

ZPŮSOBY APLIKACE HYDROGELU A MOŽNOSTI JEHO VYUŽITÍ V LESNICKÉM PROVOZU S INOVOVANÝMI MOŽNOSTMI DÁVKOVÁNÍ



Ing. JAN MACKŮ, Ph.D.
a kol.

Způsoby aplikace hydrogelu a možnosti jeho využití v lesnickém provozu s inovovanými možnostmi dávkování

Certifikovaná metodika

Ing. Jan Macků, Ph.D.

doc. Mgr. Bc. Karolina Resnerová, Ph.D.

doc. Ing. Ivana Tomášková, Ph.D.

Ing. Tomáš Holeček

Ing. Kateřina Hájková, Ph.D.

Mgr. Jiří Trombik, Ph.D.

Lesnický průvodce 7/2022

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

Strnady 136, 252 02 Jíloviště

www.vulhm.cz

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

http://www.vulhm.cz/lesnicky_pruvodce

Vedoucí redaktor: Ing. Jan Řezáč; e-mail: rezac@vulhm.cz

Výkonná redaktorka: Miroslava Valentová; e-mail: valentova@vulhmop.cz

Grafická úprava a zlom: Klára Šimerová; e-mail: simerova@vulhm.cz

ISBN 978-80-7417-243-4

ISSN 0862-7657

HYDROGEL APPLICATION AND THE POSSIBILITIES OF ITS USE IN FORESTRY OPERATIONS WITH INNOVATIVE DOSING OPTIONS

Abstract

The certified methodology represents the results of initial research and development, which were carried out by the author's, including the innovation of procedures in the application of hydrogels during forest regeneration in changing climatic conditions. The work describes the unique properties of hydrophilic polymers, the possibilities of their application, the advantages and disadvantages of such methods, and the need for their selective use for individual tree species. The methodology is intended as a recommendation for applications of hydrogels in forest cultivation for forest managers and owners, and as a result, it makes forest regeneration more efficient after clear-cutting or salvage felling. It focuses on simplifying the application, using either innovative methods or mechanization.

Key words: diameter and height increment; drought-sensitive species; means of mechanization; tablets; vitality

Oponenti: Ing. Petr Fuka, soudní znalec oboru ochrana přírody, hodnocení statického a zdravotního stavu dřevin, Stádlec

Ing. Miroslav Lotocký, Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem

Adresa autorů:

Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská
Kamýcká 129
165 00 Praha 6 – Suchbát

Obsah:

1 ÚVOD	7
2 CÍLE METODIKY	8
3 VLASTNÍ POPIS METODIKY	9
3.1 Využití hydrofilních polymerů	9
3.2 Způsoby aplikace hydrogelů v lesnické praxi	10
3.2.1 Aplikace práškového hydrogelu	10
3.2.2 Aplikace směsi hydrogelu a vody pod kořen dřeviny	11
3.2.3 Máčení kořenového systému dřevin v hydrogelu	11
3.2.4 Tableta s hydrogelem	13
3.3 Laboratorní ověření účinnosti hydrogelu v půdním profilu	17
3.3.1 Analýza účinnosti hydrogelu	17
3.3.2 Inkubační pokus pro stanovení uvolňování do půdního roztoku	23
3.4 Technologie a mechanizační prostředky aplikace hydrogelu	26
3.4.1 Rýhovací stroje	26
3.4.2 Sázecí rýhovací stroj s aplikací hydrogelu	26
3.4.3 Další metody	28
3.5 Vliv aplikace hydrogelu na vitalitu, růst a fyziologické parametry vybraných dřevin	29
3.5.1 Experiment ve fóliovníku s řízenou závlahou	30
3.5.2 Experiment na volně obnovovaných plochách	36
3.5.3 Experiment na oplocené studijní ploše v náhodném designu rozmístění sazenic	38
3.5.4 Shrnutí experimentální části	42
4 NOVOST POSTUPŮ	44
5 POPIS UPLATNĚNÍ	45
6 EKONOMICKÉ ASPEKTY UPLATNĚNÍ	46
7 DEDIKACE	46
8 LITERATURA	47
8.1 Použitá literatura	47
8.2 Publikace, které předcházely metodice	49
8.2.1 Odborné články	49
8.2.2 Aplikační výstupy	49
SUMMARY	51
9 SEZNAM OBRÁZKŮ	53

1 ÚVOD

Lesní ekosystémy střední Evropy jsou stále častěji negativně ovlivňovány dlouhými periodami sucha, v jejichž důsledku začala v posledních letech bezprecedentní kůrovcová kalamita. Kombinace těchto faktorů vedla ke vzniku rozsáhlých holin, které bude nutné postupně obnovovat. Od roku 2002 do roku 2012 se průměrný nezdar při zalesňování pohyboval kolem 15 %. V extrémně suchém roce 2015 se potřeba opakovaného zalesňování zvýšila na 22 % (SIMANOV 2016). V letech 2020–2021 činila pouze 9 % pravděpodobně v důsledku příznivých srážkových podmínek v obou letech. Při zalesňování dubem se jedná o zhruba 1000 sazenic na ha, které je třeba nahradit. Při současné výměře zalesňované plochy jsou to již stovky tisíc sazenic. Vedle pečlivého výběru vhodných dřevin pro tato stanoviště je především za nepříznivých klimatických podmínek bezpodmínečně nutné snížit stres suchem a zvýšit množství dostupné vody pro sazenice. Tato problematika je řešena řadou vědeckých týmů a odborníků, kteří testují optimální přístupy pro budoucí pěstování lesů nejen ve střední Evropě.

Jedním z velmi perspektivních řešení pro zvýšení dostupnosti vody rostlinám je využití půdních kondicionerů – hydrogelů. Běžné hydrogely absorbují 100násobek své hmotnosti, nejmodernější super-hydrogely dokáží absorbovat více než 400násobek své hmotnosti. Vodu pak uvolňují v průběhu suchého dne rostlině a následně jsou schopny rychle pojmout novou vodu z půdy. Hydrogely jsou efektivní po dobu několika let (WILSKE et al. 2014), což je dostatečná doba potřebná pro uchycení sadby na stanovišti.

Všeobecně jsou hydrofilní polymery (dále hydrogely) látky na přírodní nebo syntetické bázi s velmi vysokou absorpční schopností (ANDRY et al. 2009). Tato vlastnost přirozeně vedla k jejich použití v lesnictví a zemědělství (PARK, KIM 2001; SAXENA 2010; LEE et al. 2013; LU et al. 2018; GRABOWSKA-POLANOWSKA et al. 2021), kde jsou významným pomocníkem pro udržování vlhkosti na sušších stanovištích nebo na živiny chudých půdách (PUOCI et al. 2008). Zemědělství využívá přírodní akrylamidové hydrogely, nejčastěji polymer uhličitanu draselného. Tento typ hydrogelu je vhodný pro zemědělské plodiny i stromy, protože dokáže zadržet vodu a živiny u kořenů na dostatečně dlouhou dobu a při následném vysychání půdy jim je znovu dodává. Běžné hydrogely jsou schopny poskytnout rostlinám až 95 % vody, kterou absorbují (VUNDAVALLI et al. 2015).

V současnosti je aplikace hydrogelu do půdy realizována třemi základními způsoby: máčením kořenového systému rostlin do připraveného gelového roztoku (SARVAŠ et al. 2007), smícháním hydrogelu v práškové formě v určitém poměru se zeminou

nebo substrátem, který se pak po zasazení zavlaží (ORIKIRIZA et al. 2013), nebo nasypáním hydrogelu v práškové formě rovnou do připravené výsadbové jámy. Tyto způsoby ovšem nejsou vhodné pro každý typ výsadby, spíš se hodí pro sázení na menších plochách bez plné automatizace. Různé zkušenosti s hydrogelovým ošetřením mohou také vyplývat z různých aplikačních postupů. Kořeny mohou být nasáklé hydrogelem, ale odlišně rozvětvený kořenový systém, a tudíž i různé množství vázaného hydrogelu může způsobit zkreslení výsledků (WATANABE et al. 2019).

V předkládané metodice zohledňujeme specifika jednotlivých aplikací hydrogelu v lesním hospodářství a shrnujeme dosavadní poznatky a výsledky výzkumného týmu zabývajícího se využitím hydrofilních polymerů v obnově lesa.

2 CÍLE METODIKY

Cílem metodiky je podrobně popsat způsoby aplikace hydrogelu v lesním hospodářství s využitím nových poznatků, které autorský tým získal při řešení projektů v posledních několika letech. Důraz je kladen zejména na inovované možnosti dávkování hydrogelu přímo k sazenicím během obnovy lesů (tablety s hydrogelem, adaptér na rýhovací stroj). Hodnocení a srovnání několika metod aplikace by mělo vést ke zefektivnění nakládání s lesními sazenicemi, úsporám na materiálu a také umožnit obnovu dřevin tam, kde to dříve z důvodu nedostatečných srážek bylo nemožné nebo velmi neefektivní. Metodika představuje adaptační opatření využitelné při obnově lesa v kontextu probíhajících klimatických změn.

3 VLASTNÍ POPIS METODIKY

3.1 Využití hydrofilních polymerů

Použití hydrogelů je všestranné a najdeme ho téměř v každém odvětví, jako jsou medicína, lesnictví, zemědělství, zahradnictví, vinohradnictví atd. Mezi nejčastější hydrofilní polymery patří kopolymery akrylátu či akrylamidu. Hydrofilní polymery se využívají jako biokompatibilní materiály v lékařství, v tkáňovém inženýrství (LEE, MOONEY 2001), ale i jako přísady do nátěrových hmot a jako další pomocné látky, hlavně z důvodu složky supersorbentů a flokulantů (MLEZIVA, ŠNUPÁREK 2000; MOHAN et al. 2005). Řízená radikálová polymerace poskytuje přípravu kopolymerů s vhodnějšími vlastnostmi než u polymerů připravených klasickou radikálovou polymerací. U takto připravených polymerů se jejich hydrofilnost vyjadřuje množstvím vody v rovnovážně nabotnalém stavu. Hydrofilnost polymerů stoupá s délkou polymerního řetězce akrylátových esterů (HUNKELER 1991). Polymeraci můžeme ovlivnit koncentrací monomerů, typem použitého iniciátoru, případně druhem použitého síťovadla, čímž můžeme ovlivnit i porozitu polymeru (KOPEČEK et al. 1968).

I když stále roste zájem o přírodní polymery (SEDLÁKOVÁ et al. 2006), v zemědělství a lesnictví se nejčastěji používají polymery syntetického původu, nejčastěji je to polymer uhličitanu draselného. Tento typ hydrogelu je vhodný pro rostliny, včetně lesních dřevin, protože dokáže zadržet vodu a živiny u kořenů na dostatečně dlouhou dobu a při následném vysychání půdy jim je znovu dodává. Hlavním důvodem preference polymerů syntetického původu je, že u přírodních polymerů je proměnné chemické složení, které má za následek i rozdílné chemické a fyzikální vlastnosti. To může mít za následek nestejnou rychlost hydratace polymeru či její nepravidelnost, případně i možnost mikrobiální kontaminace (CHALUPOVÁ et al. 2005).

3.2 Způsoby aplikace hydrogelů v lesnické praxi

3.2.1 Aplikace práškového hydrogelu

Hydrogel ve formě prášku se využívá i) plošně nebo ii) lokálně. Celoplošný způsob aplikace se pro lesotechnické potřeby jeví jako nevhodný. Tento způsob aplikace neposkytuje dostatek hydrogelu dostupného pro kořeny dřevin. Hydrogel se při použití této metody často nachází i ve větší vzdálenosti od cílové rostliny, pro kterou tak není využitelný, a navíc podporuje růst nežádoucí buřeny. Mezi další nevýhody této metody bezesporu patří vysoká ekonomická náročnost. Při základní dávce 100 kg hydrogelu na hektar a velkoobchodní ceně cca 230 Kč bez DPH za kg plus náklady na aplikaci se tato metoda nejeví jako ekonomicky efektivní. Při obnově sadbou dubu zimního, pokud budeme vycházet z orientační ceny 9 Kč za prostokořenennou sazenici, při minimálním počtu 9000 na hektar a běžných nákladech na sadbu, by se tato metoda vyplatila až při značném snížení povýsadbové mortality. Celoplošná aplikace je však vhodná ve specifických zařízeních jako jsou např. lesní školky.

Druhou variantou aplikace práškového hydrogelu významně snižující náklady je aplikace lokální – pod kořenový systém sazenice. V tomto případě odpadá problém vysokých ztrát materiálu, jako je tomu při celoplošné aplikaci. Rovněž nedochází k nežádoucí podpoře růstu buřeny. Ovšem při této metodě aplikace se nejvýrazněji projevují negativní aspekty významné objemové roztažnosti hydrogelu. Jeden gram absorbentu je schopen pojmout přibližně 250 gramů vody, což znamená významný nárůst objemu. Pokud je hydrogel v nenasyceném stavu aplikován lokálně pod kořen, dojde při následném nasycení k několikanásobnému zvýšení objemu, což může zapříčinit mechanické poškození kořenového systému sazenice. Následně při postupném vysychání dochází ke vzniku dutin, které rovněž negativně ovlivňují vývoj kořenového systému.

Významným omezením při lokální aplikaci v podmínkách obnovy lesních porostů jsou také nároky na přesnost dávkování. Aplikovat dávku v rozmezí 1–4 gramy s přesností na desetiny je v lese poměrně problematické a časově náročné (Obr. 1). Využití běžných odměrek je pro takto malé množství práškového hydrogelu v praxi velmi nepřesné.

3.2.2 Aplikace směsi hydrogelu a vody pod kořen dřeviny

Aplikace nařazené jíchý pod kořen sazenice je řešením problému s nárůstem objemu při primárním nasycení hydrogelu. Navíc tento způsob eliminuje riziko, že hydrogel začne kořen naopak vysušovat v případě aplikace do velmi suchého prostředí. Tato aplikace je i poměrně jednoduchá z hlediska dávkování, protože nařazenou jíchý již lze poměrně přesně dávkovat pomocí odměrek. V praxi se při obnově velmi osvědčily plastové odměrky, protože jsou jednak odolné, lehké a skladné, ale také umožňují nabrat cca 200 ml jíchý, což odpovídá dávce pro jednu sazenici (Obr. 2).

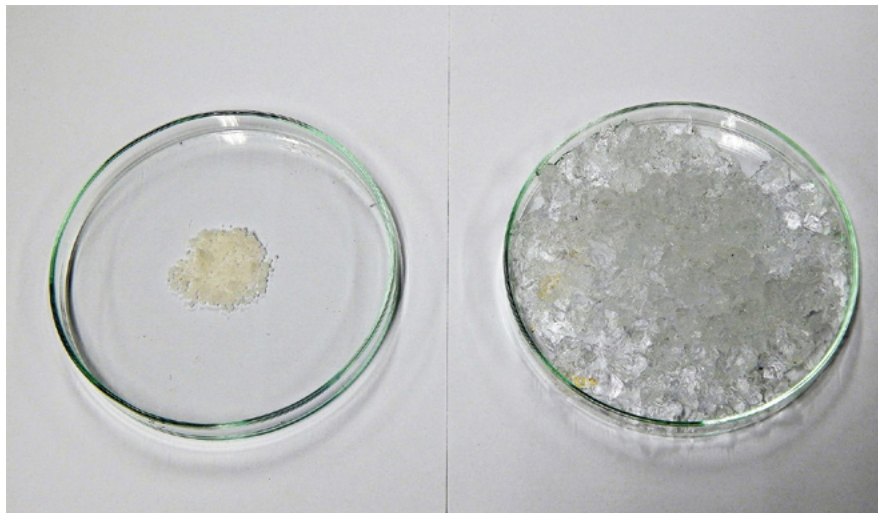
Příprava jíchý – směsi hydrogelu a vody je velmi snadná. Efektivní je využití plastových barelů s víky o objemu 30 nebo 50 l, které se naplní vodou a následně dopraví na paseku. Zde se pomocí jednoduché váhy odváží potřebné množství hydrogelu, který se aplikuje do sudu a za občasného promíchání nechá nasáknout zhruba půl hodiny. Čím je teplota vody a okolního prostředí nižší, tím je třeba vyčkat déle. Po nasycení hydrogelu je možné jíchý odebírat například do kbelíků a distribuovat po pasece.

