


VODNÍ REŽIM DOUGLASKY A LESNÍCH POROSTŮ S DOUGLASKOU: REVIEW

WATER REGIME OF DOUGLAS-FIR AND FOREST STANDS WITH DOUGLAS-FIR: REVIEW

FRANTIŠEK ŠACH  - VLADIMÍR ČERNOHOUS - DUŠAN KACÁLEK

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i. Výzkumná stanice Opočno, Na Olivě 550, 517 73 Opočno, Czech Republic

 e-mail: sach@vulhmop.cz

ABSTRACT

Douglas-fir (DF) is thought to be a convenient substitution of declined Norway spruce (NS) in the Czech Republic. Information on water regime of DF and stand mixtures with DF is important particularly in relation to climatic oscillations posing both flood and drought risks to forests. Taking into account a lack of domestic information, the review was based also on world literature sources. Water regime of DF and forest mixtures with DF includes many topics. This study focused on water balance and its components such as precipitation of open area, throughfall, stemflow, net precipitation, interception losses, water uptake by trees, transpiration, evaporation from soil surface, forest floor and ground vegetation, hillslope runoff, surface runoff, subsurface flow, subsurface stormflow, lateral interflow, groundwater recharge, stream flow, soil water content, redistribution of soil water by tree roots etc. The most important finding is that DF is capable of using water from deeper soil layers more effectively than NS. This enables DF to transpire more water during dry periods and also to grow faster compared to NS. Mentioned hydrological impacts of tree species should be taken into account for planning future tree species compositions of forests. Given the intensive use of soil water by DF, it appears that DF can aggravate water conditions in watersheds with tense water balance (water consumption \approx atmospheric precipitation) in dry periods.

For more information see Summary at the end of the article.

Klíčová slova: lesnická hydrologie; douglaska; vodní bilance

Key words: forest hydrology; Douglas-fir; water balance

ÚVOD

Literární přehledy o douglasce tisolisté (*Pseudotsuga menziesii*/Mirb./Franco) v evropských podmínkách zpracovali např. KUBEČEK et al. (2014) nebo SCHMID et al. (2014). Vodnímu režimu dřevin a jejich porostů se v poslední době věnovali ACHARYA et al. (2018), MÓRICZ et al. (2018), VICENTE et al. (2018). Douglasce ve vztahu k vodě nebyla zatím věnována v České republice větší pozornost. Pouze mezi roky 2006–2009 se otázkami vody a douglasky zabývali ČERMÁK et al. (2007) a NADEZHINA et al. (2009, 2014). Vzhledem k diskusím o možnosti zvýšení zastoupení douglasky jako náhrady chřadnoucího smrku mají informace o vodním režimu douglasky a porostních směsí s douglaskou mimořádný význam zejména ve vztahu ke klimatickým výkyvům hrozcím povodněmi a suchem. Nedostatek domácích informací pak vedl k sestavení review především ze zahraniční literatury.

Přehled poznatků

Vodní režim douglasky a porostních směsí s douglaskou zahrnuje řadu témat, která je možno přehledně vyjádřit souborem českých (anglických) klíčových slov jako jsou: vodní režim (water regime), vodní bilance (water balance, water budget), hydrologie (hydrology), složky vodní bilance (water balance components), tj. porostní srážky (net precipitation, effective precipitation), podkorunové srážky (throughfall, direct throughfall and drip), tok po kmeni (stemflow), intercepce (interception losses), příjem vody (water uptake), transpirace (transpiration of crown, canopy), evapotranspirace (evapotranspiration), výpar z půdního povrchu a přízemní vegetace (evaporation from soil surface, forest floor and ground vegetation), svahový odtok (hillslope runoff), odtok povrchový (surface runoff, overland flow), odtok podpovrchový (subsurface flow, lateral subsurface runoff, subsurface stormflow, interflow, throughflow), odtok pod-

zemní (drainage to deeper layers, groundwater flow), průsak (percolation, vertical percolation into the underlying bedrock and recharging deep groundwater), průtok, odtok ve vodoteči (stream flow, runoff, discharge, drainage), vlhkost půdy (soil moisture), obsah vody v půdním profilu (soil water content, storage), hydraulická redistribuce vody v půdním profilu, hydraulický lift (hydraulic redistribution of soil water, hydraulic lift), podzemní voda (groundwater storage) – a to vše v porostech douglasky a s douglaskou v Americe a Evropě.

Podkorunové srážky, stok po kmeni, intercepční ztráty

V nadzemním prostoru lesního porostu se odehrávají důležité procesy transformace a distribuce srážek, a to jak v ojehlčené či olistěné korunové vrstvě, tak prostřednictvím nadzemní dendromasy. Sledování a hodnocení hydrického chování nadzemní biomasy patřilo u porostů s douglaskou k četným studiím jejího vodního režimu.

