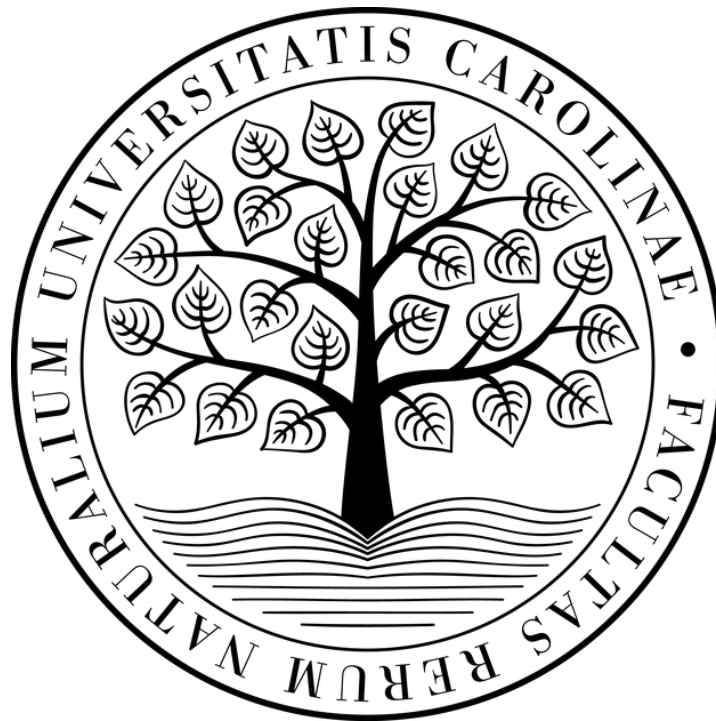


Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie



Bc. Štěpán Straka

Vliv vegetačního krytu na vznik odtoku ve svrchní části půdního profilu

Influence of land cover on the runoff formation in the upper part of the soil profile

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. Lukáš Vlček, Ph.D.

Konzultant: RNDr. Václav Šípek, Ph.D.

Praha, 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 31.7.2024



.....

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování panu RNDr. Lukáši Vlčkovi Ph.D. a panu RNDr. Václavu Šípkovi Ph.D. za jejich cenné rady, doporučení a trpělivost při vedení mé diplomové práce.

Vliv vegetačního krytu na vznik odtoku ve svrchní části půdního profilu

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vlivem vegetačního krytu na formování odtoku ve svrchní části půdního profilu. Výzkum je prováděn v CHKO Šumava v povodí Liz a zaměřuje se na dvě typické dřeviny pro tuto oblast, smrk ztepilý a buk lesní. Práce zkoumá nejen vznik odtoku, ale také analyzuje jednotlivé události za pomoci dat ze srážkoměrů a půdních vlhkostních čidel. Zároveň však byly provedeny i pokusy umělého zavlažování o extrémní intenzitě. Z práce je zřejmé, že mělký podpovrchový odtok vzniká snáze ve smrkovém porostu než v bukovém a také i samotné objemy odtoku jsou vyšší ve smrkovém lese než v bukovém.

Klíčová slova: podpovrchový odtok, les, Šumava, buk lesní, smrk ztepilý, lesní hydrologie

Influence of land cover on the runoff formation in the upper part of the soil profile

Abstract

This thesis examines the effect of vegetation cover on runoff generation in the top soil profile. The research is carried out in the Šumava Protected Landscape Area in the Liz catchment and focuses on two typical tree species for this area, spruce and beech. The work not only investigates the occurrence of runoff, but also analyses individual events using data from rain gauges and soil moisture sensors. Artificial irrigation experiments of extreme intensity were also included. It is clear from the work that subsurface runoff occurs more easily in spruce than in beech forests and that runoff volumes are also higher in spruce than in beech forests.

Key words: subsurface runoff, forest, Sumava, European beech, Norway spruce, forest hydrology

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam obrázků | 7 |
| Seznam tabulek | 9 |
| 1 Úvod | 10 |
| 2 Šumavské lesy | 12 |
| 2.1 Přehled vývoje šumavských lesů | 12 |
| 2.2 Buk lesní..... | 16 |
| 2.3 Smrk ztepilý..... | 17 |
| 3 Vybrané faktory ovlivňující odtok v lesích | 20 |
| 3.1 Srážky..... | 20 |
| 3.2 Evapotranspirace..... | 20 |
| 3.2.1 Transpirace | 21 |
| 3.2.2 Evaporace..... | 21 |
| 3.2.3 Intercepce | 22 |
| 3.4. Infiltrace | 23 |
| 3.5 Vlhkost..... | 24 |
| 3.6 Formování odtoku..... | 25 |
| 3.7 Vliv druhové přeměny lesa na vlastnosti půdy..... | 26 |
| 4 Případové studie | 28 |
| 5 Charakteristika území | 33 |
| 5.1 Morfologie území | 33 |
| 5.2 Pedologie území | 33 |
| 5.3 Vegetace území..... | 35 |
| 5.4 Geologické poměry..... | 36 |
| 5.5 Klimatické poměry | 36 |
| 5.6 Hydrologické poměry | 36 |
| 6 Metodika experimentu | 37 |
| 6.1 Data..... | 41 |
| 6.1.1 Srážky | 41 |
| 6.1.2 Vlhkost | 42 |
| 6.2 Umělé zavlažování..... | 43 |
| 7 Výsledky | 44 |
| 7.1 Přirozené odtokové události..... | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 7.1.1 Analýza odtokových událostí | 44 |
| 7.1.2 Jednotlivé události | 52 |
| 7.2 Umělé odtokové události | 66 |
| 7.2.1 První experiment | 66 |
| 7.2.2 Druhý experiment | 67 |
| 8 Diskuze | 69 |
| 9 Závěr | 71 |
| Seznam použité literatury | 73 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1. Porovnání současné situace bukového porostu a původního zastoupení buku na Šumavě..... | 17 |
| Obr. 2 Porovnání současné situace smrkového porostu a původního zastoupení smrku na Šumavě..... | 19 |
| Obr. 3 Podpovrchový odtok z různých porostů | 31 |
| Obr. 4 Zhotovování odvodňovací jámy ve smrkovém lese | 39 |
| Obr. 5 Vybudovaný experiment v bukovém lese | 39 |
| Obr. 6 Trychtýř s odvodňovacími plechy | 40 |
| Obr. 7 Náčrtek trychtýře s člunkem..... | 40 |
| Obr. 8 Porovnání objemové půdní vlhkosti a v bukovém a smrkovém porostu..... | 42 |
| Obr. 9 Objemová půdní vlhkost ve smrkovém porostu s odtokovými událostmi | 45 |
| Obr. 10 Objemová půdní vlhkost v bukovém porostu s odtokovými událostmi | 45 |
| Obr. 11 Závislost odtoku a srážek ve smrkovém lese..... | 48 |
| Obr. 12 Srážky a nezadržená voda smrkovém porostu..... | 49 |
| Obr. 13 Závislost objemu srážek a intenzity ve smrkovém lese..... | 51 |
| Obr. 14 Závislost odtoku na intenzitě srážek ve smrkovém porostu | 52 |
| Obr. 15 Odtoková událost z 14. srpna 2024 | 53 |
| Obr. 16 Jednotlivá klapnutí vůči změně půdní vlhkosti | 56 |
| Obr. 17 Odtok ve smrkovém porostu..... | 57 |
| Obr. 18 Odtok ve bukovém porostu..... | 58 |
| Obr. 19 Graf události z 27. října 2023 | 59 |
| Obr. 20 Odtoková událost z 30. července 2023 | 60 |
| Obr. 21 Odtoková událost z 26. srpna 2023 | 60 |
| Obr. 22 Odtoková událost z 2. listopadu 2023 | 61 |
| Obr. 23 Odtoková událost z 3. listopadu 2023 | 61 |
| Obr. 24 Odtoková událost z 19. listopadu 2023 | 62 |
| Obr. 25 Odtoková událost z 23. prosince 2023..... | 62 |
| Obr. 26 Odtoková událost z 22. ledna 2024 | 63 |
| Obr. 27 Odtoková událost z 5. srpna 2023 | 63 |
| Obr. 28 Odtoková událost z 6. srpna 2023 | 64 |

| | |
|--|----|
| Obr. 29 Odtoková událost z 7. srpna 2023 | 64 |
| Obr. 30 Odtoková událost z 22. října 2023 | 65 |
| Obr. 31 Odtoková událost z 5. listopadu 2023 | 65 |
| Obr. 32 Odtoková událost z 18. dubna 2024 | 66 |
| Obr. 33 Umělé zavlažování 19. října 2023 ve smrkovém porostu | 67 |
| Obr. 34 Umělé zavlažování 29. června 2024..... | 68 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Smrkový půdní horizont | 34 |
| Tab. 2 Bukový půdní horizont | 35 |
| Tab. 3 Půdní objemové vlhkosti ve smrkovém i bukovém porostu..... | 46 |
| Tab. 4 Objem srážek jednotlivých událostí | 49 |
| Tab. 5 Intenzita srážek jednotlivých událostí | 50 |
| Tab. 6 Data ze srážkové události z 14.8.2023 | 54 |

1 Úvod

Lesy v České republice tvoří přibližně třetinu celkové rozlohy. V minulosti byly lesy značně proměněny lesnickou činností a dnes se prakticky na našem území nenachází původní lesy, přičemž obecně převažují smrkové porosty. Oproti tomu byly historicky upožadovány původní smíšené lesy, které byly druhově bohatší, případně i lesy čistě listnaté, kterých je taktéž nyní na našem území méně, než by bylo pro naši krajinu přirozené.