Velkou výhodou tohoto způsobu aplikace je, že kořenový systém sazenice dobře „přisedne“ k jíše a sazenice je umístěna v loži s dostatkem vody. Z výše uvedeného lze vyvodit, že aplikace hydrogelu v nařazené formě je pro potřeby lesnického provozu ideální. Nevýhodou je poměrně náročná logistika a manipulace s jíchou na pasece. Na jeden hektar obnovy dubu zimního je při 200 ml jíchý na sazenici třeba 1800 litrů jíchý. Při poloviční dávce necelý kubický metr jíchý. Je třeba počítat s dopravou tohoto množství k pasece a také jeho distribucí k jednotlivým pracovníkům. Z toho plyne, že tato forma aplikace je sice výhodná z hlediska technologického, ovšem problematická s ohledem na praktickou logistiku pracovních postupů. Z hlediska pracovních postupů a jejich efektivity je aplikace jíchý vhodná zejména pro mechanizovanou obnovu. Pro tyto účely byla naším týmem vyvinuta speciální nástavba na rýhovací stroj (RZS 1), která umožňuje aplikaci na rozsáhlých pasekách. O stroji bude dále pojednáno v kapitole 3.4.1.

3.2.3 Máčení kořenového systému dřevin v hydrogelu

Máčení kořene sazenic v jíše s hydrogelem je běžnou praxí při manipulaci se sadbou během obnovy na pasece, případně při expedici v lesních školkách. Jícha se namíchá například v kbelíku nebo kalfasu, do kterého se následně vkládají vyzvednuté sazenice nebo balíky sazenic. Tímto způsobem se kořenový systém sazenic

ochrání před degradací na vzduchu. Metoda je velmi účinná pro prodloužení životaschopnosti vyzvednuté sadby a je alternativou pro založení sadby na pasci. Ovšem s ohledem na minimální množství hydrogelu, který ulpí na kořenech, nelze očekávat dlouhodobé působení hydrogelu po výsadbě. V rámci našich testů v pro-



Obr. 1: Jeden gram hydrogelu v práškové formě (vlevo) a po naředění vodou (vpravo). Foto: T. Holeček



Obr. 2: Dávkování jíchy s hydrogelem z barelu (vlevo) a její aplikace do sázecí jamky (vpravo). Foto: K. Resnerová

vozních podmínkách se vliv takto aplikovaného hydrogelu nepodařilo prokázat. Tato metoda se proto jeví jako vhodná zejména pro prodloužení doby manipulace s vyzvednutou sadbou. Na ujímavosti a přírůstu sazenic se dále tato metoda aplikace hydrogelu významně nepodílí.

3.2.4 Tableta s hydrogelem

Další z možností aplikace hydrogelu v lesnickém provozu, která je jednoduchá a efektivní, je využití objemově relativně stálého nosiče. Takovým nosičem může být například hydrofilní tableta (Obr. 3) pro výsadbu dřevin, která může obsahovat 7 až 60 % hydrofilního polymeru, vybraného ze skupiny zahrnující polyakrylát draselný, polyakrylát sodný, polyakrylamid, polymethylakrylát, polyethylakrylát a jejich směsi a 40 až 93 % objemu potom tvoří nosič. Jako nosič je vhodné použít dřevní reziduum – piliny nebo hobliny. Zatímco hydrofilní polymer je schopen vázat vodu a postupně ji dodávat rostlině, přítomnost dřevní substance v nosiči brání roztažnosti hydrogelu při bobtnání a omezuje potencionální narušení jemného kořenového vlášení. Zároveň vylepšuje půdu z hlediska provzdušnění a brání uléhavosti. Dřevní substance zajišťuje ve směsi retardační můstek mezi příjmem a uvolňováním vlhkosti do okolí a podporuje funkci hydrogelu pomocí hygroskopicity dřeva. Dřevní substance se rozkládá v půdě přirozeně a později slouží jako hnojivo pro sazenici.

Aplikace hydrogelu v nosiči usnadňuje manipulaci v provozu, protože tableta je aplikována přímo do jamek pro sazenice a není nutné hydrogel odměřovat či vážit.

V rámci metodiky testovanou tabletu tvoří substance na bázi ligninu a celulózy (piliny, hobliny) s velikostí částic v rozmezí 0,1–5,0 mm (nejlépe mezi 0,5 až 2 mm). Substanci tvoří z 80 % smrkové a z 15 % borové dřevo, zbývajících 5 % může být vyplněno dřevem jiných dřevin. Homogenizovaná směs má vstupní vlhkost $9\% \pm 1\%$.

Tvar hydrofilní tablety je plný, bez dutin. Druhou variantou je tableta obsahující dutinu pro umístění semene příslušné dřeviny (dále jen „výhodné provedení“; Obr. 3). Toto provedení je perspektivní, protože dodává potřebnou vlhkost a živiny od počátku klíčení semene. Průměr hydrofilní tablety je typicky v rozmezí od 18 mm do 45 mm a tloušťka od 8 mm do 20 mm s tolerancí 10 %. V jednom provedení se hmotnost hydrofilní tablety pohybuje v rozmezí od 3 do 20 g, ve výhodném provedení od 4 do 16 g. Výhodné provedení obsahuje v tabletě od 10 do 50 % hydrofilního polymeru – polyakrylátu draselného $[-CH_2-CH(COOK)-]_n$. Obsah nosiče se potom pohybuje v rozmezí od 50 do 90 % hmotnosti. Ve výhodném provedení má

hydrofilní polymer velikost částic v rozmezí od 0,8 do 2,0 mm a dřevní reziduum v rozmezí od 0,1 do 5 mm (ideálně 0,5 do 2 mm s tolerancí 10 %).

Příprava hydrofilní tablety začíná homogenizací směsi hydrogelu a nosiče v uvedeném hmotnostním poměru. Pro zvýšení pevnosti a mechanické odolnosti je možné směs hydrofilního polymeru a nosiče před lisováním předeheat až na teplotu v rozmezí od 150 do 200 °C. Tímto postupem dojde k dehydrataci polysacharidů – hemicelulóz a celulózy – na jednodušší sacharidy, které směs zpevní a plastifikací ligninu se jednotlivá vlákna se přizpůsobí tvaru tablety a následně při zchladnutí tabletu vytvrdí. Následuje lisování tablet do uvedených parametrů při tlaku v rozmezí od 20 MPa do 70 MPa po dobu od 10 do 120 sekund. Vyrobené tablety se při použití umístí do jamek pro sazenice dřevin, vždy jedna tableta k sazenici (Obr. 4).

Při výrobě hydrofilní tablety ve výhodném provedení se semenem dřevin se používá dvoufázové lisování v jedné matrici s dvojí patricí, které umožňuje výrobu mechanicky odolné tablety a zároveň podporuje správné klíčení bez poškození semene při výrobě. Při manipulaci je nutné dbát na orientaci tablety lícem vzhůru, aby došlo k vyklíčení semene. V první fázi je lisováno lože pro semeno při tlaku v rozmezí od 45 do 70 MPa a uzávěr semene je lisován při lisovacím tlaku maximálně 20 MPa. Lože tak dosahuje potřebné mechanické odolnosti pro běžnou manipulaci a práci s tabletou. Uzávěr (zátkka) pouze fixuje semeno dřevin v tabletě. Nižší lisovací tlak je volen jako prevence poškození semene a menší hustota uzávěru stimulující správnou orientaci hypokotylu je velmi vhodná pro epigeické klíčení řady dřevin, zejména buku lesního.



Obr. 3: Různé typy tablet s hydrogelem (vlevo tableta s hydrogelem, uprostřed tableta ve výhodném provedení s lůžkem pro semeno buku lesního, vpravo tableta s lůžkem pro semeno smrku nebo jedle). Foto: T. Holeček

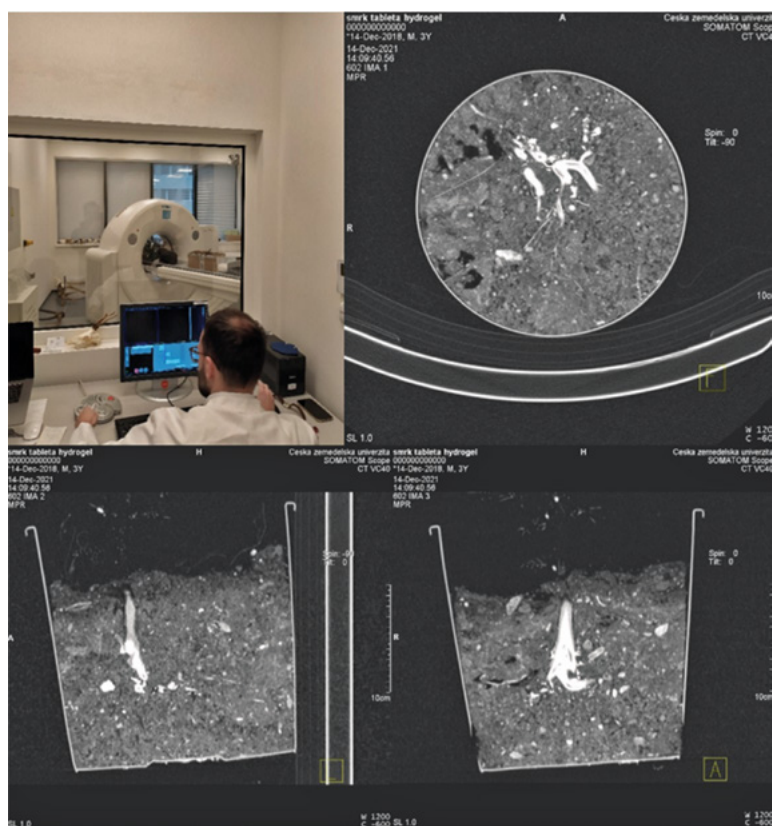
Experimentálně byla účinnost tablety s hydrogelem testována v roce 2021 ve fóliovníku s řízenou závlahou. Sazenice smrku ztepilého a dubu zimního byly zasazeny do kontejnerů o objemu 9 litrů se substrátem – základní rašelinou obohacenou o přesnou dávku hnojiva. Celkově se jednalo o 20 jedinců od každé dřeviny, polovina nebyla ošetřena hydrogelem (kontrolní vzorek) a k polovině byla přidána tableta pod kořenový systém. Následně byla polovina sazenic s tabletou i kontrola jednou za vegetační sezónu zavlažována mikrozávlahou na plnou polní kapacitu a druhá polovina těsně nad bod vadnutí. Rostliny v kontejneru byly následně analyzovány CT skenerem (Obr. 5), kde se prokázalo, že využití tablety na rozdíl od varianty



Obr. 4: Aplikace tablety s hydrogelem do sázecí jamky. Foto: K. Resnerová

sypaného hydrogelu nevede ke vzniku dutin a následnému poškození kořenového systému sazenic, který na snímcích představují bílé části (Obr. 5).

Laboratorně byla dle normy pro testování semenného materiálu lesních dřevin ČSN 48 12 11 (2006) také hodnocena klíčivost a energie klíčení u semen buku lesního uzavřených v tabletách. Testovány byly vzorky tablet se semenem, semena samostatně a tablety se semenem bez účinné látky. Test prokázal, že účinná látka i způsob výroby a následné dolisování víčka fixujícího semeno neovlivňuje negativně klíčivost a energii klíčení semen.



Obr. 5: Analýza kontejnerů se smrkovou sazenicí s přidanou tabletou s hydrogelem pomocí CT skeneru v roce 2021. Foto: T. Holeček a J. Turek

3.3 Laboratorní ověření účinnosti hydrogelu v půdním profilu

3.3.1 Analýza účinnosti hydrogelu

Pro ověření absorpčních vlastností a účinnosti hydrogelu v půdním profilu byl realizován experiment, který sledoval vývoj vlhkosti v půdě a v modifikované půdě obohacené hydrogelem (STOCKOSORB® 300; Evonik Nutrition & Care GmbH, Essen, Německo), respektive směsí hydrogelu s pilinami. Byla měřena difuze, tedy přenos vlhkosti z půdního profilu do okolního prostředí. Difuze je přímo úměrná parametřům prostředí jako je půdní typ, teplota a vlhkost vzduchu. Maximální množství vody, kterou je schopna půda zadržet, se nazývá plná polní kapacita. Množství vody v půdě přímo ovlivňuje zdravotní stav rostlin, které na ní rostou. Pokud se vlhkost dostane na kritickou hodnotu, kde rostliny už nejsou schopny čerpat vláhu z půdy, tak rostliny uvadají a následně odumírají. Kritické hodnoty vlhkosti jsou pro každý půdní typ odlišné. V našem případě je označujeme jako stresová půdní vlhkost a kritická půdní vlhkost. Hlavním cílem testování bylo zjistit, za jaký časový úsek se půdní vlhkost dostane za tyto kritické body. Účelem modifikace půdního profilu bylo maximálně oddálit dosažení zmiňovaných bodů, a tím poskytnout rostlině prodloužení období dostupnosti vody v půdě při obdobích sucha.

Pro experiment byly testovány čtyři varianty ve 20 opakováních:

- I) vzorky obsahující pouze 260 g hlinito-písčité půdy
- II) směs půdy (260 g) a 1 g hydrogelu ve formě prášku
- III) směs půdy (260 g) a 4 g pilin z jehličnatého dřeva
- IV) směs půdy (260 g), 1 g hydrogelu ve formě prášku a 4 g pilin z jehličnatého dřeva

Jednotlivé směsi byly pečlivě zhomogenizované. Použitá půda byla přesítována o maximální velikosti zrna 1 milimetr a menší. Všechny komponenty použité v půdních směsích byly před začátkem experimentu vysušeny na nulovou vlhkost. Půda a jednotlivé směsi byly umístěny do polyvinylchloridových válečků – tubusů o objemu 395 ml, které byly na spodní straně osazeny jemným sítím pevně fixovaném na vnější straně tubusu tak, aby nedocházelo ke ztrátě půdní směsi při manipulaci a měření.

