

ZMĚNY PŮDNÍ VLHKOSTI V RŮZNÝCH VARIANTÁCH BOROVÉHO POROSTU NA CHUDÝCH PÍŠČITÝCH PŮDÁCH BĚHEM VEGETAČNÍ DOBY

VARIATION OF SOIL MOISTURE IN DIFFERENT STAND CONDITIONS OF PINE STAND ON NUTRIENT-POOR SANDY SOILS DURING VEGETATION PERIOD

ONDŘEJ ŠPULÁK ✉

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

✉ e-mail: spulak@vulhmop.cz

ORCID: [O. Špulák 0000-0002-4924-3068](https://orcid.org/0000-0002-4924-3068)

ABSTRACT

Soil water is one of the fundamental conditions for the development of the forest ecosystems. Habitat conditions and forest tree composition are the basic factors influencing development of soil moisture. Tree growth and forest structure changes progress fluctuations in the hydric regime. The article evaluates development of soil moisture in different growth conditions of Scots pine stands on nutrient-poor sandy soils and defines the basic principles of these relationships. In 2018, the moisture of A horizon was measured in transects across the stands and clear-cut areas. In the period from 2018 to 2020, the vertical moisture profile was evaluated by means of dug probes under a mature stand of pine, on clear-cut area without soil preparation and in the space of the mounds and furrows on clear-cut area with soil prepared for natural regeneration by ploughing. The results showed that also in these conditions the moisture in the clear-cut area was all year round higher in comparison to the mature pine stand, however, topsoil moisture under the young pine growth with closed canopy was no longer different from the moisture of mature stand. Even in dry periods, the humidity on the clear-cut area decreased with the depth in the soil. Under the mature stand, this only happened when there was a sufficient amount of water in the ecosystem. The influence of the period within the growing season was not clearly reflected in the monitored long-term course of moisture in the soil horizons.

[For more information see Summary at the end of the article.](#)

Klíčová slova: srážky; holina; podrost; smrk ztepilý; půdní horizonty

Key words: precipitation; clear-cut area; undergrowth; Norway spruce; soil horizons

ÚVOD

V probíhajícím období měnicího se klimatu, které je prováděno nepříznivými v rozložení srážek a zvyšujícími se průměrnými teplotami vzduchu, hraje stále větší roli v ekosystému krajiny voda. Přestože rostliny mohou do svého organismu vodu přijímat i povrchem asimilačních orgánů (BERRY et al. 2019), pro suchozemské rostliny představuje základní podmínku pro život zejména voda v půdě. Představuje zdroj živného roztoku i vodu umožňující chlazení organismu během radiačních dní s vysokými teplotami vzduchu. Zejména v případě lesa, s dopadem na klima širší krajiny (POKORNÝ, HESSLEROVÁ 2022).

Vztah vody v půdě a lesního porostu se v průběhu vývoje porostu mění. S věkem dřevin i se změnami porostního prostředí svůj podíl na tomto vztahu mají rozvíjející se povrchy vegetace, definující podíl intercepce, i změny aktivního vodního provozu dřevin a přízemní

vegetace ovlivňující evapotranspiraci (KOSTNER et al. 2002; DE ROSE, SEYMOUR 2010; VILHAR, SIMONCIC 2012).

Základními modelovými dřevinami, na kterých je monitorován hydričský režim včetně půdní vlhkosti v podmínkách střední Evropy, jsou smrk a buk, sledované zejména v horských a středních polohách (např. SCHUME et al. 2004; STAELENS et al. 2006; ŠACH, ČERNOHOUS 2016). Již méně informací je k dispozici o vývoji vlhkosti půdy v porostech dalších dřevin. Borové porosty byly donedávna považovány z hlediska zdravotního stavu za stabilní i ve srážkově chudých oblastech a obdobích. Ani na chudých písčitých půdách nebyl očekáván významnější problém, proto jim byla věnována jen malá pozornost. Suché roky posledního období (na většině území ČR zejména roky 2015 a 2018) však poukázaly na limity resilience borovice lesní (ŠPULÁK, ČERNÝ 2023). Hlubší znalost vodního režimu borových porostů na těchto lokalitách může přispět k porozumění vývoji zdravotního stavu těchto porostů

v kontextu s jejich charakterem, průběhem počasí i vývojem klimatu, s možnými důsledky pro následnou volbu vhodných postupů výchovy a obnovy.

Cílem příspěvku je popsat a porovnat vývoj vlhkosti půdy v různých porostních situacích porostů borovice lesní na chudých písčitých půdách Polabí v letech 2018 až 2020 a na tomto základě stanovit základní principy těchto vztahů.

MATERIÁL A METODIKA

Experimentální plochy

Výzkum byl realizován v PLO 17-Polabí v nadmořské výšce cca 250 m na stanovišti 1M (chudá borová doubrava) v porostech na majetku ve správě Městských lesů Hradec Králové a.s. Hluboké písčité půdy v této oblasti tvoří duny s hladinou podzemní vody v hloubce 6 až 8 m, tedy mimo reálný dosah kořenů. Klimatické podmínky lokality jsou od roku 2018 sledovány pomocí meteorologických stanic (výrobce Ing. Libor Daneš, CZ) umístěných na holině a pod dospělým porostem borovice. V intervalu 10 min byly měřeny teploty čidly typu Pt1000, srážky volné plochy srážkoměrem SR-1 (Tlusták, CZ), podkorunové srážky sběrným korytem o ploše 0,5 m² napojeným do velkokapacitního překlápěcího průtokoměru (Ing. Libor Daneš, CZ). Pro popis podmínek experimentu byly vypočteny denní a měsíční hodnoty. Pro dlouhodobější vývoj srážek před rokem 2017 byla využita data z meteorologické stanice v areálu Výzkumné stanice Opočno VÚLHM, v. v. i., umístěné ve vzdálenosti cca 15 km v obdobné nadmořské výšce.

Experimentální objekt Suchý chobot tvoří tři části. První z nich je lesní porost o věku cca 85 let s dominancí borovice lesní (660 stromů na ha) a podúrovň smrku ztepilého (180 stromů na ha). Průměrná tloušťka borovice byla 26,7 cm a výška 24,8 m, celková výčetní základna porostu 41,5 m² na ha. K porostu byla v zimě roku 2017–18 přičleněna holina o výměře cca 1,3 ha (rozměry cca 60 × 200 m, cca S-J orientace), na které byla provedena příprava půdy pro přirozenou obnovu shrnutím klestu a naoráním pomocí půdní frézy v S-J směru (dále holina s přípravou půdy). Ve stejném období byla v blízkosti vytvořena holina o výměře cca 0,6 ha (výměra cca 60 × 100 m), ponechaná bez přípravy půdy (holina bez přípravy půdy). Pro bližší popis charakteru porostu a celkového designu experimentální plochy viz ŠPULÁK, KACÁLEK (2020).

Měření vlhkosti půdy

Měření vlhkosti půdy vlhkoměrem HH2 s jehlovou ambulatní sondou ML3 (Eijkelkamp, Holandsko) probíhalo v letech 2018 až 2020 v několika variantách porostní situace. První skupinou bylo měření vlhkosti ve svrchní části horizontu A v **horizontálním transektu porostem**. V určeném termínu měření roku 2018 (4. 6., 13. 6. a 30. 8.), v předem stanoveném směru daným porostem (holinou), v kolmém směru k porostnímu okraji, byly v pevném rozestupu 3 m rýčem vytvářeny malé půdní sondy (cca 25 × 25 × 25 cm). Každou pozici v rámci porostní situace reprezentovala jedna sonda. Okamžitě po vykopání byla v každé ze stěn sondy měřena vlhkost horizontu A (tzn. v hloubce cca 10 cm), tzn. 4 opakování měření na sondu (pozici).