V posledních letech jsou tendence zvýšení biodiverzity v českých lesích a přiblížení se k přirozené skladbě lesa. Například v rámci reformy lesního zákona jsou slyšet návrhy o zakotvení cíle, že by podíl každého druhu stromu nesměl přesahovat svou přirozenou hranici o více než deset procent. (Bláha et al., 2020)

Tyto transformace skladby lesa nesou řadu změn ve vodní bilanci krajiny. Bukové lesy sice mají ve vegetačním období vyšší intercepci než smrkové lesy, avšak v rámci celého roku, především díky opadavosti buku mají celkovou intercepci vyšší lesy smrkové.

Smrkové porosty již s první generací vysazení přeměňují půdní pokryv, kdy v horní vrstvě půdy se vytvoří hrabanka, tedy zemina tvořena rozkladem jehličím. Tato kyselá vrstva se odlišuje od horní vrstvy půdy v listnatých lesích v mnoha směrech, ať už v mineralizaci, kdy je v této vrstvě méně draslíku či vápníku (Nihlgård, 1971), nižšímu rozkladu organického materiálu, nižší aktivitě půdní mikrofauny (Berger et al., 2008), ale taktéž například ve struktuře, kdy půda pod smrkovým porostem je daleko méně sypká (Rothe et al., 2002).

Co se týče vlivu horní vrstvy půdy na odtok, situace je z literatury nejednoznačná. Obecně lze říci, že propustnost je vyšší v horních horizontech půdy smrkového lesa než v lese bukovém, avšak i přes mnohé pokusy a experimenty prováděné v ČR (Tužinský, 2002; Kantor et al., 2011) nebo i v zahraničí (Holzmann a Sereining, 1997; Jost a Weiler, 2006; Nordmann et al., 2009; Hümann et al., 2011) jsou výsledky odtoku rozdílné, často až opačné.

Tato práce si klade za cíl porovnat odtok svrchní části půdního profilu bukového lesa s lesem smrkovým. V průběhu jednoho roku sesbírat a zmapovat veškeré odtokové

události, kvantifikovat je a dát do souvislosti s daty ze srážkoměrů a půdních čidel vlhkosti.

2 Šumavské lesy

2.1 Přehled vývoje šumavských lesů

Na základě výsledků archeologického výzkumu a pylových analýz je možné sledovat vývoj lesů již od postglaciálu. I když byly lesy na území současné České republiky v této době tvořeny převážně bukem a jedlí s příměsí habru, tak na Šumavě, stejně jako v jiných hraničních pohořích byl základní dřevinou smrk. (Nožička, 1957)

Nejstarší písemný historický doklad lze nalézt již v Kosmově kronice, která dokazuje, že území současné ČR bylo daleko více zalesněno, než tomu je dnes a zároveň pohraniční hvozdy, tedy i Šumava byla téměř nepropustná (Nožička, 1957). Podle Petra Martana (2008) tvořily původně lesy přibližně 80 % z celkové rozlohy území České republiky, přičemž v horských oblastech byly zastoupeny ještě více.

První zásahy do původních lesů probíhaly již ve 13. století, kdy se na Šumavě objevovaly náznaky kolonizace, jako například hrad Vimperk nebo první relativně vysoko položené osady (Zátoň, Volary) (Nožička, 1957). Výraznějším vlivem však na lesy na Šumavě měl rozvoj sklářství, které se zde začalo rozvíjet již od 15. století. To mělo za následek mohutné kácení pralesů a velmi rychle Šumava ztratila mnoho tisíc hektarů lesů. Dřevo, jakožto surovina, mělo v téhle době velmi malou hodnotu, jelikož se mohlo po zaplacení paušálního poplatku prakticky neomezeně drancovat. Po vytěžení lesů v konkrétním místě se sklárny buď zrušily anebo s přilehlou osadou velmi zmenšily. (Martan, 2008) Zároveň dochází k vypalování lesů z důvodu získávání nové orné půdy. Tato masivní degradace lesů vedla v roce 1350 vůbec k prvnímu návrhu zákoníku Codex Carolinus, který se zabýval mimo jiné také ochranou lesa (Nožička, 1957), konkrétně měl postihovat vysokými tresty toho, kdo by bez povolení lesy vypaloval (Martan, 2008). Tento zákoník však nikdy nebyl prosazen (Nožička, 1957).

Již v této době se však měnila dřevinná skladba lesa. V tehdejších lesích, které byly tvořeny především bukojedlovými porosty, případně smíšenými doubravami si lidé vybírali specifické druhy pro konkrétní účely (například duby na vodní stavby nebo buky na dřevěné uhlí). (Lenoch, 2014)

První informace o podrobnějším druhovém složení poskytli tzv. urbáři, kteří zajišťovali evidenci údajů v jednotlivých panstvích. Nejstarší dochovaný soupis druhového složení lesů je z roku 1379 z rožmberského panství, kde jsou zachyceny

přibližné zastoupení dubu, buku, jedle, borovice, lípy a osiky. Podle Josefa Nožičky (1957) však nejpodrobnější zdroje informací z této doby pochází z místních názvů obcí, které jsou odvozeny od různých lesních dřevin, které se v té době nacházely povětšinou ve smíšených lesích. Na Šumavě to jsou například obce Javorník, Lipka nebo Tisovka.

Trend odlesňování, který započal ve 13. století probíhal až do třicetileté války (1618–1648). Po třicetileté válce klesl počet obyvatel o 30 %, mužů dokonce o 50 %. To mělo za následek úpadek veškeré činnosti spojené s tehdejší těžbou lesů. (Lenoch, 2014) V této době začalo docházet k přirozené obnově lesů, ale řada míst, kde lesy byly vyklučeny a přeměněny na pole a louky zarostly pouze břízami a trnitými keři. Teprve ve druhé polovině sedmnáctého a zejména v první polovině osmnáctého století, kdy nastal nový hospodářský rozvoj, byly lesy opět káceny (Nožička, 1957). Na Šumavě, jako i v jiných pohorích bylo toto umocněno i devastací z důvodu rozšiřování pastvy dobytka (Lenoch, 2014).

Pralesy však nebyly velmi dlouho rozčleněny stezkami a většina území Šumavy byla zpřístupněna až v 18. století. To mělo za následek větší možnost těžby i v odlehlejších oblastech. V této době vznikají dřevorubecké osady, podle Petra Martana (2008) se jedná o začátky intenzivní lesnické činnosti na Šumavě, avšak podle Viceny (1995) těžba probíhá především pouze v rámci zpracovávání polomů a stromů postihnutých kůrovcovými kalamitami.

Za vlády císaře a českého krále Karla VI. vyšlo v roce 1713 nařízení, které výrazně omezovalo těžbu lesů, které ležely na hranicích monarchie, tedy i Šumavy, z důvodu, že lesy mimo jiné měly i obrannou úlohu. Také byly vydány pozemkové lesní předpisy z roku 1733 s doporučením, že by se mělo těžit a využívat minerální uhlí, které mělo nahradit palivové dříví.

Šumava byla také průkopníkem lesnického vzdělávání, v roce 1795 vznikla v Zlaté Koruně první lesnická škola. To mělo za následek rozvoj modernějších lesnických metod, vznik prvních lesních školek nebo například fundovanější způsoby samotné výsadby a pěstování stromů. (Záloha, 1984) Z této doby jsou i první odhady procentuálního složení šumavských lesů, konkrétně 60 % smrku, 30 % jedle a 10 % buku, javoru a jilmu (Martan, 2008).

Na přelomu 18. a 19. století v Praze a středních Čechách dochází k nedostatku dřeva. Výsledkem této krizové situace měla být právě Šumava, kde se mohutně těžilo

dřevo ve spádových oblastech, kde bylo možné splavování po řece Vydře a po nově vybudovaných kanálech (Schwarzenberský a Vchynicko-tetovský plavební kanál) (Fencel, 1980). A podle Martana (2008) Šumava zachránila Prahu.

Velký dopad na ochranu lesů měl „Císařský královský patent lesů a dříví, ustanovení v království Českém se týkající“, který vyšel za Marie Terezie v roce 1754. Tímto se podle Dr. Nožičky uzavřelo období „*kdy si majitelé panství mohli ve svých lesích dělat, co se jim zlíbilo*“ (Nožička, 1957, str. 190; 417). Od té doby se mohly kácet lesy pouze v zimě a vlastník byl povinen obnovit, tedy zalesnit vykácené plochy. Byl také velmi regulován prodej dřeva do zahraničí a bylo přísně zakázáno přeměňovat lesy v pole a louky (Nožička, 1957). Za vlády Marie Terezie a Josefa II. se také v šumavských lesích přemnožila zvěř, která stromům škodila. Proto byli na území Schwarzenberského majetku vystříleni jeleni a ostatní zvěř byla také velmi zredukována. Tento extrémní zásah měl pozitivní vliv na udržení zbylých smíšených lesů. (Martan, 2008)

V polovině 18. století se také začal transformovat les prakticky ve všech panstvích z důvodu umělé obnovy. V následujících sto letech došlo na celém území českých zemí k přeměně z bývalých smíšených porostů převážně na čisté borové a smrkové porosty. Pro zalesňování se totiž začaly využívat rychle rostoucí dřeviny, aby byla dosažena co největší produkce dříví. Byl totiž kvůli výše zmíněným regulacím poměrně velký tlak na spotřebu, a tedy i na cenu dřeva. Koncem 18. století se vysazují hlavně borové monokultury, tento trend poměrně rychle vystřídal jehličnaté monokultury, především smrku, popřípadě modřínu. Toto má za následek větší náchylnost ke kalamitám. (Nožička, 1957)

První dobové zmínky o přetěžování lesů se objevují již v roce 1860 z Práší, ale podle Martana (2008) se jedná pouze o lokální problém, jelikož podstatná část lesů v této době byla ještě nezpřístupněná a nemohla být intenzivně těžena.