Nejprve byl každý tubus zvážen na digitální váze a zvlášť naváženy jednotlivé komponenty. Poté byl zvážen celý tubus i s náplní v jednotlivých variantách po vysušení. Následně byl tubus kompletně ponořen do vody, aby vodní hladina byla nad hranicí

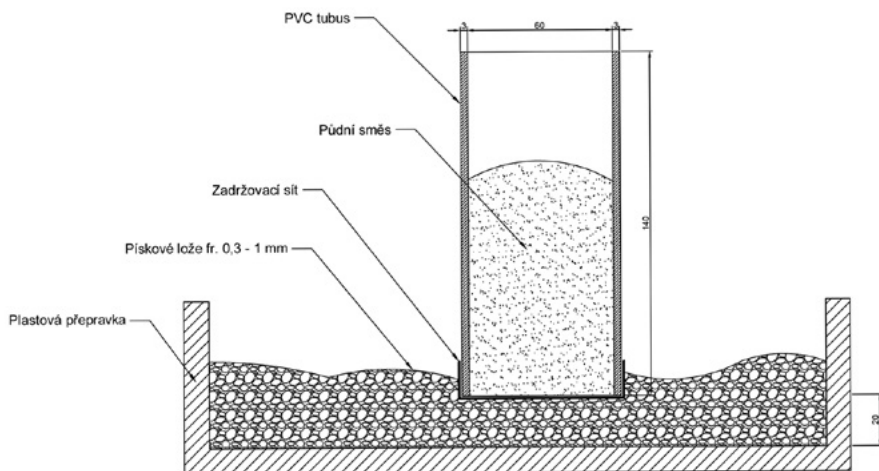
půdního profilu. Tubus byl ponechán ve vodě 30 minut. Následně se tubus s vodou nasycenou půdou přesunul na rošt, aby nadbytečná voda z tubusu odtékla. Po odkapání vody byl tubus znovu zvážen pro stanovení plné polní kapacity půdního profilu (počáteční bod následného měření) dle vztahu:

$$VL = \frac{(PV - VV)}{VV}$$

kde: VL – vlhkost [%]; PV – hmotnost původního vzorku před vysušením [g]; VV – hmotnost vysušeného vzorku [g]

Připravené tubusy byly usazeny do přepravek na pískové lože (Obr. 6) a umístěny do zkušební simulační komory Weiss.

V této komoře byl nastaven denní cyklus odpovídající extrémnímu suchu v jarním období. Byla nastavena vlhkost i teplota měnící se v závislosti na denním chodu teplot a vlhkosti vzduchu (Tab. 1). Tubusy byly v komoře ponechány po dobu 35 dní. Půdní vlhkost byla měřena gravimetricky na základě změny hmotnosti tubusu v čase. V jednotlivých časových úsecích bylo prováděno vážení vždy v 8 hodin ráno dle nastaveného půdního cyklu. Jako kontrolní vzorek byla stanovena varianta obsahující pouze půdu.



Obr. 6: Schéma uložení PVC tubusu na pískové lože

Tab. 1: Nastavených parametrů simulujících denní cyklus během experimentu

Nastavený čas	Teplota vzduchu [°C]	Relativní vlhkost vzduchu [%]
0–2 hod	17	60
2–4 hod	15	75
4–6 hod	12	60
6–8 hod	19	45
8–12 hod	27	30
12–17 hod	35	25
17–21 hod	25	35
21–24 hod	21	55

Pro vyhodnocení výsledků byl vypracován matematický model, který popisuje veškeré děje v půdním profilu v reálném prostředí (Obr. 7).

Obecná rovnice modelu:

$$\frac{dw(t)}{dt} + d_p(t) + d_h(t) + d_v(t) = q_z(t) - q_s(t)$$

Rovnici jsme dále upravili tak, že jediným sledovaným faktorem je difúze. Do modelu tedy nevstupuje zdroj, spotřebič (rostlina) a difúzní toky:

$$\frac{dw(t)}{dt} + d_p(t) = 0$$

kde $d_p(t) = b(t) w(t)$

Řešení našeho experimentu, vycházející z obecného modelu je následující:

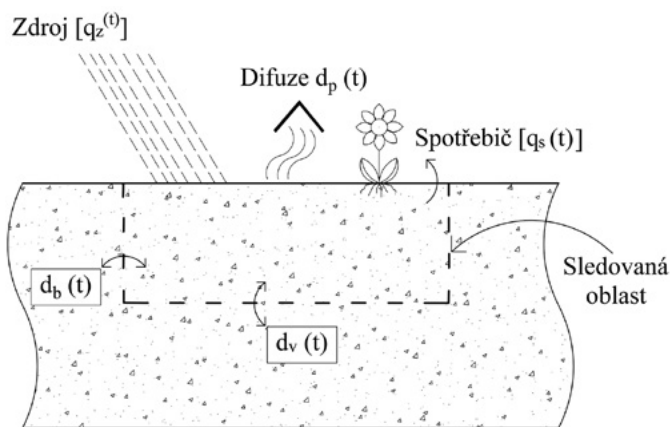
$$w(t) = C e^{-b(t)t}$$

Námi navržený experiment je charakterizován relaxačním dějem, který obvykle znamená návrat narušeného systému do rovnováhy. Každý relaxační proces lze kvantifikovat podle času nebo odpočinku. Nejjednodušší teoretický popis relaxace jako funkce času (t) je exponenciální závislost $\exp(-t/T)$. Pokud je exponenciální úpadek úměrný rychlosti jeho aktuální hodnoty, lze tento proces vyjádřit diferenciální rovnicí, kde N je množství a λ je kladná sazba zvaná konstanta exponenciálního rozpadu. Hranicí pozorovaného experimentu je stacionární stav, ve kterém mají pozorované veličiny časově konstantní hodnoty. Stacionární termodynamický stav je především rovnovážný termodynamický stav pozorovaných veličin. Lze sledovat vliv modifikace půdy pomocí dvou parametrů C a b(t).

Při potvrzení tohoto matematického modelu a jeho funkčnosti je možné lépe pochopit změnu půdní vlhkosti v půdním profilu z hlediska všech faktorů. Je tedy možné modelovat jednoduše roční období a funkčnost modifikované půdy z hlediska různých spotřebičů. Na Obr. 7 je zvýrazněna sledovaná oblast, která odpovídá našemu tubusu v laboratorním prostředí. Na základě našich laboratorních testů je tedy možné eliminovat ostatní faktory, které vstupují do děje pohybu vlhkosti v půdě.

Pro vyhodnocení funkčnosti modifikace půdního profilu hydrogelem a pilinami je několik kritérií. Jedním kritériem je plná půdní kapacita. Tedy množství vody, které je půda schopná zadržet. V tomto ohledu směs půdy s hydrogelem a směs půdy, hydrogelu a pilin zadržela větší množství vody než samotná půda. Dále bylo prokázáno, že i směs půdy a pilin je schopná udržet větší množství vody než samotná půda (plná hnědá čára), ale tento nárůst je zanedbatelný vůči prvním dvěma variantám (Obr. 8).

Pro vyjádření trendu naměřených dat byla použita exponenciální funkce, kterou byla proložena experimentální data. Tato exponenciála popisuje průběh ztráty vlhkosti v jednotlivých variantách v celém průběhu experimentu (Obr. 8). Dalším faktorem, který byl sledován, je schopnost uvolňování vlhkosti okolnímu prostředí. Protože pro prosperitu rostlin je důležitá dostupnost vody z půdního profilu. Modifikace půdy musí zadržet větší množství vody a zároveň tuto kapacitu musí

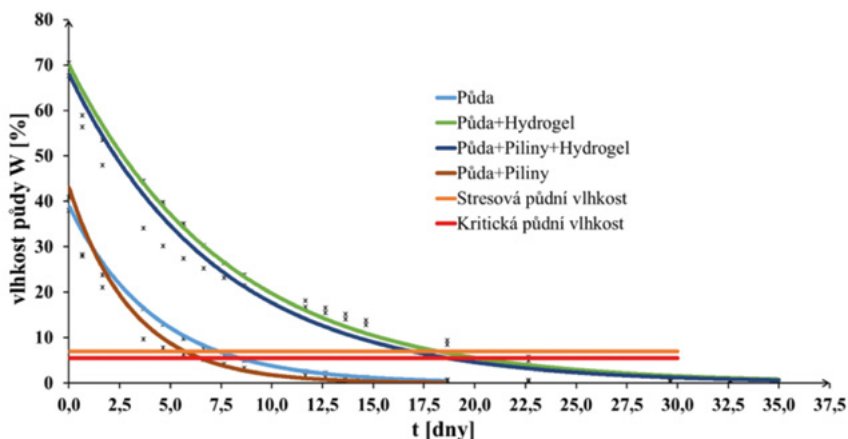


Obr. 7: Graficky znázorněná obecná rovnice matematického modelu dějů v půdním profilu

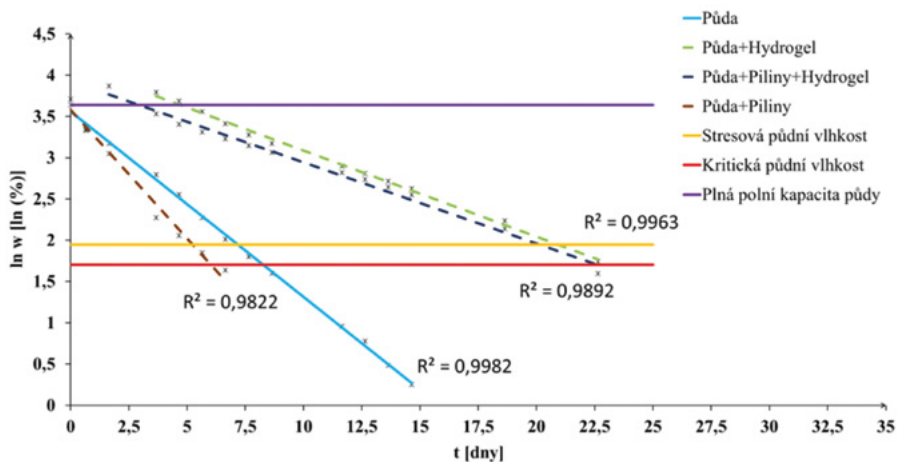
být schopná distribuovat rostlinám nebo prostředí. Dalším porovnávacím faktorem v experimentu je doba, kdy půdní profil dosáhne bodu stresové půdní vlhkosti nebo kritické půdní vlhkosti. V našem experimentu se prokázalo prodloužení této doby od plné polní kapacity o zhruba 12 dní u směsi půdy s hydrogelem a půdy s pilinami a hydrogelem. Směs půdy s pilinami těchto kritických bodů dosáhla přibližně o den a půl dříve (Obr. 9).

Účinnost tablety s hydrogelem v půdním profilu potvrzuje fakt, že rychlost vysušování půd obohacených o hydrogel je pomalejší. Ve směsi půdy s hydrogelem a pilinami pomáhají piliny distribuci vody, kterou na sebe váže hydrogel, a činí ji tak dostupnější pro prostředí a rostliny. Tableta s hydrogelem jako produkt pomáhající při obnově lesních porostů má tak dvojí využití – jako nosný materiál hydrogelu na přírodní bázi a jako prostředek k lepší distribuci vody z hydrogelu do půdního profilu.

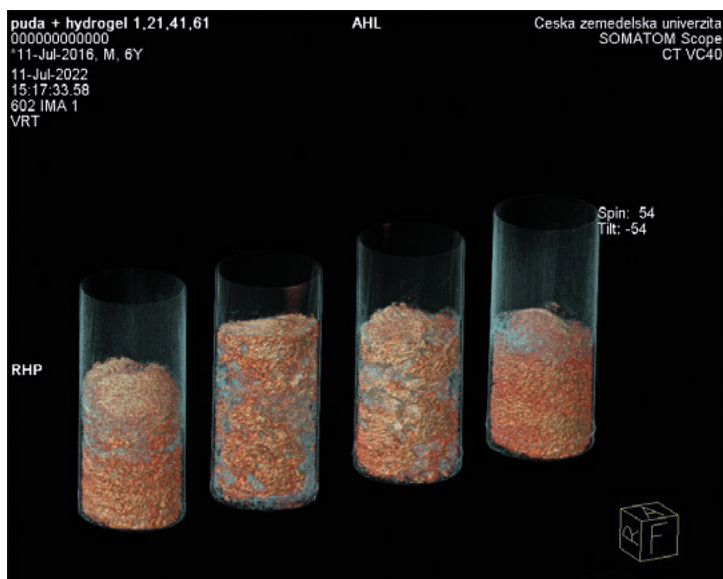
Průběh experimentu byl zaznamenán rovněž pomocí CT skeneru – nedestruktivní metody zobrazování. Touto metodou byl sledován půdní profil jednotlivých směsí a jejich chování vedoucí k případné deformaci. Z pozorování je patrné, že po celou dobu experimentu je půdní profil stabilní a nedochází k jeho narušení v důsledku vysychání hydrogelu. Celý proces nasávání a vysychání vody je tedy vratný v čase bez výrazného narušení půdy (Obr. 10).



Obr. 8: Změna půdní vlhkosti v jednotlivých variantách v čase experimentu



Obr. 9: Rychlost vysychání půdních systémů v jednotlivých variantách v čase experimentu



Obr. 10: CT snímky jednotlivých experimentálních směsí během experimentu. Zleva: směs půdy s pilinami; směs půdy, hydrogelu a pilin; směs půdy s hydrogelem; kontrolní tubus obsahující pouze půdu

3.3.2 Inkubační pokus pro stanovení uvolňování do půdního roztoku

Výzkumným týmem byl paralelně založen inkubační pokus navazující na předchozí analýzy se stejnými čtyřmi variantami: půda; půda s hydrogelem; půda s pilinami a půda s pilinami a hydrogelem (každá ve čtyřech opakováních). Během celé doby pokusu byly udržovány konstantní vlhkostní podmínky, a to na hodnoty polní kapacity. Do každého vzorku byl po celou dobu umístěn rhyzon/frita (Eijkelkamp, NED) pro účely odběru půdní vody v čase. U každého ze vzorků byl následně v předem daných časových intervalech (4, 7, 14, 21, 28, 35, 56, 91, 125, 153 dní od založení experimentu) proveden rozbor obsahu prchavých kyselin odebrané půdní vody pomocí UV-VIS spektrometru (Hach, SWI). Také u všech odběrů vody probíhalo měření pH pHmetrem MW100 (Milwaukee, HUN) a konduktivity konduktometrem MW301 (Milwaukee, HUN). Tyto hodnoty jsou vždy přepočteny na množství prvku (g) uvolněného z hmotnosti testované zeminy (do cca 10 ml půdní vody). Tato voda byla vždy po odběru doplněna zpět.

Hodnoty konduktivity půdní vody naznačují dvojnásobné zvýšení konduktivity z počátku experimentu u vzorků obsahujících hydrogel, a to v obou případech, což dokazuje pozitivní vliv použitého hydrogelu na půdu, kde rozpouští solné ionty (Tab. 2). S pokračujícím časem experimentu byla poté konduktivita ve všech variantách snižována, protože dochází ke snížení obsahu solí a jejich iontů ve vodě.

Zjištěné pH vzorků u jednotlivých variant dokazuje srovnatelné hodnoty, což znamená, že přítomnost pilin při aplikaci hydrogelu ve formě tablet dlouhodobě výraz-

Tab. 2: Změny konduktivity půdní vody (mS/m) během experimentu

Počet dní	Půda	Půda+piliny	Půda+hydrogel	Půda+piliny+hydrogel
4	110,0	135,5	242,0	241,0
7	53,5	66,5	133,5	137,5
14	40,5	45,0	87,5	83,5
21	37,5	36,0	68,5	71,5
28	37,5	35,5	66,0	75,5
35	94,5	51,0	49,0	45,0
56	77,5	39,5	54,5	54,0
91	102,0	79,5	81,0	94,5
125	94,5	51,0	49,0	45,0
153	102,5	88,0	96,5	99,5

ně neokyseluje půdu (Tab. 3). Ve všech variantách se hodnota pH s časem zvyšuje z důvodu vyluhování prchavých kyselin z pH okolo 4 až po hodnoty nad pH 6, což jsou ovšem stále hodnoty běžné pro pH vody.