Dále byla pomocí shodného vlhkoměru HH2 měřena vlhkost ve **vertikálním transektu půdou** (hloubky viz níže) pod dospělým porostem borovice s podúrovň smrku (1), na holině bez přípravy půdy (2) a v polohách brázda (3; prostor s odstraněným nadložním humusem) a val (4; prostor s akumulovaným nadložním humusem) na holině s přípravou půdy orbou pro přirozenou obnovu. V těchto čtyřech variantách byly v termínech 2. 10. a 16. 11. 2018, 12. 2., 23. 3., 6. 5.,

20. 6., 2. 8., 10. 9. a 11. 12. 2019, 10. 6., 30. 7. a 7. 10. 2020 kopány sondy do hloubky cca 80 cm, vždy tři sondy na variantu. Půdní vlhkost byla měřena ve čtyřech až pěti opakováních v bocích (stěnách) každé sondy: v horizontu A (tzn. cca 10 cm pod povrchem půdy) a ve třech hloubkách horizontu B: cca 20 cm (značeno Bh), 40 cm (značeno Bs) a 60 cm (značeno Bd) pod povrchem půdy. V brázdě a ve valu byla hloubka měření horizontu A přizpůsobena tak, aby měření reprezentovalo daný horizont.

Prezentovány jsou hodnoty relativní objemové vlhkosti půdy naměřené uvedeným čidlem ML3, bez recalibrace na dané půdní podmínky. Vzhledem ke shodnému charakteru půd (půdní typ, hloubka půdního profilu, zrnitostní složení) zájmové oblasti jsou tyto hodnoty vzájemně porovnatelné. Byly vypočteny a v grafech prezentovány průměry vlhkosti v jednotlivých polohách transektů a půdních profilů za dané termíny měření.

Schéma experimentů a jejich statistického hodnocení je představeno v tab. 1. V případě horizontálních transektů porostem byly průměrné hodnoty vlhkosti mezi příslušnými variantami porostů porovnávány pomocí t-testu. Pro porovnání vlhkosti v jednotlivých horizontech vertikálních profilů půdou dané varianty a v jednotlivých horizontech mezi variantami bylo provedeno pomocí jednofaktorové ANOVA s následným Tukey testem. Před testy byla ověřena normalita (Shapiro-Wilk test) a homoskedasticita dat (Levene's test). Statistické porovnání bylo provedeno ve statistickém prostředí R (R CORE TEAM 2022).

VÝSLEDKY

Z hlediska delšího období hrály negativní úlohu pro vývoj zdravotního stavu nejen borových porostů sledované oblasti zejména roky 2015, 2016 a 2018, v kterých byl podíl srážek ve vegetační době nižší oproti průměru za roky 2001–2011 až o více než 40 % (2015 a 2018). V roce 2018 k tomu v kombinaci s o 1 °C vyšší průměrnou teplotou (obr. 1). Již od počátku roku byl rok 2018 srážkově chudý (obr. 2), celkově v oblasti výzkumného šetření spadlo 454 mm srážek na volnou plochu a 367 mm pod porost borovice, přičemž průměr srážek za roky 2001–2011 činil 558 mm. Rok 2019 byl srážkově vyrovnanější, na lokalitě celkem spadlo 633 mm srážek. Také teplotně byl příhodnější, s výjimkou června s vysokou průměrnou teplotou téměř 22 °C. Následující rok byl celkově chladnější a bohatý na srážky, zejména ve vegetační době (s výjimkou dubna; obr. 2).

Horizontální transepty

Dospělý porost – holina

Dvě měření vlhkosti půdy v transektu porosty se uskutečnila v první polovině června, který se vyznačoval významně nízkými srážkovými úhrny. V týdnu uplynulém před prvním z těchto měření (4. 6. 2018) spadly na holině pouze necelé 2 mm srážek (obr. 3). Vlhkost půdy horizontu A naměřená v transektu pod dospělým borovým porostem kolísala v rozmezí cca 4 až 7 %. Přechod do prostoru holiny znamenal vždy, bez ohledu na charakter holiny a měřené polohy (val, brázda), nárůst průměrné vlhkosti. Maximální vlhkosti byly zjištěny na holině bez přípravy půdy a pod valem na holině s orbou, vlhkost v brázdách byla nižší (obr. 4). Rozdíly mezi vlhkostí pod dospělým porostem a ve všech sledovaných variantách na holině byly vysoce průkazné ($p < 0,001$).

V období týdne před termínem měření 13. 6. 2018 spadlo 12,8 mm srážek, většina z nich (11 mm) v den předcházející měření (obr. 3). V porovnání s předchozím termínem se hodnoty vlhkosti horizontu A příliš nezměnily. Mezi vlhkostí pod porostem a na holině byly

Tab. 1.

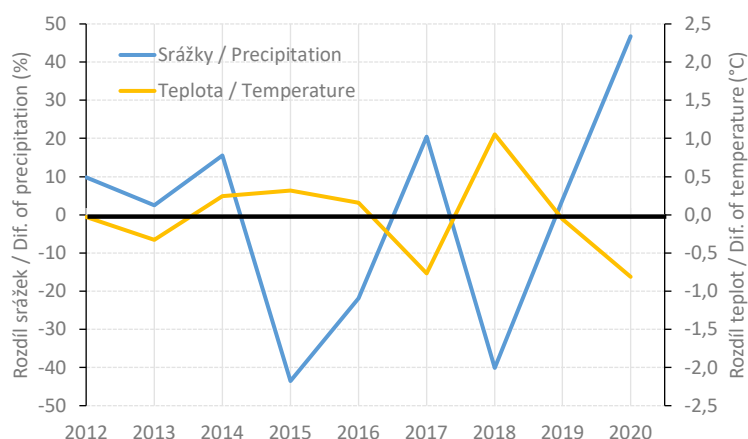
Schéma dílčích experimentů a jejich statistického hodnocení

Scheme of the individual experiments and their statistical evaluation

(porost = forest stand; holina = clear cut area; val = mound; brázda = furrow; mlazina = young forest growth; BO = pine stand with removed spruce storey; BO+SM = pine stand with spruce storey preserved; mezi variantami = between the treatments; každá varianta = each treatment)

Transekt/ Transect	Test	Datum šetření/ Date	Varianta porovnání/ Treatments to compare	Počet opakování měření/Number of repetitions	Poznámka/Note
Horizontální (prostředím)/ Horizontal (through the environment)	t-test	4. 6. 2018	porost x holina	9 x 9	porostní okraj o šířce 6 m byl vynechán/ the 6 m wide forest edge was skipped
			porost x holina val	8 x 8	
			porost x holina brázda	8 x 8	
			holina val x holina brázda	8 x 8	
			porost x mlazina	9 x 9	
			BO x BO+SM ¹	9 x 9	
	13. 6. 2018	porost x holina	9 x 8		
		porost x holina val	9 x 8		
		porost x holina brázda	9 x 8		
		holina val x holina brázda	8 x 8		
	30. 8. 2018	porost x holina	9 x 8		
		porost x holina val	9 x 8		
		porost x holina brázda	9 x 8		
		porost x mlazina	9 x 8		
Vertikální (půdou)/Vertical (through soil)	Anova, Tukey	*	A x Bh x Bs x Bd	3 x každá varianta	pro každou z variant/for each of the treatments:
			A mezi variantami		mezi variantami/between the treatments: porost x holina x holina-val x holina-brázda
			Bh mezi variantami		
			Bs mezi variantami		
			Bd mezi variantami		

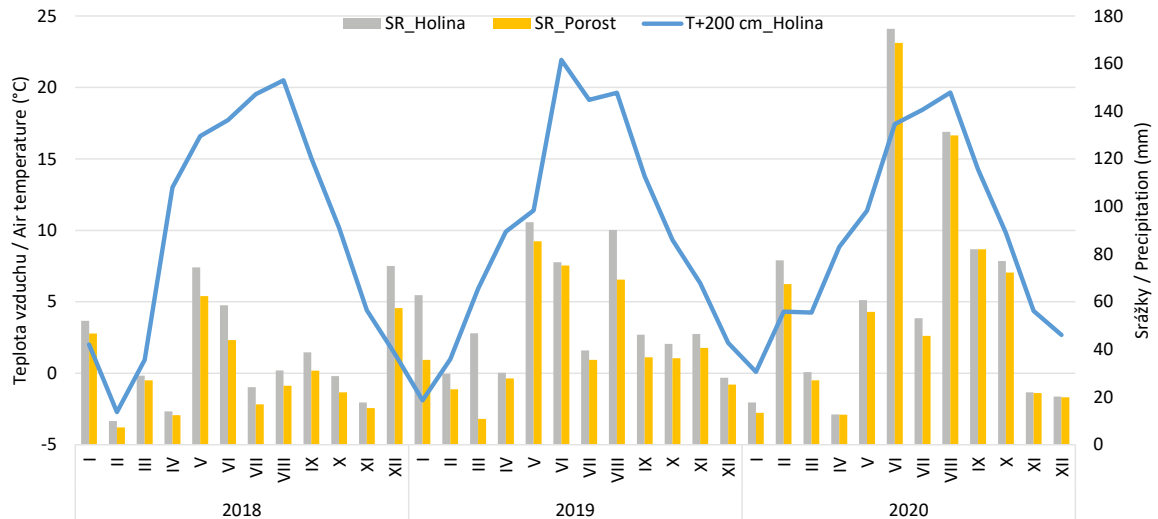
¹porost borovice se zachovanou podúrovň smrku/forest stand with preserved spruce storey

²2. 10. a 16. 11. 2018, 12. 2., 23. 3., 6. 5., 20. 6., 2. 8., 10. 9. a 11. 12. 2019, 10. 6., 30. 7. a 7. 10. 2020

Obr. 1.