Šetření podkorunových srážek a stoku po kmeni, dohromady srážek porostních, pod hustými (průměrný korunový zápoj byl 75 %) 100 až 300 let starými douglaskovými porosty s přimíšenými dřevinami typickými pro douglaskové lesy západního Oregonu a Washingtonu prováděl ROTHACHER (1963). Výčetní tloušťka douglasek se pohybovala v průměru okolo 150 cm a výška kolísala od 49 do 61 m. Nadmořská výška měla rozpětí 490 až 1060 m. Průměrné atmosférické srážky představovaly za hydrologický rok ca 2340 mm. Z nich v nadmořské výšce ca 460 m spadlo mezi květnem a zářím okolo 14 %. Pod 1100 m n. m. padaly srážky převážně kapalně. Ve vegetačním období průměrné podkorunové srážky činily 76 % celkových letních srážek volné plochy. Podkorunové srážky kolísaly podle velikosti atmosférické srážky od 0 % při dešti menším než 1,5 mm (zřejmě skropná kapacita – pozn. autora) až k 82 % při deštích nad 1,5 mm. Hustota starých porostů se přitom pohybovala od 75 do 92 % a ovlivňovala velikost intercepce. Podkorunové srážky v mimovegetační době byly vyšší než v období vegetačním a dosahovaly ca 86 % srážek volné plochy. Atmosférické srážky vyšší než 200 mm produkovaly podkorunové srážky blížící se 96 % srážek volné plochy v hydrologickém roce. Stok po kmeni byl prakticky nevýznamný téměř u všech dřevin a činil pouze ca 0,27 % celkových srážek za hydrologický rok (ROTHACHER 1963).

Intercepční ztráty ve vegetačním období dvou stejně zakmeněných porostů douglasky, situovaných na prudkém jižním, resp. severním svahu, porovnávali HEUVELDOP et al. (1972). V 41letém douglaskovém porostu na jižním svahu a v 35letém douglaskovém porostu na severním svahu byly během let 1971 a 1972 sledovány srážky volné plochy, podkorunové srážky a stok po kmeni. Porosty byly od sebe vzdáleny ca 1000 m a ležely ve stejné nadmořské výšce. Srážky volné plochy dosahovaly v chladnějším a vlhčím roce 1971 115 % normálu, srážky v teplejším a sušším roce 1972 84 % normálu. V r. 1971 byly podkorunové srážky vyšší na jižním (72 %) než na severním svahu (66 %) a v r. 1972 byly nižší na jižním svahu (59 %) než na severním (66 %). Stok po kmeni byl v obou letech vyšší na jižním než na severním svahu, ale činil pouze 1–4 % srážek volné plochy. Douglaska tak vykazala v teplejším a sušším roce 1972 v důsledku teplotního režimu na svahu s jižní expozicí vyšší intercepční ztráty (HEUVELDOP et al. 1972).

Prostorové rozložení podkorunových srážek a dynamiku půdní vody v douglaskovém porostu modelovali BOUTEN et al. (1992). Modelové výsledky indikovaly, že prostorová distribuce ročního příjmu vody a perkolační toky byly silně ovlivněny rozložením podkorunových srážek, kdežto objemový obsah vody v půdě závisel primárně na fyzikálních vlastnostech půdy (BOUTEN et al. 1992).

Objemový obsah vody v půdě při obhospodařování porostů s douglaskou

Obsah vody v půdě hraje významnou roli pro příjem vláhy kořeny, pro vytváření a příjem živného roztoku i pro drenážní odtok půdou. Takové informace poskytl několik níže analyzovaných studií.

Objemovou vlhkost půdy na povodí o výměře 101 ha s porosty douglasky ve věku 330–500 let měřili v letech 1960–1980 v horských poměrech Oregon Cascade Range ADAMS et al. (1991). Nadmořská výška tam činila 480–1070 m n. m., průměrná teplota vzduchu 9,4 °C a průměrné roční srážky 2280 mm. V období 1962–1963 byla na povodí zmýčena jedna experimentální plocha a šetrně spálena. Na druhé ploše byl ponechán starý porost douglasky jako kontrola. V létě 1963 vrstva půdy o hloubce 120 cm a kamenitosti 22 % měla na holé seči a spáleništi obsah vody o 100 mm vyšší než pod kontrolním starým porostem. V průběhu roku 1967 obsah vody na spálené holoseči poklesl, až se rozdíl oproti kontrole stal deficitním ca o 20 mm, a to v důsledku rychlého zvětšení celkové biomasy vegetačního krytu. Deficitní rozdíl oproti kontrole pak setrval ve svrchních 30 cm půdního profilu až do konce měření v roce 1980. Rozdíly ve prospěch holoseče byly nejvyšší v letech 1963–1964, v roce 1965 docházelo k přechodu a od roku 1966 až do roku 1980 byla vlhkost na holosečném obnovovaném ploše nižší. Kolísání vlhkosti půdy na ploše obnovované přirozenou obnovou ovlivnilo obnovu lesa i hydrologii povodí. Porosty douglasky obnovované holou sečí a přirozenou regenerací se ekologicky chovaly podobně jako obnovované smrkové porosty, které měly výčetní tloušťku ca 11 cm (ADAMS et al. 1991).

Vláhové poměry v půdě po holosečném těžbě porostu douglasky a zpracování klesu sledovali na severu centrálního Washingtonu LOPUSHINSKY et al. (1992). Použili čtyři opatření týkající se nakládání s potěžeby zbytky: celoplošné pálení, nakupení a pálení, odstranění, ponechání. V horských poměrech během vegetačního období zůstal obsah vody v půdě při všech opatřeních mimo interval vadnutí obnovy douglasky, tudíž dostupnost půdní vody nebyla limitním faktorem (LOPUSHINSKY et al. 1992).