Ve variantách s přidáním pilinami vznikají prchavé kyseliny (mravenčí, octová, příp. propionová) s větším zastoupením než u dalších variant (Tab. 4, Obr. 11),

Tab. 3: Změny pH půdní vody během experimentu

Počet dní	Půda	Půda+piliny	Půda+hydrogel	Půda+piliny+hydrogel
4	4,2	4,2	4,6	4,6
7	4,6	4,5	5,2	5,2
14	4,7	4,6	5,5	5,5
21	4,9	4,9	5,7	5,8
28	4,9	5,0	5,9	5,6
35	5,1	5,3	6,2	6,0
56	5,1	5,3	5,7	5,8
91	5,2	5,3	6,2	5,9
125	5,6	5,8	6,0	6,4
153	5,1	5,5	5,7	5,8

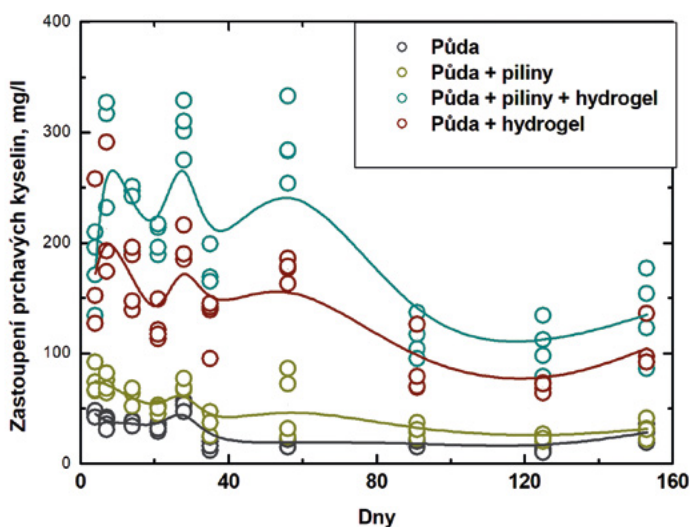
Tab. 4: Zastoupení prchavých kyselin v půdní vodě (mg/l) během experimentu

Počet dní	Půda	Půda+piliny	Půda+hydrogel	Půda+piliny+hydrogel
4	45,5	70,5	152,0	183,5
7	38,0	72,0	193,0	304,0
14	36,5	58,0	168,0	244,5
21	33,5	50,5	119,0	205,0
28	53,5	68,5	187,5	305,5
35	18,0	31,0	140,5	167,0
56	21,5	52,0	178,0	283,5
91	19,5	29,5	74,5	110,5
125	13,0	24,0	70,0	105,0
153	29,0	31,5	94,5	138,5

avšak na pH půdy nemá množství prchavých organických kyselin, jak je již zmíněno výše, žádný vliv.

Z výsledků v Obr. 11 je zřejmé, že přidavek pilin jednoznačně zvyšuje zastoupení prchavých kyselin, protože jsou ze dřeva intenzivně vyluhovány. V případě varianty s přidáním pilinami s hydrogelem jsou hodnoty 5× vyšší než u samotné půdy.

Závěrem lze tedy konstatovat, že hydrogel zlepšuje konduktivitu půdní vody, tableta s hydrogelem představuje pomalu rozpustný materiál, který se postupně uvolňuje a v dostatečném množství dodává vlhkost rostlinám, aniž by okyselil půdu.



Obr. 11: Zastoupení prchavých kyselin v půdní vodě v čase experimentu

3.4 Technologie a mechanizační prostředky aplikace hydrogelu

Aplikace hydrogelu, dalších kondicionérů a hnojiv do půdy je závislá na mnoha faktorech. V první řadě na formě podávané látky, na terénních podmínkách a na rozsahu aplikace. Výhody a nevýhody různých forem aplikace hydrogelů jsou popsány v kapitole 3.2. Co se týče terénních vlastností, patří lesní stanoviště a holiny k těm technologicky nejnáročnějším. Jednak z hlediska prostupnosti pro mechanizaci, z hlediska množství a rozměru překážek, ale také z hlediska snížené únosnosti terénu. Prostředí lesa je navíc velmi rozmanité, a proto zde lze využít stroje a zařízení pro automatizované práce jen velmi obtížně. Obnovní činnost je velmi často manuálního charakteru s použitím jednoduchým nástrojů. Z mechanizačních prostředků pro obnovu lesa lze zmínit liniové sázecí stroje, z nichž na prvním místě, co se týče četnosti využití, je rýhovací stroj. Stroje pro sázení jednotlivých sazenic, takzvané plantery, jsou v praxi užívány jen výjimečně.

3.4.1 Rýhovací stroje

Rýhovací stroj je zařízení využívající jednoduchého principu vytvoření rýhy pomocí radlice. Do této rýhy se manuálně, nebo mechanizovaně vloží sazenice a rýha se následně zavře přítlačnými tělesy, nejčastěji válci, kotouči nebo kužely. Tento princip je velmi jednoduchý a zároveň velmi účinný. Běžný rýhovací stroj jednořadý je schopen aplikovat v ideálních podmínkách až 8000 sazenic za směnu. Stroj bývá nejčastěji nesený, respektive vlečený za nosičem (traktor).

Nevýhodou tohoto typu zařízení je problematické překonávání velkých překážek (zejména pařezů), proto je pro jeho nasazení klíčová předsadební příprava – frézování. Frézování je navíc vhodné i z hlediska zvýšení kvality stanoviště, rychlejšího rozpadu dřevní hmoty a nižších ztrát vlhkosti půdy výparem. Rovněž usnadňuje veškerý další pohyb techniky na ploše v dalších letech.

3.4.2 Sázcí rýhovací stroj s aplikací hydrogelu

Autorský kolektiv v roce 2019 patentoval dávkovací zařízení, zejména pro dávkování hydrogelu a případně dalších příměsí, tj. hnojiv, stabilizátorů apod., při umělé obnově lesního porostu sadbou, a také pro zakládání nových porostů ve všech oblastech postižených nedostatkem vláhy. Zařízení je v podstatě nástavba na běžném rýhovacím sázecím stroji vybaveném kabinou obsluhy, přičemž umožňuje dávko-

vání předem stanoveného množství přísad ke každé sazenici individuálně. Rýhovacím strojem manipuluje tažné zařízení, např. traktor (Obr. 12).

Zařízení, na rozdíl od dalších metod aplikace, umožňuje vysoce efektivní liniovou výsadbu s přidáním hydrogelu a případných dalších příměsí při obnově a zakládání nových rozsáhlých lesních porostů. Dávkovací zařízení obsahuje nádrž zhotovenou z plastu, opatřenou plnicím a vypouštěcím otvorem, a potrubí pro dopravu dávkovaného materiálu. Vnitřní prostor nádrže je vybaven míchacím a dávkovacím ústrojím, na které je napojeno potrubí pro dopravu dávkovaného materiálu. Potrubí ústí v konstrukci rýhovacího sázecího stroje mezi dozadu prodlouženými částmi rozhrnovací radlice (Obr. 13). V přední části kabiny obsluhy je umístěn spouštěcí nožní spínač míchacího a dávkovacího ústrojí, který je mechanickou nebo elektrickou vazbou propojený s míchacím a dávkovacím ústrojím.

Při výsadbě dřevin vytváří rozhrnovací radlice rýhovacího sázecího stroje brázdu v půdě, do níž obsluha stroje vkládá v pravidelných intervalech sazenice. Současně s vložením sazenice do brázdy stlačí obsluha spouštěcí spínač míchacího a dávkovacího zařízení, čímž je prostřednictvím dopravního potrubí přímo ke kořenovému



Obr. 12: Sázecí rýhovací stroj s aplikací hydrogelu. Foto: J. Macků

systému sazenice přidána požadovaná dávka hydrogelu. Následně je prostřednictvím zahrnovacích kol zavěšených na zvedacím mechanismu za potrubím sázecího rýhovacího stroje zahrnut kořenový systém sazenice i přidáný hydrogel zemínou.

V současnosti je v provozu prototyp ve vlastnictví Školního lesního podniku v Kostečce nad Černými Lesy.

3.4.3 Další metody

Další z možností pro strojní aplikaci hydrogelu při obnově je vstřikování směsi při sázení pomocí speciálně upravené sázecí hole – pottiputki. Zde je na klasickou sázecí hůl připevněn nástavec s tryskou, která je hadicí spojena s čerpadlem a nádrží na aplikační jichu. Nádrž je většinou nesená nebo tažená za traktorem. Tímto způsobem může být připojeno několik sázecích holí a sazeči mohou postupovat v řadě za strojem. Velkou nevýhodou tohoto způsobu aplikace je potřeba značného



Obr. 13: Výsadba borové sazenice s využitím rýhovacího stroje s aplikací hydrogelu. Foto: M. Svatoš

personálního zázemí. Jeden sazeč je schopen aplikovat 400–1000 sazenic za směnu. S ohledem na to, že pottiputki je vhodná zejména pro obalovanou sadbu, není tato metoda nijak ekonomicky zajímavá. Variantou, kde by sázecí hůl mohla mít svoje opodstatnění je vylepšování již obnovených pasek, to je nahrazování odumřelých jedinců nebo přidání dalších druhů dřevin. V tomto případě by za předpokladu, že sazeč bude aplikovat hydrogel ručně, byla sázecí hůl efektivní.

Planter je speciálně uzpůsobený adaptér pro sázení jednotlivých kusů sazenic. Nejčastěji je nesený na hydraulickém jeřábu harvestoru, případně bagru či traktorbagru. Zařízení je ovládáno z kabiny stroje a umožňuje individuální sadbu. Planter umožňuje jak aplikaci sadby, tak hydrogelu, dalších kondicionérů a hnojiv. Navíc může automaticky obrátit drn. Velkou výhodou této metody je možnost reagovat na všechna specifika lokality a přizpůsobit umístění sadby terénu. Nosič planteru (harvestor, bagr atd.) může rovněž nést i sadbu a nádrže s účinnými látkami. Značnou nevýhodou tohoto typu obnovy je omezení použití pouze na obalovanou sadbu. Navíc pořizovací náklady na zařízení jsou značné. Ovládání rovněž vyžaduje zkušeného operátora a výsledná efektivita není v porovnání s ostatními metodami (např. použití rýhovacího stroje) dostatečná. Podle typu zařízení se uvádí cca 2500 sazenic za směnu. Výhodou je ovšem možnost pracovat ve vícesměnném provozu.

3.5 Vliv aplikace hydrogelu na vitalitu, růst a fyziologické parametry vybraných dřevin

Pozitivní vliv aplikace hydrogelu při výsadbě na morfologii a vitalitu dřevin byl prokázán řešitelským týmem v podmínkách aridní oblasti Iránu (TOMÁŠKOVÁ et al. 2020). Cílem publikované studie bylo zhodnotit účinky hydrogelu aplikovaného během výsadby na přežití, růst a fyziologické vlastnosti 20 druhů dřevin. V terénním experimentu (design se sedmi druhy ošetření sazenic včetně kontroly, dvaceti druhy dřevin a deseti opakování v každé variantě) v aridních oblastech Iránu byla k sazenicím aplikována voda (kontrola) nebo voda se směsí hydrogelu a dalších materiálů. Na vzorcích sazenic byl hodnocen přírůst, zdravotní stav, přežívání, osmotický potenciál a biochemické vlastnosti po 6 měsících a po 12 měsících po výsadbě. Ošetření hydrogelem (bez ohledu na další přidaný materiál) výrazně zlepšilo fyziologické i morfologické charakteristiky druhů citlivých na sucho, nikoli však druhů odolných vůči suchu. Význam ošetření hydrogelem je tedy nejvýznamnější pro druhy citlivé na sucho, naopak pro druhy odolné vůči suchu je vliv hydrogelu zanedbatelný (TOMÁŠKOVÁ et al. 2020).

Podobně byl selektivní pozitivní vliv hydrogelu ověřován na domácích dřevinách ve střeoevropských podmínkách třemi různými způsoby:

- 1) v kontrolovaných podmínkách ve fóliovníku s řízenou závlahou
- 2) na oplocené studijní ploše v náhodném designu rozmístění dřevin
- 3) na volně obnovovaných plochách – na lokalitách vždy s vysazeným jedním druhem dřevin

Ve všech experimentech byl použit hydrogel STOCKOSORB® 300 (Evonik Nutrition & Care GmbH, Essen, Německo).

3.5.1 Experiment ve fóliovníku s řízenou závlahou

Jako simulace provozních podmínek byly na podzim 2020 zasazeny dřeviny čtyř druhů (buk lesní *Fagus sylvatica* L., dub zimní *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., borovice lesní *Pinus sylvestris* L., smrk ztepilý *Picea abies* (L.) H. Karst.) do fóliovníku s řízenou závlahou. U každé dřeviny byly vysazeny dvě varianty: s aplikací hydrogelu a bez hydrogelu (kontrola). Hydrogel byl aplikován ve formě rozředěné jichy tvořené 1 g hydrogelu a 200 ml vody ke každé sazenici pod kořen. Do sadbovačů s 9 l rašeliny byly vysazeny dvouleté sazenice. Následně proběhlo obohacení substrátu hnojivem Silvamix pro zlepšení minerálního složení (Silvamix R30TE, Ecolab, CR). Nainstalování kapkové závlahy umožnilo přesný plán závlahy. Ve fóliovníku byla udržována optimální vlhkost podle maximální vodní kapacity půdy (přibližně 40 % z max. vodní kapacity). Vysazeno bylo celkem 128 jedinců z každého druhu dřeviny. Při každém ošetření ($n = 64$) byla provedena gazometrická měření u pěti sazenic z každé varianty.

Během prvního roku byly rostliny udržovány v optimálních vlhkostních, světelných a nutričních podmínkách, za účelem nastavení základní linie pro všechny sazenice s hydrogelem i bez něj. Během vegetační periody se průměrná teplota pohybovala kolem $19,1^{\circ}\text{C}$ ($\pm 6,1$) a relativní vlhkost kolem 74,6 % ($\pm 20,3$). Fotosynteticky aktivní záření bylo sníženo díky plastové fólii pokrývající celek, přesto hodnoty přesahovaly bod saturační ozáření (obvykle kolem $450 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

V průběhu následující vegetační sezóny byla v měsíčních intervalech sledována vitalita rostlin a v srpnu změřen výškový a tloušťkový přírůst. Vitalita všech sazenic byla po celou první část experimentu vynikající bez známek chřadnutí a prosychání asimilačního aparátu v obou variantách s výjimkou borovice lesní. Výškové i tloušťkové přírůsty byly u všech čtyř dřevin v obou variantách srovnatelné bez statisticky signifikantních rozdílů (Tab. 5).