V polovině 19. století se prudce rozvíjí těžba uhlí k topným účelům, což mělo za následek pokles těžby palivového dřeva. Oproti tomu však celková spotřeba, a tedy i těžba nepoklesla, pouze se změnilo využití dřeva, jelikož z důvodu hospodářského růstu se dřevo využívalo ve stavebnictví a při velmi mohutném budování železniční sítě (Nožička, 1957). Podle odhadů v této době tvořily v Čechách jehličnaté lesy 83 %, smíšené asi 12 % a 5 % listnaté lesy. (Lenoch, 2014)

Zcela zásadní vliv na vývoj šumavských lesů měly vichřice v roce 1868, 1870 a 1875 a následné kůrovcové kalamity. V tomto období bylo vytěženo 7 milionů m³ polomového a kůrovcového dřeva. Po těchto událostech byly až na výjimky pralesy zničeny a nový les, který se posléze vyvíjel, už měl zcela hospodářský charakter a les vznikal umělou výsadbou především smrkové monokultury (Martan, 2008).

I tento fakt vedl k podpoře průmyslu, jelikož veškerá výroba je závislá alespoň nějakou částí na dřevě, navíc se prudce rozvíjí i různé nábytkářské velkovýroby a továrny na celulózu (Nožička, 1957). Na konci 19. století bylo v Čechách jehličnatých lesů již 90 % a oproti tomu smíšených lesů bylo pouze 6 % a listnatých 4 %. (Lenoch, 2014)

Začátkem 20. století se začínají objevovat snahy o druhově bohatší lesy. V tehdejších schwarzenberských lesích se začínalo sázet podle typu půd. V půdách na zvětralinách se sázel smíšený les a na oglejovaných a podmáčených půdách smrk (Martan, 2008).

V období první světové války byla těžba a spotřeba dřeva velmi vysoká, proto po válce mělo Československo problém s nedostatkem dřeva. Z tohoto důvodu bylo vydáno několik poměrně rázných zákonů na ochranu lesů, které ač vedly k ochraně lesů, tak kvůli několika kalamitám, například v roce 1929 kvůli větrné kalamitě nebo sněhové kalamitě v roce 1930 bylo mnoho milionů m³ dřeva zpustošeno. Navíc přišla světová hospodářská krize a došlo k zhroucení cen dřeva, a tak nastal úplný útlum péče o les. Naopak v období druhé světové války byly lesy opět přetěžovány. (Lenoch, 2014)

Od roku 1948 došlo k úplnému zestátnění všech lesů. Tento nový režim umožnil kompletní změny lesů a nemusel brát ohledy na původní hranice vlastnických celků. Toto mělo za následek velmi pečlivý a dodržovaný systém, avšak oproti tomu se podíl listnatých dřevin snížil prakticky na minimum. (Lenoch, 2014)

Po tomto roce byla lesnická činnost velmi znesnadněna z důvodu různých pásem pohraniční stráže (Martan, 2008) a les byl narušen vysekáváním lesních průseků (Martan, 2011). Navíc na území Šumavy byl za komunismu neustálý nedostatek lesníků, což se projevilo zcela omezením pěstování náročnějšího buku a sázel se pouze smrk, a to i z ekonomického důvodu. (Martan, 2008) V šedesátých letech na popud šumavských lesníků vzniká CHKO Šumava za účelem ochrany přírody. V sedmdesátých letech se nedostatek lesnického personálu nahradil mechanizací a chemizací. Smíšené lesy v tomhle období byly častokrát doporučovány, ale nebyly povinné, takže vzhledem ke

státním plánům a tlakům na výtěžnost nebyly příliš realizovány. Prakticky se zrušily také malé lesní školky a nahradil je dovoz sazenic z velkokapacitních školek. (Martan, 2008)

Po revoluci v roce 1990 se stala Šumava nejdříve biosférickou rezervací a o rok později byl i vyhlášen Národní park Šumava. I když podle Martana (2011) byl tlak na založení Národního parku nejen ekologický, ale také politický, jelikož vyhlášení by z části zabránilo restitucím. Od roku 1993 bojují šumavské lesy s kůrovcem, první gradace probíhala do roku 2000 a byla zasažena hlavně oblast okolí Modravy a Plešného jezera. Daleko plošněji zásah kůrovcem vyvolal orkán Kyrill. Tato epidemie trvala od roku 2008 do roku 2012. Tyto události postihly 11 tisíc hektarů lesa, což je přibližně 22 % lesů NP Šumava. Zároveň se nabízela možnost větších zásahů do druhové skladby v rámci sadby, například v roce 2001 se vůbec poprvé osázela větší plocha listnatých lesů a jedlí. Dokonce v roce 2014 se smrk přestal sázet úplně. (Kozel, 2021)

2.2 Buk lesní

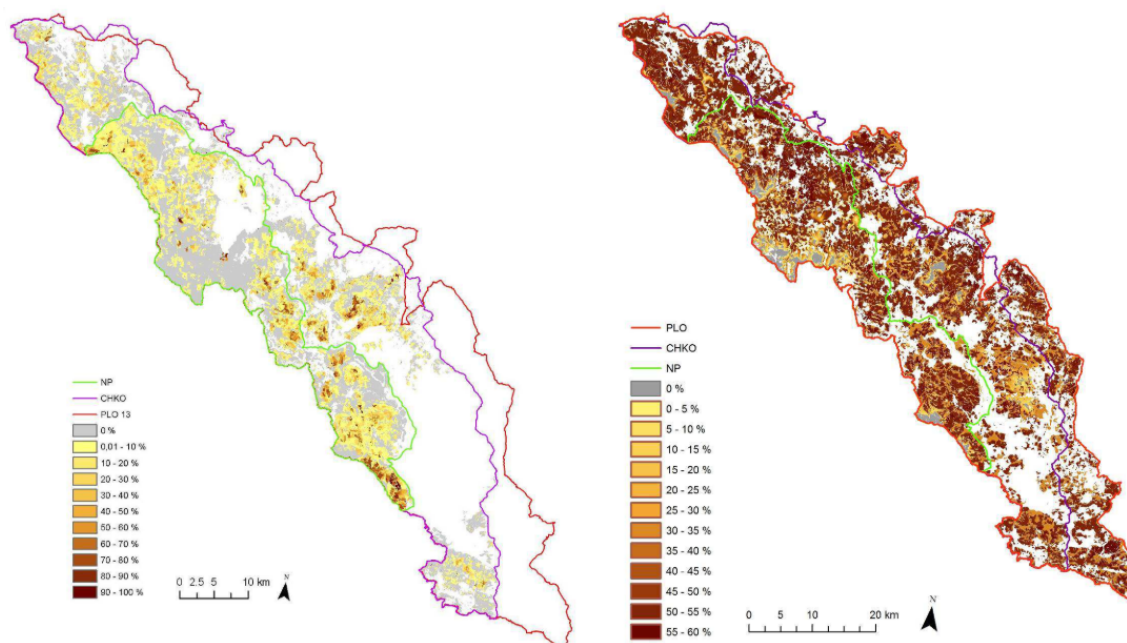
Buk se na Šumavě pevně ukotvil před 8 000 lety a vůbec největší pokryvnosti dosáhl před 1000 lety, a sice 24 % (Čížková, 2018). Ve středověku měli o buk zájem uhlíři a sklářské hutě, což vedlo k vyhledávání buků a přednostní těžbě. Později však o buk přestal být takový zájem z důvodu dostupnosti uhlí a po bukovém dřevěném uhlí přestala být poptávka. Navíc bukové kmeny měly daleko menší využití než ty smrkové, proto se začalo s výsadbou smrkových monokultur. (Martan, 2008; Úradníček a Chmelař, 1998a)

V okrajových horstvech Českých zemí byl buk rozšířen nejčastěji ve smíšených lesích společně s jedlí a smrkem primárně v rozmezí výšek 400–800 m n. m. Na Šumavě se zachovaly ještě relativně rozsáhlé porosty buku ve výškách 650–1000 m n. m. a ojedinele vystupuje bukový porost až k hlavnímu hřebeni. (Úradníček a Chmelař, 1998a)

Podle tzv. rekonstruované přirozené skladby lesa by zastoupení buku v NP Šumava mělo být kolem 21 % (Čížková, 2018), oproti tomu v celé ČR bylo zastoupení buku 8 % (Úradníček a Chmelař, 1998a). V současné době je zastoupení buku v NP Šumava 6 % a v bezzásahovém území NP Šumava cca 11 % (Čížková, 2018). Za posledních 20 let z důvodu podpory umělé výsadby buků vzrostl v polohách do 950 m n. m. z původních 4,2 % na 8,5 % (Kozel, 2021).

Z map, které vytvořila Černíková (2011) při výzkumu původní skladby lesa Šumavy, je zřejmé, že buk lesní byl původně v nižších polohách vždy zastoupen v rámci

smíšených lesů a byl často nejvíce dominantní dřevinou. Oproti tomu v současné době jsou vidět pouze malé ostrůvky lesů, kde by byl buk významněji obsažen (Obr. 1.).



Obr. 1 Porovnání současné situace bukového porostu a původního zastoupení buku na Šumavě

Zdroj: Černíková (2011)

2.3 Smrk ztepilý

Přírodně se smrk nachází nejčastěji ve výškách od 500 do 1000 m n. m. a vystupuje až k lesní hranici (cca 1350 m n. m.). Ojediněle sestupuje smrk i do nížin z důvodu klimatické inverze (Úradníček, Chmelař, 1998b).