Obsahem vody v půdě při obhospodařování pozemků s agrolesnickým využíváním (agroforestry) se v Oregonu zabývali CARLSON et al. (1994), když porovnávali silvopastorální a lesnický hospodářský systém. Obsah vody v půdě v hloubce 50–100 cm byl v r. 1984 vyšší na plochách s agroforestry než na lesních plochách s douglaskou, ale v r. 1985 už nikoliv (suché jaro). Spasená píce neodebírala vodu stromům. Spásání rostlinného podrostu mohlo redukovat vodní stres stromů během suchých period snížením objemu vody, kterou by jinak odebraly nespasené pícniny (CARLSON et al. 1994).

Evapotranspirace při obhospodařování porostů s douglaskou

Evapotranspirace porostů s douglaskou rozhoduje nejen o ochlazení transpirující biomasy, ale také o vytváření vlhkého mikroklimatu v nadkorunové úrovni i o vysoušení půdy a vodním stresem.

Evapotranspiraci (ET) pro dvouetážový porost douglasky a stálezeleného listnatého poléhavého keře libavky shalon (*Gaultheria shallon*) modelovali KELLIHER et al. (1986). Přitom zjišťovali vliv odstranění spodní libavkové etáže. Douglaskový (DG) porost měl věk 31 let, hustotu 800 stromů.ha⁻¹, výčetní základnu 16 m².ha⁻¹ a průměrnou výšku 14 m. LAI horní DG etáže byl 6, spodní etáže (libavka) 3. Experimentální porost se nacházel na východním pobřeží Vancouver Islands na svahu SV expozice se sklonem do 10 %. Odstranění spodní etáže rezultovalo do naměření vyšších hodnot objemového obsahu vody v půdě ($\theta = 0,01-0,03 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) během dvou vegetačních period po zásahu. To korespondovalo s kalkulovanou intenzitou transpirace stromů v průměru 0,4 mm.den⁻¹ během druhé poloviny obou vegetačních období. Zvýšení transpirace douglasky jako výsledek odstranění podrostu libavky bylo největší tam, kde byl LAI před odstraněním spodní etáže nejvyšší (KELLIHER et al. (1986).

Potřebu upravit po těžbě prostředí pro úspěšný růst stromků (charakterizovaný výškou kmínků, jejich průměrem při povrchu terénu a objemem kmínků) obnovy douglasky, zejména teplotu a výdej vody sazenic, řešili v JZ Oregonu FLINT, CHILDS (1987). Otestovali 12 opatření v podobě zastíňování povrchu půdy, mulčování a regulace přízemní vegetace. Největší efekt měla ta opatření, která snižovala teplotu povrchu půdy a redukovala výpar z půdního povrchu a konkurenci přízemní vegetace v příjmu půdní vody (FLINT, CHILDS 1987).

Vodní stres a přežívání výsadby douglasky z let 1981, resp. 1982 zkoumali LIVINGSTON, BLACK (1987). Původně jednoleté krytokořenné sazenice douglasky (1-0) ukazovaly na jižním svahu Mount Arrowsmith v Britské Kolumbii vysokou míru přežívání. Bez ochranných opatření přežilo ve dvou různě starých výsadbách 72 %, resp. 82 % jedinců. S ochrannými opatřeními (nakláněním výsadby k JZ, aplikací stínících kartonů, zavlažování či kombinací zavlažování se stínícími kartony) pak přežívání v různě starých výsadbách činilo 81 %, resp. 95 % (LIVINGSTON, BLACK 1987).

Na výzkum vodní bilance douglasky ve váhovém lyzimetru umístěném blízko Seattle (stát Washington) se zaměřili FRITSCHEN et al. (1977). Evapotranspiraci 28 m vysoké douglasky stanovovali během podzimu (duben až prosinec) 1972–1974. Průměrná intenzita ET byla determinována ve vztahu k ploše korunové projekce stromu a činila 1,8 mm.den⁻¹ v r. 1972, na 2,0 mm.den⁻¹ v r. 1973 a 2,5 mm.den⁻¹ v r. 1974. Pro měsíční období se ET pohybovala od 1,3 do 3,6 mm.den⁻¹. V r. 1972 představovala ET 46 % z celkových srážek, včetně zavlažování pro udržení stejné vlhkosti s okolím, a intercepce (I) činila 36 % z ET. V r. 1973 byla ET = 51 % z celkových srážek a I = 37 % z ET. V r. 1974 pak ET dosáhla 69 % celkových srážek a I se rovnala 24 % z ET (FRITSCHEN et al. 1977).

Odtok po těžbách a hmyzích kalamitách porostů s douglaskou

Odtok z povodí s porosty douglasky se mění v důsledku těžby dřeva, obnovních sečí, ale i v důsledku kalamitního zničení lesa a holin.

Odtok po obnovních těžbách porostů s douglaskou studovali HARR (1980) a HARR et al. (1982). V první studii HARR (1980) zkoumal odtok na malých povodích jednak po skupinové (kotlíkové) těžbě 130leté douglasky (skupinová holosečná těžba na 25 % plochy povodí), jednak na povodí bez zásahu. Roční vodnost a velikost okamžitých kulminačních průtoků se po těžbě významně nezměnily. Po těžbě se nicméně významně snížily nízké průtoky (HARR 1980). Ve druhé studii HARR et al. (1982) zjistili, že po holosečné těžbě se v průběhu 4 let roční odtoková výška v holosečeném povodí zvýšila v průměru o 380 mm a v povodí po clonosečné těžbě (odstraněno 60 % celkové výčetní základny) o 200 mm. Velikost ani časování kulminačních průtoků se po holosečné ani po clonosečné těžbě významně nezměnily. Nízké průtoky se během suchého roku v holosečeném povodí vyskytly pouze během 8 dnů a v clonosečeném povodí jen 2 dnů (HARR et al. 1982).

