

# HOSPODÁŘSKÉ POSTUPY PRO ZACHOVÁNÍ HYDRICKÝCH FUNKCÍ LESŮ V OBLASTECH POSTIŽENÝCH KŮROVCOVOU KALAMITOU

LESNICKÝ PRŮVODCE



Ing. DAVID DUŠEK, Ph.D.  
Ing. ONDŘEJ ŠPULÁK, Ph.D.

Certifikované  
METODIKY  
PRO PRAXI

9/2025

# **Hospodářské postupy pro zachování hydrických funkcí lesů v oblastech postižených kůrovcovou kalamitou**

**Certifikovaná metodika**

**Ing. David Dušek, Ph.D.  
Ing. Ondřej Špulák, Ph.D.**

Strnady 2025

## **Lesnický průvodce 9/2025**

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.

Strnady 136, 252 02 Jíloviště

[www.vulhm.cz](http://www.vulhm.cz)

Publikace vydané v řadě Lesnický průvodce jsou dostupné v elektronické verzi na:

[http://www.vulhm.cz/lesnicky\\_pruvodce](http://www.vulhm.cz/lesnicky_pruvodce)

**Vedoucí redaktor:** Ing. Jan Řezáč; e-mail: [rezac@vulhm.cz](mailto:rezac@vulhm.cz)

**Výkonná redaktorka:** Miroslava Valentová; e-mail: [valentova@vulhmop.cz](mailto:valentova@vulhmop.cz)

**Grafická úprava a zlom:** Klára Šimerová; e-mail: [k.simerova@vulhm.cz](mailto:k.simerova@vulhm.cz)

ISBN 978-80-7417-301-1

ISSN 0862-7657

# **SILVICULTURAL PROCEDURES FOR MAINTAINING FOREST HYDROLOGICAL FUNCTIONS IN BARK BEETLE-IMPACTED AREAS**

## *Abstract*

This methodology addresses the critical need for adaptive forest management strategies in Central European forest ecosystems currently facing unprecedented degradation of Norway spruce monocultures due to bark beetle outbreaks and climate change. The primary objective is to define silvicultural procedures that maintain and restore the hydrological functions of forests—specifically retention, accumulation, and water quality protection—on extensive clear-cut areas. The document integrates findings from hydrology, pedology, and plant ecophysiology to evaluate the hydrological benefits and risks of various tree species (e.g., beech, oak, birch, aspen, larch, fir). It proposes combined and two-phase restoration techniques using pioneer "preparatory" species to stabilize microclimates and soil conditions. Furthermore, it details the role of forest tending (thinning) and the strategic retention of deadwood and logging residues in mitigating erosion, reducing unproductive evaporation, and enhancing groundwater recharge.

*Adresa autorů:*

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.

Výzkumná stanice Opočno

Na Olivě 550, 517 73 Opočno

e-mail: [dusek@vulhmop.cz](mailto:dusek@vulhmop.cz); [spulak@vulhmop.cz](mailto:spulak@vulhmop.cz)

# Obsah:

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>CÍL METODIKY</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>METODIKA</b> .....	<b>8</b>
	<b>Teoretická východiska</b> .....	<b>8</b>
	<b>Dřeviny pro obnovu kalamitních holin z pohledu hydrologických přínosů a rizik</b> .....	<b>11</b>
	Buk lesní .....	<b>11</b>
	Dub zimní .....	<b>13</b>
	Bříza bělokorá .....	<b>15</b>
	Topol osika .....	<b>17</b>
	Jeřáb ptačí .....	<b>19</b>
	Jedle bělokorá .....	<b>21</b>
	Smrk ztepilý .....	<b>23</b>
	Borovice lesní .....	<b>25</b>
	Modřín opadavý .....	<b>27</b>
	Postupy obnovy porostů na kalamitních holinách .....	<b>29</b>
	Kombinovaná obnova porostů .....	<b>30</b>
	Dvoufázová kombinovaná obnova porostů .....	<b>30</b>
	Postupy výchovy porostů .....	<b>32</b>
	Ponechávání mrtvého dřeva a těžebních zbytků po kalamitních těžbách .....	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ</b> .....	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY</b> .....	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>EKONOMICKÉ ASPEKTY</b> .....	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>DEDIKACE</b> .....	<b>38</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURA</b> .....	<b>38</b>
	<b>Seznam použité a související literatury</b> .....	<b>38</b>
	<b>Seznam publikací, které předcházely metodice</b> .....	<b>45</b>
	<b>SUMMARY</b> .....	<b>47</b>

# 1 ÚVOD

Lesní ekosystémy ve středoevropském prostoru procházejí v posledních dekádách bezprecedentní dynamickou změnou, jejímž nejviditelnějším projevem je rozsáhlý rozpad smrkových monokultur v důsledku gradace podkorního hmyzu, především lýkožrouta smrkového (*Ips typographus* L.). Tyto kůrovcové kalamity svým rozsahem a rychlostí často překonávají historické zkušenosti. Přibližně od roku 2015 dochází nejen v ČR k masivnímu nárůstu napadení, při kterém hlavním spouštěčím faktorem jsou dlouhodobá období sucha v kombinaci s vysokými teplotami ve vegetačním období (NETHERER et al. 2019). Tyto klimatické podmínky snižují obranné mechanismy stromů, zejména smrku ztepilého, a zároveň umožňují kůrovcům dokončit více generačních cyklů ročně, což vede k exponenciálnímu růstu jejich populací (FERNÁNDEZ-CARRILLO et al. 2024).

Výsledkem není pouze ztráta produkční základny, ale také narušení biogeochemických cyklů, z nichž důležitý je také cyklus hydrologický. Poznání a popis fyzikálních a pedologických změn na kalamitních plochách je předpokladem pro návrh efektivních péstebních opatření pro obnovu a tvorbu odolnějších lesních porostů. Současné moderní přístupy k tvorbě těchto lesů by měly být založeny nejen na poznatcích lesního inženýrství, ale i na integraci poznatků z hydrologie, pedologie a ekofyziologie rostlin.

## 2 CÍL METODIKY

Cílem metodiky je formulace hospodářských postupů v lesních porostech postižených rozsáhlými kůrovcovými kalamitami. Metodika shrnuje vhodné hospodářské postupy aplikovatelné v reakci na kůrovcové kalamity s cílem v maximální míře udržet a co neefektivněji obnovit hydrické funkce i v případě odumření / smýcení lesních porostů. Opatření v celém spektru lesnického managementu jsou doporučena z hlediska jejich pozitivního vlivu na retenční funkci lesa, snížení rizika vzniku eroze a zachování kvality vody.

## 3 METODIKA

### Teoretická východiska

Predispozice lesních ekosystémů k rozsáhlým kůrovcovým kalamitám je způsobena komplexní interakcí klimatických faktorů, které ovlivňují jak populaci kůrovce, tak vitalitu hostitelských stromů, a stanovištních faktorů určujících podmínky pro růst, ale i zranitelnost hostitelských dřevin (MIKKELSON et al. 2013). Za důležitý spouštěcí faktor je považováno akutní sucho, které spolu s rostoucími teplotami ve vegetačním období často vede ke kalamitnímu přemnožení kůrovce (NETHERER et al. 2019). Silný stres suchem oslabuje obranné mechanismy stromů, mírné zimní teploty naopak zvyšují pravděpodobnost přezimování kůrovců. Ze stanovištních faktorů zvyšuje riziko vzniku kůrovcové kalamity přítomnost nezpracovaných větrných nebo sněhových polomů a výskyt hustých stejnověkých dospělých porostů smrku. Topografické charakteristiky, jako nadmořská výška, sklon a orientace svahu, ovlivňují lokální teplotní podmínky, sluneční záření a fenologii kůrovce. Exponované smrkové porosty (např. po narušení větrem) mají odlišné tepelné podmínky, což zvyšuje stres zbývajících stromů a jejich náchylnost k napadení. Bylo pozorováno, že *Ips typographus* preferuje vitálně rostoucí stromy, náhle stresované suchem, což naznačuje, že kůrovec vyhledává stromy s vysokou nutriční hodnotou lýka, ale oslabenou schopností aktivovat obranné mechanismy (MEZEI et al. 2017; NETHERER et al. 2019).

Hydrické funkce lesa lze rozdělit na funkci retenční (schopnost zadržet vodu v povodí a zpomalit odtok), akumulární (schopnost vázat vodu v půdním profilu a biomase) a kvalitativní (schopnost vodu čistit a bránit erozi). Kůrovcová kalamita a následně asanační těžby zasahují do všech těchto složek. Rozpad porostu mění intercepci srážek, evapotranspiraci i odtokové poměry. Následná těžba za použití těžké mechanizace zhušťuje půdu, snižuje její infiltrační kapacitu a vytváří preferenční cesty pro rychlý povrchový odtok, což v případě vyšších srážek vede k erozi a povodňovým odtokům. Obnova lesa pak představuje dlouhodobý proces návratu k rovnovážnému stavu, během něhož je nutné pracovat s rizikem vyplavování živin, zejména dusičnanů, do podzemních a povrchových vod.

Vodní režim lesního ekosystému je komplexní soubor vzájemně propojených procesů, které ovlivňují hydrologickou bilanci povodí. Zahrnuje příjem srážek, jejich intercepci korunami stromů, evapotranspiraci (ET), infiltraci vody do půdy, dynamiku půdní vlhkosti a odtok (povrchový i podpovrchový).

Evapotranspirace, která je součtem transpirace (dýchání) vegetace a evaporace (výparu) z půdy a koruny, je jedním z nejdůležitějších procesů, které kůrovcová kalamita ovlivňuje. Napadení stromu lýkožroutem vede k rychlému a téměř úplnému zablokování cévních svazků, což má za následek zastavení transpirace již v prvních týdnech po napadení, a to i v tzv. „zelené fázi“, kdy jehličí zůstává na pohled zelené (GANDHI et al. 2022). Tento mechanismus, nazývaný „ztráta hydraulické vodivosti“, je hlavním faktorem vedoucím k úhynu stromu. Pokles transpirace je však komplexně nahrazen dalšími hydrologickými procesy. Se ztrátou jehličí a následným prosvětlením lesního patra se na půdní povrch dostává více slunečního záření a větru, což vede ke zvýšené evaporaci vody z půdy a k silnější transpiraci přízemní vegetace (BEARUP et al. 2014). Důsledkem je, že celková evapotranspirace v povodí klesá, ale její míra je vysoce variabilní. Variabilita je způsobena odlišnými konkurenčními procesy v hydrologickém cyklu, které se liší v závislosti na charakteristikách povodí, klimatu a fázích napadení (MIKKELSON et al. 2013). Příмым důsledkem poklesu evapotranspirace je významný nárůst půdní vlhkosti v zasažených porostech. Tento nárůst je patrný již během první vegetační sezóny po napadení a svého maxima, které může v souvislosti s dalším vývojem porostu přetrvávat několik let, dosahuje ve druhé sezóně. Hydrologická odezva je však prostorově a časově značně heterogenní.

V zapojeném lese hraje intercepci (schopnost nadzemních částí vegetace zachytit srážkovou vodu, která se následně vypaří zpět do atmosféry, aniž by dopadla na půdní povrch) klíčovou roli. U porostů smrku ztepilého (*Picea abies*) může roční intercepci činit v našich podmínkách až 45 % celkového úhrnu srážek. Tato voda je z hlediska odtoku ztrátou, avšak z hlediska mikroklimatu a tlumení povodňových vln je klíčovým stabilizačním prvkem.

Kůrovcové kalamity ovlivňují také dynamiku sněhové pokrývky. Vlivem ztráty jehličí a následné redukce intercepci plochy se zvyšuje množství sněhu, které dopadá přímo na půdní povrch (MIKKELSON et al. 2013). Důsledkem je dřívější a intenzivnější tání sněhu na jaře, což má významný vliv na načasování odtoku a může posunout hlavní odtokové události do dřívějších období roku. Snížení intercepci sněhu a jeho sublimace z korun stromů přispívá k celkovému zvýšení odtokové vydatnosti povodí, což je obzvláště důležité v ekosystémech závislých na tání sněhu (REN et al. 2021).

Ztrátou korunového zápoje dochází k posunu aktivního povrchu, tedy roviny, kde dochází k transformaci dopadajícího slunečního záření na teplo. V zapojeném lese se tato transformace odehrává v korunách stromů. Na holině dopadá globální radiace přímo na povrch půdy, případně na vrstvu těžebních zbytků. Tento jev vede ke zvýšení teplotních extrémů, a to má přímé hydrologické důsledky. Vysoká teplota povrchu zvyšuje sytostní doplněk vodní páry v přízemní vrstvě atmosféry, což vede k nárůstu evaporace (výparu). Zahřívání svrchních půdních horizontů vede k urychlení mineralizace humusu a uvolňování živin (zejména nitrátového dusíku), které nejsou zachycovány vegetací a jsou následně vyplavovány do podzemních vod.

Lesní ekosystémy mají schopnost transformovat srážkové úhrny a snižovat kulminace velkých vod. Lesy snižují velikost odtoků extrémních vod, a naopak zvyšují odtoky v obdobích sucha (ŠVIHLA et al. 2016). Tato retenční a retardační schopnost je však na holinách a v proředěných porostech výrazně oslabena. Kritickým faktorem je zde tzv. hydrologická diskontinuita. V nenarušeném prostředí voda odtéká převážně podpovrchově, pomalu, pórovým systémem půdy. Těžba dříví a výstavba lesní dopravní sítě však tento systém narušuje. Zhutnění povrchy linek a cest, spolu s erozními rýhami, fungují jako drenážní kanály, které převádějí pomalý svahový nesoustředěný odtok na rychlý soustředěný odtok povrchový. Tento proces dramaticky urychluje odtok vody z povodí. Vlivem husté cestní sítě a erozních rýh mohou být vrcholy průtokových vln (kulminace) zvýšeny o 12,5 % až 90 % v závislosti na místních podmínkách, sklonu svahu a charakteru srážky. Dochází také ke zkrácení doby kulminace povodní – povodňová vlna přichází dříve a je strmější. Často je pozorován i tzv. „předvrchol“ vlny, způsobený okamžitým odtokem vody z nepropustných povrchů lesních cest a skládek přímo do vodotečí (VÍCHA et al. 2009).

Ve vědecké literatuře lze nalézt protichůdné výsledky ohledně změn odtokového režimu po kůrovcových kalamitách, přičemž některé studie zaznamenaly nárůst, jiné pokles a další neudávají žádnou změnu (REN et al. 2021). Příčinou této variability je, že hydrologická odezva je silně ovlivněna regionálními a lokálními podmínkami, jako je klima, topografie a míra disturbance. V humidních a vlhkých letech vede snížení evapotranspirace k jednoznačnému a měřitelnému nárůstu odtoku (REN et al. 2021). Naopak v suchých a vodou limitovaných oblastech je odezva mnohem složitější. V takových případech může odtok dokonce mírně klesnout při nízké až střední mortalitě, zatímco výrazný nárůst je pozorován až při vysoké mortalitě (nad 40 %). Toto nelineární chování zdůrazňuje, že hydrologické dopady nelze jednoduše zobecnit a vyžadují hlubokou znalost specifických podmínek každého povodí (MIKKELSON et al. 2013). Na holinách experimentálních objektů v Orlických horách, Beskydech a na Šumavě byl zaznamenán nárůst odtoku ve vegetační době oproti vzrostlému lesu o 8–12 %. Odtok z holin byl pak o 2–7 % vyšší než z ploch pokrytých mladými (ŠVIHLA et al. 2016).