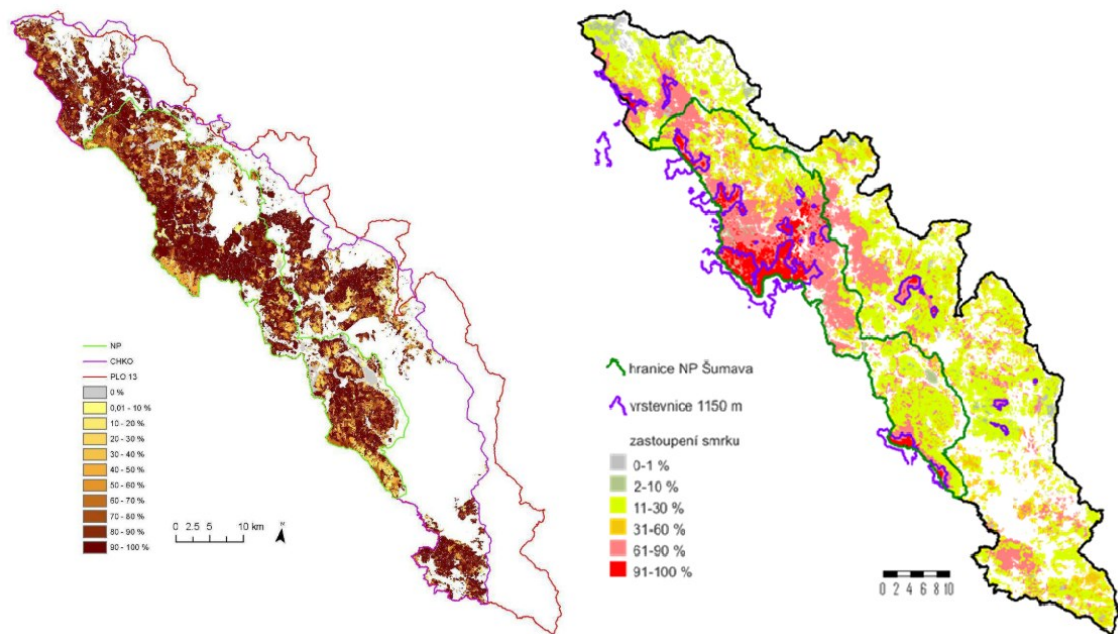
Vlivem hospodaření byl smrk v posledních 200 letech druhotně silně rozšířen nejen na Šumavě, ale prakticky všude ve střední Evropě. Nejprve zaujal místa smíšených lesů jedlobukových, kde byl původně jenom vtroušen, později došlo k pronikání smrku i do nižších poloh. Lesní kulturou byl smrk dále rozšiřován i na místa čistých bučin a dokonce doubrav, takže se již v první polovině 19. století stal hlavní dřevinou na území celé ČR. Poté svým rychlým růstem a technickými přednostmi nadále vytlačoval většinu původních dřevin, přičemž tento trend trvá dodnes. Z tohoto důvodu došlo k velkému rozvoji chorob a škůdců s následnými kalamitami velkého rozsahu (kůrovec, mniška) (Úradníček, Chmelař, 1998b).

Nové analýzy pylových zrn z Prášílského a Roklanského jezera ukazují, že na Šumavě v posledních 9 000 letech ve všech nadmořských výškách dominoval smrk (Čížková, 2008; Hubený, 2010). Přibližně před 4000 lety došlo k poklesu zastoupení na Šumavě z původních 80 % na 30–40 % z důvodu oteplení, avšak od této doby se opět rozšířil na hlavní dřevinu Šumavy. Smrk dokázal růst i v poměrně nehostinných podmínkách Šumavy jako jsou horské hřebeny nad 1200 m n. m. nebo například v mrazových kotlinách. (Hubený, 2010) Podle Josefa Nožičky (1972) byl smrk na Šumavě v horských lesích doplňován ve směsi s jedlí, bukem, jeřábem, jilmem, javorem a klenem. V pohorských oblastech byly lesy tvořeny smíšeně s jedlí, borovicí, bukem, dubem, habrem, břízou, lípou, osikou a olší.

Existují poměrně podrobné informace o rozšíření smrku v jednotlivých oblastech Šumavy. Například v lesích okolo Sušice byl smrk v roce 1828 zastoupen 71 % nebo v Kamenné Lhotě u Vimperka ve třicátých letech 20. století dominoval smrk pouze 50–60 %. (Hubený, 2010)

V současné době je smrk v NP Šumava zastoupen přibližně 79 % a v CHKO Šumava 71 %. Podíl smrku je velmi variabilní s nadmořskou výškou, do 600 m n. m. je smrku pouze 20 %, v nadmořské výšce do 1000 m je zastoupen 30 %, do 1200 m na 56 %, do 1300 m na 95 % (Hubený, 2010). Za posledních 20 let došlo k mírnému poklesu zastoupení smrku v šumavských lesích, z důvodu podpory umělé sadby jiných dřevin. Na celkovém území Šumavy pokleslo množství smrku přibližně o procento, avšak největší rozdíl je v nejvyšších nadmořských výškách lesa, kde z absolutní dominance klesl smrk přibližně na 70 %. (Kozel, 2021)

Na mapě (Obr. 2) je vidět odhad původního zastoupení smrku na Šumavě podle Matějky (2018), který vycházel z výzkumu Černíkové (2011) a taktéž i mapa současného zastoupení smrku (Černíková, 2011). Z mapy lze především vyčíst, že smrk původně dominoval spíše ve vyšších polohách a naopak v nižších polohách byl pouze zastoupen ve smíšených lesích. Nyní v místech, kde jsou k dispozici data, je evidentní, že smrk je majoritní dřevinou i v nižších polohách, kde je nyní na úkor jiných původních dřevin.



Obr. 2 Porovnání současné situace smrkového porostu a původního zastoupení smrku na Šumavě

Zdroj: Černíková (2011); Matějka (2018)

3 Vybrané faktory ovlivňující odtok v lesích

3.1 Srážky

Prvotním činitelem odtoku jsou vertikální srážky a jejich intenzita, přičemž je třeba uvažovat nad všemi typy srážek, včetně srážek pevného skupenství (Riedl, 1973). Zároveň se jedná o nejvýznamnější zdroj vody (Vavříček a Kučera, 2017). Srážky, které nejsou zachyceny intercepcí dopadají na samotný povrch lesních minerálních půd. Zde dochází k smáčení neboli k povrchové retenci, avšak podle Mingteha Changa (2013) k samotnému smáčení půdy je potřeba velmi malé množství vody, které nepřesahuje 1 mm srážek. Tyto srážky, které se dostaly až k samotné minerální půdě, se nazývají tzv. efektivní srážky a v průměru se jedná přibližně okolo 70–80 % objemu vody ze samotné srážkové události. (Chang, 2013)

3.2 Evapotranspirace

Evapotranspirace v lesní hydrologii představuje stěžejní oblast výzkumu s relativně dlouhou historií (Sun et al., 2016). Podle odhadů Trenbertha et al. (2009) je více než polovina veškeré sluneční energie, která je absorbována zemským povrchem využita k odpařování vody. Evapotranspirace je definována jako *“souhrn všech procesů, kterými se voda pohybuje z povrchu země do atmosféry odpařováním a transpirací. Evapotranspirace zahrnuje odpařování vody do atmosféry z povrchu půdy, odpařování z kapilární zóny a z vodních útvarů na pevnině. Evapotranspirace také zahrnuje transpiraci, což je pohyb vody z půdy do atmosféry prostřednictvím rostlin. Transpirace nastává, když rostliny zabírají kapalnou vodu z půdy a uvolňují vodní páru do vzduchu z listů”*. (U.S. Geological Survey, 2018)

Obecně evapotranspirace v lesích závisí kromě srážek také na stáří stromů a heterogenitě prostředí. Dalším faktorem je intenzita obhospodařování lesa, jeho prořezávání, které snižuje množství biomasy, a tím i intercepci a transpiraci korun stromů (Boggs et al., 2006; Sun et al., 2016). V rámci rozdílnosti zkoumaných druhů, tedy smrku ztepilého a buku lesního je důležité si uvědomit jejich kompletně rozdílnou stavbu a také fenologický vývoj v rámci roku, především vzhledem k opadavosti buku v mimovegetačním období.

V lesních povodích v České republice je evapotranspirace v průměru 510 ± 90 mm za rok, což se na vodní bilanci projevuje přibližně 60 % oproti průměrným ročním úhrnům (Hruška et al., 2021).

3.2.1 Transpirace

Hlavním mechanismem výdaje vody vegetace je transpirace. Jedná se o samovolné odpařování vody, popřípadě o vodu, která byla využita na stavbu dané rostliny. Globální syntetická studie uvádí, že transpirace představuje 61 ± 15 % celkové evapotranspirace a vrací do atmosféry přibližně 39 ± 10 % dopadajících srážek (Schlesinger a Jasechko, 2014).

Čím vlhčí období je, tím je větší výpar v lesích ve srovnání s jinými typy krajiny, například polem. Dokonce ve velmi suchých obdobích může být transpirace vyšší u polí než u lesa. (Riedl, 1973)

Samotnými rozdíly v transpiraci mezi smrkovými a bukovými porosty se zabývalo několik výzkumů, ať už v České republice, tak především v zahraničí. Například Rötzer et al. (2017) nepřímými metodami simulovali transpiraci za období mezi lety 1998 až 2013, přičemž u smrku byla stanovena průměrná roční transpirace 403 mm, kdežto u buku pouze 324 mm. Naopak hodnoty pouze ve vegetačním období jsou podle Kučery a Šrámka (2022) opačné. Z měření průtoků vody v kmenech a následného přepočítání na počet stromů na stanovené ploše došli k výsledkům, že výsledná transpirace v bučině je v roce 2021 v období od května do srpna 303 mm a v roce 2022 ve stejném období 293 mm. Tyto hodnoty jsou přibližně poloviční, než byla stanovena potenciální evapotranspirace. Oproti tomu ve smrkovém porostu ve stejných obdobích byla suma transpirace v roce 2021 138 mm a v roce 2022 pouze 54 mm, což při porovnání s potenciální evapotranspirací je pouze 24 % a v roce 2022 vlivem sucha dokonce pouze 9 %.