Rozdíl srážek za vegetační období (od dubna do října) vzhledem k dlouhodobému srážkovému průměru za roky 2001–2011 (%) a rozdíl (°C) průměrné teploty vzduchu za vegetační období k teplotnímu průměru 2001–2011 pro meteorologické stanice Opočno (do roku 2016) a Chobot (od 2017)

Fig. 1.

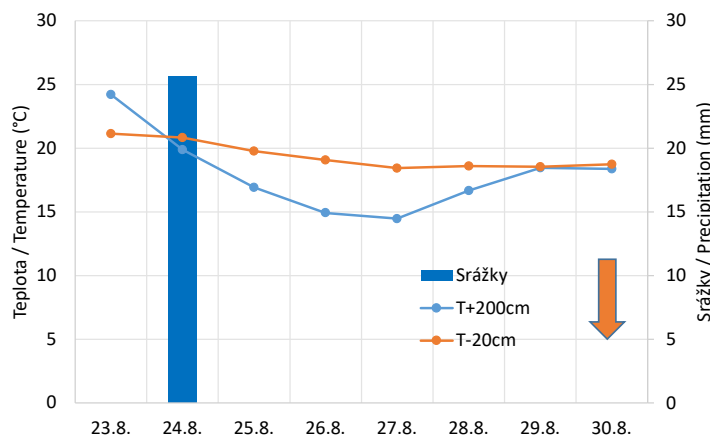
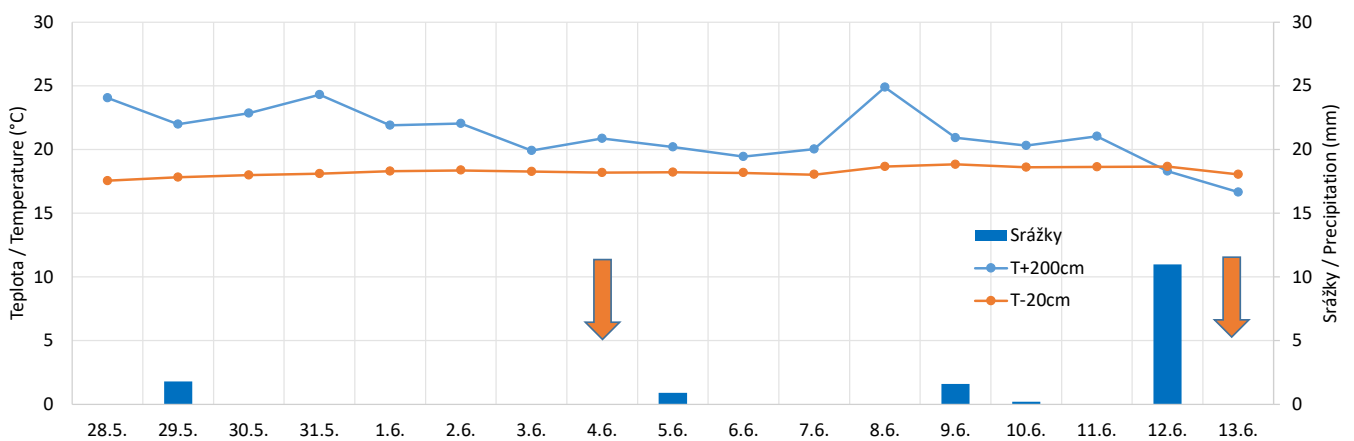
The mean proportion (%) of precipitation during the vegetation period (April to October) to the long-term precipitation average for 2001–2011 (i.e. percentage difference) and the difference (°C) in average air temperature during the vegetation period to the 2001–2011 temperature average for the Opočno (until 2016) and Chobot (from 2017) meteorological stations



Obr. 2.

Měsíční průměrné teploty, měsíční suma srážek na holině a měsíční suma podkorunových srážek v dospělém porostu borovice v letech 2018 až 2020. SR_Holina – srážky na holině, SR_Porost – podkorunové srážky, T+200 cm_Holina – teplota vzduchu ve výšce 200 cm nad zemí na holině **Fig. 2.**

Monthly average temperatures, monthly sum of precipitation on clear-cut area, and monthly sum of throughfall in mature pine stands from 2018 to 2020. SR_Holina – precipitation of the clear-cut area; SR_Porost – throughfall; T+200 cm_Holina – air temperature on clear-cut area 2 m above ground



Obr. 3.

Průměrná denní teplota vzduchu (+200 cm) a půdy (-20 cm) a denní suma srážek ve dnech před termíny měření transektů půdní vlhkosti (termín měření označen šipkou)

Fig. 3.

Average daily air (+200 cm above ground) and soil (-20 cm) temperature and precipitation sums in the days before the date of measurement of the soil moisture in transects (the measurement date marked with an arrow)

rozdíly opět průkazné ($p < 0,01$). Změna nastala u vlhkosti na holině s orbou, kde, na rozdíl od přechozího termínu, byla v prostoru brázdy nyní vlhkost v porovnání s valem vyšší, avšak bez průkazných rozdílů ($p = 0,17$). V obou analyzovaných porostech borovice narůstala průměrná vlhkost s klesající vzdáleností k porostnímu okraji (obr. 4).

V průběhu týdne před srpnovým termínem spadlo cca 26 mm srážek šestý den před dnem měření (obr. 3). Vlhkost půdy pod dospělým porostem byla srovnatelná s hodnotami prvního červnového termínu, na holinách však byla vlhkost v tomto srovnání nižší bez statistického rozdílu mezi vlhkostí pod valem a v brázdě ($p = 0,5$; obr. 4). Mezi vlhkostí pod porostem a na holině byly opět rozdíly průkazné ($p < 0,001$). Průměrné denní teploty vzduchu byly v tomto období oproti červnovým termínům nižší, teploty půdy vyšší jen minimálně (obr. 3).

Dospělý porost – mlazina

V kontrastu se situací na holině byla vlhkost svrchního horizontu půdy v prostoru mlaziny v obou hodnocených termínech blízká vlhkostem pod dospělým porostem ($p > 0,2$). Přes 11 mm, které spadly den před druhým termínem měření 30. 8. 2018, byly naměřené vlhkosti v porovnání s prvním datem (4. 6. 2018) nižší, navýšení hodnot v mlazině bylo ojedinělé (obr. 5).

Dospělý porost borovice a podúroveň smrku

V červnovém termínu měření byla vlhkost horizontu A v celém transektu pod porostem borovice s odstraněnou podúrovní smrku vyšší až o téměř 3 %, celkově však rozdíly nebyly průkazné ($p = 0,2$). Na konci srpna se průměry v polohách transektu vzájemně prolínaly, opět bez průkazných rozdílů mezi variantami ($p = 0,9$; obr. 6).

Vertikální transekt půdou v čase

Monitoring pod dospělým porostem borovice poukázal na velice nízké hodnoty a minimální rozdíly mezi průměrnou vlhkostí svrchních (A, Bh) a hlubších (Bs, Bd) půdních horizontů na začátku periodických měření. V zimním období 2018–19 se vlhkost zvýšila. Dále však až do počátku srpna 2019 byly rozdíly mezi vlhkostmi v celém profilu minimální (obr. 7). V období následujícím došlo k vzájemnému oddělení vlhkosti půdy sledovaných horizontů: od tohoto termínu vlhkost nadále klesala s hloubkou v půdě. Vliv na to bude mít pravděpodobně srážkově bohatý srpen a počátek září (obr. 2). Celkově byla vlhkost horizontu A pod porostem průkazně vyšší než vlhkost Bd ($p = 0,03$).