Náhlé změny podmínek vznikají i bez přispění lidské činnosti. Tak např. dopady hmyzí kalamity na změny v odtoku pozorovali HELVEY, TIEDEMANN (1978). Po katastrofální defoliaci douglaskových porostů štetconošem douglaskovým v horách Oregonu a Washingtonu v letech 1972–1974 byly na třech povodích studovány odtokové změny v ročním a letním objemu odtoku a v kulminacích průtoků. Roční odtoková výška z povodí řeky Umatilla (352 km²), kde nastala 25procentní redukce asimilačního aparátu, byla o 132 mm vyšší než predikovaná hodnota pro nepoškozené porosty. Žádné změny v odtoku nebyly detekovány na severní ani na jižní větvi řeky Walla Walla, kde redukce asimilačního aparátu byla jen 16%, resp. 13% (HELVEY, TIEDEMANN 1978). To odpovídá HIBBERTOVU (1967) odvození ze světové literatury, že k významnému zvýšení odtoku dochází až po destrukci lesního porostu alespoň na 20 % povodí. Na žádném z povodí nebyly detekovány změny kulminačních průtoků (HIBBERT 1967).

Hydraulická redistribuce půdní vody v porostech s douglaskou

Hydraulická redistribuce půdní vody je aktuálně sledovaným procesem. Jak tento proces může fungovat v lese, popsali např. BROOKS et al. (2002). Jedním z aspektů strukturální složitosti zápoje korunové vrstvy lesního porostu je architektura podzemního kořenového systému, která ovlivňuje vzorce využívání půdní vody stromy a nakonec transpiraci korunové vrstvy. Hluboko kořenicí stromy a další rostliny mohou hydraulicky vyzdvihovat vodu z vlhkých půdních horizontů, nacházejících se i několik metrů pod zemí, do sušších vrstev půdního profilu, kde je její část uvolňována do půdy. Tato redistribuovaná voda pak může být dostupná té samé rostlině i sousedícím rostlinám stejného nebo jiného druhu, které mají aktivní kořeny v téže vrstvě. Proces je chápán jako převážně pasivní, vyžadující pouze gradient vodního potenciálu z vlhkých půdních vrstev skrze kořenový xylém do suchých půdních vrstev a relativně nízkou rezistenci k reverznímu toku z kořenů. Ačkoliv směr pohybu vody je typicky vzhůru do sušších mělkých vrstev půdy, nedávná měření mízního toku v kulových a laterálních kořenech ukázala, že mohou vodu redistribuovat buď dolů, nebo laterálně z vlhkých svrchních horizontů půd do sušších půdních horizontů. Vzhledem k pozorovanému obousměrnému charakteru tohoto pravděpodobně pasivního procesu byl k podchycení jeho podstaty navržen komplexnější termín hydraulická redistribuce, který původně používané označení hydraulický lift zobecňuje.

Hydraulická redistribuce obvykle nastává v noci, kdy je transpirace dostatečně zmenšena, aby umožnila vodnímu potenciálu kořenů překonat sušší část půdního profilu. Znamka hydraulické redistribuce spočívá hlavně v časových průbězích půdního vodního potenciálu, ukazujících zvýšení vodního potenciálu v sušších půdních vrstvách během noci nebo jiných period, kdy je transpirace redukována. Na základě experimentů s deuterizovanou vodou se vyvozuje, že hydraulická redistribuce může významně přispívat do vodní bilance nejen rostliny, která ji využívá pro sebe, ale také pro sousední rostliny jiného druhu. Vedle potenciálního pozitivního vlivu na vodní bilanci rostliny během suchých period může hydraulická redistribuce také zvětšit přístupnost živin v mělkých půdních vrstvách a umožnit příjem živin mělkými jemnými kořeny.

Výskyt hydraulické redistribuce půdní vody zkoumali BROOKS et al. (2002) v plně zakmeněném 20letém porostu douglasky se střední výškou 16 m, který se nacházel v nadmořské výšce 370 m v oblasti pacifických severozápadních jehličnatých lesů. Průměrné roční srážky byly sice vzhledem k velké akumulaci sněhu v zimě ca 2500 mm, letní sucha však trvala 3 nebo i více měsíců (např. červen až srpen). Během nich spadlo pouze 101 mm srážek, a to převážně v červnu, v srpnu pak jen 2 mm. V tomto období douglaska prokázala noční hydraulickou redistribuci půdní vody do vrstev 20–60 cm, čerpané z vrstev 60–100 cm. V srpnu bylo 28 % denní spotřeby vody čerpáno z noční hydraulické redistribuce probíhající z hloubky až 2 m. Denní ztráty výparem činily od července do září 1,0–1,4 mm. V horních 50 cm půdy se rozprostíralo až 90 % biomasy jemných kořenů. Z hloubek do 60 cm pocházelo během léta 12–14 % denního evapotranspiračního toku. Při absenci hydraulické redistribuce by nízký obsah vody v půdě pozorovaný na konci 10denní monitorovací suché periody byl dosažen už o 2 dny dříve. BROOKS et al. (2006) navazovali na svůj výzkum hydraulické redistribuce půdní vody v mladém porostu douglasky (Brooks et al. 2002). Hydraulická redistribuce vody v půdě byla v časném létě zanedbatelná. V pozdním létě (srpen) se zvýšila na 0,17 mm.den⁻¹. Ve 20–60 cm půdní vrstvě byl pak celkový potenciál půdní vody vyjádřený sacím tlakem 1,0 MPa; přítom bod vadnutí se rovná 1,5 MPa. Při maximální hydraulické redistribuci se voda doplňovala přibližně 40 % vody denně čerpané z půdních vrstev 20–60 cm (tedy z horní vrstvy půdy). Zadešťovací experiment na malých plochách demonstroval, že redistribuovaná voda byla odebírána přízemní vegetací až ze vzdálenosti 5 m od zadešťovacího zdroje. Hydraulická redistribuce vody v půdě byla představována pasivním tokem prostřednictvím ko-