3.2.2 Evaporace

K výdajovým složkám vodní bilance patří kromě transpirace také evaporace (Kantor, 1987), jakožto výpar vody z půdy. (ČHMÚ, 2023)

Podle Kantora je evaporace z půdy v lesích v rámci celkové vodní bilance velmi nízká, přibližně se podílí 2 % na celkových atmosférických srážkách a nabývá hodnot

do 0,5 mm za den (Kantor, 1990). Evaporace ze sněhu se pohybuje od 4 % do 8 % a v nižších polohách je vyšší než na horách. (Špulák, 2023)

Dle měření Riedla (1973) je výpar jak z bukového, tak i ze smrkového porostu shodný, konkrétně 0,7 mm za den. Nízký výpar je umocňován existencí hrabanky, která značně zmenšuje evaporaci v lese (Pobědinskij a Krečmer, 1984). Vyšší hodnoty jsou pouze u buku na začátku a na konci vegetačního období, kdy na lesní půdu prostupuje z důvodu neolistěných porostů větší množství slunečního záření. (Kantor, 1987) U evaporace z půdy ze smrkových a bukových porostů nejsou příliš velké rozdíly a její význam ve vodní bilanci lesů má především ve vegetačním období (Peřina, 1973; Kantor, 1987).

Naopak Floriancic et al. (2023) poukazují na skutečnost, že napadané listí a popřípadě i samotná hrabanka sice chrání hlubší vrstvy půdy před vysušením, avšak zároveň tato horní vrstva sama o sobě zachytává relativně velký objem vody, který se následně vypařuje. Zjistili, že bukový opad i smrková hrabanka mohou zachytit okolo 20 % ročních srážek, přičemž odhadují, že většina tohoto objemu vody se odpaří a jen malá část se infiltuje do hlubších vrstev půdy.

3.2.3 Intercepce

Část srážek je nevyhnutelně zachycena korunami stromů a nadzemní částí rostlin a nepronikne k půdě. Tomuto jevu, při kterém dochází k nemalému množství zachycení vody se říká intercepce. (Riedl, 1973)

Podle Changa (2013) přibližně 10–25 % ročních srážek se ztratí intercepací z korun stromů. Při jednotlivých srážkových událostech se však musí brát zřetel na intenzitu a dobu trvání deště, jelikož koruna stromů nejdříve zachytí relativně velké množství vody, avšak jen do doby naplnění kapacity koruny stromu. Odhaduje se však, že málo vydatné atmosférické srážky do 2 až 5 mm, zachytí kompletně právě koruny stromů (Veselý, 1957; Šrámek a Fadrhonsová, 2023). Velkou schopnost zachytit srážky nemají jen samotné koruny stromů, ale i nižší rostliny (v českých podmínkách například borůvčí), případně také mechy. (Šrámek a Fadrhonsová, 2023)

Intenzitou intercepce v lesích se zabýval již v roce 1911 Robert E. Horton, kdy zjistil, že větší hodnoty nabývají jehličnaté lesy nad lesy listnatými. (Sun et al., 2016)

V rámci roku se intercepční ztráty velmi liší, především u buku jsou hodnoty v zimních obdobích oproti letním měsícům menší (Kantor, 1983), z tohoto důvodu je průměrná výška sněhu v listnatých porostech vyšší (Pelíšek, 1964).

Avšak podle Tužinského (2000) v letních měsících je intercepce obdobná, dokonce o přibližně 8 % buk lesní zadrží více vody než smrk ztepilý. Výzkumem rozdílů intercepce mezi bukem a smrkem se zabývali také Rötzer et al. (2017), kteří za pomoci modelů s několikaletými daty přišli s výsledkem, že celková roční intercepce v smrkovém porostu je vyšší (142 mm), než v bukovém porostu (62 mm).

Na českém území se od 70. let problematikou intercepčních ztrát v lesích zabýval Petr Kantor. Zjistil, že podkorunové srážky se v relativních hodnotách mezi bukovými a smrkovými porosty příliš neliší. Zásadní rozdíl však vyšel u stoku po kmeni, jelikož u smrku byl zanedbatelný a tvořil 1,4 % ročních atmosférických srážek, naproti tomu u buku představuje stok významnou složku ve vodním režimu lesa, protože po kmeni stéká 15,3 % srážek. (Kantor, 1981) Toto je především z důvodu hladké kůry a tvarem korunových větví, které se sbíhají k sobě a tvoří přirozené “trychtýře” (Šrámek, Fadrhonsová, 2023). Výsledkem výzkumu bylo stanovení celkové intercepce, která vyšla u smrku 15,6 %, kdežto u buku 5,2 %. (Kantor, 1981).

Oproti tomu Šrámek a Fadrhonsová (2023) pomocí rešerše evropských studií zjistili, že intercepce smrku i buku mohou být daleko vyšší a stanovili střední hodnotu intercepce u smrku 34 % a u buku 23 %, avšak poukazují i na velkou variabilitu různých výsledků.

3.4. Infiltrace

Dalším důležitým prvkem ovlivňujícím odtok v lesích je půda a její schopnost infiltrace vody. Infiltrace závisí především na pórovitosti a povaze minerálních a organických substancí. (Kravka et al., 2009)

Lesní půdy se vyznačují specifickou skladbou, kdy na povrchu se nachází hrabanka a pod ní je vrstva nashromážděného humusu. Pro tyto dvě části půdního profilu je typická vysoká infiltrační kapacita. Pod tímto horizontem se většinou nachází horizont B, ve kterém jsou makropóry vytvořeny kořenovou činností a půda je tedy poměrně provzdušněná (Krečmer et al., 2003). Oproti podpovrchovým půdním horizontům má tato

vrstva značnou infiltrační a protierozní schopnost. Nicméně i v této části půdy může docházet k laterárnímu proudění nazývané jako „biomat flow“ (Sidle et al., 2007).

Půdy v lesích mají oproti zemědělským půdám několikanásobně vyšší infiltrační kapacitu (Krečmer et al., 2003), především z důvodu velké hydraulické vodivosti (Williams, 2016), která je v lesních půdách až o tři řády vyšší, než u zemědělské půdy (Skaggs et al., 2011) Dalším důvodem je také velký počet pórů nejrůznějších velikostí – od mikropórů, přes kořenové tunely až zvířecí nory (Chang 2013; Poběnski a Krečmer, 1984). Díky těmto větším pórům vznikají preferenční cesty, které usnadňují samotné proudění. (Williams, 2016) Z tohoto důvodu probíhá poměrně snadný vsak vody do hlubších vrstev půdy a díky tomu se tvoří podpovrchový odtok, který je důležitou složkou celkového odtoku v lesích. Malý podpovrchový odtok podporuje skutečnost, že v českých lesích je často málo propustné horninové prostředí, které znesnadňuje průsak vody do hlubších vrstev (Poběnski a Krečmer, 1984). Podle Krečmera et al. (2003) se podpovrchový odtok podílí na celkovém odtoku v lesích až 40 % a významně tak transformuje srážkotvorné procesy, jelikož je až 500x pomalejší než rychlost povrchového odtoku (Krečmer et al., 2003). Rozdíly půdního vsaku neboli infiltrace byla experimentálně testována například v jedlobučině, kdy 500 cm³ vody se vsakovalo 72 vteřin, ve smrkovém porostu se voda vsakovala podobně rychle, avšak například na lesních loukách se poloviční množství vody vsakovalo 10800 vteřin (Riedl, 1973)

Gravitační a kapilární síly způsobují, že rychlost samotné infiltrace je na začátku srážkové události vysoká. Jak se však póry plní vodou, zvýšení obsahu vody v půdě způsobuje pokles deficitu vody. Tato rychlost tudíž postupně klesá a to až do fáze, kdy se sníží na konstantní hodnotu, *“při které se rychlost infiltrace rovná rychlosti odtoku vody z půdního profilu gravitačním působením”* (Chang, 2013, s. 219).

Pokud jsou makropóry spojeny s navětralým podložím horniny, tak prostředí umožňuje průsak do hlubších vrstev a srážková voda odtéká ve formě základního odtoku, který následně vychází na povrch pramennými vývěry (Krečmer et al., 2003). Těmto průsakům ať už ve vertikálním či horizontálním směru se říká perkolace.

