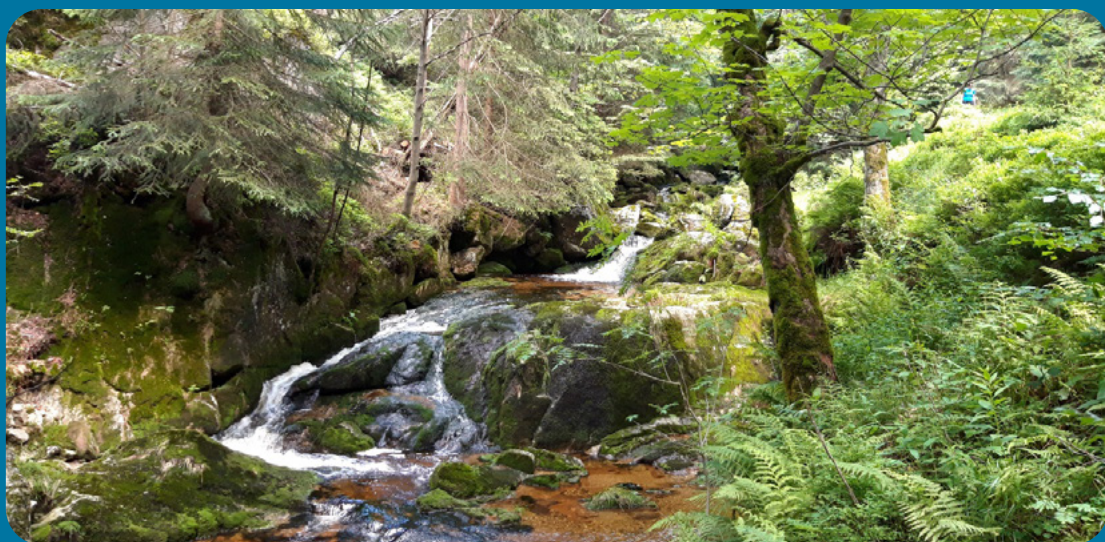


VODA V LESNÍCH EKOSYSTÉMECH



Vít Šrámek
Radek Pokorný
Petr Kupec
a kolektiv

VODA V LESNÍCH EKOSYSTÉMECH

**Vít Šrámek
Radek Pokorný
Petr Kupec
a kolektiv**

2023

Seznam autorů:

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Jíloviště-Strnady,
útvár Ekologie lesa:

Ing. Věra Fadrhonsová

Mgr. Kateřina Hellebrandová Neudertová, Ph.D.

doc. Ing. Vít Šrámek, Ph.D.

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Výzkumná stanice Opočno:

Ing. Vladimír Černošou, Ph.D.

Ing. František Šach, CSc.

Ing. Ondřej Špulák, Ph.D.

Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav zakládání a pěstění lesů:

Dr. Matjaž Čater

doc. Ing. Radek Pokorný, Ph.D.

Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav inženýrských staveb,
tvorby a ochrany krajiny:

Ing. Petr Čech

Ing. Jan Deutscher, Ph.D.

Ing. Ondřej Hemr

doc. Ing. Petr Kupec, Ph.D.

prof. Ing. Václav Tlapák, CSc.

Seznam autorů fotografií

Archiv VÚLHM VS Opočno: obr. 1.1

Vít Šrámek: přední a zadní strana obálky, obr. 2.5a, 2.6, 5.2

Ondřej Špulák: obr. 3.1–3.6

Radek Pokorný: obr. 2.5b

Petr Kupec: obr. 6.2–6.4, 7.2, 7.4

Petr Čech: obr. 8.1, 8.2

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 7 |
| 1 Funkce lesa a voda | 9 |
| 1.1 Klimatická funkce lesa | 11 |
| 1.2 Hydrická a vodohospodářská funkce lesa | 12 |
| 2 Srážky na volné ploše a v lesním porostu | 16 |
| 2.1 Srážky | 16 |
| 2.2 Intercepce | 21 |
| 2.3 Horizontální srážky | 26 |
| 2.4 Stok po kmeni | 26 |
| 2.5 Ekologický význam intercepce | 28 |
| 3 Sněhové srážky a sních | 33 |
| 4 Výpar z lesa – evapotranspirace lesních porostů | 44 |
| 4.1 Transpirace listů a větví | 46 |
| 4.2 Transpirace jednotlivých stromů | 49 |
| 4.3 Transpirace lesních porostů | 53 |
| 5 Monitoring malých lesních povodí | 63 |
| 5.1 Základní údaje o sledovaných povodích | 63 |
| 5.2 Sledování a hodnocení klimatických a hydrologických parametrů | 65 |
| 5.3 Závěr | 74 |
| 6 Monitoring lesních mikropovodí | 75 |
| 6.1 Východiska monitoringu mikropovodí | 77 |
| 6.2 Vlastní monitoring mikropovodí | 77 |
| 6.3 Časové a prostorové rámce využití monitoringu mikropovodí | 81 |
| 7 Lesnické meliorace, zadržování vody v lesích | 85 |
| 7.1 Historie | 85 |
| 7.2 Vlastní lesnické meliorace a hrazení bystřin | 87 |
| 8 Lesní dopravní síť | 97 |
| 8.1 Lesní cesty | 99 |
| 8.2 Údržba, opravy, rekonstrukce a rekultivace lesní dopravní sítě | 105 |
| 8.3 Trasy pro lanovkové a letecké soustředování dříví | 106 |
| 8.4 Trasy pro rekreační dopravu | 107 |

Poděkování

Publikace byla zpracována v rámci sumarizace výsledků řešení projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum QK1810415 „Vliv dřevinné skladby a struktury lesních porostů na mikroklima a hydrologické poměry v krajině“.

Úvod

Lesy v současné době pokrývají více než 30 % pevniny a není tedy divu, že se významně podílejí nejen na globálním koloběhu vody, ale také na udržení celkové rovnováhy – homeostáze – naší planety. K té přispívají ovlivňováním energetické bilance, poutáním uhlíku a také svou rolí v hydrologickém cyklu, a to jak v globálním měřítku, tak na regionální úrovni. V našem středoevropském prostoru souvislost lesů a vody vnímáme obzvláště citlivě, vždyť naprostá většina pramenů, které naši krajinu sytí vodou, se nachází přímo v lesích nebo v jejich blízkosti. Je to voda, která umožňuje existenci lesů, nebo jsou to lesy, které zajišťují dostatek vody? Dostupnost vláhy je pro dřeviny pochopitelně zcela zásadní, ale i opačný pohled na tuto rovnici dává dobrý smysl.

V současné době žijeme v období, kdy jsou stále častěji zaznamenávány extrémní projevy počasí spojované především s globální změnou klimatu. Předkládané scénáře dalšího vývoje navíc naznačují, že v dosavadních obdobích vysokých letních teplot, mírných zim či sucha pociťujeme zatím spíše počáteční ochutnávku budoucí reality. V této situaci se projevují obavy o budoucnost lesů i dostupnost vodních zdrojů. Rozloha lesů v Evropě i České republice v posledních desetiletích roste, nicméně jejich zdravotní stav není optimální. Máme například čerstvou zkušenost s tím, jak teplá a suchá období v letech 2015 a 2018 výrazně přispěla k rozvoji kůrovcové kalamity. Ta vedla k rychlému nárůstu holin a v nejhůře postižených lokalitách i k výrazné – byť doufejme, že přechodné – proměně vzhledu krajiny. Vede dočasné odlesnění ke zvýšené dostupnosti vody, či k vysychání? Pro obě možné odpovědi existují určité argumenty, i když v případě „dočasného“ odlesnění je na místě hovořit spíše o „dočasně“ zvýšené dostupnosti vody, ale zároveň i možném rozkolísání stavu vody ve zdrojích, jež může mít řadu negativních důsledků – od zvýšení rizika povodní po zhoršenou kvalitu vody.

Na jednoduché otázky tohoto typu neexistují jednoznačné odpovědi, které by zahrnovaly reakce na úrovni stromu, lesního porostu, krajinného celku i kontinentu. Proto jsme se rozhodli sestavit publikaci, která by shrnovala základní poznatky o vodě v lesních ekosystémech a zároveň alespoň z části představila dlouhodobá měření, která mají platnost pro náš region. Při zpětném pohledu je zřejmé, že jsme nedokázali podchytit všechny aspekty vody v ekosystému – jde tedy spíše o určitý výběr z této problematiky. Kromě kapitol, které se zabývají obecně jednotlivými složkami vodní bilance, jsou prezentována i dlouhodobá měření na některých lesních povodích malých vodních toků, stejně jako nově zahajovaná měření v menších krajinných celcích – mikropovodích. Zahrnuta je i problematika hrazení bystřin a lesnických meliorací, které představují historické obory pro úpravu vodních poměrů a jejichž postupy jsou v současné době stále více využívány pro projekty posilující zadržování vody v krajině. Stejně tak je popsána i problematika lesní cestní sítě, jejímž primárním účelem je sice zpřístupnění lesů pro hospodářskou činnost a rekreaci, ale zároveň představuje asi nejvýraznější zásah do přirozeného pohybu vody v lesních komplexech. Právě vhodné postupy lesnického hospodaření považujeme za jeden z významných nástrojů pro zmírnění dopadů změny klimatu, a to nejen v globálním, ale především v regionálním měřítku. Pro rozhodování o vhodnosti lesnických opatření je však potřeba opírat se o odborně podložené informace a argumenty. Snad k tomu malou měrou přispěje i tato publikace.

Vít Šrámek

1 Funkce lesa a voda

Vladimír Černošous, František Šach

Les je důležitou součástí našeho životního prostředí. Bez vlivu člověka by lesy pokrývaly naprostou většinu střední Evropy. V průběhu utváření středoevropské krajiny byly lesy postupně lidskou činností vytlačovány na stanoviště nevhodná pro zemědělství a osídlení. Tereziánský katastr z poloviny 18. století evidoval v českých zemích 1 118 tis. ha lesů. Později docházelo k zalesňování málo produktivních pozemků a v současné době je rozloha lesů u nás více než dvojnásobná. Lesy byly obnovovány zejména za účelem produkce dřeva, nicméně vždy přinášely vlastníkům i celé společnosti řadu dalších funkcí. Lesy působí jako stabilizační prvky v krajině chránící před sesuvy půd, lavinami, povodněmi, zajišťují příznivé klima, kvalitu povrchových i podzemních vod, slouží ke sběru plodů i k rekreaci. Již stovky let je plnění těchto funkcí podporováno také lidskou činností a je vnímáno jako integrovaná součást obhospodarování lesů.

Názvosloví v oblasti funkcí lesa:

- **Vlastnost lesa** – přirozený projev lesní biogeocenózy
- **Funkce lesa** (služba) pro společnost – vlastnosti lesa, které uspokojují potřeby společnosti
- **Funkce lesního hospodářství** – funkce (služby) reprodukčního procesu lidské činnosti v lese
- **Komplexní funkce** – spojují (propojují) funkce lesa s funkcemi lesního hospodářství
- **Funkce produkční** – tržní produkce dřeva a zvěře
- **Funkce mimoprodukční**
 - **netržní** se zprostředkovaným dopadem na trh (lesní plodiny, funkce půdoochranné, hydrické, vzduchoochranné, klimatické, vázání CO₂)
 - **bez tržního dopadu** (zdravotně-hygienické, rekreační, kulturně-naučné, vědecké)

Funkce lesa vycházejí z jeho vlastností a jsou přirozeným projevem lesních ekosystémů. Jako funkce lesa jsou vnímány procesy, které uspokojují potřeby společnosti. Ty jsou často samovolné. Vznikají v neobhospodávaných lesích jako efekt přírodní, v hospodářských lesích pak jako efekt sdružený, který je dosahován bez speciálně vynaložených nákladů. Takové funkce je možno nazývat *službami lesa*, *službami lesních ekosystémů*, podle BLUMA (2004) *effects of forests*. Vlastnosti vytvářené nebo podporované lidskou činností jsou pak funkce lesního hospodářství. Dle Krečmera (2006) jsou to funkce řízené, lesnickou činností záměrně udržova-

né, posilované, anebo nově vytvářené, efekty pozitivní s potlačováním či vylučováním efektů záporných (všechny přírodní účinky být službami nemohou, protože mnohé přírodní účinky nejsou člověku příznivé). Naplňování řízených funkcí vyžaduje vklady specifické práce a finančních prostředků. Řízené funkce je možno označit také jako *služby lesního hospodářství*. Spojením (propojením) funkcí lesa s funkcemi lesního hospodářství vznikají funkce lesa komplexní.

Funkce následně dělíme na funkce produkční (produkce dřeva, zvěře, lesních plodů) a funkce mimoprodukční (funkce půdoochranné, hydrické, vzduchoochranné, klimatické a vázání C a N). V některých případech jsou mimoprodukční funkce děleny na ekosystémové (výše zmíněné) a sociální (např. rekreační, zdravotně hygienická, kulturně naučná). V současné době se věnuje velká pozornost i ekonomickému ocenění funkcí lesů, které jsou společností poskytovány. V tomto případě se pak často hovoří o ekosystémových službách. Dále se budeme věnovat funkcím, které lesy naplňují ve vztahu ke klimatu a zejména koloběhu vody.



Obrázek 1.1:

Lesy, na které společnost klade vysoké požadavky na naplňování některých mimoprodukčních funkcí, jsou v souladu se zákonem o lesích č. 289/1995 Sb. vyjmuty z kategorie lesů hospodářských a zařazeny mezi lesy ochranné či lesy zvláštního určení. Na fotografii lesní porosty na Kozích hřbetech v Krkonoších s významnou ochrannou funkcí (půdoochranná, ochrana níže ležících porostů před lavinami)

1.1 Klimatická funkce lesa

Klimatická funkce lesů se obvykle definuje jako soubor funkčních efektů lesů v dlouhodobějším režimu v měřítku mezoklimatickém, ale i mikroklimatickém. K důležitým dílčím efektům patří účinky lesních porostů v oblasti bilance záření, režimu teploty vzduchu a půdy, ve vodní bilanci i v proudění vzduchu. Bioklimatické funkční účinky se pak uplatňují v rámci funkce rekreační, léčebné a ekologické, která zahrnuje vliv na kvalitu ovzduší, půdu, vodu i biodiverzitu.

V rámci České republiky je klimatický a hydrický význam lesa důležitý především pro krajinné mezoklima. Mezoklima krajiny je zde možno chápat jako podnebí pro území v řádu jednotek až desítek kilometrů čtverečních. Mezoklima lze proto pojmenovat i jako místní podnebí. Na mezoklimatu závisí hydrické poměry krajiny, tedy její „hospodaření“ s vodou. Odtud se vyvozuje krajinná funkce lesů jako soubor funkčních efektů v krajinném prostředí. Ta je naplněna mimo jiné obzvláště významnou funkcí klimatickou a hydrickou.

Pokorný (2020) zmiňuje historickou zkušenost, že odlesnění po čase vede k teplotním extrémům a úbytku srážek. Řada vědeckých prací prokazuje, že evapotranspirace je nejdůležitějším procesem vyrovnávání teplot, ochlazování krajiny a hraje klíčovou roli pro rozložení dešťových srážek na kontinentech. Lesy vracejí do ovzduší obrovské množství vodní páry. Tímto procesem podporují vzdušné proudy, které přenášejí vláhu do hloubi kontinentů. Lze říci, že lesy nevyrůstají jen tam, kde je pro ně vhodné podnebí, ale že si mohou do značné míry vhodné klima a počasí utvářet. Na základě analýz izotopů kyslíku v dešťových srážkách bylo prokázáno, že například více než polovina dešťových srážek v Amazonii pochází z vlastní transpirace lesů a jen menší část z oceánu. V mezoklimatickém měřítku lesní porosty svým celkovým výparem zvyšují četnost občasných lokálních letních srážek a množství vody v nich. Kromě samotné transpirace se na tvorbě srážek podílí i produkci takzvaných kondenzačních jader. Lesní stromy uvolňují z povrchu asimilačních orgánů do atmosféry biologické částice, z nichž některé aktivně podporují vznik dešťových a sněhových srážek v procesu nazývaném bioprecipitace. Tyto biologické částice jsou z hlediska podpory vzniku srážek účinnější než jiné atmosférické částice. Vodní pára v jejich blízkosti přechází z plynného skupenství do kapalného za vzniku kapek. Pravděpodobnost výskytu srážek se tak zvyšuje.

Nová vědecká data prokazují, že destabilizace oběhu vody vede k nepředpověditelným změnám klimatu. Kolísání a změny vodního cyklu vedou k destruktivním procesům a oslabování lesů, které potom podléhají požárům a škůdcům, včetně invazivních druhů. Pravdou je též opak: lesní požáry a nadměrná těžba narušují oběh vody a teplotní režim a snižují schopnost ekosystémů vázat oxid uhličitý do biomasy a do půdy.

Vliv lesa v měřítku mikroklimatu uvnitř porostů a v jejich okolí se projevuje narušováním větrných proudů a vytvářením větrných zátiší, rychlejším oteplováním na jaře a ochlazováním v létě. V porostech od 5. lesního vegetačního stupně (zhruba od 600 m n. m.) mohou lesy zvyšovat srážkové úhrny usazenými srážkami, které vznikají vyčesáváním nízké oblačnosti, tvorbou ledovky a námrazy.

Účinnost lesních porostů v ovlivnění klimatických parametrů se liší podle jejich výměry, zastoupených dřevin (jehličnaté, listnaté) i stáří. Jejich vliv však může zažít každý, kdo vstoupí do lesa v parném letním dni.

1.2 Hydrická a vodohospodářská funkce lesa

Hydrická (vodní) funkce lesů se obvykle definuje jako soubor funkčních efektů lesů ve vodní bilanci a vodním režimu lesů. Jde o kvalitativní a kvantitativní účinky na položky vodní bilance lesů a na genezi odtoku srážkových vod. Ke kvalitativním účinkům patří ovlivňování jakosti vody při propouštění srážek korunami, při průsaku lesní půdou a při povrchovém odtoku. Šířeji se pod kvalitativními účinky rozumí ovlivňování režimu v tocích zadržováním (retencí) a zpomalováním (retardací) odtoku srážkových vod v lesních ekosystémech, a tím vliv lesů v povodí na rozložení odtoku v čase. Ke kvantitativním účinkům patří působení na vodní bilanci a její složky – evapotranspiraci, intercepci, srážky horizontální, projevující se pak v celkovém odtoku z lesů. Vodohospodářská funkce lesa je chápána jako využití hydrického působení lesů pro zajištění kvantity i kvality vody ve vodárenských nádržích a dalších vodních zdrojích.

Dle metodiky ekonomického hodnocení hydrických funkcí lesa (Šišák a kol. 2011) jsou za hydrické funkce lesa považovány funkce, které uspokojují vodní potřeby společnosti. Společenská významnost a hodnota těchto funkcí odráží míru uspokojování měnících se společenských potřeb a poptávky v čase a místě. Hydrické funkce lesa patří mezi tzv. ochranné environmentální funkce lesa. Hydrické funkce lesa umožňují v konkrétních podmínkách úsporu nákladů. Když ve srovnání se stávajícím stavem přestanou dané funkce působit, dojde k sociálně-ekonomickým škodám (ztrátám). Chybějící funkce je pak třeba preventivně zastoupit náhradními biotechnickými opatřeními, které by dané funkce převzaly, což s sebou přináší ekonomické náklady (tzv. náklady prevence). Vzniklé škody je naopak třeba odstranit, kompenzovat, provést opatření, která by uvedla postižené části krajiny do původního stavu, příp. by odvrátila škody v podnicích, v sídlech a infrastruktuře (náklady kompenzace).

Stěžejní hydrické funkce lesa jsou chápány ve výše uvedených souvislostech jako vlivy lesa na distribuci a kvalitu vody v krajině pro společnost, tj. vlivy lesa na:

- maximální průtoky ve vodotečích,
- minimální průtoky vody ve vodotečích,
- kvalitu vody ve vodních tocích a nádržích reprezentovanou obsahem dusičnanů.

Omezení maximálních průtoků ve vodotečích

Tlumení velkých vod lesními komplexy je posuzováno na základě dlouhodobým pozorováním zjištěné skutečnosti, že lesní komplex tlumí v mnohem větší míře objem i kulminaci povodňových průtoků ve srovnání se zemědělskými kulturami, případně zpevněnými plochami (například silnicemi). Při povodni je schopen velký lesní komplex snížit kulminační (tzn. maximální) průtok oproti zemědělské půdě asi o polovinu. Je to dáno hlavně vysokou infiltrační schopností lesních půd, které pojmu za minutu až 10 mm srážek. Dále se podílí i vyšší intercepce (zadržování) vody korunami a vyšší evapotranspirace (výpar a „vydýchaná“ voda) stromů oproti jiným typům vegetace. Přehodnocením a doplněním stávajících dat byl odvozen průměrný celostátní úhrn zvýšení objemu stoletých velkých vod, ke kterému by došlo po záměně lesů za pole, na 13 mm. Prakticky to znamená, že pro kompenzaci vlivu odlesnění jednoho hektaru by bylo nutno vybudovat záchytnou nádrž o objemu 130 m³. Například v závěru povodí Labe

u Hřenska snižují lesy kulminaci stoleté velké vody asi o $824 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tj. zhruba o 16 %. Bez přítomnosti lesů v povodí Labe by tak bylo nutno vybudovat retenční vodní nádrže o objemu cca 356 milionů m^3 , což je více, než je objem přehrady na Lipně.

Nadlepšení minimálních průtoků ve vodotečích

Určitou část pohlcené srážkové vody zadrží lesní půdy. Voda pak postupně zpomaleně odtéká pod jejím povrchem a udržuje takzvaný základní (nejnižší) odtok ve vodotečích. V době sucha tato tzv. retenční schopnost lesních půd zabezpečuje vyšší trvalý odtok z lesa proti zemědělské půdě či aglomeracím a voda je pak k dispozici v krajině níže po toku. Zvyšování vydatnosti pramenů lesními komplexy je důsledkem delší dotace podzemních vod lesní půdou než půdou zemědělskou. Prakticky se tato skutečnost projevuje tím, že minima průtoků vod z lesních celků jsou vyšší než ze zemědělských pozemků. Dle dlouholetých pozorování na řece Svatce odtoky z lesa jsou od průtoku 180-ti denní vody vyšší než odtoky z polí a od průtoku 220-ti denní vody jsou vyšší než odtoky z trvalých travních porostů. V průměru ČR je bezpečně odtok z lesa pramennými vývěry při 355-ti denní vodě v průměru čtyřikrát vyšší oproti trvalým travním porostům, dvakrát oproti orné půdě a oproti ostatním plochám šestkrát. V širokém globálu zvýší lesní porosty při odtoku 220–365-ti denní vody objem odtoku o $77 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, o $118 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ oproti trvalým travním porostům, při odtoku 180–365-ti denní vody z polí a o $103 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ a při odtoku 200–365-ti denní vody z ostatních ploch (sadů, neplodných ploch, veřejných prostranství).

M – denní průtok (voda)

Je průměrný denní průtok, dosažený nebo překročený po M dní ve zvoleném časovém období. Obvykle se volí délka časového období 1 hydrologický rok, uvažuje-li se jiné období (např. vegetační) musí to být uvedeno. 180-ti denní voda tak představuje průtok, který je dosahován nejméně po 180 dnů v hydrologickém roce (tedy zhruba po polovinu roku). M – denní průtok se označuje $Q_{M,d}$, index M označuje počet dní dosažení nebo překročení daného průtoku ($Q_{100,d}$).

N – letý průtok (voda)

Je největší (kulminační) průtok povodňové vlny, který je dosažen v dlouhodobém průměru jednou za N let. Označuje se Q_N . Například 100-letý průtok (Q_{100}) je průměrně dosažen 1x za 100 let.

Kvalita vody ve vodních tocích a nádržích

V neposlední řadě ovlivňují lesy kvalitu vod. Kromě toho, že možných zdrojů znečištění vody je v lese podstatně méně než v zemědělské krajině, a minimální je také použití průmyslových hnojiv, pesticidů a herbicidů, má les schopnost některé znečišťující látky filtrovat. Z lesů odtéká vysoce kvalitní voda z hlediska obsahu dusičnanů. Tvorba kvalitní pitné vody z lesních vodních zdrojů je dávno známa, a proto se většina vodních nádrží, které jsou zdrojem pitné vody pro

zásobování obyvatel, nachází v převážně zalesněných povodích. Kvalita povrchových vod je dána ovšem i polohou vodního zdroje, tj. geografickými poměry. Pro docílení kvality pitné vody u vodě odtékající ze zemědělských kultur a ostatních ploch je nutno upravit kvalitu vody snížením obsahu $\text{NO}_{(x)}$ v průměru o 20 mg.l^{-1} ve srovnání s vodou odtékající z lesů. Z lesů odtéká voda, která z hlediska obsahu dusičnanů obvykle splňuje parametry vody pitné, jak dokládá tabulka 1.1. Průměrná sociálně–ekonomická cena náhrady kvality vody z lesních porostů kva-

Tabulka 1.1:

Průměrný obsah nitrátového dusíku (N-NO_3^-) ve vodách z lesa podle přírodních lesních oblastí (PLO). Vyhláška č. 252/2004 Sb. stanovuje pro pitnou vodu jako maximální obsah nitrátů 50 mg.l^{-1} , což odpovídá koncentraci nitrátového dusíku $11,3 \text{ mg.l}^{-1}$ (převzato z Šišák a kol., 2008)

| PLO | č. | N-NO_3^- mg.l^{-1} | PLO | č. | N-NO_3^- mg.l^{-1} |
|--|----|---|---------------------------------------|----|---|
| Krušné hory | 1 | 3,15 | Podkrkonoší | 23 | 7,60 |
| Podkrušnohorská pánev | 2 | 4,07 | Sudetské mezihoří | 24 | 8,63 |
| Karlovarská vrchovina | 3 | 2,50 | Orlické hory | 25 | 5,05 |
| Doupovské hory | 4 | 2,19 | Předhoří Orlických hor | 26 | 9,27 |
| České středohoří | 5 | 17,93 | Hrubý Jeseník | 27 | 4,70 |
| Západočeská pahorkatina | 6 | 3,00 | Předhoří Hrubého Jeseníku | 28 | 4,29 |
| Brdská vrchovina | 7 | 3,72 | Nízký Jeseník | 29 | 2,16 |
| Křivoklátsko a Český kras | 8 | 3,05 | Drahanská vrchovina | 30 | 9,44 |
| Rakovnicko-kladenská vrchovina | 9 | 3,42 | Českomoravské mezihoří | 31 | 10,69 |
| Středočeská pahorkatina | 10 | 7,19 | Slezská nížina | 32 | 6,45 |
| Český les | 11 | 4,81 | Předhoří Českomoravské vrchoviny | 33 | 11,13 |
| Podhůří Šumavy a Novohradských hor | 12 | 3,82 | Hornomoravský úval | 34 | 7,69 |
| Šumava | 13 | 2,65 | Jihomoravské úvaly | 35 | 7,99 |
| Novohradské hory | 14 | 2,23 | Středomoravské Karpaty | 36 | 6,36 |
| Jihočeská pánev | 15 | 0,42 | Kelečská pahorkatina | 37 | 8,02 |
| Českomoravská vrchovina | 16 | 3,31 | Bílé Karpaty a Vizovické vrchy | 38 | 5,32 |
| Polabí | 17 | 10,28 | Podbeskydská pahorkatina | 39 | 12,90 |
| Severočeská pískovcová plošina a Český ráj | 18 | 14,60 | Moravskoslezské Beskydy | 40 | 3,55 |
| Lužická pískovcová vrchovina | 19 | 4,90 | Hostínsko-vsetínské vrchy a Javorníky | 41 | 3,10 |
| Lužická pahorkatina | 20 | 3,78 | | | |
| Jizerské hory a Ještěd | 21 | 2,65 | | ☒ | 8,32 |
| Krkonoše | 22 | 3,19 | | | |

litou vody z jiných kultur byla stanovena na základě vyvolaných nákladů na čištění pitné vody znečištěné $\text{NO}_{(x)}$ ve výši 465.000 Kč/ha. Je to cena za vyčištění 1.256 m^3 pitné vody s náklady $370 \text{ Kč}\cdot\text{m}^{-3}$ při snížení koncentrací $\text{NO}_{(x)}$ o $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Výpočet je proveden pro roční průměrný specifický odtok $0,04 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$.

LITERATURA

BLUM A., 2004: Forest functions. *In* Burley J. *et al.* (eds.): Encyclopedia of forest sciences. Amsterdam, Elsevier, p. 1121–1126.

KREČMER V., 1994: Jak dál v našich lesích? *Planeta*, 2, 24–26.

KREČMER V., ŠIŠÁK L., ŠACH F., ŠVIHLA V., FLORA M. 2006: K ekonomickému hodnocení mimotržních funkcí lesa z hledisek lesopolitických. *Zprávy lesnického výzkumu*, 51, p. 195 – 215.

MATĚJÍČEK J., 2003: Vymezení základních pojmů a vztahů z oblasti mimoprodukčních funkcí lesa. *Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti*, 56 s.

NAVRÁTIL P. a kol 2011: Mapování hydromelioračních okrsků

POKORNÝ J., 2020: Lesy přitahují vodu. *Vodohospodářský bulletin*: 29–31.

ŠIŠÁK L., ŠACH F., KUPČÁK V., ŠVIHLA V., PULKRAB K., ČERNOHOUS V., ZEMAN M., 2008: Systém hodnocení společenské sociálně-ekonomické významnosti funkcí lesů včetně kritérií a indikátorů polyfunkčního obhospodařování lesů. *Výroční zpráva projektu QH71296 za rok 2008*. Praha Česká zemědělská univerzita v Praze 94s.

ŠIŠÁK L., ŠACH F., ŠVIHLA V., PULKRAB K., ČERNOHOUS V., STÝBLO J., 2011: Metodický postup vyjádření společenské sociálně-ekonomické významnosti funkcí lesa včetně praktických příkladů. Praha, Česká zemědělská univerzita v Praze. 74 s.

ŠIŠÁK L., ŠACH F., ŠVIHLA V., PULKRAB K., ČERNOHOUS V., DUDÍK R., 2016: Metodika hodnocení společenské sociálně-ekonomické významnosti ekosystémových služeb lesa v České republice. Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze, 33 s.

2 Srážky na volné ploše a v lesním porostu

Vít Šrámek, Věra Fadrhonsová

2.1 Srážky

Dostatek vody je jedním ze základních předpokladů pro fungování ekosystémů. Množství a rozdělení srážek v ročních obdobích společně s teplotou jsou hlavními určujícími parametry pro výskyt vegetačních pásem neboli biomů na Zemi. Zatímco v oblasti tropických lesů se průměrné roční srážky pohybují v rozsahu od 1 000 do 3 000 mm za rok, pro existenci lesa v oblasti tundry postačují srážky v rozsahu 250 až 300 mm. Střední Evropa spadá do biomu listnatých a smíšených lesů mírného pásma, kde se srážky pohybují zhruba od 400 do 2 000 mm. V České republice je průměrná výše ročních srážek 684 mm, nejnižší měsíční úhrny bývají v únoru (37 mm), nejvyšší obvykle v letních měsících v červnu (82 mm), červenci (89 mm) a srpnu (78 mm). Nejvyšší srážkové úhrny jsou dosahovány v horských polohách, kde ročně překračují hodnotu 1 000 mm. Nejdeštivějším místem na našem území je meteorologická stanice Bílý Potok – Smědava v Jizerských horách, kde v průměru ročně spadne 1 705 mm srážek.

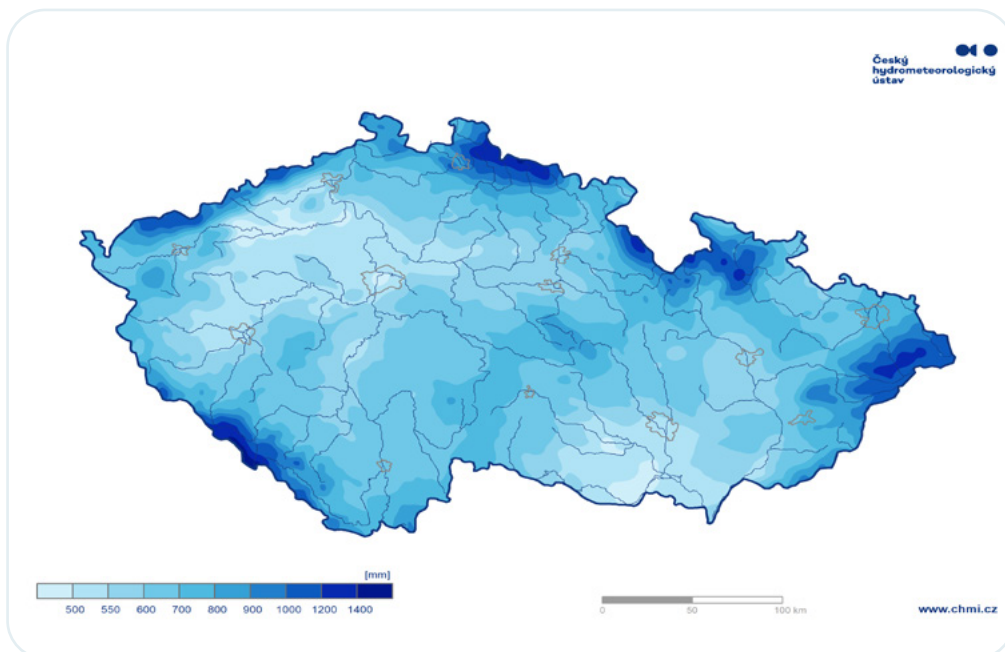
Množství srážek se měří v milimetrech (mm). Jde o výšku vodního sloupce, který ve srážkách napadne. Někdy je jednotka rovněž uváděna jako jeden litr srážek na metr čtvereční ($l \cdot m^{-2}$). V milimetrech lze uvádět i hodnoty výparu, transpirace či odtoku z určité plochy. Výhodou je, že lze v těchto jednotkách porovnávat různá povodí, aniž by bylo potřeba přepočítávat hodnoty jednotlivých parametrů na jejich plochu.

Nejsušší lokality České republiky jsou v oblasti Jižní Moravy a ve srážkovém stínu Krušných hor na Žatecku a Chomutovsku, kde průměrné roční srážkové úhrny pouze lehce překračují hranici 400 mm (obr. 2.1). Srážkové podmínky jsou tak na celém území příznivé pro vznik lesních ekosystémů – původní stepní společenstva se vyskytují pouze na místech, kde tomu kromě nižší úrovně srážek přispívá také geologické podloží a případně reliéf terénu. Z nejznámějších lze jmenovat například Mohelenskou hadcovou step, Velkou a Malou Pleš na Křivoklátsku či

skalnaté stráně Pálavy. Z přirozených ploch bezlesí nelze opominout ani alpské louky v Krkonoších a Jeseníkách.

Samotný úhrn srážek je pochopitelně pouze jedním z faktorů umožňujících existenci lesa. Například pro lesy Středomoří je charakteristická vyšší spodní hranice průměrných srážek (500–900 mm) než u lesů mírného pásma. Je to proto, že se tamní lesy musí vypořádat s vyššími teplotami. V souvislosti se změnou klimatu se často hovoří o posunu vegetačních pásů směrem k pólům, případně posunu vegetačních stupňů do vyšších nadmořských výšek. Z hlediska průměrného množství srážek se situace nejeví příliš dramaticky. To lze doložit na vývoji srážkového normálu (průměrná roční suma srážek za období 30 let), který se oproti období let 1961–1990 pouze mírně zvýšil. Oproti tomu teplotní normál vykazuje ve stejném období výrazný nárůst (tab. 2.1). Se zvyšujícími se teplotami stoupají nároky na výpar, proto lze očekávat, že i z pohledu prosté vodní bilance může být v nejteplejších oblastech existence lesa ohrožena.

Dynamika vývoje lesů se ovšem obvykle neřídí průměrnými charakteristikami podnebí. Pro rychlé změny jsou významné extrémní výkyvy – a jejich výskyt bude v období změny klimatu



Obrázek 2.1:

Průměrný roční úhrn srážek za období 1991–2000 (zdroj: Český hydrometeorologický ústav; www.chmi.cz)

velmi pravděpodobně narůstá. Již v současné době pozorujeme stále nerovnoměrnější rozdělení srážek zejména ve vegetačním období, a to v časovém i prostorovém měřítku. Dochází tak k výraznějším obdobím sucha (například v letech 2015 a 2018) a na druhou stranu k častějšímu výskytu přívalových srážek i období s výraznou srážkovou činností, jež může vést k bleskovým záplavám a vzniku povodňových situací s řadou negativních dopadů pro ekosystémy i pro společnost.