řenů uvnitř půdy jak laterálně, tak směrem dolů podle gradientů vodního potenciálu. Termín hydraulická redistribuce půdní vody je proto obsáhlejší než paralelně užívaný termín hydraulický lift.

Komparativní studii transpirace a příjmu vody douglasky a smrku rostoucích ve stejných přírodních poměrech Moravské pahorkatiny provedli NADEZHINA et al. (2014). Studie prokázala menší citlivost douglasky k deficitu půdní vody; tu byla za sucha schopna odebírat z hlubších půdních vrstev efektivněji než smrk. Biologické vlastnosti douglasky v suchých periodách měly za následek vysoké požadavky na celkový výpar a vysychání hlubších vrstev půdy. Douglaska může svou hydraulickou redistribucí, resp. hydraulickým liftem (zdvihem) vody v půdě nadlepšovat příjem vody přizemní vegetací.

U mladých (24 let) i dospělých (450 let) douglasek MEINZER et al. (2004) pozorovali existenci konvergence v biofyzikálním řízení využití a redistribuce půdní vody v horní půdní vrstvě (60 cm) s největší hustotou jemných kořenů (průměr menší než 1 mm). MEINZER et al. (2005) dále prokázali, že v mladých douglaskách (24 let) se redistribuce vody děje ze tří čtvrtin jejím transportem v nadzemní biomase (krytosemenné přitom transportují značně větší kvanta vody než konifery). MEINZER et al. (2007) také zjistili, že ve smíšeném 450letém porostu douglasky a tsugy v oblasti jihozápadního Washingtonu byla průměrná plocha kořenů v horních 60 cm půdy významně větší v blízkosti stromů tsugy. Nicméně sezónní extrakce vody byla i při menší ploše kořenů douglasky významně vyšší v její blízkosti a vedla k významně nižší zásobě vody v blízkosti stromů douglasky v letním suchém období v hloubkách 15–65 cm. To bylo způsobeno větší hnací silou pro příjem vody douglaskou, nikoliv rozdíly v hydraulických vlastnostech kořenů obou dřevin. Maximální intenzita hydraulické redistribuce byla větší poblíž douglasky, protože se u ní nacházely nižší hodnoty objemového obsahu vody v půdě. To rezultovalo v příkřejší gradient celkového potenciálu půdní vody mezi horní a spodnější vrstvou půdy, který byl hnací silou pro výtok (exsudaci) vody z mělkých kořenů.

ZÁVĚRY

Studium vybraných informačních zdrojů týkajících se vodního režimu douglasky a porostů s douglaskou přineslo soubor důležitých poznatků. V rámci přírodních a lesnických poměrů popsaných v review lze prezentovat závěry pro vodní režim douglasky a porostů s douglaskou.

V nadzemním prostoru lesního porostu se obecně odehrávají důležité procesy transformace a distribuce srážek, zasahující do půdní a kořenové sféry. Z analyzovaných informačních zdrojů vyplynulo, že douglaska silně ovlivnila distribuci porostních srážek. Objemový obsah vody v půdě však závisel primárně na fyzikálních vlastnostech půdy. Na jižním svahu byly intercepční ztráty v porostu douglasky vyšší než na svahu severním. Průměrné letní podkorunové srážky představovaly 76 % srážek volné plochy, průměrné zimní podkorunové srážky byly vyšší, když dosahovaly 86 % srážek volné plochy. Stok po kmeni byl zanedbatelný ve vegetačním i mimovegetačním období. Při srážce nad 200 mm se výše podkorunových srážek blížila výši srážek volné plochy, když podíl podkorunových srážek dosahoval 96 %.

Významnou roli pro příjem vláhy kořeny, pro vytváření a příjem živného roztoku i pro drenážní odtok půdou hraje půdní voda. Ukázalo se, že odstranění poléhavého keřovitého podrostu, nacházejícího se pod horní etáží douglasky, rezultovalo během dvou vegetačních period po zásahu do naměřených vyšších hodnot objemového obsahu vody v půdě. To korespondovalo s kalkulovanou intenzitou transpirace DG stromů v průměru 0,4 mm.den⁻¹ během druhé poloviny obou vegetačních období. V jiném případě byla po holosečné těžbě douglasky a plošném pálení objemová vlhkost svrchní vrstvy půdy vyšší než v kontrolním DG porostu. Po 4 letech se v důsledku obnovy hydricky funkční vegetace na holoseči stav obrátil a objemová vlhkost svrchní vrstvy půdy

zde zůstávala po dlouhou dobu nižší než na kontrole. Při obnově porostů vodní režim výsadby douglasky příznivě ovlivňovala opatření snižující teplotu půdy a výdej vody sazenicemi.