Naproti tomu **na holině bez přípravy půdy** vlhkost průkazně klesala s hloubkou v půdě v celém sledovaném období (průkazné rozdíly mezi všemi horizonty, $p < 0,001$; obr. 7), vlhkosti byly až na vlhkost Bd při posledním termínu v říjnu 2020 v celém profilu v porovnání s vlhkostí pod porostem vyšší.

S narůstající hloubkou klesala vlhkost půdy, její kolísání v průběhu sledovaného období i rozdíly mezi variantami. S výjimkou období od začátku do poloviny roku 2019 v horizontech Bs a Bd (výjimečně také Bh) byly v celém profilu průměrné vlhkosti ve všech horizontech pod porostem v porovnání s holinami nižší. Průkazný byl rozdíl mezi vlhkostmi v polohách A a Bh ($p = 0,002$). Rozdíly mezi variantami na holinách byly neprůkazné a nevykazovaly jednotný trend (obr. 8).

DISKUSE

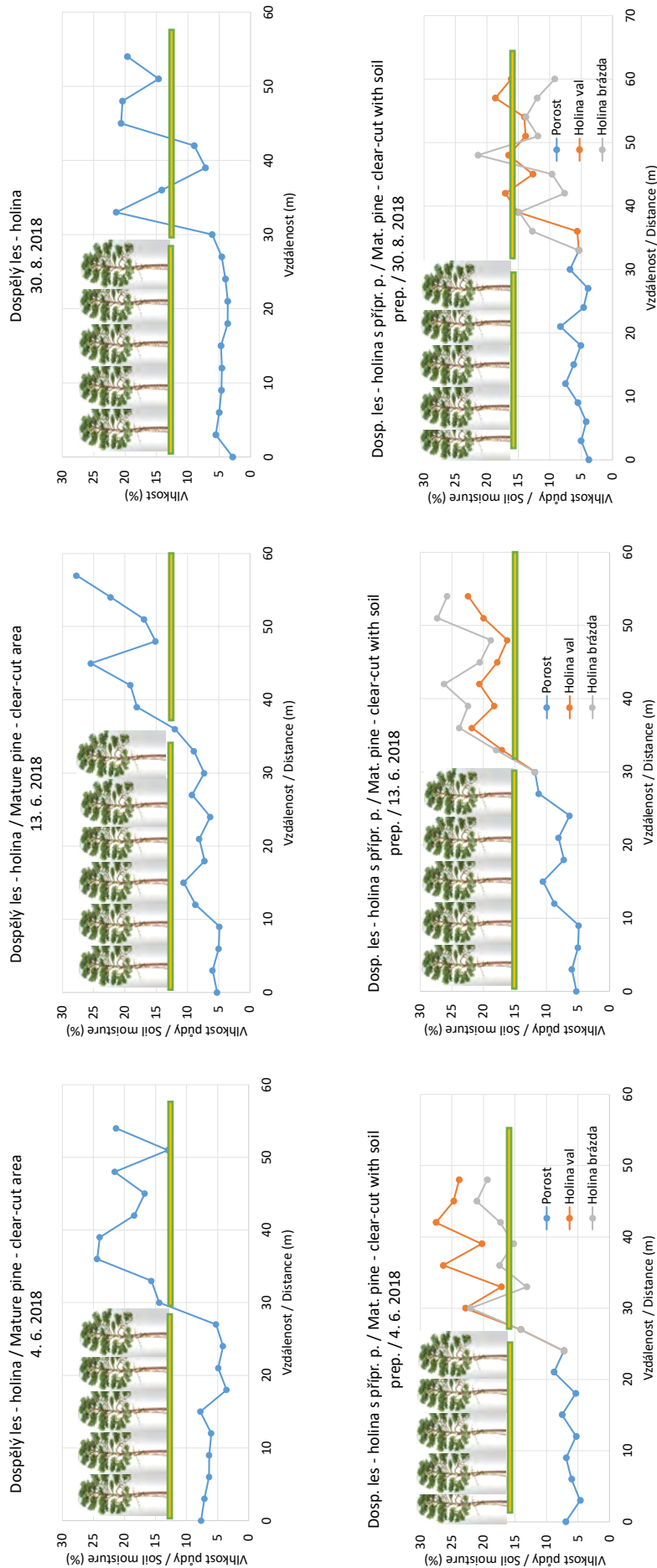
Na vývoji vlhkosti půdy v lesním ekosystému se projevuje řada fyzikálních a biologických aspektů. Jedním z podstatných faktorů je samotný charakter půdy. Píščité půdy, jako v případě našeho experimentu, mají celkově malou vodní retenční kapacitu (JENSEN et al. 2005). Ta je zvyšována přítomností jemných částic a zvláště organické hmoty – humusu. Ten je díky vegetaci koncentrován zejména při povrchu půdy, v nadložních horizontech (L, F, H) a svrchním minerálním horizontu A (YANG et al. 2021). To je jedním z důvodů vyšší vlhkosti tohoto horizontu v porovnání s hlubšími horizonty. Vyšší vlhkost horizontu A se v naší studii jednoznačně projevila zejména na holině, kde byl vzhledem k nízké pokrývnosti vegetace (přízemní vegetaci s celkovou pokrývností do 10 %, v které dominovalo borůvčí) minimální vliv evapotranspirace redukcí vstup vody do půdy i snižující její vlhkost. Naproti tomu pod dospělým porostem borovice byl dlouhodobě patrný, extrémně do začátku srpna 2019 (obr. 7), vliv dřevin a přízemní vegetace na omezení vstupu vody do půdy intercepce i odběr vody z půdy pro evapotranspiraci. Z průběhu vlhkosti následujícího po tomto období je patrné, že se pozitivně projevily vyšší srážkové úhrny v srpnu a září 2019 a zásoba vody v půdě se již dostala nad úroveň kompletně odčerpávanou vegetací, tzn., že bylo ukončeno období zvýšeného rizika deficitu vody v ekosystému lesa.

Schopnost a průběh vsakování srážek jsou ovlivňovány charakterem povrchu půdy. Vodoodpudivé vlastnosti některých forem půdní hrabanky (soil water repellency) mohou způsobovat povrchovou akumulaci nebo povrchový odtok srážkové vody a nestejně zasakování (HEWELKE et al. 2018). Při déletrvajících srážkách, při kterých dochází k plošnému hydraulickému propojení povrchu a interiéru půdy, a po určitém čase, by se však měly vlivem spojitosti půdních vrstev lokální rozdíly vlhkosti půdy způsobené tímto jevem snižovat. Proto se dá předpokládat, že i náhodná bodová měření naší studie stav lokality rámcově reprezentovala.

Důležitými faktory ovlivňujícími vývoj vlhkosti půdy jsou také teplota (FENG, LIU 2015) spojená s radiací (ozářeností plochy) a proudění vzduchu (CHEN et al. 1993). Otevřené prostředí holin zvyšuje teplotní amplitudy i rychlost větru, čímž narůstá výpar z povrchu. Jak např. popsal KREČMER (1982), vznikem rozsáhlých holin po smrkových porostech se výrazně snižuje drsnost povrchu na přibližně 1/100 až 1/500 původní hodnoty. Tento jev vede k významnému zvýšení průměrné rychlosti proudění vzduchu při omezení dynamické turbulence. Holiny v našem experimentu měly velikost 0,6 a 1,3 ha. Vzhledem k charakteru okolních porostů (většinou navazovaly dospělé porosty borovice) však nelze předpokládat extrémní vliv větru na vysušování povrchu půdy. Tomuto předpokladu také odpovídá vlhkost horizontu A, která byla na holinách v termínech měření v porovnání s porostem borovice průkazně vyšší i v prostoru brázdy, v které je odkrytý povrch půdy nejvíce vystavený výparu.