3.5 Vlhkost

Vlhkost půdy vyjadřuje obsah vody v půdě. Je to dynamická veličina, která závisí nejen na počasí, ale i na stavu půdy. Čím méně půda obsahuje vody, tím většími silami je tato

zbylá voda v půdě vázána. Což znamená, že půda s nižší vlhkostí snáze může zadržet více vody než půda s již vyšší vlhkostí. (Vavříček a Kučera, 2017)

Vlhkost nadložního humusu neboli hrabanky se v rámci roku mění. Na jaře je nadložní humus obvykle více vlhký. Poté vlhkost vlivem výdaje na evapotranspiraci klesá a v létě bývá nejnižší a jeho zadržovací schopnost je tedy naopak nejvyšší. (Poběnskiĳ a Krečmer, 1984) Podle Jačky et al. (2022) dochází k významnému rozdílu vlhkostních režimů povrchových horizontů půdy smrku a buku. U porostu smrku oproti buku lze pozorovat nižší hodnoty půdní vlhkosti, kde je i daleko rychlejší pokles půdní vlhkosti v období beze srážek. Taktéž Pelíšek (1964) uvádí, že v půdách v listnatých lesích je obecně vyšší půdní vlhkost nežli v lesích jehličnatých. Toto souhlasí i s řadou jiných výzkumů (Kostić al., 2012; Cassagne, 2004), kdy byla nejsvrchnější vrstva půdy ve smrku sušší než v bukovém porostu, oproti tomu v hlubších vrstvách (cca od 10 cm) se tyto rozdíly vyrovnávaly. V bukové lesní půdě se dokonce několikrát vyskytl přebytek vody, může ukazovat na určité doplňování podzemní vody. Ve smrkové lesní půdě se takovýto nadbytek vody nevyskytoval (Nihlgård, 1971).

3.6 Formování odtoku

Povrchový odtok vzniká v případě, pokud je množství efektivní srážky vyšší než intenzita infiltrace. V tomto případě tedy voda, která se již nedokáže infiltrovat buď odečte, popřípadě setrvá nashromážděna v bezodtokové depresi. (Kravka et al., 2009) Podle Williamse (2016) ve většině případů vzniku povrchového odtoku musí být celý půdní profil nasycen. Tento odtok nastává při velkých přivalových deštích a se značným zpožděním od počátku dané srážkové události (Riedl, 1973).

Specifikem lesních půd je existence nadložního humusu. Kromě již zmíněné velké infiltrační kapacity této vrstvy se tato vrstva projevuje jako ochrana před promrznutím půdy a hrabanka tedy udržuje pórovitost a schopnost vsakovat půdu i v podmínkách, kdy např. zemědělská půda je již zamrzlá. Nejméně v lesích promrzá půda v listnatých, popř. smíšených porostech (Poběnskiĳ a Krečmer, 1984). I když v lese i na jiných místech krajiny začíná tát sníh ve stejnou dobu, intenzita tání je daleko menší a jeho trvání je delší. Díky tomu se voda snadněji vsakuje a stává se součástí podpovrchového odtoku, a to především v době, kdy rozmrzá i samotná půda. Oproti tomu na začátku tání, kdy je půda zamrzlá, se voda stává spíše součástí povrchového odtoku. (Riedl, 1973) Samotná intenzita tání sněhu se liší v jehličnatých a listnatých

porostech, kdy sníh taje intenzivněji v listnatých než ve jehličnatých lesích, ve kterých dochází k většímu stínění povrchu půdy. (Špulák, 2023)

Avšak součástí povrchového toku v lesích může být i voda, která již byla dříve infiltrována, jelikož tato podpovrchová voda může pod povrchem téct bočním směrem domíst, kde se již povrchový tok nachází. (Chang, 2013)

Podle Williamse (2016) je však povrchový odtok v zalesněných povodích relativně malý a je z velké části generován právě podpovrchovou vodou.

Les má také velmi důležitou funkci ve vyrovnávání průtoků, snižuje rozkolísanost v daném povodí a ovlivňuje tak odtokové poměry (Pelíšek, 1964). Dle Veselého (1957) například odtok velkých jarních vod z území lesa začíná až o 10–15 dní později než v bezlesích oblastech. Kulminační průtoky při povodních dokáží lesy snížit oproti zemědělské půdě na polovinu a naopak, v době sucha retenční schopnost lesních půd zajišťuje vyšší trvalý odtok z lesa oproti zemědělské půdě (Černohous a Šach, 2023) a dokáže pomáhat dotovat dané povodí i několik let (Veselý, 1957). To má za následek, že minimální průtoky jsou vyšší v lesnatých oblastech než v oblastech s minimem lesní krajiny. (Černohous a Šach, 2023)

3.7 Vliv druhové přeměny lesa na vlastnosti půdy

I přes relativně rozsáhlé zkoumání odtoku v lesích je poměrně málo poznatků o tom, jakým způsobem ovlivňují jednotlivé druhy stromů samotný odtok a čím jsou tyto odlišnosti způsobeny. (Jost et al., 2012)

Jednotlivé druhy stromů mají různé vlivy na lesní půdu. Primárním rozdílem sledovaných druhů stromů je jejich opad, jelikož právě opad z listnatých lesů bývá v lesích největším zdrojem organické hmoty v půdě. (Kostić et al., 2012) Intenzita rozkladu listového opadu je ovlivněna řadou podmínek, jako například strukturou společenstva rozkladačů nebo i samotným prostředím a jeho podmínkami (Berg a McClaugherty, 2008). V bukových porostech je forma nadložního humusu tvořena typem mul (Rothe et al., 2002), který je charakteristický dobře vyvinutým humózním horizontem a díky velmi intenzivní činnosti zooedafonu zde probíhá rychlý rozklad organické hmoty. (Němeček, 2023)

Kvůli špatnému rozkladu dochází ve smrkovém lese oproti původnímu bukovému lesu k hromadění vyšší hmotnosti lesní půdy než u přirozených smíšených, popř.

bukových lesů. Podle Ivan Perkoviće et al. (2019) jsou půdy ve smrkovém porostu v průměru o 30 % těžší. Pro smrkové lesy je typickým znakem nadložní humus typu mor, popřípadě moder. (Rothe et al., 2002) Tyto typy se vyznačují nepříznivými podmínkami pro rozklad a transformaci humusu. Na rozkladu se podílejí spíše houby a plísně, jelikož přítomnost, a tedy i činnost zoedafonu je značně omezena. (Němeček, 2023). Specifikací smrku je také jeho slabá penetrační energie, kdy se neprokořeňuje do hlubších minerálních horizontů, a tak neovlivňuje tolik ukládání a výměnu živin tak jako například buk. (Berger et al., 2000)

Avšak je vždy nutné brát v potaz, že právě tyto smrkové monokultury nejsou původním porostem a tím pádem půda vznikala v průběhu času v různých podmínkách. Tímto vývojem se zabývalo mnoho autorů (Perković et al., 2019; Cessagne et al., 2004; Kostić et al., 2012; Gauquelin et al., 1996; Nihlgård, 1971), kteří zkoumali pedologický vliv smrkového porostu, který byl vysazen v původních smíšených, případně bukových lesích. Dále je ale nutné si uvědomit, že i původní bukové lesy častokrát vznikly i nezalesněných územích, ať už přirozeně, či lidskou činností, takže půda se historicky vyvíjela pod různými vlivy a podmínkami. (Gauquelin et al., 1996)

Již s první generací smrku se tvoří hrabanka, která má kyselé pH (Nihlgård, 1971), přičemž se kyselost nadále přenáší i do půdních horizontů (Kostić et al., 2012). Hlavním důvodem kyselosti je, že smrková hrabanka obsahuje velké množství kyselých kationtů, (Rothe et al., 2002) a z tohoto důvodu se rozkládá velmi pomalu (Berger et al., 2008).

Co se týče hodnot organické hmoty lze říct, že u bukového porostu jsou vyšší hodnoty dusíku (Nihlgård, 1971; Perković et al., 2019), než u smrkového porostu. Vyšší obsah dusíku obecně naznačuje vyšší kvalitu listového opadu a rychlejší produkci humusu (Perković et al., 2019). Oproti tomu hodnoty uhlíku jsou vyšší u smrkového porostu. (Heil et al., 2020) Důležitým faktorem je však indikátor C/N, tedy hmotnostní poměr uhlíku a dusíku, obecně lze říci, že ve smrkových lesích nabývá C/N vyšších hodnot (Nihlgård, 1971; Perković et al., 2019), přičemž s hloubkou jak v bukovém, tak i smrkovém porostu tento poměr klesá. (Perković et al., 2019)

Ve smrkovém porostu, který není často prořezáván zcela chybí bylinné patro. Důvodem jsou nejen horší světelné podmínky (Kostić et al., 2012), ale i z důvodu pomalého rozkladu smrkového opadu, který brání klíčení bylin, (Sydes a Grime, 1981) případně i kvůli mělkému kořenovému systému, který ovlivňuje podzemní konkurenci

o vodu a živiny (Falinski a Falinska, 1986). Oproti tomu v dobře prořezávaném smrkovém lese se přízemní vegetace příliš neliší od vegetace listnatých lesů (Hill, 1987).

4 Případové studie

Od začátku dvacátého století probíhaly experimenty, které dokazovaly, že odtok z lesní půdy ve srovnání s jinými typy půdy se vyznačuje mnoha specifiky. (Schume et al., 2003) Jak již bylo naznačeno v předešlých kapitolách, stěžejní vliv na odtok v lesích s různou druhovou skladbou je odlišná evapotranspirace, která se v buku i smrku poměrně liší.

V tuzemsku se věnoval rozdílu povrchového odtoku mezi bukovým a smrkovým lesem Ladislav Tužinský. Ten potvrzuje díky svým experimentům velmi dobrou retenční schopnost lesních půd, přičemž hodnoty povrchového odtoku nikdy nepřesáhly 4 mm, což představuje méně než 1 % z celkového úhrnu srážek. I přes tyto velmi nízké hodnoty je však zřejmé, že povrchový odtok z bukového porostu je v průměru o něco vyšší než ve smrkovém porostu. Ve smrkových lesích se povrchový odtok pohyboval v průměru okolo 1,4 mm, kdežto v bukovém lese v průměru 2,1 mm. (Tužinský, 2000; 2002)

Avšak opačné hodnoty získal výzkum Kantora et al. (2011) v Orlických horách, kteří sice taktéž uvádí nepodstatnost povrchového odtoku, avšak u smrku stanovil povrchový odtok na 1,2 % v rámci celkovému úhrnu srážek a u buku pouze 0,5 %. Kromě toho se věnuje i půdnímu odtoku, avšak podle autora je tato složka zcela bezvýznamná a tvoří ji jen 0,1–0,2 % srážek.