# Dřeviny pro obnovu kalamitních holin z pohledu hydrologických přínosů a rizik

Obnova lesa po kalamitách by měla směřovat k efektivnímu využití širší škály stanovištně vhodných dřevin. Jejich kombinace přináší snížení rizika nepříznivých škodlivých činitelů spojených s budoucím vývojem klimatu, ale také, díky specifickým vlastnostem dřevin, poskytuje diferenciaci efektu na hydrologický režim lesních povodí. Důvody a způsoby ovlivnění vodního režimu hlavních dřevin jsou popsány v následujících kapitolách.

## Buk lesní

Buk lesní je dominantní klimaxovou dřevinou velké části evropského kontinentu. Buk je klasifikován jako anisohydrická dřevina (případně mírně anisohydrická). To znamená, že během období sucha udržuje průduchy otevřené relativně dlouho, aby udržel fotosyntézu a transpiraci, a to i za cenu výrazného poklesu vodního potenciálu v pletivech. Tato strategie umožňuje buku růst a asimilovat uhlík i v podmínkách mírného až středního sucha, kdy smrk již stagnuje. Pokud však sucho překročí kritickou mez, buk vyčerpá dostupné rezervy a hrozí hydraulické selhání (kavitace/embolie xylému). Bod zlomu (P50 – ztráta 50 % vodivosti) se u buku pohybuje mezi -2,8 až -3,5 MPa. Díky anisohydrickému chování a vysokému indexu listové plochy (LAI) může být denní transpirace dospělého bukového porostu v létě velmi vysoká, často vyšší než u smrku na stejném stanovišti. To může vést až k hlubokému vysušování půdního profilu (SCHUME et al. 2004).

V plném olistění se intercepce buku pohybuje mezi 9–29% ročních srážek (MINDAS et al. 2018). Ačkoliv má buk vysoký index listové plochy (LAI), horizontální uspořádání listů umožňuje efektivní skanutí vody. Intercepce buku je tedy v letních měsících nižší ve srovnání se smrkem, ale vyšší než u dubu nebo břízy. Buk jako opadavá dřevina v zimě téměř neinterceptuje srážky (ztráta <10%) a nedochází k významné sublimaci sněhu zachyceného v jeho korunách. Hladká kůra a vzpřímené větve buku podporují stok po kmeni. Díky efektu stoku po kmeni může být množství vody k půdě dodatečně navýšeno v průměru o ca 12% srážkového úhrnu (5–20% v závislosti na intenzitě srážky); tato voda je zároveň obohacena depozicí prvků z korunové vrstvy. Stokem po kmeni je voda doručena přímo do rhizosféry (kořenové zóny), kde dochází k její přednostní infiltraci podél kořenových systémů hluboko do půdního profilu.

Srdčitý kořenový systém buku je mnohem hlubší než smrkový, a buk má tak k dispozici větší objem půdy s větším množstvím vody. Kořeny buku vytvářejí preferenční cesty pro infiltraci vody, tzv. makropóry (LANGE et al. 2009). Dlouhodobé studie a modelování vodní bilance ve střední Evropě konzistentně ukazují, že pod bukovými porosty dochází k vyššímu průsaku vody do hloubky než pod porosty smrkovými nebo borovými. Buk v noci redistribuuje vodu z hlubších vrstev do povrchových kořenů, kde ji uvolňuje do půdy (tzv. hydraulický lift / zdvih). Z tohoto procesu zároveň profitují okolní mělce kořenicí dřeviny (např.

smrk). Smíšení smrku s bukem (např. 30% podíl buku) prokazatelně zvyšuje vlhkost svrchní vrstvy půdy v suchých obdobích o 4–11 % (ŠACH, ČERNOHOUS 2015). Zatímco smrk zvyšuje primárně svrchní vrstvy, buk díky hlubším kořenům čerpá vodu z celého profilu. V suchých létech tak může buk vyčerpávat zásoby vody, které by v případě porostů dalších dřevin (zejména smrku) zůstaly v půdě, což může vést k poklesu průtoků v tocích během vegetační sezóny.

Buk je schopen fungovat jako „biologická pumpa“ bazických kationtů. Jeho kořenový systém čerpá tyto prvky z hlubších horizontů zvětrávání a vrací je prostřednictvím opadu na povrch půdy (LEUSCHNER et al. 2006). Srovnání půd pod bukem a smrkem na stejném podloží jednotně ukazuje vyšší pH, vyšší nasycení sorpčního komplexu bázemi (BS) a nižší koncentrace výměnného hliníku pod bukem. Poměr C/N v čerstvém opadu buku se pohybuje v širokém rozmezí, typicky mezi 30 a 50, v závislosti na nutričním stavu stanoviště a interní translokaci (přesunem) živin před opadem listů (BERGER, BERGER 2014). V porovnání se smrkem ztepilým, kde hodnoty C/N v opadu často přesahují 50 až 80, je bukový opad pro dekompozitory dostupnější, avšak ve srovnání s jasanem ztepilým, jehož opad má poměr C/N často pod 25, je buk považován za substrát nižší kvality (SCHEIBE, GLEIXNER 2014).

Pěstování buku lesního přináší z hydrologického hlediska zásadní pozitiva, která jsou však vyvážena specifickými fyziologickými riziky v kontextu klimatické změny. Mezi hlavní hydrologické přínosy patří vysoká dotace podzemních vod díky nízké zimní intercepci a absenci zimní transpirace, dále efektivní svádění vody po kmeni, které zajišťuje provlhčení hlubších vrstev půdy v kořenové zóně i při nižších srážkách. Buk zlepšuje půdní strukturu a hydraulickou vodivost, čímž snižuje povrchový odtok a erozi lépe než jehličnany. Naproti tomu vysoká spotřeba vody v létě v důsledku vyšší transpirace může vést k rychlému vyčerpání půdní vláhy, pokud není buk ve směsi s dřevinami s úspornějším hospodařením s vodou (např. smrkem). V dobách dostatku vody buky transpirují intenzivněji a vyčerpávají půdní zásoby rychleji, což může v následných suchých periodách vést k vodnímu deficitu (ŠÍPEK et al. 2020). Buk je ideální dřevinou pro stabilizaci vodního režimu, zejména v polohách, kde nehrozí extrémní letní vysychání. Pro zvýšení odolnosti porostů a optimalizaci vodní bilance se doporučuje pěstování ve směsích s dalšími dřevinami, které kombinují různé strategie hospodaření s vodou, čímž se rozkládá riziko a zvyšuje celková hydrologická stabilita ekosystému.

## Dub zimní

Duby jsou strategickou dřevinou pro nižší a střední polohy. Dub zimní je ve vědecké literatuře jednotně klasifikován jako druh s tendencí k anizohydrickému chování. Dub zimní udržuje průduchy otevřené i při výrazném poklesu dostupnosti vody (RAFTOYANNIS, RADOGLOU 2002). Otevřené průduchy umožňují dubu pokračovat ve fixaci CO<sub>2</sub> (fotosyntéze) i v obdobích, kdy smrk a buk již fyziologicky stagnují. To vede k udržení produkce biomasy, ale zároveň to znamená pokračující transpiraci a odčerpávání vody z půdy i za podmínek silného sucha. Studie ukazují, že dub zimní udržuje vysoký tok mízy (*sap flow*) i při vysokých hodnotách deficitu tlaku vodních par (VPD), což z něj činí významného spotřebitele vody v kritických obdobích léta. Anizohydrická strategie vystavuje vodivá pletiva stromu extrémnímu podtlaku. Aby nedošlo k přerušení vodního sloupce a vzniku embolie (kavitace), musí mít dub mimořádně odolný xylém. Dub disponuje „bezpečnostní rezervou“, která mu umožňuje operovat s vodním potenciálem listů hluboko pod hodnotami, které by pro buk nebo smrk byly fatální (PETERS et al. 2023). Tato vlastnost ale znamená, že dub je schopen vyčerpat půdní vodu na mnohem nižší vodní potenciál než ostatní druhy. Zajímavým zjištěním je nízká vnitrodruhová variabilita v odolnosti vůči embolii. Studie neprokázaly významné rozdíly mezi různými proveniencemi, což naznačuje, že vysoká odolnost je silně konzervativní, geneticky fixovaný znak druhu, a nikoliv pouze fenotypová adaptace na lokální podmínky (LOBO et al. 2018).

Koruna dubu zimního je typicky řidší, s jinak uspořádanými listy a větvemi než u buku či smrku. To se projevuje vysokou propustností pro srážky, resp. nízkou intercepcí. Studie porovnávající monokulturu buku a smíšený les (buk-dub-lípa) ukázaly, že smíšený les s přítomností dubu propouští k půdě výrazně více vody. Rozdíl je patrný zejména ve vegetační sezóně, kdy je olistění buku velmi husté a překryvné (vysoký index listové plochy, LAI), což vede k vysoké intercepci. Dubová koruna propouští v létě o cca 22 % více vody než buková (NOVOSADOVÁ et al. 2023). Dub má hrubou, hluboce brázditou borku s vysokou nasákavostí. Voda stékající po větvích je zadržována v prasklinách kůry, kde se buď vsákne do borky, nebo odpaří, a její tok dolů je zpomalen. To značně snižuje efektivitu stoku po kmeni, který tvoří pouze něco kolem 2 % ročních srážek.

Dub díky hlubokému křovému kořenu (který se ovšem na mělkých půdách nebo půdách s vysokou hladinou podzemní vody nemusí vyvinout) využívá zdroje vody z větších hloubek, ačkoli ve smíšených porostech čerpá většinu vody z hloubek jen 30 až 45 cm (BELLO et al. 2019). Významná je u dubu hydraulická redistribuce, kdy kořeny rostlin transportují vodu mezi vrstvami půdy s různým vodním potenciálem. V případě dubu se jedná typicky o transport vody z hlubokých, vlhčích horizontů do svrchních, suchých vrstev půdy (hydraulický lift / zdvih), ke kterému dochází v noci, kdy je transpirace minimální a průduchy jsou zavřené (ZAPATER et al. 2011). Dub je schopen redistribuovat více vody než buk. Studie prokázaly, že sousední smrky dokázaly tuto redistribuovanou vodu velmi efektivně využít. Až 61 % vody v kořenech sousedních smrků v suché půdě pocházelo z redistribuce zprostředkované dárcovskou dřevinou (HAFNER et al. 2017).

Kořenový systém dubu je tvořen silnými, dřevnatějícími kořeny. Po jejich odumření a rozkladu vznikají v půdě makropóry. Půdy pod starými dubovými porosty (170 let) mají signifikantně vyšší nasycenou hydraulickou vodivost a infiltrační rychlost než půdy pod smrkem nebo mladými duby. Půda pod duby vykazovala vyšší vzdušnou kapacitu v hloubce 0–30 cm. To znamená, že duby vytvářejí „houbovitější“ a propustnější půdní strukturu, která dokáže rychle absorbovat přívalové srážky a převést je do hloubky, čímž se snižuje riziko eroze a povrchového odtoku (ZHANG et al. 2023).

Listy dubu obsahují vysoké množství ligninu a tříslovin, což zpomaluje jejich rozklad. To může vést k akumulaci hrabanky. Nicméně studie naznačují, že hydrofobicita horizontu opadu pod duby je obecně nižší než pod jehličnany (jako borovice nebo smrk). Dubové listy, ačkoliv jsou tuhé, mají tendenci se kroutit a vytvářet kypřejší vrstvu, která mechanicky nebrání toku vody tak efektivně jako slehlé jehličí. Ve smíšených porostech (např. dub-borovice) dochází k interakci, kdy příměs dubového listí do jehličnatého opadu snižuje celkovou hydrofobicitu a zlepšuje vsakovací schopnosti organického horizontu. Dub tak funguje jako meliorační dřevina (ILEK et al. 2024). Na druhou stranu se dubový opad rozkládá pomaleji a je kyselější než např. opad lípy či javoru.

Dub zimní představuje z hydrologického hlediska robustní, vysoce funkční a stabilní alternativu ke smrku ztepilému, zejména v nižších a středních polohách ohrožených suchem. Hlavní hydrologické přínosy spočívají ve schopnosti zvyšovat infiltraci, schopnosti hydraulické redistribuce, nízké intercepci a vysoké odolnosti vůči kavitaci. Rizikem je možnost vyčerpání zásob podzemní vody a konkurence ve směsích při extrémním suchu. Vzhledem k tomu, že pozitivní vliv na infiltraci roste s věkem porostu, je žádoucí prodlužovat obmýti dubu nebo ponechávat výstavky, které udržují preferenční toky v půdě aktivní.

## Bříza bělokorá

Bříza bělokorá je rychle rostoucí opadavá listnatá dřevina s rozsáhlým areálem rozšíření napříč Eurasíí. Její ekologická valence jí umožňuje kolonizovat široké spektrum stanovišť, od suchých písčitých půd až po vlhká a rašelinná stanoviště (kde je častěji zastupována břízou pýřitou). V kontextu hydrologie lesa byla bříza dlouho přehlížena nebo považována za konkurenta produkčních dřevin. Současné výzkumy však ukazují, že bříza může plnit zásadní stabilizační a meliorační funkce, které jsou kritické pro udržení vodní bilance v krajinně narušené klimatickými extrémy.

Většina studií klasifikuje břízu jako druh s tendencí k isohydrickému chování (ASPELMEIER, LEUSCHNER 2004). To znamená, že bříza v reakci na pokles půdní vlhkosti nebo nárůst tlaku vodní páry relativně rychle omezuje stomatální vodivost, aby udržela konstantní vodní potenciál listů a zabránila hydraulickému selhání (kavitaci) vodivých pletiv. To však vede k dřívějšímu omezení fotosyntézy a asimilace uhlíku spojenému s nižší produkcí biomasy během sucha. Tato strategie zajišťuje vyšší pravděpodobnost přežití extrémních epizod sucha tím, že chrání hydraulický systém před nevratným poškozením (ZHANG et al. 2020). Evropské populace vykazují vyšší toleranci k suchu než asijské populace. Transpirace břízy není v rámci koruny homogenní. Denní hodnoty hustoty toku mízy (SFD) v horní třetině koruny byly v průměru 1,8krát vyšší než ve spodní třetině. Noční tok mízy u břízy bělokoré představuje přibližně 6–8 % celkové denní ztráty vody. Noční tok při vysokém VPD představuje skutečnou transpiraci (ztrátu vody), nikoliv jen doplňování zásob vody v pletivech. Tento jev může zlepšovat příjem živin, ale zároveň představuje hydrologické riziko vyčerpávání půdní vláhy v době, kdy neprobíhá fotosyntéza (SELLIN, LUBENETS 2010).

Srovnávací studie ukazují, že bříza nemusí být vždy největším spotřebitelem vody, jak se často traduje. Při srovnání 10 druhů dřevin v Nizozemsku měla bříza bělokorá během 10týdenního letního období nejnižší kumulativní transpiraci (136 mm), zatímco javor klen dosáhl nejvyšší hodnoty 429 mm (PFLUG 2024). Tento výsledek může být ovlivněn celkovou listovou plochou (LAI) a přísnou stomatální regulací břízy v reakci na vysoké hodnoty VPD.