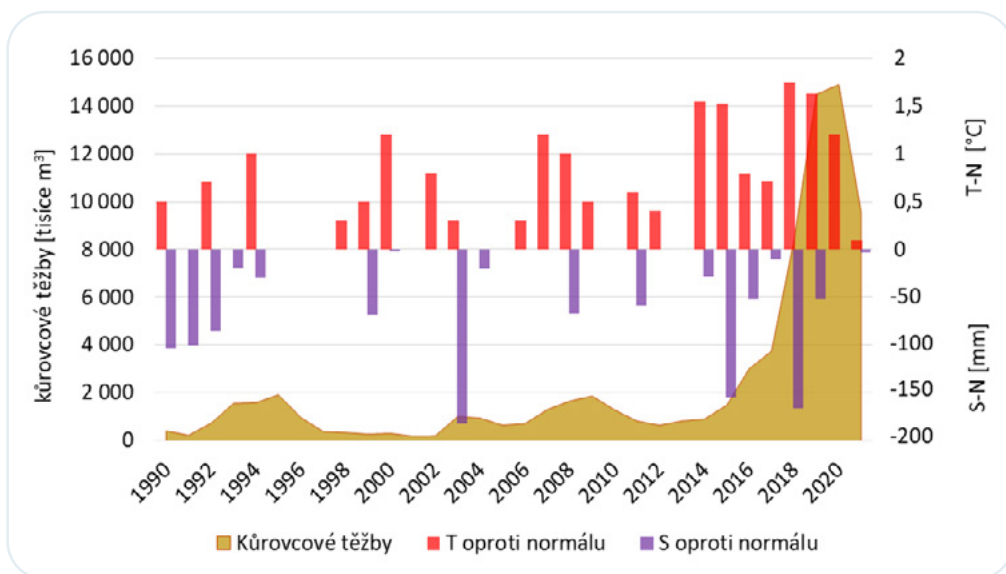
Tabulka 2.1:

Průměrné roční sumy srážek a průměrné roční teploty v České republice (dlouhodobý normál)

| Normálové období | průměrné roční srážky | průměrná roční teplota |
|------------------|-----------------------|------------------------|
| 1961–1990 | 674 mm | 7,5 °C |
| 1981–2010 | 686 mm | 7,9 °C |
| 1991–2020 | 684 mm | 8,3 °C |

Měření srážek je možné provádět prakticky jakoukoliv sběrnou nádobou s definovanou plochou, která je v dostatečné vzdálenosti od překážek, které by bránily zachycení deště. Za optimální je považována vzdálenost od překážek, jež je minimálně dvojnásobkem jejich výšky. Staniční srážkoměry mají záchytnou plochu 500 cm² a voda z nich je sváděna do menší zásobní nádoby. Množství je měřeno přelitím do odměrného válce. V současné době jsou srážky na profesionálních i amatérských stanicích měřeny obvykle automatickými srážkoměry, kde se do paměti ústředny zaznamenává překlopení váženky nejčastěji po každých 0,2 mm srážek. Zejména v horských polohách jsou srážky často z okolí srážkoměru odnášeny větrem, což může způsobovat velké chyby měření. V takových podmínkách se používají různé typy ochranných límců, které mají zabránit větrným turbulencím v oblasti záchytné plochy, často je využíváno několik srážkoměrů zároveň. Specifickým problémem je měření srážek ve formě sněhu. U manuálně obsluhovaných staničních srážkoměrů je nutné zachycený sníh nechat roztát a poté změřit jeho množství. Hydrologové využívají rovněž totalizátory, ve kterých se sníh rozpouští díky přidavku chloridu vápenatého a srážky se zde hromadí po celé zimní období. V totalizátorech se v delším intervalu (týden až měsíc) měří výška hladiny, která se přepočítává na množství srážek spadlých od posledního měření. Pro zimní automatické měření je možné využít vyhřívané srážkoměry, v nichž sníh roztává ihned po dopadu, či váhové sněhoměry, ve kterých je registrována váha napadlého sněhu. Více ke sněhu je uvedeno v kapitole 3.

Dřeviny jsou na snášení nepříznivých podmínek včetně sucha poměrně dobře fyziologicky vybaveny – svědčí o tom ostatně jejich růst i na velmi nepříznivých stanovištích, jako jsou skalní výchozy, výsušné jižní stráně na vápencových podložích či opuštěné lomy. V případě delších období bez srážek mohou uplatnit celou řadu ochranných a obranných mechanismů - od omezení transpirace zavřením průduchů, omezení fotosyntézy a dýchání až po předčasný opad listů u opadavých dřevin či snížení listové plochy u dřevin stálezelených. Problémem je, pokud se suché periody častěji opakují. V takovém případě dochází k vyčerpávání energetických zásob a snížení odolnosti vůči dalším nepříznivým faktorům. K výraznému poškození až odumření pak dochází často z jiné příčiny. Příkladem může být kůrovcová kalamita. Jako hlavní spouštěcí faktor pro extrémní nárůst kůrovcových těžeb od roku 2015 působila právě výrazná období sucha a vysokých teplot. Samotné odumření smrkových porostů bylo ovšem způsobeno kůrovci a tam, kde se podařilo jejich šíření zabránit, zůstaly smrkové porosty zachovány.



Obrázek 2.2:

Vývoj kůrovcových těžeb ve srovnání s teplotními a srážkovými odchylkami v letech 1990–2021

V grafu jsou vyneseny kladné odchylky průměrných ročních teplot od klimatického normálu 1981–2010 (T-N) a záporné odchylky ročních srážek od normálu za stejné období (S-N). Studenější a srážkově bohatší roky oproti dlouhodobému normálu nejsou vyneseny. Z grafu je zřejmé, že kůrovcové kalamity v minulosti (1993–1995, 2003–2005, 2007–2009) následovaly po suchém nebo výrazněji teplém období i to, že aktuální kůrovcová kalamita začala a gradovala v období velmi teplých a suchých let.

K přímému odumření dřevin v důsledku sucha může docházet, pokud se místní podmínky změní skutečně razantně. Příkladem mohou být poškození borových porostů na písčitých půdách v okolí Hradce Králové, kde došlo v letech 2015–2018 k poklesu hladiny spodní vody, jež se dostala mimo dosah kořenů borovic. Dřeviny tak ztratily zdroj vláhy, který nízké úhrny srážek v těchto letech nevyrovnaly. Borovice jako druh sice dokáže růst i na výrazně sušších stanovištích, ale rychlá změna vodního režimu byla v tomto případě pro její porosty příčinou rozsáhlého poškození.

Existence lesů, jejich druhové složení i struktura jsou významně ovlivňovány množstvím srážek. Na druhou stranu je i rozložení srážek nad pevninou ovlivňováno existencí lesních ekosystémů. Je obecně známo, že lesy hrají významnou roli v takzvaném „malém“ hydrologickém cyklu. Velký hydrologický cyklus ve zkratce představuje výpar vody z oceánu, přenos vodní páry nad pevninu a odtok srážkové vody zpět do oceánů. Malý hydrologický cyklus pak spočívá ve výparu vody z pevniny, její přenos a následně spad ve formě dešťových či sněhových srážek. Právě komplexy lesů mají zásadní význam pro výpar vody do atmosféry. Díky postupnému opakování tohoto cyklu dochází k přenosu vláhy i do oblastí, které jsou od oceánu velmi vzdáleny. Podle teorie biotické pumpy navíc lesy přispívají k aktivnímu toku vzduchu z oceánů nad pevninu. Globálně až více než 40 % srážek pochází z výparu nad pevninou, nikoliv z oceánů. V České republice je to zhruba 20–30 % srážek, ovšem například srážky v Číně jsou podle Van der Enta (2010) až z 80 % tvořeny vodou, která se vypařila z Euroasijského kontinentu. Lesnatá území tvoří celé atmosférické řeky, které umožňují přenos srážek do nitra kontinentů. Výrazná odlesnění pak mohou přivodit vysoušení (aridizaci) rozsáhlých území. Jedním z důvodů úpadku starověkých civilizací v oblasti Mezopotámie byl pravděpodobně nedostatek vody, který byl do značné míry způsoben rozsáhlým odlesněním Středomoří. Stejně tak může pro globální rozdělení srážek hrát významnou roli odlesňování rozsáhlých oblastí v Jižní Americe, Africe i v oblasti Sibiře.

Teorie biotické pumpy: Vodní pára nad lesem kondenzuje za vzniku mraků. Přitom voda v kapalném skupenství (kapičky vody v mracích) má daleko menší objem, než vodní pára (poměr je zhruba 1 : 1200). Kondenzací vodní páry tak vzniká tlakový gradient, který aktivně nasává vodu z okolí. V případě pobřežních lesů se tak nad pevninu dostává vlhký vzduch z oceánů, který může být souvislými lesními komplexy transportován dále do vnitrozemí.

2.2 Intercepce

Z běžné zkušenosti každý ví, že se pod stromy může schovat před začínajícím deštěm či přeháňkou. Část srážek, která je zachycená v korunách stromů, se nazývá intercepce a můžeme ji vyjádřit (a také měřit) jako rozdíl mezi množstvím srážek na volné ploše a pod lesním porostem. Ještě přesněji ji lze definovat jako část srážek, která se v korunové vrstvě zachytí a následně z ní odpaří – část zachycené vody se dostane k povrchu půdy opožděně okapem či stokem po kmenech.

Intercepce je významnou částí malého koloběhu vody a důležitou položkou vodní bilance lesních ekosystémů. Její velikost se pohybuje v desítkách procent srážek volné plochy a je závislá na celé řadě parametrů. Jedním z nich je pochopitelně velikost a struktura (tzv. drsnost) korunové vrstvy. Obecně lze říci, že ve velkých korunách dospělého lesa se zadrží více srážek než v mlazínách, zapojené porosty jehličnanů (zejména těch s kratšími jehlicemi – u nás smrku a jedle) mají vyšší intercepci než listnaté porosty a u opadavých listnatých lesů je při plném olistění výrazně vyšší intercepce než v mimovegetačním období. Některé hodnoty intercepce pro různé dřeviny jsou uvedeny v tabulce 2.2. Jde však o hodnoty pouze orientační, což vyplývá i z velkého rozpětí hodnot, jež byly zjištěny v jednotlivých studiích. Kromě druhu dřeviny, věku porostu a jeho struktury závisí intercepce i na dalších faktorech.

Tabulka 2.2:

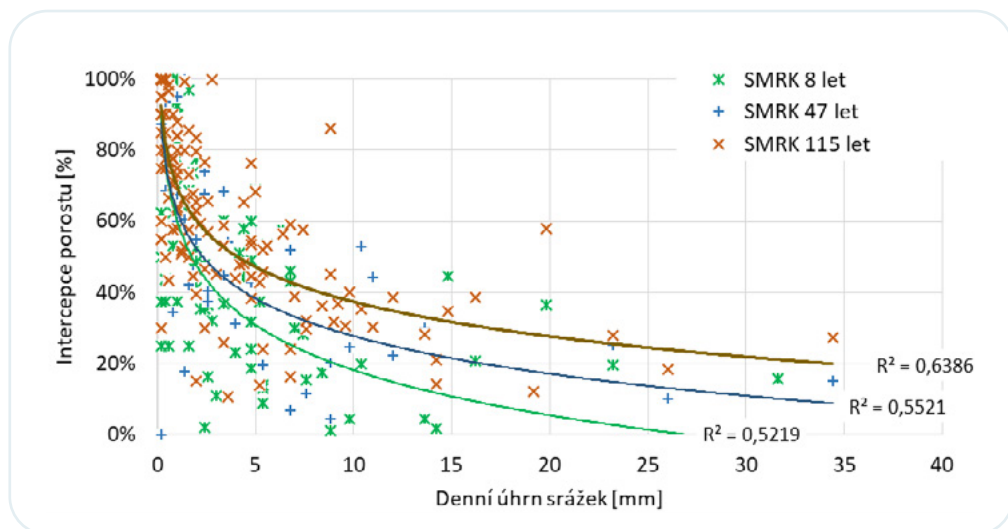
Hodnoty intercepce pro naše hlavní dřeviny odvozené z domácích a evropských studií

| | střední hodnota intercepce | rozsah intercepce |
|---|-------------------------------|----------------------|
| borovice lesní (<i>Pinus sylvestris</i>) | 36 % | 12–42 % |
| buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i>) | 23 % | 7–47 % |
| douglaska tisolistá (<i>Pseudotsuga menziesii</i>) | 39 % | 32–40 % |
| dub letní, dub zimní (<i>Quercus robur + Q. petraea</i>) | 22 % | 10–25 % |
| jedle bělokora, jedle obrovská (<i>Abies alba + A. grandis</i>) | 34 % | 24–80 % |
| smrk ztepilý (<i>Picea abies</i>) | 34 % | 15–53 % |

Intercepci významně ovlivňuje množství srážek, a to jak při hodnocení v řádu jednoho či několika dnů, tak v celoroční bilanci. Kapacita pro záchyt vody v korunách stromů je v daný okamžik konstantní. Po jejím vyčerpání již srážky propadávají k povrchu půdy. Obecně je tak intercepce vyšší při krátkých srážkách s celkově nižšími dešťovými úhrny než při srážkách s vysokými úhrny a srážkách s dlouhou dobou trvání. To platí pro hodnocení jednotlivých dešťových epizod, srovnání různých lokalit s různými průměrnými srážkami i pro roky s výrazně

rozdílnou sumou srážek. Na obrázku 2.3 je znázorněna velikost intercepce tří různě starých porostů smrku ztepilého na výzkumné ploše Želivka v blízkosti Ledče nad Sázavou v závislosti na úhrnu srážek. Data jsou představena v denních úhrnech, jde tedy v zásadě o hodnocení jednotlivých srážkových epizod v průběhu vegetačního období roku 2018. Z obrázku je patrné, že srážky zhruba do výše 2 mm mohou být zcela zachyceny v korunách – v takových případech je intercepce 100 %. S rostoucím úhrnem srážek se stále vyšší podíl dostává k povrchu půdy. V případě srážky 10 mm je to již 60 % srážkové vody v dospělém porostu smrku, 70 % ve smrkové tyčovině a více než 80 % ve smrkové mlazině. U intenzivnějších srážek se pak jejich relativní podíl zadržený v korunách dále snižuje. Toto platí nejen pro hodnocení jednotlivých srážkových epizod, ale i pro hodnocení srážek za delší období. Obecně tak platí, že v horských oblastech s vyššími srážkovými úhrny je procento intercepce nižší než v nižších či středních polohách. Například Jančo a kol. (2021) uvádějí pro horskou oblast západních Tater s ročními úhrny srážek nad 1 450 mm intercepci dospělého smrkového porostu ve výši 27–30 %, u dospělých porostů smrku ve Středočeské pahorkatině se běžně pohybuje ve výši 33–50 % (Krečmer a kol. 1981).

Výše intercepce může být ovlivněna i vývojem počasí v jednotlivých letech. To lze ilustrovat opět na příkladu výzkumných ploch se smrkem na objektu Želivka srovnáním roků 2017 a 2018 (obr. 2.4). Vegetační období roku 2017 bylo normální s průměrnou teplotou 14,7 °C a úhrnem srážek 423 mm. Následující vegetační období 2018 bylo oproti tomu velmi teplé a suché s průměrnou teplotou 17,0 °C a úhrnem srážek pouze 281 mm. V roce 2017 byla ve

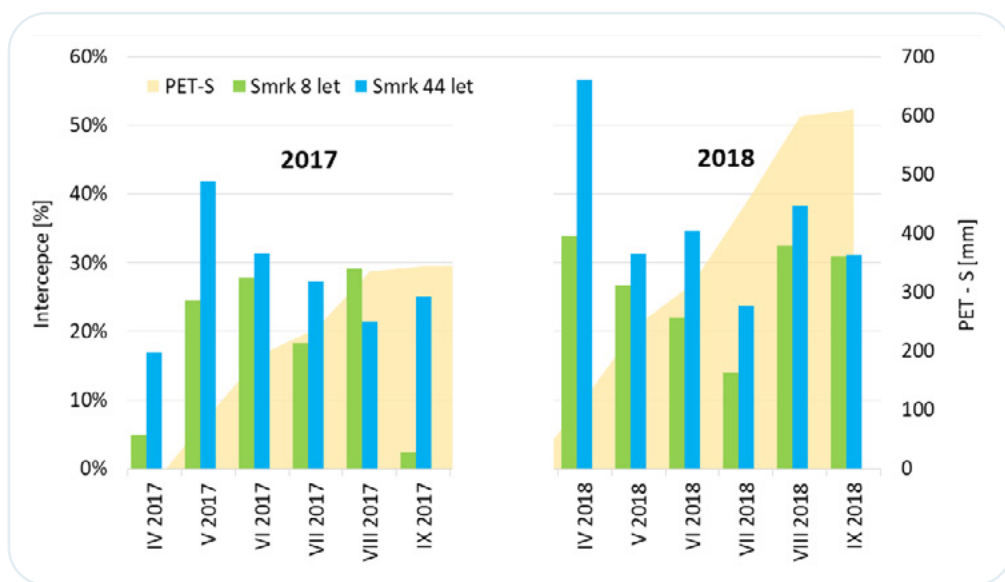


Obrázek 2.3:

Závislost intercepce na denním úhrnu srážek ve třech smrkových porostech na výzkumné ploše Želivka (Středočeská pahorkatina 440 m n. m.)

smrkových porostech velmi nízká hodnota intercepce v dubnu a září, kdy převládalo chladné počasí s vysokými úhrny srážek. Pokud srovnáme celá vegetační období, je výrazný rozdíl v intercepce jak ve smrkové mlazině (2017 16 %, 2018 27 %), tak v kmenovině (2017 25 %, 2018 32 %).

Hodnocení intercepce v lesních porostech se často omezuje pouze na korunovou vrstvu. Déšť je však zachycován i v nižších patrech lesa, které mohou být tvořeny mladšími vrůstajícími stromy, keři, ale i bylinnou vegetací. Ta může záchyt srážek i výrazně zvyšovat. Jeden takový příklad je patrný z tabulky 2.2. Intercepce dospělých bukových porostů se obvykle pohybuje v hodnotách od 18 % do 25 %. Maximální intercepce 47 %, která je v tabulce pro buk uváděna, byla zjištěna v neobhospodařovaných bukových lesích s hustým podrostem. S podrostem a bylinnou vegetací je nutno počítat. V mladých borových porostech na sušších stanovištích se někdy doporučují intenzivnější prořezávky či probírky, jejichž cílem je snížit korunový zápoj a tím



Obrázek 2.4:

Vývoj intercepce ve smrkové mlazině a kmenovině ve dvou vegetačních sezónách s odlišným průběhem počasí.

PET-S je rozdíl mezi potenciální evapotranspirací (PET) a množstvím srážek (S). Charakterizuje množství srážek, které chybí k tomu, aby srážková voda naplnila potřebu výparu (sytostní doplněk), jež je dána teplotou a vlhkostí vzduchu, radiací, tlakem a rychlostí větru. Tento rozdíl dobře charakterizuje intenzitu sucha v jednotlivých letech. Je patrné, že ve vegetačním období roku 2017 „chybělo“ pro naplnění potenciálního výparu 345 mm srážek, v následujícím roce to byl téměř dvojnásobek (610 mm).

i snížit intercepci a dosáhnout zvýšení disponibilní vláhy v lesní půdě. Pokud jsou však takové zásahy příliš silné, dochází k přílišnému prosvětlení porostu a nárůstu přizemní vegetace (obvykle borůvčí), jež může mít obdobnou intercepci jako samotná korunová vrstva. V takovém případě může být zásah z hlediska vodního režimu i kontraproduktivní. Specifické postavení mají mechy s obrovskou kapacitou zadržování vody vzhledem ke své hmotnosti. Ve srovnání se svou váhou dokáží jednotlivé druhy mechů zadržet sedminásobek až téměř patnáctinásobek vody. Na rozdíl od vyšších rostlin zachycují mechy vodu uvnitř svých těl a pouze malá část takto zadržovaných srážek se odpaří. Zachycená voda z větší části postupně infiltruje do půdy – mechy tak hrají pozitivní roli v postupném uvolňování vody do půdního prostředí a zároveň omezují výpar vody přímo z půdního povrchu. Obdobná je i role svrchní organické vrstvy půd – humusové vrstvy. Ta obsahuje různě rozložené zbytky korunového opadu – především listů a jehličí a obvykle se skládá z několika vrstev. Humusová vrstva má často vyšší kapacitu pro záchyt vody než vrstva korunová. Obecně u listnatých dřevin je kapacita humusu pro záchyt vody vyšší než jehličnanů, celkový efekt je však závislý i na mocnosti humusové vrstvy, a ta bývá v našich podmínkách pod jehličnany vyšší. Přestože má humusová vrstva velkou kapacitu pro zadržení srážek, výpar z ní je poměrně malý díky zastínění korunami a také relativně malému povrchu ve srovnání se svrchními patry lesa. Intercepce vody opadem a humusovou vrstvou se obvykle pohybuje do 15–20 % z celkového množství srážek.

Měření intercepce: Množství vody zachycené v korunách se neměří přímo, intercepce se vypočítává jako rozdíl mezi množstvím srážek měřených na volné ploše (případně nad lesním porostem) a množstvím srážek zachycených pod korunami stromů (porostní srážky). Měření porostních srážek je ovšem záležitost komplikovaná – pod korunami stromů není déšť distribuovaný rovnoměrně. Oreňák a kol. (2017) zjistili v dospělém smrkovém porostu v západních Tatrách intercepci pod okraji korun 20 %, pod korunami 27 %, v blízkosti kmene to bylo již 63 %. Vysoká variabilita spadu srážek pod porostem vyžaduje tedy měření v mnoha bodech. V některých případech manuálního měření se využíval vysoký počet srážkoměrů, často 20–50, které byly rovnoměrně či náhodně rozmístěny v porostu. V současné době se využívají různé typy systémů sběrných koryt s automatickou registrací (obr. 2.5), které jsou v porostu rozmístěny tak, aby reprezentativně pokrývaly spad srážek pod korunami i v porostních mezerách. Čím je lesní porost pestřejší z hlediska druhového složení i struktury, tím je potřeba vyšší počet zařízení. Měření pochopitelně komplikuje také spad listů a jehličí ze stromů. Odběrová zařízení tak musí být pravidelně čištěna. V případě měření intercepce přizemní vegetace je srážková voda obvykle zachycována do větších odběrových nádob – lyzimetrů, jejichž sběrné části jsou umístěny na povrchu půdy, případně pod humusovým horizontem.



Obrázek 2.5a:

Zařízení pro měření porostních srážek na ploše intenzivního monitoringu lesních ekosystémů (povodí Červík v Moravskoslezských Beskydech)



Obrázek 2.5b:

Měření porostních srážek v dubovém a bukovém porostu (Školní lesní podnik Křtiny)

2.3 Horizontální srážky

Jak již bylo naznačeno, kapacita korunové vrstvy pro zadržení srážek se snižuje s jejím ovlhnutím. Při mírných krátkých deštích, ve kterých spadne do 2 mm srážek, nemusí korunová vrstva k zemi propustit žádnou vláhu. „Krátkodobá“ hodnota intercepce pak dosahuje hodnoty 100 %. V případě, že jsou koruny vlhké z předchozích dešťů, je množství srážek ve stejném lesním porostu téměř stejné jako na volné ploše. V takovém případě se intercepce blíží nule. Zejména v horských oblastech pak může docházet k situacím, kdy lesní porosty povrchem korun stromů „vyčesávají“ srážky z mlhy či spodních vrstev oblaků a intercepce tak krátkodobě dosahuje záporných hodnot. Již v roce 1973 uvádí Krečmer na příkladu smrkových porostů v Orlických horách (plochy Šerlich), že v případech, kdy se mlha vyskytovala již před deštěm a koruny stromů tak byly plně ovlhčené, byly srážky pod porostem až o 25 % vyšší než srážky na volné ploše. Také za dlouhodobého výskytu mlhy bez deště je v lesním porostu možné naměřit nízké úhrny srážek z okapu, jenž se na volné ploše nevyskytuje. Kantor (1981) uvádí, rovněž pro oblast Orlických hor, že v ročním průměru horizontální srážky nadlepšují v bukovém i smrkovém porostu vodní bilanci o 100 – 200 mm srážek. Velký specifických povrch stromů – zejména jehličnanů – tak má v horských polohách pozitivní vliv na nadlepšení vodní bilance ekosystému. Výrazný vliv horizontálních srážek je v zimním období, kdy koruny stromů zachycují vodu formou jíní či námrazy.

2.4 Stok po kmeni

Voda, která se v lese dostane k bylinnému patru a následně k povrchu půdy, je označována jako porostní srážky. Z největší části je tvořena okapem z korun stromů, z části také přímým propadem srážek v mezerách mezi listovím. Obvykle velmi malá část se dostává k půdě stokem po kmeni. Ten je často v hydrologických modelech zanedbáván, protože představuje i méně než jedno procento srážek volné plochy. Jinak je tomu ovšem u naší nejrozšířenější listnaté dřeviny – buku lesního. Buk má sbíhavé větve a hladkou kůru a tvoří tak jakési přirozené „trychtýře“, kterými je voda sváděna k půdnímu povrchu. Množství vody, které dokáže stéci z jednoho mohutného kmene během intenzivního deště, je imponující. Jde o desítky litrů, na plochách v Beskydech bylo naměřeno i více než 200 l vody v průběhu jedné dešťové epizody. Procentuálně nedosahuje ani u buku stok po kmeni objemu, který představuje okap vody ze stromů. Tvoří obvykle kolem 5–10 % srážek volné plochy, i když Germer a kol. (2012) uvádí pro bukové porosty v Evropě stok po kmeni v rozpětí 3–25 %. Pro srovnání Kantor a Šach udávají v Orlických horách množství stoku po kmeni v bukovém porostu 10 % a ve smrku pouhé 0,1 % srážek volné plochy. Tyto údaje pochopitelně odpovídají olistěné koruně, v mimovegetačním období je množství vody stékající po kmeni výrazně nižší, v případě sněhových srážek nulové. Role stoku po kmeni v lesních porostech spočívá nejen v tom, že zvyšuje množství porostních

srážek, ale také v tom, že přivádí velké množství vody do oblasti v těsném okolí kmenů, což má ekologické důsledky pro zásobení dřevin vodou, zasakování vody do hlubších horizontů i pro distribuci přízemní vegetace a epifytů – především mechů a lišejníků.



Obrázek 2.6:

Zařízení pro měření stoku po kmeni v bukovém porostu. Plocha Všeteč v Píseckých horách

Měření stoku po kmeni: Jímání vody po kmeni se provádí spirálami či speciálními límcí, které jsou pevně přichyceny ke kmeni stromů. V minulosti se pro tento účel využívaly manžety z olověných plechů, v současné době jsou především z různých druhů montážních pěn v kombinaci se silikonovými tmely, případně mohou být sestavovány z plastových či polyetylenových výlisků. Voda je z nich sváděna obvykle do zásobních nádob, které musí mít velký objem (> 200 l), aby nedošlo k přetečení mezi jednotlivými odečty. Často je více menších nádob (> 50 l) sestaveno do kaskád, což usnadňuje manipulaci. Měření protékající vody registračním zařízením je stále ještě méně obvyklé vzhledem k jeho komplikovanosti. Standardní typy srážkoměrů pro něj nejsou vhodné kvůli velkému objemu vody v krátkém čase a proměnlivé dynamice průtoku. Vzhledem k malé potřebě takových přístrojů je jejich cena obvykle poměrně vysoká. Množství stoku v milimetrech se získává přepočtením podle podílu kruhové základny (plochy průřezu kmenem ve výšce 1,3 m) měřených stromů vůči výčetní kruhové základně celého porostu. Stok po kmeni je obvykle jímán nejen pro zjištění množství, ale především pro zjištění chemických parametrů. Jeho role v geo-biochemickém cyklu ekosystému je ještě významnější než v cyklu hydrologickém.

2.5 Ekologický význam intercepce

Intercepce je v některých případech vnímána spíše jako negativní efekt – voda, která se z korunové vrstvy lesního ekosystému bez užítku vypaří. Z hlediska biologického bývala označována jako součást „neužitečného“ či „neproduktivního“ výparu, z hlediska hydrologického se hovořilo o „intercepčních ztrátách“ celkové vodní bilance. Jakkoliv intercepce představuje vodu, která se z ekosystému odpaří, aniž by dosáhla povrchu půdy, není její role zanedbatelná z fyziologického, ekologického a nakonec ani z hydrologického hlediska.

Z hlediska fyziologie nahrazuje výpar vody zadržené v korunách stromů do určité míry některé funkce transpirace. Intercepce stejně jako transpirace ochlazuje povrch rostlin a okolní vzduch. Při odpaření jednoho litru vody se při teplotě 20 °C spotřebuje energie zhruba 2 450 kJ (při teplotě 0 °C je to 2 510 kJ). Pro srovnání – při ochlazení jednoho metru krychlového vzduchu o 1 °C se spotřebuje energie pouhých cca 1,28 kJ. Výparem intercepční vody se rovněž sytí vzduch vodní párou. V podmínkách dostatečné vzdušné vlhkosti mohou být průduchy rostlin otevřené a přijímat oxid uhličitý nutný pro fotosyntézu a růst, aniž by docházelo k velkým ztrátám vody transpirací. Lze tak říci, že intercepce do jisté míry snižuje nároky stromů na půdní vlhkost, aniž by omezovala asimilaci uhlíku. To, co voda zachycená v korunách stromů nemůže z pochopitelných důvodů dřevinám poskytnout, je transport živin z půdy k asimilačním orgánům, nicméně ve výše zmíněných parametrech ovlivňuje prostředí rostlin pozitivně.

Průchod vody korunami má pak významný ekologický vliv na spodní patro lesa a půdní prostředí. Voda se nedostává ke spodním patřům lesa a na povrch půdy rovnoměrně. Jak již bylo uvedeno, pod lesním porostem jsou místa, kde pronikne oproti volné ploše minimum srážek, na okrajích korun a v mezerách korunové vrstvy jsou naopak místa, kde celkové úhrny mohou být oproti volné ploše i vyšší. Tím vznikají preferenční cesty pro zasakování vody, kterým se přizpůsobuje přizemní vegetace i růst kořenů pod půdním povrchem. Propad srážek korunami (a jejich částečné zachycování) je jedním z důvodů vysoké variability lesního prostředí i lesních půd.

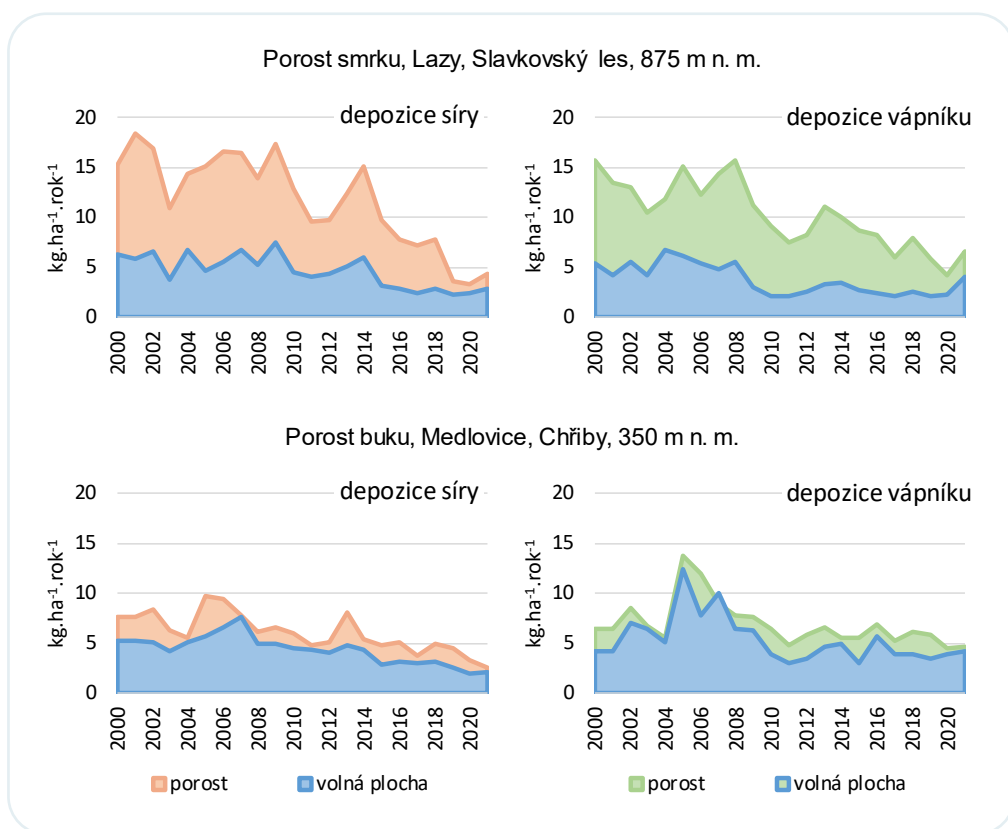
Nejde jen o mozaiku množství srážek pod porostem. Porostní srážky mají jiné chemické složení, než má dešťová voda na volné ploše. Jednak omývají povrch listů, na kterém ve formě prachových částic a aerosolů ulpívají látky z ovzduší, jednak rozpouštějí látky vylučované listovím a kůrou a z části mohou i vymývat některé prvky z rostlinných orgánů. Přestože pod lesním porostem množství srážek dosahuje pouze 50–80 % volné plochy, vnos živin, dalších látek, ale i zátěžových prvků do lesní půdy je vyšší (obr. 2.7). Stejně jako vlastní intercepce je míra tohoto obohacení srážek závislá na drsnosti povrchu korunové vrstvy: k většímu zachytu látek, a tedy i výraznějšímu obohacení srážkové vody dochází – ve srovnání s listnatými porosty – v korunách stálezelených jehličnatých dřevin. Výrazně negativně se tento proces projevoval v období imisní kalamity ve druhé polovině dvacátého století. Spady síranů a vodíkových iontů pod lesními porosty silně převyšovaly jejich depozici na volné ploše a zřetelně přispívaly k acidifikaci a degradaci lesních půd. Lochman a Šebková (1998) uvádějí, že v době vrcholící imisní kalamity v Krušných horách koncem 70. let minulého století dosahoval spad síry na volné ploše dnes již neuvěřitelných 20–40 kg na hektar ročně, ale v dospělém porostu smrku v blízkosti Moldavy běžně překračoval 100 kg. Měření v roce 1979 dokonce prokázala rekordní hodnotu

190 kg.ha⁻¹.rok⁻¹. Oblast Krušných hor a dalších severních pohraničních pohoří byla extrémně zatížena imisemi, o čemž dodnes svědčí například zbytky porostů smrků pichlavého a jiných nepůvodních jehličnatých dřevin, které byly vysazovány na kalamitních holinách jako dřeviny odolné vůči znečištění ovzduší. Na rozdíl od přímého vlivu oxidu siřičitého, který způsoboval rychlé odumírání lesa, ovlivňoval vysoký spad depozic (především sloučenin síry a dusíku) prakticky celé území České republiky. Aniž by tak došlo k okamžitému narušení zdravotního stavu lesa, byly lesní půdy často nevratně ochuzeny o zásoby bazických živin. I v současné době je spad znečištění v porostních srážkách vyšší než na volné ploše, byť již obvykle nedosahuje kritických hodnot. Na druhou stranu i pro depozici živin platí, že je vyšší v lese než na volné ploše. Roční depozice bazických prvků na volné ploše se pohybuje v jednotkách kilogramů za rok. V listnatých porostech bývá např. u vápníku o 30–50 % vyšší, v jehličnatých porostech to bývá i více než dvojnásobek. U hořčíku a draslíku je rozdíl ještě vyšší, ale tyto prvky jsou z části vymývány z korun stromů, nejde tedy o přímý vstup prvků do ekosystému.

Atmosférická depozice neboli spad látek se srážkami má několik forem. Jedná se o **suchou depozici**, kterou lze dále dělit na depozici pevných látek a aerosolů. Zejména v případě dusíku je uvažována rovněž **plynná depozice**, která představuje přímou interakci oxidů dusíku, amoniaku ale i plynné kyseliny dusičné s rostlinami. **Mokrou depozici** reprezentuje spad látek se srážkami. Mokrý depozice je zachycována speciálními kolektory, které se otevírají pouze za deště či mrholení (**wet-only**), zadržaná srážková voda je následně analyzována v chemických laboratořích. Častější je odběr srážkové vody trvale otevřenými nádobami, které ovšem zachycují i část suché depozice, jež ulpí na jejich povrchu. V tomto případě hovoříme o celkové (**bulk**) depozici. V lesních porostech je sledována podkorunová depozice (**throughfall**), jejíž měření je stejně problematické jako měření srážek – pro získání reprezentativní hodnoty je nutné použít větší množství odběrových zařízení, často i specifického tvaru (koryta). V případě dřevin s hladkou borkou a sbíhovou korunou – v našich podmínkách zejména buků – představuje nezanedbatelný podíl depozic i voda stékající po kmenech (**stemflow**). Ta ovšem již do velké míry obsahuje látky vyplavené z kůry a asimilačních orgánů dřevin. Aby bylo možné zjistit poměr suché a mokré depozice v lesních porostech, je nutné používat speciální modely (**canopy exchange models**), které umožňují určit právě podíl látek vyplavovaných z korunové vrstvy. Depozice se udává v kilogramech na hektar za rok [kg.ha⁻¹.rok⁻¹], případně v gramech na metr čtvereční za rok [g.m⁻².rok⁻¹].

