôzneho spôsobu a miery zjednodušenia procesov v jednotlivých modeloch, ktoré nemusia vždy vedieť dostatočne reprodukovať reálne fyzikálne procesy tvorby odtoku v jednotlivých povodiach.

Zrážkovo-odtokové modely s rozčlenenými parametrami nepredstavujú v žiadnom prípade rutinný nástroj, ich využívanie si vyžaduje dobré vedomosti užívateľa o hydrologických procesoch, o možnostiach parametrizácie prostredia v modeloch, ako aj o vlastnostiach konkrétneho skúmaného povodia. Pre integrovaný manažment povodia sa preto odporúča skúmať každé povodie, prípadne región zvlášť a poprípade overiť aj viacero modelových prístupov.

Poďakovanie
Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy c. APVV-0378-07 a LPP-0254-07. Týmto ďakujem agentúre za podporu výskumu.

Zoznam použitej literatúry:

ANDREASSIAN, V., 2004. Water and forest: from historical controversy fo scientific debate. J. Hydrol., 291,1-27.

ASTON, A.R., 1979. Rainfall interception by eight small trees. J. Hydrol. 42, 383–396.

BENETIN, J., 1983. Analytické riešenie vzťahu medzi transpiráciou a výparom z intercepcie. Vodohosp. čas. 31, č. 3-4, 354368

BENETIN, J., NOVÁK, V., ŠOLTÉSZ, A., ŠTEUKAUEROVÁ, V., 1986. Intercepcia a jej vplyv na vodnú bilanciu vegetačnej pokrývky. Vodohosp. časopis 34, č. 1, 3-24.

BEST , A., ZHANG, L., McMAHON, T., WESTERN, A., VERTESSY, R., 2003. A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability. CSIRO Land and Water Technical Report 25/03, ISBN 1 876 830 57 3, 56 pp.

BEVEN, K.J., 2001. Rainfall - runoff modeling. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester.

BÍBA, M., OCEÁNSKA, Z., VÍCHA, Z., JARABÁČ, M., 2006. Forest - hydrological research in small experimental catchments in the Beskydy Mountains. (in Czech with an extended English abstract), J. Hydrol. Hydromech., 54, 2, 113-122.

BOSH, J. M., HEWLETT, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evaporation. J. Hydrol., 55, 3-23.

BRECHTEL, H.M., 1970. Komplexní úprava povodí. Nová hlediska při obhospodařování krajiny. Zprávy les. Výsk. 16, 2, 1 – 8.

BREUER, L., ECKHARDT, K., FREDE, H.G., 2003. Parameter values for models in temperate climates. Institute for Landscape Ecology and Resources Management, Justus-Liebig-University Giessen, Heinrich-Buff-Ring 26-32, 35392 Giessen, Germany.

BUBLINEC, E., 2008. Les - to nie sú len stromy. Edícia E – ekológia lesa, odborné ekologické publikácie č.1. Ústav ekológie lesa SAV Zvolen. ISBN 978-80-969525-5-7.

BUTTLE, J. M., CREED, I. F., POMEROY, J. W., 2000. Advances in Canadian forest hydrology, 1995-1998. Hydrol. Process., 14, 1551-1578.

ČABOUN, V., MINĎÁŠ, J., 2003. Vodná bilancia a hydrické funkcie lesných ekosystémov v krajine. Funkcia energetickej a vodnej bilancie v bioklimatických ekosystémoch. Zborník príspevkov, SPU v Nitre (elektronická forma), 7 s.

DUNKERLAY, D., 2000. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. Hydrol. Proc. 14, 669–678.

ECKHARDT, K.S., BREUER, L., FREDE, H.G., 2003. Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. J. Hydrol. 273, 164-176.

ENGLER, A., 1919. Untersuchungen űber den Einfluss des Wal-des auf den Stand der Gewasser. Mitt. Schweiz. Anst. Forst. Versuchswes., 12, 636 pp.