Co se týče Šumavy, tak zde byl proveden výzkum Kulasové et al. (2019), při kterém se uměle zavlažovalo pět dní experimentální území ve smíšeném lese, přičemž se vždy skrápělo o intenzitě do 10 mm/10 min a pouze několik hodin v rámci každého dne. I když byl vybudován mechanismus dvou odvodňovacích plechů z půdního profilu (v hloubkách 20 a 50 cm), tak zde za celou dobu experimentu neodtekla žádná voda. Oproti tomu vlhkost reagovala vždy téměř okamžitě po každém skrápění. Autoři zdůvodňují absenci odtoku vyšší přítomností preferenčních cest a tedy u větší propustnosti půdy.

V rámci podpovrchového odtoku bylo provedeno mnoho experimentů, které se zabývaly odlišnostmi mezi porosty a jsou zároveň zkoumány i v této práci. Metodikou

vycházejí především z knihy “Hillslope Hydrology” (Kirkby, 1978), konkrétně z kapitoly “Techniques for measuring subsurface flow on hillslopes”.

První nalezený experiment zkoušeli již v roce 1997 Holzmann a Sereining (1997). Vybrali dvě alpské lokality, přičemž jedna byla porostlá smrkovou monokulturou a druhá smíšeným, především listnatým lesem s převažujícím bukovým porostem. Zároveň obě tyto lokality byly tvořeny svahem se sklonem 35–40 %. Na obou místech byla vyhloubena podlouhlá jáma až do hloubky 160 cm, kde již začíná skalní podloží. V této jámě byly zasunuty do čelní stěny ve třech hloubkách plechy (20, 110 a 160 cm). Tyto plechy tvoří žlaby, které následně odvádějí podpovrchový tok do kontejnerů. Na jedné lokalitě byly v těchto kontejnerech tlakové sondy, které měly měřit kontinuálně množství vody, avšak na druhé byly tyto kontejnery sledovány 1x až 2x týdně a byla zde měřena naakumulovaná voda. Z tohoto důvodu nebylo možné sledovat a porovnávat jednotlivé srážkové události mezi jednotlivými stanovišti.

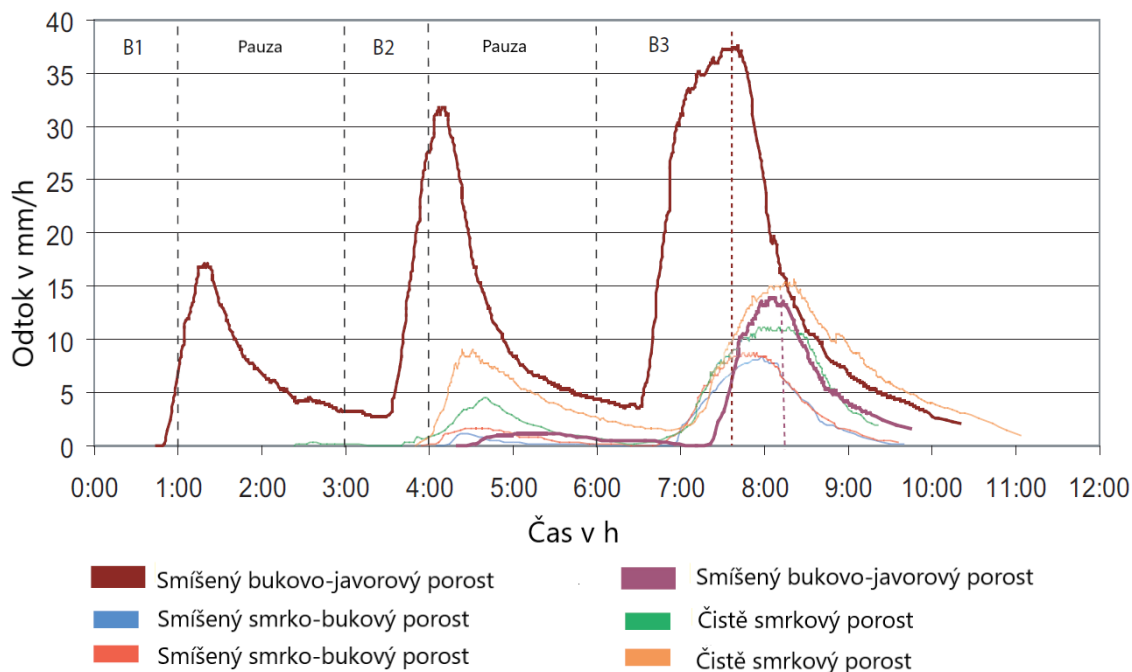
U obou typů lesa dominoval odtok z prvních 20 cm (70 %). Z plechu, který byl zabudován v hloubce 110 cm vytékalo 20 % z celkového množství odtoku a nejhlubší vrstva se podílela na odtoku pouze 10 %. U obou lokalit nebyl pozorován povrchový odtok. V jehličnatém lese bylo celkově zachyceno 260 litrů za celou dobu měření, kdežto u smíšeného lesa pouze 210 litrů. Podobně jako u experimentu Jost a Weiler (2006) i zde byl proveden experiment umělého zavlažování. Na obou stanovištích se zavlažovalo tři hodiny, přičemž první dvě hodiny o intenzitě 60 mm/h a poslední hodinu o intenzitě 100 mm/h. Ve smíšeném lese se podařilo zachytit pouze 1,2 % závlahové vody a v jehličnaté lokalitě bylo zachyceno 8 % srážek.

Dalším obdobným výzkumem se zabývali Jost a Weiler (2006), kteří následně publikovali tento experiment v roce 2012 (Jost et al., 2012). Ve svazích bukového i smrkového lesa byl simulován silný déšť, kdy malé území bylo jednu hodinu intenzivně skráceno vodou, aby se dosáhlo fiktivní srážky 60 až 100 mm/hod. I přes takto intenzivní fiktivní srážkovou událost se veškerá voda infiltrovala nezávisle na vegetačním krytu. Hlavním rozdílem bylo, že ve smrkovém porostu se většina vody transportovala v horní vrstvě půdy, která byla v rámci experimentu ohraničena plechem v hloubce 40 cm. Oproti tomu odtok v buku zasahoval až do hloubky 80 cm, kde se nacházel další odvodňovací plech. Ve smrkovém porostu byly v průběhu experimentu veškeré póry vyplněny vodou, kdežto u bukového porostu v jeho svrchní vrstvě póry zdaleka nedosahovaly své maximální kapacity.

V rámci celkového odtoku ze smrkového porostu odtekla v celém měřeném profilu přibližně čtvrtina celkového množství skrápěné vody, oproti tomu u buku tomu bylo až dvojnásobek, tedy přibližně polovina simulovaného deště. Autoři tohoto experimentu rozdíl přisuzují především hlubším kořenovým systémům u buku, který má zároveň vyšší biogenní aktivitu a vytváří účinný systém preferenčních cest, které efektivně odvádí srážkovou vodu. (Jost a Weiler; 2006)

Umělé intenzivní zavlažování v lesích s různým porostem provedli i Nordmann et al. (2009). Vybrali celkově šest svahů (20–31 %) s různou vegetací, avšak především porosty, kde dominoval smrk nebo porosty smíšené, kde byl zastoupen i buk. Tato experimentální území byla vystavena intenzivním umělým dešťovým srážkám po dobu jedné hodiny s intenzitou 50 mm/h, poté byla provedena dvouhodinová pauza a následně opět skrápěli se shodnou intenzitou a pauzou. Tyto cykly opakovali celkově třikrát.

Na následujícím grafu (Obr. 3.) se zcela vymyká bukovo-javorový porost. Na jednom pozorovaném území již po první simulované srážce odtékalo značné množství vody, což oproti jiným porostům bylo zcela unikátní. Oproti tomu druhý bukovo-javorový porost měl ze všech míst nejpozdější odezvu a odtok se projevil až po třetí závlaze. Co se týče smrkových porostů, tak lze říci, že na srážky reagovaly daleko dříve, konkrétně již po druhém skrápění, než v smíšených smrko-bukových porostech. Autoři tedy došli k tvrzení, že z experimentu je zaznamenán druhově podmíněný trend retence vody, kdy je zřejmé, že vyšší míra retence vody je v půdách pod smíšenými lesy, kde jsou přítomny listnaté stromy, než pod čistě smrkovými porosty.



Obr. 3 Podpovrchový odtok z různých porostů

Zdroj: Nordmann et al. (2009)

Při výzkumu Marco Hümanna et al. (2011) proběhlo velké množství podobných experimentů na několika profilech a lokalitách, a to včetně v bukovém a smrkovém porostu. Oproti ostatním experimentům vybrali pro výzkum území s daleko nižším sklonem svahu, tedy okolo 10 %. Taktéž intenzita zavlažování byla oproti jiným článkům odlišná, autoři simulovali tři dny po sobě jdoucí srážky. Každý den byly provedeny čtyři 15minutové intervaly zavlažování natolik intenzivní, aby se docílilo v každém intervalu 10 mm srážky.

I když byl v tomto experimentu kladen důraz na jiné téma, konkrétně vliv porostu na povodně, tak jsou z článku zřejmé rozdíly mezi zkoumanými dřevinami. Autoři demonstrovali tyto odlišnosti na odtokovém součiniteli z experimentálních území, které skrápěli. U buku se odtokový součinitel pohyboval mezi 0,2–3,7 % a u smrku na jedné lokalitě byl odtokový součinitel 0,6 % a u druhého 0 %. Autoři tyto velmi nízké hodnoty přisuzují velké infiltrační schopnosti.