Procesy v korunové vrstvě lesních ekosystémů mají význam i z hlediska hydrologického. Z čistě mechanického pohledu představuje intercepce (stejně jako jakýkoliv výpar) ztrátu vody, která se nedostane k půdě, a tudíž ani do zdrojů. Z tohoto pohledu je ideální nepropustná plocha (např. vybetonovaná či pokrytá asfaltem), která téměř veškerou srážkovou vodu odvede ve formě odtoku. Takto funguje například sběrná oblast pro zásobování pitnou vodou na Gíbral-

taru, jež začala být budována již v 11. století. Každý, kdo zažil letní bouřku v městských ulicích, však tuší, že pro normální krajinu není takové „bezezbytkové“ jímání srážkové vody funkční. Hydrická funkce lesů spočívá ve zpomalení toku vody ekosystémem, jejího zadržování v období nadbytku a postupného uvolňování v době nedostatku. V lesích dochází zcela výjimečně k povrchovému odtoku vody při přivalových srážkách, a naopak v obdobích sucha lesy zabezpečují vyšší zásobení povrchových toků než jiné typy ekosystémů. Tyto funkce jsou z části zajišťovány prostřednictvím lesních půd, které mají výraznou nadložní organickou (humusovou) vrstvu a vysokou retenční kapacitu díky výraznému prokořenění, výskytu makro- i mikropórů a bohaté půdní biologické činnosti. Významnou roli hraje i intercepce, zejména z hlediska zpomalování toku vody ekosystémem a již popsanou distribucí srážek v rámci porostu. Pokud pak



Obrázek 2.7:

Depozice síry a vápníku na volné ploše a pod porostem ve dvou odlišných lesních porostech. V horní části grafu jsou data z plochy Lazy v západních Čechách, s relativně vysokou depozicí síry a dospělým smrkovým porostem s vysokým zachytem suché depozice. Ve spodní části grafu jsou data z dospělého porostu buku na ploše Medlovice v jedné z nejméně zatížených lokalit na východním úpatí Chřibů.

přihlédneme k teorii biotické pumpy (viz rámeček na str. 20), přispívá intercepce jako součást výparu k posunu vlhkých vzduchových hmot v rámci kontinentů a zajištění dostatečných srážek v makroregionálním měřítku. Četné studie dokládají, že po smýcení lesa v povodí obvykle dojde ke zvýšení jeho vodnosti. Přesto je možné tvrdit, že lesy nejen přispívají k udržení vody v krajině, ale jsou i základním předpokladem pro její získání a distribuci.

LITERATURA

ELLISON D., MORRIS C.E., LOCATELLI B., SHEILG D., COHEN J., MURDIYARSO D., GUTIERREZ V., VAN NOORDWIJK M., CREED I.F., POKORNY J., GAVEAU D., SPRACKLEN D.V., TOBELLA A.B., ILSTEDT U., TEULING A.J., GEBREHIWOT S.G., SANDS D.C., MUYS B., VERBIST B., SPRINGGAY E., SUGANDI Y., SULLIVAN C.A. 2017: Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51–61, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002

FRIESEN J., LUNDQUIST J., VAN STAN J.T., 2015: Evolution of forest precipitation water storage measurement methods. *Hydrological Processes* 29, 2504–2520, DOI 10.1002/hyp.10376

GERRITS A., M., PFISTER L., SAIVENIJE H.H.G. 2010: Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest. *Hydrological Processes* 24, 3011–3025, DOI: 10.1002/hyp.7712

GERMER, S., BLUME T., ANDRÉ F., JONARD M., CAIGNET I., COENDERS–GERRITS M., 2012. Pan-European beech (*Fagus sylvatica*) stemflow data comparison. *Geophysical Research Abstract* 14 (EGU2012-12761).

GERRITS, A.M.J., PFISTER, L., SAIVENIJE, H.H.G., 2010. Spatial and temporal

GRIBOVSKI Z., KALICZ P., PALOCZ–ANDRESEN M., SZALAY D., VARGA T., 2019: Hydrological role of Central European forests in changing climate – review. *Időjárás* 123, 535–550, DOI 10.28974/idojaras.2019.4.8.

HŮNOVÁ I., 2016: Atmosférická depozice dusíku. *Chemické listy* 110, 779–784.

JANČO M., MEZEI P., KVAS A., DANKO M., SLEZIAK P., MINDÁŠ J., ŠKVARENINA J., 2021: Effect of mature spruce forest on canopy interception in subalpine conditions during three growing seasons. *Journal of hydrology and hydromechanics* 69, 436–446, DOI: 10.2478/johh-2021-0025

JOCHHEIM H., LÜTTSCHWAGER D., RIEK W., 2022: Stem distance as an explanatory variable for the spatial distribution and chemical conditions of stand precipitation and soil solution under beech (*Fagus sylvatica* L.) trees. *Journal of Hydrology* 608, 127629, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127629

KANTOR P., 1981: Intercepce horských smrkových a bukových porostů. *Lesnictví* 27, 171–192.

KANTOR P., ŠACH F., Vodní režim mladého horského smrkového a bukového porostu ve vegetačních obdobích 2005 a 2006. In: Štrelcová, K., Škvarenina, J. & Blaženec, M. (eds.): “Bioclimatology and Natural Hazards” International Scientific Conference, Poľana nad Detvou, Slovakia, September 17–20.

- KEYS, P.W., WANG–ERLANDSSON L., GORDON L.J., 2016: Revealing invisible water: moisture recycling as an ecosystem service. PLoS ONE 11e0151993, DOI:10.1371/journal.pone0151993
- KREČMER V., 1968: K intercepci srážek ve středohorské smrččině. Opera corcontica 5, 83–93.
- KREČMER V., 1973: Meteorologické podmínky výskytu kapalných srážek z mlhy a jejich význam pro intercepční proces ve středohorském lese. Meteorologické zprávy 26, 18–25
- KREČMER V., FOJT V., 1981: Intercepce smrččin chlumní oblasti. Vodohospodářský časopis. 1981, 29, 33–49.
- KREČMER V., FOJT V., HYNČICA V., 1981: Intercepční proces ve smrkových porostech. Vodohospodářský časopis 29, 593–614.
- LEVIA D. L., FROST E. E., 2003: A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. Journal of hydrology 274, 1–29.
- LI X., XIAO Q., NIU J., DYMOND S., MC PHERSON E.G., VAN DOORN N., YU X., XIE B., ZHANG K., LI J., 2017: Rainfall interception by tree crown and leaf litter: An interactive proces. Hydrological Processes 31, 3533–3542, DOI: 10.1002/hyp.11275
- LOCHMAN V., ŠEBKOVÁ V., 1998: The development of air pollutant depositions and soil chemistry on the research plots in the eastern part of the Ore Mts. Lesnictví–Forestry 44, 549–560.
- MOESER D., MAZZOTTI G., HELBIG N, JONAS T., 2016: Representing spatial variability of forest snow: Implementation of a new interception model. Water Resources Research 52, 1208–1226, DOI: 10.1002/2015WR017961.
- OREŇÁK M., VIDO J., HRÍBIK M., BARTÍK M., JAKUŠ R., ŠKVARENINA J. 2019: Intercepční proces smrekového porostu vo fáze rozpadu v Západných Tatrách. Zprávy lesnického výzkumu 58, 360–369
- PEARCE F., 2020: Weather makers. Science 368 (6497) DOI: 10.1126/science.368.6497.1302
- POKORNÝ J., HESSLEROVÁ P., 2022: Aktivní úloha vzrostlého lesa v klimatu, oběhu vody a zadržování živin. Časopis Sovak, 16–25
- ŠACH F., ČERNOHOUS V., KACÁLEK D., 2019: Vodní režim douglasky a lesních porostů s douglaskou: review. Zprávy lesnického výzkumu 64, 149–154
- THIELEN, S.M., GALL C., EBNER M., NEBEL M., SCHOLTEN T., SEITZ S., 2021: Water's path from moss to soil: A multi-methodological study on water absorption and evaporation of soil–moss combinations. Journal of Hydrology and Hydromechanics 69, 421–435, DOI: 10.2478/johh-2021-0021
- VAN DER ENT R., SAVENIJE H.H.G., SCHAEFLI B., STEELE–DUNNE S., 2010: Origin and fate of atmospheric moisture over continents. Water Resources Research 46, W09525, DOI: 10.1029/2010WR009127
- VAN STAN J.T., GUTMANN E., FRIESEN J. (EDS.) 2020: Precipitation Partitioning by Vegetation. A global synthesis. Springer Nature Switzerland, 281 pp., DOI: 10.1007/978-3-030-29702-2
- ZELENÝ V., 1975: Vodohospodářský význam lesů v Beskydech. Lesnictví, 21, 131–144.

3 Sněhové srážky a sníh

Ondřej Špulák

Sněhové srážky tvoří v mnoha ohledech specifickou část koloběhu vody v přírodě. Právě pro jejich výjimečnost a také pro speciální roli sněhové pokrývky v hydrologickém fungování lesních ekosystémů věnujeme tomuto fenoménu vlastní kapitolu. Sníh je významným prvkem ovlivňujícím mikroklima lesa a často i jeho charakter, a to svými osobitými vlastnostmi. Podstatnou odlišností sněhových srážek od deště je to, že po dopadu hned neodtékají, mohou pomaleji zasakovat, a tak se lépe zapojit do doplňování zásob podzemní vody. V horských polohách představuje sněhová pokrývka v průměru 25–30 % ročního úhrnu srážek a ovlivňuje po dlouhou dobu vodní režim v jarních měsících.

Sníh vzniká za vhodných klimatických podmínek v oblacích z ledových krystalek tvořících se na kondenzačních jádrech převážně biologického původu, jako jsou bakterie. Jeho struktura

Základní vlastnosti sněhu a jejich měření: Na rozdíl od deště se množství vody vstupující do prostředí ze sněhových srážek podstatně hůře stanovuje, a to pro jeho variabilní fyzikální vlastnosti i mj. převívání po dopadu vlivem větru. Pro popis vlastností sněhové pokrývky se nejčastěji používají údaje, jako jsou výška sněhu, vodní hodnota sněhu a jeho hustota. V prostředí lesa se vlivem terénu i vlivem mikroklimatického působení stromové, keřové i bylinné vegetace mohou vlastnosti sněhu včetně jeho výšky lokálně významně lišit a vztah mezi výškou sněhu a obsahem vody v něm bývá obecně nevyzpytatelný. A to z toho důvodu, že hustota a tím i vodní hodnota sněhu v lese kolísají, a to jak v prostoru, tak v čase. Vodní hodnota sněhu vyjadřuje veškeré okamžité množství vody ve sněhové pokrývce. Lze si ji představit jako výšku vodního sloupce, který by vznikl, kdyby se sníh na dané ploše rozpustil (bez ztrát výparem). V České republice se nejčastěji uvádí v milimetrech výšky vodního sloupce, a tak ji lze přímo vztahovat k dešťovým srážkám. Další možností vyjádření jsou jednotky hmotnosti na plochu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$). Naproti tomu hustota sněhu se vyjadřuje jako objemová hmotnost ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a narůstá v období tání.

Vodní hodnota sněhu má přímou souvislost s jeho mechanickým působením, zatížením sněhem, její znalost je však důležitá např. také v hydrologii. Kromě ručního měření metodou vážení sněhového profilu vyzvednutého odběrným („sněhoměrným“) válcem (obr. 3.1) může být zjišťována automaticky pomocí řady metod fyzikálního charakteru. Přirozené vlastnosti sněhu však způsobují, že měření každou z dosud dostupných metod jsou zatížena určitou chybou. U nás se pro kontinuální automatické měření vodní hodnoty nejčastěji používají tzv. sněhoměrné polštáře na principu měření tlaku, méně je uplatňováno měření na principu váhy sněhu (obr. 3.2).

zahrnuje nepřebornou škálu forem a velikostí, které jsou ovlivněny odlišnou kombinací teploty, tlaku a koncentrace molekul vody (vlhkosti) v oblacích i podmínkami při sestupu k povrchu Země. Svou roli hraje také čas – čím déle se vločky tvoří, tím bývají větší.

S klimatickými podmínkami a časem pak souvisí také hustota sněhu. Čerstvě napadnutý suchý sníh (tzn. neobsahující žádnou tekutou vodu) při nízkých teplotách mohou tvořit molekuly vody jen ze 3 % objemu, zbytek představují vzduchové mezery mezi ledovými krystalky. Jeho hustota pak může být jen 30 kg.m^{-3} . Naproti tomu u mokrého sněhu se hustota zvyšuje na více než 500 kg.m^{-3} a při silných srážkách, kdy vypadává déšť se sněhem, se může blížit až hustotě vody.

Obsah kapalné vody ve sněhu pak kromě hustoty určuje také jeho přilnavost na povrchy. Při sněžení běžně dochází k zachycování (intercepci) sněhu v korunách stromů. Např. u smrku v horách může být takto zachyceno celkově kolem 40 % sněhových srážek, z nich cca 3/4 později dospějí k zemi, zbytek se vypaří či vysublimuje. Mokrý sníh má svou lepivostí předpoklady



Obrázek 3.1:
Odběrný válec pro měření výšky a vodní hodnoty sněhu

být více zachycován (má vyšší míru intercepce) a má tak tendenci vytvářet v korunách vysoké „sněhové čepice“. Tato zátěž pak pro stromy představuje riziko vzniku deformací (ohnutí), zátřhů větví, zlomů i vývrátů, zvláště v kombinaci s větrem.

Pro zvýšení stability a snížení rizika poškození porostů sněhem se musí lesní hospodář soustředit na včasné výchovné zásahy. Dřeviny mají vyšší stabilitu při nižším poměru výšky stromu k jeho tloušťce v prsní výšce, což je výška 1,3 m nad zemí, ve které se běžně provádí měření tloušťky kmene u stojících stromů. Tento poměr h/d se označuje štíhlostní kvocient. Stabilitu stromů zlepšuje také hlubší zavětvení, jež snižuje těžiště koruny. U většiny dřevin se doporučuje zahájit výchovu při výšce porostu 5 m. Jak ukazují práce Nováka a kol. (2013), případně Slodičáka a kol. (2013), ve středním věku už význam výchovy jako prostředku zvyšování stability porostů klesá. Například v borových porostech bez výchovy je zatížení sněhem kritické již



Obrázek 3.2:

Automatický sněhoměr LDSMS2014 měřící vodní hodnotu sněhu na principu váhy a výšky sněhu (Špulák a kol., 2020)

při hodnotách 10 až 40 kg.m⁻², což odpovídá 10 až 40 mm vodní hodnoty sněhu. I zvyšování stability dřevin výchovou však má své limity. U vychovávaných porostů borovice se za kritické považuje zatížení sněhem 60 kg.m⁻². Aby při tomto zatížení došlo ke zlomu stromu se štíhlostním kvocientem 120 uvnitř porostu, pak stačí, aby foukal vítr o rychlosti pouze 7 až 8 m.s⁻¹, a pro stromy na jeho okraji jenom 2 až 3 m.s⁻¹.

Na větvích mladých dřevin v horských polohách způsobuje těžký závěs sněhu zlomy či zátrhy větví (obr. 3.3). Většina dřevin tomuto poškození postupně odrůstá, ohrožené však zůstávají dřeviny, v jejichž korunách se sníh s ohledem na úhel a hustotu větvení snadno zadržuje, jako je bříza či jeřáb nebo dřeviny málo odolné vůči námraze (například modřín). Zátrhy vznikají také jako důsledek jevu zvaného snowbridging, což lze volně přeložit jako „přemostění sněhu“, při kterém se vlivem klimatických podmínek (nejčastěji déšť na sníh a následný mráz) vytvá-



Obrázek 3.3:

Zátrhy větví bývají jedním z důsledků silné zátěže nasněžené vrstvy sněhu nebo vlivem vytvoření ledové krusty na povrchu sněhové pokrývky (snowbridging), jež koncentruje hmotnost větší plochy na v ní zamrzlé objekty (Balcar a kol. 2007)

řejí pevné ledové krusty na povrchu sněhu. Pokles výšky sněhu s takovou krustou pak vlivem zhuťňování způsobuje, že na větve v ní zamrzlé působí hmotnost sněhu z širšího okolí a vede k jejich poškození.

Ke specifickému poškození vlivem sněhu dochází v horských oblastech na příkrých svazích. Zatímco laviny jsou záležitostí spíše pásů bezlesí, neboť svým bořivým pohybem přímo určují hranice lesa, pomalé plazení sněhu často způsobuje deformace výsadeb i přirozené obnovy dřevin, a to i pod porostem. Výsledkem bývá křivolakost nebo minimálně „fajfkovité“ zahnutí bází kmenů. Stromy se tak vyrovnávají se stabilitou utvářením rozložitých kořenových systémů a dochází k formování tlakového a tahového dřeva. Zahnutý tvar bází stromků je vyhledávaný záměrně pouze pro velice specifické účely, u smrku je jím např. výroba alpského rohu – Alphorhu (obr. 3.4).

Sníh má vysokou odrazivost světla. Čerstvý sníh odrazí asi 90 % dopadajícího světla ve viditelné oblasti spektra (má albedo okolo 0,9). U staršího sněhu odrazivost postupně klesá a sníh absorbuje více záření, které je převedeno na teplo. To znamená, že čím více sněhová vrstva na povrchu nataje, tím více poklesne její odrazivost a v důsledku toho se stále zvyšuje rychlost odtávání. Absorpce záření narůstá také vlivem přítomnosti příměsí ve sněhu. Ty se mohou stát jeho součástí již v oblacích (např. jemné částičky pouštního písku, emisní sloučeniny), nebo mohou být zachytávány při sněžení podobně, jako když dešťové kapky „vymývají“ atmosféru.



Obrázek 3.4:

Ukázka hry na alpský roh, jehož spodní díl se vyrábí ze zahnuté báze kmene deformované vlivem sněhu. Foto z akce saského lesopolitického fóra

V lesích je pak v jarním období povrch sněhové pokrývky často pokryt opadem drobných větviček, kůry a jehličí ze stromů. Rozdíl v absorpci záření sněhem a okolím hraje významnou roli při odtávání. Díky němu např. sněhová pokrývky v okolí kmenů stromů odtává rychleji, neboť dřevo se vlivem slunce intenzivněji ohřívá a získané teplo následně předává blízkému sněhu. Kolem kmenů se tak vytvářejí vytáté „lavory“ mající svůj význam při lokální infiltraci a doplňování zásob podzemní vody. Podobně působí vyzařování tepla absorbovaného korunami stromů na tání a sjiždění zachyceného sněhu z korun, při kterém přibývají porostní srážky i mimo srážkové události.

Stejný princip vyšší absorpce tepla ze slunečního záření také přispívá příznivějším podmínkám pro přirozenou obnovu dřevin s lehkými semeny. Například semena borovice, břízy, javorů a jasanů často vypadávají v průběhu zimy, v ideálním případě tedy na sníh. Ohřev vlivem slunce způsobuje jejich postupné „vtahování“ do sněhu (obr. 3.5). Poslední fáze intenzivnější oblevy pak semeno spláchne k povrchu půdy. Po celou dobu své pouti sněhem má přitom příhodné vlhkostní podmínky umožňující přípravu na klíčení.



Obrázek 3.5:
„Vtahování“ jasanových semen do sněhu vlivem vyšší absorpce tepla od slunce

Voda ze sněhu se do koloběhu vody v lesním ekosystému zapojuje více způsoby. Přestože většina sněhu v průběhu tání zkapalní, pórovitá struktura sněhu napomáhá sublimaci, tedy přímé přeměně pevného skupenství vody ve skupenství plynné, čímž dochází ke zvyšování vlhkosti vzduchu. Naproti tomu při vysoké vzdušné vlhkosti za mrazových teplot dochází k desublimaci vodní páry a vytváření jíní, jinovatky nebo námrazy. Námraza pak spolu s ledovkou může způsobovat mechanické poškození dřevin závěsem na větve a koruny podobně jako vrstva mokrého sněhu. Analýzou vývoje vodní hodnoty sněhu a objemu tající vody v průsaku bylo zjištěno, že výpar a sublimace (evaporace) ze sněhu se pohybuje v řádu procent sněhových srážek (od cca 4 do 8 %) a v nižších polohách je vyšší než na horách.

Pro mikroklima lesa a jeho obnovu jsou důležité také izolační vlastnosti sněhu. Ty značně závisí na jeho hustotě. Čerstvě napadaný sníh s hustotou 100 kg m^{-3} má součinitel tepelné vodivosti asi $0,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, což je hodnota srovnatelná s vlastnostmi polystyrenové izolace. Naproti tomu slehlý sníh o hustotě 500 kg m^{-3} má tepelnou vodivost zhruba dvacetkrát vyšší, obdobnou jako kapalná voda. Zatímco silné mrazové teploty bez sněhu způsobující holomráz jsou pro vegetaci limitující, zvláště pokud dojde k promrznutí povrchu půdy, při kterém mohou být zaškrceny kořenové krčky i poškozeny kořeny, pletiva (mladých) dřevin zakrytá vrstvou sněhu jsou proti vymrzání chráněna. Pro jejich příznivý život pod sněhem je však podstatná přítomnost vzduchu ve struktuře sněhu. Množství vzduchu ve sněhu klesá s jeho zhutňováním v průběhu tání, kdy volný prostor mezi ledovými krystalky zaplňují kapky vody z tajícího sněhu. Při oteplení za jasných zimních dnů a opětném zamrznutí přes noc pak na povrchu sněhu často dochází k vytváření zmrzlých krust, ve kterých je vzduch ze sněhu vytlačen a jeho prostor je nahrazen vodou. Tyto ledové vrstvy pak brání přístupu vzduchu (kyslíku) k pletivům vegetace pod slehlou vrstvou sněhu. Při delším trvání mohou pletiva zažívat anaerobní stres, kdy v důsledku nedostatku kyslíku a trvalého chladu (i dalších stresorů) dochází až k jejich odumírání. Ještě dramatičtější tento proces „dušení“ probíhá pod ledovkou.

Vlivem intercepce korunami stromů spadne k povrchu půdy v lese méně sněhových srážek než na volné ploše. Listnaté dřeviny mají v porovnání s jehličnany mimo vegetační dobu menší intercepce srážek, včetně sněhových, a to díky menšímu povrchu korun. Bývají proto také odolnější vůči škodám sněhem. Ze stejného důvodu pod nimi zpravidla bývá větší zásoba vody ve sněhu než pod porosty jehličnanů. Výšku a vodní hodnotu sněhu jehličnatých porostů navyšuje nejen příměs listnatých dřevin, ale i přimíšení opadavého modřínu. V horských polohách na druhou stranu bývá vodní bilance jehličnatých porostů (smrku) i v zimním období nadlejšována horizontálními srážkami – námrazou, jinovatkou. Ta pak může vyrovnat vyšší intercepční ztráty výparem, případně působit i v hydrologické bilanci kladně, to znamená, že se pod porost smrku v porovnání s listnáči i volnou plochou nakonec dostane celkově více srážek. Intercepce sněhu je závislá na korunovém zápoji. Na rozdíl od kapalných srážek tak u mladých, hustých porostů smrku bývá vyšší, s věkem a klesajícím korunovým zápojem klesá. Snížení intercepce sněhu porostem a navýšení podkorunových srážek, lze dosáhnout pouze výraznějším uvolněním korun silnějšími výchovnými zásahy. Po obnovení korunového zápoje tento efekt navýšení opět mizí.

Vývoj sněhové pokrývky je ovlivňován celou řadou faktorů. V první řadě je to charakter terénu, včetně orientace vůči světovým stranám, charakter a sled sněhových srážek, dále střídání teploty vzduchu, změny v intenzitě slunečního záření, výskyt dešťových srážek při sněhové pokrývce, ale i průběh a intenzita proudění vzduchu. Větší vliv na ukládání a vrstvení sněhu má

spíše jeho druhotné převívání než vítr v čase nasněžení. To může sníh přenést i z návětrné na závětrnou stranu. V důsledku všech těchto faktorů má sněhový profil specifické vrstvení, které se v průběhu času vyvíjí. Na rozdíl od volné krajiny typu rovinatá louka jsou vlastnosti sněhové pokrývky v prostředí lesa výrazně různorodé. Stromy a terénní útvary snižují množství sněhu při povrchu půdy svou intercepcí, kdy se část sněhu z korun vypaří (sublimuje). Na druhou stranu omezují stíněním intenzitu záření prostupujícího do porostu i rychlost proudění vzduchu, čímž přispívají ke zpomalení odtávání. Jednotlivé stromy v lese vytvářejí překážky proudění vzduchu, a tím ovlivňují charakter ukládání sněhu. Na návětrné straně kmenů pak bývá vrstva sněhu vyšší a často se sníh zachytává i na kůře kmene či přilehlé části koruny. Naproti tomu na závětrné straně se vytvářejí nejprve vyváté sněhové „kapsy“ a teprve ve větší vzdálenosti při poklesu rychlosti větru bývá vrstva sněhu vyšší. Ještě výrazněji se tento efekt projevuje u stromových solitér (obr. 3.6).

Různorodé prostředí lesa s mnoha typy mikrostanovišť zpomaluje a prodlužuje období tání, které je tak pomalejší než tání sněhu ve volném terénu. Např. Kantor (1988) oproti holině



Obrázek 3.6:
Vrstvení sněhu v blízkém okolí stromových solitér je výrazně ovlivňováno větrem

zjistil ve smrkovém porostu o 15 až 30 % nižší průměrné i maximální hodnoty rychlosti tání. Obecně pak platí, že sníh taje intenzivněji v listnatých než ve stálezelených jehličnatých porostech, ve kterých dochází k většímu stínění povrchu půdy. Pomalé odtávání v lese je příznivé z hlediska infiltrace (vsakování), která umožňuje plynulejší doplňování zásob podpovrchové i podzemní vody. To je důležité zejména v horských oblastech, neboť ty jsou pak díky udržování základního odtoku zásobárnou vody pro podhorská území v obdobích nižších srážkových úhrnů. Tání sněhu neprobíhá jen v důsledku atmosférických podmínek – teplot, záření, vzdušné vlhkosti, proudění vzduchu, případně vlivem kapalných srážek. Na odtávání se současně podílí teplo předávané kontaktem s povrchem půdy, tedy tání „zdola“. K němu dochází v průběhu celé zimy, s výjimkou epizod zámru, které nastávají zejména v bezleši v nižších polohách při nedostatečné vrstvě sněhu.

Vrstvení a odtávání sněhu je ovlivňováno také charakterem porostů jednotlivých dřevin. Z hodnocení výšky a vodní hodnoty sněhu v mladých porostech rostoucích na společné vrcholové lokalitě v Krkonoších bylo zjištěno, že nejvyšší vrstva sněhu se tvoří v porostech kleče a smrku. Méně se sníh vrstvil pod modřínem, jeřábem a břízou, v porostní mezeře byla výška sněhu po celé období nejnižší. Výšku sněhu v porostu kleče navyšoval sníh zachycovaný na vystoupavých větvích, tento jev byl pozorován i v nejbližším okolí hluboko zavětřených smrků. Na rozdíl od výšky sněhu však nebyl mezi porostní mezerou a porosty dřevin zjištěn výraznější rozdíl v jeho hustotě. Rozdíly ve vodní hodnotě sněhu se projevily až v průběhu tání, které probíhalo nejrychleji na volné ploše. Průkazně nejpomaleji klesala vodní hodnota v porostu smrku, a to díky výraznějšímu stínění korunami. Rozdíl okamžité vodní hodnoty v závěru období tání dosahoval 100 až 200 mm.

Pokud nedojde k poškození hydrografické sítě (v případě lesních porostů zejména struh, příkopů a potoků) například vlivem těžké techniky, ani intenzivní tání v lese většinou nevede k povrchovému odtoku, který je častým projevem tání na zemědělské půdě a může znamenat nebezpečí eroze půdy či povodní. Naproti tomu v odumřelém lese se průběh ukládání sněhu a odtávání částečně přibližuje tomu na holině. Mění se totiž intenzita záření (radiační poměry) a zároveň se zvyšuje rychlost větru. Podobnost vývoje sněhové pokrývky v odumřelém lese s holinou je však větší ve fázi akumulace sněhu než odtávání (Bartík a kol. 2019). Na kalamitních holinách pak v porovnání se smrkovým porostem existuje vyšší pravděpodobnost vzniku jarních povodní. Toto riziko ale není akutní nejméně prvních pět let po vzniku holiny, pokud je zachován charakter lesních půd, zejména jejich příznivá infiltrační a retenční schopnost.

LITERATURA

AHMED H., HELGASON W., BARR A., BLACK A., 2021: Characterization of spring thaw and its relationship with carbon uptake for different types of southern boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108511.

BALCAR V., KACÁLEK D., BARTOŠ D., 2007: Poškození experimentálních výsadeb lesních dřevin sněhem v Jizerských horách. In: *Management of forests in changing environmental conditions*. Ed. Saniga M., Jaloviari P., Kucbel S. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, Lesnícka fakulta, Katedra pestovania lesa, s. 260–267. - ISBN 978-80-228-1779-0.

BARTIK M., HOLKO L., JANČO M., ŠKVARRENINA J., DANKO M., KOSTKA Z., 2019: Influence of mountain spruce forest dieback on snow accumulation and melt. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 67(1), 59-69. DOI: 10.2478/johh-2018-0022.

BARTOŠ J., ŠPULÁK O., SOUČEK J., 2011: Vlastnosti sněhu ve vztahu k mladým porostům vybraných dřevin v horských polohách. *Zprávy lesnického výzkumu*, 56 (3), 220–227.

BARTOŠ J., ŠPULÁK O., ČERNOHOUS V., 2009: Ukládání sněhu ve vztahu k dřevinám vysazeným na kalamitní holině v hřebenové partii horských poloh. *Zprávy lesnického výzkumu*, 54 (3), 166–173.

BOON S., 2009: Snow ablation energy balance in a dead forest stand. *Hydrological Processes*, 23: 2600-2610., DOI: 10.1002/hyp.7246.

FLEMMING G., 1987: Wald – Wetter – Klima. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 136 s. ISBN 3-3310-0691-2.

OTTO H.-J., 1994: Waldökologie. E. Ulmer, Stuttgart, 391 s. ISBN 3-8252-8077-2.

CHROUST L., 1997: Ekologie výchovy lesních porostů. VÚLHM, VS Opočno, 277 s.

CHYSKÝ J., HEMZAL K., 1993: Technický průvodce - Větrání a klimatizace. BOIL-B press Brno, 481 s. ISBN 80-901574-0-8.

IWATA Y., HAYASHI M., HIROTA T., 2008: Comparison of Snowmelt Infiltration under Different Soil-Freezing Conditions Influenced by Snow Cover. *Vadose Zone Journal*, 7: 79-86. DOI: 10.2136/vzj2007.0089.

JIRÁK J. 2015: Automatické sněhoměrné stanice. In: Manažment povodí a povodňových rizik 2015 a Hydrologické dni 2015, Bratislava: Výskumný ústav vodného hospodárstva, 7 s. ISBN 978-80-89740-06-2.

KANTOR P., 1979: Vliv druhové skladby lesních porostů na ukládání a tání sněhu v horských podmínkách. *Lesnictví*, 25, 3, 233–252.

KANTOR P., 1988: Vliv sněhové pokrývky na hydrickou účinnost horských imisních oblastí. *Práce VÚLHM*, 7, 9-36.

KANTOR P., KARL Z., ŠACH F., 2009: Analysis of snow accumulation and snow melting in a young mountain spruce and beech stand in the Orlické hory Mts., Czech Republic. *Journal of Forest Science*, 55, 10, 437–451.

KANTOR P., ŠACH F., 2002: Snow accumulation and melt in a spruce stand and on a clearcut in the Orlické Hory Mts (the Czech Republic). *Ekológia (Bratislava)*, 21, Supplement 1, 122–135.

KREČMER V. ET AL., 1971: Mikroklimatický a vodní režim obnovních sečí ve smrkových porostech středohorské oblasti Orlických hor. Dílčí závěrečná zpráva VÚLHM, Jíloviště-Strnady, 80 s.

KRIEGEL H., 2003: Ovlivnění vývoje kultur v horách sněhem. *Zprávy lesnického výzkumu*, 48, 1, 25–29.

LIXIN C., ZUOSINAN C., GUODONG J., JIE Z., JIACHEN Z., ZHIQIANG Z., 2020: Influences of forest cover on soil freeze-thaw dynamics and greenhouse gas emissions through the regulation of snow regimes: A comparison study of the farmland and forest plantation. *Science of The Total Environment*, 726. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138403.

NOVÁK J., DUŠEK D., SLODIČÁK M., 2013: Výchova porostů borovice lesní a poškození sněhem. Zprávy lesnického výzkumu, 58, 2, 147–157.

NYKÄNEN M.-L., PELTOLA H., QUINE C.P., KELLOMÄKI S., BROADGATE M., 1997: Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fennica* 31(2): 193–213. DOI:10.14214/sf.a8519.

OWUOR S.O., BUTTERBACH-BAHL K., GUZHA A.C., RUFINO M.C., PELSTER D.E., DÍAZ-PINÉS E., BREUER L., 2016: Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. *Ecological Processes*, 1, 16, DOI: 10.1186/s13717-016-0060-6.

PÄÄTALO M.-L., 2000: Risk of snow damage in unmanaged and managed stands of Scots pine, Norway spruce and birch. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15, 530–541. DOI: 10.1080/028275800750173474.

PÄÄTALO M.-L., PELTOLA H., KELLOMÄKI S., 1999: Modelling the risk of snow damage to forests under short-term snow loading. *Forest Ecology and Management*, 116, 51-70. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00446-0.

SLODIČÁK M., NOVÁK J., DUŠEK D., 2013: Výchova porostů borovice lesní. Certifikovaná metodika. Lesnický průvodce 5, Strnady, Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. 23 s. ISBN 978-80-7417-069-0.

ŠACH F., 2007: Zimní svahový odtok ve vztahu k postupům obnovy lesa. Zprávy lesnického výzkumu, 52, 4, 361-373.

ŠPULÁK O., KACÁLEK D., ČERNOHOUS V., 2020: Snow cover accumulation and melting measurements taken using new automated loggers at three study locations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 285-286, 107914. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.107914.

ŠPULÁK O., SOUČEK J., ČERNOHOUS V., 2012: Pozemní metody a technologie měření vodní hodnoty sněhu: review. Zprávy lesnického výzkumu, 57, 4, 304-313.

TIERNEY G.L., FAHEY T.J., GROFFMAN P.M., HARDY J.P., FITZHUGH R.D., DRISCOL C.T., 2001: Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry* 56, 175–190. DOI: 10.1023/A:1013072519889.

TRIBBECK M.J., GURNEY R.J., MORRIS E.M., 2006: The Radiative Effect of a Fir Canopy on a Snowpack. *Journal of Hydrometeorology*, 7, 880-895. DOI: doi.org/10.1175/JHM528.1.

VARHOLA A., COOPS N.C., WEILER M., MOORE R.D., 2010: Forest canopy effects on snow accumulation and ablation: An integrative review of empirical results. *Journal of Hydrology*, 392, 3-4, 219–233. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.08.009.

4 Výpar z lesa – evapotranspirace lesních porostů

Radek Pokorný, Matjaž Čater

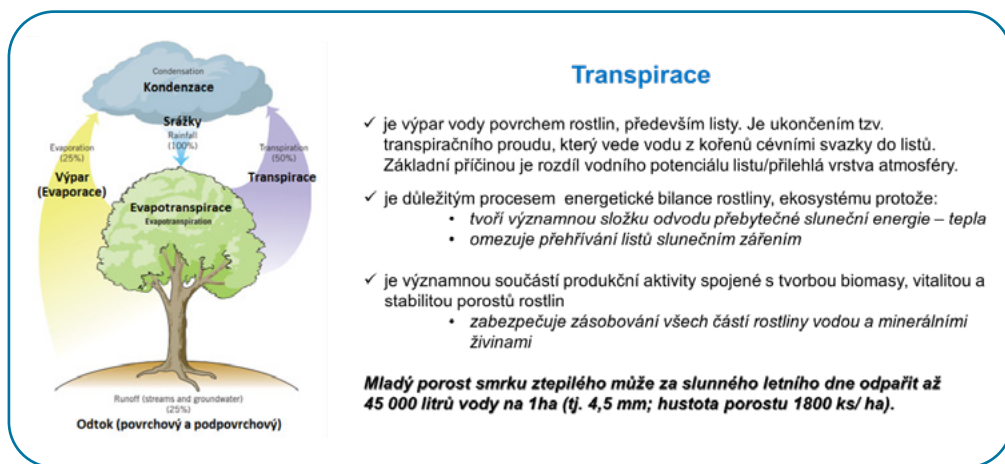
Množství vody spotřebované stromy je silně ovlivněno klimatem a množstvím dostupných srážek. Množství dostupné vody pro udržení transpirace ovlivňují půdní podmínky, geologické podloží i nadmořská výška a orografie terénu. Stromy využívají vodu přijímáním z okolní půdy jemnými kořeny (v průměru do 1 až 2 mm), vedou ji kmenem a větvemi k listoví, kde se odpařuje přes průduchové štěrbinny na povrchu listů do atmosféry. Tento fyziologický proces rostlin, známý jako transpirace, odráží tedy půdní i atmosférické podmínky. Rozdíly mezi evapotranspirací jehličnatých a listnatých porostů jsou z velké míry dány rozdílnou intercepcí, neboť jehličnany jsou v našich podmínkách (vyjma modřínu) stálezelené a jejich listová plocha (smrku, jedle, douglasky) je velká. Oproti tomu rychlost transpirace se mezi těmito dvěma typy porostů liší jen málo.