Odtok z povodí se obecně mění v důsledku těžby dřeva, obnovních sečí, ale i kalamitního zničení lesa a holin. Holosečná obnova douglasky na ploše povodí zvýšila celkový objem odtoku ve vodoteči více než těžba clonosečná. Kulminační průtoky se nezměnily, nízké průtoky se zmenšily a po holosečné obnově se vyskytly v 8 dnech, po clonosečné ve 2 dnech. Kalamitní těžba následkem přemnožení štětkonoše douglaskového se na odtokových poměrech v povodí projevila po defoliaci na 25 % porostní plochy. Celková roční odtoková výška byla o 132 mm vyšší než hodnota pro nepoškozené porosty. Potvrdily se tak souhrnné výsledky, že změnu odtoku vyvolá destrukce alespoň 20 % plochy povodí.

Řada studií prokázala, že v porostech s douglaskou nastává hydraulická redistribuce půdní vody. Douglaska je totiž schopná odebírat vodu z hlubších vrstev půdy mnohem efektivněji než smrk. To jí umožňuje transpirovat více vody, zvláště během suchých period, a také růst rychleji než smrk (NADEZHINA et al. 2014). Zmíněné biologické vlastnosti by měly být brány do úvahy při plánování budoucí druhové skladby lesů (viz ALBERT et al. 2018), protože mohou mít podstatný dopad na pěstování i hydrologii.

I když se v literatuře objevují náznaky, že douglaska může redistribucí půdní vody dotovat svrchní vrstvu půdy (BROOKS et al. 2006), musí být tyto indikace prokázány také v domácích poměrech, např. v vztahu ke smrku (NADEZHINA et al. 2014) nebo buku (ŠACH, ČERNHOUS 2015).

Za předpokladu potenciální náhrady v současné době kalamitně chřadnoucího smrku douglaskou, by zastoupení douglasky v nižších polohách (2.–4. LVS) mohlo být do 20 %, ve vyšších polohách (5.–7. LVS) potom maximálně do 10 % (NOVÁK et al. 2018). Vysoký odběr půdní vody douglaskou může, zvláště pak v suchých periodách, zhoršovat vodní poměry v povodích s napjatou vodní bilancí (spotřeba vody ≈ atmosférické srážky).

Poděkování:

Výsledek vznikl za podpory Ministerstva zemědělství – institucionální podpora MZE-RO0118 – a z podpory výzkumu a vývoje z veřejných prostředků MZe projektu NAZV QK1810415 „Vliv dřevinné skladby a struktury lesních porostů na mikroklima a hydrologické poměry v krajině“ a projektu QJ1520299 „Uplatnění douglasky tisolisté v lesním hospodářství v ČR“.

LITERATURA

- ACHARYA B.S., KHAREL G., ZOU CH.B. BRADFORD P. WILCOX B.P., HALIHAN T. 2018. Woody plant encroachment impacts on groundwater recharge: A review. *Water*, 10: 1466. DOI: 10.3390/w10101466
- ADAMS P.W., FLINT A.L., FREDRIKSEN R.L. 1991. Long-term patterns in soil moisture and revegetation after clear-cut of a Douglas-fir forest in Oregon. *Forest Ecology and Management*, 41, (3–4): 249–263. DOI: 10.1016/0378-1127(91)90107-7
- ALBERT M., NAGEL R.-V., SUTMÖLLER J., SCHMIDT M. 2018. Quantifying the effect of persistent dryer climates on forest productivity and implications for forest planning: a case study in northern Germany. *Forest Ecosystems*, 5: article number 33. DOI: 10.1186/s40663-018-0152-0
- BOUTEN W., HEIMOVAARA T.J., TIKTAK A. 1992. Spatial patterns of throughfall and soil water dynamics in a Douglas fir