FORSYTH, T., 2005. Land use Impacts on Water Resources-Science, Social and Political Factors. In: Encyclopedia of Hydrologica,l Sciences (Ed. M. G. Anderson, J.J. McDonnell), Chapter 187, John Wiley & Sons, Ltd., 2910-2923.
GASH, J.H.C., WRIGHT, I.R., LLOYD, C.R., 1980. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain. J. Hydrol. 48, 89–105.
GREACEN, E.L., WILLIAMS, J., 1983. Physical properties and water relations. In 'SOILS an Australian view point.' CSIRO/Academic Press pp 499-530.
HAMILTON, L.S., KING, P.N., 1983. Tropical Forested Watersheds: Hydrological and Soil Response to Major Uses for Conservation, Westview Press: Boulder.
HEGG, CH., McARDELL, B. W., BADOUX, A., 2006. One hundred years of mountain hydrology in Switzerland by the WSL, Hydrol. Process., 20,371-376.
HIBBERT, A., R., 1967. Forest treatment effects on water yield. In: W. E. Sopper and H. W. Lull (Editors), Int. Symp. For. Hydrol., Pergamon, Oxford.
HOLKO, L., KOSTKA, Z., 2008. Impact of Landuse on Runoff in Mountain Catchments of Different Scale. Soil & Water Res., 3, (3): 113–120.
HORVÁT, O., 2007. Parametrization of Hydrologic Processes in the Runoff Modelling. Dizertačná práca, odbor Hydrológia a vodné hospodárstvo, Katedra vodného hospodárstva krajiny, SvF STU v Bratislave, 129s.
CHEN, J.M., LIU, J., CIHLAR, J., GOULDEN, M.L., 1999. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. Ecol. Model. 124, 99–119.
JEWITT, G., 2005. Water and Forests. In: Encyclopedia of Hydrological Sciences (Ed. M. G. Anderson, J.J. McDonnell), Chapter 186, John Wiley & Sons, Ltd., 2895-2909.
JONES, J. A., POST, D. A., 2004. Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and regrowt in the northwestern and eastern United States. Water Resours. Res., vol. 40, W05203, doi: 10. 1029/2003 WR002952
KANTOR, P., 1983. Výpar z půdy a přízemní vegetace ve smrkovém a bukovém porostu. Práce VÚLHM 63, s.165-199.
KANTOR, P., 1990. Základní vazby celkového výparu a odtoku ze smrkových a bukových lesů. Vodohospodársky časopis 38, č.3, 327-348.
KANTOR, P., ŠACH, F., 2002. Možnosti lesu při tlumení povodní. Lesnícky výskum 11/2002, 493-495.
KOSTKA, Z., HOLKO, L., 2006. Role of forest in hydrological cycle – forest and runoff. Meteorologický časopis, 9, 143-148.
KUBEŠ, R., 2002. Matematické modelovanie zrážkovo - odtokových procesov. Písomný projekt k dizertačnej skúške. SvF STU Bratislava, 119s.
LAPIN, M., TOMLAIN, J., 2001. Všeobecná klimatológia a meteorológia. Vysokoškolské skriptá. FMFI UK, Vydavateľstvo UK, 184 s., Bratislava, ISBN 80-223-1433-1.
LIU, Y.B., DE SMEDT, F., 2004. WetSpa Extension, A GIS – based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management. Documentation and User Manual. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering , Brussel, Belgium.
MacDONALD, L.H., STEDNICK, J.H., 2003. Forests and Water: A State-of-the-Art Review for Colorado, CWRRI Completion Report No. 196, Colorado State University, 75 pp.
MAJERČÁKOVÁ, O., 1983. Intercepcia ako komponent vplývajúci na tvorbu odtoku zo zrážok v lesných porastoch. Kandidátska dizertačná práca. Bratislava, Ústav hydrológie a hydrauliky SAV, 91s.
McCULLOCH, J. S. G., ROBINSON, M., 1993. History of forest hydrology. J. Hydrol.,150, 189-216.
MINĎÁŠ, J., ČABOUN, V., 2002. Influence of vegetation on catchment runoff. In Slovak, project VTP 27-64 E0203, final report, 26 pp.