Bříza má výrazně nižší interceptní ztrátu než jehličnany. V plném olistění dosahuje interceptce břízy hodnot srovnatelných s jinými listnáči, ale stále nižších než u smrku. Bříza po opadu listů ztrácí velkou část záchytné plochy, přesto si i v zimě zachovává určitou interceptční kapacitu (ca 56 % letní hodnoty) díky husté síti větví a drsnosti kůry, ale absolutní ztráty vody výparem jsou minimální. Relativně hladká kůra mladších bříz a vzpřímený úhel větví podporují tok vody po kmeni lépe než hrubá borka starých borovic nebo dubů (PFLUG et al. 2021). Tok po kmeni je u břízy vyšší v bezlistém stavu. Kapacita zadržení vody korunou závisí na smáčivosti povrchů. Bříza má listy s vysokým obsahem epikutikulárních vosků (až 71,76  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), což je jedna z nejvyšších hodnot mezi běžnými listnáči (KLAMERUS-IWAN et al. 2020). Vysoký obsah vosku zvyšuje hydrofobicitu povrchu listu, což by teoreticky mělo snižovat zadržení vody. Nicméně drsná textura listů a velký povrch větví tento efekt kompenzují.

Bříza disponuje vysoce plastickým kořenovým systémem, který se adaptuje na podmínky stanoviště. Na propustných minerálních půdách koření bříza hlouběji než smrk ztepilý. Průměrná hloubka kořenů se pohybuje kolem 0,71–0,74 m (KRIŠĀNS et al. 2022). Hlubší kořeny umožňují bříze čerpat vodu ze spodních horizontů během letního sucha, kdy povrchové vrstvy vysychají. Na půdách s vysokou hladinou podzemní vody vytváří bříza plošší kořenový systém (hloubka cca 0,67 m), aby se vyhnula anoxickým (bezokyslíkatým) podmínkám. Bříza je sice tolerantnější k zamokření v dormantním stavu (zima), ale během vegetace hypoxie inhibuje růst kořenů (WANG et al. 2015).

Na příkladu břízy pýřité bylo demonstrováno, že kolonizace rašelinišť břízou vede k výraznému snížení hladiny podzemní vody. Bříza má vyšší transpiraci a intercepci než původní mechová vegetace nebo nízké keře. Tento efekt „vodní pumpy“ urychluje mineralizaci rašeliny, uvolňování CO<sub>2</sub> a zvyšuje riziko požárů rašelinišť (WELPELO et al. 2024). Na sekundárně zamokřených minerálních půdách (např. po kalamitní těžbě smrku) je schopnost břízy snižovat hladinu podzemní vody a vysoušet svrchní horizonty vnímána pozitivně. Studie ukazují, že bříza dokáže snížit vlhkost svrchní půdy efektivněji než smrk, což zlepšuje podmínky pro následnou obnovu cílových dřevin (ŠPULÁK et al. 2021).

Bříza vytváří kořenový talíř ve tvaru eliptického paraboloidu. Na vlhkých a rašelinných půdách je stabilita břízy nižší než na suchých minerálních půdách. Ačkoliv bříza na vlhkých půdách vytváří širší kořenové talíře, mělčí zakořenění zde zvyšuje riziko vývrátů při silném větru (KRIŠĀNS et al. 2021). Kořeny bříz příznivě ovlivňují půdní infiltraci. Zlepšují fyzikální stav půd tím, že dodávají kyslík do prokořeněné zóny, zlepšují půdní strukturu a zvyšují propustnost a makroporozitu. Biomasa jemných kořenů břízy je pozitivně korelována s hydraulickou vodivostí půdy. Vyšší hustota kořenů zvyšuje infiltraci (WEBB et al. 2022). Opad břízy zvyšuje hodnoty pH a obsah bázi (Ca, Mg) v horních vrstvách půdy ve srovnání s jehličnany. Rychlý rozklad opadu břízy vede k tvorbě příznivého humusu typu mull, jenž podporuje vysokou enzymatickou aktivitu a vyšší hustotu populací půdní fauny. Bříza funguje jako „živinová pumpa“ která přerozděluje základní kationty a další prvky z hlubších částí půdního profilu (JONCZAK et al. 2020). Na druhou stranu byla zaznamenána vyšší citlivost semenáčků břízy k suchu ve srovnání s topolem osikou (MARTINCOVÁ, LEUGNER 2020).

Bříza představuje z hydrologického hlediska cennou dřevinu, zejména v oblastech postižených klimatickou změnou a suchem. Mezi její hlavní hydrologické přínosy patří zvýšení dotace podzemních vod, zlepšení infiltrace, urychlení koloběhu živin a vysoušení sekundárně zamokřených stanovišť. Mezi rizika kultivace břízy patří degradace rašelinišť, snížená statická stabilita na podmáčených půdách (zejména při absenci mrazu – stabilita břízy je v míře závislá na zmrznutí půdy, které pevně ukotvuje kořenový talíř) a vysoká noční transpirace.

## Topol osika

Rod topol (*Populus*) je obecně řazen mezi rychle rostoucí dřeviny s vysokou spotřebou vody, což je dáno specifickou anatomií xylému a regulací průduchů. Topoly vykazují tendence k anisohydrickému chování, kdy průduchy zůstávají otevřené i při poklesu půdního vodního potenciálu, což dovoluje pokles vodního potenciálu listů na velmi nízké hodnoty. To umožňuje pokračovat ve fotosyntéze a růstu i v počátečních fázích sucha, což vysvětluje vysokou produkci biomasy (ATTIA et al. 2015). Na druhou stranu, tato strategie vystavuje vodivá pletiva (xylém) extrémnímu napětí. Pokud sucho trvá dlouho a překročí kritickou mez, dochází k masivní kavitaci (přerušení vodního sloupce) a hydraulickému selhání, což může vést k náhlému odumření koruny nebo celého stromu (LIU, BRONDI 2021). Je nutné zdůraznit, že v rámci topolů existuje značná vnitrodruhová variabilita, která nabízí potenciál pro šlechtění a výběr klonů vhodných pro specifická stanoviště ohrožená suchem (ZHANG et al. 2020).

Osika díky hladší kůře a jiné architektuře koruny propouští více vody ve formě stoku po kmeni a vykazuje mnohem menší intercepci srážek v porovnání se smrkovým porostem. V zimě je bezlistá, a proto většina sněhu propadne korunou na zem, kde je chráněna před větrem a přímou radiací. V osikových porostech se na konci zimy akumuluje o 30–50 % více vody ze sněhových srážek než v sousedních smrkových porostech. Na jaře taje sníh pod osikou dříve (vyšší propustnost krátkovlnné radiace bezlistou korunou) a rychleji než ve smrkových porostech. To vede k vyššímu a koncentrovanějšímu jarnímu odtoku. Ačkoliv čerstvé listy osiky mohou vykazovat určitou nesmáčivost díky kutikulárním voskům, rozklad osikového listí probíhá mnohem rychleji než rozklad jehličí smrku a vede k tvorbě humusu typu mull nebo moder s nižším obsahem hydrofobních látek.

Osika vytváří dimorfní kořenový systém s horizontálními laterálními kořeny (často velmi rozsáhlými, propojujícími jedince z vegetativní obnovy – ramety) a vertikálními kořeny, které pronikají do hlubších minerálních vrstev. Studie z Lotyšska na úrodných minerálních půdách ukázaly silnou korelaci mezi průměrem kmene a biomasou silných kořenů osiky, které tvoří masivní kotvící desku, výrazně hlubší než u smrku.

Specifikem osiky je její klonální růst. Skupiny stromů (ramet) jsou propojeny společným kořenovým systémem. Experimenty se značením izotopy a měřením toku v kořenech prokázaly tok vody mezi rametami (CHARRIER 2021). Voda může být transportována od stromů s přístupem ke zdroji vody ke stromům na sušších mikrostanovištích. Toto propojení zvyšuje odolnost celého klonu (porostu) vůči heterogennímu suchu a představuje významnou výhodu oproti soliterně rostoucím jehličnanům.

Díky vyššímu čistému úhrnu srážek a intenzivnější infiltraci z tání sněhu přispívají osikové porosty k efektivnějšímu doplňování podzemních vod. Tento efekt je klíčový v kontextu adaptace na klimatickou změnu, kdy je zadržetí zimní vláhy v krajině prioritou. Hluboký kořenový systém mechanicky zpevňuje svahy a proces hydraulické redistribuce pomáhá udržovat vlhkost v povrchové vrstvě půdy během suchých period. Na druhé straně, díky anisohydrické strategii a vysoké transpiraci může osika v létě rychle vyčerpat zásoby vody

v půdním profilu. Rychlé tání sněhu pod osikami může zvyšovat riziko jarních povodní. Osika je ideální pro stanoviště s hlubšími půdami, kde může uplatnit svůj kořenový systém a hydraulickou redistribuci. Na velmi mělkých a vysychavých půdách je riziko jejího selhání vyšší. Při pěstování ve směsi se smrkem osika zajistí přísun vody ze sněhu a infiltraci, zatímco smrk v podrostu bude profitovat z vlhkosti redistribuované kořeny osiky a z ochrany před přímou radiací.

## Jeřáb ptačí

Jeřáb ptačí je dřevina s mimořádnou ekologickou valencí, sahající od nížinných poloh až po horní hranici lesa. Ačkoliv byl v minulosti často přehlížen nebo vnímán jako „plevelná“ dřevina konkurující cílovým druhům, je v současné době stále více oceňován jeho přínos v stabilizaci vodního režimu krajiny, zvláště ve vyšších polohách.

Jeřáb vykazuje chování, které lze charakterizovat jako mírně anizohydrické s prvky zranitelnosti (vulnerability). Je poměrně citlivý na pokles vodního potenciálu a jeho xylém je náchylný ke kavitaci dříve než u některých odolnějších druhů (např. dubů). Vodní potenciál v kmeni a listech může během sucha klesat na hodnoty, které by u přísně izohydrických druhů (jako je smrk nebo topol) vedly k úplnému uzavření průduchů (VOGT 2001).

Měření metodou sap flow a lyzimetrické studie naznačují, že jeřáb ptačí patří mezi dřeviny se střední úrovní transpirace, srovnatelnou s jinými listnáči mírného pásma, jako je javor klen, ale nižší než u vysoce náročných dřevin jako jasan ztepilý. V letním období může kumulativní transpirace jeřábu dosahovat hodnot srovnatelných s jehličnaný, avšak s výraznější reakcí na denní chod VPD. To naznačuje, že jeřáb je schopen velmi efektivně využívat vodu, když je dostupná a atmosférické podmínky (vysoké VPD) podporují výpar (PFLUG 2024). Klíčovým mechanismem přežití u jeřábu je schopnost opětovného naplnění cév. Jeřáb dokáže aktivně obnovit funkčnost embolizovaných cév po pominutí stresu, což je energeticky náročný proces, ale umožňuje rychlou regeneraci hydraulické vodivosti po dešti. Tato plasticita z něj činí odolnou pionýrskou dřevinu, která dokáže přežít na otevřených a vysychavých stanovištích.

Specifickým rysem jeřábu ptačího je jeho listová morfologie. Lichožpeřené listy mají odlišnou smáčivost a nižší aerodynamický odpor než celistvé listy buku nebo jehlice smrku. Povrchové napětí a mikrostruktura listů jeřábu neumožňují tak efektivní zadržování vodního filmu jako u jehličnanů, což podporuje rychlejší tvorbu větších kapek a jejich skanutí na půdu. Tento proces je urychlován i flexibilitou větví a řapíků, které se pod tíhou vody ohýbají a „vylévají“ zachycenou vodu, čímž se snižuje doba expozice vody pro evaporaci. Dalším faktorem je architektura větvení. Jeřáb má v porovnání se stinnými dřevinami (např. bukem) řidší korunu, což umožňuje snazší pronikání srážek. To je hydrologicky významné zejména při srážkách nízké intenzity. V ekosystémech, kde převažují drobné, časté srážky, může tento rozdíl činit desítky milimetrů vody ročně ve prospěch půdní vláhly pod porosty jeřábu (PFLUG et al. 2021).

Opadavý charakter jeřábu a struktura jeho listů vedou k nižším intercepčním ztrátám v porovnání s jehličnatými dřevinami, a to jak ve vegetačním, tak i v mimovegetačním období. Vyšší propustnost srážek pod jeřábem v létě, kdy intercepce činí 15–25 %, zvyšuje vlhkost svrchní vrstvy půdy a snižuje riziko sucha pro podrost. V oblastech s deficitem vodních zdrojů představuje nižší intercepce jeřábu jednoznačný hydrologický benefit, neboť minimalizuje evaporativní ztráty vody, která by jinak ani nedosáhla na půdní povrch. V horských ekosystémech, kde se jeřáb často vyskytuje v pásmu horní hranice lesa, hraje významnou roli horizontální srážky z mlhy a nízké oblačnosti. Jeřáb má jako listnáč s menší listovou plochou a absencí listů v zimě (kdy jsou mlhy časté) výrazně nižší schopnost zachytávat mlhu. Na-

hrazení porostu smrku porostem jeřábu tedy vede k lokálnímu snížení vstupu vody z mlhy do ekosystému (JANČO et al. 2021). Na druhé straně, nižší záchyt vody u jeřábu znamená menší atmosférickou depozici kyselin a dusíku, což přispívá k regeneraci chemismu půd a povrchových vod.

Ačkoliv jeřáb často kolonizuje mělké půdy a balvanitá stanoviště, kde je nucen rozprostřít kořeny po povrchu, na hlubších profilech, je schopen vyvinout kořenový systém dosahující hloubky přes 1 metr, výjimečně až 3,5 metru. Rozhodující je charakter stanoviště, kdy na oglejených půdách zůstávají kořeny mělké (do 40–60 cm) kvůli hypoxii ve spodních vrstvách. Na propustných, kamenitých půdách využívá štěrbin mezi kameny a proniká do hloubky, čímž se ukotvuje výrazně lépe než smrk, který tvoří plochý talířový systém. Dominantním znakem je však extenzivní laterální (postranní) šíření kořenů. Kořeny jeřábu se běžně rozprostírají do vzdálenosti 3 až 9 metrů od kmene. Tato „srdčitá“ až široce „talířovitá“ architektura má zásadní hydrologický význam pro záchyt vody z velké plochy. Propletená síť pevných, houževnatých kořenů efektivně stabilizuje suťové svahy a břehy bystřin, čímž brání erozi a sesuvům půdy efektivněji než smrková monokultura (MAUER, PALÁTOVÁ 2002).

Transpirační aktivita jeřábu v letním období, kombinovaná s jeho schopností udržet otevřené průduchy i při mírném stresu, představuje potenciální riziko pro kompetici o vodu ve smíšených kulturách. Ve svrchních horizontech půdy může hustý kořenový systém jeřábu odčerpat dostupnou vláhu rychleji než pomaleji rostoucí sazenice cílových dřevin (např. jedle bělokoré). Nicméně studie naznačují, že tento kompetiční tlak je často vyvážen pozitivním stínícím efektem, který snižuje přímou evaporaci z půdy a tepelný stres podrostu (KONŌPKA et al. 2021). V době klimatické nejistoty tak představuje jeřáb ptačí hydrologicky příznivou a ekologicky plastickou dřevinu, která by měla být významně podporována v lesnickém plánování, zejména v horských a podhorských oblastech.

## Jedle bělokorá

Jedle bělokorá je původní klimaxová dřevina, která byla v minulém století decimována průmyslovými imisemi v kombinaci s pro ni nevhodným hospodařením, vykazuje soubor morfologických a fyziologických vlastností, jež ji předurčují k roli stabilizačního prvku v adaptivních strategiích lesního managementu (BLEĐÝ et al. 2024).