TOR-NGERN et al. (2018) ve svém přehledu uvádějí, že borové lesy v průměru spotřebují 66 % srážek na evapotranspiraci, třetina srážek je pak transformována na odtok. Podle předchozí studie (ŠPULÁK et al. 2022) byl však podíl srážek, ze kterých se na zájmovém území může formovat odtok, za sledované období let 2017–2020 minimální. Hlouběji než 70 cm v půdě prosáкло pod porostem borovice průměrně pouze 3 % srážkového úhrnu a na holině 9 %. Zbývající voda byla zachycena a využita v rámci stromového patra, přízemní vegetace a půdní bioty. Za jednu z významných zásobáren vody (a živin) v půdě lze považovat podzemní orgány rostlin (DA SILVA, ROSSATTO 2019).

Při periodickém šetření se vliv období v rámci vegetační doby na dlouhodobém průběhu vlhkosti horizontů půdy jednoznačně neprojevil – z hodnot není např. zřejmé významné navýšení vlhkosti v průběhu zimního období. Z toho lze usuzovat, že velikost a časová následnost



Obr. 4.

Průměrná vlhkost A horizontu půdy v transektu z dospělého porostu borovice na holinu bez přípravy (nahore, porostní okraj znázorňuje piktogram) a s přípravou půdy orbou (dole) ve třech termínech měření: 4. 6., 13. 6. a 30. 8. 2018. Porost – dospělý porost borovice, Holina val – půda pod valem na holině s přípravou půdy, Holina brázda – půda v brázdě na holině s přípravou půdy, Dosp. les – dospělý les

Fig. 4.

Average soil moisture in A horizon in a transect from mature pine stand to a clear-cut area without soil preparation (above, the edge of the stand is represented by a pictogram) and with soil prepared by ploughing (below) in three measurement dates: 4/6, 13/6 and 30/8/2018. Porost – mature pine, Holina val – soil below a mound on the clear-cut area with soil preparation, Holina brázda – soil in a furrow on the clear-cut area with soil preparation, Mat. pine – mature pine stand

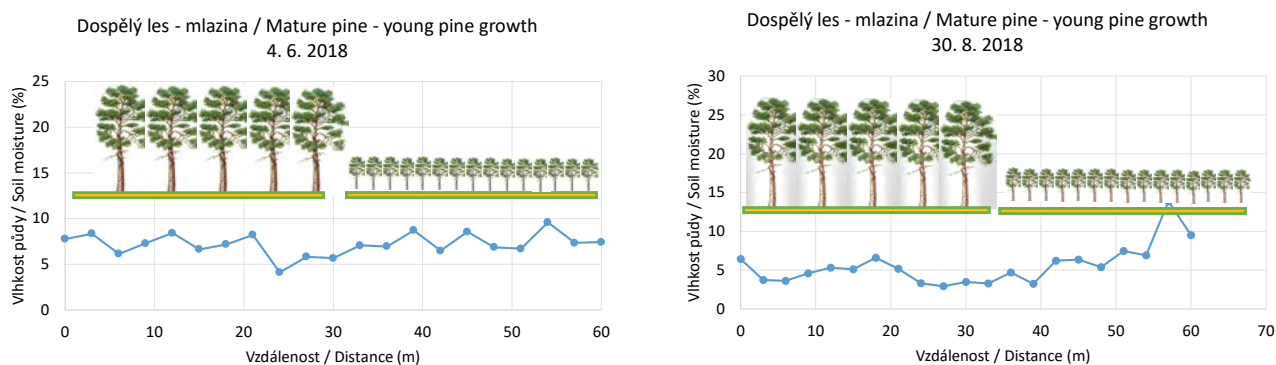
předchozích srážek hrají na vývoji vlhkosti půdy na daném stanovišti roli významnější, než konkrétní den měření v roce.

Vlhkost na holině klesala s hloubkou v půdě. To souvisí jednak s pronikáním omezeného množství srážek do půdy (infiltrací), které jsou zachytávány postupně, jednak s výše zmíněným vlivem obsahu humusových látek ovlivňujících retenční kapacitu jednotlivých půdních vrstev. Minimální rozdíly vlhkosti v rámci sledovaného profilu pod porostem borovice v období do počátku srpna 2019 mohou mít souvislost s doběhem vlivu extrémně suchého roku 2018. Dřeviny pravděpodobně v suchém období roku 2018 snížily obsah vody v pletivech (např. ZWEIFEL et al. 2001) a k opětovnému vyrovnání nedošlo v průběhu zimy 2018–19, kdy byla sice zlepšena dostupnost vody v půdě, ale klimatické podmínky pravděpodobně neumožnily dostatečnou fyziologickou aktivitu stromů (cf. SCHABERG 2000). V jarním období je výrazná potřeba vody pro rašení a rozvoj listů, obsah vody v pletivech se tak mohl vyrovnávat až do vrcholného léta. Rozdíl mezi průběhem vlhkosti do srpna 2019 a po něm by mohl souviset i s pozorováním WANGA et al. (2023), kteří z výsledků měření v agrolesnickém systému hospodaření uvádějí, že vlhkost svrchního horizontu půdy v období

sucha byla víceméně stabilní, zatímco v průběhu srážkově bohatého období kolísala.

Pokles půdní vlhkosti s hloubkou v půdě také nepřímou potvrzuje, že se dřeviny rostoucí na tomto stanovišti nemohou spoléhat na dostupnost vláhy pocházející z podzemní vody, jejíž vztlání z hladiny v hloubkách více než 6 m, při písčitém charakteru půd, je mimo reálný dosah kořenů borovice. Nízké zastoupení živin v půdě a snižující se vlhkost představují přirozenou bariéru pro aktivní rozrůstání kořenů (cf. GOSS et al. 1993; HODGE 2004; BRUNNER et al. 2015).

Zvýšení vlhkosti horizontu A v části dospělého borového porostu s odstraněnou smrkovou podúrovňí oproti původnímu smíšenému porostu bylo (alespoň ve sledovaných termínech) nízké, celkově neprůkazné. Přesto však byl zjištěn pozitivní vliv tohoto zásahu na tloušťkový přírůst borovic (ŠPULÁK 2019, 2023). To vzhledem k absenci vzájemné konkurence v nadzemním prostoru mezi borovicí a smrkem v těchto porostech nepřímou potvrzuje, že i toto nepatrné zvýšení vlhkosti je pro hydrický režim borovice podstatné. Kromě toho OBERHUBER, GRUBER (2010) zjistili korelaci radiálního přírůstu borovic se srážkami a s relativní vlhkostí vzduchu. Naproti tomu vztah

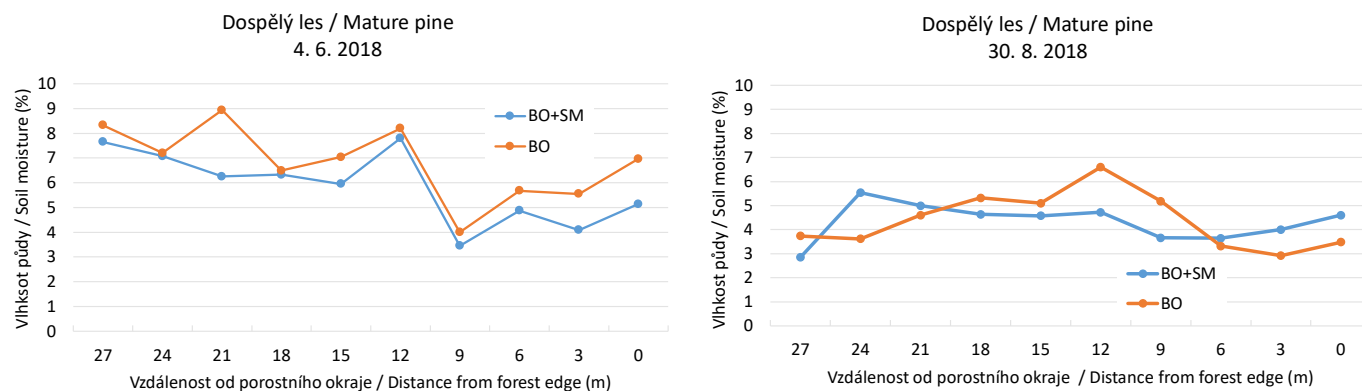


Obr. 5.

Průměrná vlhkost horizontu A půdy v transektu z dospělého porostu do mlaziny borovice 4. 6. a 30. 8. 2018

Fig. 5.