MINĎÁŠ, J., MORAVČÍK, M., STANOVSKÝ, M., 1998. Význam lesov a ich obhospodarovania z hľadiska protipovodňovej ochrany krajiny. In: O povodniach v roku 1998. Zborník referátov. Práce a štúdie SHMÚ, Bratislava, 1998: 66-71.
MINĎÁŠ, J., ŠKVARENINA, J., STŘELCOVÁ, K., 2001. Význam lesa v hydrologickom režime krajiny. Ústav krajinnej ekológie SAV Bratislava, Životné prostredie, č. 3.
NIEHOFF, D., FRITSCH, U., BRONSTERT, A., 2002. Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. Journal of Hydrology, Vol. 267, 1-2, 80-93.
PEKÁROVÁ, P., KONÍČEK, A., MIKLÁNEK, P., 2005. Influence of landeuse on runoff regime in experimental microcatchments of the Institute of Hydrology SAS. (in Slovak with an English summary), Veda, Bratislava, ISBN 80-224-0865-4, 216 pp.
PETRÍK, M., 1986. Príspevok k zrážkovému režimu jedľobukového ekosystému. In: Poznatky z bioklimatológie, lesníckej ekológie a meliorácií. Zborník z konferencie, Zvolen, Bratislava, 54-59.
PIKE, R. G., SHERER, R., 2003. Overview of the potential effects of forest management on low-flows in snowmelt-dominated hydrologic regime. BC J. of Ecosyst. and Manag., vol. 3, no. 1, 18 pp.
POBEDINSKIJ, A. V., KREČMER, V., 1984. Funkce lesu v ochrane vod a púdy. Státní zemědelské nakladatelství, Praha, 1984, 256 s.
RAEV, I., 2005. Research network, achievements and problems of the forest hydrological studies in Bulgaria. Int. Conf on Forest Impact on Hydrological Processes and Soil Erorosion, University of Forestry, Training and Experimental Forestry Enterprise Yundola, Bulgaria, 17-29.
RAGAB, R., COOPER, J.D., 1993. Variability of unsaturated zone water transport parameters: Implications for hydrological modelling. 1. In situ measurements. Journal of Hydrology (Amsterdam) [J. HYDROL. (AMST.)]. Vol. 148, No. 1-4, 109-131.
REINHART, K.G., ESCHNER, A.R., TRIMBLE, G.R., 1963. Effect on streamflow of four forest practices in the mountain of West Virginia. U.S. Forest Service Res. Paper NE - 1.
SEUNA, P., 1999. Hydrological effects of forestry treatment in Finland. Invited lecture at the Symp. On Flood Control, Beijing, China.
STŘELCOVÁ, K., MINĎÁŠ, J., 2000. Transpirácia buka lesného vo vzťahu k meniacim sa podmienkam prostredia. Vedecké štúdie 2000, Technická Univerzita vo Zvolene.
TEKLEHAIMNOT, Z., JARVIS, P.G., 1991. Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies. J. Appl. Ecol. 28, 603–618.
VALTÝNI, J., 2001. The forest and the floods (in Slovak with English abstract), Vedecké štúdie 5/2001/A, Technická Univerzita vo Zvolene, 46 pp.
VERTESSY, R. A, WATSON, F.G.R., O´SULLIVAN, S. K., 2001. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forest. Forest Ecology and Management 143, 13-26.
VERTESSY, R., WATSON, F., O´SULLIVAN, S., DAVIDS, S., CAMPBELL, R., BENYON, R., HAYDON, S., 1998. Predicting water yield from Mountain Ash forest catchments. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology Industry Report, Report No. 98/4, Monash University, Victoria, Australia, 38 pp.
WILM, H.G., DUNFORD, E.G., 1948. Effect of timber cutting on water available for stream flow from a lodepole pine forest, U.S. Dep. Agr. Techn. Bull. 968.

Marcela Bulantová
Katedra vodného hospodárstva krajiny SvF STU
Radlinského 11, 813 68 Bratislava
marcela.bulantova@stuba.sk