Recentní studie klasifikují jedli bělokorou jako druh s tendencí k izohydrickému chování, podobně jako smrk ztepilý, avšak s významnými odlišnostmi vyplývajícími z kořenové morfologie (MAGH et al. 2019). Jedle udržuje relativně konstantní polední vodní potenciál listů i v průběhu vysychání půdy, prostřednictvím regulace stomatální vodivosti. Jakmile se dostupnost vody sníží pod určitou prahovou hodnotu, jedle částečně uzavírá průduchy, aby zabránila poklesu napětí v xylému na kritickou úroveň, která by vedla k embolii / kavitaci (MORENO et al. 2024). Odolnost vůči embolii není v celém stromě konstantní. Studie na dospělých jedlích prokázaly trend zvyšování odolnosti od vrcholu kmene směrem k bázi. Tento jev, známý jako hydraulická segmentace, chrání kritické části stromu (kmen a hlavní kořeny) před selháním. V případě extrémního sucha dojde nejprve k embolii v koncových větvích a jehlicích, zatímco hydraulická integrita (celistvost) kmene zůstává zachována pro následnou regeneraci. U jedle je tato segmentace vyvinuta silněji než u smrku, což přispívá k její vyšší schopnosti přežít epizody sucha a následně regenerovat (ZAMBONINI et al. 2024). Díky izohydrické regulaci a přístupu k hlubším zásobám vody vykazuje tato dřevina stabilnější transpiraci v čase. Ve smíšených porostech bylo pozorováno, že během mírného až středního sucha transpirace buku klesá, zatímco transpirace jedle zůstává neovlivněna. To činí z jedle hydrologicky stabilizující prvek, který udržuje mikroklima a latentní tok tepla (výpar) i v obdobích, kdy jiné druhy již omezují své fyziologické funkce (MAGH et al. 2019).

Jedle bělokorá prokazatelně provádí hydraulickou redistribuci. Voda je transportována z hlubších vrstev do suchých povrchových vrstev (hydraulický zdvih / lift) i laterálně (do stran). Množství redistribuované vody je však velmi malé, tvoří pouze ca 0,2 % z celkového objemu vody v systému. Ačkoliv tedy jedle vodu redistribuuje, tento proces je pravděpodobně nedostatečný k tomu, aby zachránil sousední mělce kořenící dřeviny před akutním vadnutím během krátkodobého extrémního sucha. Ekologický význam hydraulické redistribuce u jedle spočívá spíše v udržení vitality vlastních jemných kořenů v suché svrchní vrstvě půdy (TÖCHTERLE et al. 2020).

Jedle bělokorá, jakožto stín snášející jehličnan s vysokým indexem listové plochy (LAI), vykazuje specifickou dynamiku intercepce. Ploché jehlice jedle a horizontální uspořádání větví ve spodní části koruny (u starších stromů) vytvářejí efektivní záchytnou plochu. Stok po kmeni u jedle je minimální (<1–2 %). Účinnost intercepce sněhu u jedle se pohybuje kolem 30%. Sněh zachycený v korunách je vystaven větru a slunečnímu záření, což vede k intenzivní sublimaci (XIAO et al. 2019). V porovnání s bukem akumulují jedlové porosty méně sněhu pod korunami. Na druhou stranu, stínění korunami zpomaluje tání sněhu, který na zem dopadl. Výsledkem je, že jarní tání v jedlovém porostu je pozvolnější než v porostu bukovém, což má pozitivní vliv na redukci jarních povodní, ale může to znamenat menší celkovou dotaci podzemních vod (SCHUME et al. 2004).

Jedle v mládí vytváří silný kůlový kořen, který se s věkem transformuje do mohutného srdčitého systému s kotevními kořeny pronikajícími hluboko do podloží. Tím zpřístupňuje vodu z hloubek nedostupných pro smrk a vytváří vertikální cesty pro vsakování srážek. Dominantní zónu kořenů má v hloubce 0,2–0,8 m, s významným přesahem do větších hloubek, nad 1–2 m v závislosti na půdním typu (ПОТЕПА et al. 2018). Kořeny jedle prostupují smykovými plochami potenciálních sesuvů a fungují jako tahové kotvy. Na flyšových a nestabilních podložích je tato funkce velmi významná. Opad jedle vykazuje ve srovnání se smrkem většinou rychlejší dekompozici, ale má jen mírně příznivější vliv na půdní chemismus (TŘEŠTÍK, PODRÁZSKÝ 2017). Jedlový opad má ale nižší intercepční kapacitu než smrkový, což umožňuje efektivnější průsak vody do půdy při menších srážkách (ILEK et al. 2021).

Hlavní hydrologické přínosy jedle tedy spočívají v aktivní tvorbě cest pro průsak vody do hlubších vrstev půdy díky vertikálnímu kořenovému systému, v prevenci eroze a sesuvů na svazích, odolnosti proti větru zajišťující kontinuitu lesního krytu a dále ve schopnosti udržet fyziologické funkce i v obdobích srážkových deficitů díky přístupu k hluboké vodě a izohydrické regulaci. Hlavní rizika a omezení spočívají ve vyšší spotřebě vody a vyšší zimní intercepci, což může vést k mírnému poklesu ročního odtoku z povodí oproti listnatým porostům. Na extrémně suchých stanovištích (např. svahy jižní expozice) je i jedle ohrožena a nemůže plnit své funkce. Zvyšování podílu zastoupení jedle by se tedy mělo dít prostřednictvím tvorby druhově a prostorově diferencovaných porostů. V kombinaci s bukem lesním vytváří jedle hydrologicky nejrobustnější systém, schopný tlumit povodňové vlny a zároveň udržovat stabilní mikroklíma v krajině.

## Smrk ztepilý

Smrk ztepilý je klíčovou hospodářskou dřevinou střední a severní Evropy. Jeho hydrologický vliv je však předmětem intenzivní diskuse, zejména v kontextu klimatické změny a pěstování smrkových monokultur mimo jejich přirozený areál. Zatímco v horských oblastech s dostatkem srážek plní smrk důležitou protierozní a retenční funkci, v nížinách a pahorkatinách se stává rizikovým faktorem.

Při poklesu vodního potenciálu dochází u smrku k nelineárnímu a náhlému poklesu hydraulické vodivosti xylému. Tento kolaps, vyvolaný kavitací (vznikem vzduchových bublin v xylému) a následnou embolií, nastává velmi rychle a při relativně nízkých úrovních embolie, což vede k úplnému přerušení vodního sloupce a následné mortalitě stromu. Tento jev činí smrk vysoce rizikovým z hlediska stability vodního režimu, neboť jeho schopnost transpiračního chlazení a odběru vody z půdy může selhat náhle s okamžitým dopadem na mikroklima a hydrologii stanoviště (AREND et al. 2021).

Smrk ztepilý je tradičně klasifikován jako dřevina s isohydrickou strategií hospodaření s vodou. To znamená, že při nástupu půdního sucha nebo při vysokém deficitu tlaku vodních par v atmosféře reaguje relativně časným uzavřením průduchů (stomat), aby udržel vodní potenciál v jehlicích a xylému nad kritickou hodnotou, která by vedla k embolii. Srovnávací studie se smrkem a bukem potvrzují, že smrk udržuje méně negativní vodní potenciály během vysychání půdy, což odráží jeho striktnější stomatální kontrolu (GOMEZ-GALLEGO et al. 2022). Tato strategie vede na jedné straně k úspoře půdní vody v počátečních fázích sucha, na straně druhé však časně uzavření průduchů omezuje fotosyntetickou asimilaci a transpirační ochlazování porostu. Pokud sucho trvá dlouho, isohydrická strategie se stává nevýhodnou, protože strom nemůže asimilovat uhlík a je zároveň vystaven tepelnému stresu.

Smrkové porosty se vyznačují mimořádně vysokou intercepční kapacitou, která je dána kombinací vysokého indexu listové plochy (LAI), hustoty zavětvení a drsnosti povrchu jehlic a kůry. Smrkové porosty mohou v závislosti na intenzitě srážek intercepčně zadržet a následně odpařit (evaporovat) 30–45 % ročního úhrnu srážek. Významná část sněhu zachycená v korunách stromů sublimuje přímo do atmosféry, aniž by roztála a vsákla do půdy. Ztráty sublimací mohou v určitých klimatických podmínkách představovat významný úbytek vodních zdrojů. Drsná šupinatá borka a architektura větví smrku brání efektivnímu stoku vody po kmeni. Podíl stoku po kmeni v monokultuře smrku je nízký, ca 6 % (NOVOSADOVÁ et al. 2023).

Smrk ztepilý má mělký kořenový systém soustředěný převážně v horních půdních horizontech. V dobách hydrologického sucha smrk rychle vyčerpává vodu z povrchových vrstev, ale nedokáže efektivně čerpat vodu z hlubších horizontů. To vede k rychlému nástupu vodního stresu a uzavírání stomat, což omezuje fotosyntézu a oslabuje obranyschopnost stromu. V půdě pod porosty smrku byla pozorována nižší kapacita vzduchu a nižší hydraulická vodivost, což naznačuje méně vyvinutý systém makropórů (JULICH et al. 2021). Absence

hlbokého prokořenění u smrku tedy snižuje schopnost půdy rychle absorbovat přivalové srážky a převádět je do hlubších zvodní.

Na druhou stranu vysoká intercepce smrku funguje jako hydraulická brzda během přivalových dešťů. Korunová vrstva efektivně transformuje srážkovou vlnu, snižuje kinetickou energii kapek dopadajících na půdu a oddaluje vrchol odtoku. Hustý zápoj smrkových porostů stíní povrch půdy, čímž zpomaluje jarní tání sněhu. To vede k časovému rozvolnění tání v rámci povodí, což snižuje riziko jarních povodní.

## Borovice lesní

Borovice lesní představuje v kontextu evropského lesnictví klíčový prvek, jehož ekologická amplituda a areálové rozšíření z ní činí jeden z nejvýznamnějších biotických regulátorů hydrologického cyklu na krajině úrovni. V současné době, charakterizované akcelerující klimatickou změnou a posunem srážkových režimů, se však tradiční pohled na borovici jako na stabilní a nenáročnou dřevinu zásadně mění.

Borovice lesní je klasifikována jako isohydrická až mírně anizohydrická dřevina. To znamená, že disponuje přísnou stomatální kontrolou vodního potenciálu listů. Jakmile klesne vodní potenciál půdy nebo neúměrně vzroste VPD, borovice aktivně uzavírá průduchy, aby udržela vodní potenciál nad kritickou hranicí, při které dochází k embolii xylému (kavitaci). Tato strategie je klíčová pro přežití na suchých stanovištích, ale má svou daň v podobě zastavení asimilace uhlíku během sucha (BÄR et al. 2017).

Intercepce srážek se v borových porostech pohybuje v širokém rozmezí, typicky mezi 20 % až 35 % ročního úhrnu srážek, v závislosti na hustotě porostu a intenzitě srážkových událostí. Obecně je intercepce borových porostů, v důsledku specifické struktury korun, nižší v porovnání s porosty smrku. Stok po kmene u borovice představuje typicky 1–5 % srážek. Kmen borovice, pokrytý hrubou borkou, funguje jako sběrná plocha, která koncentruje srážkovou vodu k patě kmene. Tento koncentrovaný vstup vody infiltruje do půdy v úzkém prstenci kolem kmene a preferenčně stéká podél silných kořenů do větších hloubek (PRINOS et al. 2023). Tento mechanismus, známý jako „double-funneling“ (koruna svádí vodu ke kmene, kořeny ji svádí do hloubky), umožňuje borovici efektivně doplňovat zásoby vody v hlubších půdních horizontech i při srážkách nižší intenzity, které by jinak byly zadrženy v povrchové vrstvě hrabanky a vypařeny. Sníh zachycený v korunách je vystaven větru a slunečnímu záření, což vede k masivní sublimaci. Borovice, která propustí více sněhu na zem, tak umožňuje vytvoření mocnější sněhové pokrývky, která při jarním tání sytí půdní profil a doplňuje podzemní vody.

Na hlubokých písčitých půdách vytváří borovice robustní kulový kořen doplněný systémem hlubokých kotevních kořenů a rozsáhlých povrchových horizontálních kořenů. Tato struktura je v literatuře popisována jako „klec“ (*cage structure*), která pevně svírá velký objem půdy. Díky tomu je borovice mechanicky stabilnější než smrk, ale především má přístup k vodě v hloubkách, které jsou pro jiné dřeviny nedostupné. V oblastech s dostupnou hladinou podzemní vody (např. váté písky v Polabí) mohou kořeny borovice pronikat až do kapilární třásně nad hladinou podzemní vody. V takových případech porost přímo čerpá podzemní vodu pro transpiraci, což může vést k lokálnímu poklesu hladiny podzemní vody, zejména v letních měsících (VINCKE, THIRY 2008).

Vliv borovice na povodně je ambivalentní. U malých a středních povodní mají borové lesy vysokou retenční schopnost díky drsnosti povrchu a infiltraci (pokud není povrch půdy hydrofobní). Nicméně při extrémních srážkách, kdy dojde k nasycení retenční kapacity, nebo v případě silně hydrofobní půdy po suchém období, může být odtok z borového lesa rychlý a přispívat k bleskovým povodním.

Ačkoliv je borovice adaptována na suchu, extrémní epizody sucha spojené s vlnami veder ukazují její limity. Kombinace dlouhodobého deficitu srážek a vysokého VPD v roce 2018 vedla na mnoha lokalitách k selhání hydraulického systému, odumírání jehlic a následnému napadení sekundárními škůdci a patogeny. Mortalita borovice na stanovištích nižších a středních poloh signalizuje, že klimatická změna posouvá tyto ekosystémy mimo její ekologické optimum (DEBEL et al. 2021). Borovice je významným spotřebitelem vody, zejména v mladém věku. Její celoroční intercepce a transpirace snižují míru doplňování podzemních vod ve srovnání s listnatými lesy.

## Modřín opadavý

Modřín opadavý, jako jediný evropský opadavý jehličnan, představuje unikátní ekofyziologický model. Jeho strategie hospodaření s vodou se zásadně liší od stálezelených konifer (smrk, borovice) i od listnatých dřevin (buk, dub). Historicky byl modřín využíván jako meliorační a zpevňující dřevina, zejména v imisních oblastech, kde prokázal vysokou odolnost vůči znečištění ovzduší díky každoroční obnově asimilačního aparátu. Dnes se však pozornost přesouvá k jeho schopnosti prosperovat v sušších a teplejších podmínkách a k jeho vlivu na vodní bilanci krajiny.

Modřín je řazen mezi anisohydrické druhy, které udržují průduchy otevřené a pokračují v transpiraci a fotosyntéze i při poklesu vodního potenciálu půdy. Vodní potenciál v jejich pletivech klesá paralelně s potenciálem půdy. Tato „riskantní“ strategie umožňuje modřínu maximalizovat zisk uhlíku (růst) v obdobích mírného stresu, ale vystavuje jej vyššímu riziku kavitace (přerušení vodního sloupce v xylému) při extrémním suchu (ANFODILLO et al. 1998).

Modřín vykazuje vysokou citlivost a plasticitu v reakci na meteorologické proměnné, zejména na deficit tlaku vodních par a sluneční radiaci. Zatímco smrk reaguje na zvyšující se VPD poměrně brzkým uzavřením stomat (stomatální limitace), modřín udržuje vysokou vodivost i při vyšších hodnotách VPD, pokud je v půdě dostatek vody. V horkých letních dnech s vysokou radiací funguje modřínový porost jako výkonná „pumpa“, která aktivně odčerpává vodu z půdního profilu. Pokud je tento odběr vyšší než doplňování srážkami, dochází k rychlému vyčerpávání zásob půdní vláhy, což může vést k vysušení stanoviště rychleji než pod porostem smrku. Aby modřín udržel tuto strategii, musí mít přístup k vodním zdrojům. To je zajištěno jeho kořenovým systémem, který je schopen čerpat vodu z větších hloubek než mělký systém smrku.