Souhrnný výpar z lesa se označuje jako **evapotranspirace**. Jeho hlavní složkou je aktivní výdej vody rostlinami, především korunovou vrstvou stromů, jenž je označován jako **transpirace**. Zbývající část výparu je pasivní (je řízena pouze fyzikálními zákonitostmi) a je označována jako **evaporace**. Jde o výpar vody zachycené v korunách – tedy o **intercepci**, které byla věnována jedna z předchozích kapitol, dále o **výpar z půdy**, případně **výpar z volné vodní hladiny**. Do evaporace náleží rovněž **výpar ze sněhové pokrývky**, který je blíže popsán v předchozí kapitole. Lesní ekosystémy jsou charakteristické tím, že v rámci výparu dominuje transpirace – tedy složka, kterou mohou rostliny do značné míry aktivně regulovat. V našich podmínkách se běžně na celkovém výparu podílí transpirace z 60 %, intercepce ze 30 % a evaporace z 10 %. Evapotranspirace obvykle tvoří hlavní podíl výdejové části vodní bilance lesa (kolem 70 %), zbylých cca 30 % zbývá na odtok. Výše uvedené poměry jsou pochopitelně přibližné, existuje jejich velké rozpětí, a to jak podle charakteru lesního porostu (dřevina, věk, struktura), tak podle místních meteorologických a klimatických podmínek.

Transpirace lesních porostů je významnou výdajovou složkou ve vodní bilanci lesa a krajiny. Z hlediska vodního režimu lesních ekosystémů se sice jedná o ztrátu vody, ale z hlediska biologického je voda spotřebovaná lesními dřevinami v procesu transpirace nezbytnou podmínkou jejich existence. Protože se jedná o proces aktivně řízený rostlinou s přímou vazbou na produk-

ci biomasy, je transpirace označována jako fyziologický, aktivní či produktivní výpar (Brechtel a Scheele 1982). Vztah spotřeby vody k růstu rostlin se vyjadřuje jako koeficient efektivity využití vody. Je uváděn jako množství biomasy vyprodukované na jednotku spotřebované vody ($\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$). Významnost tohoto koeficientu bude zřejmě stoupat s projevem změny klimatu v podobě četnějších, intenzivnějších a déle trvajících průsušků a vysokých teplot.

Transpirace rostlin – i lesních dřevin – je složitý fyziologický proces, jehož podstatou je výdej vody ve formě vodní páry z povrchu těla rostlin (zejména z listů) do atmosféry. Podle místa výparu se transpirace dělí na stomatální, kutikulární a rhizodermální (neregulovatelný výpar z kořenů). Stomatální transpirace je výpar vody přes průduchové štěrby (stomata) asimilačního aparátu, kdežto kutikulární transpirace představuje výpar vody z kutinovaného povrchu rostliny (přes pokožku). Pro lesní dřeviny je nepoměrně významnější transpirace stomatální, jejíž podíl činí u jehličnanů asi 97 %, u listnáčů 90 % celkových transpiračních ztrát (tzn., že kutikulární dosahuje max 10 %). Pouze u mladých listů se může podíl kutikulární transpirace zvýšit na třetinu až polovinu z celkového podílu. Z fyziologického pohledu má transpirace v životě rostlin nezastupitelné poslání jednak v příjmu živin z půdy, které jsou rozpuštěny v přijímané vodě, ale především při ochlazení rostlinného těla, které by se zejména v horkých letních dnech přehřívalo stejně jako jiné neaktivní povrchy. Například teplota asfaltu, betonu, dokonce povrchu půdy na velkých lesních pasekách apod. může dosahovat kolem poledne v horkém létě i 60 °C. To si rostliny nemohou dovolit, neboť již při ca 50 °C se počínají rozpadat (denaturovat) bílkovinné struktury těla živých organismů. Teplo je tedy odváděno z rostliny (respektive spotřebováno) právě změnou skupenství vody z kapalné na plynnou fázi.



Právě u lesních dřevin lze očekávat, s ohledem na jejich značnou biomasu osluněného listoví, vysoké hodnoty transpirace. Získání exaktních údajů o transpiraci dřevin, případně celých lesních porostů, však naráží na mimořádné metodické a přístrojové obtíže, což ještě umocňuje široká škála různorodých vnitřních i vnějších faktorů, které fyziologický výpar ovlivňují, případ-

¹ Některé rostliny, jako například kontryhel, jsou schopny vylučovat vodu i v podobě kapek na okraji listů.

ně přímo řídí. Z vnitřních faktorů to je zejména specifická druhová architektura (morfologie listů/jehlic, hmotnost, hustota průduchů, listová plocha a její úhlová a prostorová distribuce, poměr kořen/výhon, tvar a velikost koruny, kořenového systému), funkce a anatomie xylému vodivé běle (typ buněk, jejich množství a velikost), hloubka prokořenění půdy a absorpční plocha kořenů, časové rozdíly ve fenologii, stáří rostliny, regulační schopnost průduchů, citlivost k mikroklimatickým parametrům a vodnímu deficitu. Z vnějších faktorů mají bezprostřední vliv na výpar vody z rostlin meteorologické podmínky (intenzita dopadajícího slunečního záření, teplota, vlhkost a tlak vzduchu, deficit vodní páry v ovzduší, rychlost proudění vzduchu) a půdní poměry (struktura a vlhkost půdy). Pohyb vody v kontinuu půda-rostlina-atmosféra se děje podél gradientu vodního potenciálu (síly, jakou je voda vázána v daném prostředí) od půdy (-0,3 MPa), přes kořeny a kmen stromu (-0,8 MPa) po listová pletiva (-1,0 MPa) a mezibuněčný prostor v listoví (-7,0 MPa) až do atmosféry (-100 MPa).

Pro stanovení fyziologického výparu lesních porostů se v hydrologickém výzkumu používají různé metody, které se rozlišují podle toho, na jaké úrovni se primárně tento děj sleduje, a odpovídá to i tomu, jak se jednotlivé metody postupně vyvíjely:

- transpirace jednotlivých asimilačních orgánů, případně větví
- transpirace jednotlivých stromů
- transpirace celých porostů

4.1 Transpirace listů a větví

V odborné literatuře existuje dostatek spolehlivých údajů o transpiraci jednotlivých asimilačních orgánů, popř. větví. Transpirační hodnoty se zde vyjadřují množstvím vody (mg, g, kg nebo l), které je vztaženo k suché nebo čerstvé hmotnosti asimilačních orgánů, popř. k jejich ploše (cm², m²) za určitou časovou jednotku (min, hod, den). Nejčastěji se při těchto experimentálních šetřeních zpočátku používala metoda krátkodobého vážení, a to již ve dvacátých a třicátých letech minulého století.

Tato starší měření shrnuli např. Assmann (1968) či Mitscherlich (1971), se stanovením následných průměrných hodnot denní transpirace podle jednotlivých dřevin (v gramech vytranspirované vody na gram čerstvé hmotnosti listů): 1,0–1,4 g.g⁻¹ pro smrk; 1,9–2,4 g.g⁻¹ pro borovici; 2,8–4,8 g.g⁻¹ pro buk; 3,2–4,4 g.g⁻¹ pro modřín; 6,0–7,6 g.g⁻¹ pro dub; 8,0–9,5 g.g⁻¹ pro břízu. Již z těchto měření bylo možné provádět první dedukce nároků dřevin na vodu, aktivní výpar. Následně prováděli měření v mladém dvacetiletém smíšeném porostu (borovice, douglaska, buk, bříza) Kunstle a Mitscherlich (1973, 1977) za použití tehdy originální metody, kdy byly 20–

30 cm větve rostoucích stromů uzavřeny ve speciálních komorách (kyvetách) s regulovatelnou výměnou vzduchu. Zjistili diametrální rozdíl intenzity výparu vody z povrchu listů u borovice a douglasky v průběhu dne a silnou závislost výparu na teplotě vzduchu, kdy transpirační hodnoty dosahovaly svého maxima v poledních a brzkých odpoledních hodinách. Výrazně vyšší intenzita transpirace listnatých dřevin ve srovnání s jehličnany byla na úrovni větví zjištěna i řadou dalších autorů. V teplých slunných letních dnech odpařil každý gram čerstvých asimilačních orgánů dubu, břízy, lípy, jasanu i dalších listnatých dřevin za hodinu v průměru 0,5 až 0,8 g vody, zatímco za obdobných podmínek byla intenzita transpirace smrku, borovice či douglasky podstatně nižší, ca 0,1 až 0,2 g vody na g čerstvé hmotnosti za hodinu.

V současnosti je transpirace na úrovni listu či letorostu měřena velmi přesně pomocí infračerveného analyzátoru plynu (obr. 4.1), kdy je daná část rostliny uzavřena do komůrky s modifikovatelnými podmínkami prostředí – teplotou, vlhkostí i ozářením – a transpirace je stanovena z měření změn koncentrací vodní páry v čase. Obdobným způsobem lze pomocí změny koncentrace oxidu uhličitého (CO_2) měřit rychlost fotosyntézy či respirace.

Steinhubel (1983) uváděl, že jehličí patnáctiletých smrků ztratí v poledne během 30 minut až 8 % z celkového obsahu vody, kdežto ráno a večer se během půl hodiny odpaří jen 2–4 %. Kunstle a Ullrich (1976) stanovili intenzitu transpirace u borovice lesní a borovice černé, kdy se na počátku období sucha po předchozích nízkých srážkách u borovice lesní pohybovala transpirace během dne mezi 0,1 – 0,3 g vody a u borovice černé mezi 0,2 – 0,6 g vody na g sušiny jehličí za hodinu. V průběhu suché a mimořádně teplé periody (maxima teplot vzduchu 38°C) reagovaly obě dřeviny na změněné podmínky odlišně. Z jižní Evropy introdukovaná borovice černá omezila fyziologický výpar cca o 30 %, přičemž denní maxima klesla na 0,3 g.g⁻¹



Obrázek 4.1:

Infračervený analyzátor plynu (IRGA) s komůrkou pro možnost vložení a stanovení transpirace na úrovni listu/letorostu

za hodinu. Borovice lesní transpirovala ve dne přibližně stejnou intenzitou jako na počátku suchého období, ale podstatně se zvýšil podíl transpirace v nočních hodinách, takže celkový výpar byl dokonce o 75 % vyšší než na počátku experimentu. Na vydatné srážky, a tím i zvýšenou zásobu vody v půdě reagovaly obě dřeviny zvýšením výdeje vody s výrazným maximem v odpoledních hodinách (zde u borovice lesní až $1,1 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{hod}^{-1}$). K analogickým závěrům dospěli i Žúrová a Patlaj (1979), kdy při umělé vyvolané přísušce (vlhkost půdy 6–15 %) kolísal výpar z asimilačních orgánů borovice mezi 0,07 až $0,15 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{hod}^{-1}$, kdežto při vlhkosti půdy 60 % vzrostla transpirace o téměř 400 %. Již tyto prvotní výsledky transpirace na úrovni listů a větví poukázaly na její výraznou denní dynamiku a rozdíly mezi dřevinami za různých podmínek prostředí.

Stanovení intenzity transpirace jednotlivých listů a větví je ale z pohledu vodní bilance samoúčelné, pokud se nepřepočte na úroveň celého stromu či lesního porostu. Údaje z různých typů porostů zde jednoznačně dokumentují výrazně větší hodnoty biomasy listů či listové plochy u jehličnatých dřevin oproti dřevinám listnatým. Tato skutečnost pak společně s nižší intenzitou transpirace jehličnanů mohla vést k závěrům, že ve fyziologickém výparu mezi jehličnatými a listnatými porosty nemusí být vlastně výrazný rozdíl. To také zaznamenali při porovnání spotřeby vody smrkem a bukem již například Ladefoged (1968), Schmaltz (1969) i Mitscherlich (1971). Za optimálních klimatických podmínek a při dostatečné zásobě vody v půdě se pohybovala v létě maximální denní transpirace ve smrkových porostech mezi 1,9–4,9 mm (průměr 3,5 mm) a v bukových porostech mezi 2,2–4,8 mm (průměr 3,8 mm). Při oblačném typu počasí se ale spotřeba vody snížila o 60 i více procent.

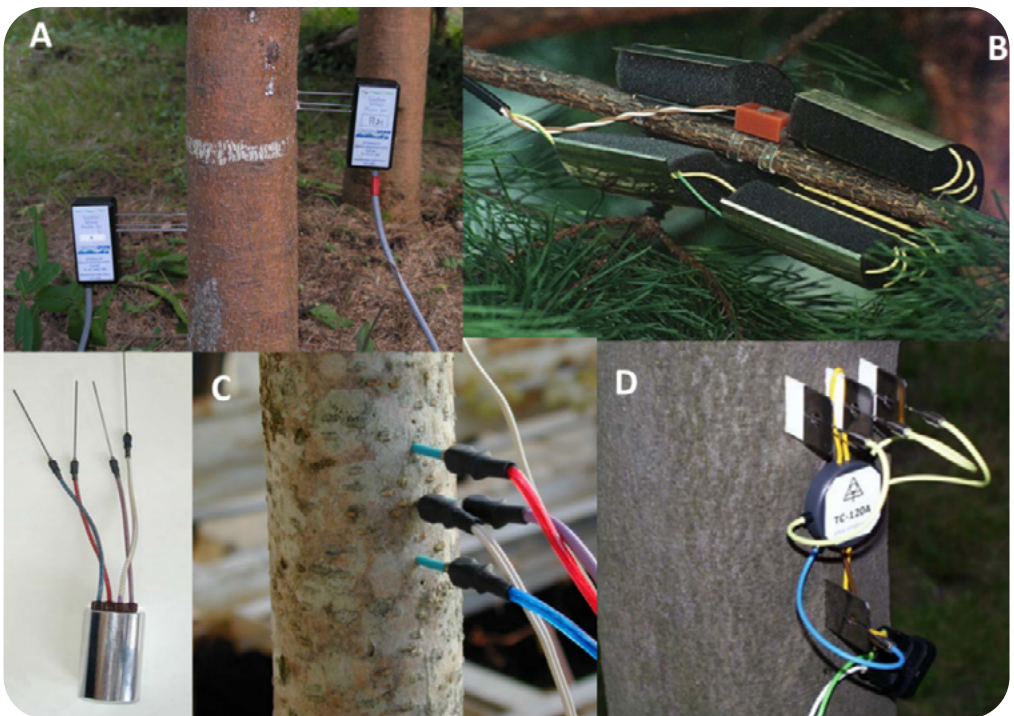
Metody stanovení transpirace jednotlivých listů a větví a přepočty na celé stromy, příp. lesní prostory byly zejména pro svoji nenáročnost v bilančních kalkulacích běžně používány. Na druhé straně však nebylo možné zanedbat skutečnost, že věrohodnost a přesnost takto získaných výsledků pro použití v lesnické hydrologii snižovaly nejasnosti a nepřesnosti v přepočtech na úroveň stromu či porostu. Přepočet z jedince na porost se provádí nejčastěji přes biomasu listoví, plochu povrchu půdy či velikost koruny, plochu povrchu listoví (index listové plochy – LAI), plochu vodivé části běle, výčetní tloušťku kmene, respektive výčetní kruhovou základnu.

Index listové plochy – LAI (leaf area index) je bezrozměrnou veličinou, která udává, o kolik je vyšší povrch listů či jehlic (listové plochy) oproti ploše půdy, kterou zakrývají. Je jedním z významných ekofyziologických parametrů, který má význam pro transpiraci, fotosyntézu, intercepci, ale například i pro distribuci přízemní vegetace či možnost zmlazení lesních porostů. V našich podmínkách se hodnoty LAI pohybují obvykle od 3 do 6. Měření LAI v lesních porostech se provádí nejčastěji nepřímými metodami – měřením pronikajícího záření ve srovnání s volnou plochou či vyhodnocováním hemisférických fotografií korunové vrstvy. U opadavých dřevin je možné využít rovněž přímé metody – měření plochy vzorku listů a přepočet na celý porost podle jejich suché hmotnosti.

4.2 Transpirace jednotlivých stromů

Měření transpirace celých stromů je nepoměrně složitější než stanovení hodnot fyziologického výparu jednotlivých větví, popř. listů, protože je nelze uzavřít do ventilované komůrky. Obtíže zpravidla nečiní pouze měření transpirace u mladých stromků, kdy jsou vybranými druhy dřevin osazeny různě velké a různě konstruované uzavřené nádoby. Tato metoda se používá v lesnickém výzkumu již přes 100 let. Důležitou roli v míře transpirace stromu hraje samozřejmě jeho věk, velikost stromu, kořenového systému, listové plochy a řada dalších parametrů.

Pro stanovení transpirace jednotlivého stromu lze využít hned několik dosud vyvinutých metod založených na předpokladu, že veškerá stromem vytranspirovaná voda projde jeho kmenem. Pro měření takzvaného transpiračního proudu, přesněji specifické rychlosti toku



Obrázek 4.2:

Ukázka sond vybraných typů zařízení reprezentující metodu tepelných pulzů (A), tepelné bilance na větvích a stromech malých dimenzí (B), větších dimenzí (D) a metodu deformace tepelného pole (C)

xylémových šťáv, lze použít například metody: 1) tepelné bilance (Čermák a kol. 1973, Čermák a kol. 1976); 2) tepelných pulzů (Köstner a kol. 1998); 3) deformace tepelného pole (Nadezhdina a kol. 2004); 4) tepelné disipace, tepelného poměru (Granier 1985). Ve všech uvedených metodách se opakuje přívlastek spojený s teplotou, a to proto, že je měřeno šíření tepla, spotřeba tepla či ochlazování vyhřívané sondy v kmeni proudem vody ve vodivých pletivech xylému. Část výsledků z experimentálních šetření je sestavena v tabulce 4.1. Vzrostlé stromy v lesních porostech spotřebují ve vegetační sezóně v průměru denně asi 20 až 60 litrů vody za den. Maxima dosahuje například dub letní na lužním stanovišti ($400\text{--}450 \text{ l.den}^{-1}$) nebo douglaska při optimálním zásobování vodou (až 880 l.den^{-1}). Maximální hodnoty denní transpirace pro různé druhy dřevin lze vybrat z přehledu, který uvádí například Wullschlegler a kol. (1998).

Semenáčky (staří tři let) různých druhů dřevin tak vytranspirují za vegetační období poměrně málo, zpravidla do tří litrů, např. semenáčky smrku $0,75\text{--}2,26$ litru; jedle $0,24\text{--}0,51$ litru; borovice černé $0,74\text{--}2,84$ litru; vejmutovky $0,47\text{--}2,82$ litru. Penka a Štěpánek (1978) uváděli obdobnou spotřebu $0,54 \text{ l}$ vody za vegetační období pro jednoletý semenáček dubu o výšce $7,6 \text{ cm}$ s 10 listy jako podobně malý tříletý semenáček jedle.

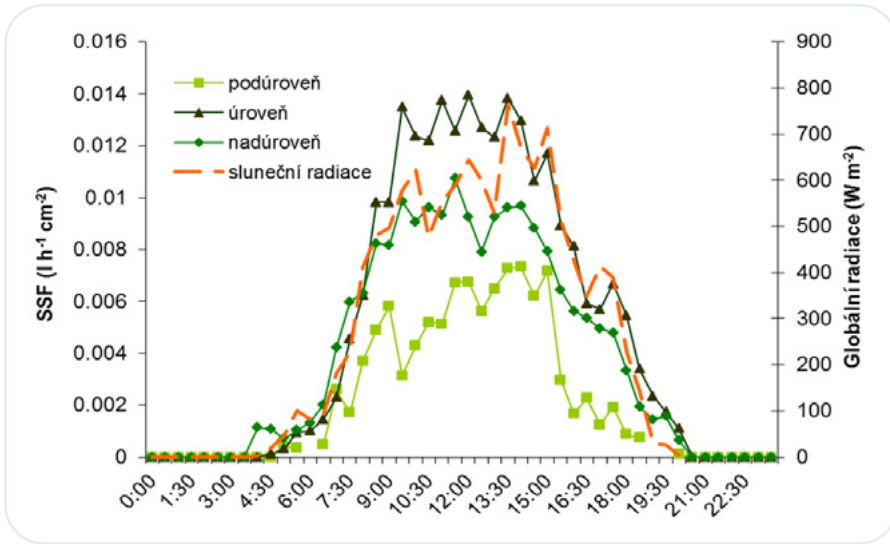
Nárůst potřeby vody na fyziologický výpar s rostoucím věkem stromků je logickým důsledkem podstatného zvýšení biomasy asimilačních orgánů a celé rostliny. Chroust (1988) zaznamenal ve dvanáctiletém smrkovém porostu (výška $3,5 \text{ m}$, hmotnost jehličí jednoho stromku v čerstvém stavu v průměru $1,4 \text{ kg}$) transpiraci $2,1$ litru jednoho stromku za den s teplotou cca $20 \text{ }^\circ\text{C}$, při poklesu denní teploty na $10\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$ jen okolo 1 l.den^{-1} a za deštivého počasí již jen zanedbatelný výdej vody. S využitím Ladefogedovy metody stanovil transpiraci borovice lesní ve staří 42 let, s výškou 16 m při oblačném počasí na $0,7\text{--}1,5 \text{ l.hod}^{-1}$ a za slunného dne až 2 l.hod^{-1} . Podobnou rychlost transpirace ($1,75 \text{ l.hod}^{-1}$) zjistili Swaynsou a kol. (1979) u buku (věk 22 let, výška 6 m , hmotnost sušiny listů $5,55 \text{ kg}$, listová plocha 32 m^2). Chašes a kol. (1971) zjistili ve vegetačním období spotřebu vody jasanem $17\text{--}39 \text{ l}$ vody (listová plocha 11 m^2).

Minima transpirace vzrostlých stromů se pohybují kolem 10 l.den^{-1} v závislosti na stanovišti, dostupnosti vody a průběhu počasí. Oba extrémny jsou tak relevantní i pro stejný druh dřeviny, avšak odlišný ekotyp, jak je patrné z tabulky 4.1 pro dub letní lužního a stepního ekotypu. Rozsah míry transpirace (minimum – maximum) je mezi druhy dřevin podmíněn jejich anatomickou strukturou dřeva, vlastnostmi na úrovni listu/jehlice, růstovou strategií či pozicí stromu v korunové vrstvě porostu. Stromy rostoucí v podúrovni, kde jsou nízké hodnoty ozáření, vyšší a vyrovnaná vlhkost vzduchu, mají obvykle také nízkou a vyrovnanou míru transpirace. Naopak nadúrovňoví jedinci vykazují vysokou míru transpirace i rozsah hodnot, neboť jsou vystaveny intenzivní ozáření a nižším vlhkostem vzduchu současně s vyšší rychlostí proudění. Například v mladé horské smrčíně (věk $25\text{--}30$ let) aktivně vypaří podúrovňový smrk za příznivých podmínek 3 l.den^{-1} , při přísušku $2,5 \text{ l.den}^{-1}$ (variabilita 10%), úrovňový smrk 6 l.den^{-1} vs. $3,5 \text{ l.den}^{-1}$ (variabilita 40%), nadúrovňový smrk pak 12 l.den^{-1} za příznivých podmínek a jen 5 l.den^{-1} při přísušku (variabilita 60%). Ze závislosti na sociálním postavení stromu v porostu respektive postavení a oslunění koruny a míry transpirace je zřejmé, že za podmínek jasného počasí a dobré dostupnosti vody v půdě dosahují nadúrovňové a úrovňové stromy vyšších hodnot transpirace než jedinci potlačený s malou a zastíněnou korunou. Za snížené půdní vlhkosti toto platit již nemusí, neboť nejprve jsou v aktivním výparu omezeni zpravidla dominantní jedinci.

Tabulka 4.1:
Transpirace jednotlivých dřevin

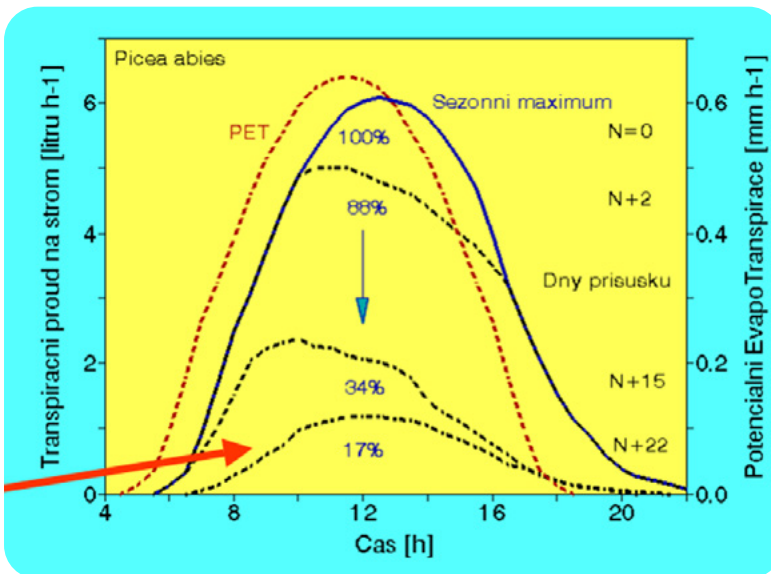
| Druh dřeviny | Metoda | H | DBH | LA | SA | TR max (l.den ⁻¹) | TR (tis. l.veg.s. ⁻¹) |
|---------------------------------------|--------|----|-----|-------|------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Bříza běkorkorá | TM | | | | | 70 | |
| <i>Betula alba</i> | TM | 15 | 16 | | | (37–43) | 3,0–4,7 |
| | TM | | | | | 42 | |
| Buk lesní | TM | 35 | 54 | | | 137 | |
| <i>Fagus sylvatica</i> | TM | 30 | 54 | | 2100 | 164 | |
| Modřín / <i>Larix sp.</i> | TM | 20 | | | | 74 | |
| Smrk ztepilý | TM | 25 | | | | 63 | |
| <i>Picea abies</i> | TM | 11 | 10 | | | 10 | |
| | TM | 15 | 19 | | | 49 | |
| | TM | - | - | | | 23 | |
| | TM | 25 | 36 | 447 | | 175 | |
| | | 25 | 46 | | | 70–120 (23–32) | 4,1–5,8 |
| | TM | 17 | 15 | | | 66 | |
| Borovice lesní | L/P | | | | | 13 | |
| <i>Pinus sylvestris</i> | R/SI | 15 | | | | 29 | |
| | TM | | | | | 13 | |
| Douglaska | L/P | 28 | 38 | | | 64 | |
| <i>Pseudotsuga menziesii</i> | R/SI | 76 | 134 | | 4020 | 530 | |
| * | TM | 42 | 81 | | | 880 | |
| | TM | 18 | 20 | | | 22 | |
| Dub zimní | TM | - | | | | 12 | |
| <i>Quercus petraea</i> | TM | 15 | 9 | | | 10 | |
| | TM | 17 | 120 | | | 260 (92) | |
| | TM | 21 | 42 | | | 130–180 (42–59) | 7,6–10,7 |
| | TM | | 10 | | | 11 | |
| Dub letní | TM | | | | | 10 | |
| <i>Quercus robur</i> | TM | 33 | | | | 450 | 19–39 |
| | TM | 33 | | | | 400 | |
| Dub cer <i>Quercus cerris</i> ** | TM | 19 | 130 | | | 370 (180) | |
| Vrba / <i>Salix fragilis</i> | TM | | | 38–47 | | 103 | |
| Javor Babyka <i>Acer campestre</i> | TM | 17 | 95 | | | 170 | |
| Habr <i>Carpinus betulus</i> | TM | 17 | 95 | | | 120 (55) | |

H– výška stromu (m), DBH– výčetní tloušťka kmene (cm), LA– plocha listoví (m²), SA – plocha běle (cm²), TRmax – maximální transpirace (l/den) s uvedením průměrných hodnot v závorce, TR– transpirační výdej za celou vegetační sezónu v tisících litrů. Veškeré údaje jsou uvedeny pro jeden strom. Metody: TM– metoda tepelné disipace, VC– ventilovaná komora, R/SI– radioaktivní nebo stabilní izotopy, L/P– lyzimetry nebo stromové potenciometry.* zdroj Borera 1980, ** zdroj Huzulák 1981



Obrázek 4.3:

Specifická rychlost transpiračního proudu (SSF) protékajícího kmenem smrku ztepilého v průběhu letního mírně oblačného dne. Zobrazena je rychlost transpirace stromů s dominantním (nadúroveň), průměrným (úroveň) a podprůměrným (podúroveň) postavením v porostu (zdroj: archiv autorů)



Obrázek 4.4:

Transpirace smrku při prohlubujícím se stresu sucha vůči potenciálním hodnotám evapotranspirace (dle Čermák a Nadezhdina 2015)

Nejen samotná rychlost transpirace s ohledem na anatomickou stavbu, ale také funkčnost a celková vodivá plocha běle ovlivňují hodnoty celkového aktivního výparu. Ačkoliv je rychlost toku vody ve kmeni stromu u kruhovité pórovitých dřevin vyšší (20–45 m.hod⁻¹) než u roztroušeně pórovitých (1–4 m.hod⁻¹), může díky velkému podílu běle docházet k tomu, že podúrovňoví jedinci v celkovém výdeji transpirují více než nadúrovňoví (např. habr vs. jasan; Szatniewska a kol. 2022). Dalšími faktory vysvětlujícími rozdíly v transpiraci dřevin je rozdílná reakce na klimatické faktory, vodivost průduchů, náchylnost ke kavitaci, schopnost a rychlost obnovy nefunkčního vodivého systému po embolizaci, podíl nadzemní a podzemní biomasy stromů, vnitřní kapacita kmene pro vodu (ta je dána množstvím parenchymatických buněk xylému, ale i floému a pružností kůry), distribuce kořenů, hloubka prokořenění půdy, mykorhiza a další. Některé projevy dřevin tak mohou být dobrým indikátorem stresu sucha, například embolizace vodivého systému kmene nebo objemové změny kmene.

4.3 Transpirace lesních porostů

Údaje o transpiraci různých typů lesních porostů jsou již poměrně dostupné, a to jak vzhledem k různým biomům a stanovištím, tak i klimatickým podmínkám. Jsou však zjišťovány různými metodami a ne vždy jsou uváděny všechny parametry ve stejných jednotkách, což komplikuje vzájemné srovnání. Přesto lze objektivně stanovit meze, v nichž se pohybují transpirační hodnoty lesa. Brechtel a Lehnardt (1982) sestavili přehledně údaje o transpiraci porostů evropských dřevin z několika desítek v té době dostupných literárních pramenů. Je zde však určitá nejistota naměřených odhadů, která souvisí právě s různými použitými metodami pro stanovení transpirace s různou měrou spolehlivosti a velkou prostorovou a časovou variabilitou dalších parametrů. Extrapolovat využití vody jedním stromem na úroveň porostu není snadné. Dobrá shoda byla potvrzena ve studiích porovnávajících extrapolované výsledky transpirace stromu na úroveň porostu s výsledky získanými Bowenovým poměrem, tedy energetickou bilancí, pro jejíž stanovení je třeba měřit ve vertikálním profilu korunové vrstvy hned několik mikroklimatických parametrů (teplota a vlhkost vzduchu, rychlost větru), radiační bilanci povrchu a tok tepla do půdy. Horší výsledky byly dosaženy s technikou tzv. vířivé difúze (Loustau a kol. 1996). Zde činí problém především ulpívání vzdušné vlhkosti či změna skupenství vody ve vnitřním systému na povrchu trubic měřicí techniky a reakce vodní páry s chemickými látkami v nasávaném vzduchu. Kvantitativní odhady využití vody u dřevin se tedy liší podle použitých metod a technik. Nejpoužívanějšími jsou metody tepelné – viz předchozí kapitola, nebo metody s využitím radioaktivních či stabilních izotopů, ventilovaných komor či techniky pyrometru.

Obtížie přepočtu transpiračních měření listů a větví, popř. jednotlivých stromů na celé lesní porosty se v lesnickém hydrologickém výzkumu často obcházejí tím, že se transpirace lesa určuje různými nepřímými metodami, jichž je v současné době zpracováno značné množství. Jsou

to například metody vycházející z tepelné či celé energetické bilance vypařujícího povrchu, z měření komplexu klimatických faktorů, ze změn obsahu vody v rhizosféře apod. Běžné jsou i postupy, kdy se transpirace vypočte jako jediná neznámá z rovnice vodní bilance. Uvedenými metodami se často studuje i evapotranspirace jako souhrnná položka fyziologického výparu dřevin a fyzikálního výparu půdy.

Přepočty z jednotlivých stromů na celé lesní porosty potvrdily, že v průběhu vegetačního období nemusí mít konkrétní druh dřeviny pro celkové hodnoty transpirace takový význam jako vnější klimatické podmínky. Z vyhodnocení různých experimentů tak vyplývá vysoká variabilita transpirace druhově podobných porostů v průběhu vegetační sezóny v závislosti na různých půdních a klimatických faktorech. V sušších letech s omezenou nabídkou půdní vláhy byla ve směs v chlumních a pahorkatinných oblastech spotřeba vody lesními dřevinami výrazně nižší než v dostatečně vlhkých vegetačních sezónách.

V průměrných hodnotách se transpirace lesních porostů hlavních hospodářských dřevin smrku, borovice, dubu a buku nemusí podstatně lišit. Denní hodnoty se pohybují nejčastěji mezi 1–5 mm v závislosti na podmínkách, roční množství vytranspirované vody se pak pohybuje zhruba mezi 100–516 mm (v průměru 286 mm) u smrkového, mezi 74–631 mm (281 mm) borového, mezi 220–680 mm (456 mm) modřínového, mezi 399–580 mm (472 mm) douglasového, mezi 120–375 mm (310 mm) dubového, 209–497 mm (313 mm) bukového a 203–644 mm (396 mm) březového porostu. Dokonce louka či obilné pole (296 mm, 351 mm) mohou dosahovat obdobných hodnot evapotranspirace. V relaci s těmito údaji jsou i výsledky různých autorů. Například Báčvarov (1982) zjistil průměrnou roční transpiraci dubových porostů 277 mm, Raev (1982) 315 mm u borovice a 404 mm u smrku, Protopopov (1975) 261 mm v jedlových porostech a 179 mm v porostech modřínových, Calder (1978) 350 mm ve čtyřiceti letém smrkovém porostu, Brechtel a Schaele (1982) v porostech buku 281 mm, v porostech dubu a borovice 240 mm, Pogodaeva (1972) v modřínových lesích 219–278 mm atp. Také při komparativním šetření v Orlických horách zaznamenal Kantor (1984a) v průběhu pěti let nevýznamné rozdíly mezi transpirací dospělého smrkového porostu (195 mm.rok^{-1}) a bukového porostu (181 mm.rok^{-1}). Ke shodným výsledkům dospěli i Benecke a Ploeg (1978), podle nichž se pohybovala evapotranspirace v dospělém porostu smrku kolem 316 mm a v dospělém porostu buku kolem 281 mm za rok. Roční transpirace je velmi odlišná v návaznosti na průběh počasí předchozího a především daného roku, například transpirace březového porostu byla ve vlhčím roce (1976) 290 mm, v sušším roce (1975) pak pouze 190 mm. Obdobně odlišná situace byla zaznamenána v dubovém porostu, kde při trvalém nadbytku půdní vláhy na lužním stanovišti byl v suchém a teplém roce fyziologický výpar 466 mm, zatímco ve vlhkém a chladném roce jen 258 mm. Rozdíly transpiračních hodnot u jedné a téže dřeviny v závislosti na stanovištních a klimatických podmínkách tak mohou být podstatně vyšší než rozdíly mezi porosty různého druhového složení. Charakteristická je zejména schopnost většiny evropských dřevin podstatně omezit svoji transpiraci při nedostatku vláhy. Podle Pauliukevičiuse (1972) osikobřezové porosty se spodní etáží smrku spotřebovaly při srážkách 544 mm na transpiraci 326–366 mm, ale v následujícím extrémně suchém roce (srážky 301 mm) jen 223–240 mm. K podobným závěrům dospěl v Orlických horách i Kantor (1984a). Ve vegetačním období 1979 s porostními srážkami 200 mm pod normálem zde klesla transpirace smrkového i bukového porostu o cca 10–35 %. Rozdíl 35 % v hodnotách evapotranspirace bukodubových porostů ve vlhkém a suchém roce zaznamenali i Aussenac a Granier (1979). Největším problémem je opakující se sucho po dobu několika let, kdy je půdní vlhkost dlouhodobě na nízké úrovni a ne-

stačí se zvyšovat v celém půdním profilu na plnou polní vodní kapacitu ani přes zimní období. V takových případech se rozpojí systém zasakující povrchové vody ze srážek a vztlínání vody z hladiny podzemní vody. Ta následně klesá natolik, že dřeviny svým kořenovým systémem nejsou schopny reagovat přírůstem do větších hloubek. Z dlouhodobého experimentu redukce (o 25 %) podkorunových srážek v mladém smrkovém porostu (ve výšce 440 m n.m.) vyplynulo, že dlouhodobě stresovaný porost smrku je schopen rychleji reagovat průduchovou vodivostí a mírou transpirace na změnu vlhkostních podmínek, ale schopnost obnovení tloušťkového přírůstu je již nižší. Podíl transpirace na čistých podkorunových srážkách tvořil v bukovém i ve smíšeném dubo-bukovém (stáří 50–70 let, zastoupení buku 50 %, dubu 40 %, lípy 10 %; 400 m n.m.) asi 70 % a s opakujícím se suchem následujícího roku dosáhl až téměř 100 %. To znamená, že veškerá voda porostních srážek byla využita pro transpiraci porostu.