Tab. 5: Srovnání přírůstu a mortality u sazenic ošetřených hydrogelem a kontrolních ve fóliovníku s řízenou závlahou v roce 2021. DB...dub zimní, BK...buk lesní, SM...smrk ztepilý, BO...borovice lesní

Dřevina	Ošetření	Výškový přírůst [cm]	Tloušťkový přírůst [mm]	Mortalita [%]
BK	hydrogel	6,9±6,4	0,2±0,1	-
	kontrola	5,5±4,5	0,2±0,1	-
SM	hydrogel	14,9±5,1	0,4±0,2	-
	kontrola	14,9±5,5	0,4±0,2	-
BO	hydrogel	15,5±7,1	0,2±0,1	4,7
	kontrola	18,9±5,5	0,3±0,1	12,5
DB	hydrogel	18,2±10,1	0,2±0,2	-
	kontrola	19,9±13,0	0,2±0,1	-

Na konci vegetační sezóny byly rovněž v rámci kontrolního období změřeny (vždy 5 sazenic u každé varianty a dřeviny) dva klíčové fyziologické parametry – rychlost fotosyntézy (P_n) a transpirace (Tr). Světelná křivka fotosyntézy (Obr. 14) představuje závislost mezi množstvím fotosynteticky aktivního záření (PPFD) na ose X a rychlostí čisté fotosyntézy (P_n) na ose Y. Řada bodů odpovídající různému množství dopadajícího světla byla zvolena proto, aby bylo možné prokázat např. posun v hodnotě kompenzační ozářenosti nebo bodu světelné saturace nebo změnám v kvantovém výtěžku. Z naměřených křivek je patrné, že hydrogel již v rámci kontrolního období bez stresu suchem pozitivně ovlivnil rychlost čisté fotosyntézy a transpirace u dubu (Obr. 14). V případě buku nebyl dokumentován žádný vliv aplikace hydrogelu a u borovice a smrku byly naopak hodnoty rychlosti fotosyntézy ve variantě s hydrogelem sníženy. Neznamená to ovšem negativní vliv hydrogelu na fyziologické parametry – statisticky významné rozdíly nebyly nalezeny (Obr. 14). Ze světelné křivky rovněž vyplývá, že hydrogel neovlivňuje kvantový výtěžek fotosyntézy, který udává účinnost využití světelné energie na asimilaci CO_2 ve srovnání s kontrolou.

Poté, co sazenice rostly většinu sezóny v optimálních vlhkostních podmínkách, byla od srpna 2021 provedena druhá část experimentu – vystavení cílových dřevin maximálnímu stresu suchem trvajícím 40 dní. Všechny čtyři cílové dřeviny byly rozděleny do dvou skupin, přičemž byly rovnoměrně rozděleny i podle způsobu ošetření – s hydrogelem a kontrolní (bez hydrogelu). Jedna skupina byla závlahou udržována na plné polní kapacitě (vždy polovina sazenic v každé variantě = 32 jedinců).

Druhá polovina rostlin byla udržována v intervalu mezi bodem snížené dostupnosti vody a bodem vadnutí a následně byla vlhkost snížena pod bod vadnutí. Byl zaznamenán vývoj absolutní a relativní půdní vlhkosti v každém kontejneru. Cílem tohoto experimentu bylo prokázat účinnost hydrogelu a jeho schopnost oddálit tím dobu, kdy vlivem sucha dochází u cílových dřevin k vadnutí (mortalitě).

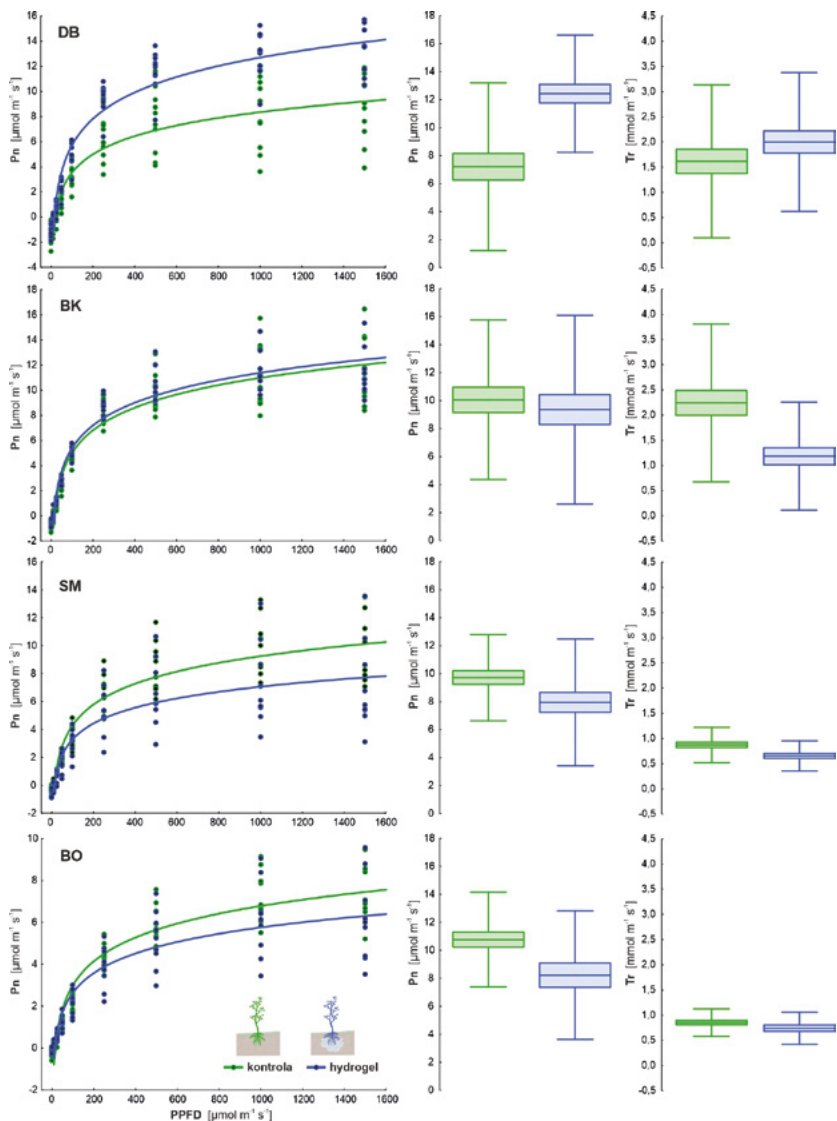
Experiment (kapitola 3.3) ukázal na významnou účinnost hydrogelu v surové formě a jeho schopnost zpomalit ztrátu vody v půdě a oddálit nástup vadnutí. Pro hodnocení vlivu aplikace hydrogelu při stresu suchem byly stejně jako v případě kontrolního období měřeny dva klíčové fyziologické parametry – rychlost fotosyntézy (P_n) a transpirace (Tr).

Při hodnocení se vycházelo ze tří základních hypotéz: a) hydrogel nemá vliv na fyziologické parametry sledovaných dřevin, b) vliv hydrogelu na dřevin se v průběhu měření nemění a c) mezi časem a ošetřením hydrogelem není žádná souvislost. Měření probíhala s využitím gazometrického systému LI-Cor (LI-6400 XT, NE, USA) s 2×3 LED komorou. Bylo měřeno 5 sazenic každé dřeviny a v každé variantě (s hydrogelem a bez hydrogelu, se závlahou a bez závlahy).

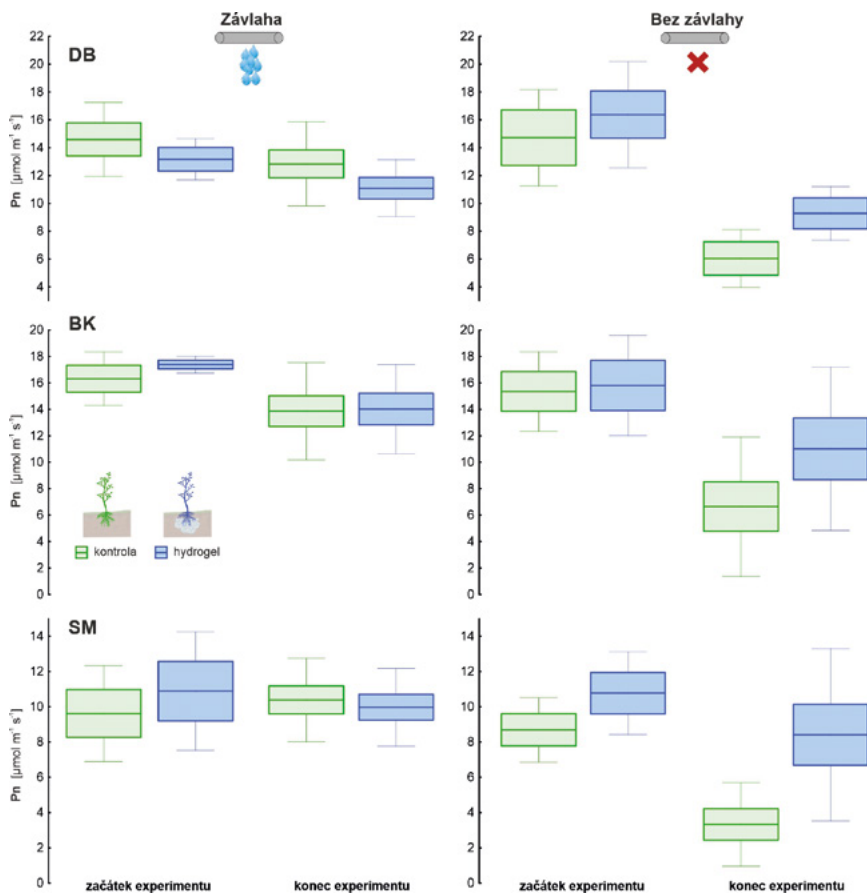
V průběhu měření vykazovaly sazenice borovice extrémní rozptyl naměřených hodnot, který vzhledem k omezenému počtu měření nebylo možné vyřešit odstraněním odlehlých hodnot, proto byla z následujících grafů a statistických hodnocení tato dřevina vyřazena.

V případě zavlažovaných sazenic nelze pozorovat významné rozdíly mezi sazenicemi ošetřenými hydrogelem a kontrolním vzorkem (Obr. 15 a 16). Při simulaci extrémního stresu suchem však byl prokázán signifikantní pozitivní vliv aplikace hydrogelu na fyziologický stav buku, dubu a smrku. Aplikace hydrogelu udržuje hodnoty fotosyntézy a transpirace v období sucha na přibližně stejné úrovni jako v podmínkách dostatečné závlahy (plná polní vodní kapacita) ještě měsíc po omezení vody v půdě na hodnotu odpovídající bodu vadnutí. Na konci experimentu zajistil hydrogel zhruba o 50 % vyšší transpiraci i rychlost fotosyntézy u všech sledovaných dřevin i v podmínkách výrazného nedostatku vody, který lze přirovnat k měsíčnímu bezesrážkovému období (Obr. 15 a 16).

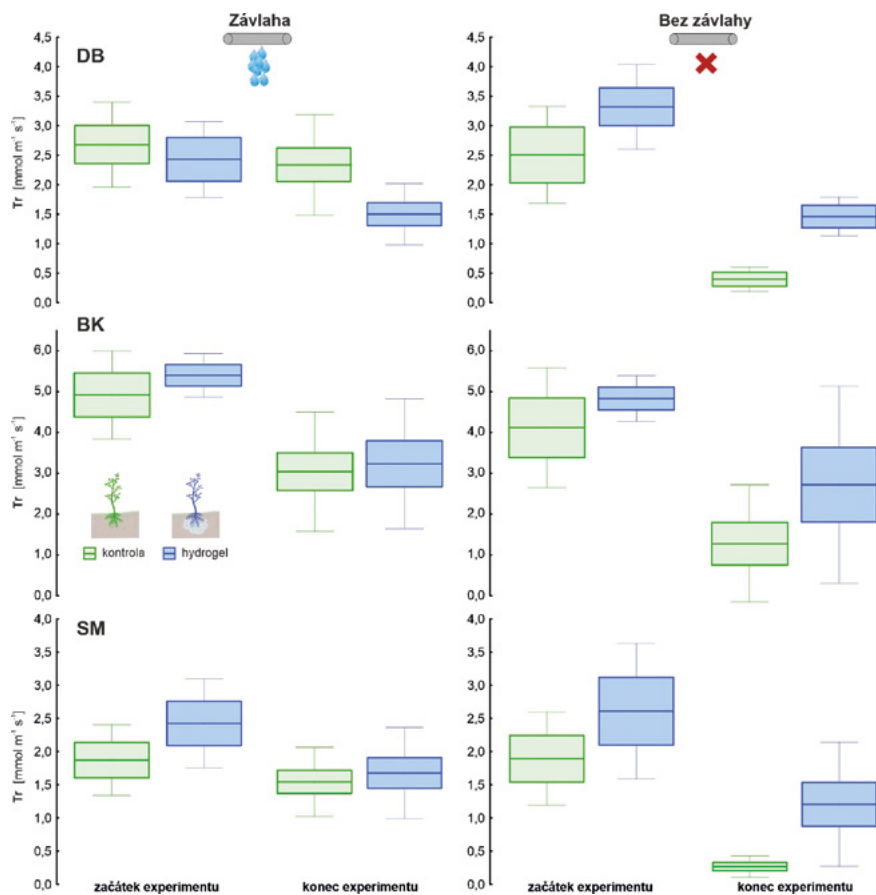
Průměrný pokles hodnot jak v zavlažované, tak suchem stresované variantě souvisí s koncem vegetační sezóny (měřeno v září), neboť potřeba chlazení listu se s klesající teplotou snižuje.



Obr. 14: Srovnání hodnot rychlosti fotosyntézy (P_n) prostřednictvím tzv. světelné křivky fotosyntézy u studovaných dřevin ve fóliovníku s řízenou závlahou bez vystavení stresu suchem (vlevo), rychlosti fotosyntézy (P_n) měřené při osvětlení $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (uprostřed) a rychlosti transpirace (Tr) měřené při hodnotě světla $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. PPFD – množství fotosynteticky aktivních fotonů dopadajících na m^2 plochy za sekundu. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý, BO – borovice lesní



Obr. 15: Rychlost fotosyntézy měřená při osvětlení $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ve fóliovníku v srpnu a září 2021. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý



Obř. 16: Rychlost transpirace měřená při hodnotě světla $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ve fóliovníku v srpnu a září 2021. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý

3.5.2 Experiment na volně obnovovaných plochách

Na jaře v roce 2019 bylo založeno 10 výzkumných ploch na předem vybraných lokalitách kolem Kostelce nad Černými lesy a jedna plocha u Rožmitálu pod Třemšínem. Byly zvoleny odlišné lokality a sazenice čtyř hlavních hospodářských dřevin (buk lesní, dub zimní, borovice lesní a smrk ztepilý). Celkem bylo vysazeno 1300 sazenic (300 BO, 300 BK, 400 SM, 300 DB).

Sazenice byly vysázeny vždy po 50 jedincích na každé ploše ve dvou variantách: i) s přídáním suspenzí obsahující hydrogel pod kořen a ii) bez hydrogelu – kontrolní. Každá sazenice byla označena štítkem s číslem a variantou.