V bezlistém stavu je plocha povrchu koruny (zastoupená pouze větvemi a kmenem) výrazně menší. Intercepční kapacita zde klesá na minimum. To umožňuje, aby většina zimních srážek (sníh i déšť) propadla korunou až na povrch půdy. Vodní hodnota sněhu (SWE) akumulovaného pod opadavými porosty (včetně modřínu) může být o 20–40 % vyšší než pod sousedními smrkovými porosty (BARNHART et al. 2016). Modřín má jemnější, vzdušnější korunu s jehlicemi uspořádanými ve svazečcích na brachyblastech. Tato struktura má specifickou retenční kapacitu. Jehličnany mají obecně vyšší kapacitu zadržení vody než listnáče, přičemž modřín se pohybuje na dolní hranici kapacity jehličnatých dřevin (PFLUG et al. 2021). Při srážkách nízké intenzity (mrholení, slabý déšť) může být intercepční ztráta u modřínu srovnatelná se smrkem, protože voda ulpívá na povrchu jehlic a odpařuje se. Při intenzivních srážkách dochází u modřínu ve srovnání se smrkem k rychlejšímu nasycení koruny.

Hrubá, šupinatá borka starých modřínů má vysokou nasákavost a drsnost, což snižuje stok po kmeni. Ten je zhruba srovnatelný se smrkem a mnohem nižší než u buku a dalších listnáčů s hladkou kůrou. Vyšší akumulace sněhu pod modříny je jasným hydrologickým přínosem, ale proces tání zahrnuje i významná rizika. Bezlistá koruna modřínu má vysokou

transmisivitu pro krátkovlnné záření. Sníh pod modřiny je tak vystaven přímému slunečnímu svitu výrazně více než pod smrky. Navíc tmavé kmene a větve modřinů absorbují záření, ohřívají se a vyzařují dlouhovlnnou radiaci. Tato kombinace vede k tomu, že tání sněhu pod modřinovými porosty je rychlejší a intenzivnější než pod smrkovými porosty, a často i rychlejší než na volné ploše. V případě nahrazení smrkových porostů modřinám může docházet (podobně jako u listnáčů) k synchronizaci tání s otevřenými plochami, což může vést ke zvýšení kulminace jarních odtoků a zvýšení rizika jarních povodní (Izwońska et al. 2025).

Modřin vytváří mohutný, srdčitý až kůlový kořenový systém, který je schopen pronikat do značných hloubek. Může tak čerpat vodu z hlubších půdních horizontů a skalních puklin. Hluboké kořeny modřinu mechanicky rozrušují podloží a vytvářejí kanály, podél kterých může voda infiltrovat do hloubky. Modřinové porosty vykazují jedny z nejvyšších infiltračních rychlostí.

Biogeochemické aspekty pěstování modřinu přináší určitá rizika, zejména v oblasti kvality vody. Pokud dojde k rychlé mineralizaci opadu v době, kdy vegetace není aktivní (pozdní podzim, teplá zima) nebo kdy kořenový systém není schopen živiny zachytit (např. v monokulturách bez podrostu), hrozí vyplavování nitrátů do podzemních a povrchových vod. Zvýšené koncentrace nitrátů vedou k acidifikaci půdy a mohou zhoršovat kvalitu pitné vody v nádržích ležících v zalesněných povodích. Ačkoliv modřin okyseluje půdu méně než smrk, v čistých monokulturách na chudých substrátech může také docházet k podzolizaci. Ve smíšených porostech (např. s bukem) se tento efekt eliminuje a dochází naopak k melioraci půdy.

## Postupy obnovy porostů na kalamitních holinách

Obnova kalamitních holin vzniklých rychlým velkoplošným rozpadem porostů v důsledku napadení kůrovcem je specifická nutností obnovit lesní prostředí v krátkém časovém úseku na plochách o výměře často výrazně převyšující zákonem danou velikost holé seče. Pro rozsáhlé kalamitní holiny je typický výskyt teplotních extrémů v letních i zimních měsících. Kalamitní holiny jsou vysoce nestabilní z hlediska pedologických procesů. Náhlé odlesnění narušuje vodní režim a stabilitu půdních agregátů. Specifickým jevem na holinách je vymrzání sazenic, ke kterému dochází v důsledku cyklického promrzání a tání povrchové vrstvy půdy. Kalamitní holiny jsou zdrojem emisí oxidu uhličitého v důsledku urychlené mineralizace humusu. Ponechání plochy bez vegetačního krytu vede k vyplavování živin a erozi. Aktivní management, zaměřený na rychlé obnovení vegetačního krytu, je klíčový pro minimalizaci ztrát organické hmoty a stabilizaci půdy.

Na otevřených plochách dochází k explozivnímu rozvoji světlomilné buřně. Dominantními a nejproblematictějšími druhy jsou třtiny, zejména třtina křovištní (*Calamagrostis epigejos*). Tento druh trávy vytváří hustý kořenový systém a nadzemní biomasu. Transpirace vody porostem třtiny je řádově 3–5× vyšší než transpirace druhově bohatého bylinného pokryvu nebo zastíněného povrchu. Buřň vyčerpá dostupnou vodu v horních horizontech dřívě, než ji stihne využít mělký kořenový systém sazenic. V zimním období dochází pod tíhou sněhu k poléhání uschlé biomasy třtiny, což sazenice mechanicky deformuje a zvyšuje riziko houbových infekcí.

Pokud se vyskytuje přirozená obnova pocházející ze smýceného mateřského porostu, bývá většinou nedostatečná a v důsledku intenzivní těžby je nezřídka poškozena či úplně zničena. Pod smrkovými porosty bývá přirozené zmlazení tvořeno opět převážně smrkem, bez žádoucího zastoupení listnatých dřevin a jedle.

Vzhledem k výše popsaným rizikům je žádoucí při obnově kalamitních holin upřednostňovat kombinaci přirozených procesů s cílenými pěstebními zásahy. Tradiční postupy obnovy založené na okamžitém a jednorázovém zalesnění holin cílovými dřevinami se na těchto extrémních stanovištích ukazují jako biologicky rizikové, neboť mikroklimatické charakteristiky kalamitních holin jsou neslučitelné s ekologickými nároky mnoha klimaxových dřevin v jejich juvenilním stadiu. Na kalamitních holinách lépe odrůstají světlomilné dřeviny jako jsou bříza, osika, dub, jeřáb, modřín, borovice (a smrk). Pro obnovu stínomilných dřevin (buk, jedle) je výhodnější využít podsadbu pod přípravné dřeviny.

## Kombinovaná obnova porostů

Základním principem kombinované obnovy je funkční a prostorová diferenciace porostu již ve fázi jeho zakládání. Jsou vylišovány dvě kvalitativně odlišné složky: kostra a výplň.

Kostra porostu představuje stabilizační a hodnotovou páteř budoucího lesa. Je tvořena dřevinami, které jsou pro dané stanoviště typologicky vhodné, plnicí funkce produkční či meliorační a zpevňující, avšak jejichž přirozená obnova je na dané lokalitě nejistá, pomalá nebo nemožná (např. z důvodu absence mateřského porostu). Dřeviny kostry mají obvykle strategii K-selekce (klimaxové dřeviny jako buk, jedle, dub) nebo přechodnou strategii s vysokou produkcí (modřín, douglaska). Jsou to stromy, které mají v mýtním věku tvořit horní etáž a být nositeli nejvyšších sortimentů dříví. Při tvorbě kostry je potřebné zajistit rovnoměrné nebo skupinové rozmístění stromů po ploše tak, aby v budoucnu (např. ve věku 40–60 let) tvořily požadovaný podíl v druhové skladbě. Kostra se zakládá zpravidla umělou obnovou.

Výplň porostu v jeho juvenilních fázích plní roli primárně výchovnou, mikroklimatickou a půdoochrannou. Je tvořena dřevinami s r-strategií (pionýři: bříza, osika, jíva, jeřáb) nebo ji tvoří silně se zmlazující hospodářské dřeviny (smrk, borovice). Dřeviny výplně se vyznačují rychlým růstem v mládí, schopností obsadit volný prostor a tolerancí k extrémům holiny. Chrání citlivé jedince kostry (např. buk, jedle) před mrazem, slunečním úpalem a vysušujícím větrem. Svým rychlým růstem a bočním tlakem nutí dřeviny kostry porostu k výškovému přírůstu a přirozenému vyvětování (čistění kmene), čímž zvyšují kvalitu jejich budoucí dřevní hmoty. Opad listnatých pionýrů je bohatý na živiny a snadno se rozkládá, což urychluje revitalizaci půdy degradované holosečí. Výplň vzniká primárně přirozenou obnovou. V případě absence náletu může být doplňována sítí nebo sadbou přípravných dřevin, ale ekonomická podstata kombinované obnovy spočívá právě v přirozené obnově této složky.

## Dvoufázová kombinovaná obnova porostů

Dvoufázová obnova může být považována za specifickou formu kombinované obnovy. Postupy dvoufázové obnovy jsou podrobněji metodologicky popsány v pracích SOUČEK et al. (2016), DUŠEK et al. (2022) a LEUGNER et al. (2023). Dvoufázová obnova rozkládá obnovu do delšího časového úseku a využívá sukcesních procesů. Postup obnovy předpokládá dočasné využití přípravných dřevin v obnově lesa a je velmi vhodným opatřením na kalamitních holinách, kde je žádoucí omezit vznik rozsáhlých stejnověkových porostů. Skládá se ze dvou fází:

1. Fáze přípravná (Stabilizační): cílem je co nejrychleji zajistit krytí půdy. Využívá se přirozeného zmlazení rychle rostoucích dřevin jako břízy, jeřábu, osiky, olše a vrby, případně se tyto dřeviny obnovují sítí či výsadbou. V této fázi dochází k rychlému obnovení transpirace, zpevnění půdy kořeny a odčerpání přebytečného dusíku. Stínění půdy přípravnými dřevinami vytváří příznivé porostní mikroklima, tlumí tepelné extrémy

a zabraňuje enormně rychlému rozkladu humusových horizontů, které jsou významným rezervoárem vody. Opad přípravných dřevin zároveň melioruje stanoviště.

2. Fáze cílová (Produkční): pod ochranou přípravného porostu (cca po 5–15 letech v závislosti na stanovištních a porostních podmínkách) se vnášejí cílové dřeviny (buk, jedle, stín snášející cenné listnáče). Tyto dřeviny v polostínu lépe odrůstají, netrpí tolik suchem a teplotními výkyvy. Přípravný porost se postupně uvolňuje, případně může být maloplošně jednorázově odtěžen. Vybrané kvalitní a vitální stromy přípravného porostu mohou být alespoň dočasně začleněny do porostu cílových dřevin.

V současnosti je diskutována možnost využití smrku ztepilého jako přípravné dřeviny, z důvodu dobrého odrůstání smrku na kalamitních plochách a perspektivy ekonomického využití dřevní hmoty. Tuto variantu lze připustit v oblastech vyšších LVS (od 5. LVS), v oblastech, kde se vyskytuje vitální přirozená obnova smrku a kde smrkové porosty nevykazují symptomy tzv. chřadnutí smrku. Symptomy chřadnutí se projevují žloutnutím asimilačního aparátu smrku ve všech věkových stupních, výrony pryskyřice na kmeni, ztrátou přírůstu, poruchami rašení až následným hynutím stromů. Toto chřadnutí je pravděpodobně spojeno s masivním napadením václavkami *Armillaria* ssp. (DUŠEK et al. 2018). V těchto oblastech je vysoké riziko rozpadu přípravného porostu smrku ještě před splněním jeho funkce, a použití smrku jako přípravné dřeviny by zde mělo být vyloučeno. V ostatních oblastech by měl být smrk jako přípravná dřevina využíván pouze z přirozené obnovy. Z důvodu nepříznivých melioračních vlastností smrkového opadu je zde zároveň žádoucí podporovat jakoukoli listnatou příměs.

Modřín opadavý je další dřevinou, která vykazuje dobrý růst v prostředí kalamitních holin a je tedy zvažován i jako dřevina přípravná. V minulosti byl využíván v porostech náhradních dřevin po imisních kalamitách, např. v Krušných horách. Nevýhodou je poměrně nepříznivý vliv opadu modřínových monokultur na chemismus lesních půd a také skutečnost, že modřín dosahuje nejvyšší kvality ve směsích s dalšími dřevinami se zastoupením do ca 30 %. Nevhodné je využití modřínu na všech vodou ovlivněných stanovištích. Použití modřínu jako přípravné dřeviny by se tedy mělo ideálně omezit na relativně malé plochy (do 0,3 ha) původem z přirozené obnovy se současnou podporou jakékoli příměsi dřevin s příznivou meliorační funkcí. V případě umělé obnovy lze využít snížené hektarové počty 1 200 ks. Výhodou využití modřínu je možnost zachování části nejkvalitnějších jedinců z přípravného porostu a jejich začlenění do směsi cílových dřevin. Využití modřínu na kalamitních holinách je podrobněji popsáno v práci LEUGNER et al. (2024a).

## Postupy výchovy porostů

Porostní výchova (prořezávky a probírky) je nejdůležitější nástroj pro aktivní formování porostní struktury a regulaci konkurenčních vztahů. Výchovné zásahy umožňují usměrňovat druhové složení porostu, podporovat kvalitní jedince, zvyšovat statickou stabilitu jednotlivých stromů i celých porostů, ovlivňovat koloběh živin, radiační, tepelný a hydrický režim porostů. Modely výchovy porostů lesních dřevin byly tradičně koncipovány pro nesmíšené porosty hlavních hospodářských dřevin (SM, BO, BK, DB) diferencovaně podle cílových hospodářských souborů, kde řídicím ukazatelem pro zásah byl věk porostu nebo horní porostní výška (SLODIČÁK, NOVÁK 2007). Při výchově smíšených porostů založených ve skupinovitém smíšení lze doporučit sledovat zásady výchovy formulované v modelech výchovy pro nesmíšené porosty jednotlivých dřevin. Při jednotlivém nebo řadovém smíšení nelze jednoduše stanovit modely výchovy z důvodu velkého množství variant porostních směsí a při zásazích je nutno individuálně vycházet z biologických nároků zastoupených dřevin, aktuálního stavu porostu a hospodářského cíle. Problematika výchovy porostních směsí je mnohem komplikovanější a vyžaduje vyšší lesnickou odbornost a zkušenost než výchova porostů stejnorodých.

Včasně zahájená porostní výchova již ve stadiu nárostů či mlaziny je klíčovým předpokladem pro zachování (vybudování) stability a zvýšení druhové diverzity následných porostů. Zanedbání výchovy může mít i ve smíšených porostech nepříznivé následky (přeštíhlení, zkrácení korun apod.), které nelze výchovou v pozdějším věku uspokojivě korigovat. Z hlediska vytvoření příznivého štíhlostního kvocientu je žádoucí provést první výchovné zásahy v jehličnatých dřevinách nejpozději při horní porostní výšce 5–7 m, při překročení porostní výšky 10 m již nelze štíhlostní kvocient výchovnými zásahy relevantně ovlivnit. Včasnost výchovného zásahu je také klíčová pro udržení délky korun, zvláště u rychle rostoucích světломilných dřevin. Principy výchovy přípravných dřevin břízy bělokoré, topolu osiky, olše lepkavé a jeřábu ptačího ve směsích s dalšími dřevinami jsou popsány např. v práci DUŠEK et al. (2022) nebo LEUGNER et al. (2024b).