Pokud se týče srovnání evapotranspirace, byly zaznamenány v listnatých porostech průměrné hodnoty o 5–10 % vyšší než v porostech jehličnatých. Do vodní bilance jehličnatých porostů se zpravidla nezahrnuje zimní transpirace, která je zcela zanedbatelná a podle sdělení Caldera (1978) nepřevyšuje ve smrkových porostech 1 mm za měsíc.

Závislost transpiračních hodnot na věku porostů je obvykle spojována s plochou a hmotností asimilačního aparátu, či s dynamikou přírůstu. Zatímco potřeba vody lesních kultur je v prvních letech po výsadbě z pohledu celkové vodní bilance nepodstatná a v průměru nepřesahuje 10 mm za rok, je transpirace mlazin, tyčkovin a dalších vývojových fází lesa mnohonásobně vyšší. Brechtel (1976) a Brechtel a Scheele (1982) sice nenalezli signifikantní rozdíl mezi mladými, středně starými a dospělými porosty borovice, dubu a buku, ovšem ve většině literárních zdrojů je maximální transpirace vázána na kulminaci běžného přírůstu (Obr. 4.5).

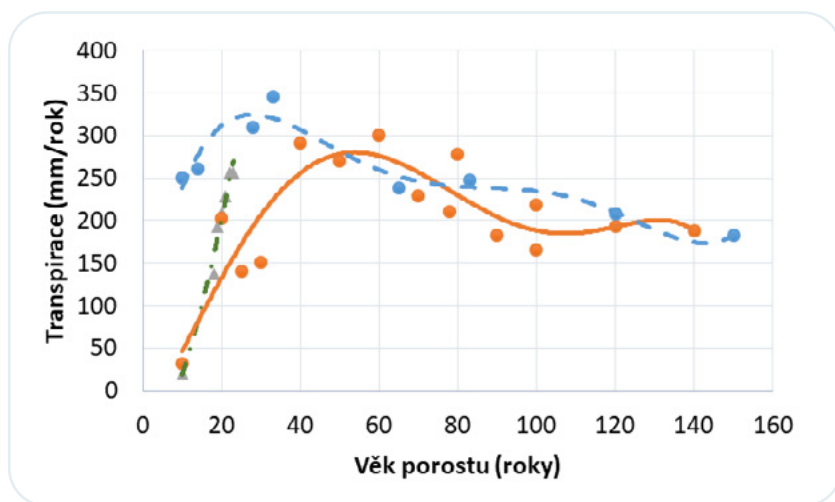
Podle údajů Molčanova (1960, 1970) vykazuje smrk nejvyšší spotřebu vody ve věku šedesáti let, podle výpočtů Běleho (1978) ve věku padesáti let. Fadorov (1977) zaznamenal v borovici největší transpiraci zhruba ve třiceti letech. V porostech břízy se pohybuje od dvacátého roku téměř setrvale kolem 300 mm. Ve Švýcarsku studoval vliv zásoby vody v půdě na evapotranspiraci pětatřicetiletého listnatého porostu s převahou buku Item (1974, 1981). V konkrétních podmínkách na slabě kyselých až kyselých hnědých půdách se při nízké půdní vlhkosti pohybovala spotřeba vody lesem od 0,5 do 1 mm denně, kdežto při dostatečné vlhkosti se ustálila na cca 4 mm za den. O nezvykle nízkých transpiračních hodnotách dospělého borového porostu podřadné bonity, rostoucího na pískovcových skalách Kokořínska, referoval Čermák a kol. (1986). Nekvalitní borovice zde umožnila svou minimální vlastní spotřebou (50–60 mm za vegetační období) významný průsak srážek propustným podložím do podzemních zdrojů.

Lesní dřeviny však nemusí snižovat svůj fyziologický výpar jen v suchých obdobích. Brechtel, Hoyningen–Huene (1978) publikovali údaje z chlumní oblasti Hessenska, podle nichž se při ročních srážkách 400–575 mm pohybovala transpirace dospělých bukových porostů v rozmezí 250–265 mm, ale ve vlhkém a chladnějším roce (srážky 753 mm) klesla pod 220 mm. Aktivní příjem (pohlčení) srážkové vody listy, její dočasné zadržení na povrchu transpiračních orgánů, nižší teplota a ozáření povrchů i vyšší vlhkost vzduchu v korunách stromů při dešti i po něm mohou redukovat transpiraci o 10–100 %.

Vedle vnitřních faktorů je transpirace ovlivňována zejména nabídkou vody v půdě a klimatickými činiteli. Tyto vnější podmínky mohou být pro celkový fyziologický výpar často významnější než věk prostu a druh dřeviny. Kantor uvádí, že v perhumidních oblastech našich středohor,

s ohledem na délku vegetační doby, nepřesáhne zpravidla transpirace dospělých (popřípadě středně starých) jehličnatých i listnatých porostů 200 až 250 mm za rok. V nížinných a pahorkatinných oblastech bude v našich klimatických podmínkách při příznivější bilanci obvykle spotřeba vody lesem limitována zásobou vody v půdě. Ve srážkově bohatých a teplých letech lze dle Kantora předpokládat transpiraci zapojených tyčovin i starších lesních porostů v rozpětí 250–350 mm za rok. Naopak v suchých, ale i vlhkých studených vegetačních obdobích klesnou zpravidla roční transpirační hodnoty v těchto plochách pod 250 mm.

A co nám říkají údaje o transpiraci a vodní bilanci porostů v posledních extrémně suchých letech 2015, 2018 či 2019? Z celkového srážkového úhrnu 500 mm za celé sledované období dubna až listopadu r. 2019 v oblasti jižní Moravy (Útěchov u Brna) tvořily ve sledovaném dubovém porostu (věk 70 let, výška 23 m, zastoupení dubu zimního 59 %, buku lesního 25 %, lípy 13 % a habru 3 %) podkorunové srážky 68,6 % (343 mm) a stok po kmeni 7,7 % (38,7 mm); ztráty intercepce byly 23,7 % (118,3 mm) a konečně aktivním výparem, tedy transpirací, porost vydal 87,5 % (437,5 mm). Z uvedeného je zřejmé, že výdejové složky převyšovaly dokonce příjmovou složku srážek v dubové porostní ploše o 55,8 mm. Ve srovnávaném bukovém porostu (věk 55 let, výška 17 m, zastoupení buku 90 %) ve stejném území činily z úhrnu 500 mm podkorunové srážky 57 %, stok po kmeni 5 %, intercepce 38 % a transpirace 82 % (410 mm). I v porostní ploše buku tak výdejové složky převýšily příjmovou, a to až o cca 100 mm (Pokorný a kol. 2020). Jak je možné, že ač byl rok 2019 i sledované období růstové sezóny od počátku rašení až po úplný opad listoví (počátek dubna – konec listopadu) srážkově nadnormální (oproti normálu let 1960–1990), přesto byla vodní bilance obou sledovaných porostních ploch



Obrázek 4.5:

Roční transpirace prostu smrku (modře), borovice (oranžově) a břízy (zeleně) v závislosti na věku různých porostů (zdroj Molčanov 1960, 1970, Běle 1978, Fedorov 1977, Grobov 1975, Lutzke a Simon 1975)

záporná? Vysvětlení hledíme v transpiraci a především požadavcích na výpar řízených dopadajícím množstvím sluneční radiace, teplotou a vlhkostí vzduchu. Každý měsíc roku 2019 byl teplotně nadprůměrný (vyjma května) i oproti průměrům období let 1981–2010 – a to o 1 až 5 °C, především v období předjaří a léta (<https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data/mesicni-prehledy-pozorovani#>). Navíc byly měsíce červen, červenec a srpen počtem výskytu letních a tropických dní rekordní i oproti srovnávacímu období pozdějších let 1981–2010. Pokud porovnáme sumy počtu těchto dnů za uvedeného měsíce, pak bylo v létě roku 2019 o 24 letních a 12 tropických dní více, než bylo obvyklé v letech 1981–2010. Je jasné, že porost nemůže vytranspirovat více než množství vody dostupné kořenům stromů porostu. Stromy tedy čerpaly vodu ze zásob v nižších vrstvách půdy, kam ještě dosahují jejich kořeny (především kořeny dubu jsou schopny dosahovat poměrně značných hloubek), nebo byl možný podpovrchný přítok (zřejmě v případě porostu buku, který leží na svahu pod rozvodnicí). Byl tedy r. 2019 suchý? Ano byl, a to dokonce pátý v řadě od r. 2015. Je jasné, že normálové srážky období 1960–1990 odpovídají tehdejšími teplotám, a tedy nemohou odpovídat jak vyšším průměrným teplotám vzduchu, tak požadavkům na výpar zvýšeným počtem výrazně teplých letních a tropických dní i zvýšeným deficitem vodních par v ovzduší zaznamenaných v létě r. 2019. Pokud tedy byl rok 2019 nadnormálovým o 110 mm v celkovém ročním úhrnu srážek, a přesto dubovým a bukovým porostům ca 60–100 mm chybělo do vyrovnané vodní bilance, pak by normálové množství srážek pro období vegetační sezóny (duben – listopad) let 1960–1990 mělo být z 390 navýšeno na 600 mm, tedy o 50 % normálu! Validované modely vývoje klimatu předpovídají pro příští desetiletí nárůst srážek o ca 3 % (Marek et al. 2011). To ovšem platí pouze pro krátkodobou budoucnost (10–20 let). V dlouhodobější budoucnosti (za 30–50 let) dojde naopak ke snížení srážek a to v oblastech jižní Moravy cca o 35 mm. Výsledky roku 2019 tedy dokládají přesně naznačený obecný trend v kontextu globální změny klimatu, na který je třeba reagovat adaptačními opatřeními podporujícími zlepšování vodní bilance lesních porostů, neboť zápornou vodní bilanci porostu nelze udržet déle než jednu, maximálně dvě růstové sezóny. Navíc jsou v důsledku zvyšování teploty ovzduší a požadavků na výpar významně ovlivněny produkční i ostatní funkce lesa, včetně krajiny.

LITERATURA

- AMBROS Z., 1978: Vodná bilancia lesných porastov Karpát. Lesn. Čas. 24, 203–221.
- ASSMANN E., 1968.: Nánka o výnose lesa. Bratislava, Příroda 486 s.
- AUSSENAC G., 1972: Etude de l'évapotranspiration réelle de quatre peuplements forestiers dans l'est de la France. Ann. Sci. For., 29, s. 369–389.
- AUSSENAC G., GRANIER A, 1979.: Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'Est de la France–II.–Etude de l'humidité du sol de l'évapotranspiration réelle.“ Ann. Sci. For. 36, 265–280.
- BÁČVAROV D., 1982: Balans na vodata prez vegetacionnija period pri osnovnite tipove dábova gora v lztečnite Rodopi. Gorskostop. Nauka 19, 16–25.

BECKER M., 1970: Transpiration et comportement vis-à-vis de la sécheresse de jeunes plants forestiers (*Abies alba* Mill., *Picea abies* (L.) Karsten., *Pinus nigra* Arn. ssp. *laricio* Poir., *Pinus strobus* L.). *Ann. Sci. For.* 27, 401–420.

BĚLĚ, M., 1978: Prognosa zmen hydrické účinnosti ploch lesů v Krušných horách. \Závěrečná správa\ Jíloviště–Strnady, VÚLHM, 33 s.

BENECKE P., VAN DER PLOEG R.R., 1978: Wald und Wasser. II. Quantifizierung des Wasserumsatzes am Beispiel eines Buchen und eines Fichtenaltbestandes im Solling. *Forstarchiv*, 49, 26–32.

BITJUKOV M.A., 1980: Izučit izmenenije vodochrane–zaščitnoj role lesov pod vlijanijem lesochozajstvennizh meroprijatil. \Zaključitelnoje soobščenie\ Soči, Kavkazskil filial VNIILM, 198s.

BOGATYREV JU. G., VASILJEVA I.N., 1975: Vodnyj režim počvy I poddrosta jeli na vyrubkach I pod pologom. *Lesovedenije*, 16–25.

BORER F., 1980: Zur Wasserbilanz eines Einzelbaums innerhalb eines Waldbestandes. *Journal forestier suisse. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*.

BRECHTEL H.M., 1976: Influence of Species and Age of Forest Stands on Evapotranspiration and Ground Water Recharge in the Rhine – Main–Valley. Discussion Paper... XVI IUFRO World–Congress, June 20 – July 2, 1976, Oslo, IUFRO 33 s.

BRECHTEL H.M., VON HOYNINGEN-HUENE J., 1978: Binfluss der Verdunstung verschiedener Vegetationsdecken auf den Gebietswasserhaushalt. In : *Gewasserpflge – Bodennutzung – Landschaftsschutz* Hann. Munden, Hessische Forstliche Versuchsanstalt, 172–231.

BRECHTEL H.M., LEHNARDT F., 1982: Einfluss der Grundwasserabsenkung auf Waldstansorten. 4 Fortbildungslehrgang Grundwasser. Nutzbares Grundwasserangebot. 11 bis 14. Oktober 1982 in Darmstadt. Hann. Munden, Hessische Forstliche Versuchsanstalt, 49 s.

BRECHTEL H.M., SCHEELE G., 1982: Erwirtschaftung von Grundwasser durch land – und forstwirtschaftliche Massnahmen. 4 Fortbildungslehrgang 1982 in Damstadt. Hann. Munden, Hessische Forstliche Versuchsanstalt, 48 s.

BURENINA T.A., 1982: Dinamika vosstanovlenija lesogidrologičeskich uslovij na eksperimentalnoj vyrubke srednegornogo pojasa Zapadnego Sajana. In: *Sredobranzujuščaja rol lesnych ekosistem Sibiri*. Krasnojarsk, AN SSSR, 106–114.

BURGER H., 1953: Blattmenga und Zuwachs. In: *Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchswes.* Bd. 29. Zurich, 38 – 130.

CALDER I.R., 1978: Transpiration observations from a spruce forest and comparisons with predictions from an evaporation model. *J. Hydrol.* 38, 33–47.

ČERMÁK J., DEML M., PENKA M., 1973: A new method of sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum* 15, 171–178.

ČERMÁK J., KUČERA J., PENKA M., 1976: Improvement of the method of sap flow rate determination in full–grown trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. *Biologia Plantarum* 18, 111–118.

ČERMÁK J., KUČERA J., 1980: Sezonní průběh transpiračního proudu a spotřeba vody u dubu (*Quercus robur* L.) v lužním lese. In: Zborník referátov 3. Zjazdu SBS. Zvolen, Slovenská botanická spoločnosť, 233–238.

ČERMÁK J. ET AL., 1982a: Měření a vyhodnocení transpirace stromů na bilanční ploše Nedamov. \Závěrečná zpráva\ . Brno, VŠZ – Ústav ekologie lesa, 25 s.

ČERMÁK J., ÚLEHLA J., KUČERA J., PENKA M., 1982b: Sap flow rate and transpiration dynamics in the full-grown oak (*Quercus robur* L.) in floodplain forest exposed to seasonal floods as related to potential evapotranspiration and tree dimensions. *Biologia Plantarum* 24, 446–460.

ČERMÁK J. ET AL., 1983: Měření a vyhodnocení transpirace stromů na pokusné ploše Nedamov. \Závěrečná zpráva\ . Brno, VŠZ – Ústav ekologie lesa, 45 s.

ČERMÁK J. ET AL., 1986: Transpirace a vodní režim borového prostu v pískovcové oblasti chudých borů. In : Funkce lesů v životním prostředí. Sborník referátů. Brno, VŠZ – LF, s. 67–73.

ČERMÁK J., NADEZHINA N., TRCALA M., SIMON J., 2015: Open field-applicable instrumental methods for functional assessment of whole trees and stands. *iForest* 8, 226–278.

EIDMANN F.E., SCHWENKE H. J., 1967: Beitrage zur Stoffproduktion, Transpiration und Wurzelatmung einiger wichtiger Baumarten. *Forstwiss. Cbl., Beihefte* 23, 46 s.

ERMICH, K., 1956: O metodach badania transpiracji lasu. *Sylwan serie A*, 30–37.

PEDOROV S.F., 1977: Issledovvanije elementov vodnogo balansa v lesnej sone jevroejskoj territorii SSSR. Leningrad, Gidrometeccisdat. 244 s.

GRANIER, A. 1985. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute le tronc des arbres. *Ann. For. Sci.* 42:193–200.

GRIBOV A. I., 1975: Gidrologičeskaja rol berezovch lesov južnej časti Krasnojarskogo kraja. In: Stacionarnyje gidrologičeskije issledovanija v lesach Sibiri. Krasnojarsk, AN SSSR, 43–68.

GULIDOVA I. V., 1962: Fotosintez i transpiracija u jeji v različnych akologičeskich uslovijach. In: Mater. K naučn . obosnov. Nek. Lesoohozj. Meroprijatij v sev. Časti vologodskoj obl. AN SSSR, 97–102.

HÄSLER R., 1982: Net photosynthesis and transpiration of *Pinus montana* on east and north facing slopes at alpine timberline. *Oecologia* 54, 14–22.

HETSCH W., HEILIG K-H., 1981: Der Wasserhaushalt von Fichte in Abhängigkeit von Boden und Atmosphäre. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 144, 317–330.

HUBER A. ET AL., 1983: Influencia de algunos factores meteorologicos enel consume de aqua por transpiracion de *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst, y *Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst. *Turriablba*, 33, 169–175.

HUZULÁK J., 1981: Ekologicko – fyziologická štúdia vodného režimu lesných drevín. Bratislava, Veda, 140 s.

CHANG, M. I. N. G. T. E. H., 1977: Is canopy interception an accurate measure of loss from the hydrologic budget? *Tex. J. Sc.* 28, 339–346.

CHAŠES C.M., BOBRO V.I., LIŠENKO A.A., 1971: Transpiracionnyj raschod vody drevesnymi porodami. Les. Coz., 38–41.

CHROUST L., 1985a: Vliv výchovných zásahů v mladých smrkových porostech na kvantitativní a kvalitativní produkci biomasy \Závěrečná správa\ VÚLHM – výzk. stan. Opočno, 47 s.

CHROUST L. 1885b: Nadzemní biomasa mladých borových porostů (*P. sylvestris*) a její zjišťování. In: *Communicationes Forest. Czech.* 14, Praha, VÚLHM.

CHROUST L., 1987: Intercepce a transpirace v borové tyčkovině. Rukopisy. VÚLHM – Výzk. stan. Opočno, 8 s.

CHROUST L., 1988: Intercepce a transpirace ve smrkové mlazině. Rukopisy. VÚLHM – Výzk. stan. Opočno, 9 s.

ITEM H., 1974: Ein Model1 fir den Wasserhaushalt eines Laubwaldes. Mitt. Eidgenos. Anst. F. forstliche Versuchswesen, 50, 137–331.

ITEM H., 1978: Ein Model1 fur den Wald und Wiesse. Mitt. Eidgenos. Anst. F. forstliche Versuchswesen 57, 82 s.

KANTOR, P., 1981: Hydrická účinnost dospělých smrkových a bukových porostů. \Závěrečná zpráva\ VÚLHM – Výzk. stan. Opočno, 45 s.

KANTOR, P., 1984a: Vodohospodářská funkce horských smrkových a bukových porostů. *Lesnictví* 30, 471–490.

KANTOR, P., 1984b: Stanovení hydrické účinnosti smrkových a bukových kultur. \Závěrečná zpráva\ VÚLHM – Výzk. stan. Opočno, 35 s.

KLOTZLI, F., 1968: Wald und Umwelt. *Schweiz. Z. F. Forstwesen* 119, 264–334.

Koval I.P. 1973: Rasehod vlagi na transpiraciju i ispaenije s počvy v bukovych nasaždenijach. *Les. Choz.*, 24–27.

KOZLOVA L.N., 1984: Rasehod vody na transpiraciju lesnymi fitocenozami Krasnojarsko–Ačinskoy lesostepi. In: *Sredooobrazujuščaja rol lesnych ekosistem Sibiri.* Krasnojarsk, AN SSSR, 46–58.

KOZLOVA L.N., 1984: Transpiracija rastenij v sosnjakach i na vyrubkach Golondinskogo chrepta. In: *Transformacija lesnymi ekosistemami faktorov okruš. sredy.* Krasnojarsk, AN SSSR, 86–96.

KREČMER V., 1969: Vodohospodářská vlivy lesů. *Stud. Inform. Lesnictví*, 3–104.

KŘEČEK, J., 1983: Evapotranspirace smrkového porostu stanovená metodou Bowenova poměru. \Závěrečná zpráva\ VÚLHM Jíloviště–Strnady, 13 s.

KÜNSTLE E., MITSCHERLICH G., 1970: Assimilations – und Transpirations– messungen in einem Stangenhloz. *Allg. Forst–u. Jagdstg.*, 141, 89–94.

KÜNSTLE E., ULLRICH C.H., 1976: Vergleichende Gaswechselfmessungen an Gemeiner Kiefer (*Pinus silvestris* L.) und Schwarzkiefer (*Pinus nigra* Arn.) unter den Extrembedingungen des Sommers 1975 im Oberrheinischen Trockengebiet. *Allg. Forst–u. Jagdstg.* 147, 65–68.

- KÜNSTLE E., MITSCHERLICH G., 1978: Photosynthesis, Transpiration und respiration A tmung in einem Mischbestand in Schwarzwald. IV. Teil: Bilanz. Allg. Forst- u. Jagdstg. Allg. Forst- u. Jagdstg, 148, 227–239.
- LADEFOGED K., 1962: Über den Wasserhaushalt der Waldbäume. Forstl. Mitteil. 15, 271–280.
- LADEFOGED K., 1963: Transpiration of forest trees in closed stands. Physiologia Plantarum 16, 378–414.
- LASSOIE J.P., SCOTT D.R., FRITSCHEN L.J., 1977: Transpiration studies in Douglas-fir using the heat pulse technique. For. Sci. 23, 377–390.
- LÁZARESCU C., FIDANOF F., 1968: Cercetări privind transpiratia la tei. Revista Pádurilor, 83, 5–12.
- LOKVENC T., CHROUST L., 1987: Vliv břízy na odrůstání smrkové kultury. Lesnictví 33, 993–1010.
- LUTZE R., SIMON K.H., 1975: Zur Bilanzierung des Wasserhaushalts von Waldbeständen auf Sandstandorten der DDR. Beiträge f. Forst – wirtschaft 9, 5–12.
- MITSCHERLICH G., 1971: Wald Wachstum und Umwelt. Bd 2. Waldklima und Wasserhaushalt. Frankfurt a. M., J. D. Sauerländer s Verlag, 365 s.
- MOLČANOV A.A., 1960: Hidrologičeskaja rol lesa. Moskva, Izdat. AN SSSR, 485 s.
- MOLČANOV A.A., 1970: Cikly atmosfernych osadkov v različnych prirodnych zonach v otdelnych tipach lesa. In: Doklady sov. Uč. Na mežd. Simp. Po vlijaniju les ana vnesnjuju sredu. Tom 1. Moskva, 24–59.
- MRÁZ, K., 1985: Vodní režim půdy a sumární vodní bilance dubového a smrkového porostu ve vegetačním období. Lesnictví 31, 803–816.
- NEUWIRTH G., 1962: Okologische Beziehungen des Gaswechsels im Vorwald. In: Probleme der Waldökologie unter besonderer Berücksichtigung der Fichtenwirtschaft im Mittelelgebirge. Berlin, Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, 97–123.
- NICOLSON J.A., THORUD D.B., SUCOFF E.I., 1968: The linterception – Transpiration Relationship in White Spruce and White Pine. J. Soil and Water Conserv. 23, 181– 184.
- OSZLÁNYI J., 1983: Structure of tree species biomass in forest stands. Ekologia (ČSFR) 4, 431–447.
- PAULIUKIČIUS G.B., 1972: Hidrolof'gičeskije i geochimičeskije svojstva cholmistých lesnych landšaftov. Vilnius, AN Lít. SSSR, 1972. 459 s.
- PENKA M., ČERMÁK J., 1978: Denní a sezonní průběhy transpiračního proudu u břízy (*Betula alba* L.) a dubu (*Quercus sessilis* Ehrh. I. In: Struktura, funkce a produktivita modelových lesních ekosystémů. Brno, VŠZ – LF, 55–71.
- PENKA M., – ŠTĚPÁNEK V., 1978: Studium vodního provozu semenáčků dubu letního. In: Struktura, funkce a produktivita modelových lesních ekosystémů. Brno, VŠZ – LF, 85–102.
- PENKA M., 1985: Transpirace a spotřeba vody rsotlinami. Praha, Academia, 250 s.
- Petráš R., 1985: Listová biomasa porastov smreka, borovice a buka.“Les. Čas. 31, 323–333.

- POGODAJEVA N.N., 1972: Raschod vody na transpiraciju lesnymi soobščesrzami Čitinskogo Zabajkalja. In: Zap. Zabajkal. Fil. Geogr. O–va SSSR. Vyp. 71., 13–14.
- POPOV V.V. 1967, : Transpiracionnaja sposobnost kultur berazy i sosny. Les. Ž., 10, 9–22.
- POPOV V.V., 1975: Sredooobrazujuščaja rol temnochvojnogo lesa. Novosibirak, Nauka, 328 s.
- RAEV I., 1977: Za chidrologičnija efekt na nasaždenija ot poglavnite naši darvesni vidove. Gorsko Stopanstvo 33, 1–7.
- RAEV I., 1982: Výsledky výzkumu v oblasti lesní hydrologie a jejich využití v lesním hospodářství BLR. In: Lesnické vodní hosp. v tvorbě život. Prostř. Ostrava, Dům techniky ČSVTS, 36–41.
- ROBERTS, J., 1977: The use of tree–cutting techniques in the study of the water relations of mature Pinus sylvestris L. I. The technique and survey of the results. J. Exp. Bot. 28, 751–767.
- ROBERTS J., 1983: Forest transpiration: a conservative hydrological process? J. Hydrol. 66, 133–141.
- RUNNING S.W., 1984: Documentation and Preliminary Validation of H₂O TRANS and DAYTRANS, Two Models for Predicting Transpiration and Water Stress in Western Coniferous Station. 45 s.
- SCHMALTZ J., 1969: Die Bedeutung des Waldes für den Wasserkreislauf. Forstarchiv 40, 132–147.
- SLAVÍK, B., 1965: Metody studia vodního provozu rostlin. Praha, Nakl. ČSAV, 302 s.
- SMOLJAK L.P., RUSALENKO A.I., PETROV J.G., 1977: Tablicy zapassov nadzemnoj fitomassy sosnjakov BSSR. Les. Choz., 68–71.
- STEINHUEEL G., 1983: Transpiration von Hohenvarianten der Karpatenfichte. In: Acta Institutii Forestalis Zvolenensis. 6 Zvolen. VÚLH, 333–347.
- SWANSON R.H., BENECKE U., HAVRANEK W.M., 1979: Transpiration in mountain beech estimated simultaneously by heat–pulse velocity and climatised cuvette. New Zealand J. For. 9, 170–177.
- ŠEVELEV N.N., 1979: Gidrologičeskoje značenije pogloščenija vody chovej jeli I pichity v korennych temnochvojnyh. Lesach Sredn. Urala. Sverdlovak, 123–129.
- VESELKOV B.M., TICHOV P.V., 1984: Svjaz transporta vody po kaileme s intensivnost ju transpiracii u sosny obyknovennej. Piziol. Rast. 31, 1099–1106.
- VINŠ B., ŠIKA A., 1981: Biomasa smrkového porostu v chlumní oblasti. In: Práce VÚLHM 59, VÚLHM Jiloviště – Strandy, 83–99.
- VORONKOV N.A., 1979: Osobennosti gidrologičeskoj roli lesnyh nasaždenij po sezonam goda. In : Tez. Dokl. Na Vses. Sovešč. Zaščitn. Lesorazved. i raciconal. Ispolz ... Taškent, 33–34.
- VYSKOT M., 1980: Bilance biomasy hlavních lesních dřevin. Lesnictví 26, 849–882.
- WEIHE, J., 1986: Zurückhaltung von Regenniederschlagen durch Buchen und Fichten. Allg. Forstz. 23, 86–90.
- ŽROVA P.T., PATLAJ I.N., 1979: Transpiracija sejancev sosny obyknovennoj raznogogeografičeskogo proischoždenija. Lasovod. i Agrolesomel. Kyjev, 53–59.

5 Monitoring malých lesních povodí

Kateřina Neudertová Hellebrandová

Vyhodnocování vztahů mezi srážkami a odtokem z povodí (srážkově-odtokových poměrů) je předmětem zkoumání hydrologů již po generace. Reakce povodí na srážky závisí na geologických strukturách v povodí, půdě, topografii terénu, velikosti povodí a v neposlední řadě také na vegetaci (Chang 2013).

Sledovat a hodnotit vzájemné vztahy lesních porostů a srážkově-odtokových poměrů v malých zalesněných povodích je jedním z cílů výzkumných projektů zaměřených na problematiku lesnické hydrologie. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti provádí tento výzkum v povodí Červík (CE) a Malá Ráztoka (MR) v Moravskoslezských Beskydech od 1. 11. 1953 a v povodí Pekelského potoka (Želivka – ZE) ve Středočeské pahorkatině od 1. 11. 1976.

K detekci, kvantifikaci a předpovědi změn hydrologických a hydrochemických poměrů v povodích, ať už vlivem lesnického managementu nebo probíhající klimatické změny, lze přistupovat různým způsobem – pomocí vědeckého výzkumu, monitoringu, případně modelování přírodních dějů.

5.1 Základní údaje o sledovaných povodích

Pekelský potok je pravostranný přítok vodní nádrže Švihov, situovaný ve Středočeské pahorkatině v nadmořské výšce 445 m n. m. (tab. 5.1, obr. 5.1). Na povodí probíhá od roku 1976 hydrologický a hydrochemický výzkum, jehož cílem je, mimo jiné, sledovat a vyhodnocovat vliv změn lesnického managementu a struktury porostů na hydrologický režim lesního povodí. Povodí má plochu 124,4 ha, z čehož 96 % tvoří pozemky určené pro plnění funkcí lesa.

Červík a Malá Ráztoka jsou malé vodní toky pramenící v Moravskoslezských Beskydech. Malá Ráztoka je pravostranným přítokem říčky Lomná (hydrologické pořadí 2-01-01-129), pramení na severozápadním úbočí vrchu Tanečnice (1084 m n. m.) a teče severozápadním směrem do obce Trojanovice, kde se vlévá do Lomné. Její povodí, které má rozlohu 210,7 ha, leží v nadmořské výšce 869 m n. m. Červík (hydrologické pořadí 2-03-01-008), pramení v oblasti vrchu Trojačka (987 m n. m.) a Rožnovský vrch (902 m n. m.), teče severovýchodním směrem a v osadě Samčanka se vlévá do Ostravice. Monitorovaná část povodí (uzávěra v místě měrného profilu) má rozlohu 189,7 ha a její střední nadmořská výška je 869 m n. m.

Od hydrologického roku 1954 probíhá v obou beskydských povodích výzkum zaměřený na sledování vlivu lesa a lesnického hospodaření na hydrologickou bilanci, jehož hlavním cílem je vyhodnotit dopad obnovních zásahů a změny druhové skladby porostů na odtoky vody z povodí. Po dvanáctiletém bezzásahovém kalibračním období proběhly na obou povodích zrychlené porostní obnovy s částečnou změnou druhové skladby zakládaných porostů, které byly ukončeny v polovině 80. let 20. století.

Hydrologický rok je stanoven tak, aby všechny spadlé srážky v témže roce také odtokly. Začíná 1. listopadu a končí 31. října následujícího kalendářního roku. Jeho počátek stanovený na přelom října a listopadu souvisí s možným výskytem sněhových srážek – od 1. listopadu již mohou srážky zůstat ležet na zemském povrchu s tím, že roztají a odečtou až další rok na jaře. Kromě toho se období konce října a počátku listopadu vyznačují minimálními srážkami. V každé části světa je hydrologický rok definován jinak, například v Africe je jeho počátek a konec dán začátkem období dešťů (1. 4. a 31.3.).

Povodí Červíku se skládá ze dvou subpovodí. Na dílčím povodí CA bylo přistoupeno k zrychleným obnovám smrkových porostů, ty byly od roku 1966 po dobu dvaceti let po částech těžené a následně opět zalesněné převážně smrkem. Subpovodí CB sloužilo jako kontrolní povodí s tradičním lesnickým hospodařením.

Tabulka 5.1:
Charakteristika sledovaných povodí

| Povodí | Červík (CE) | Malá Ráztoka (MR) | Želivka (ZE) |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| Poloha | 49°27' N 18°23' E | 49°30' N 18°15' E | 49°40' N 15°14' E |
| Nadmořská výška (m n. m.) | 637–958 | 596–1084 | 374–470 |
| Průměrná nadmořská výška (m n. m.) | 803 | 869 | 445 |
| Rozloha (km ²) | 2,107 | 1,897 | 1,244 |
| Geologický podklad | pískovec, břidlice | pískovec | pararula |
| Převládající půdní typ | kambizem | podzol, kambizem | kambizem, pseudoglej |
| Převažující dřevina | smrk, buk | smrk, buk | smrk |
| Průměrná teplota (°C) | 6,8 | 7,1 | 8,2 |
| Průměrné roční srážky (mm) | 1 118 | 1 244 | 630 |
| Průměrný odtok (l.s ⁻¹ .km ⁻²) | 20,1 | 29,1 | 3,2 |

Dospělé bukové porosty na povodí Malé Ráztoky byly z 50 % odtěženy formou postupně přiřazovaných pruhových sečí, které byly následně zalesňovány především smrkem. V 80. letech byly porosty na MR značně postiženy kyselou depozicí, proto bylo povodí opakovaně vápněno (1983, 1985 a 1987) (Jařabáč, Chlebek 1998).

5.2 Sledování a hodnocení klimatických a hydrologických parametrů

Teploty a srážky

K měření srážek a dalších meteorologických parametrů (teplota vzduchu, rychlost a směr větru, sluneční svit) slouží na povodí Červík automatická meteorologická stanice od firmy EMS Brno, která je umístěna na volné ploše (louce) v blízkosti měrných žlabů. Stejným měřením je vybaveno i povodí Pekelského potoka, zde se meteorologická stanice nachází na blízkém poli. Na Malé Ráztoce jsou meteorologické veličiny měřeny na stanici Palouček ve spodní partii povodí. Stanice je vybavena registrační jednotkou M4016, na kterou je připojen člunkový srážkoměr SR02 a sonda pro měření teploty vzduchu. Měsíční srážkové úhrny jsou měřeny pomocí totalizátorů, v každém z povodí jsou rozmístěny čtyři. Změřené srážky jsou pomocí Hortonovy polygonové metody přepočteny na plochu povodí a jsou dosazeny do vodní bilance.

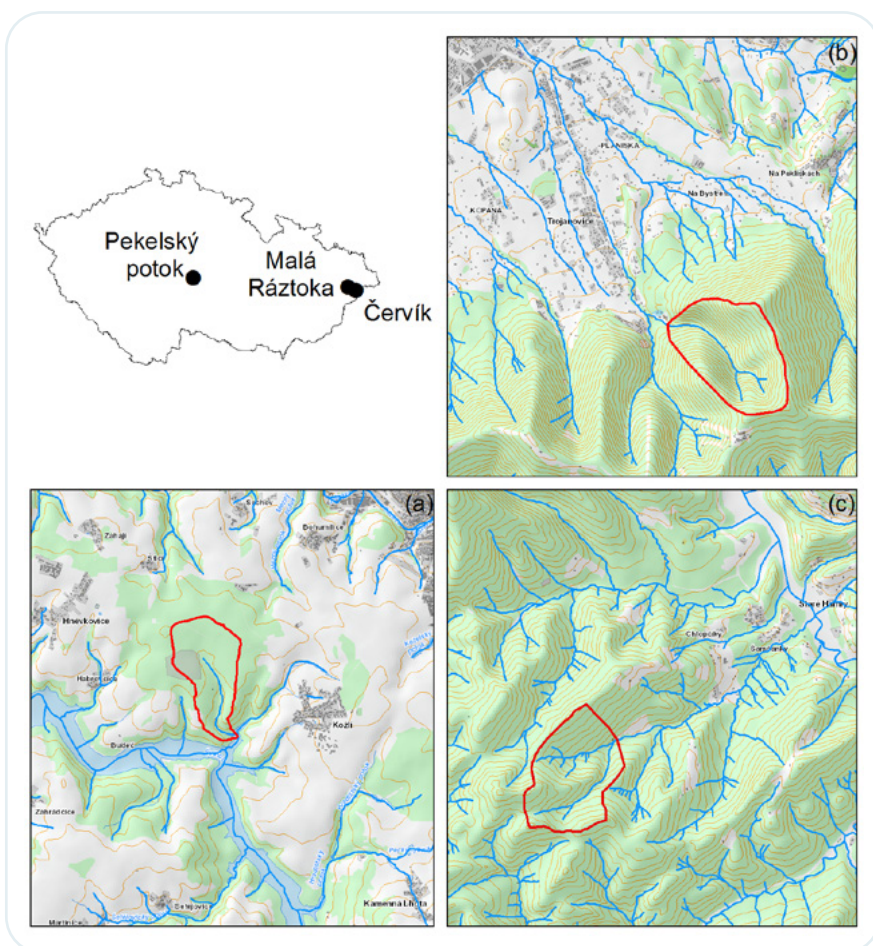
Totalizátor je srážkoměr o dostatečném objemu, aby mohl sloužit k měření úhrnu srážek za delší časové období. Na počátku měření obsahuje sběrná nádoba nemrznoucí roztok a dále vhodnou látku, která zabraňuje výparu z hladiny. Zpravidla bývá umístován na hůře dostupná nebo odlehlá místa, protože nepotřebuje častou obsluhu (obr. 5.2).