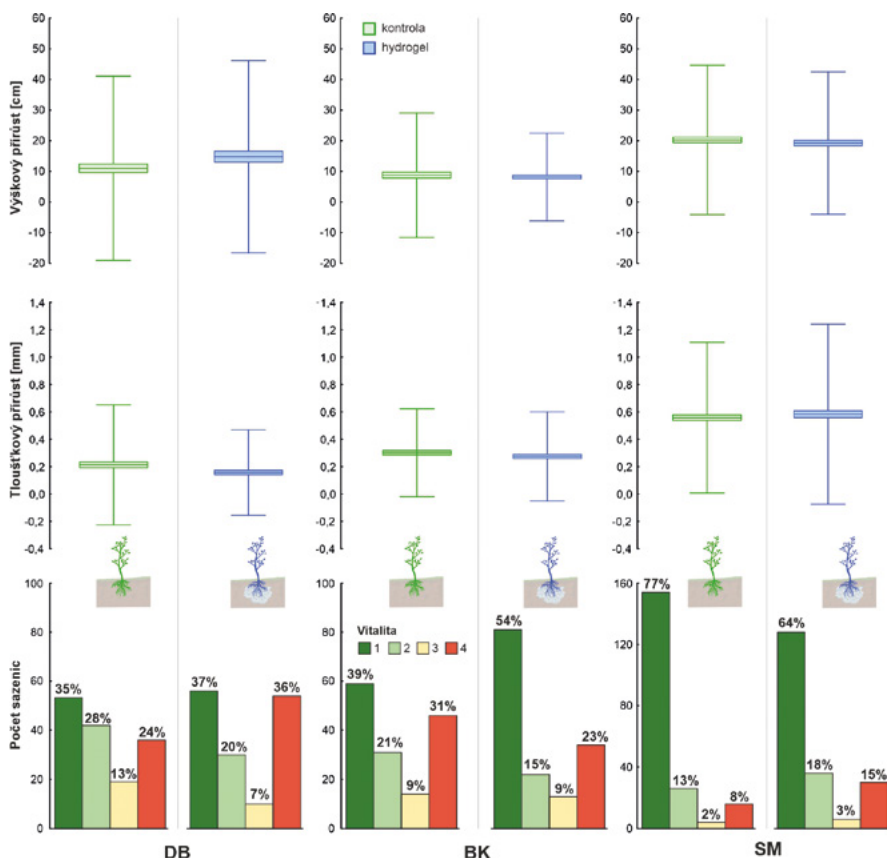
Následující měsíce (duben 2019–říjen 2020) bylo prováděno morfometrické a fyziologické měření každých 5 týdnů během vegetační sezóny. Ve sledovaném období nebyly zaznamenány periody extrémního sucha na stanovišti.

Byly měřeny následující morfometrické parametry: výška sazenice a tloušťka sazenice v krčku pomocí digitální průměrky. Vitalita sazenic byla hodnocena ve čtyřech kategoriích: 1 – výborná až mírně snížená vitalita, 2 – zřetelně snížená vitalita (stagnace růstu, prosychání koruny na periferních oblastech koruny), 3 – zbytková vitalita (větší část koruny odumřelá), 4 – suchý strom. Výška sazenic, tloušťka v krčku a vitalita byla měřena na všech sazenicích. Související měření fyziologických charakteristik (rychlost fotosyntézy a transpirace) probíhalo vždy na 5 vybraných sazenicích každé dřeviny a každé varianty (hydrogel a kontrola).

Vzhledem k tomu, že mortalita borovice lesní na studijních plochách byla v obou variantách vyšší než 80 %, nebyly sazenice dále hodnoceny na morfometrické parametry a vitalitu. Extrémně vysokou mortalitu v rámci tohoto experimentu zapříčinil pravděpodobně nekvalitní sadební materiál. U stále vitálních sazenic borovice však byla dále měřena rychlost fotosyntézy a transpirace (viz níže).

Mezi jednotlivými variantami nebyly zjištěny statisticky signifikantní rozdíly ve výškovém ani tloušťkovém přírůstu jednotlivých dřevin (Kruskalův-Wallisův test, $p > 0,05$; Obr. 17). Vitalita jednotlivých dřevin vykazovala různorodé výsledky. V případě dubu byla průměrná vitalita u obou variant srovnatelná bez statistických rozdílů, i když na první pohled byla mortalita vyšší. U smrku se dokonce ukázal negativní vliv hydrogelu na vitalitu dřevin [Kruskalův-Wallisův test: $H(1, N = 400) = 8,59$; $p < 0,05$], kdy byla mortalita o 7 % vyšší. Na druhou stranu u buku byla statisticky prokázána lepší vitalita u sazenic ošetřených hydrogelem [Kruskalův-Wallisův test: $H(1, N = 300) = 5,47$; $p < 0,05$], kde bylo přežívání sazenic zvýšeno o 8 % (Obr. 17).

Tato nejednoznačnost výsledků se dá snadno vysvětlit absencí ochrany sazenic proti poškození zvěří a lesotechnickou činností. Proto je třeba při analýze vždy tyto vlivy minimalizovat. V dalším výzkumu proto byly analyzovány pouze dřeviny neovlivněné poškozováním zvěří.



Obr. 17: Srovnání výškového a tloušťkového přírůstu sledovaných dřevin ošetřených hydrogelem a kontrolních a kategorie vitality jednotlivých sazenic na studijních plochách v roce 2020. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý. Hodnocení vitality: 1 – výborná až mírně snížená vitalita, 2 – zřetelně snížená vitalita (stagnace růstu, prosychání koruny na periferních oblastech koruny), 3 – zbytková vitalita (větší část koruny odumřelá), 4 – suchý strom

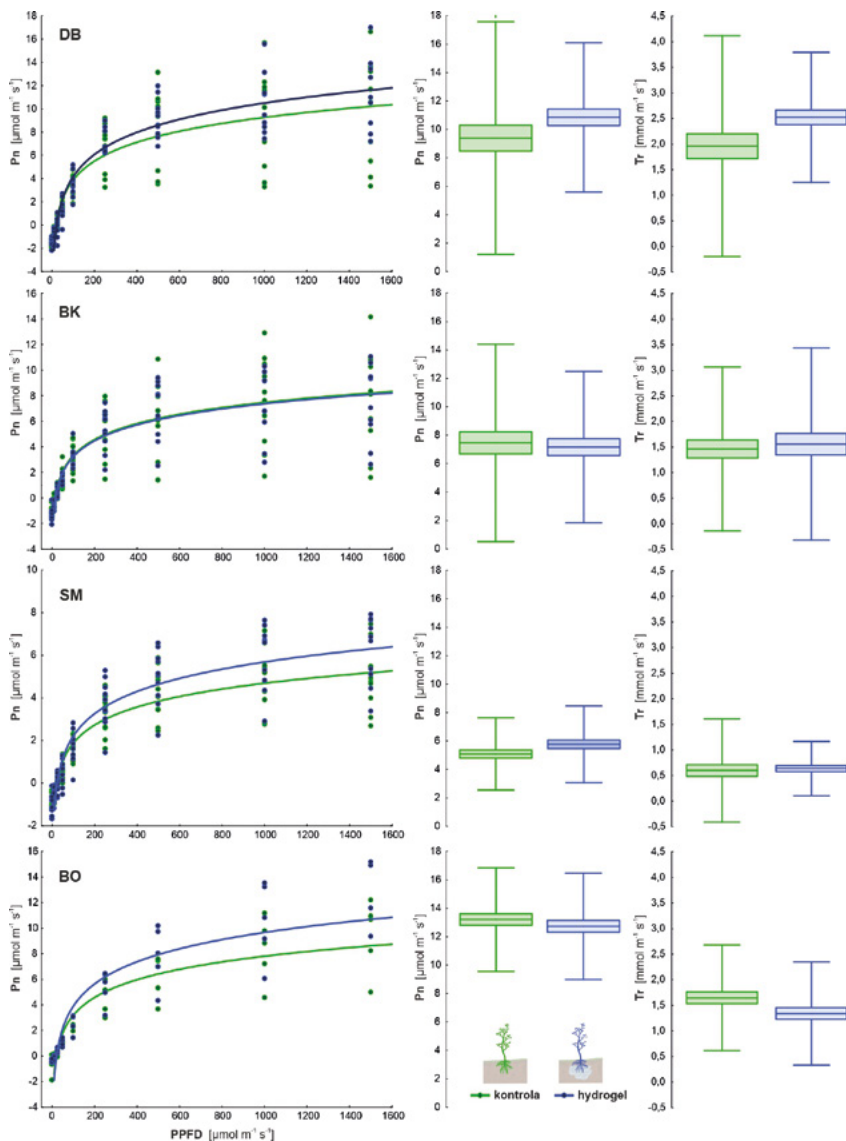
Zatímco u morfometrických charakteristik sazenic byly výsledky nejednoznačné, fyziologická měření dokazují pozitivní vliv aplikace hydrogelu na fyziologické charakteristiky, především u sazenic dubu a smrku, který se projevoval významně vyššími hodnotami fotosyntézy ve srovnání s kontrolními sazenicemi (Obr. 18). Vyšší rychlost fotosyntézy je u dubových a smrkových sazenic ošetřených hydrogelem dána větší otevřeností průduchů (vyšší hodnoty stomatální vodivosti). Vyšší asimilace CO₂ zajišťuje tvorbu většího množství organických látek určených nejen ke stavbě těla, ale také alokovaných na obranu. Z naměřených světelných křivek je patrné, že hydrogel pozitivně ovlivnil rychlost čisté fotosyntézy u dubu, smrku a rovněž u borovice. Vliv aplikace hydrogelu u bukových sazenic nebyl v experimentu prokázán. Transpirace dubu stresovaného suchem byla významně vyšší, což bylo potvrzeno i při experimentech ve fóliovníku (viz výše). Vyšší transpirace u smrku ošetřeného hydrogelem zaznamenaná ve fóliovníku nebyla v terénu potvrzena (Obr. 18).

3.5.3 Experiment na oplocené studijní ploše v náhodném designu rozmístění sazenic

Na začátku roku 2021 byla založena speciální výzkumná plocha v okolí Kostelce nad Černými Lesy (GPS: 49,9146 N; 14,8281E). Cílem experimentu bylo eliminovat nezkoumané negativní vlivy prostředí na sazenice (zvěř, běžná lesnická a leso-technická činnost). Na zkusné ploše bylo provedeno zalesnění cílovými dřevinami v unikátním sadebním vzorci navrženém pro potřeby statistické analýzy. Vzorec eliminuje rizika spojená s odchylkami způsobenými podmínkami v lese a zároveň minimalizuje riziko autoreplikace, která by byla pro potřeby následných analýz nevhodná. Celkově bylo vysazeno v březnu 2021 více než 1000 sazenic čtyř dřevin (smrk, borovice, buk a dub) ve třech variantách (hydrogel, bez hydrogelu – kontrola, tableta s hydrogelem). Pokus byl poté na jaře roku 2022 rozšířen o sazenice lípy srdčité *Tilia cordata* Mill. (120 sazenic) a javoru klenu *Acer pseudoplatanus* L. (132 sazenic), rozdělených vždy do dvou variant: sazenice s tabletou obsahující hydrogel a sazenice kontrolní.

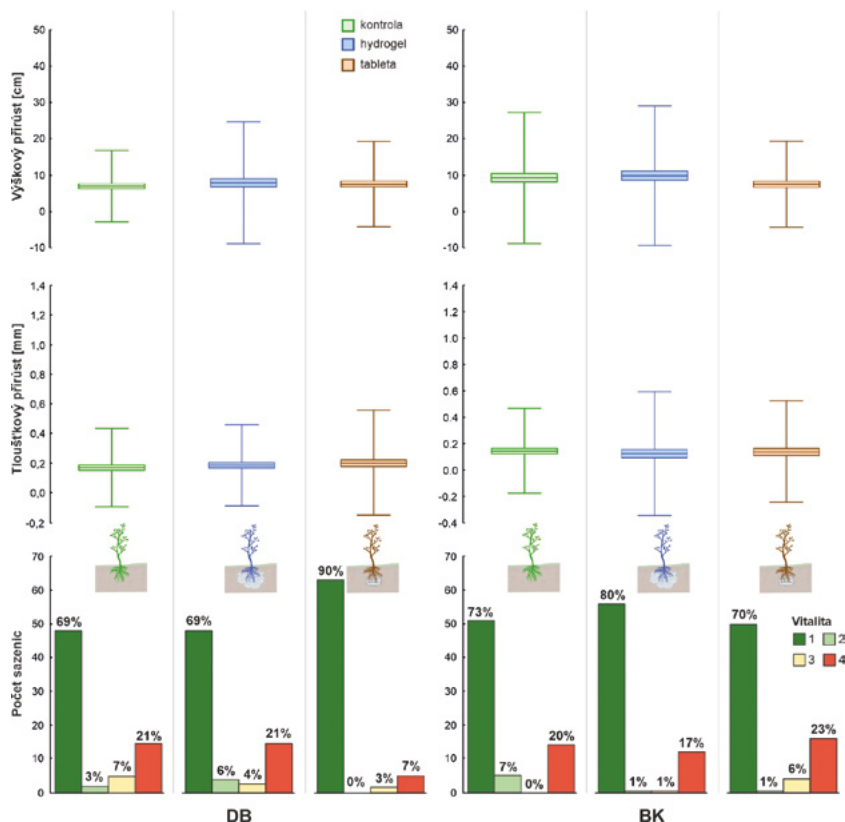
U každé sazenice byly následně měřeny morfometrické parametry a vitalita stejnou metodou popsanou v kapitole 3.5.2. Měření probíhala v roce 2021 a 2022. Ve sledovaném období nebyly zaznamenány periody extrémního sucha na stanovišti. Fyziologická měření v rámci tohoto experimentu neprobíhala.

Dub zimní s přidanou tabletou s hydrogelem měl výrazně vyšší vitalitu a mortalitu sazenic byla o 14 % nižší než u ostatních ošetření (Obr. 19). Celková mortalita bukových sazenic byla u všech typů ošetření srovnatelná, nejnižších hodnot dosahovala při ošetření rozředěnou jichou s hydrogelem – 17 % (Obr. 19).



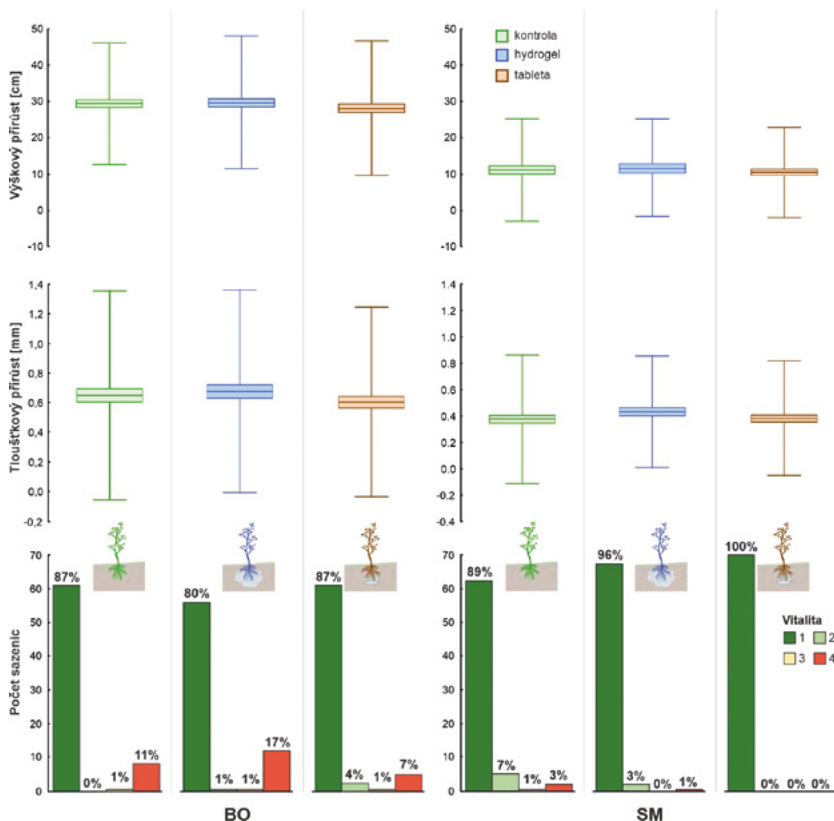
Obr. 18: Srovnání hodnot rychlosti fotosyntézy (P_n) prostřednictvím tzv. světelné křivky fotosyntézy u studovaných dřevin (vlevo), rychlosti fotosyntézy (P_n) měřené při osvětlení $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (uprostřed) a rychlosti transpirace (Tr) měřené při hodnotě světla $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý, BO – borovice lesní

Nejnižší mortalita borových sazenic byla zjištěna u ošetření s tabletou obsahující hydrogel, ale celkově byla vitalita všech variant velmi podobná (Obr. 20). Smrk celkově vykazoval pouze nízkou mortalitu sazenic. Jedinci ošetření hydrogelem v obou variantách však měli lepší vitalitu a v případě tablety byly všechny sazenice plně vitální (Obr. 20).