Výchovné zásahy, především silné, zlepšují růstovou odpověď dřevin v souvislosti se suchem. V jehličnatých porostech mají silné výchovné zásahy vliv na zvýšení resilience, tedy rychlejší obnovou růstu po suchých epizodách. Výchovné zásahy v porostech listnatých dřevin zvyšují rezistenci, tedy schopnost udržet růst a fyziologické procesy v průběhu period sucha. Snížení počtu stromů má zpravidla za následek zvýšení transpirace jednotlivých stromů, díky zvýšené ploše osluněného jehličí a vyšší aerodynamické drsnosti porostu (BREDA et al. 1995). Na druhou stranu, transpirace smrkového porostu jako celku může po provedeném pěstebním zásahu poklesnout až o několik desítek procent (LAGERGREN et al. 2008), protože transpirace vysoce koreluje s LAI (GRANIER et al. 2000). Porostní výchova dále vede ke snížení porostní intercepce snížením záchytné plochy (snížením LAI), a tím k zvýšení množství dostupné vody v půdě (BREDA et al. 1995; SIMONIN et al. 2007). Veškeré výchovné zásahy na lokalitách ohrožených suchem je vhodné provádět mimo vegetační období, nejlépe v posledním čtvrtletí (říjen–prosinec). Vzniká tak předpoklad lepšího zásobení vodou v zimních měsících ve výchovou proředených porostech, což zlepší dostupnost vody v půdě a přírůst v následných obdobích sucha.

## Ponechávání mrtvého dřeva a těžebních zbytků po kalamitních těžbách

Historicky bylo mrtvé dřevo v hospodářských lesích vnímáno jako nežádoucí prvek, který může představovat riziko šíření škůdců, zvyšovat nebezpečí požárů nebo komplikovat pěstební práce. Odstranění veškeré nekromasy z porostů však může mít za následek nejen ochuzování stanovišť o živiny, ale i signifikantní změny v hydrologickém režimu. Nekromasa není jen pasivním reziduem, ale dynamickou složkou ekosystému, která aktivně interaguje s vodním cyklem na několika úrovních – od intercepce srážek přes modifikaci evaporace až po ovlivnění infiltrace a podpovrchového odtoku (SHOROHOVA et al. 2022). V tomto kontextu nabývá na významu studium vlivu mrtvého dřeva, ať už ve formě silného mrtvého dřeva nebo těžebních zbytků, na distribuci srážek, půdní vlhkost a povrchový odtok.

Jakmile strom odumře a stane se součástí detritického (rozkladného) řetězce, začíná proces dekompozice, který zásadně mění jeho hydraulické vlastnosti. Houbové patogeny, které kolonizují mrtvé dřevo, enzymaticky rozkládají polymery buněčných stěn. Tento proces vede ke ztrátě hmotnosti a hustoty dřeva, čímž se zvyšuje celková pórovitost materiálu. Z hydrologického hlediska je klíčové, že rozkladem vznikají nové typy pórů a zvyšuje se vnitřní povrch, na který se může voda vázat. Studie naznačují, že rozkladem vznikají nové typy pórů a zvyšuje se vnitřní povrch, na který se může voda vázat. Studie naznačují, že maximální obsah vody v tlejícím dřevě může v pokročilých stádiích rozkladu mnohonásobně převýšit hmotnost samotné sušiny dřeva (PŘÍVĚTIVÝ, ŠAMONIL 2021).

Různé typy hnilob vedou k odlišným fyzikálním strukturám dřevního rezidua. Houby způsobující bílou hnilobu rozkládají lignin i celulózu. Výsledkem je často vláknitá, houbovitá struktura, která si zachovává určitou soudržnost, ale má extrémně vysokou nasákavost. Dokáže rychle absorbovat srážkovou vodu a dlouho ji zadržovat, což z ní činí významný rezervoár vody v ekosystému. Houby červené hniloby preferenčně degradují celulózu a hemicelulózu, zatímco ligninová kostra zůstává relativně nedotčena (byť modifikována). Dřevo se rozpadá na kostkované fragmenty a prach. Tento typ rozkladu vytváří strukturu, která je sice porézní, ale často méně schopná kapilárního vedení vody a zadržování velkých objemů ve srovnání s vláknitou strukturou bílé hniloby.

V pokročilých stádiích rozkladu se hygroscopicita dřeva zvyšuje. Rozložené dřevo reaguje na změny vzdušné vlhkosti citlivěji než dřevo čerstvé. Tato vlastnost má významný dopad na mikroklima: v obdobích s vysokou vzdušnou vlhkostí (noc, ráno) tlející dřevo „nasává“ vlhkost ze vzduchu, čímž snižuje rosný bod v nejbližším okolí, a během dne, kdy teplota stoupá, tuto vodu odpařuje, čímž své okolí ochlazuje (latentní teplo výparu).

Proces rozkladu dřeva neprobíhá lineárně a jeho rychlost i dopad na vodní bilanci jsou silně závislé na druhu dřeviny. Bukové dřevo podléhá rozkladu nejrychleji. Kmeny o průměru 50–90 cm se rozloží průměrně za 51 let. Co je však hydrologicky podstatné, je rychlost nárůstu vlhkosti. Bukové kmeny velmi rychle ztrácejí svou hustotu a paralelně s tím rapidně zvyšují svou schopnost nasáknout vodou. Bukové dřevo se tak stává „vodním rezervoárem“ mnohem dříve než dřevo jehličnanů. V pokročilých stádiích rozkladu obsahovaly bukové kmeny v Žofinském pralese až 391 kg vody na m<sup>3</sup>. Jehličnany vykazovaly výrazně delší

dobu rozkladu (71 let pro smrk, 72 let pro jedli). Jejich nárůst vlhkosti v čase byl pomalejší. Smrkové dřevo si déle zachovává svou strukturální integritu a nižší pórovitost, což omezuje rychlost infiltrace vody do kmene. Maximální obsah vody u smrkových kmenů byl nižší, kolem  $279 \text{ kg/m}^3$  (PŘÍVĚTIVÝ, ŠAMONIL 2021). V lesích s dominancí listnáčů tedy hraje mrtvé dřevo dynamičtější roli v krátkodobém hydrologickém cyklu (rychlé nasycení a uvolnění), zatímco v jehličnatých lesích představuje stabilnější, dlouhodobou složku retence, která se ale aktivuje pomaleji.

Zvýšení hydraulické drsnosti povrchu přítomností těžebních zbytků je jedním z neúčinnějších opatření proti vodní erozi a pro podporu vsaku. Ležící kmeny a větve zvyšují drsnost povrchu, zpomalují povrchový odtok a podporují infiltraci, čímž přispívají k protierozní ochraně a zmírňování povodňových vln. Na strmějších svazích ale voda stéká po povrchu zbytků rychleji a retenční kapacita klesá. Nad ležícími kmeny se akumuluje splavený sediment a organická hmota. Vytvářejí se tak mikrolokality s hlubší půdou, vyšším obsahem živin a lepší vodní kapacitou, které slouží jako „hotspots“ pro uchycení vegetace. Tento proces je klíčový pro obnovu degradovaných svahů. Dřevo padlé do vodních toků významně ovlivňuje morfologii koryta. Vytváří tůně, schody a kaskády, které zpomalují proudění vody, tlumí její energii a snižují riziko zahlučování koryta.

Ponechané těžební zbytky mohou sloužit jako mulč. Tato vrstva organické hmoty na povrchu půdy funguje jako mechanická bariéra, která na jedné straně zachycuje část srážek (intercepční ztráta), ale na straně druhé výrazně omezuje neproduktivní výpar z půdy (evaporaci). Půda pod mulčem má v létě výrazně nižší teplotní maxima a menší denní amplitudy teplot než půda nekrytá (DHAR et al. 2022). Drsnost povrchu tvořená těžebními zbytky snižuje rychlost větru těsně nad povrchem, což omezuje odvod nasyceného vzduchu a dále brzdí výpar (RING et al. 2015). V celkové bilanci může intercepce na lesním opadu a zbytcích představovat ztrátu 10–25 % z celkového úhrnu srážek. Ačkoli intercepční kapacita těžebních zbytků ponechaných na ploše může být poměrně vysoká, redukce evaporace tento deficit v dlouhodobé bilanci (zejména v suchých periodách) dostatečně kompenzuje. Ponechání drobných těžebních zbytků, především větví, hraje pozitivní roli při samotné těžbě. Vytvoření ochranné vrstvy z klestu v těžebních linkách chrání půdu před zhutněním těžkou harvesterovou technologií. Ponechání zbytků působí preventivně nejen proti trvalému poškození hydrologického režimu stanoviště, ale také zmírňuje nepříznivé změny v mikrobiální aktivitě v důsledku těžeb (HARTMANN et al. 2012).

V mnoha ekosystémech (např. horské smrčiny) je přirozená obnova silně vázána na tlející kmeny. Semena klíčící na minerální půdě jsou vystavena riziku rychlého vyschnutí svrchní vrstvy půdy. Naproti tomu tlející dřevo, díky své houbovitě struktuře a často i pokryvu mechorostů, udržuje stabilní vlhkost i v obdobích krátkodobého sucha. Mechorosty na kmeni fungují jako knot, který nasává vodu a udržuje substrát vlhký (SANCHEZ et al. 2009). Tlející dřevo je bohaté na mykorhizní houby, které jsou pro semenáčky nezbytné. Tyto houby nejen zpřístupňují živiny, ale také aktivně transportují vodu k semenáčkům, čímž zvyšují jejich šanci na přežití.

V lesích s hospodářskou (dřevoprodukční) funkcí, které tvoří většinu lesního fondu České republiky, není plošná bezzásahovost ekonomicky, sociálně ani politicky průchozí variantou. Vlastníci lesů jsou závislí na příjmech z prodeje dříví a jsou vázáni legislativou k péči o lesní majetek. Ponechání části nekromasy je nutno chápat jako investici do stability vodního (a živinového) režimu, která se vrací v podobě vyšší odolnosti porostů vůči stresu ze sucha a lepší ochrany půdního fondu. V oblastech ohrožených suchem a na stanovištích s nízkou retenční kapacitou půdy je vhodné ponechat minimálně 30 % těžebních zbytků rovnoměrně rozprostřených po ploše (ovšem s ohledem na umožnění případné umělé obnovy). Při těžbě na svazích je nutné orientovat těžební zbytky a ležící kmeny po vrstevnici, aby se maximalizoval jejich efekt na zpomalení odtoku. Ponechávání části dřevní hmoty k úplnému rozkladu by mělo být standardem nejen z důvodu opatření pro zvýšení retenční kapacity lesů, ale i z důvodů zvýšení biodiverzity. V tomto kontextu je žádoucí diverzifikovat ponechané mrtvé dřevo na stojící a ležící (Tab. 1).

**Tab. 1:** Kvantitativní doporučení pro ponechání nekromasy z hlediska zachování hydrologických funkcí.

Typ struktury mrtvého dřeva	Doporučené množství (v lesích s dřevoprodukční funkcí)	Funkce
Vysoké pařezy / souše	20–50 ks/ha (cca 5–10 % porostu)	Mikroklima, biodiverzita
Ležící hroubí	30–50 m <sup>3</sup> /ha	Infiltrace, ochrana proti erozi, efekt houby („sponge effect“) – ovlivnění mikroklimatu
Těžební zbytky (klest)	Ponechat min 30 %, lépe aspoň 50 % objemu na ploše	Ochrana půdy před zhutněním a vysycháním, zásoba živin
Břehové porosty malých vodních toků (potoky, bystřiny, prameniště)	Pásmo šířky min. 15 m, minimalizace odstraňování nekromasy, možno zvážit i bezzásahovost; nutný je však vhodný management kmenů padlých do koryta z hlediska rizika poškození jeho hydraulických vlastností	Filtrace vody, stabilita břehů

## 4 ZÁVĚR

Metodika reaguje na současné změny lesních ekosystémů, vyvolané rozpadem smrkových monokultur v důsledku kůrovcových kalamit a globální klimatické změny, s cílem poskytnout lesnické praxi přehledné poznatky a nástroje pro udržení a urychlenou obnovu hydrických funkcí lesa. Z analýzy hydrologických, pedologických a ekofyziologických dat vyplývá, že obnova kalamitních holin nemůže spoléhat na šablonovité postupy minulosti, ale musí integrovat poznatky o specifických nárocích a funkcích jednotlivých dřevin. Potvrzuje se nutnost odklonu od pěstování stejnověkových monokultur směrem k druhově a prostorově diferencovaným porostům. Zásadní roli v moderním managementu hrají přípravné dřeviny (bříza, osika, jeřáb), které rychle stabilizují mikroklima, zlepšují infiltraci a připravují půdu pro cílové dřeviny.

Metodika rovněž zdůrazňuje, že voda v lese není ovlivněna pouze druhovou skladbou a strukturou porostu, ale také prací s mrtvým dřevem a těžebními zbytky. Ponechání biomasy na ploše funguje jako efektivní prevence neproduktivního výparu a eroze. Implementace navržených postupů – od dvoufázové obnovy po specifické výchovné zásahy – představuje cestu k vytvoření lesů, které budou nejen produkovat dřevní hmotu, ale budou schopny zachřt vodou v povodí, tlumit povodňové vlny a odolávat budoucím klimatickým extrémům.

## 5 SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Tato metodika přináší posun od tradičních pěstebních schémat k adaptivním strategiím zaměřeným na hydrologickou bezpečnost. Přínos a novost spočívá především ve zpřístupnění poznatků a formulaci opatření v širokém spektru postupů lesnického managementu. V oblasti zakládání lesa jsou formulovány hydrologické přínosy a možná rizika využití vybraných domácích druhů dřevin využitelných ke kombinované (dvojfázové) obnově kalamitních holin, s důrazem na využití přípravných dřevin. Jsou nastíněny principy výchovy druhově pestřejších porostů a jejich vliv na hydrický režim lesa. V rámci těžebních postupů, které jsou vzhledem k charakteru kalamitní těžby z větší části neplánovatelné a velmi různorodé, jsou navrženy postupy pro ponechávání části hroubí a nehroubí těžebního porostu z hlediska udržení hydrologických funkcí lesa.

## 6 POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Metodika je určena pro lesní hospodáře, vlastníky lesů, správce lesních majetků. Dále je určena pro orgány státní správy lesů, taxační kanceláře, lesnické školy, univerzity a lesnický výzkum.

V digitální podobě je plnotextově dostupná na webových stránkách [www.vulhm.cz](http://www.vulhm.cz).

## 7 EKONOMICKÉ ASPEKTY

Aplikace navržených postupů má významné ekonomické dopady, které se projevují jak v přírodních nákladech na pěstební činnost, tak v dlouhodobé hodnotě lesního majetku a ekosystémových služeb. Ekonomická podstata kombinované a dvoufázové obnovy spočívá v maximálním využití přirozené obnovy pro složku „výplně“ (pionýrské dřeviny). Tím odpadají náklady na nákup sadebního materiálu a výsadbu na velké části plochy.

Výsadba cílových dřevin (jedle, buk) pod ochranou přípravného porostu výrazně snižuje mortalitu sazenic způsobenou suchem, mrazem či slunečním úpalem. To eliminuje náklady na opakované vylepšování a opakované zalesňování, které je na holinách časté. Rozsah opakované obnovy se v ČR v letech 2000–2019 pohyboval od 3087 do 5246 hektarů.

Zvýšením druhové pestrosti a využitím dřevin s různou strategií hospodaření s vodou (rozložení rizika) se minimalizuje hrozba velkoplošných rozpadů porostů v budoucnu. Tím se zajišťuje kontinuita výnosů a snižuje riziko ekonomických ztrát z kalamitního dříví. Při kalamitním rozpadu porostů je ohrožena samotná existence lesních ekosystémů a všech jeho funkcí. Sociálně ekonomická cena dřevoprodukční funkce lesa v ČR činí v průměru 10292 Kč na hektar za rok a nedřevoprodukční 2341 Kč.