Průměrný roční úhrn srážek je ve sledovaném období 630 mm v povodí Pekelského potoka, 1 244 mm na Malé Ráztoce a 1 118 mm v povodí Červíku. Zatímco v níže položeném povodí Pekelského potoka je průměrný srážkový úhrn nižší, než je tomu ve srovnání s průměrem České republiky, horská povodí Červíku a Malé Ráztoky mají průměrný roční srážkový úhrn vysoko nad celorepublikovou normálovou hodnotou. Deset let s nejnižšími ročními srážkovými úhrny pro každé povodí a pro území ČR je zaznamenáno v tabulce 5.2.

Srážkové úhrny za určité období jsou základním ukazatelem při posuzování toho, zda se ve sledované období vyskytlo, či nevyskytlo sucho.

Grafy na obrázku 5.3 prezentují srážkové úhrny na experimentálních povodích po dobu probíhajícího monitoringu a také srážkové úhrny na území ČR od roku 1961. Milimetry srážek zároveň představují počet litrů vody, které spadnou na 1m² daného povodí za rok. V grafech je zaznamenán lineární trend a také pětiletý klouzavý průměr.

U všech čtyř lokalit je patrná výrazná meziroční variability ročních srážkových úhrnů. Když však provedeme analýzu trendu pomocí Mann-Kendallova testu (tabulka 5.3), zjistíme, že zde není detekovatelný trend v čase. To znamená, že srážek statisticky významně nepřibývá ani neubývá v dlouhodobém kontextu.



Obrázek 5.1:

Poloha povodí (a) Pekelského potoka, (b) Malé Ráztoky a (c) Červíku

Tabulka 5.2:

Deset let s nejnižšími srážkovými úhrny na povodích v porovnání s celorepublikovým srážkovým úhrnem

| ZE (1976 – 2021) | | CE (1954 – 2021) | | MR (1954 – 2021) | | ČR (1961 – 2021) | |
|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| rok | srážky (mm) | rok | srážky (mm) | rok | srážky (mm) | rok | srážky (mm) |
| 2005 | 408 | 1992 | 893 | 2003 | 774 | 2003 | 516 |
| 2004 | 426 | 2015 | 932 | 1959 | 818 | 2018 | 521 |
| 1991 | 479 | 1983 | 934 | 1964 | 833 | 2015 | 535 |
| 1992 | 489 | 2003 | 942 | 2015 | 849 | 1982 | 539 |
| 2018 | 489 | 1964 | 954 | 1969 | 859 | 1973 | 542 |
| 2006 | 512 | 1986 | 967 | 1992 | 869 | 1969 | 567 |
| 1996 | 518 | 1990 | 968 | 1957 | 872 | 1989 | 573 |
| 2008 | 538 | 1954 | 980 | 2011 | 902 | 1972 | 578 |
| 1990 | 540 | 2011 | 997 | 1963 | 910 | 1971 | 579 |
| 1982 | 547 | 1989 | 1016 | 2018 | 913 | 1990 | 582 |



Obrázek 5.2:

Totalizátor u meteorologické stanice Mnichov, Hrubý Jeseník

Sucho považujeme v lesnictví za jeden z abiotických škodlivých činitelů. Jedná se o poměrně specifický fenomén, na rozdíl od dalších škodlivých činitelů, jako je třeba vítr, sníh, námraza nebo kůrovcová kalamita, které se dají poměrně snadno ohraničit z hlediska časového a prostorového vymezení i jejich dopadu na lesní ekosystém. Sucho takto ohraničené není a často lze jen velmi obtížně určit, kdy sucho začíná, kde se vyskytuje, kdy daná epizoda končí, a zda byla horší než epizoda předchozí nebo jaké byly její účinky.

Tabulka 5.3:

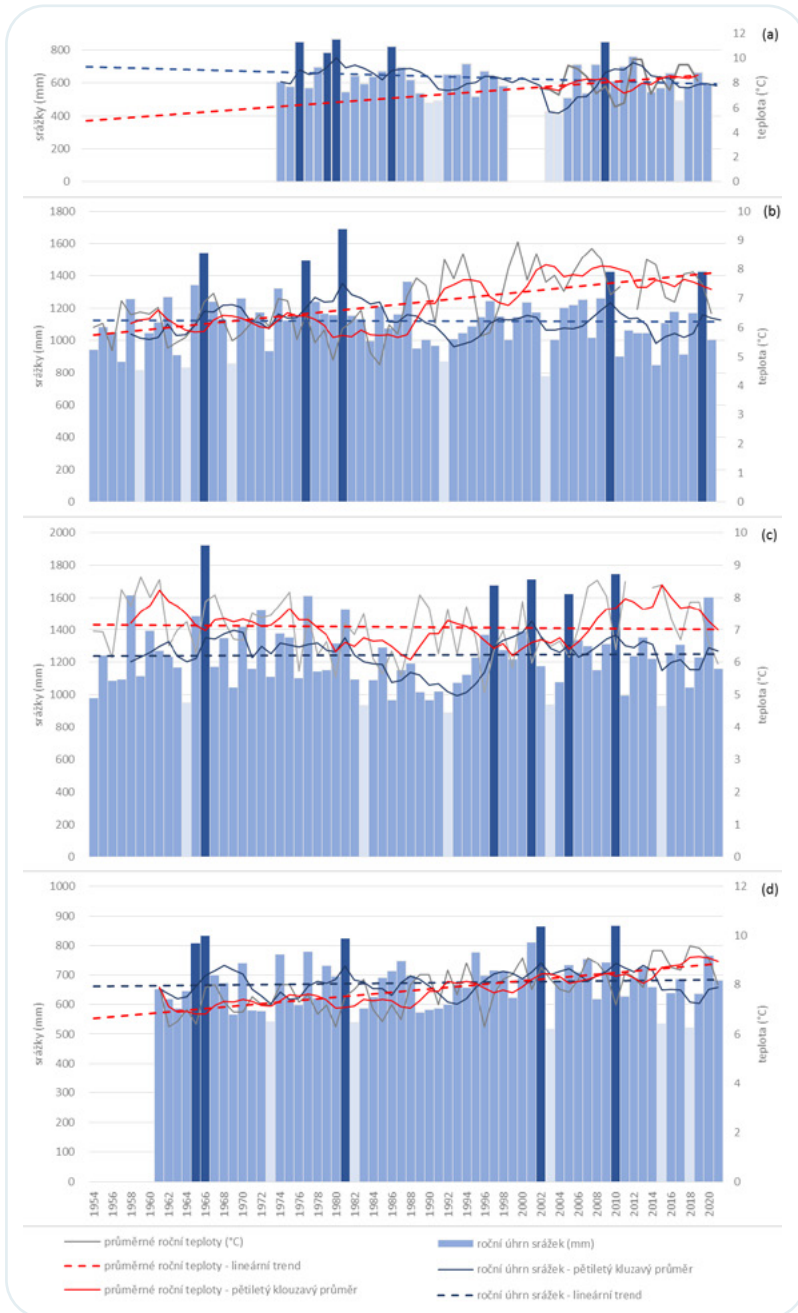
Hodnocení trendu v časových řadách průměrných ročních teplot a srážkových úhrnů na experimentálních povodích a na území ČR pomocí Mann-Kendallova testu

| období | časová řada | hodnota p |
|-------------|--------------|-----------|
| 1961 – 2021 | ČR - teplota | <0,0001 |
| 1961 – 2021 | ČR - srážky | 0,444 |
| 2004– 2021 | ZE - teplota | 0,449 |
| 1975–2021 | ZE - srážky | 0,300 |
| 1954–2021 | MR - teplota | 0,646 |
| 1954–2021 | MR - srážky | 0,841 |
| 1954–2021 | CE - teplota | <0,0001 |
| 1954–2021 | CE - srážky | 0,975 |

Při hodnocení hydrologické bilance povodí je však třeba sledovat nejen příjmovou, ale i výdejovou složku. Výdejová složka je realizována prostřednictvím odtoku a také pomocí evapotranspirace v daném prostoru. Evapotranspirace v sobě zahrnuje dvě složky – evaporaci, tedy výpar z půdy, povrchu vegetace, vodní hladiny a podobně, a dále transpiraci.

Hydrologická bilance povodí vyjadřuje změnu zásob vody v povodí (ΔS) na základě zhodnocení vstupů a výstupů vody z povodí. Vstupy představují zejména srážky (P), výstupy jsou realizovány prostřednictvím celkového odtoku (Q_c) a evapotranspirace (ET).

Základní rovnice hydrologické bilance má následující tvar: $P - ET - Q_c = \Delta S$



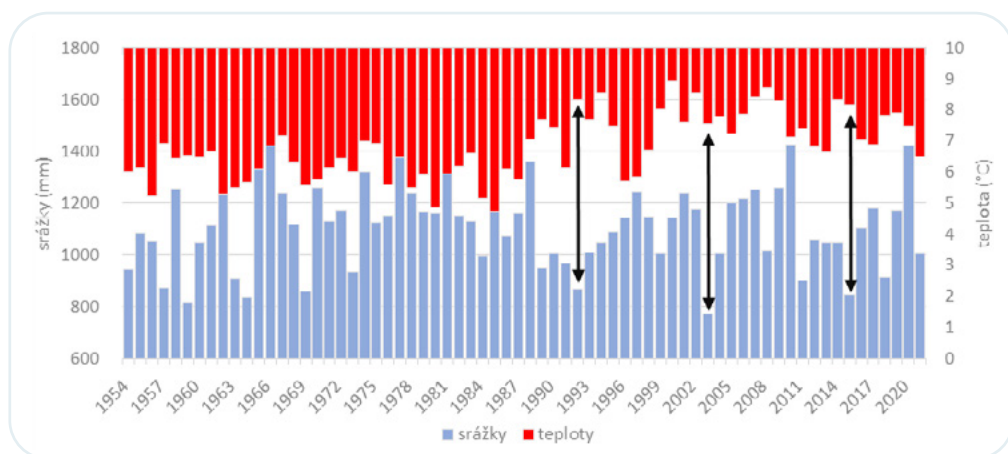
Obrázek 5.3:

Roční srážkové úhrny a průměrné teploty (a) v povodí Pekelského potoka v období 1976–2021, v povodí (b) Červíku a (c) Malé Ráztoky v období 1954–2021 a na území ČR v období 1961–2021 (d)

Evapotranspirace (transpirace + evaporace) je řízena především teplotou vzduchu. Vyšší teplota znamená nejen vyšší výpar z povrchů, ale také intenzivnější transpiraci vody rostlinami. To vede (v případě nízkých srážkových úhrnů) k postupnému vysušování půdního profilu a ke vzniku epizod sucha. Jejich závažnost a délka trvání je závislá zároveň na průběhu srážek a teplotě vzduchu.

Průběh průměrných teplot a trendy jejich vývoje na experimentálních povodích a v rámci České republiky můžeme opět vidět v grafech na obrázku 5.3. Je zde výrazná meziroční variabilita, nicméně, v případě povodí Červíku i v případě území České republiky již vidíme jasně detekovatelný a statisticky významný trend. Graf na obrázku 5.4 zobrazuje v detailu průběh srážkových úhrnů a průměrných teplot na povodí Červík v období 1954 – 2021. V grafu jsou vyznačeny roky (1992, 2003, 2015), ve kterých dochází k naplnění předpokladů pro vznik sucha – tedy k souběhu nízkých srážkových úhrnů a vysokých průměrných ročních teplot. Zejména zde však můžeme vidět nárůst průměrných teplot od 90. let minulého století a s tím spojené prodlužování a větší intenzitu period sucha.

Významné změny v časových řadách teplot a srážek na experimentálních povodích byly identifikovány pomocí následujících statistických testů: Pettittův (Pettit-Mann-Whitney test), SNHT (Standart Normal Homogenity test). Zatímco u srážek nebyly nehomogenity v časových řadách identifikovány, výsledky těchto testů pro časové řady teplot na povodí Červík můžeme vidět v tabulce 5.4. Zatímco v chladnějším měsících roku došlo ke vzniku statisticky významných změn v průměrných teplotách v roce 1987, v teplém období roku je to až v roce 1991, stejně jako u průměrných ročních teplot (obr. 5.5).



Obrázek 5.4:

Roční srážkové úhrny a průměrné teploty v povodí Červíku s vyznačenými suchými roky 1992, 2003 a 2015

Při porovnání průměrných teplot a průměrných srážkových úhrnů z období před rokem 1991 s obdobím pro roce 1990 na povodí Červík (obr. 5.6) je zřejmé, že ke zvýšení průměrných měsíčních teplot došlo v průběhu celého roku, nejvíce v období od dubna do srpna (červen o 2,1 °C, červenec o 2,4 °C), nejméně v říjnu (o 0,24°C). U srážkových úhrnů jsou změny ve dvou sledovaných obdobích. Úbytek můžeme pozorovat zejména v letních měsících, dále v listopadu, prosinci, lednu a dubnu. Roční srážkový úhrn se však příliš nemění.

Tabulka 5.4:

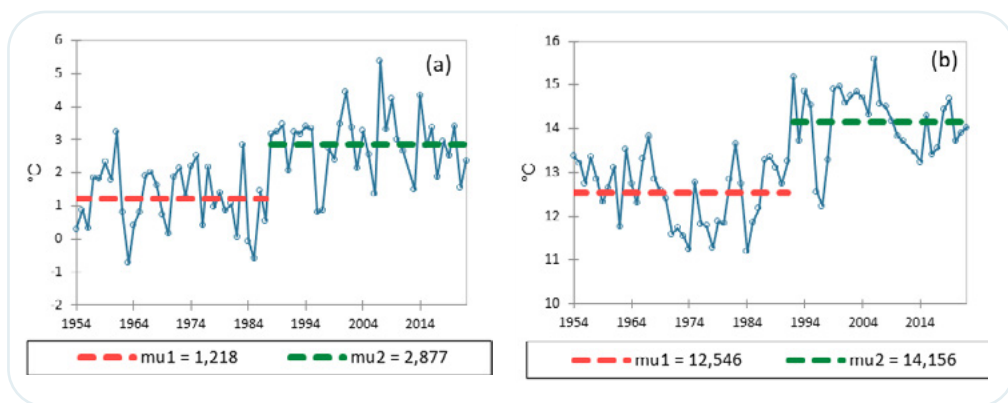
Identifikace nehomogenit v časových řadách průměrných ročních teplot na experimentálním povodí Červík pomocí Pettitova a SNHT testu

| test | Pettitův | | SNHT | |
|------------------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| | hodnota p | rok změny | hodnota p | rok změny |
| leden | 0,002 | 1987 | 0,006 | 1987 |
| únor | 0,022 | 1986 | 0,015 | 1986 |
| březen | 0,108 | 1988 | 0,133 | 1988 |
| duben | 0,001 | 1991 | 0,001 | 1991 |
| květen | <0,0001 | 1991 | 0,000 | 1991 |
| červen | <0,0001 | 1991 | <0,0001 | 1991 |
| červenec | <0,0001 | 1990 | <0,0001 | 1990 |
| srpen | <0,0001 | 1987 | <0,0001 | 1988 |
| září | 0,341 | 1980 | 0,506 | 1980 |
| říjen | 0,275 | 1985 | 0,322 | 1985 |
| listopad | 0,026 | 2000 | 0,014 | 2000 |
| prosinec | 0,367 | 2003 | 0,227 | 2003 |
| průměr | <0,0001 | 1991 | <0,0001 | 1991 |
| jarní období* | <0,0001 | 1991 | <0,0001 | 1991 |
| chladné období** | <0,0001 | 1987 | <0,0001 | 1987 |
| teplé období*** | <0,0001 | 1991 | <0,0001 | 1991 |

* březen – květen

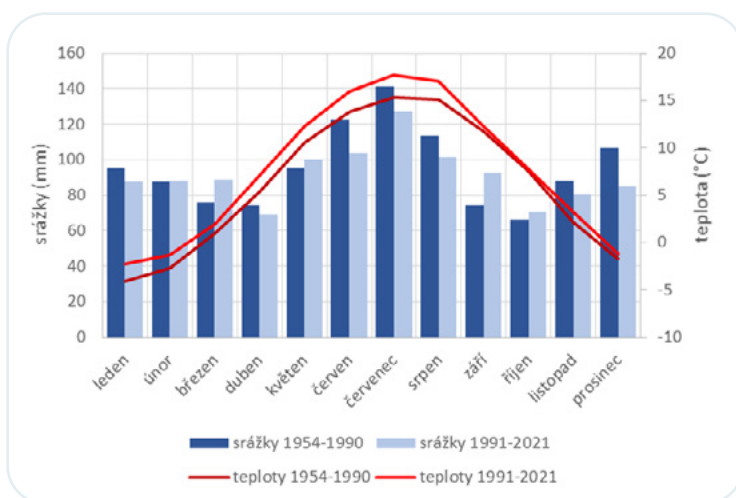
** leden – květen, listopad – prosinec

*** červen – říjen



Obrázek 5.5:

Detekované nehomogenity v datech průměrných teplot na povodí Červíku za (a) chladné a (b) teplé období roku



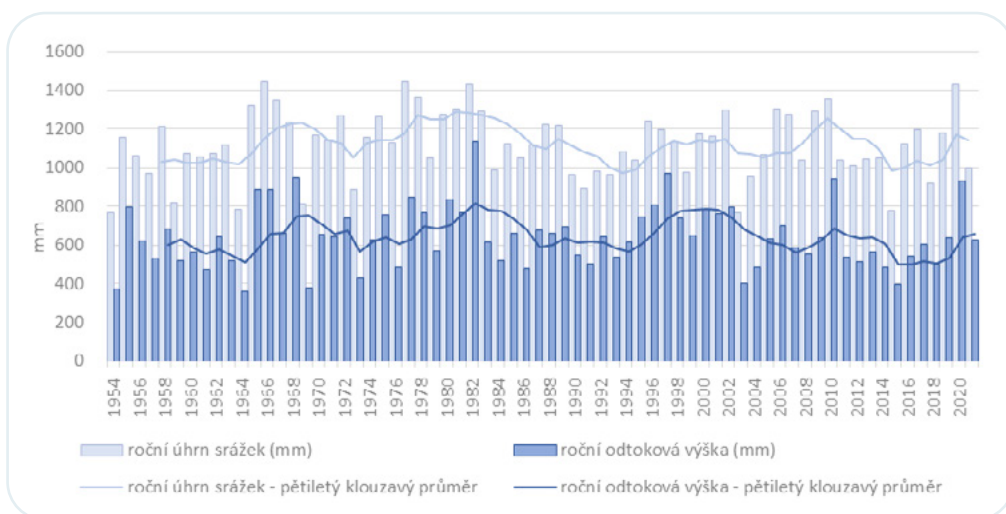
Obrázek 5.6:

Roční srážkové úhrny a průměrné teploty v povodí Červíku s vyznačenými suchými roky 1992, 2003 a 2015.

Odtok vody z povodí

Množství vody, odtékající z povodí je další důležitou součástí bilanční rovnice. Odtoky vody z povodí (respektive průtoky) jsou měřeny v otevřených měrných žlabech s obdélníkovým profilem. V nich se měří výška hladiny, ze které je poté dle měrných křivek vypočten objem odtoku. Měrná křivka vyjadřuje vztah mezi vodním stavem (výškou hladiny) a průtokem (množstvím protékající vody) v daném příčném profilu koryta. K měření výšky hladiny slouží plovákové kontinuální hladinoměry PSH-30, ultrazvukové sondy a ponorné tlakové hladinoměry. Provoz čidel a přístup k archivovaným datům je zajištěn prostřednictvím řídicích a registračních jednotek Fiedler M4016.

Pro vyhodnocení srážkoodtokových vztahů v jednotlivých letech je třeba naměřené hodnoty srážek a odtoků uvažovat v rámci hydrologického roku (viz definice v rámečku výše). Vzhledem k tomu, že množství vody odtékající z povodí je do značné míry ovlivňováno množstvím dopadajících srážek, vyznačuje se odtoková výška velkou meziroční variabilitou bez pozorovatelného trendu (obr. 5.7).



Obrázek 5.7:

Roční srážkové úhrny a výšky odtoku v povodí Červíku pro hydrologické roky 1954 – 2022

5.3 Závěr

Kapitola se zabývá analýzou časových řad odtokových a základních klimatických charakteristik dlouhodobě monitorovaných malých lesních povodí. Výsledky takovýchto analýz jsou vždy ovlivněny nejen délkou, ale také kvalitou naměřených dat.

V dlouhodobém hledisku můžeme u sledovaných povodí pozorovat nárůst průměrných ročních teplot, a to zejména od začátku 90. let minulého století, což koresponduje se situací na území České republiky.

Srážky vykazují vysokou meziroční variabilitu, nicméně z dlouhodobého hlediska nedochází ke statisticky významným změnám v jejich množství. Obdobně je tomu u množství vody odtékající z povodí.

Právě dlouhodobá pozorování a měření a jejich vyhodnocování nabývají na významu v kontextu probíhající klimatické změny. Analýzy trendů a významných změn v časových řadách hydrologických a meteorologických charakteristik poskytují důležité informace pro porozumění vlivu změny klimatu na srážkoodtokové vztahy v lokálním i globálním měřítku.

LITERATURA

ALEXANDERSSON, H., 1986: A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology* 6, 661–675.

CHANG M., 2013: *Forest hydrology: an introduction to water and forests*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, ISBN 978-1-4398-7994-8.

CHLEBEK, A., JAŘABÁČ, M., 1998: Vliv porostů lesních dřevin a jejich obnovy na vodní režim malých povodí (Červík, Malá Ráztoka, U vodárny). Závěrečná zpráva, VÚLHM Jíloviště – Strnady.

KENDALL, M. G., 1975: *Rank Correlation Methods*, Oxford Univ. Press, New York.

MANN, H. B., 1945: Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245–259.

PETTITT, A. N., 1979: A non-parametric approach to the change-point detection. *Appl Stat* 28(2):126–135.

6 Monitoring lesních mikropovodí

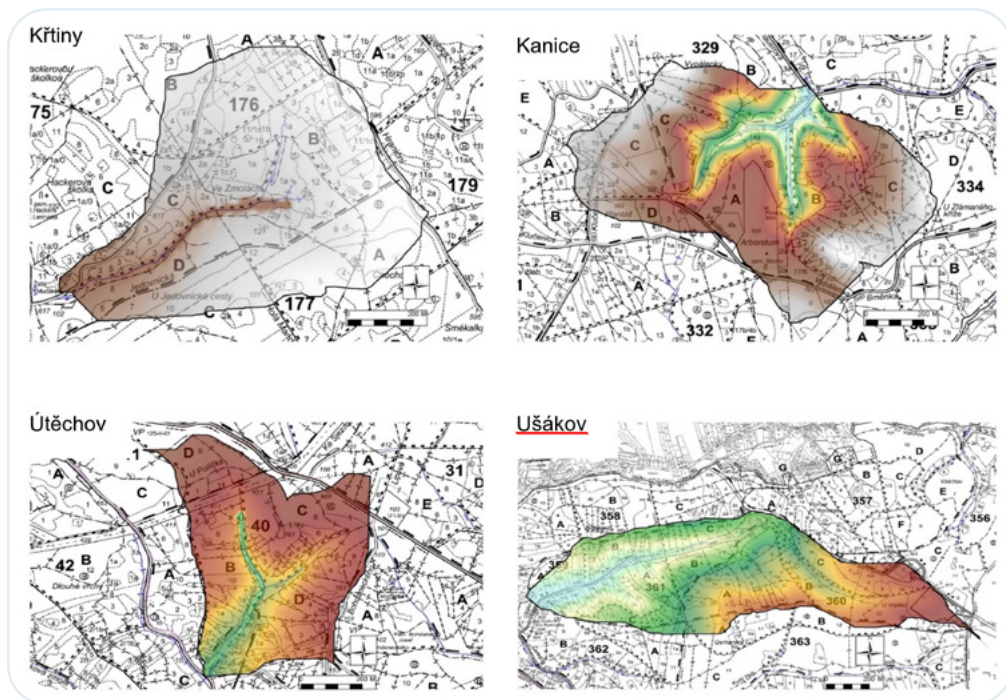
Petr Kupec, Jan Deutscher

Termín mikropovodí je odvozen od pojmu povodí. Pojem povodí definuje vodní zákon. (zákon č. 254/2001 sb.) jako území, ze kterého veškerý povrchový odtok odtéká sítí vodních toků a případně i jezer do moře v jediném vyústění, ústí nebo deltě vodního toku. Území České republiky náleží do tří mezinárodních oblastí povodí, a to do mezinárodní oblasti povodí Labe, mezinárodní oblasti povodí Odry a mezinárodní oblasti povodí Dunaje. Ostatní říční povodí, kterými jsou tato dílčí povodí tvořena, mohou být obecně označována jako malá, případně drobná povodí. Malým povodím se v hydrologii rozumí povodí o celkové výměře do 100 km².

Jiná definice se nabízí v případě drobných vodních toků. Stejný zákon uvádí, že dle právního systému ČR jsou vodní toky definovány jako povrchové vody tekoucí vlastním spádem v korytě trvale nebo po převažující část roku, a to včetně vod v nich uměle vzdutých. Pro potřeby judikatury a dle hydrografické situace ČR se vodní toky nadále dělí na tzv. významné vodní toky a drobné vodní toky. Seznam významných vodních toků stanoví Ministerstvo zemědělství ve spolupráci s Ministerstvem životního prostředí vyhláškou. Hydrografická síť ČR sestává z přibližně 75 000 km vodních toků. Hrádek a Sobota (1999) uvádějí, že významné toky tvoří cca 22 % celkové hydrografické sítě ČR. Ostatní vodní toky jsou označovány jako tzv. drobné vodní toky. Přestože tvoří většinu (78 %) hydrografické sítě ČR, jsou pro ně jen výjimečně k dispozici soustavná hydrologická pozorování.

Toto základní rozdělení na významné a drobné vodní toky, respektive dílčí a malá povodí, je z celorepublikové perspektivy dostačující a funkční. Pro vědecké účely, jako je například vyhodnocování hydrických funkcí a ekosystémových vstupů a výstupů, stejně tak i pro laické potřeby vlastníků pozemků či drobných hospodářů, je ovšem takovéto rozdělení příliš obecné. Pokud budeme vycházet z úvahy, že malá povodí jsou tvořena drobnými vodními toky, je možné využít podrobnější rozdělení drobných povodí podle velikosti dle Mácy, Nechvátala a kol. (2008), kteří dělí povodí na: mikropovodí (elementární odtokové plochy), velmi malá povodí (rozloha do 10 km²), středně malá povodí (rozloha do 80 km²) a malá povodí (rozloha nad 80 km²). Pokud uvážíme, že drobné vodní toky tvoří malá povodí, pak mikropovodí jsou odtokovými oblastmi „mikro“ drobných vodních toků. U těchto toků se předpokládá, že jejich průtok se po většinu roku pohybuje do 1 l.s⁻¹.

Obecně lze říci, že drobné vodní toky a jimi tvořená mikropovodí trpí nedostatkem soustavných přímých hydrologických pozorování. V technické (projekční) praxi se v současné době při získávání hydrologických údajů pro tato povodí vychází převážně z dat poskytovaných Českým hydrometeorologickým úřadem (ČHMÚ), čerpaných z časových řad klimatických a hydrologických dat měřených na tocích vyšších řádů. Tato data jsou pro pochopení procesů v mikropovodích



| Základní vlastnosti povodí | Křtiny | Kanice | Útěchov | Ušákov |
|-----------------------------------|--------|---|------------|--------|
| Plocha (ha) | 57 | 65 | 38 | 82 |
| Délka hlavního toku (m) | 940 | 640 | 660 | 1850 |
| Maximální nadmořská výška (m n m) | 563 | 371 | 325 | 439 |
| Minimální nadmořská výška (m n m) | 456 | 287 | 452 | 220 |
| Střední nadmořská výška (m n m) | 521 | 341 | 411 | 350 |
| Expozice | východ | sever | jihovýchod | východ |
| Průměrný sklon povodí (%) | 21 | 17 | 38 | 26 |
| Lesnatost (%) | 100 | 98 | 100 | 98 |
| Hlavní dřevina | SMRK | SMÍŠENÉ (BK29, DBZ20, BO19, HB17, MD15) | BUK | DUB |

Obrázek 6.1:

Příklad tvarů a charakteristik drobných lesních povodí instalovaných na ŠLP ML Křtiny
Použité zkratky dřevin u smíšeného povodí: BK – buk lesní, DBZ – dub zimní, BO – borovice lesní, HB – habr, MD – Modřín opadavý. Číslo za zkratkou uvádí přibližné zastoupení v procentech

nedostačující zejména mírou svého zobečnění. Mimo to mají drobné vodní toky v mikropovodích i další vlastnosti, které ztěžují jejich hospodářské využívání, ochranu a management, stejně jako odpovědný vědecký výzkum. Mezi tyto vlastnosti lze zařadit zejména jejich hydraulicky nedefinovatelná koryta, terénní nepřístupnost, územní odlehlost a nedostupnost. Přes uvedené skutečnosti jsou právě tyto vodoteče a jejich mikropovodí základními stavebními kameny větších hydrologických celků a celkový stav těchto mikropovodí se následně odráží v územích níže po proudu, kde ovlivňuje nejen celkovou jakost vodních zdrojů, ale zejména dostupnost a množství vody během roku či vyrovnanost průtoků.

6.1 Východiska monitoringu mikropovodí

Základem pochopení hydrologických vztahů v mikropovodí je znalost hodnot parametrů jeho hydrologické (vodní) bilance. Definicí hydrologické bilance nabízí opět zákon o vodách (zákon č. 254/2001 sb.), kde je uvedeno, že tzv. vodní bilance sestává z hydrologické bilance a vodohospodářské bilance. Hydrologická bilance porovnává přírůstky a úbytky vody a změny vodních zásob povodí, území nebo vodního útvaru za daný časový interval. Vodohospodářská bilance porovnává požadavky na odběry povrchové a podzemní vody a vypouštění odpadních vod s využitelnou kapacitou vodních zdrojů z hledisek množství a jakosti vody a jejich ekologického stavu. Hydrologická bilance byla blíže popsána v rámečku na str. 68 předchozí kapitoly.

Z pohledu drobného vodního toku, tedy z pohledu vody, která skutečně propadne listovím až k zemi a je přístupná pro rostliny a zároveň se stává součástí povrchového a podpovrchového odtoku, lze jako základní složky vodní bilance lesního mikropovodí uvést následující: srážky na povodí, průtok v závěrném profilu (odtok), množství podpovrchového odtoku v rhizosféře a evapotranspirace porostu.

6.2 Vlastní monitoring mikropovodí

V současné době je na úrovni mikropovodí možné efektivně měřit vzdušné srážky poloprofesionálními či profesionálními klimatickými či srážkoměrnými stanicemi. V kombinaci s dlouhodobými klimatickými údaji poskytovanými např. ČHMÚ či z volně dostupných gridových sítí (např. EOBS) lze množství srážek v mikropovodí stanovit s relativně vysokou přesností.

Pro stanovování průtoků drobných vodních toků je v současnosti využívána řada relativně nepřesných metod: – hydrometrování, čili měření rychlosti hydraulickými vrtulemi nebo plováky a následný přepočít na objemový průtok (vyžaduje delší přímou trať a dokonalou znalost profilu koryta); – vodočty a limnigrafy (vyžaduje dokonalou znalost profilu koryta a jeho stabilizaci formou vodní stavby). Další možností, jak získat data o průtocích drobných vodních toků, je hydrologické modelování, které v rámci ČR zažívá v současnosti významný vzestup. Byla vyvinuta celá řada modelů, z nichž pro drobná povodí lze s úspěchem využít např. DesQ–MaxQ model či HEC–HMS model či modely flexibilní typu PERSiST (Futter a kol, 2015). Nicméně nejčastěji se pro stanovování odtoků z mikropovodí využívá hydrologické měření výšek hladin nad hydrau-



Obrázek 6.2:

Poloprofesionální klimatická stanička firmy AMET Velké Bílovice, osazená anemometrem, srážkoměrem, čidly pro stanovení solární radiace, teploty a vlhkosti vzduchu a půdními teploměry. Stanice je plně automatizovaná, s možností dálkového přístupu k datům, napájená vnitřní baterií a integrovaným solárním panelem

licky definovanými přepady. Využitelné jsou přepady různých tvarů, v praxi se nejvíce využívají přepady trojúhelníkové (Thomsonův přepad) či lichoběžníkové (Cippolettiho přepad), případně jejich kombinace na jednom přepadovém objektu. Pomocí odvozených hydraulických vztahů lze relativně jednoduše přepočítávat hodnotu výšky hladiny nad přepadem na hodnotu průtok v masce přepadu (případně tento vztah graficky vyjádřit pomocí tzv. konšumpční křivky a tuto pak využívat pro odečty hodnot průtoků podle aktuálně měřených výšek hladin). Z hodnot aktuálních průtoků pak lze stanovovat další charakteristiky typu celkových odtokových množství, odtoku jako takového atp. Současné technické možnosti umožňují tento způsob měření výšek hladin realizovat kontinuální automatizovanou formou. To znamená, že k vlastnímu měření se využívá automatických čidel na principu měření tlaku vody nad čidlem (submerzní tlaková čidla) nebo na principu stanovení odezvy mezi čidlem vyslaným a následně přijatým impulsem ultrazvukové vlny po jejím odrazu od vodní hladiny (ultrazvuková čidla). Tato čidla umožňují intenzitu měření a zápisu měřených hodnot v podstatě podle potřeb měřitele, většinou mají integrovaný datalogger či jsou spojeny s externím dataloggerem, který slouží současně jako řídicí jednotka měřící aparatury. Zároveň jsou tyto řídicí jednotky schopné odesílat prostřednictvím GSM sítě (či jiných technologií bezdrátového přenosu dat) měřená data ke zpracování či prezentaci do dalších externích zařízení. Měřicími aparaturami popsaného typu se osazují měřící stanice výšek hladin, instalované většinou v závěrných profilech drobných (lesních) toků.



Obrázek 6.3:

Maska Thomsonova přepadu o úhlu přelivné hrany 90°, nainstalovaná na drobném lesním toku, a příklady konstrukce hladinoměrných sensorů (Fiedler a Mágr) – vpravo ultrazvukový senzor, vlevo ponorný tlakový senzor

Komplikovanější situace nastává v případě stanovování mělkého průtoku podpovrchového. Obecně je v praxi tento problém řešen prostřednictvím posuzování změny vlhkosti půd v obráceném svahovém gradientu. Základem mohou být například gridová měření vlhkostních charakteristik půd v úzké časové jednotce, případně modelování. I v této oblasti je možné využít přístroje pro analýzu hydraulické vodivosti půdy, jako jsou permeametry, případně přístroje zaměřené na měření elektrických vlastností vody v prostředí (vodivost, odpor), nebo podobně jako například Haria a Shand (2004) využít pro monitorování pohybu podpovrchové vody tlakové snímače PTT (Pressure Transducer Tensiometer).

Hodnoty průměrné evapotranspirace běžně se vyskytujících typů porostů (druhovú skladby) jsou v literatuře dostupné. Pro potřeby podrobné analýzy mikropovodí však mohou být tyto hodnoty zavádějící. Přímé měření transpirace na úrovni jednotlivých rostlinných jedinců je možno provádět některou z metod uvedených v kapitole 4.2 a po přepočtu vztáhnout data na celý porost či mikropovodí.



Obrázek 6.4:
Kompletně osazená hladinoměrná stanice na drobném lesním toku, ŠLP ML Křtiny

6.3 Časové a prostorové rámce využití monitoringu mikropovodí

Z hlediska časového se nabízejí v problematice hydrologických měření na mikropovodích dva základní rámce:

1. Hydrologický rok (1.11. – 31.10. následujícího roku – viz rámeček v kapitole 5)
2. Kalendářní rok.

Ačkoliv kontext hydrologických měření v České republice směřuje spíše k využívání hydrologického roku jako základního rámce šetření parametrů vodní bilance, v poslední době se zdá jako výhodnější volit kalendářní rok. Důvodem je jednak postupné pozbývání smyslu definice hydrologického roku. Přinejmenším v nižších a středních polohách se v důsledku změny klimatu mění původní předpoklad, že sníh, který napadne v zimních měsících předchozího roku, roztaje, odtече, a tedy musí být i bilancován až v roce následujícím. Dále zde hraje roli fakt, že většina srovnatelné světové literatury pracuje s rokem kalendářním.

Dalšími jednoduchými časovými rámci hydrologického monitoringu na lesních mikropovodích je rozdělení výsledků měření pro vegetační a mimovegetační období. Těchto časových fází se využívá zejména pro porovnání různých vlastností jednoho povodí ve zmíněných obdobích.