Obr. 19: Srovnání výškového a tloušťkového přírůstu sledovaných dřevin ošetřených hydrogelem a kontrolních a kategorie vitality jednotlivých sazenic na studijních plochách v roce 2022. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem, hnědá – sazenice s tabletou. DB – dub zimní, BK – buk lesní. Hodnocení vitality: 1 – výborná až mírně snížená vitalita, 2 – zřetelně snížená vitalita (stagnace růstu, prosychání koruny na periferních oblastech koruny), 3 – zbytková vitalita (větší část koruny odumřelá), 4 – suchý strom

Srovnáním morfometrických parametrů (výškový a tloušťkový přírůst) nebyly u žádné ze sledovaných dřevin zjištěny statisticky signifikantní rozdíly mezi variantami ošetření. Přítomnost hydrogelu tak nemá přímý vliv na růst studovaných druhů (Obr. 19 a 20).



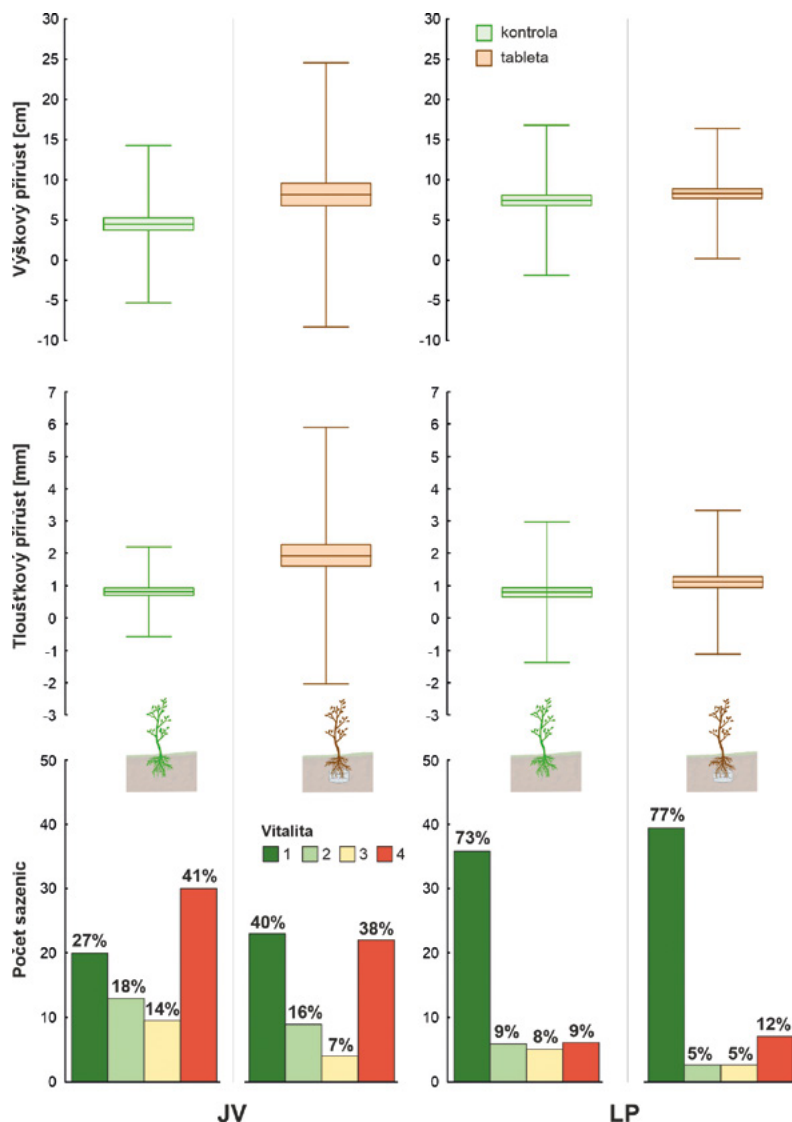
Obr. 20: Srovnání výškového a tloušťkového přírůstu sledovaných dřevin ošetřených hydrogelem a kontrolních a kategorie vitality jednotlivých sazenic na studijních plochách v roce 2022. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem, hnědá – sazenice s tabletou. BO – borovice lesní, SM – smrk ztepilý. Hodnocení vitality: 1 – výborná až mírně snížená vitalita, 2 – zřetelně snížená vitalita (stagnace růstu, prosychání koruny na periferních oblastech koruny), 3 – zbytková vitalita (větší část koruny odumřelá), 4 – suchý strom

V rozšířeném experimentu se sazenicemi lípy a javoru již po jedné vegetační sezoně vykazovaly sazenice javoru klenu po přidání tablety výrazně vyšší vitalitu a o 3 % nižší mortalitu. Sazenice lípy srdčité dosahovaly v obou variantách srovnatelnou vitalitu (Obr. 21). U obou dřevin byl zjištěn vyšší tloušťkový i výškový přírůst po přidání tablety s hydrogelem. V případě javoru byl výškový přírůst statisticky signifikantně vyšší [Kruskalův-Wallisův test: $H(1, N = 74) = 3,93$; $p < 0,05$], v průměru dvojnásobný, tzn. o 4 cm větší. Tloušťkový přírůst byl dokonce v průměru více než dvojnásobný [Kruskalův-Wallisův test: $H(1, N = 79) = 8,92$; $p < 0,05$] (Obr. 21). Lípa srdčitá vykazovala také vyšší výškový přírůst (v průměru o 1 cm) a průkazně vyšší tloušťkový přírůst [Kruskalův-Wallisův test: $H(1, N = 108) = 4,68$; $p < 0,05$] (Obr. 21).

3.5.4 Shrnutí experimentální části

Z uvedených výsledků je zřejmé, že pozitivní vliv hydrogelu na růst a vitalitu hlavních hospodářských dřevin se projevuje zejména v období extrémních srážkových deficitů, kdy přidání hydrogelu prodlužuje období dostupnosti vody pro rostlinu. Tento fakt je ověřen laboratorně i experimentálně. Na experimentálních plochách a fóliovníku s řízenou závlahou je za plné vláhy vliv na morfometrické i fyziologické parametry rostliny minimální. Za těchto podmínek se projevuje pozitivní vliv přidání hydrogelu pouze u javoru klenu a dubu zimního.

Všechny studované dřeviny reagují pozitivně na přítomnost hydrogelu v případě stresu suchem (viz kapitola 3.5.1). Ze studovaných dřevin je výjimkou borovice lesní, která odpovídá na přítomnost hydrogelu nejednoznačně a aplikaci v tomto případě nedoporučujeme. Z aplikačních forem hydrogelu doporučujeme tabletu s hydrogelem, protože je v provozních podmínkách lehce aplikovatelná a na studijní ploše vykazuje její aplikace nejvýraznější snížení mortality u studovaných dřevin (zejména javoru klenu a dubu zimního).



Obr. 21: Srovnání výškového a tloušťkového přírůstu sledovaných dřevin s přidanou tabletou s hydrogelem a kontrolních a kategorie vitality jednotlivých sazenic na studijních plochách v roce 2022. Zelená barva – kontrolní sazenice, hnědá – sazenice s tabletou. JV – javor klen, LP – lípa srdčitá. Hodnocení vitality: 1 – výborná až mírně snížená vitalita, 2 – zřetelně snížená vitalita (stagnace růstu, prosychání koruny na periferních oblastech koruny), 3 – zbytková vitalita (větší část koruny odumřelá), 4 – suchý strom

4 NOVOST POSTUPŮ

Aplikace hydrogelů v lesním hospodářství dlouhodobě postrádá ucelený metodický návod s přehledem výhod a nevýhod jednotlivých postupů. Ačkoli je účinnost a pozitivní vliv hydrogelu na rostliny dlouhodobě znám, způsoby dávkování jsou doporučeny pouze výrobci bez hlubší analýzy v lesních ekosystémech a poloprovozních podmínkách.

Vzhledem k novým postupům a aplikačním metodám poskytuje předložený text přehled dosavadních znalostí a možností využití hydrofilních polymerů v lesním hospodářství a výsadbě okrasných dřevin. Metody jsou hodnoceny na základě statistického vyhodnocení aplikace hydrogelu a jeho dopadů na vitalitu vybraných dřevin v rámci terénních i laboratorních experimentů.

Výsledkem je zhodnocení hlavních hospodářských dřevin s ohledem na potenciál a efektivitu využití hydrogelu při jejich pěstování. Z analyzovaných dřevin v podmínkách střední Evropy je nejperspektivnější aplikace hydrogelu při výsadbách dubu, buku, smrku, lípy a javoru, které vykazují nejvýraznější reakci při použití hydrogelu, a to zejména při vystavení středně až dlouhodobému stresu suchem. Využití hydrogelu pro sadbu borovice lesní nedoporučujeme vzhledem k nejednoznačnosti výsledků během experimentů. Zatímco na stanovištích s dostatkem vody a v letech s vysokým srážkovým úhrnem je vliv přidaného hydrogelu na rostliny nevýrazný a minimální, v období s nedostatkem srážek podporuje růst dřevin i jejich fyziologické ukazatele.

5 POPIS UPLATNĚNÍ

Metodika je určena pro praktické využití při obnově lesa, výsadbách a činnostech majících za cíl omezení negativních dopadů klimatických změn na lesní ekosystémy. Uživatelé jsou potenciálně všichni vlastníci lesů, lesní hospodáři, subjekty provádějící lesnické činnosti, státní správa lesů, lesnické výzkumné ústavy a univerzity. Navržené postupy a metody aplikace hydrogelů naleznou uplatnění nejen v hospodářských lesích, ale i v městských aglomeracích, ovocných sadech nebo chráněných územích. Použití hydrofilních polymerů je již nyní ekologicky šetrné, hydrogely jsou biologicky odbouratelné a v současnosti se vyvíjí nové šetrnější sloučeniny.

V případě plošné aplikace nebo za využití mechanizovaných metod mohou být hydrogely cenným nástrojem ve velkoplošné obnově lesa na stanovištích s nedostatkem srážek, kde je pěstování dřevin velmi obtížné nebo dokonce nemožné bez použití metod pro snížení stresu suchem a zvýšení množství dostupné vody pro sazenice. Zejména se jedná o plochy určené k rekultivaci, kalamitní plochy určené k obnově a písčité stanoviště. Pro aplikaci hydrogelu je vhodná většina dřevin, zejména však druhy citlivé na sucho.

Na základě výsledků experimentu lze pro praktické využití hydrogelu jednoznačně doporučit aplikaci formou rozředěné jíchy pod kořen nebo tablety s hydrogelem. Tyto metody jsou provozně nejsnadněji aplikovatelné a zároveň umožňují jednoznačně specifikovat a modifikovat dávku aditiva, které je k sazenici přidáno.

6 EKONOMICKÉ ASPEKTY UPLATNĚNÍ

Zvýšení tržeb předpokládáme především ve spojení se snížením ztrát při obnově lesa spojených se zvýšenou mortalitou sazenic vybraných druhů dřevin, a to především při umělé obnově lesa u všech vlastníků lesů. V současnosti se mortalita sazenic při umělé obnově pohybuje mezi 25–40 %, umělá obnova probíhá přibližně na 26 000 ha ročně. Při předpokládaném zvýšení ujmavosti v důsledku použití hydrofilních polymerů o pouhé 2 % můžeme odhadovat snížení nákladů spojených s obnovou o minimálně 8 mil. Kč ročně, tedy 40 mil. Kč za 5 let. Při průměrné ceně prostokořenné sazenice 5 Kč a průměrnému počtu sazenic 5000 ks na ha lze počítat s úsporou 25 000 Kč/ha. Pokud bychom uvažovali o potřebě znovu obnovit plochy, kde se zalesnění z důvodu přísušku a absence hydrogelu nepodařilo, činí úspora dokonce 131 mil. Kč (počítáme s rozlohou ploch, kde byla v roce 2015 nutná opakovaná obnova, tj. 5246 ha). Roční odhad zisku v rámci snížení ztrát během zalesňování je odhadován v souvislosti se zvýšením nákladů (nákup hydrogelu nebo tablet, sázecí adaptér) po původní investici zhruba na 7 mil. Kč ročně. Značné snížení nákladů lze očekávat rovněž v souvislosti se sníženou potřebou zavlažování sazenic.

7 DEDIKACE

Metodika byla zpracována v rámci řešení výzkumného projektu Ministerstva zemědělství ČR NAZV ZEMĚ QK1910347. Autorské podíly tvůrců metodiky jsou následující: J. Macků 30 %, K. Resnerová 30 %, I. Tomášková 10 %, T. Holeček 10 %, K. Hájková 10 %, J. Trombik 10 %.

8 LITERATURA

8.1 Použitá literatura

- Andry, H.; Yamamoto, T.; Irie, T.; Moritani, S.; Inoue, M.; Fujiyama, H. Water retention, hydraulic conductivity of hydrophilic polymers in sandy soil as affected by temperature and water quality. *Journal of Hydrology*, **2009**, 373, 177–183. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.04.020.
- Grabowska-Polanowska, B.; Garbowski, T.; Bar-Michalczyk, D.; Kowalczyk, A. The benefits of synthetic or natural hydrogels application in agriculture: An overview article. *Journal of Water and Land Development*, **2021**, 51, 208–224, doi: 10.24425/jwld.2021.139032.
- Hunkeler, D. Mechanism and kinetics of the persulfate initiated polymerization of acrylamide. *Macromolecules*, **1991**, 24, 2160–2171, doi: 10.1021/ma00009a004.
- Chalupová, Z.; Masteiková, R.; Savickas, A. Farmaceutické hydrofilní gely. *Česká a slovenská farmacie*, **2005**, 54, 55–59.
- Kim, J.J.; Park, K. Modulated insulin delivery from glucose-sensitive hydrogel dosage forms. *Journal of Controlled Release*, **2001**, 77, 39–47, doi: 10.1016/s0168-3659(01)00447-3.
- Kopeček, J.; Jokl, J.; Lím, D. Mechanismus der Dreidimensionalen Polymerisation von Glykolmethacrylaten. *Journal of Polymer Science C*, **1968**, 16, 3877–3889.
- Lu, S.; Wang, Z.; Hu, Y.; Liu, B.; Liu, J. E. Effectiveness and durability of polyacrylamide (PAM) and polysaccharide (Jag C 162) in reducing soil erosion under simulated rainfalls. *Water*, **2018**, 10, 257. doi: 10.3390/w10030257.
- Lee, S.S.; C Hang, S.X.; Chang, Y.-Y.; Ok, Y.S. Commercial versus synthesized polymers for soil erosion control and growth of Chinese cabbage. *SpringerPlus*, **2013**, 2, 1–10, doi: 10.1186/2193-1801-2-534.
- Lee, K. Y.; Mooney, D. J. Hydrogels for tissue engineering. *Chemical Reviews*, **2001**, 101, 1869–1880, doi: 10.1021/cr000108x.
- Mleziva, J.; Šnupárek, J. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha, Sobotáles, **2000**, 537 s.