Average soil moisture in A horizon in the transect from mature stand to the young pine growth in 4/6 and 30/8/2018



Obr. 6.

Průměrná vlhkost horizontu A půdy v transektu porostem borovice s podúrovňí smrku a s odstraněnou podúrovňí 4. 6. a 30. 8. 2018

Fig. 6.

Average soil moisture of A horizon in the transect through pine stands with spruce lower storey and with the storey removed in 4/6 and 30/8/2018

přírůstu a vlhkosti půdy, případně teploty vzduchu, nebyl prokázán. To mj. poukazuje na plasticitu vegetace z hlediska příjmu vody v případě její periodicky zvýšené dostupnosti.

Pozorované zvýšení vlhkosti půdy na holině je důsledkem absence hydricky funkčního živého lesního porostu, které se následně projevuje i na rozložení odtoku z povodí (e.g. ANDRÉASSIAN 2004). Lesem využitou vodu však nelze jednoduše považovat za ztrátovou položku v lokálním ekosystému (POKORNÝ, HESSLEROVÁ 2022). Neboť les pro své fyziologické pochody související s vodou, ústící do (evapo-) transpirace, dokáže využívat většinu sluneční energie. Uvolňováním latentního tepla pak na prostředí působí přímým chladícím efektem a zároveň krátký oběh vody vytváří oblačnost a vyšší vlhkost vzduchu (až mlhy), a tlumí tak příkon sluneční energie (POKORNÝ et al. 2021). Tyto dopady jsou, zvláště při současných projevech klimatické změny, pro prostředí spíše významným ziskem.

ZÁVĚR

Z hodnocení průběhu vlhkosti půdy v různých polohách borového porostu na chudém stanovišti s písčitou půdou a hloubkou podzemní vody mimo dosah kořenů vyplynuly následující souvislosti:

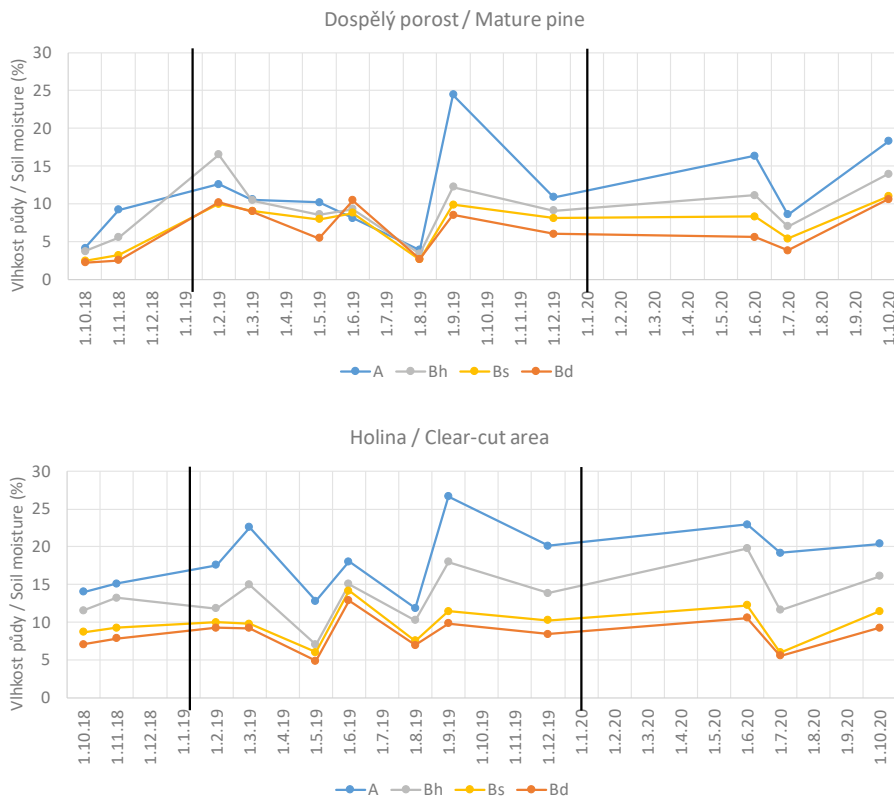
- Na holině bylo potvrzeno oproti dospělému porostu borovice celoroční zvýšení vlhkosti půdy, a to zejména svrchních horizontů (A a Bh).

- Rozdíly mezi vlhkostí svrchního minerálního horizontu půdy pod valem a v brázdě na holině s přípravou půdy se vyvíjely v souvislosti s časem od poslední srážky a její sumou. Při déletrvajícím období bez srážek klesala vlhkost půdy v brázdě.
- Zapojená mlazina borovice vlhkost svrchní vrstvy půdy ovlivnila podobně jako dospělý porost, navýšení vlhkosti potvrzené na holině se již neprojevovalo.
- Zvýšení vlhkosti půdy po odstranění smrkové podúrovně borového porostu bylo pouze dílčí, přesto pro vývoj borovic podstatné.
- Vlhkost půdy na holině i v suchých periodách klesala s hloubkou v půdě. Pod porostem byl tento vztah pozorovaný pouze při dostatečném množství vody v ekosystému (po doplnění srážkového deficitu).
- Vliv postupu vegetační doby se na dlouhodobém průběhu vlhkosti horizontů půdy jednoznačně neprojevil.

Zjištěné výsledky mohou být uplatnitelné pro porozumění vývoje vlhkosti půdy v borových lesích na obdobných stanovištích.

Poděkování:

Výsledek vznikl za podpory Ministerstva zemědělství ČR v rámci podpory na rozvoj výzkumné organizace č. MZE-RO0123 a projektu QK24010054 – Dopady klimatické změny na malá lesní povodí a možnosti jejich zmírnění prostřednictvím lesnického managementu a vodohospodářských opatření.