Ponechání doporučených 30–50 % těžebních zbytků na ploše může představovat ušlý zisk z prodeje energetické štěpky. Tuto ztrátu je však nutné chápat jako investici do ochrany půdního fondu. Odvezení zbytků by vedlo k degradaci půdy, erozi a zhutnění, jejichž následná sanace by výrazně převýšila krátkodobý výnos z biomasy.

## 8 DEDIKACE

Metodika byla vypracována v rámci grantové podpory MZe projektu NAZV QK22010189 „Vliv odlesnění na vodní režim malých povodí“ a institucionální podpory MZE-RO0123.

## 9 LITERATURA

### Seznam použité a související literatury

- ANFODILLO T., RENTO S., CARRARO V., FURLANETTO L., URBINATI C., CARRER M. 1998. Tree water relations and climatic variations at the alpine timberline: Seasonal changes of sap flux and xylem water potential in *Larix decidua* Miller, *Picea abies* (L.) Karst. and *Pinus cembra* L. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:19980110>, 55. DOI: 10.1051/forest:19980110
- AREND M., LINK R.M., PATTHEY R., HOCH G., SCHULDT B., KAHMEN A. 2021. Rapid hydraulic collapse as cause of drought-induced mortality in conifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118 (16): e2025251118. DOI: doi:10.1073/pnas.2025251118
- ASPELMEIER S., LEUSCHNER C. 2004. Genotypic variation in drought response of silver birch (*Betula pendula*): Leaf water status and carbon gain. *Tree Physiology*, 24: 517-528. DOI: 10.1093/treephys/24.5.517
- ATTIA Z., DOMEK J.C., OREN R., WAY D.A., MOSHELION M. 2015. Growth and physiological responses of isohydric and anisohydric poplars to drought. *Journal of Experimental Botany*, 66 (14): 4373-4381. DOI: 10.1093/jxb/erv195
- BÄR A., NARDINI A., MAYR S. 2017. Post-fire effects in xylem hydraulics of *Picea abies*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica*. *New Phytologist*, 217. DOI: 10.1111/nph.14916
- BARNHART T., MOLOTCH N., LIVNEH B., HARPOLD A., KNOWLES J., SCHNEIDER D. 2016. Snowmelt rate dictates streamflow. *Geophysical Research Letters*, 43: 8006-8016. DOI: 10.1002/2016GL069690

- BEARUP L., MAXWELL R., CLOW D., MCCRAY J. 2014. Hydrological effects of forest transpiration loss in bark beetle-impacted watersheds. *Nature Climate Change*, 4: 481-486. DOI: 10.1038/nclimate2198
- BELLO J., HASSELQUIST N., VALLET P., KAHMEN A., PÉROT T., KORBOULEWSKY N. 2019. Complementary water uptake depth of *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in mixed stands during an extreme drought. *Plant and Soil*, 437. DOI: 10.1007/s11104-019-03951-z
- BERGER T.W., BERGER P. 2014. Does mixing of beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*) litter hasten decomposition? *Plant Soil*, 377 (1-2): 217-234. DOI: 10.1007/s11104-013-2001-9
- BLEDÝ M., VACEK S., BRABEC P., VACEK Z., CUKOR J., ČERNÝ J., ŠEVČÍK R., BRYNYCHOVÁ K. 2024. Silver Fir (*Abies alba* Mill.): Review of ecological insights, forest management strategies, and climate change's Impact on European Forests. *Forests*, 15 (6): 998.
- BREDA N., GRANIER A., AUSSENAC G. 1995. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiology*, 15: 295-306. DOI: 10.1093/treephys/15.5.295
- DEBEL A., MEIER W.J.-H., BRÄUNING A. 2021. Climate signals for growth variations of *F. sylvatica*, *P. abies*, and *P. sylvestris* in Southeast Germany over the past 50 years. *Forests*, 12 (11): 1433.
- DHAR A., FORSCH K.B.C., NAETH M.A. 2022. Effects of coarse woody debris on soil temperature and water content in two reconstructed soils in reclaimed boreal forest. *Soil Systems*, 6 (3): 62.
- DUŠEK D., LEUGNER J., SOUČEK J., NOVÁK J., KACÁLEK D. 2022. Využití přípravných dřevin ve směsích a zásady pro první výchovné zásahy v těchto porostech. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 34 s. Lesnický průvodce 11/2022.
- DUŠEK D., NOVÁK J., SLODIČÁK M., KACÁLEK D. 2018. Pěstební doporučení pro výchovu smrkových porostů v oblastech jejich chřadnutí. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 36 s. Lesnický průvodce 10/2018.
- FERNÁNDEZ-CARRILLO Á., FRANCO-NIETO A., YAGÜE-BALLESTER M.J., GÓMEZ-GIMÉNEZ M. 2024. Predictive model for bark beetle outbreaks in European forests. *Forests*, 15 (7): 1114.
- GANDHI K.J.K., MILLER C.N., FORNWALT P.J., FRANK J.M. 2022. 8 - Bark beetle outbreaks alter biotic components of forested ecosystems. In bark beetle management, ecology, and climate change. K.J.K. Gandhi, R.W. Hofstetter (eds.), Academic Press: 227-259.
- GOMEZ-GALLEGO M., GALIANO L., MARTÍNEZ-VILALTA J., STENLID J., CAPADOR-BARRETO H.D., ELFSTRAND M., CAMARERO J.J., OLIVA J. 2022. Interaction of drought- and pathogen-induced mortality in Norway spruce and Scots pine. *Plant, Cell & Environment*, 45 (8): 2292-2305. DOI: 10.1111/pce.14360
- GRANIER A., LOUSTAU D., BRÉDA N. 2000. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 57: 755-765. DOI: 10.1051/forest:2000158

- HAFNER B.D., TOMASELLA M., HÄBERLE K.-H., GOEBEL M., MATYSSEK R., GRAMS T.E.E. 2017. Hydraulic redistribution under moderate drought among English oak, European beech and Norway spruce determined by deuterium isotope labeling in a split-root experiment. *Tree Physiology*, 37 (7): 950-960. DOI: 10.1093/treephys/tpx050
- HARTMANN M., HOWES C.G., VANINSBERGHE D., YU H., BACHAR D., CHRISTEN R., HENRIK NILSSON R., HALLAM S.J., MOHN W.W. 2012. Significant and persistent impact of timber harvesting on soil microbial communities in Northern coniferous forests. *Isme j*, 6 (12): 2199-2218. DOI: 10.1038/ismej.2012.84
- CHARRIER G. 2021. Spreading the (soil water) wealth: insight into the complexity of root system architecture. *Plant Physiology*, 186 (1): 206-207. DOI: 10.1093/plphys/kiab093
- ILEK A., BŁOŃSKA E., MISZEWSKI K., KASZTELAN A., ZBOROWSKA M. 2024. Investigating water storage dynamics in the litter layer: the impact of mixing and decay of pine needles and oak leaves. *Forests*, 15 (2): 350.
- ILEK A., SZOSTEK M., MIKOŁAJCZYK A., RAJTAR M. 2021. Does mixing tree species affect water storage capacity of the forest floor? Laboratory test of pine-oak and fir-beech litter layers. *Forests*, 12 (12): 1674.
- IZWORSKA K., ZIELONKA T., MUTER E. 2025. Changes in climate-growth relationships in *Larix decidua* revealed by daily climatic data in the Tatra Mountains. *Forest Ecosystems*, 14: 100363. DOI: 10.1016/j.fecs.2025.100363
- JANČO M., MEZEI P., KVAS A., DANKO M., SLEZIAK P., MINDAS J., JAROSLAV S. 2021. Effect of mature spruce forest on canopy interception in subalpine conditions during three growing seasons. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 69. DOI: 10.2478/johh-2021-0025
- JONCZAK J., JANKIEWICZ U., KONDRAS M., KRUCZKOWSKA B., OKTABA L., OKTABA J., OLEJNICZAK I., PAWŁOWICZ E., POLLÁKOVÁ N., RAAB T., REGULSKA E., SŁOWIŃSKA S., SUT-LOHMANN M. 2020. The influence of birch trees (*Betula* spp.) on soil environment – A review. *Forest Ecology and Management*, 477: 118486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118486>
- JULICH S., KREISELMEIER J., SCHEIBLER S., PETZOLD R., SCHWÄRZEL K., FEGER K.-H. 2021. Hydraulic properties of forest soils with stagnant conditions. *Forests*, 12 (8): 1113.
- KLAMERUS-IWAN A., ŁAGAN S., ZAREK M., SŁOWIK-OPOKA E., WOJTAN B. 2020. Variability of leaf wetting and water storage capacity of branches of 12 deciduous tree species. *Forests*, 11 (11): 1158.
- KONŌPKA B., ŠEBEŇ V., PAJTÍK J., SHIPLEY L.A. 2021. Excluding large wild herbivores reduced norway spruce dominance and supported tree species richness in a young, naturally regenerated stand. *Forests*, 12 (6): 737.
- KRIŠĀNS O., MATISONS R., KITENBERGA M., DONIS J., RUST S., ELFERTS D., JANSONS Ā. 2021. Wind resistance of eastern baltic silver birch (*Betula pendula* Roth.) suggests its suitability for periodically waterlogged sites. *Forests*, 12 (1): 21.

- KRIŠĀNS O., MATISONS R., VUGULS J., RUST S., ELFERTS D., SEIPULIS A., SALENIECE R., JANSONS Ā. 2022. Silver birch (*Betula pendula* Roth.) on dry mineral rather than on deep peat soils is more dependent on frozen conditions in terms of wind damage in the Eastern Baltic Region. *Plants* (Basel), 11 (9). DOI: 10.3390/plants11091174
- LARGERGREN F., LANKREIJER H., KUČERA J., CIENCIALA E., MÖLDER M., LINDROTH A. 2008. Thinning effects on pine-spruce forest transpiration in central Sweden. *Forest Ecology and Management*, 255: 2312-2323. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.12.047
- LANGE B., LÜESCHER P., GERMANN P.F. 2009. Significance of tree roots for preferential infiltration in stagnic soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (10): 1809-1821. DOI: 10.5194/hess-13-1809-2009
- LEUGNER J., KACÁLEK D., ŠVORC-ŠTĚPÁNOVÁ N. 2024a. Využití přípravných porostů modřínu při vícefázové obnově kalamitních holin. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 28 s. Lesnický průvodce 11/2024.
- LEUGNER J., SOUČEK J., KACÁLEK D., SMOLÍKOVÁ R., ČERNÝ J. 2024b. Hospodaření v porostech přípravných dřevin pro vyvážené využití jejich ekologického efektu a produkčního potenciálu. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 31 s. Lesnický průvodce 13/2024.
- LEUGNER J., SOUČEK J., ŠPULÁK O., MARTÍNEK A. 2023. Obnova kalamitních holin přes přípravný les. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 35 s. Lesnický průvodce 13/2023
- LEUSCHNER C., MEIER I., HERTEL D. 2006. On the niche breadth of *Fagus sylvatica*: Soil nutrient status in 50 Central European beech stands on a broad range of bedrock types. *Annals of Forest Science*, 63: 355-368. DOI: 10.1051/forest:2006016
- LIU X., BIONDI F. 2021. Inter-specific transpiration differences between aspen, spruce, and pine in a sky-island ecosystem of the North American Great Basin. *Forest Ecology and Management*, 491: 119157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119157>
- LOBO A., TORRES-RUIZ J.M., BURLETT R., LEMAIRE C., PARISE C., FRANCONI C., TRUFFAUT L., TOMÁŠKOVÁ I., HANSEN J.K., KJÆR E.D., KREMER A., DELZON S. 2018. Assessing inter- and intraspecific variability of xylem vulnerability to embolism in oaks. *For Ecol Manage*, 424: 53-61. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.04.031
- MAGH R.-K., BONN B., GROTE R., BURZLAFF T., PFAUTSCH S., RENNINGER H. 2019. Drought superimposes the positive effect of silver fir on water relations of European beech in mature forest stands. *Forests*, 10 (10): 897.
- MARTINCOVÁ J., LEUGNER J. 2020. Vyhodnocení odolnosti k vysychání u základních přípravných dřevin – břízy a osiky. *Zprávy lesnického výzkumu*, 65 (3): 190-196.
- MAUER O., PALÁTOVÁ E. 2002. Mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.) root system morphogenesis. *Journal of Forest Science*, 48: 342-350. DOI: 10.17221/11894-JFS
- MEZEI P., JAKUŠ R., PENNERSTORFER J., HAVAŠOVÁ M., ŠKVARENINA J., FERENČÍK J., SLIVINSKÝ J., BIČÁROVÁ S., BILČÍK D., BLAŽENEC M., NETHERER S. 2017. Storms, temperature maxima and the Eurasian spruce bark beetle *Ips typographus*—An infernal trio in Nor-

- way spruce forests of the Central European High Tatra Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 242: 85-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.004>
- MIKKELSON K., BEARUP L., MAXWELL R., STEDNICK J., MCCRAY J., SHARP J. 2013. Bark beetle infestation impacts on nutrient cycling, water quality and interdependent hydrological effects. *Biogeochemistry*, 115. DOI: 10.1007/s10533-013-9875-8
- MINDAS J., BARTIK M., ŠKVARENINOVÁ J., REPISKÝ R. 2018. Functional effects of forest ecosystems on water cycle – Slovakia case study. *Journal of Forest Science*, 64: 331-339. DOI: 10.17221/46/2018-JFS
- MORENO M., SIMIONI G., COCHARD H., DOUSSAN C., GUILLEMOT J., DECARSIN R., FERNANDEZ-CONRADI P., DUPUY J.L., TRUEBA S., PIMONT F., RUFFAULT J., JEAN F., MARLOIE O., MARTIN-StPAUL N.K. 2024. Isohyricity and hydraulic isolation explain reduced hydraulic failure risk in an experimental tree species mixture. *Plant Physiology*, 195 (4): 2668-2682. DOI: 10.1093/plphys/kiae239
- NETHERER S., PANASSITI B., PENNERSTORFER J., MATTHEWS B. 2019. Acute drought is an important driver of bark beetle infestation in Austrian Norway spruce stands. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2. DOI: 10.3389/ffgc.2019.00039
- NOVOSADOVÁ K., KADLEC J., ŘEHOŘKOVÁ Š., MATOUŠKOVÁ M., URBAN J., POKORNÝ R. 2023. Comparison of rainfall partitioning and estimation of the utilisation of available water in a monoculture beech forest and a Mixed Beech-Oak-Linden Forest. *Water*, 15 (2): 285.
- PETERS R., STEPPE K., PAPPAS C., ZWEIFEL R., BABST F., DIETRICH L., VON ARX G., POYATOS R., FONTI M., FONTI P., GROSSIORD C., GHARUN M., BUCHMANN N., STEGER D., KAHMEN A. 2023. Daytime stomatal regulation in mature temperate trees prioritizes stem rehydration at night. *New Phytologist*, 239. DOI: 10.1111/nph.18964
- PFLUG S. 2024. Water balance components of temperate tree species as driven by plant traits and environmental factors. Ph.D. Thesis. Vrije Universiteit Amsterdam.
- PFLUG S., VOORTMAN B., CORNELISSEN J., WITTE J.-P. 2021. The effect of plant size and branch traits on rainfall interception of 10 temperate tree species. *Ecohydrology*, 14. DOI: 10.1002/eco.2349
- PINOS J., FLURY M., LATRON J., LLORENS P. 2023. Routing stemflow water through the soil via preferential flow: a dual-labelling approach with artificial tracers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27 (15): 2865-2881. DOI: 10.5194/hess-27-2865-2023
- POTĘPA B., SZYKIEWICZ A., UDYRYSZ-KRAWEC M. 2018. GPR Survey for fir (*Abies alba*) and spruce (*Picea abies*) root systems in different locations in the Western Carpathians Mts. (Poland). *Journal of Geological Resource and Engineering*, 6. DOI: 10.17265/2328-2193/2018.05.002
- PŘÍVĚTIVÝ T., ŠAMONIL P. 2021. Variation in downed deadwood density, biomass, and moisture during decomposition in a natural temperate forest. *Forests*, 12 (10): 1352.
- RAFTOYANNIS Y., RADOGLUO K. 2002. Physiological responses of beech and sessile oak in a natural mixed stand during a dry summer. *Annals of Botany*, 89 (6): 723–730.