- stand. *Water Resources Research*, 28, (12): 3227–3233. DOI: 10.1029/92WR01764
- BROOKS J.R., MEINZER F.C., COULOMBE R., GREGG J. 2002. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests. *Tree Physiology*, 22: 1107–1117.
- BROOKS J.R., MEINZER F.C., WARREN J.M., DOMEK J.C., COULOMBE R. 2006. Hydraulic redistribution in a Douglas-fir forest: lessons from system manipulations. *Plant, Cell and Environment*, 29: 138–150. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2005.01409.x
- CARLSON D.A., SHARROW S.H., EMMINGHAM W.H., LAVENDER D.P. 1994. Plant-soil-water relation in forestry and silvopastoral systems in Oregon. *Agroforestry Systems*, 25: 1–12. DOI: 10.1007/BF00705702
- ČERMÁK J., KUČERA J., BAUERLE W.L., PHILLIPS N., HINCKLEY T.M. 2007. Tree water storage and its diurnal dynamics related to sap flow and changes in stem volume in old-growth Douglas-fir trees. *Tree Physiology*, 27 (2): 181–198.
- FLINT L.E., CHILDS S.W. 1987. Effects of shading, mulching and vegetation control on Douglas-fir seedling growth and soil water supply. *Forest Ecology and Management*, 18: 189–203. DOI: 10.1016/0378-1127(87)90160-5
- FRITSCHEN L.J., HSIA J., DORAISWAMY P. 1977. Evapotranspiration of a Douglas fir determined with a weighing lysimeter. *Water Resources Research*, 13, (1): 145–148. DOI: 10.1029/WR013i001p00145
- HARR R.D. 1980. Streamflow after patch logging in small drainages within the Bull Run Municipal Watershed, Oregon. Research Paper, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service: 16 s. PNW-268.
- HARR R.D., LEVNO A., MERSEREAU R. 1982. Streamflow changes after logging 130-year-old Douglas fir in two small watersheds. *Water Resources Research*, 18 (3): 637–644. DOI: 10.1029/WR018i003p00637
- HELVEY J.D., TIEDEMANN A.R. 1978. Effects of defoliation by Douglas-fir tussock moth on timing and quantity of streamflow. Research Note, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture: 13 s. PNW-326.
- HEUVELDOP J., MITSCHERLICH G., KÜNSTLE E. 1972. Über Kronendurchlass, Stammablauf und Interzeptionsverlust von Douglasienbeständen am Süd- und Nordhang. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 143 (6): 117–121.
- HIBBERT A.R. 1967. Forest treatment effects on water yield. In: Sopper, W.E., H.W. Lull, H.W. (eds.): *Forest hydrology. Proceedings of an international symposium*. Oxford, Pergamon Press: 527–543. Dostupné na/Available on: <http://coweeta.uga.edu/publications/842.pdf>
- KELLIHER F.M., BLACK T.A., PRICE D.T. 1986. Estimating the effects of understory removal from a Douglas fir forest using a two-layer canopy evapotranspiration model. *Water Resources Research*, 22 (13): 1891–1899. DOI: 10.1029/WR022i013p01891
- KUBEČEK J., ŠTEFANČÍK I., PODRÁZSKÝ V., LONGAUER R. 2014. Výsledky výzkumu douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii* Mirb./ Franco) v České republice a na Slovensku – přehled. *Lesnický časopis – Forestry Journal*, 60: 116–124.
- LIVINGSTON N.J., BLACK T.A. 1987. Water stress and survival of three species of conifer seedlings planted in a high elevation southfacing clear-cut. *Canadian Journal of Forest Research*, 17 (9): 1115–1123. DOI: 10.1139/x87-170
- LOPUSHINSKY W., ZABOWSKI D., ANDERSON T.D. 1992. Early survival and height growth of Douglas-fir and lodgepole pine seedlings and variations in site factors following treatment logging residues. Research Paper, Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service: 22 s. PNW-RP-451. DOI: 10.2737/PNW-RP-451
- MEINZER F.C., BROOKS J.R., BUCCI S., GOLDSTEIN G., SCHOLZ F.G., WARREN J.M. 2004. Converging patterns of uptake and hydraulic redistribution of soil water in contrasting woody vegetation types. *Tree Physiology*, 24 (8): 919–928.
- MEINZER F.C., BOND B.J., WARREN J.M., WOODRUFF D.R. 2005. Does water transport scale universally with tree size? *Functional Ecology*, 19 (4): 558–565. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2005.01017.x
- MEINZER F.C., WARREN J.M., BROOKS J.R. 2007. Species-specific partitioning of soil water resources in an old-growth Douglas-fir-western hemlock forest. *Tree Physiology*, 27 (6): 871–880.
- MÓRICZ N., GARAMSZEGI B., RASZTOVITS E., BIDLÓ A., HORVÁTH A., JAGICZA A., ILLÉS G., VEKERDY Z., SOMOGYI Z., GÁLOS B. 2018. Recent drought-induced vitality decline of black pine (*Pinus nigra* Arn.) in South-West Hungary – Is this drought-resistant species under threat by climate change? *Forests*, 9 (7): 414. DOI: 10.3390/f9070414
- NADEZHINA N., STEPPE K., PAUW D.J.W. DE, BEQUET R., ČERMAK J., CEULEMANS R. 2009. Stem-mediated hydraulic redistribution in large roots on opposing sides of a Douglas-fir tree following localized irrigation. *New Phytologist*, 184, (4): 932–943. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2009.03024.x
- NADEZHINA N., URBAN J., ČERMÁK J., NADEZHIN V., KANTOR P. 2014. Comparative study of long-term water uptake of Norway spruce and Douglas-fir in Moravian upland. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62 (1): 1–6. DOI: 10.2478/johh-2014-0001
- NOVÁK J., KACÁLEK D., DUŠEK D., LEUGNER J., SLODIČÁK M., ŠIMERDA L. 2018. Tvorba směsí s douglaskou. Certifikovaná metodika. Strnady, Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti: 27 s. Lesnický průvodce 14/2018.
- ROTHACHER J. 1963. Net precipitation under a Douglas-fir forest. *Forest Science*, 9 (4): 423–429.
- SCHMID M., PAUTASSO M., HOLDENRIEDER O. 2014. Ecological consequences of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) cultivation in Europe. *European Journal of Forest Research*, 133:13–29. DOI: 10.1007/s10342-013-0745-7
- ŠACH F., ČERNOHOUS V. 2015. Hydraulický lift buku pro smrk: potenciálně významný ekosystémový proces pro pěstování smrkových porostů v souvislosti s klimatickou změnou oteplování. *Zprávy lesnického výzkumu*, 60 (1): 53–63.
- VICENTE E., VILAGROSA A., RUIZ-YANETTI S., MANRIQUE-ALBA À., GONZÁLEZ-SANCHÍS M., MOUTAHIR H., CHIRINO E., DEL CAMPO A., BELLOT J. 2018. Water balance of Mediterranean *Quercus ilex* L. and *Pinus halepensis* Mill. forests in semiarid climates: a review in a climate change context. *Forests*, 9: DOI: 10.3390/f9070426