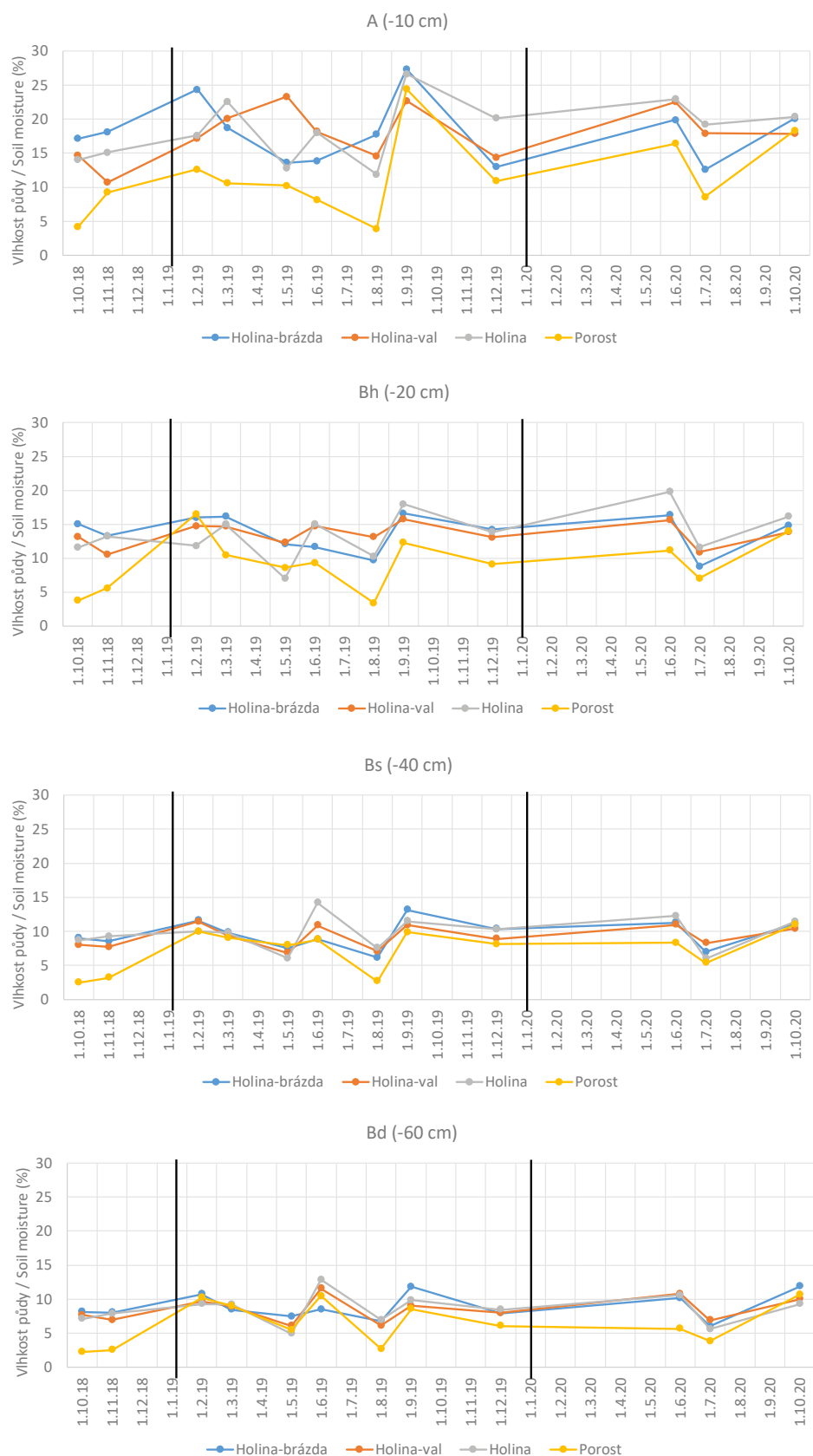


Obr. 7.

Průběh vlhkosti v půdních horizontech pod dospělým porostem borovice a na holině bez přípravy půdy od října 2018 do října 2020. Horizonty: A (tzn. cca 10 cm pod povrchem půdy), Bh – 20 cm pod povrchem půdy, Bs – 40 cm a Bd – 60 cm pod povrchem půdy

Fig. 7.

Moisture of soil horizons under a mature pine stand and on clear-cut area without soil preparation from October 2018 to October 2020. Horizons: A (i.e. cca 10 cm below ground), Bh – 20 cm, Bs – 40 cm and Bd – 60 cm below ground


Obr. 8.

Průběh vlhkosti v jednotlivých horizontech půdy od října 2018 do října 2020 ve variantách: Holina-brázda, -val – tzn. holina s přípravou půdy; Holina – bez přípravy půdy; Porost – dospělý porost borovice lesní

Fig. 8.

Moisture of individual soil horizons from October 2018 to October 2020 in treatments: Holina-brázda – soil in a furrow on the clear-cut area with soil prepared by ploughing; Holina-val – soil below a mound on the same clear-cut area; Holina – clear-cut area without soil preparation; Porost – mature pine

LITERATURA

- ANDRÉASSIAN V. 2004. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291: 1–27. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.015
- BERRY Z.C., EMERY N.C., GOTSCH S.G., GOLDSMITH G.R. 2019. Foliar water uptake: Processes, pathways, and integration into plant water budgets. *Plant, Cell & Environment*, 42: 410–423. DOI: 10.1111/pce.13439
- BRUNNER I., HERZOG C., DAWES M.A., AREND M., SPERISEN C. 2015. How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science*, 6: 547. DOI: 10.3389/fpls.2015.00547
- DA SILVA B.H.P., ROSSATTO D.R. 2019. Are underground organs able to store water and nutrients? A study case in non-arboreal species from the Brazilian Cerrado. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 31 (3): 413–421. DOI: 10.1007/s40626-019-00155-9
- DEROSE R.J., SEYMOUR R.S. 2010. Patterns of leaf area index during stand development in even-aged balsam fir – red spruce stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 40 (4): 629–637. DOI: 10.1139/X10-018
- FENG H., LIU Y. 2015. Combined effects of precipitation and air temperature on soil moisture in different land covers in a humid basin. *Journal of Hydrology*, 531: 1129–1140. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.016
- GOSS M.J., MILLER M.H., BAILEY L.D., GRANT C.A. 1993. Root growth and distribution in relation to nutrient availability and uptake. *European Journal of Agronomy*, 2 (2): 57–67. DOI: 10.1016/S1161-0301(14)80135-4
- HEWELKE E., OKTABA L., GOZDOWSKI D., KONDRAS M., OLEJNICZAK I., GÓRSKA E.B. 2018. Intensity and persistence of soil water repellency in pine forest soil in a temperate continental climate under drought conditions. *Water*, 10 (9): 1121. DOI: 10.3390/w10091121
- HODGE A. 2004. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 162 (1): 9–24. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01015.x
- CHEN J.Q., FRANKLIN J.F., SPIES T.A. 1993. Contrasting microclimates among clear-cut, edge, and interior of old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 63 (3/4): 219–237. DOI: 10.1016/0168-1923(93)90061-L
- JENSEN N.H., BALSTRØM T., BREUNING-MADSEN H. 2005. The relations between soil water retention characteristics, particle size distributions, bulk densities and calcium carbonate contents for Danish soils. *Hydrology Research*, 36 (3): 235–244. DOI: 10.2166/nh.2005.0017
- KOSTNER B., FALGE E., TENHUNEN J.D. 2002. Age-related effects on leaf area/sapwood area relationships, canopy transpiration and carbon gain of Norway spruce stands (*Picea abies*) in the Fichtelgebirge, Germany. *Tree Physiology*, 22 (8): 567–574. DOI: 10.1093/treephys/22.8.567
- KREČMER V. 1982. Bioklimatické změny na obnovních sečích v imisních oblastech. In: Hrazdira A. et al. (eds.): *Obnova lesa v imisních oblastech. Sborník příspěvků ze semináře*. 29. a 30. září 1981. Praha, Česká akademie zemědělská: 63–68.
- OBERHUBER W., GRUBER A. 2010. Climatic influences on intra-annual stem radial increment of *Pinus sylvestris* (L.) exposed to drought. *Trees*, 24 (5): 887–898. DOI: 10.1007/s00468-010-0458-1
- POKORNÝ J., RYPLOVÁ R., HESSLEROVÁ P., JIRKA V., VÁCHA Z. 2021. Slunce – voda – rostliny – klima: Podklady k poznání a výuce. Třeboň, ENKI, o.p.s.: 197 s. Dostupné na/Available on: https://projekty.pf.jcu.cz/svv/files/Slunce_-_voda_-_rostliny_-_klima_Podklady_k_poznani_a_vyuce.pdf
- POKORNÝ J., HESSLEROVÁ P. 2022. Aktivní úloha vzrostlého lesa v klimatu, oběhu vody a zadržování živin. *Sovak*, 31 (7/8): 16–25.
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Dostupné na/Available on: <https://www.R-project.org/>
- SCHABERG P.G. 2000. Winter photosynthesis in red spruce (*Picea rubens* Sarg.): Limitations, potential benefits, and risks. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 32 (4): 375–380. DOI: 10.2307/1552385
- 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 (1/4): 258–274. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.11.036
- STAELENS J., DE SCHRIJVER A., VERHEYEN K., VERHOEST N.E.C. 2006. Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. *Journal of Hydrology*, 330 (3/4): 651–662. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.04.032
- ŠACH F., ČERNOHOUS V. 2016. Hydraulic lift potential of beech for spruce in extremely dry 2015 vegetation season. In: Kacálek, D. et al. (ed.): *Funkce lesa v měnících se podmínkách prostředí. Sborník původních vědeckých prací u příležitosti 17. vědecké konference pěstitelů lesa. Dobruška, 30.–31. 8. 2016. Opočno, VÚLHM – VS: 223–230. Proceedings of Central European Silviculture. Volume 6.*
- ŠPULÁK O. 2019. Vliv smrkové etáže na tloušťkový přírůst borových porostů na stanovišti chudá borová doubrava v suchých letech. [Impact of the Norway spruce subcanopy on DBH of Scotch pine stands on the nutrient poor oak with pine forest site in dry years]. In: Houšková, K. (ed.): *Pěstování lesů ve střední Evropě. Sborník vědeckých prací u příležitosti 20. mezinárodního setkání pěstitelů lesa střední Evropy a 100 let založení Mendelovy univerzity v Brně. Brno, 3.–5.9.2019. Brno, Mendelova univerzita v Brně: 184–191. Proceedings of Central European silviculture [Vol. 9]*
- ŠPULÁK O., KACÁLEK D. 2020. How different approaches to logging residues handling affected retention of nutrients at poor-soil Scots pine site after clear-cutting? A case study. *Journal of Forest Science*, 66 (11): 461–470. DOI: 10.17221/143/2020-JFS
- ŠPULÁK O., KACÁLEK D., RÁČEK Z., PEROUTKOVÁ P., PALARČÍK J. 2022. The impact of clear-cutting on the volume and chemistry of water at a sandy nutrient-poor pine site. *Forests*, 13: 1226. DOI: 10.3390/f13081226
- ŠPULÁK O., ČERNÝ J. 2023. Potenciál borovice lesní v podmínkách změny klimatu: review. [Scots pine potential under climate change conditions: review]. *Zprávy lesnického výzkumu*, 68 (1): 49–58. DOI: 10.59269/zlv/2023/1/689
- ŠPULÁK O. 2023. Stabilization of the pine increment during recent years of low precipitation and high temperatures by removal of the spruce lower storey. *Forest Ecology and Management*, 545: 121300. DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121300
- TOR-NGERN P., OREN R., PALMROTH S., NOVICK K., OISHI A., LINDER S., OTTOSSON-LÖFVENIUS M., NÄSHOLM T. 2018. Water balance of pine forests: Synthesis of new and published results. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259: 107–117. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.04.021