Posledním široce používaným rámcem interpretace výsledků hydrologických měření na mikropovodí jsou různé specifické hydrologické situace, většinou kumulované do jedné typické situace v jistém čase a prostoru. Můžeme takto kumulovat například suché periody za období v jistou průměrnou periodu, periody srážkové s různou parametrizací srážek, periody hydrologických extrémů s různou parametrizací extrémů (srážkový, průtokový, odtokový) atp.

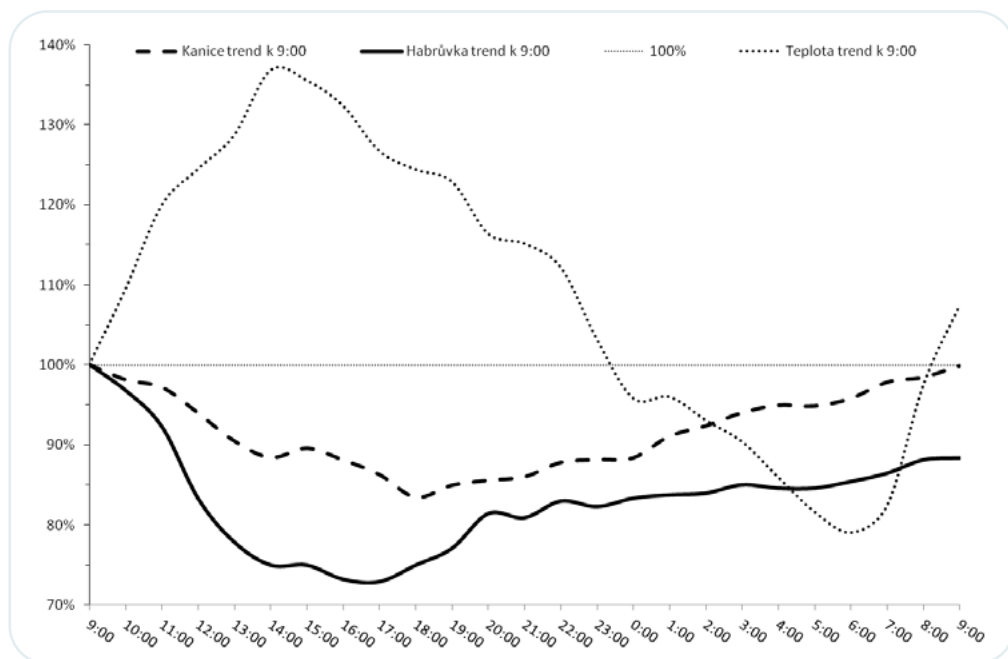
Je zřejmé, že uvedené časové rámce lze využívat pro interpretaci výsledků hydrologických šetření na lesních mikropovodích při popisech každého jednoho z nich anebo v souvislostech delších časových úseků. Tímto způsobem je možné popsat trendy dlouhodobého vývoje měřených parametrů i trendy vývoje hydrologie mikropovodí jako takových.

Pokud se týká prostorových rámců šetření hydrologických parametrů mikropovodí, pak i zde je možné za zásadní považovat dva:

1. Popis změny hydrologických vlastností v povodí v souvislosti s jakýmkoliv změnami v mikropovodí – v lesních mikropovodích nejčastěji v souvislosti s plošnými hospodářskými zásahy v lesích.
2. Srovnání hydrologických vlastností několika mikropovodí s obdobnými vlastnostmi definovanými jako nezávislé proměnné a rozdílnou vlastností definovanou jako vlastnost závislou – typicky např. porovnání hydrologických vlastností pahorkatinných mikropovodí s rozdílnou dřevinnou skladbou (viz obr. 6.5, 6.6).

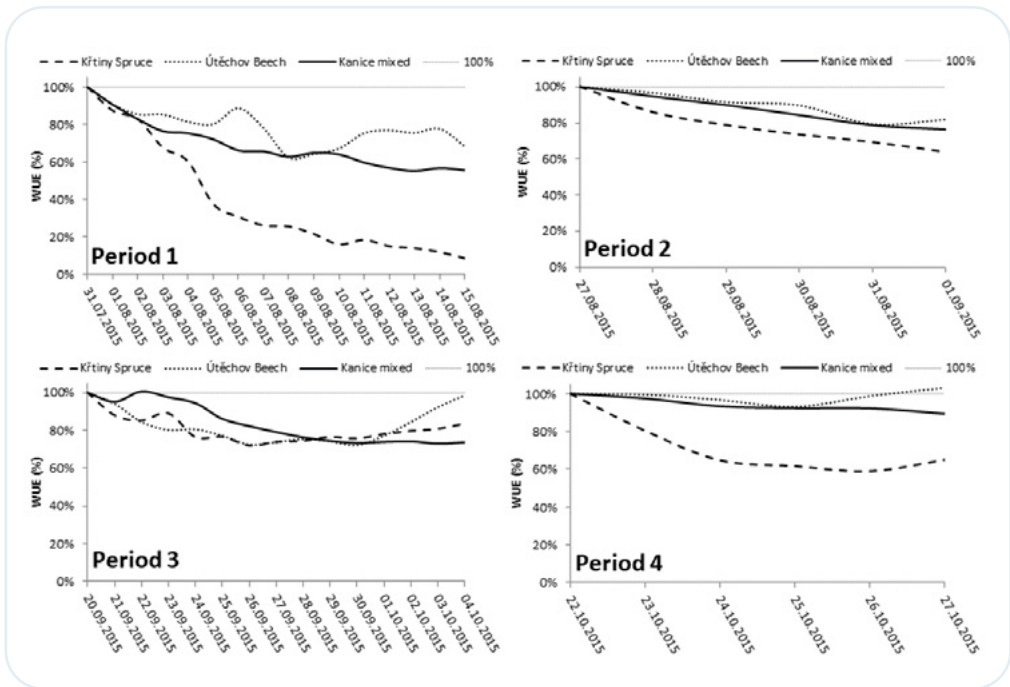
Prostorové rámce – možnost interpretace hydrologických charakteristik mikropovodí v souvislosti s jejich prostorovou charakteristikou v kombinaci s rámci časovými, jsou nejdůležitější cha-

rakteristikou hydrologie mikropovodí. Vzhledem k malým rozlohám mikropovodí je poměrně snadné definovat vztahy v mikropovodí a pozorovat, že veškeré změny charakteristik mikropovodí v definičním čase se velmi rychle projeví na změně charakteristik hydrologického oběhu v povodí. Navíc vzhledem k poměrně jasně definovaným vztahům lze poměrně přesně vymezit kauzalitu mezi změnou charakteristiky povodí a změnou parametru hydrologického oběhu. Tím je monitoring mikropovodí v hydrologii unikátní a pro komplexní poznání hydrologických jevů a jejich příčin a následků v podstatě nepostradatelný.



Obrázek 6.5:

Příklad srovnání průtoků (odtokových množství) ze zalesněného (Kanice) a bezlesého (Habrůvka) mikropovodí v suchých periodách vegetačního období roku 2011. Obrázek ukazuje průběh relativních hodnot teploty a průtoků v hodinových intervalech v průměru všech bezesrážkových period delších než 5 dnů vztažených ke 100% hladině průtoků v lesních recipientech, kdy se teoreticky průtok začíná snižovat vlivem transpirace lesních porostů, případně se navrácí k původním hodnotám po přerušení transpirace v nočních hodinách. Z obrázku je patrné, že pokles hodnoty průtoků (odtokových množství) je v průběhu dne výrazně výraznější v případě bezlesého mikropovodí a nejvyšší hodnota tohoto poklesu nastává dříve. Dále je evidentní, že v lesní mikropovodí se v ranních hodinách vrací k původním hodnotám průtoků, bezlesé povodí v suchých periodách vodu ztrácí. Deutscher a Kupec, 2014



Obrázek 6.6:

Příklad porovnání vodohospodářské účinnosti (WUE – Water Use Efficiency) tří lesních mikropovodí s různou dřevinnou skladbou (Křtiny – smrkové mikropovodí, Útěchov – bukové mikropovodí a Kanice – smíšené mikropovodí) ve čtyřech suchých periodách roku 2015. První dvě periody jsou situovány do vegetačního období, první je dlouhá, druhá krátká, druhé dvě jsou na konci vegetačního období, respektive v přechodu do doby mimovegetační, první opět dlouhá, druhá krátká. Grafy ukazují relativní trendy schopnosti zadržení vody v těchto periodách na jednotlivých povodích vztahené k průměrné roční hodnotě (100 %) (zdroj: Kupec a kol., 2018)

LITERATURA

ČERMÁK J., KUČERA J., 1990: Scaling up transpiration data between trees, stands and watersheds. *Silva Carelica*, 15: 101-120.

DEUTSCHER, J., KUPEC, P., 2014: Monitoring and validating the temporal dynamics of interday streamflow from two upland head micro-watersheds with different vegetative conditions during dry periods of the growing season in the Bohemian Massif, Czech Republic. *Environmental Monitoring and Assessment*. sv. 187, č. 360,

FUTTER, M.N.; WHITEHEAD, P.G.; SARKAR, S.; RODDA, H.; CROSSMAN, J., 2015: Rainfall runoff modelling of the Upper Ganga and Brahmaputra basins using PERSiST. *Env. Science: Processes & Impacts* 2015, 17(6), 1070-1081.

HARIA, A. H., SHAND, P., 2004: Evidence for deep sub-surface flow routing in forested upland Wales: implications for contaminant transport and stream flow generation. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(3). s. 334 - 344.

HRÁDEK, F., SOBOTA, J., 1999: Prognózy maximálních průtoků v nepozorovaných profilech povodí drobných vodních toků. In *Workshop Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Praha, ČVUT, ČVHS, 25. 10. 1999, s. 82-85. ISBN 80-01-02072-X.

KUPEC, P., ŠKOLOUD, L., DEUTSCHER, J., 2018: Tree species composition influences differences in water use efficiency of upland forested microwatersheds. *European Journal of Forest Research* (2018), 137: 477–487.

MÁČA, P.; NECHVÁTAL, M., 2008: Monitoring a vyhodnocení extrémních odtokových poměrů v povodích drobných vodních toků z hlediska prevence a zmírňování povodňových škod. Závěrečná zpráva grantového projektu NAZV 1G46040. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 32 s.

Vyhláška Mze 470/2002 sb., kterou se stanoví seznam významných vodních toků a způsob provádění činností souvisejících se správou vodních toků. *Sbírka zákonů* 2002, částka 171(2001), s. 9898.

7 Lesnické meliorace, zadržování vody v lesích

Petr Kupec, Václav Tlapák

Lesnické (lesotechnické) meliorace (LM) jsou souborem biologických, biotechnických a technických opatření, kterými se zlepšují odtokové poměry malých povodí, chrání půda před erozí, zahrazují bystřiny, upravuje vodní režim lesních půd a zlepšují mikroklimatické podmínky v krajině. Lesnické meliorace zlepšují krajinné prostředí, odstraňují nebo redukují činitele, které působí škody a narušují rovnováhu přírody. Zabývají se především řešením otázky oběhu vody; odstraňují důsledky nadměrného i nedostatečného množství vody, a to jak v půdě, tak i na povrchu. Patří sem odvedení nadměrného množství vody z půdy a zlepšení fyzikálních vlastností půdy odvodněním, přivedení vody závlahou, právě tak jako snížení ztrát vody z půdy neúčinným výparem a v posledním období zejména zadržování vody v lesích. Lesnické meliorace jsou vázány na lesní krajiny, nicméně jejich principy se uplatňují i v krajinách nelesních.

Významnou složkou LM je hrazení bystřin a strží (HB), které je z celého komplexu lesotechnických meliorací nejnáročnější, při provedení vyžaduje největší odpovědnost a po stránce investiční je nejdražší. S tím těsně souvisí úprava povodí, která je prvním předpokladem k vyřešení odtokových poměrů bystřin a je zárukou účinnosti provedených investic, staveb na vodním toku. Je zřejmé, že hrazení bystřin a strží je svým posláním mimo jiné rovněž prostředkem zadržování vody v lesích. Nejlevnější, nejtrvanlivější a bez větších nákladů na udržování jsou biologické zásahy LM, kterými lze zvýšit hydrologickou účinnost povodí, tedy posílit retenční funkci povodí, retardaci vody v povodí, stejně jako její akumulaci, a tím snížit velikost odtoků za náhlých přívalů a zajistit jejich kvantitativní vyrovnanost v čase. Tuto funkci plní primárně les sám prostřednictvím svého aktivního vlivu na hydrologický oběh.

Všeobecně lze říci, že LM a HB mají tak dlouhou minulost jako sama kultivace půdy. Jen co začal člověk kultivovat půdu a pěstovat plodiny, zjistil, že úprava půdního prostředí má příznivý vliv na jejich růst. Na zemědělských a lesních pozemcích tak historicky vznikaly závlahové a odvodňovací soustavy, ochranné hráze proti povodním, zemní a kamenné terasy na ochranu půdy, objekty k zadržování dlouhodobě využitelné vody a další a další typy opatření vědomě ovlivňující koloběh vody v krajině ve prospěch člověka a jeho aktivit.

7.1 Historie

Nároky, které se kladou na LM a HB, ale i na ostatní lesnicko–meliorační úpravy, při kterých kromě zvyšování produkční schopnosti lesů jde i o zlepšení životního prostředí a ochranu přírody, jsou velmi vysoké. LM se historicky uplatňovaly rovněž v oblasti asanace a rekultivace průmyslem znehodnocených ploch. Podle toho, jaký je předmět řešení LM a HB, lze rozlišit tři základní směry oboru.

První směr vznikl v alpských oblastech, kde odlesňování a poškozování lesů těžbou a pastvou způsobovalo urychlování povrchového odtoku, erozi půdy a devastaci vodních toků a bystřin. Eroze a záplavy zničily celé oblasti, proto se některé z nich začaly vylidňovat. Na začátku, asi od 13. století, se lidé proti povodním a erozi chránili jen v dolních úsecích toků, a to zpevňováním břehů, stavěním hrází a záchytných přehrázek. Později přišli na to, že ochranu proti erozi a povodním, stejně jako ochranu vodních zdrojů lze úspěšně realizovat jen úpravami vodních poměrů a protierozní ochranou v celém povodí. Protože šlo o horské oblasti, LM se soustředily zejména na hrazení bystřin a úpravy dílčích povodí bystřin (tzv. lesomeliorační perimetr). Ve vrcholném období LM (konec 19. a první polovina 20. století) a v alpských oblastech v podstatě až dodnes je tento obor považován za hospodářsky i společensky velmi důležitou a všeobecně vysoce prestižní činnost.

Druhý směr lesnických meliorací vznikl v oblastech středohor a na rovinách, kde se nacházejí převážně hospodářské lesy a zájmy lesnictví se zaměřují na zvyšování jejich produkce. Potřeba LM se zvýšila zejména po zavedení smrkových a borových hospodářských systémů, a to hlavně tehdy, když se pěstovaly na minerálně chudých a zamokřených půdách. V těchto případech byly dosaženy kladné výsledky zejména odvodňováním, hnojením a záruďováním degradovaných půd.

Třetí směr v LM vznikl v rovinatých stepních a lesostepních oblastech, využívaných převážně pro pěstování zemědělských kultur. V těchto oblastech šlo o zvyšování výnosů pěstovaných rostlin a o ochranu i tvorbu přírodního prostředí na územích s nižší lesnatostí, stejně jako o ochranu polních kultur prostřednictvím dřevinné vegetace, např. prostřednictvím větrolamů, různých typů biotechnických opatření proti vodní erozi a podobně.

Na území bývalého Československa se první práce zaměřené na ochranu přírodního prostředí lesem, tedy první LM v zemědělském území, uskutečnily v 17. století, když se poprvé úspěšně zalesnily váté písky Záhorské nížiny (1648–1652). Za první zákonné opatření v této oblasti lze pokládat pokrokový, tzv. tereziánský lesní zákon z roku 1770. Významným mezníkem je i ochranné zalesňování bzeneckých písků a zalesňovací práce provedené na základě lesního zákona č. 250 z r. 1852. Soustavné protierozní zalesňování započalo až r. 1885, když se již prováděly přípravy i na soustavné hrazení bystřin. Ochranné lesní pásy se začaly zakládat v letech 1948–1950 a plán na komplexní využití lesa při zveřejňování krajiny byl vypracován roku 1953. Poměrně rozsáhlé práce se uskutečnily v rámci vodohospodářského zalesňování, které bylo zaměřeno především na vodohospodářské zvýšení účinnosti lesů a účinnosti vodních děl, respektive na lepší využití vodních zdrojů.

Hrazení bystřin v kontextu úpravy lesomelioračního perimetru bylo jako svébytná disciplína LM do českých zemí fakticky přeneseno na přelomu 19. a 20. století, kdy byly zřízeny expozitury lesotechnického oddělení hrazení bystřin v Praze (1890) a v Brně (1909). Po první světové válce bylo zřízeno vlastní oddělení hrazení bystřin při ministerstvu zemědělství ČSR s expoziturami v Praze, Brně a Opavě, výkonnou službu HB pak obstarávaly státní stavební správy HB u zemědělských oddělení okresních úřadů. V době druhé světové války se služba HB omezila fakticky pouze na biologické práce (meliorační zalesňování). Od padesátých let pak byly LM i HB gesčně definitivně přesunuty pod Státní správu lesů, kam spadá jejich problematika v podstatě do současnosti. Obsah LM a HB od 50. let je pak reflexí společenských požadavků na obor stejně jako politického prostředí, v němž tyto společenské požadavky vznikaly. Je tak možné sledovat vývoj od technického pojetí a velkorysých projektů LM a HB z 50. let přes ztrátu možnosti ovlivňování hospodaření v lesních povodích v 70. letech (v podstatě omezení možnosti realizace opatření pouze na koryta vodních toků), stavebně–investiční boom v 80. letech, restrukturalizaci lesního hospodářství v ČR v důsledku společenských změn po roce 1989 až po současnou renesanci oboru.

Zmíněná renesance oboru souvisí dominantně s významně rostoucí společenskou poptávkou po tzv. ostatních funkcích lesa, především funkci hydricko-vodohospodářské. Tu aktuálně vymezuje probíhající klimatická změna a její dopady na lesní, ale i nelesní krajinu. Lze říci, že obecně formulované principy oboru z druhé poloviny 19. a první poloviny 20. století dnes nacházejí opětovně uplatnění při realizaci opatření orientovaných proti suchu či akutním povodním. Holistické přístupy k hospodaření v krajině, stejně jako akceptace časového kontextu vedou k návratu k biotechnickému řešení celého povodí v souvislostech vodní bilance a vývoje jejich parametrů v delších časových obdobích (historicky i v modelech budoucích trendů).

7.2 Vlastní lesnické meliorace a hrazení bystřin

Účelem lesnických meliorací a hrazení bystřin je v užším slova smyslu odstranit nebo snížit škodlivou činnost bystřin, projevující se za velkých přívalů, zlepšit hydrologické vlastnosti povodí a zadržet vodu v lesích – zejména v krajině horních částí vodních toků. Za bystřinu je možné považovat přirozený vodní tok s malým povodím, s náhlými a výraznými změnami průtoku, se strmými průtokovými vlnami, které prohlubují dno, podemílají svahová úpatí a tvoří nátrže; přemísťují značně a nepravidelně splaveniny, které dočasně ukládají ve štěrkových lavicích a nánosech na bystřinném dně, na zaplavovaném území, nebo je odnášejí do vodních toků vyšších řádů a vodních nádrží (Zlatuška a kol. 2019).

Úkolem takto vymezených lesnických meliorací a hrazení bystřin je soubor opatření, která mají zamezit vzniku a dopravě splavenin, zajistit bezpečný průtok vody a zadržet adekvátní množství vody v lesích. K tomu vede následující posloupnost činností:

1. návrh opatření v povodí ke zvýšení hydrologické účinnosti povodí, případně k asanaci sběrného území;

2. návrh trasy toku bystřiny;
3. stanovení výše odtoku a dimenzování průtočného profilu;
4. ustalovací práce a návrh podélného sklonu;
5. návrh břehových opevnění a břehových porostů.

Opatření v povodí

Smyslem opatření v povodí je aplikace především biologických (lesnických) postupů vedoucích k posílení hydrologické účinnosti povodí. V zásadě se jedná o formulaci vhodné dřevinné skladby, struktury a textury lesa a návrh postupů pěstování lesa, které zajistí trvalé plnění požadovaných parametrů hydrologické účinnosti povodí. V současné době je možnost realizace opatření v celém povodí velmi omezená či spíše teoretická a opatření se, pokud je to vůbec možné, realizují v dílčí části povodí (v podstatě v lesomelioračním perimetru). Je výhodou, pokud se tyto dílčí části povodí shodují s tzv. hydromelioračním okrskem (dle lesnické typologie vymezené části lesa se specifickým vodním režimem charakteristickým přebytkem vody), protože lesnická opatření v těchto dílčích okrscích jsou explicitně formulována s cílem modulace hydrologického oběhu. Specifickou oblastí návrhu opatření v povodích jsou povodí jakýmkoliv způsobem devastovaná (většinou erozí půd), kde je primárním úkolem jejich sanace, která brání působení devastujícího (erozního) činitele. V těchto povodích většinou nestačí pouze biologická opatření a je nezbytné kombinovat je s opatřeními technickými.

Je zřejmé, že opatření v povodí musí reflektovat základní parametry hydrologické bilance. Kvalitně provedená opatření v povodí pak výrazně snižují nároky na technická opatření v korytě toku.

Návrh trasy toku bystřiny

Vlastnímu návrhu trasy toku bystřiny (směrovému vedení trasy a úpravy sklonu) musí předcházet komplexní rekognoskace terénu. Jejím smyslem je zejména:

- a) Šetření splavenin (materiálu, který je bystřinou unášen a následně ukládán) – řeší se zejména zdroj splavenin, jejich pohyb a rozmístění v rámci celého toku a jeho úseků, identifikace míst, kde se splaveniny ukládají a kde se dostávají znovu do pohybu, stejně jako jejich třídění v rámci celého toku (ve smyslu zrnitostního složení). Za tímto účelem se standardně odebírají vzorky splavenin z plochy 1 m² k posouzení zrnitostního složení splavenin. Vzorky se odebírají v úsecích s měnícím se sklonem a šířkou koryta – v průměru na každých 200–500 m.
- b) Posouzení možností, jak zlepšit směrové poměry toku – šetří se obecně velikosti poloměrů, délka a střídání oblouků, potenciální místa a úseky vyžadující nové směrové uspořádání, úseky toku, které jsou zachovalé a nevykazují ani ukládání ani prohlubování koryta, místa (úseky toku), kterým je třeba se při návrhu vyhnout, místa, kde obvykle za přívalů voda vystupuje z břehů, terénní deprese v okolí toku, které je možné využít pro řízenou inudaci, místa, která jsou vhodná pro křížování s komunikací atp.
- c) Posouzení možností úprav podélného sklonu – tato část rekognoskace terénu je zaměřena na vyznačení míst, kde dochází v průběhu k náhlému poklesu sklonu či kde je dno koryta zpevněno skálou, na zajištění míst, která jsou mimo koryto níže položená než dno koryta, vytipování míst, kam dosahují záplavy za přívalů či míst, kde tok ohrožuje svahy atp.

Místa (úseky) toku, které nevykazují žádné prohlubování dna ani ukládání splavenin, neobjevují se na nich břehové nátrže (podélné podemílání břehů s následným utržením horní části břehu), ani nevystupuje voda z břehů, zůstanou zachovány a nebudou zahrnuty do zahrazovacích návrhů. Na těchto místech se zjistí poloměr oblouků, velikost sklonů a průtočný profil. Tyto údaje jsou východiskem pro návrh úpravy.

Zjednodušeně má rekognoskace terénu popsat:

- sběrnou oblast bystřiny či lesomelioračního perimetru, kde se soustřeďuje povrchová voda z přivalových srážek a erozní činností se uvolňují splaveniny;
- oblast transportní, ve které jsou splaveniny unášeny;
- oblast sedimentační, kde se erodované hmoty ukládají.

Stanovení výše odtoku a dimenzování průtočného profilu

K dimenzování koryta a stanovení výše odtoku se využívá známých hydrotechnických výpočtů. Základem výpočtů je rovnice kontinuity – Chézyho rovnice popisující rychlost proudění v otevřených korytech. Pro stanovení výše disponibilní vody v povodích může pomoci výpočet hodnot prvků vodní bilance. Pro vlastní dimenzování úprav je rozhodujícím parametrem tzv. návrhový průtok. Tím se rozumí kulminační odtok vody z povodí za povodně, jejíž statistická četnost výskytu odpovídá zvolenému stupni ochrany podle N-letého průtoku (viz rámeček v kapitole 1 na str. 8). Při dimenzování na N-letou velkou vodu se předpokládá, že území, popřípadě koryto nebo objekt, budou ochráněny v časovém úseku N let, a bude zajištěno bezpečné provedení tohoto průtoku úpravou. Problematikou návrhových průtoků se zabývají na projekční straně příslušné oborové předpisy, na straně definiční pak ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav). Základním vstupem dimenzování průtočného profilu je návrh tvaru, rozměru a drsnosti stěn koryta stanovený pomocí výše popsaných vztahů na základě návrhového průtoku N-leté vody. Tvar průřezu průtočného profilu by měl být co nejvíce podobný přirozenému tvaru toku.

Ustalovací konsolidační práce a úprava podélného sklonu

Smyslem úpravy podélného sklonu dna je především zabránit vzniku a transportu splavenin. Úpravy podélného sklonu dna jeho snížením lze v zásadě efektivně dosáhnout pouze instalací příčných objektů v korytě toku (bystřiny). Ta se obecně realizuje:

1. v horní trati bystřiny pomocí přehrážek (objekty instalované kolmo na osu toku, jejichž přelivná hrana je výše než dno nad objektem);
2. ve střední a dolní trati bystřiny pomocí stupňů (objekty instalované kolmo na osu toku, jejichž přelivná hrana je ve dně nad objektem).

Hrubé splaveniny – valouny velkých rozměrů je možné v horní trati bystřiny buď zachytit v retenční přehrážce, nebo je ponechat v korytě s tím, že se zřídí přehrážky, za nimiž se vytvoří mírnější sklon, při kterém se splaveniny určité velikosti nezačnou pohybovat.

V druhé části toku v tratích, kde je menší sklon, ale stále nebezpečí prohlubování dna, a kde je patrný transport menších splavenin, se upravuje podélný sklon koryta většinou odstupňováním,

tj. zřízením stupňů a vytvořením tzv. vyrovnaného kompenzačního sklonu (tj. takového sklonu dna koryta, který zaručuje, že průměrný vzorek splavenin nebude ze dna odebírán a transportován).

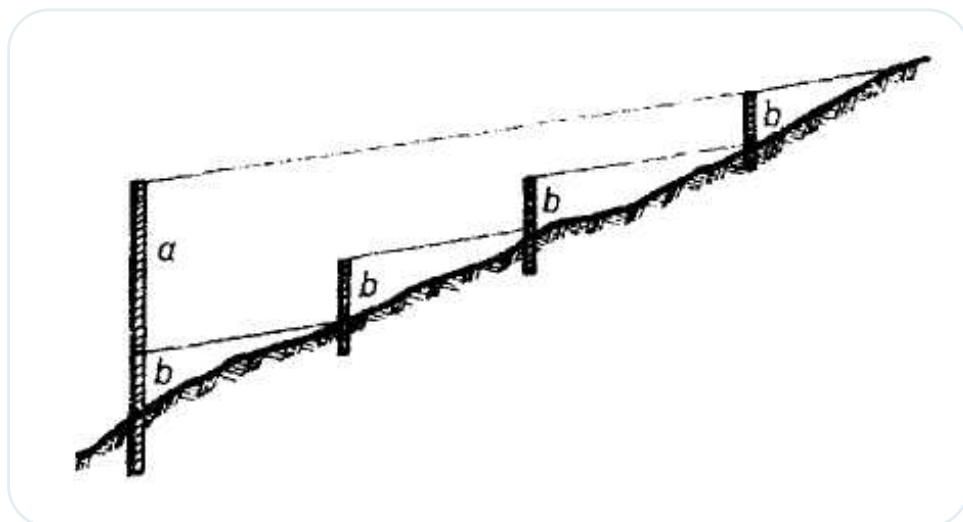
V dolní části bystřinného toku, pokud je ještě nebezpečí prohlubování koryta, se zřizují rovněž stupně, i když nižší, a na větší vzdálenost s kompenzačním mezisklonem.

Přehrážky

Přehrážky jsou příčné objekty instalované kolmo na osu toku, jejichž přelivná hrana je výše než dno nad objektem. Rozeznáváme dva základní typy přehrážek s různým funkčním posláním:

1. **přehrážky konsolidační** – instalované s cílem ustálit koryto na určitou délku, zabránit výmolné činnosti, vázat splaveniny, zajistit svahy úbočí a bočních suťových kuželů před podmíláním;
2. **přehrážky retenční (lapače štěrku), přehrážky s výpustí, přehrážky průcezné** – instalované s cílem zachytit splaveniny v horní trati toku, zabránit jejich dopravě do spodní trati a ochránit trať před zašterkováním; ve zvláštních případech zachytit přívaly, snížit povodňovou vlnu a propouštět jen určité množství vody.

Konsolidační přehrážky se mohou zřizovat buď ojedinele, nebo v sérii za sebou podle své důležitosti.



Obrázek 7.1:
Konsolidační funkce: a) jedné vysoké přehrážky; b) několika nižších přehrážek

Lapače štěrku jsou přehrážky zřizované v korytech bystřin a strží na vhodném místě tak, aby byl za nimi velký nádržný prostor pro zachycení a udržení co největšího množství splavenin. Předpokládá se, že jejich retenční prostor bude pravidelně čištěn a obnovován pro kontinuální zajištění retenční funkce. Retenční přehrážky s výpustí mají v zásadě dvojí poslání: 1) zabránit zvýšenému průtoku vody v korytě, tedy snížit povodňovou vlnu a 2) zachytit splaveniny, které jsou větších rozměrů, než je přípustné. Konstrukčně jsou typické průtočnými otvory v těle přehrážky, které zaručují provedení vypočteného průtoku, na něž je dimenzováno i koryto pod přehrážkou. Průčzné přehrážky jsou přehrážky s menšími otvory, kterými může voda prostupovat, cedit se, přičemž se na návodní straně ukládají větší splaveniny. Postupem doby se ukládá i jemnější materiál (písek) ve vlastním tělese objektu, takže průčznost pozvolna klesá, až dojde k úplnému utěsnění objektu. Ten se pak mění se v zásadě na přehrážku konsolidační či lapač štěrku, pokud disponuje dodatečným retenčním prostorem.

Jak z popisu funkcí přehrážek vyplývá, při jejich instalaci zejména do strží a v menší míře i do toků, mají rovněž významnou schopnost zadržovat vodu v krajině. Jako stavební materiál přehrážek se používá kámen, beton, prefabrikáty, drátokamenné konstrukce (gabiony), volně uložené balvany a kameny, celé neopracované kmeny a klest. Přehrážky zřízené z uvedeného materiálu jsou také pojmenovány podle použitého materiálu, např. kamenná přehrážka, betonová přehrážka atp. Renesanci v současné době zažívají srubové konstrukce přehrážek, které jsou kombinací dřevěných trámových či kuláčových rámu a kamenných výplní.

Stupně

Stupně jsou příčné objekty nižší než přehrážky, které se zřizují pouze pro úpravu podélného sklonu toku k vytvoření kompenzačního sklonu. Od přehrážek se liší zásadně tím, že jejich přelivná hrana je umístěna ve dně nad objektem, a tím nad nimi nevzniká nádržný prostor. Jejich konstrukce bývá složitější než v případě přehrážek, protože obsahují více hydraulicky a stavebně svébytných prvků.

Základní dělení stupňů vyplývá z toho, jakým způsobem je tlumena energie vody přepadající přes přelivnou hranu stupně:

1. *Stupně s přepadem (přepadové)* – vodní paprsek přepadá přes přelivnou hranu volně a tlumení jeho energie je realizováno prostřednictvím speciální konstrukce spadiště;
2. *Stupně se skluzem (skluzové)* – voda přes přelivnou hranu přetéká a její energie je tlumena prostřednictvím drsnosti povrchu a délky skluzového svahu.

Přepadové stupně jsou obvykle konstrukčně členěny do tří částí:

1. těleso stupně;
2. vývar (vývařiště);
3. vzpěrný práh.

Těleso stupně v podstatě představuje přelivný objekt stupně. Vzdušná strana tělesa bývá ve sklonu 5 : 1 nebo větším – 4 : 1. Návodní strana tělesa bývá svislá. Těleso je zavázáno v příčném

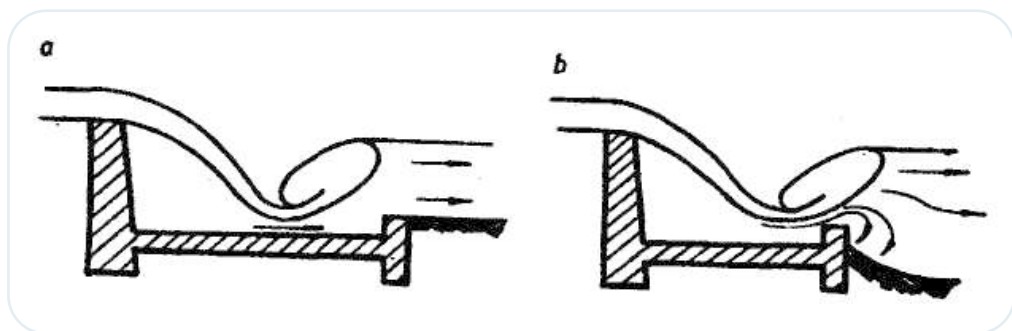
směru do svahu křídly, jejichž horní hrana, vodorovná nebo ve sklonu 1 : 15 až 1 : 20, navazuje na odtokovou sekci. Pokud se týká výšky tělesa stupně, respektive jeho přelivné hrany, ta začíná na 0,3 m. Je žádoucí, aby byla výška jednotlivých stupňů co nejmenší kvůli zajištění průchodnosti toků pro vodní organismy.

Vývařiště je speciální konstrukce spadiště (zpevněné dno pod objektem, kam dopadá paprsek vody přepadající přes objekt). Pokud je toto místo konstrukčně nezpevněné, nazývá se dopaďišť. Při dopadu paprsku na nezpevněné dno pod tělesem objektu vzniká výmol, jehož hloubka a šířka je závislá na výšce stupně, na výšce vodního sloupce, na koruně stupně, na průtočném množství vody a na složení dna.



Obrázek 7.2:

Příklady konstrukcí přehrázek, vlevo zděná průtočná přehrážka, vpravo drátokamenná průcezná přehrážka



Obrázek 7.3:

Schématické znázornění délky vývařiště a jeho funkce ve vztahu k výšce tělesa přepadového stupně, vlevo správná délka vývařiště, vpravo krátké, nefunkční vývařiště

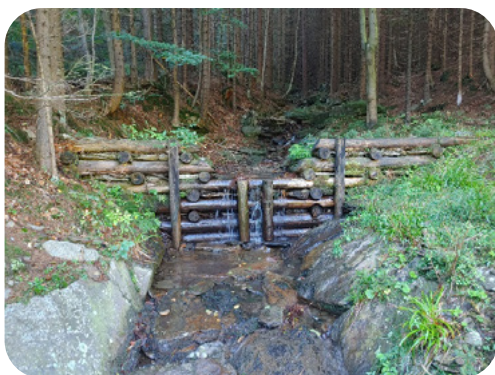
Vývařiště si lze zjednodušeně představit jako vanu plnou vody zakončenou ve směru toku vzpěrným prahem. Bazén vývařiště slouží jako dopadová plocha pro přepadající paprsek vody, tzn. energie vody je tlumena jejím dopadem na vodní hladinu. Hloubka vody ve vývaru bývá u menších stupňů v rozmezí d 40–70 cm, délka vývaru činí cca 1,5 až dvojnásobek přepadové výšky tělesa objektu.

Funkcí vzpěrného prahu na konci vývařiště je zajistit ustálené, konsolidované proudění vody na výtoku z objektu.

U skluzových stupňů voda volně nepřepadá přes přelivnou hranu, ale stéká po ploše tělesa. Vodní paprsek je zde tedy nesen. Většina skluzových stupňů nemá vývařiště. Skluzové plochy těchto stupňů mají tvar písmene S nebo sinusoidy či různých kombinovaných křivek. Sklon skluzné plochy se pohybuje většinou v rozmezí od 1 : 4 až do 1 : 15.

Skluzové stupně se budují z kamene. Skluzová stěna je ze silné dlažby na cementovou maltu nebo z betonu s kamenným obkladem dna na omočeném obvodu. Základy pro skluzové stupně musí být tak hluboké, aby podloží sneslo tlak způsobený tíhou vody a vlastního zdiva. Stavebně jsou skluzové stupně náročné jak z hlediska prostorového, tak z hlediska potřebné únosnosti podloží.