WATER REGIME OF DOUGLAS-FIR AND FOREST STANDS WITH DOUGLAS-FIR: REVIEW

SUMMARY

Impacts of Douglas-fir (DF) on forest hydrology have been studied marginally in the Czech Republic. A few publications (ČERMÁK et al. 2007; NADEZHDIINA et al. 2009, 2014) resulted from research conducted in 2006–2009. Both production and effects of DF on its environment were also discussed by researchers (KUBEČEK et al. 2014; SCHMID et al. 2014) and foresters.

Water regime of DF and tree species mixtures with DF can be covered using following water balance (budget) key words such as net precipitation, effective precipitation, throughfall, direct throughfall and drip, stemflow, interception, water uptake, evapotranspiration, transpiration of crown or canopy, evaporation from soil surface, forest floor and ground vegetation, hillslope runoff, surface runoff, overland flow, subsurface flow, lateral subsurface runoff, subsurface stormflow, interflow, throughflow, drainage to deeper layers, groundwater flow, percolation, groundwater recharge, groundwater storage, stream flow, runoff, discharge, drainage, soil moisture, soil water content or storage, hydraulic soil water redistribution, hydraulic lift. Although some studies about tree species effects on water cycle have been released (ACHARYA et al. 2018; MÓRICZ et al. 2018), the synthesis dealing with relationship of water regime and DF was missing in the Czech Republic.

The important processes of transformation and distribution of precipitation take place in the aboveground space of forest stands and they extend also into soil and root zone. Distribution of net precipitation by DF was strongly influenced by the canopy layer but volumetric soil water content depended on physical soil properties (BOUTEN et al. 1992). Interception losses in the DF stand were higher on the southern slope than on northern one (HEUVELDOP et al. 1972). Average summer throughfall represented 76% of open-area precipitation; average winter throughfall represented 86% of open-area precipitation. Stemflow was negligible both in a growing and in a dormant season. Rainfall higher than 200 mm resulted in throughfall equal to 96% of the open area precipitation (ROTHACHER 1963).

The volumetric soil water content (obsolete soil moisture) plays a substantial role for water uptake by roots, for creating of soil nutrient solution and also for water drainage through the soil. A few studies brought about that information. Removal of *Gaultheria shallon* understory moderately increased volume content of soil water but distinctly increased total potential of soil water under Douglas-fir (KELLIHER et al. 1986). After clearcutting logging and broadcast burning, the volume content of soil water in the soil surface layer was higher than that in the control DF stand. The values reversed after four years in consequence of clear-cut vegetation restoration. The volume soil water content in the soil surface layer was then remaining lower on the clear-cut for a long time when compared to the control DF stand (ADAMS et al. 1991). Water regime of DF plantations can be modified by treatments decreasing soil surface temperature and reducing competition of ground vegetation (FLINT, CHILDS 1987).

Water runoff from the catchment with DF in stand composition varies in consequence of regeneration fellings and logging, and of course in consequence of salvage cuttings and cleared areas. Clear-felled DF regeneration within a catchment area increased total stream runoff more than shelterwood felling. Peak flows did not change but low flows decreased. If clearcutting was used, the low flows occurred in eight days, and in shelterwood cutting it occurred only in two days (HARR 1980; HARR et al. 1982). Salvage felling after *Orgyia pseudotsugata* outbreak influenced runoff conditions in watersheds due to more than 25% defoliation. Total annual runoff was by 0.004 mm·ha⁻¹ greater than the value in undamaged forest stands. It confirmed worldwide results that total runoff changes if at least 20% of catchment's forested area is destroyed (HIBBERT 1967).

DF is able to use water from deeper soil layers more effectively than Norway spruce (NS). This enables DF to transpire more water, especially during dry periods and also to grow faster than NS (NADEZHDIINA et al. 2014). Mentioned biological characteristics should be taken into account for future tree species composition of the forests (see ALBERT et al. 2018), because they may have substantial both silvicultural and hydrological impact.

Even though indications of DF capability of soil water redistribution within the surface soil layer occur (BROOKS et al. 2006), it must be proved also in the conditions of the Czech republic, e.g. in relation to NS (NADEZHDIINA et al. 2014) or European beech (BE) (ŠACH, ČERNOHOUS 2015).

Provided that substitutions of declined NS by DF are done, on lower sites (2nd oak with beech – 4th beech vegetation domains), the DF share could be maximally 20%, whereas on upper sites (5th beech with fir – 7th spruce with beech vegetation domains) could share maximally 10% (NOVÁK et al. 2018). Especially in dry periods, intensive soil water consumption by DF can aggravate water conditions in watersheds with tense water balance (water consumption ≈ atmospheric precipitation).

Zasláno/Received: 09. 01. 2019

Přijato do tisku/Accepted: 06. 02. 2019