- Mohan, Y. M.; Murthy, P. S. K.; Reedy, M. M.; Raju, M. P.; Raju, K. M. Synthesis and swelling properties of crosslinked poly(AAm-KMA-MA) hydrogels. *Journal of Polymer Materials*, **2005**, 22, 283–294, doi: 10.1080/10601320500189539.
- Orikiriza, L.; Agaba, H.; Eilu, G.; Kabasa, J.; Worbes, M.; Hüttermann, A. Effects of hydrogels on tree seedling performance in temperate soils before and after water stress. *Journal of Environmental Protection*, **2013**, 04, 713–721, doi: 10.4236/jep.2013.47082.
- Puoci, F.; Iemma, F.; Spizzirri, U. G.; Cirillo, G.; Curcio, M.; Picci, N. Polymer in agriculture: a review. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, **2008**, 3, 299–314, doi: 10.3844/ajabssp.2008.299.314
- Sarvaš, M.; Pavlenda, P.; Takáčová, E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations. *Journal of Forest Science*, 2007, **53**, 204–209.
- Saxena, A.K. Synthetic biodegradable hydrogel (PleuraSeal) sealant for sealing of lung tissue after thoracoscopic resection. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **2010**, 139, 496–497, doi: 10.1016/j.jtcvs.2008.11.003.
- Sedláková, M.; Rabišková, M.; Spilková, J. Přírodní polymery pro formulaci hydrofilních matricových tablet, **2006**, Česká a slovenská farmacie, 55, 4–11.
- Simanov, V. *České lesy v datech a číslech*. Praha, Národní zemědělské muzeum s.p.o., **2016**, 398 s.
- Tomášková, I.; Svatoš, M.; Macků, J.; Vanická, H.; Resnerová, K.; Čepl, J.; Holuša, J.; Hosseini, S.M.; Dohrenbusch, A. Effect of different soil treatments with hydrogel on the performance of drought-sensitive and tolerant tree species in a semi-arid region. *Forests*, **2020**, 11, 211, doi:10.3390/f11020211.
- Vundavalli, R.; Vundavalli, S.; Nakka, M.; Rao, D.S. Biodegradable nano-hydrogels in agricultural farming – alternative source for water resources. *Procedia Materials Science*, **2015**, 10, 548–554, doi: 10.1016/j.mspro.2015.06.005.
- Watanabe, K.; Saensupo, S.; Naiam, Y.; Klomsaard, P.; Sriroth, K. Effects of superabsorbent polymer on soil water content and sugarcane germination and early growth in sandy soil conditions. *Sugar Tech*, **2019**, 21, 444–450, doi: 10.1007/s12355-018-0672-5.
- Wilske, B.; Bai, M.; Lindenstruth, B.; Bach, M.; Rezaie, Z.; Frede, H. G.; Breuer, L. Biodegradability of a polyacrylate superabsorbent in agricultural soil. *Environmental Science and Pollution Research*, **2014**, 21, 9453–9460, doi: 10.1007/s11356-013-2103-1

8.2 Publikace, které předcházely metodice

8.2.1 Odborné články

- Hazarika, R.; Bolte, A.; Bednarova, D.; Chakraborty, D.; Gaviria, J.; Kanzian, M.; Kowalczyk, J.; Lackner, M.; Lstibůrek, M.; Longauer, R.; Nagy, L.; **Tomášková, I.**; et al. Correction to: Multiactor perspectives on afforestation and reforestation strategies in Central Europe under climate change. *Annals of Forest Science* **2021**, 78, 71, doi:10.1007/s13595-021-01088-7.
- Holuša, J.; Lubojacký, J.; Čurn, V.; Tonka, T.; **Lukášová (Resnerová), K.**; Horák, J. combined effects of drought stress and *Armillaria* infection on tree mortality in Norway spruce plantations. *Forest Ecology and Management* **2018**, 427, 434–445, doi:10.1016/j.foreco.2018.01.031.
- Hönig, V.; Procházka, P.; Obergruber, M.; Kučerová, V.; Mejstřík, P.; **Macků, J.**; Bouček, J. Determination of tractor engine oil change interval based on material properties. *Materials* **2020**, 13, 5403, doi:10.3390/ma13235403.
- Kunert, N.; **Tomášková, I.** Leaf turgor loss point at full hydration for 41 native and introduced tree and shrub species from Central Europe. *Journal of Plant Ecology*, **2020**, 13, 754–756, doi: 10.1093/jpe/rtaa059
- Lorenc, F.; Pešková, V.; Modlinger, R.; Mrnka, L.; **Tomášková, I.**; Šenfeld, P.; Turčáni, M. Fine roots of *Picea abies* compensate for drought stress in the rainfall reduction experiment. *Dendrobiology* **2018**, 80, 91–100, doi:10.12657/denbio.080.009.
- Macků, J.; Resnerová, K.; Holeček, T.; Hájková, K.; Sikora, A.; Tomášková, I.** Využití hydrofilních polymerů při obnově a zakládání lesa jako účinná ochrana proti suchu (I). *Lesnická práce*, **2022**, 10, 44–45.
- Macků, J.; Resnerová, K.; Holeček, T.; Hájková, K.; Sikora, A.; Tomášková, I.** Využití hydrofilních polymerů při obnově a zakládání lesa jako účinná ochrana proti suchu (II). *Lesnická práce*, **2022**, 11, 51–52.
- Özçelik, M. S.; **Tomášková, I.**; Surový, P.; Modlinger, R. Effect of forest edge cutting on transpiration rate in *Picea abies* (L.) H. Karst. *Forests*, **2022**, 13, 1238, doi:10.3390/f13081238
- Tomášková, I.**; Svatoš, M.; **Macků, J.**; Vanická, H.; **Resnerová, K.**; Čepl, J.; Holuša, J.; Hosseini, S.M.; Dohrenbusch, A. Effect of different soil treatments with hydrogel on the performance of drought-sensitive and tolerant tree species in a semi-arid region. *Forests*, **2020**, 11, 211, doi:10.3390/f11020211.

8.2.2 Aplikační výstupy

Česká zemědělská univerzita v Praze. Dávkovací zařízení, zejména hydrogelu, pro výsadbu lesního porostu, uspořádané jako nástavba na rýhovacím sázecím stroji. Vynálezci: **Macků, J.**; Holuša, J; **Resnerová, K.**; Rybka, A.; Honzík, I., Jošt, B. Česká republika. Užitný vzor CZ 31844. 06.06.2018.

Česká zemědělská univerzita v Praze. Dávkovací zařízení, zejména hydrogelu, pro výsadbu lesního porostu, uspořádané jako nástavba na rýhovacím sázecím stroji. Vynálezci: **Macků, J.**; Holuša, J; **Resnerová, K.**; Rybka, A. Česká republika. Patentový spis CZ 307765. 17.04.2019.

Česká zemědělská univerzita v Praze. Hydrofilní tableta a sada pro výsadbu dřevin. Vynálezci: **Macků, J.**; **Holeček, T.**; Štícha, V.; **Resnerová, K.**; **Tomášková, I.**; Svatoš, M.; Vanická, H.; Nuhlíček, O.; Gaff, M. Česká republika. Užitný vzor CZ 35447. 05.10.2021.

Česká zemědělská univerzita v Praze. Radlice. Vynálezci: **Macků, J.**; Nuhlíček O.; **Resnerová, K.** Česká republika. Průmyslový vzor EUIPO 015001942-0001.

HYDROGEL APPLICATION AND THE POSSIBILITIES OF ITS USE IN FORESTRY OPERATIONS WITH INNOVATIVE DOSING OPTIONS

Summary

The main aim of the methodology is to describe and analyze in detail different methods of hydrogel application in forestry, using the data and know-how of author's acquired during the experiments both in field and laboratory. Emphasis is on innovative options for dosing hydrogel directly to seedlings during forest regeneration (tablets with hydrogel, Fig. 3 and 4; adapter for furrowing machine, Fig. 12 and 13). The evaluation and comparison of several application methods should lead to more efficient handling of forest seedlings, savings on material, and the restoration of tree species in conditions and areas, where forest regeneration was impossible or very inefficient due to insufficient precipitation previously. The methodology offers innovative adaptation measures that can be used in forest restoration in the context of ongoing climate change. The positive impact of application of hydrogel in the regeneration efforts is most significant in arid regions and on dry, sandy soils. In Central European conditions, positive effect of hydrogel on the growth and vitality of several economic tree species was confirmed, especially in periods of extreme precipitation deficits. Adding hydrogel (Fig. 1 and 2) also extends the water availability period. The time to reach critical soil moisture deficiency (mortality of trees) is extended by at least 12 days in soil treated with hydrogel (tablet and diluted hydrogel) (Fig. 9). Neither the tablet nor the hydrogel disturbs the soil profile (Fig. 5 and 10). Both treatments increase water conductivity in the soil and do not significantly acidify it (Table 2, 3 and 4, Fig. 11). On the experimental plots with controlled irrigation (total moisture), the effect of hydrogel on the morphometric (Fig. 17, 19, 20 and 21) and seedlings physiological parameters could be neglected (Fig. 14). Under these optimal conditions, adding hydrogel has a significant positive effect in *Acer pseudoplatanus* and *Quercus petraea* only. Almost all studied tree species responded positively to the presence of hydrogel only in the event of drought stress. We have shown that the hydrogel maintains the values of photosynthesis and transpiration in the dry season at approximately the same level as under conditions of sufficient irrigation (total field water capacity) for a month after limiting the soil water to the value corresponding to the wilting point. At the end of the experiment, the hydrogel ensured a roughly 50% higher transpiration and photosynthesis rate for all monitored tree species,

in conditions of significant water shortage, which can be compared to a monthly rainless period (Fig. 15 and 16). The exception among studied species is Scots pine, which response most unambiguously to the presence of hydrogel, and we do not recommend the application of hydrogel with this tree species. Among the hydrogel application methods, we recommend a tablet enriched with hydrogel because it is easily applicable in the field, and its addition to the seedling can reduce the mortality of seedlings, especially during prolonged dry periods.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: Jeden gram hydrogelu v práškové formě (vlevo) a po naředění vodou (vpravo). Foto: T. Holeček
- Obr. 2: Dávkování jichy s hydrogelem z barelu (vlevo) a její aplikace do sázecí jamky (vpravo). Foto: K. Resnerová
- Obr. 3: Různé typy tablet s hydrogelem (vlevo tableta s hydrogelem, uprostřed tableta ve výhodném provedení s lůžkem pro semeno buku lesního, vpravo tableta s lůžkem pro semeno smrku nebo jedle). Foto: T. Holeček
- Obr. 4: Aplikace tablety s hydrogelem do sázecí jamky. Foto: K. Resnerová
- Obr. 5: Analýza kontejnerů se smrkovou sazenicí s přidanou tabletou s hydrogelem pomocí CT skeneru v roce 2021. Foto: T. Holeček a J. Turek
- Obr. 6: Schéma uložení PVC tubusu na pískové lože
- Obr. 7: Graficky znázorněná obecná rovnice matematického modelu dějů v půdním profilu
- Obr. 8: Změna půdní vlhkosti v jednotlivých variantách v čase experimentu
- Obr. 9: Rychlost vysychání půdních systémů v jednotlivých variantách v čase experimentu
- Obr. 10: CT snímky jednotlivých experimentálních směsí během experimentu. Zleva směs půda s pilinami; směs půdy, hydrogelu a pilin; směs půdy s hydrogelem; kontrolní tubus obsahující pouze půdu
- Obr. 11: Zastoupení prchavých kyselin v půdní vodě (mg/l) v čase experimentu
- Obr. 12: Sázecí rýhovací stroj s aplikací hydrogelu. Foto: J. Macků
- Obr. 13: Výsadba borové sazenice s využitím rýhovacího stroje s aplikací hydrogelu. Foto: M. Svatoš
- Obr. 14: Srovnání hodnot rychlosti fotosyntézy (P_n) prostřednictvím tzv. světelné křivky fotosyntézy u studovaných dřevin ve fóliovníku s řízenou závlahou bez vystavení stresu suchem (vlevo), rychlosti fotosyntézy (P_n) měřené při osvětlení $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (uprostřed) a rychlosti transpirace (Tr) měřené při hodnotě světla $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. PPFD – množství fotosynteticky aktivních fotonů dopajících na m^2 plochy za sekundu. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý, BO – borovice lesní

- Obr. 15: Rychlost fotosyntézy měřená při osvětlení $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ve fóliovníku v průběhu srpna a září 2021. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý
- Obr. 16: Rychlost transpirace měřená při hodnotě světla $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ve fóliovníku v průběhu srpna a září 2021. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý
- Obr. 17: Srovnání výškového a tloušťkového přírůstu sledovaných dřevin ošetřených hydrogelem a kontrolních a kategorie vitality jednotlivých sazenic na studijních plochách v roce 2020. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý. Hodnocení vitality: 1 – výborná až mírně snížená vitalita, 2 – zřetelně snížená vitalita (stagnace růstu, prosychání koruny na periferních oblastech koruny), 3 – zbytková vitalita (větší část koruny odumřelá), 4 – suchý strom
- Obr. 18: Srovnání hodnot rychlosti fotosyntézy (P_n) prostřednictvím tzv. světelné křivky fotosyntézy u studovaných dřevin (vlevo), rychlosti fotosyntézy (P_n) měřené při osvětlení $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (uprostřed) a rychlosti transpirace (T_r) měřené při hodnotě světla $1500 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem. DB – dub zimní, BK – buk lesní, SM – smrk ztepilý, BO – borovice lesní
- Obr. 19: Srovnání výškového a tloušťkového přírůstu sledovaných dřevin ošetřených hydrogelem a kontrolních a kategorie vitality jednotlivých sazenic na studijních plochách v roce 2022. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem, hnědá – sazenice s tabletou. DB – dub zimní, BK – buk lesní. Hodnocení vitality: 1 – výborná až mírně snížená vitalita, 2 – zřetelně snížená vitalita (stagnace růstu, prosychání koruny na periferních oblastech koruny), 3 – zbytková vitalita (větší část koruny odumřelá), 4 – suchý strom
- Obr. 20: Srovnání výškového a tloušťkového přírůstu sledovaných dřevin ošetřených hydrogelem a kontrolních a kategorie vitality jednotlivých sazenic na studijních plochách v roce 2022. Zelená barva – kontrolní sazenice, modrá barva – sazenice ošetřené hydrogelem, hnědá – sazenice s tabletou. BO – borovice lesní, SM – smrk ztepilý. Hodnocení vitality: 1 – výborná až mírně snížená vitalita, 2 – zřetelně snížená vitalita (stagnace růstu, prosychání koruny na periferních oblastech koruny), 3 – zbytková vitalita (větší část koruny odumřelá), 4 – suchý strom

Obr. 21: Srovnání výškového a tloušťkového přírůstu sledovaných dřevin s přidáním tabletou s hydrogelem a kontrolních a kategorie vitality jednotlivých sazenic na studijních plochách v roce 2022. Zelená barva – kontrolní sazenice, hnědá – sazenice s tabletou. JV – javor klen, LP – lípa srdčitá. Hodnocení vitality: 1 – výborná až mírně snížená vitalita, 2 – zřetelně snížená vitalita (stagnace růstu, prosychání koruny na periferních oblastech koruny), 3 – zbytková vitalita (větší část koruny odumřelá), 4 – suchý strom



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

www.vulhm.cz

LESNICKÝ PRŮVODCE 7/2022