Speciální konstrukcí příčných objektů hrazení bystřin nebo strží vhodných pro zadržení vody v krajíně formou retardace odtoku jsou tzv. stupně s účinnou drsností (balvanité stupně). Jejich konstrukce je inspirována přirozenými toky, které mají vysokou drsnost koryta a na nichž proto nevznikají v důsledku erozní činnosti proudící vody podstatné změny charakteru dna. Vysoká drsnost koryta je zajištěna velkými nepravidelně rozmístěnými kameny, balvany, na které voda naráží a tím se snižuje její kinetická energie. To se pak projevuje ve snížení rychlosti vody a její unášecí síly. Tím, že se jedná o přirozený ekomorfologický projev koryta, vytváří tok harmonický celek s okolní nivní krajinou. Stupně s účinnou drsností (balvanité stupně) jsou v podstatě velké



Obrázek 7.4:

Příklady konstrukcí přepadových stupňů, vlevo srubová konstrukce, vpravo drátokamenná konstrukce přehrážka

balvany uměle osazené do koryta v předepsaném sklonu tak, aby svou nadzemní částí tříštily vodní vlákna; tím vzniknou mezi kameny turbulentní jevy, vodní vlákna se vzájemně promísí a vzniknou vzájemně se rušící víry, čímž se sníží a přemění kinetická energie v tepelnou nebo zvukovou. Výsledkem je pak dosažení nevýznamné rychlosti. Podélný sklon těchto stupňů má být větší než 1 : 10 až 1 : 15 na krátkou vzdálenost 10–20 m. I když mluvíme o stupni, konstrukčně je tento prvek v podstatě skluz, jehož dno je tvořeno balvany o nejdelší ose 80–120 cm, umístěných tak, aby tato osa byla kolmo ke dnu a aby se voda co nejvíce tříštila. Výška této konstrukce se pohybuje kolem 1,0 až 1,5 m.

Posledním typem příčných objektů využívaných v praxi hrazení bystřin pro konsolidaci dna a zpomalení proudění vody v krajině jsou prahy a pásy ve dně. Prahy jsou příčné objekty s přepadovou výškou do 0,3 m. Přelivná hrana je v úrovni dna nad objektem. Práh nepřerušuje břehové linie bystřiny nebo horského potoka a při větších průtocích je zaplaven vodou. Prahy přispívají ke stabilizaci dna a zabraňují místnímu porušení dna zpětně postupující erozí. Umísťují se do upravené části toku tam, kde je velká vzdálenost mezi stupni nebo kde vzniká nebezpečí podemletí břehů v oblouku koryta. Zřizují se většinou ze dřeva nebo z kamene. Dřevěné jsou z 1 až 2 kusů kuláčů nebo hraněného dřeva, umístěných nad sebou a připevněných k pilotám. Pokud není ve dně dlažba a dno je složeno z drobných valounů, zpevňuje se pod nimi dno spadištěm na vzdálenost 1–1,5 m dlažbou.

Prahy se někdy také vkládají do dna při jeho prohloubení, které se provádí na krátkou vzdálenost a do malé hloubky 20–30 cm. Tehdy se skládá práh z více kuláčů umístěných nad sebou.

Pásy (opěrné pásy) mají obdobnou funkci jako prahy: mají chránit dno před postupujícím prohlubováním, zabránit uvolnění a odnosu kamene, jímž je dno zpevněno (dlažba, štět). Dále mají zabránit porušení břehového opevnění svahů, podemletí základů a sesutí boční dlažby. Od prahů se liší důkladnějším provedením. Zřizují se v tratích o velkém spádu; jsou vybudovány přes celou šířku koryta a zavázány do břehů. Chrání v souvislé korekci i před případným poškozením, způsobeným vyjitím vody z břehů. Sahají do hloubky 0,8–1,0 m v šířce 0,8 m. Jsou zhotoveny ze zdiva na cementovou maltu, nebo z betonu. Jejich vzdálenost se řídí sklonem a vzdáleností stupňů; bývají umístěny 20–40 m od sebe.

Návrh břehových opevnění a břehových porostů

Břehová opevnění jsou součástí tzv. podélných konstrukcí na tocích, tedy konstrukcí, jejichž podélná osa je rovnoběžná s osou toku. Podle funkce se dělí na:

- Opevňovací konstrukce
- Usměrnovací konstrukce

Opevňovací konstrukce jsou určené k podélnému zpevnění břehů, výjimečně i celého koryta toku. Dle jejich umístění se dělí na:

- Opevnění paty svahů
- Opevnění břehů
- Opevnění dna

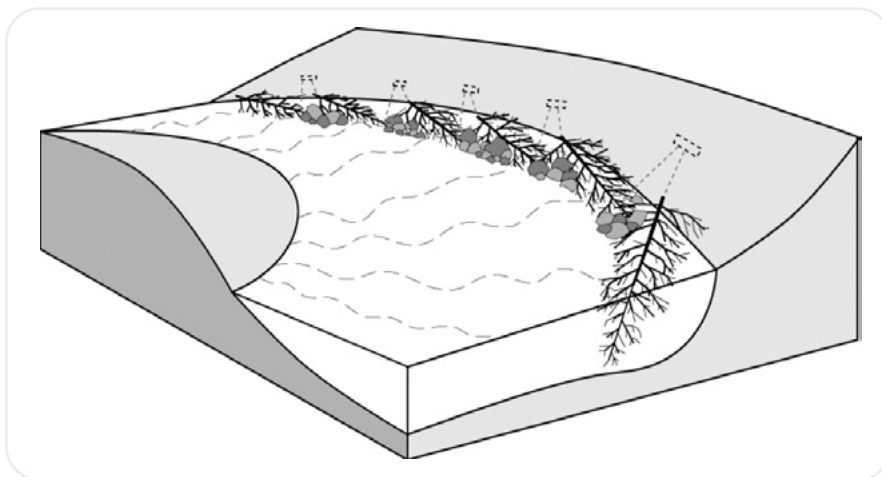
Pro opevnění paty svahů se využívají zapuštěné, polozapuštěné či nasazené konstrukce, nejčastěji kamenné či dřevěné (plůtkové, laťové). Opevnění břehů pak většinou představuje kombinaci opevnění paty svahu jednou z výše popsaných konstrukcí v kombinaci s nějakou formou vegetačního či polovegetačního opevnění. Opevnění dna se v praxi řeší prakticky pouze v okolí objektů či v extravilánu. Konstrukčně může být realizováno různě, většinou jde o kamenné konstrukce typu záhozů či rovnanin, nebo kamenného zdiva.

Usměrňovací stavby mají za úkol odklonit proudnici toku od erozně ohrožených částí toků (většinou oblouků). Základní usměrňovací konstrukcí jsou tzv. výhony. Jedná se o žebra z různých materiálů umístěná do ohroženého břehu tak, aby odkláněla tok do bezpečné vzdálenosti od tohoto ohrožení. Dle jejich umístění vůči směru proudění se rozdělují na inklinativní (inklinantní), deklinativní (deklinantní) a neutrální.

Vegetačními doprovody (břehovými a doprovodnými porosty) se označují rostlinná společenstva souvisle zapojených lesních porostů nebo skupin, pásů a řad stromů, keřů a bylinné vegetace na březích toků a v jejich okolí. Jsou různého druhu, a pokud jsou správně uspořádány a pěstovány, uplatňují se při úpravách drobných toků svými prospěšnými účinky.

Druhy a účinky vegetačních doprovodů lze rozdělit do dvou skupin, kterými jsou:

- **břehové porosty** (též zvané pravé), které jsou stanovištně vázány na koryto a břehy drobných vodních toků a mají především účel *opevňovací a stabilizační*, tj. chránit koryto před účinky proudící vody při současném zřeteli na začlenění úpravy do okolního prostředí;



Obrázek 7.5:

Usměrnění toku pomocí deklinantních výhonů z vrcholů smrků ukotvených v březích a stabilizovaných kamennými pohozy

- **doprovodné porosty**, které se vyskytují podél drobných toků, takže nejsou vázány na jejich koryto a břehy a mají především *účel krajínotvorný*, tj. začlenit provedené úpravy do okolní krajiny, popř. druhotně i účel půdoochranný, zvláště v inundačních územích toků.

Při navrhování vegetačních doprovodů obou skupin se má vycházet z charakteru drobných toků (druhu, vodního režimu, způsobu využití aj.), z podmínek využívání pobřežních pozemků, z požadavků ochrany a tvorby krajiny, z místních stanovištních podmínek aj.

Funkce vegetačních doprovodů, zejména břehových porostů, je především ochranná a projevuje se tím, že sítí hustě rozvětvených kořenů vyztužuje zeminu koryta nebo břehu a tvoří ochranný plášť, který zachycuje působení unášecí síly a dynamického tlaku vodního proudu.

LITERATURA

BĚLSKÝ, J., 2005: Hrazení bystřin a strží v českých zemích v letech 1884 až 2004. Praha: Lesy České republiky, 2005. 33 s. ISBN 80-86945-12-X.

HANÁK, K. a kol., 2008: Stavby pro plnění funkcí lesa. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2008. 300 s. Technická knihovna. ISBN 978-80-87093-76-4.

KREŠL, J., 1990: Lesnické meliorace. 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1990. 226 s.

SKATULA, L., 1953: Hrazení bystřin a strží: [Určeno] pro posluchače les. fak. 2. vyd. Praha: SPN, 1953. 516 s. Učební texty vysokých škol.

TLAPÁK, V., HERYNEK, J., 2001: Úpravy vodních toků a hrazení bystřin. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2001. 146 s. ISBN 80-7157-551-8.

VOKURKA, A., ZLATUŠKA, K., 2020: Technická doporučení pro hrazení bystřin a strží. MZE 2020, 96 s. ISBN 978-80-7434-557-9

ZLATUŠKA, K. (ED), 2020: Technická doporučení pro projektování lesní dopravní sítě. MZe ČR s ČZU Praha, Praha 2020, 124 s. ISBN 978-80-7434-556-2

ZLATUŠKA, K., DRÁPELA, K., 2012: Příspěvek k určení návrhového průtoku při hrazení bystřin a úpravách toků. Zprávy lesnického výzkumu = Reports of forestry research. 2012. sv. 57, č. 4, s. 314--326. ISSN 0322-9688. URL: <http://www.vulhm.cz/sites/File/ZLV/fulltext/228.pdf>

ZUNA, J., 2008: Hrazení bystřin. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. 180 s. ISBN 978-80-01-04010-2.

8 Lesní dopravní síť

Ondřej Hemr, Petr Čech

Lesní dopravní síť je zařízení všeho druhu sloužící k dopravnímu zpřístupnění lesů a jejich propojení se sítí veřejných pozemních komunikací, k vyklizování, přibližování, vyvážení a odvozu dříví a jiných produktů lesa, k dopravě osob, materiálů a strojů v souvislosti s hospodařením v lese a s provozováním myslivosti, v souvislosti s plněním společenských funkcí lesa, k zajištění průchodnosti lesů pro složky IZS, pro průjezd speciálních vozidel, popř. i k jiným účelům; součástí lesní dopravní sítě jsou i lesní sklady, body záchrany, heliporty apod. Otázkou je, proč by se publikace zaměřená na vodu v lesích měla zabývat problematikou lesní dopravní sítě? Ten, kdo se někdy procházel lesy v deštivém období, to jistě přinejmenším tuší. V předchozích kapitolách jsme několikrát konstatovali, že v lese jen naprosto výjimečně dochází k povrchovému odtoku vody, a to i při silných srážkách. Místo, kde naopak voda odtéká po povrchu, jsou zpevněné cesty. Ty navíc často přerušují i přirozené dráhy pro tok vody v půdě, a tím přispívají k tvorbě soustředěného odtoku. Podobně je tomu u linek, svážnic i lanovkových drah v případě, že je dříví dopravováno v polozávěsu. Zpřístupnění lesních porostů je ovšem nutné v hospodářských lesích ze zřejmých důvodů, ale také v lesích chráněných území i národních parků, kde je potřeba vhodným způsobem zajistit pohyb osob (do cestní sítě lze počítat i turistické stezky) a integrovaného záchranného systému. Málokdo z nelesníků ví, že jemnější způsoby lesnického managementu a zejména výběrný systém hospodaření, při kterém nevznikají holé seče, vyžaduje hustší síť cest než dosud „standardní“ hospodaření podle jednotlivých věkových tříd. Při plánování zpřístupnění lesů či rekonstrukce cestní sítě je tak vždy potřeba mít na paměti kromě hledisek hospodářských také citlivý přístup k vodnímu režimu lesních ekosystémů.

Lesní cesta – je účelová pozemní komunikace. Je součástí lesní dopravní sítě a slouží k odvozu dříví, dopravě osob a materiálu v zájmu vlastníka a pro průjezd speciálních vozidel, zvláště složek integrovaného záchranného systému.

Lesní odvozní cesta – jednapruhová účelová komunikace vytvářející dopravní spojení uvnitř lesů; z dopravního hlediska zaručuje bezpečný celoroční nebo sezónní provoz.

Lesní cesta pro celoroční provoz – lesní cesta umožňující svým prostorovým uspořádáním a technickou vybaveností celoroční provoz.

Lesní cesta pro sezónní provoz – lesní cesta umožňující svým prostorovým uspořádáním a technickou vybaveností sezónní provoz v obdobích s nižším úhrnem srážek nebo v obdobích zámrazu.

Ostatní trasy pro lesní dopravu – trasy pro lesní dopravu, které nejsou pozemními komunikacemi (především lesní svážnice a technologické linky).

Lesní svážnice – slouží pro soustředování dříví, zpravidla spojuje technologické linky s lesní cestní sítí.

Technologická linka – slouží pro soustředování a vyklizování dříví, zpravidla spojuje lesní porosty s lesními svážnicemi, lesními sklady a lesními skládkami. Je vedena po neupraveném terénu bez odstranění vrchní vrstvy zeminy promíchané s organickými zbytky.

Lesní stezka, lesní pěšina – slouží výhradně pěší dopravě (turistické pěšiny, lovecké chodníky). Její šířka je maximálně 1,5 m. Navrhují se nebezpečně či s povrchem výhradně z přírodních materiálů (dřevo, kámen), s maximálním využitím současných tras a pěšin a tak, aby jejich vedení zahrnovalo zájmová místa v oblasti. V trase lesní pěšiny mohou být jednotlivé schody nebo schodiště.

Technická vybavenost lesní cesty – vozovka lesní cesty, odvodnění lesní cesty, objekty na lesní cestě, výhybny a obratiště, lesní sklady, připojení lesní cesty na silnice, místní nebo účelové komunikace, samostatné sjezdy, dopravní značky, záchytná nebo vodící bezpečnostní zařízení.

Odvodnění – soubor výrobků, konstrukcí nebo terénních úprav pro bezeškové převádění a odvádění povrchových vod z tělesa lesní cesty a z okolních pozemků a pro jejich zabezpečení proti škodlivému působení podzemních vod.

Lesní sklad – stavebně upravená plocha u lesní cesty, sloužící pro úpravu, skladování nebo nakládání dříví, těžebních zbytků nebo dřevěné štěpky a pro skladování materiálů či techniky pro hospodaření v lese.

Propustek – stavební (mostní) objekt s kolmou světlostí mostního otvoru do 2 m včetně, sloužící k převedení průtoku obvykle povrchových vod napříč tělesem lesní cesty.

Trativod – kryté odvodňovací zařízení upravující vodní režim pod povrchem lesní cesty a podloží odnímáním vody z okolní zeminy, ochranné vrstvy apod.

Volná šířka lesní cesty – nejmenší vzdálenost, měřená kolmo k ose lesní cesty mezi vnitřními líci stálých bočních překážek o výšce přes 20 cm; neexistují-li, je volná šířka totožná se šířkou koruny lesní cesty.

8.1 Lesní cesty

Podle předpokládaného účelu a dopravního významu lesní cesty je definována její návrhová kategorie. Od ní se odvozuje požadavek na vybavenost a parametry lesní cesty. Návrhová kategorie udává druh lesní cesty (1L nebo 2L) a volí se podle významu cesty v lesní dopravní síti. Návrhové kategorie jsou pak kombinací tří údajů v tomto pořadí: druh lesní cesty, minimální volná šířka a návrhová rychlost. Např. 1L 4,0/30 = označení pro lesní cestu s celoročním provozem, minimální volnou šířkou cesty přes 4,0 m a návrhovou rychlostí 30 km/h. Druh lesní cesty charakterizuje dopravní význam, konstrukci a technickou vybavenost cesty.

Lesní cesta pro celoroční provoz s označením 1L, má nejvyšší kvalitu profilu a vybavení. Jedná se o páteřní komunikace, které jsou vždy opatřeny vozovkou umožňující zimní údržbu. Takové cesty jsou dnes většinou kryty penetračním makadamem, který je postupně nahrazován krytem z hutněných asfaltových vrstev. Velké množství lesních cest 1L je dnes také kryto nestmelenými směsmi kameniva; mají nižší pořizovací cenu a dobře se v zimě udržují. Výjimečně jsou lesní cesty pro celoroční provoz kryty ostatními povrchy (například silničními panely). V případě neúnosné zemní pláně se provádí úprava zeminy podloží a odvodnění zemního tělesa.



Obrázek 8.1:
Lesní cesta 1(L) s povrchem z asfaltového betonu

Tyto cesty mají kompletní technické vybavení, zejména: dostatek výhyben, případně obratiště, vybavenost lesními sklady, vyřešeny jsou dostatečné rozhledy v trase i na sjezdech, zpevnění sjezdů, odvodňovací zařízení, neuvažuje se přeléváním vody přes vozovku.

Lesní cesta pro sezonní provoz, označení 2L, není zatížena tak vysokými požadavky jako cesty 1L. Lesní cesty 2L se užívají pouze sezónně, v klimaticky výhodných obdobích: přes léto či při zámrazu bez sněhové pokrývky. Nepředpokládá se u nich zimní údržba; na jaře a na podzim při zvýšené vlhkosti zemního tělesa se předpokládá jejich uzavření pro veškerou lesní dopravu. V případě dostatečně únosného a stabilního podloží nemusí mít lesní cesty 2L vozovku. U těchto cest převažují vozovky z nestmelených směsí kameniva (mechanicky zpevněné kamenivo, vibrovaný štěrk, štěrkodrt). Vzhledem k provozu odvozních souprav po 2L je nezbytné zajistit únosnost povrchu lesní cesty. Lesní cesty 2L mají pouze nezbytné technické vybavení: výhybny, obratiště, lesní skládky, rozhledy v trase i na sjezdech, jsou jen nezbytně odvodněny, přípouští se přelití vody přes vozovku.

Návrhová rychlost (km/h) určuje minimální a maximální hodnoty prostorových prvků lesních cest: poloměry směrových a výškových oblouků, minimální délky rozhledu pro zastavení a maximální povolený sklon. Návrhová rychlost závisí na kategorii lesní cesty a má být v celé délce jednotná, menší návrhová rychlost se volí v terénech, kde je obtížné opatřit lesní cestu dostatečně velkými prvky bez výrazných zásahů do terénu. U cest se stmelným krytem vozovky



Obrázek 8.2:
Lesní cesta (2L) s provozním zpevněním.

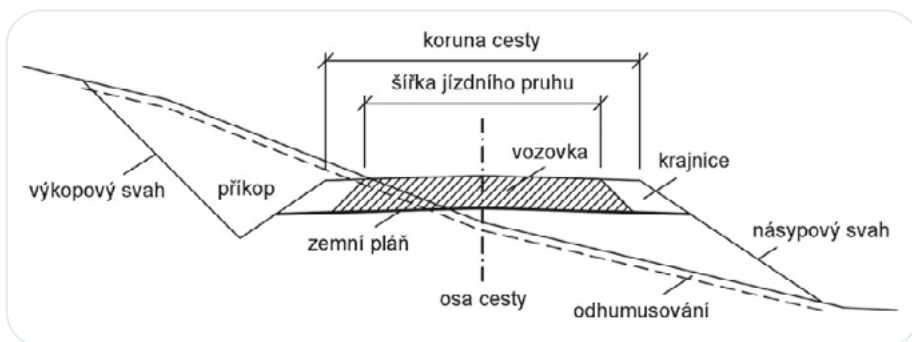
se návrhová rychlost stanovuje na 30 km/h, u nestmelených krytů a nezpevněných cest na 20 km/h. Lesní cesty jsou z hlediska příčné konstrukce tvořeny spodní stavbou (zemní těleso cesty), svrchní stavbou (vozovka s příslušenstvím) a objekty. Při návrhu lesní cesty je zohledňována celá řada hledisek: prostorové možnosti terénu a vedení trasy, podloží vozovky, návrhové průtoky pro odvodňovací zařízení, délky rozhledů apod.

Pro lesní cesty se určuje obvykle dvacetileté návrhové období. To se stanovuje s ohledem na plánovanou životnost nejnákladnější konstrukce – vozovky lesní cesty; a tomu se přizpůsobuje i míra zabezpečení, zejména odvodnění cesty. Při návrhu lesní cesty musí být zohledněny především lesnické požadavky: návaznost na technologii těžby, trasování, minimalizace záborů lesních pozemků a ochrana lesních porostů. Při tom je třeba zajistit dostatečnou bezpečnost, hospodárnost, účelnost a správnost řešení, včetně hledisek krajinné estetiky, ekonomiky výstavby a ochrany životního prostředí.

Tabulka 8.1:

Celková délka lesních cest v ČR (km). 1L – lesní cesty pro celoroční provoz, 2L – lesní cesty pro sezónní provoz, N – navrhované lesní cesty (rekonstruované i nové) (zdroj: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů)

| Rok | 1L | 2L | N | Celkem |
|------|--------|--------|-------|--------|
| 2016 | 12 881 | 26 646 | 6 928 | 46 455 |
| 2017 | 12 589 | 26 738 | 7 280 | 46 607 |
| 2018 | 12 601 | 26 808 | 7 790 | 47 199 |
| 2019 | 12 520 | 26 849 | 8 137 | 47 506 |
| 2020 | 12 409 | 26 458 | 8 598 | 47 465 |



Obrázek 8.3:

Konstrukční části zemní cesty (zdroj: Zlatuška a kol., 2020)

Objekty na lesních cestách

Součástí lesní dopravní sítě jsou i objekty a další stavby na lesních cestách:

Mosty jsou odvodňovací objekty s kolmou světlostí mostního otvoru nad 2,0 m. Nacházejí se zpravidla při křížení trasy lesní cesty s vodním tokem a slouží k převádění požadovaných N-leťých vod, zpravidla „dvacetileté“ Q_{20} či „stoleté“ Q_{100} . Dle hlavní nosné konstrukce rozlišujeme mosty deskové, trámové, rámové a jiné. Jsou konstruovány z kamene, betonu, cihel či dřeva či oceli. Na lesních cestách jsou nejčastěji ocelové či spřažené (železobetonové) konstrukce o jednom poli. Hlavními částmi mostu jsou: spodní stavba (opěry, pilíře a založení), svršek (římsy, chodníky, vozovka a hydroizolace) a vybavení (zábradlí, svodidla, osvětlení apod.)

Propustky jsou stavební objekty v tělese nebo pod tělesem lesní cesty s kolmou světlostí do 2,0 m sloužící k převedení soustředěného odtoku povrchových vod pod lesní cestou. Na lesních cestách se nejčastěji budují trubní propustky z (železo)betonových nebo ocelových trub a propustky rámové. Stále častěji se objevují propustky z plastového potrubí či vlnitých plechů z pozinkované oceli. Hlavní části propustků tvoří čela, lože, samotné potrubí a nadnásyp, případně obetonování.

Brody jsou navrhovány k překonávání malých vodních toků a kanálů, kde niveleta vozovky je v úrovni dna toku. Zpevňují se obvykle dlažbou z lomového kamene do betonového lože, zajištěnou v podélném směru lesní cesty prahy. Zpevnění brodu navazuje na podélné opevnění koryta. Brody je možné budovat také ze silničních panelů do lože z kameniva chráněného proti vyplavování.

Opěrné a zárubní zdi se na lesních cestách zřizují vzácně – omezují přístupnost, jsou nákladné a bývají náchylné k poškození vegetací. Na lesních cestách se navrhují: železobetonové (tížné, úhlové, prefabrikované, srubové), ocelové nebo zděné z lomového kamene, z drátokameniných košů, dřevěné srubové či z armované zeminy.

Výhybny jsou budovány u lesních cest 1L a 2L v místech, kde je nutné zajistit průjezd dvou vozidel zároveň, protijedoucích či při objíždění. Navrhují se v místech s dostatečným výhledem v přímých úsecích cest, případně na vnější stranu směrového oblouku.

Obratiště slouží k otáčení vozidel na konci neprůjezdných cest. Provádí se buď okružní, kde se vozidlo otáčí během jízdy nebo úvratové, kde otáčení probíhá zacouváním. Tvar takového obratiště je pak T nebo Y.

Točka je směrový oblouk o velkém středovém úhlu (téměř 180°), který se dříve navrhoval v místech, kde bylo třeba zajistit obrácení trasy, např. v hřebenech údolí.

Lesní sklady jsou užívány ke skladování dříví. Navrhují se zpevněné, v příhodných geologických podmínkách i nezpevněné, včetně odvodnění. Lesní skládky jsou zařízení dočasná, pokud se zpevňují, pak pouze dostupným biologickým materiálem (klest, štěpka apod.).

Sjezdy z komunikací slouží k propojení lesních cest se silnicemi, místními komunikacemi a dalšími účelovými komunikacemi. Lesní svážnice a technologické linky se na silnice či místní ko-

munikace nepřipojují, lesní cesty se nepřipojují na dálnice. Součástí sjezdů je i zajištění dostatečné šířky sjezdu a výhledů.

Bezpečnostní zařízení jsou na lesních cestách zřizována jen ojediněle. Patří mezi ně např. zábradlí, svodidla, směrové sloupky. V místech připojení na veřejnou pozemní komunikaci se umísťují svislé dopravní značky, v odůvodněných případech i v trase lesní cesty. Zejména v turisticky silně navštěvovaných oblastech se u lesních cest umísťují tabulky s kódem tzv. bodu záchrany, který usnadňuje lokalizaci místa pro případný zásah složek integrovaného záchranného systému - například horské služby či hasičů.

Součástí objektů na lesních cestách jsou dále souběhy a křížení lesních cest s inženýrskými sítěmi, vodními toky a melioračními kanály.

Ostatní trasy pro lesní dopravu

Na lesní cesty dále navazují další trasy lesní dopravy – lesní svážnice (3L) a technologické linky (4L). Ty slouží k přibližování a soustřeďování dříví z porostu až k odvoznímu místu na lesní cestě



Obrázek 8.4:
Lesní svážnice (3L) (zdroj: Zlatuška a kol., 2020)

prostřednictvím traktoru, přibližovače a vyvážedce. Standardně navazují na lesní cesty v místě připojení svážnice/linky na lesní cestu.

Na lesních svážnicích 3L probíhá soustředování dříví k odvoznímu místu. Trasy 3L zpravidla spojují lesní cesty s technologickými linkami 4L. Jsou navrhovány nezpevněné nebo jen s provozním zpevněním (nehnutné kamenivo rozprostřené na zemní pláň ke zvýšení její únosnosti, obvykle šterkodrť frakce 0–32 nebo 0–63 tloušťky 200 mm) a opatřeny základním podélným a příčným odvodněním a pouze nezbytnými objekty – například jsou bez výhyben. Jejich nejmenší volná šířka je 3,0 m. Protože jsou lesní svážnice budovány s menšími náklady než lesní cesty, je vhodné je odvodňovat jednoduššími způsoby. V praxi se využívají např. průlehy, jednoduché dřevěné svodnice.

Technologické linky 4L jsou dočasné trasy k vyklízení dříví z porostu a jeho soustředování pomocí mechanizace schopné pohybu po neupraveném terénu nebo animálně. Linky 4L bývají vedeny po spádnici. Nejsou opatřeny zemním tělesem, povrch je vždy nezpevněný a bez odstranění svrchní organické vrstvy. Tyto trasy jsou navrhovány při technologické přípravě těžebního pracoviště, s min. šířkou 2,0 m.



Obrázek 8.5:
Technologická linka (4L) (zdroj: Zlatuška a kol., 2020)

8.2 Údržba, opravy, rekonstrukce a rekultivace lesní dopravní sítě

Pro výstavbu lesních cest je účelné navrhovat takové konstrukce, které vyžadují jen minimální údržbu. A to nejlépe tak, aby si vlastník lesa mohl zajistit údržbu sám. Hlavním tématem údržby bývá kryt vozovky. Stmelené kryty vyžadují méně údržby, je na ně ale třeba najímat odbornou firmu. U vozovek s nestmeleným krytem je třeba údržbu provádět téměř nepřetržitě, údržba také závisí více na klimatických faktorech než na intenzitě dopravy.

Nejvíce údržbových prací probíhá v létě. Letní (stavební) údržba zahrnuje čištění vozovky a krajnic, povrchů na sjezdech, odvodňovacích zařízení a objektů lesních cest (zvláště propustků a svodnic), údržbu průjezdného profilu, rozhledových polí, svahů zemního tělesa, bezpečnostních zařízení a dopravních značek. V létě je nutné taky obnovovat příčný sklon vozovky, aby mohla voda odtékat z cesty mimo cestní těleso, dále pak obnovovat krytovou vrstvu, odstraňovat vyježděné koleje, výtluky a kaluže, sedimenty, nánosy a další nežádoucí objekty. Při zimní údržbě je úsilí směřováno na lesní cesty 1L, zejména odklizení sněhu z jízdního pásu, ošetření cest posypem, event. instalaci a údržbu sněhových zábran. Na lesních cestách 2L se zimní údržba provádí pouze vzácně, např. z důvodu mysliveckého hospodaření.

Opravy na lesních cestách spočívají v odstraňování vad, poškození a opotřebení většího rozsahu – v péči souvislé a lokální. Opravy lesních cest zahrnují: spravení výtluků, výmrzků, vyrovnaní povrchů poškozených úseků, větší opravy odvodnění, doplnění svodnic, opravy bezpečnostních zařízení, zajištění stability svahů násypů a zářezů, doplnění provozního zpevnění a odstranění nadbytečného opotřebení lesních cest. V současné době probíhají opravy poškozených úseku převážně v následujících dvou situacích. V případě nestmelených krytů je vozovka očištěna, znovu zhutněna a je zřízena nová vrstva z nestmeleného kameniva. Oprava stmelených krytů je nákladnější: povrch je třeba očistit, rozrušit, zhutnit a poté zřídít novou vrstvu z penetračního makadamu nebo asfaltobetonu, transformovat penetrační makadam na vibrovaný štěrť či mechanicky zpevněné kamenivo, případně překrýt povrch cesty vrstvou kameniva zpevněného popílko-cementovou suspenzí.

Rekonstrukcí rozumíme zvýšení třídy lesní cesty a řeší se při ní zejména: rozšíření oblouků, rozhledová pole, zřízení/zpevnění vozovky, obnova/doplnění odvodňovacího zařízení, opravy a dobudování objektů, dovybavení bezpečnostního zařízení, úprava/doplnění sjezdů, úpravy podélného a příčného sklonu, úprava/vybudování výhyben a lesních skladů.

V současné době je již naprostá většina lesní dopravní sítě vybudována a nově projektované lesní cesty tvoří minimum investic do cestní sítě. Rekultivace lesních cest se provádí u provozně nepotřebných cest nebo u takových, u kterých se již opravy či rekonstrukce nevyplatí. Účelem rekultivace je zamezení vzniku erozních rýh a navrácení plochy lesní půdy k produkčním účelům. Pro rekultivaci lesních cest lze využít např. metody užívané při hrazení bystřin a strží a při protierozní ochraně půdy obecně: odstranění umělých konstrukčních vrstev a geosyn-

tetických materiálů, zřízení úrodné vrstvy půdy a založení lesního porostu. Pro vlastní sanaci erozních linií lze využít nejjednodušší příčné objekty ze dřeva a z klestu: zápletové a laťové půtky, klestovou podestýlku, klejonáž, garnisáž, prahy, pasy, dřevěné či srubové stupně a srubové přehrážky.

8.3 Trasy pro lanovkové a letecké soustředování dříví

Systémy lanovkového a leteckého soustředování dříví jsou nedílnou součástí existující dopravní sítě a navazují na lesní cestní síť.

Lesní lanovky se používají k vyklízení surového dříví z pracovních polí pod nosné nebo tažné lano a jeho následné přibližování po přibližovací lince k lesní skládce nebo skladu. Lanovky mohou dříví vyklízet a přibližovat nahoru i dolů svahem, tenkým i hrubým koncem dopředu. Mohou být vedeny po spádnici, šikmo na vrstevnice i vodorovně. Při technologické přípravě pracovního postupu se vychází z řady faktorů: těžební metoda, druh těžby, intenzita zásahu, stáří porostu, převažující směr kácení stromů, směr postupu těžby, šířka pracovního pole a obecně ekonomické, ekologické a ergonomické parametry při výrobě surového dříví. Šíře problematiky lesních lanovek dalece přesahuje možnosti tohoto textu.

Letecké soustředování vrtulníkem je vysoce výkonná technologie, náročná na technologickou přípravu pracoviště a týmovou práci všech zúčastněných. Vrtulníkem lze soustřeďovat výřezy, kmeny i celé stromy. Pokud nepřesahují nosnost vrtulníku, doporučuje se soustřeďovat celé stromy. Velikost nákladu závisí také na ročním a denním období a na teplotních podmínkách. Technologicky je nejnáročnější vázání stromů v porostu, které musí být prováděno rychle a bezpečně. Koordinaci pracovního procesu je vhodné řídit pomocí radiového spojení. Z hlediska spotřeby času je vhodnější spíše soustřeďování dříví z větší přístupné plochy nebo kotlíku, než při těžbě jednotlivých stromů. Příznivost z hlediska výkonnosti a bezpečnosti práce je úměrná sklonu svahu: větší sklon umožňuje pilotovi lepší orientaci a přehled o připraveném nákladu, včetně vizuálního kontaktu vazačů s posádkou vrtulníku, zvedání dříví je možné bez vyhýbání se překážkám, odlet je možný bez nutnosti stoupání apod. Pro letecké soustřeďování je také nutné navrhnout dostatek dostupných lesních skladů, ty mohou sloužit i k doplňování pohonných hmot. Velikost plochy lesního skladu musí také umožňovat přistávání vrtulníku. Například pro přistávání vrtulníků integrovaného záchranného systému je požadována přistávací plocha 51 x 51 m.

8.4 Trasy pro rekreační dopravu

V současné době má stoupající tendenci rekreační využívání lesních cest. Tato mimoprodukční funkce lesa je ze strany společnosti vnímána jako jedna z nejdůležitějších. Lesní cesty se však rekreačnímu využití uzpůsobují jen výjimečně. V turisticky atraktivních lokalitách a v blízkosti měst je zvýšená potřeba parkování, a proto jsou v těchto místech zřizována parkoviště, odpočívadla, lavičky, tabule či např. úvaziště a napajedla pro koně. Pro pěší turistiku je možné využívat lesní stezky a pěšiny, případně turistické či lovecké chodníky zřizované pro chůzi v lese. V místech předpokládaného intenzivního využití stezky v neúnosném terénu či v chráněném území je možné povrch stezky zpevňovat.

Mezi nejpevnější patří štětované konstrukce: kameny min. tloušťky 20 cm uložené na zhutněný podklad, opřené o sebe, zaklínované a překryté místním, nejlépe písčitým, materiálem. Pro zmírnění povrchové eroze se štětové chodníky osazují kamennými svodnicemi.

Další používanou konstrukcí jsou povalové chodníky ze dřeva. Obvykle se budují jako převýšené nad okolní terén, aby jejich konstrukce byla co nejvíce izolována od půdní vlhkosti.

Na lesních cestách je často provozována také cykloturistika, převážně turistická a sportovní. Všechny lesní cesty mají parametry vhodné pro cykloturistiku, terénní cyklisté využívají lesní cestní síť pouze pro dopravu k místním sjezdům terénem.

Pro rekreační účely jsou lesní cesty využívány také osobami se sníženou pohyblivostí, dále např. k jezdecké turistice (hipoturistice) či k běžeckému lyžování.

ITERATURA

HANÁK, K. a kol., 2008: Stavby pro plnění funkcí lesa. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2008. 300 s. Technická knižnice. ISBN 978-80-87093-76-4.

HANÁK, K., 1996: Zpřístupňování lesa: odvodňovací objekty na lesních cestách. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1996. 106 s. ISBN 80-7157-231-4 [brož.].

HANÁK, K., HRŮZA, P., 2023: Zpřístupňování lesa: trasování a projektování lesních odvozních cest. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2023. 116 s. ISBN 80-7157-685-9.

HRŮZA, P., 2014: Zpřístupňování lesa a jeho komplexní pojetí. 1. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. 123 s. ISBN 978-80-7375-987-2.

HRŮZA, P., HANÁK, K., SKOUPIL, J., 2000: Forest road network formation and optimization and its effects on runoff conditions and minimization of erosion damages. In Proceeding of the International Scientific Conference Forest and Wood Technology vs. Environment. 1. vyd. Brno: MZLU v Brně, 2000, s. 117--124. ISBN 80-7157-471-6.

ZLATUŠKA, K. (ED.), 2020: Technická doporučení pro projektování lesní dopravní sítě. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2020. ISBN 978-80-7434-556-2

ČSN 73 6108. Lesní cestní síť 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2018.

ISBN 978-80-7417-246-5 (online)

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.
Strnady 136, 252 02 Jíloviště
www.vulhm.cz
2023



www.vulhm