- REN J., ADAM J.C., HICKE J.A., HANAN E.J., TAGUE C.L., LIU M., KOLDEN C.A., ABATZOGLOU J.T. 2021. How does water yield respond to mountain pine beetle infestation in a semiarid forest? *Hydrology and Earth System Sciences*, 25 (9): 4681-4699. DOI: 10.5194/hess-25-4681-2021
- RING E., HÖGBOM L., NOHRSTEDT H.-Ö., JACOBSON S. 2015. Soil and soil-water chemistry below different amounts of logging residues at two harvested forest sites in Sweden. *Silva Fennica*, 49 (4): 1265.
- SANCHEZ E., RACHEL G., DALLING J. 2009. Importance of nurse logs as a substrate for the regeneration of pioneer tree species on Barro Colorado Island, Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 25 (4): 429-437. DOI: 10.1017/S0266467409006130
- SELLIN A., LUBENETS K. 2010. Variation of transpiration within a canopy of silver birch: Effect of canopy position and daily versus nightly water loss. *Ecophysiology*, 3: 467-477. DOI: 10.1002/eco.133
- SHOROHOVA E., KAPITSA E., KUZNETSOV A., KUZNETSOVA S., LOPES DE GERENYU V., KAGANOV V., KURGANOVA I. 2022. Coarse woody debris density and carbon concentration by decay classes in mixed montane wet tropical forests. *Biotropica*, 54. DOI: 10.1111/btp.13077
- SCHIEBE A., GLEIXNER G. 2014. Influence of litter diversity on dissolved organic matter release and soil carbon formation in a mixed beech Forest. *PLOS ONE*, 9 (12): e114040. DOI: 10.1371/journal.pone.0114040
- SCHUME H., JOST G., HAGER H. 2004. Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech and Norway spruce. *Journal of Hydrology*, 289: 258-274. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.11.036
- SIMONIN K., KOLB T., MONTES-HELU M., KOCH G. 2007. The influence of thinning on components of stand water balance in a ponderosa pine forest stand during and after extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143: 266-276. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.01.003
- SLODIČÁK M., NOVÁK J. 2007. Výchova lesních porostů hlavních hospodářských dřevin. Strnady, VÚLHM: 46 s. Lesnický průvodce 4/2007.
- SOUČEK J., ŠPULÁK O., LEUGNER J., PULKRAB K., SLOUP R., JURÁSEK A., MARTINÍK A. 2016. Dvoufázová obnova lesa na kalamitních holinách s využitím přípravných dřevin. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 35 s. Lesnický průvodce 10/2016.
- ŠACH F., ČERNOHOUS V. 2015. Hydraulický lift buku pro smrk: potenciálně významný ekosystémový proces pro pěstování smrkových porostů v souvislosti s klimatickou změnou oteplování. *Zprávy lesnického výzkumu*, 60 (1): 53–63.
- ŠÍPEK V., HNILICA J., VLČEK L., HNILICOVÁ S., TESAŘ M. 2020. Influence of vegetation type and soil properties on soil water dynamics in the Šumava Mountains (Southern Bohemia). *Journal of Hydrology*, 582: 124285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124285>
- ŠPULÁK O., ŠACH F., KACÁLEK D. 2021. Topsoil Moisture depletion and recharge below young norway spruce, white birch, and treeless gaps at a mountain-summit site. *Forests*, 12 (7): 828.

- ŠVIHLA V., ŠACH F., ČERNOHOUS V. 2016. Vliv holých sečí či rychlého velkoplošného rozpadu lesa na celkový odtok za vegetační období. Zprávy lesnického výzkumu, 61 (2): 138–144.
- TÖCHTERLE P., YANG F., REHSCHUH S., REHSCHUH R., RUEHR N.K., RENNENBERG H., DAN-NENMANN M. 2020. Hydraulic water redistribution by silver fir (*Abies alba* Mill.) occurring under severe soil drought. Forests, 11 (2): 162.
- TŘEŠTÍK M., PODRÁZSKÝ V. 2017. Meliorační funkce jedle bělokoré (*Abie alba* Mill.): případová studie. Zprávy lesnického výzkumu, 62 (3): 182–188.
- VÍCHA Z., JAŘABÁČ M., OCEÁNSKÁ Z., BÍBA M. 2009. Vliv lesních cest na odtoky z horských lesnatých povodí. Zprávy lesnického výzkumu, 54 (3): 231–237.
- VINCKE C., THIRY Y. 2008. Water table is a relevant source for water uptake by a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. Agricultural and Forest Meteorology, 148: 1419–1432. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.04.009
- VOGT U. 2001. Hydraulic vulnerability, vessel refilling, and seasonal courses of stem water potential of *Sorbus aucuparia* L. and *Sambucus nigra* L. Journal of Experimental Botany, 52: 1527–1536. DOI: 10.1093/jexbot/52.360.1527
- WANG A.-F., ROITTO M., SUTINEN S., LEHTO T., HEINONEN J., ZHANG G., REPO T. 2015. Waterlogging in late dormancy and the early growth phase affected root and leaf morphology in *Betula pendula* and *Betula pubescens* seedlings. Tree Physiology, 36 (1): 86–98. DOI: 10.1093/treephys/tpv089
- WEBB B., ROBINSON D., MARSHALL M., FORD H., PAGELLA T., HEALEY J., SMITH A. 2022. Variation in root morphology amongst tree species influences soil hydraulic conductivity and macroporosity. Geoderma, 425: 116057. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116057
- WELPELO C., DUBBERT M., TIEMEYER B., VOIGT C., PIAYDA A. 2024. Effects of birch encroachment, water table and vegetation on methane emissions from peatland microforms in a rewetted bog. Scientific Reports, 14 (1): 2533. DOI: 10.1038/s41598-024-52349-0
- XIAO Y., LI X., ZHAO S., SONG G. 2019. Characteristics and simulation of snow interception by the canopy of primary spruce-fir Korean pine forests in the Xiaoxing'an Mountains of China. Ecology and Evolution, 9 (10): 5694–5707. DOI: 10.1002/ece3.5152
- ZAMBONINI D., SAVI T., ROSNER S., PETIT G. 2024. Consistent decrease in conifer embolism resistance from the stem apex to base resulting from axial trends in tracheid and pit traits. Frontiers in Plant Science, 15: 1414448. DOI: 10.3389/fpls.2024.1414448
- ZAPATER M., CHRISTIAN H., NATHALIE B., BRÉCHET C., BONAL D., GRANIER A. 2011. Evidence of hydraulic lift in a young beech and oak mixed forest using 18O soil water labeling. Trees, 25: 885–894. DOI: 10.1007/s00468-011-0563-9
- ZHANG L., LIU L., ZHAO H., JIANG Z., CAI J. 2020. Differences in near isohydric and anisohydric behavior of contrasting poplar hybrids (I-101 (*Populus alba* L.) × 84K (*Populus alba* L. × *Populus glandulosa* Uyeki)) under drought-rehydration treatments. Forests, 11 (4): 402. DOI:

ZHANG Y., WANG L., ZHANG W., ZHANG Z., ZHANG M. 2023. Quantification of root systems and soil macropore networks association to soil saturated hydraulic conductivity in forested wetland soils. *Forests*, 14: 132. DOI: 10.3390/f14010132

## Seznam publikací, které předcházejí metodice

- ČERNÝ J., ŠPULÁK O., KOMÁNEK M., ŽIŽKOVÁ E., SÝKORA P. 2024. Sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) and its adaptation strategies in the context of global climate change: a review. *Central European Forestry Journal*, 70 (2): 77–94. DOI: 10.2478/forj-2024-0012
- ČERNÝ J., ŠPULÁK O., SÝKORA P., NOVOSADOVÁ K., KADLEC J., KOMÁNEK M. 2024. Význam buku lesního ve střední Evropě v období klimatické změny: přehled současných poznatků. *Zprávy lesnického výzkumu*, 69 (1): 74–88. DOI: 10.59269/zlv/2024/1/721
- DUŠEK D., LEUGNER J., SOUČEK J., NOVÁK J., KACÁLEK D. 2022. Využití přípravných dřevin ve směsích a zásady pro první výchovné zásahy v těchto porostech. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 28 s. Lesnický průvodce 5/2020.
- DUŠEK D., LEUGNER J., NOVÁK J., SLODIČÁK M., ČERNÝ J., KACÁLEK D. 2020. Pěstební postupy v lesích ohrožených suchem na stanovištích s převahou nepůvodních smrkových porostů. VÚLHM, v.v.i., Strnady.
- DUŠEK D., NOVÁK J. 2024. Vliv výchovných zásahů na růst náhradního porostu modřínu opadavého (*Larix decidua* Mill.). *Zprávy lesnického výzkumu*, 69 (2): 136–142.
- DUŠEK D., NOVÁK J., SLODIČÁK M., KACÁLEK D. 2018. Pěstební doporučení pro výchovu smrkových porostů v oblastech jejich chřadnutí. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 36 s. Lesnický průvodce 10/2018.
- LEUGNER J., KACÁLEK D., ŠVORC-ŠTĚPÁNOVÁ N. 2024a. Využití přípravných porostů modřínu při vícefázové obnově kalamitních holin. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 31 s. Lesnický průvodce 13/2024.
- LEUGNER J., SOUČEK J., KACÁLEK D., SMOLÍKOVÁ R., ČERNÝ J. 2024b. Hospodaření v porostech přípravných dřevin pro vyvážené využití jejich ekologického efektu a produkčního potenciálu. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 31 s. Lesnický průvodce 13/2024.
- LEUGNER J., SOUČEK J., ŠPULÁK O., MARTÍNÍK A. 2023. Obnova kalamitních holin přes přípravný les. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 35 s. Lesnický průvodce 13/2023.
- NOVÁK J., SLODIČÁK M., DUŠEK D. 2011. Aboveground biomass of substitute tree species stand with respect to thinning - European larch (*Larix decidua* Mill.). *Journal of Forest Science*, 57 (1): 8–15.

- SOUČEK J., ŠPULÁK O., DUŠEK D. 2018. Metodika přeměny a přestavby borových monokultur na stanovištích přirozených smíšených porostů. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 35 s. Lesnický průvodce 15/2018.
- ŠPULÁK O., ČERNÝ J. 2003. Potenciál borovice lesní v podmínkách změny klimatu: review. Zprávy lesnického výzkumu, 68 (1): 49–58. DOI: 10.59269/zlv/2023/1/689
- ŠPULÁK O., SLODIČÁK M., NOVÁK J., LEUGNER J. 2023. Postupy hospodaření v porostech borovice lesní pro zmírnění nepříznivých dopadů environmentální změny. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 48 s. Lesnický průvodce 1/2023.
- ŠPULÁK O., SLODIČÁK M., NOVÁK J., LEUGNER J. 2024. Postupy hospodaření v porostech dubu zimního pro zmírnění nepříznivých dopadů environmentální změny. Certifikovaná metodika. Strnady, VÚLHM: 48 s. Lesnický průvodce 5/2024.

# SILVICULTURAL PROCEDURES FOR MAINTAINING FOREST HYDROLOGICAL FUNCTIONS IN BARK BEETLE-IMPACTED AREAS

## *Summary*

### 1 Introduction and Objectives

Since 2015, Central Europe has experienced a massive increase in bark beetle (*Ips typographus*) infestations, primarily triggered by long-term drought and high temperatures. This crisis has resulted in the loss of production bases and the disruption of hydrological cycles. The goal of this methodology is to formulate management practices for affected areas to maximize the retention and efficient restoration of forest water functions, even after the death or removal of mature stands.

### 2 Hydrological Impacts of Forest Dieback

The collapse of forest stands significantly alters precipitation interception, evapotranspiration, and runoff. Key impacts include:

- **Increased Soil Moisture:** Loss of transpiration (often starting in the „green phase“) leads to a significant rise in soil moisture during the first two seasons.
- **Altered Snow Dynamics:** Reduced canopy interception increases snow accumulation on the ground, leading to earlier and more intense spring melting, which can shift peak runoff events.
- **Microclimate Extremes:** On clear-cuts, solar radiation hits the soil directly, increasing temperature extremes and accelerating the mineralization of humus, which releases nutrients (like nitrates) into groundwater.
- **Hydrological Discontinuity:** Heavy machinery and road networks compact soil, transforming slow subsurface flow into rapid surface runoff, increasing flood peaks by 12.5% to 90%.

### 3 Tree Species and Hydrological Strategies

The methodology classifies tree species based on their water-management strategies:

- **Anisohydric species** (e.g., beech, oak, larch, aspen): These keep stomata open longer during drought to maintain photosynthesis, acting as „biological pumps“. While they risk hydraulic failure under extreme stress, they often facilitate better groundwater recharge due to lower winter interception (deciduous) and deep root systems that create macropores for infiltration.

- Isohydric species (e.g., spruce, pine, fir, birch): These close stomata early to prevent cavitation. This conserves water initially but limits cooling and carbon gain. Silver fir is highlighted as a stabilizing element due to its deep heart-root system and ability to perform hydraulic redistribution (lifting water from deep to shallow layers).

## 4 Restoration and Management Procedures

To combat the harsh conditions of large clear-cuts, the methodology advocates for:

- Two-Phase Restoration: This involves first establishing a „stabilizing“ phase with pioneer species (birch, aspen, rowan) to cover the soil, restore transpiration, and mitigate temperature extremes. The „target“ phase (beech, fir) follows 5–15 years later under the protection of the established canopy.
- Combined Restoration: Differentiating the stand into a „skeleton“ (target species for long-term value) and „filler“ (pioneer species for microclimate protection and soil improvement).
- Tending (Thinning): Early thinning is essential for stand stability and drought resilience. Strong thinning reduces the Leaf Area Index (LAI), thereby decreasing stand-level interception and increasing available soil water.

## 5 Role of Deadwood and Logging Residues

Retaining necromass is critical for hydrological stability. Deadwood acts as a „sponge,“ absorbing large quantities of water (up to 391 kg/m<sup>3</sup> for beech) and cooling the microclimate through evaporation.

- Erosion Control: Logging residues increase surface roughness, slowing runoff and trapping sediment.
- Soil Protection: A layer of slash (klest) protects soil from compaction by heavy machinery and functions as mulch to reduce unproductive soil evaporation.
- Recommendations: It is recommended to leave at least 30% (ideally 50%) of logging residues and 30–50 m<sup>3</sup>/ha of lying coarse woody debris in production forests.

## 6 Economic Aspects

While leaving residues may result in lost profit from biomass sales, it is an investment in soil protection. Utilizing natural regeneration for „filler“ components significantly reduces planting and maintenance costs. Adaptive management ensures the continuity of forest functions and minimizes the risk of future large-scale collapses.



Výzkumný ústav  
lesního hospodářství  
a myslivosti, v. v. i.

[www.vulhm.cz](http://www.vulhm.cz)

LESNICKÝ PRŮVODCE 9/2025