- VILHAR U., SIMONCIC P. 2012. Water status and drought stress in experimental gaps in managed and semi-natural silver fir-beech forests. *European Journal of Forest Research*, 131 (5): 1381–1397. DOI: 10.1007/s10342-012-0605-x
- WANG Z.H., XIONG K.N., WU C.X., LUO D., XIAO J., SHEN C.H. 2023. Characteristics of soil moisture variation in agroforestry in karst region. *Land-Basel*, 12 (2): 347. DOI: 10.3390/land12020347
- YANG H., YOO H., LIM H., KIM J., CHOI H.T. 2021. Impacts of soil properties, topography, and environmental features on soil water holding capacities (SWHCs) and their interrelationships. *Land-Basel*, 10 (12): 1290. DOI: 10.3390/land10121290
- ZWEIFEL R., ITEM H., HÄSLER R. 2001. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree Physiology*, 21 (12/13): 869–877. DOI: 10.1093/treephys/21.12-13.869

VARIATION OF SOIL MOISTURE IN DIFFERENT STAND CONDITIONS OF PINE STAND ON NUTRIENT-POOR SANDY SOILS DURING VEGETATION PERIOD

SUMMARY

In the ongoing period of climate change, which is accompanied by irregularities in the distribution of precipitation and rising average air temperatures, water plays an increasingly important role in the ecosystems of landscape. The relationship between soil water and forest stand evolves during the development of the stand, as the proportions of interception and evapotranspiration change. Scots pine stands were considered stable in terms of health even in the areas and periods of poor precipitation, therefore little attention was paid to them. However, the dry years of the last period (Fig. 1) have pointed to the limits of the Scots pine resilience. A deeper knowledge of the water regime of pine can contribute to understanding the development of the health status of these stands in the context of their character and the development of the climate.

The contribution aims to describe and compare the development of soil moisture in different growth conditions of Scots pine stands on poor sandy soils between 2018 and 2020 and define the basic principles of these relationships.

The research was carried out in lowland of the Czech Republic on nutrient-poor deep sandy soils with groundwater level at a depth of 6 to 8 m, altitude of approx. 250 m. Measurement of soil moisture was performed with a HH2 hygrometer with an ambulatory needle probe ML3 (Eijkelkamp, Holland) in four to five repetitions per location.

In 2018, the moisture of A horizon (at a depth of approx. 10 cm) was measured in a line (transect) through the mature, young forest stand or clear-cut area. Furthermore, moisture in vertical profile of soil under a mature stand of pine with spruce lower storey, on clear-cut area without soil preparation and on clear-cut area with soil prepared for natural regeneration by ploughing (below mounds and furrows) was measured during the years 2018–2020. Within the probes dug to a depth of approx. 80 cm, moisture was measured in horizon A and in three depths of horizon B: approx. 20 cm (marked Bh), 40 cm (Bs) and 60 cm (Bd) below the soil surface. Depending on the nature of the data, the average moisture values of the respective stand-character treatments were statistically compared using a t-test or one-way ANOVA followed by Tukey test in the R statistical environment (Tab. 1).

Right from the beginning, the year 2018 was poor in precipitation, the year 2019 was more balanced, the last evaluated year was overall colder and rich in precipitation (with the exception of April; Fig. 2).

The first line measurement of soil moisture took place in the first half of June 2018, which was characterized by a significant precipitation deficit (Fig. 1, 2, and 3). The maximum A-horizon moisture was observed on clear-cut area without soil preparation and under the mounds on ploughed clear-cut area (Fig. 4). The differences between the moisture under the stand and every clear-cut treatment were highly significant ($p < 0.001$).

Eleven millimeter of rain fell the day before the measurement of 13/06/2018 (Fig. 3). Moisture was similar to the previous date. The differences between the stand and clear-cut area moistures were significant ($p < 0.01$). In the furrows, the moisture was on that date higher compared to the mounds, but the differences were not significant ($p = 0.17$; Fig. 4).

About 26 mm of rain fell on the sixth day before the measurement in August (Fig. 3). There were significant differences between the moisture under the stand and on the clear-cut areas ($p < 0.001$), mound and furrow showed no difference in this term ($p = 0.5$; Fig. 4).

Moisture of the upper soil horizon under the young pine growth with closed canopy was close to the moisture under the mature pine in both evaluated dates ($p > 0.2$; Fig. 5).

In the June date, the average humidity of horizon A in the line transect under the pine stand with the spruce lower storey removed was up to 3% higher, but the overall differences were not significant. At the end of August, the moistures at both transects overlapped, also with no significant difference (Fig. 6).

Monitoring under the mature pine stand pointed to very low moisture values and minimal differences between the average moisture of the upper (A, Bh) and deeper (Bs, Bd) soil horizons at the beginning of the measurements. In the winter season of 2018–19, the moisture increased. Furthermore, until the beginning of August 2019, the differences of the positions in the profile were minimal (Fig. 7). From this date, moisture decreased with depth in the soil. Under the pine stand, the overall humidity of the A horizon was significantly higher than the humidity of Bd ($p = 0.03$).

On the other hand, in the clear-cut area without soil preparation, the moisture content decreased significantly with the depth in the soil throughout the observed period ($p < 0.001$; Fig. 7). The moisture was higher compared to pine stand values in the entire profile with exception of the last measurement date in October 2020. With increasing depth, soil moisture decreased, its fluctuations during the observed period were reduced, as well as the differences between the treatments.

In the entire profile, in the B horizon with the exception of the period from the beginning to the middle of 2019, soil moisture in all horizons under the canopy was lower compared to the values on the treatments of clear-cut area. These difference were significant in A and Bh horizons ($p = 0.002$). The differences between the treatments on the clear-cut area were not significant and did not show a uniform trend (Fig. 8).

The evaluation of the development of soil moisture in different positions of a pine stand on a nutrient-poor site with sandy soil and depth of groundwater beyond the reach of the roots revealed the following associations: compared to the mature pine stand, there was a year-round increase in soil moisture of the clear-cut areas, especially in the upper horizons (A and Bh). On the clear-cut area with soil preparation, the differences between moisture of the upper mineral horizon of the soil under the mound and in the furrow developed in connection with the time since the last precipitation and its amount. During a longer period without precipitation, soil moisture in the furrow decreased, probably due to increased evaporation. The young pine growth with closed canopy affected the moisture of the upper layer of the soil in a similar way as the mature stand, the moisture increase manifested in the clear-cut area was no longer observed. The increase in soil moisture of the pine forest after removal of the spruce lower storey was only limited (small), but essential for the improvements in development of pine trees. Soil moisture on clear-cut area decreased with depth in the soil even in dry periods. Under the canopy, this relationship was observed only when there was sufficient water in the ecosystem (after supplementing of precipitation deficit). The period within the growing season did not clearly manifested on the long-term course of the soil moisture. It can be assumed that the obtained results correspond with the development of soil moisture in pine forests of similar habitats.

Zasláno/Received: 16. 1. 2024

Přijato do tisku/Accepted: 13. 05. 2024