U nižších a středních srážkových událostí je v bukových lesích podpovrchový odtok rychlejší a má vyšší odtokovou odezvu než má smrkový les. Naopak u extrémně intenzivních srážek smrkové lesy pravděpodobně způsobí rychlejší odtokovou odezvu

ve srovnání s bukovými, protože smrk je náchylnější k nadměrnému nasycení půdy (Johnson et al., 2011).

5 Charakteristika území

Výzkum byl prováděn v CHKO Šumava v experimentálním povodí Liz, které je součástí povodí Volyňky. Místní stanice byla uvedena do provozu v roce 1975 Ústavem pro hydrodynamiku Akademie věd České republiky a jeho primárním účelem je hydrologický výzkum. Povodí Liz je součástí celostátní sítě GEOMON a taktéž i celoevropské sítě experimentálních povodí ERB (Tesař a Šír, 2013).


5.1 Morfologie území

Povodí se rozkládá na ploše 0,99 km² v CHKO Šumava, přibližně 3 km od hranice národního parku. Povodí Lizu se nachází ve Vimperské vrchovině, která je součástí Šumavského podhůří. Průměrná nadmořská výška tohoto povodí je 912,5 m n. m., přičemž nejvyšší bod je vrchol Na Dědku, ležící v nadmořské výšce 1074 m n.m. a nejnižší 828 m n. m. Průměrná sklonitost povodí je 16,6 % (Pražák et al., 1994)

5.2 Pedologie území


Půdní typ je dán půdotvornými faktory a lze jej klasifikovat jako středně hluboký písčitohlinitý podzol, případně dystrická kambizem (Šípek a Tesař, 2015; Tesař, 2006). Tato půda, která má zároveň lehčí zrnitost, díky svým vlastnostem propustí větší množství srážek, takže nedochází k oglejení. Jelikož se povodí nachází podél zalesněného svahu, má půda vyšší hydraulickou vodivost a v nasyceném stavu je od 200 do 350 mm/h. Z tohoto důvodu byl povrchový odtok pozorován jen velmi zřídka a vznikal pouze při extrémních srážkových úhrnech. (Šípek a Tesař, 2015)

V povodí Liz byly v roce 2019 pořádány Půdoznalecké dny a rámci exkurzního průvodce byly popsány půdní profily v smrkovém i bukovém porostu. Tyto profily jsou zachyceny a popsány autory v Tab.1 a Tab. 2 (Fiala et al., 2019).

| | označení | mocnost (cm) | popis |
|--|--|--------------|---|
|  | L | 14 - 10 | opadanka |
| | F _{noz} mykogenní hor. drti | 10 - 6 | světle hnědý, fibrický, vrstevnatý, filcovitý, rostlinné zbytky mycelia hub, hladký přechod do H |
| | F _{zo} zoogenní hor. drti | 6 - 3 | tmavý, mesický, drobný, kyprý/křemovitý, exkrementy, zbytky kořenů |
| | H | 3 - 0 | černý, humický, drobtovitý, sypký/křemovitý, ostrý přechod do Ah (< 3mm) |
| | Ah | 0 - 13 | 10 YR 6/4, světle žlutavě hnědá, hlinitopísčítá, drobtovitá až hrudkovitá, drobná, kyprá |
| | B _v | 13 - 30 | 7,5 YR 5/6 (rezavě hnědá), písčitohlinitá, drobtovitá, hrudkovitá, drobně hranolovitá polyedrická, drobná, kyprá. |
| | B _v C | 30 - 45 | 5 YR 4/6, (rezavě hnědá) hlinitopísčítá, hrudkovitá, soudržná |
| | IIC | 45 - 75 | 10 YR 5/3; 2,5 Y 4/6; matně žlutavě hnědá, olivově hnědá, písčítá, drobně hranolovitá, soudržná, ulehlá |

Tab. 1 Smrkový půdní horizont

Zdroj: Fiala et al. (2019)

| | horizont | mocnost | popis |
|---|-------------------------------|------------------|--|
|  | L | 10 – 6,5 (cm) | převážně bukový opad |
| | F | 6,5 - 4 | různá stadia rozložených listů, mycelia, vrstevnatý, fibrický |
| | H | 4 - 0 | tmavohnědý, filcovitý, shluky, vespod vrstva černý, humický |
| | A _h | 0 - 10 | 10 YR 3/3 tmavohnědá vespod světlejší písčitohlinitá, drobtovitá, hrudkovitá, kyprá |
| | B _{vs} | 10 - 35 | 7,5YR 5/6, rezavě hnědá, hlinitopísčitá, drobtovitá, hrudkovitá, kyprá |
| | B _v | 35 - 50 | 10YR 6/4, světle žlutavě hnědá, hlinitopísčitá, drobtovitá, soudržná |
| | B _v C ₁ | 50 - 60 | 10YR 5/2 šedavě až žlutavě hnědá, písčitohlinitá, drobně hranolovitá, soudržná/vazká |
| | B _v C ₂ | 60 – 72 | 10YR 4/2, šedavě až žlutavě hnědá, písčitohlinitá, středně až hrubě hranolovitá, soudržná/vazká |
| | IIC | 72 - 85 | 2,5Y 6/1, žlutavě šedá, 2,5Y 4/6 olivově hnědá, písčitohlinitá, hrubě hranolovitá, soudržná/vazká |

Tab. 2 Bukový půdní horizont

Zdroj: Fiala et al. (2019)

5.3 Vegetace území

Povodí je plně pokryto kyselým smrko-bukovým lesem. Většinu stromů je okolo 100 let s výškou asi 28 m a průměrem kmene okolo 40 cm. (Votrubová et al., 2017) Podle Pražáka et al. (1994) je v povodí Lizu smrkového porostu 86,4 % a bukového 6,18 %. Ostatní dřeviny jsou přítomny do 2 % (modřín, jedle, borovice). Avšak z dat potenciální přirozené vegetace (CENIA) jsou pro toto povodí přirozené bučiny.

5.4 Geologické poměry

Povodí Liz je součástí Českého masivu, konkrétně metamorfovaného komplexu – moldanubického masivu. Geologická stavba je tvořena metamorfovanými horninami, především migmatizovanými biotitickými pararulami a kvarcitem. Tyto horniny jsou hodně prostoupeny žilami pegmatitů a aplidů a objevuje se zde i žíla žulového porfyru. (Škoda a Pálenský, 2004) V nivních částech povodí jsou tyto horniny překryty nevápnitými uloženinami, případně i svahovinami čtvrtohorního stáří. (Tesař, 2006) Tento soubor hornin tvoří hydrogeologický masiv, jehož významným kolektorem je přípovrchová zóna rozpukání a je charakteristická průlinovo-puklinovou porozitou. Hladina podzemní vody se vyskytuje v hloubkách od 80 cm do několika metrů pod povrchem půdy (Sněhota et al., 2009).

5.5 Klimatické poměry

Dle mapy Quittovi klasifikace podnebí se povodí Lizu nachází na pomezí oblastí CH6 a CH7. Tyto chladné oblasti jsou charakteristické dlouhým a relativně chladným jarem. Oproti tomu léto je zde krátké, vlhké, chladné a počet letních dní se pohybuje od 10 do 30 dní v roce. Podzim je dlouhý, mírně chladný a zima je taktéž dlouhá, vlhká a s dlouhým trváním sněhové pokrývky. Počet dní s mrazem se v rámci jednoho roku pohybuje okolo 140 až 160 dní.

Průměrný úhrn srážek na tomto místě je 851 mm/rok. Průměrná měsíční teplota se pohybuje od $-3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ v lednu do $13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ v červenci a celková průměrná roční teplota činí $6,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Šípek a Tesař, 2015).

5.6 Hydrologické poměry

Území experimentálního mikropovodí Lizu se nachází v povodí IV. řádu Zdíkovského potoka, který má celkovou rozlohou $17,6\text{ km}^2$. Rozloha povodí Lizu činí $0,99\text{ km}^2$ a je zde $2,28\text{ km}$ vodních toků, přičemž údolnice má délku $1,45\text{ km}$ (Tesař a Šír, 2013). Podle dlouhodobé vodní bilance se zde skutečná roční evapotranspirace pohybuje kolem 500 mm/rok . (Šípek a Tesař 2015)

Zdíkovský potok je přítokem Volyňky, která je jedním z hlavních přítoků Otavy. V oblasti Zdíkovského potoka je relativně vysoká hustota říční sítě ($0,8\text{--}1,2\text{ km/km}^2$), což znamená, že v rámci tohoto povodí je vyšší povrchový odtok.

6 Metodika experimentu

Experimentální část diplomové práce je založena na sledování rozdílů v tvorbě mělkého podpovrchového odtoku v lokalitách se smrkovým a bukovým porostem. Experimentální práce byly rozděleny na dvě části. První zahrnuje odtokové epizody, kdy pozorovaný odtok byl způsoben výhradně přirozenou srážkou. V druhé části došlo k umělému zadeštění sledovaných ploch dešti o dvou různých intenzitách, které byly vyšší než většina pozorovaných přirozených srážek.

Experiment probíhal v povodí Liz, v místě, kde má Ústav pro hydrodynamiku AV ČR své stanice, přičemž jedna se nachází v bukovém porostu a druhá ve smrkovém. Samotné počátky přípravy začaly na podzim roku 2022. Pro experiment byla zvolena metodika inspirovaná z článku od autorů Jost et al. (2012), kteří naopak nejspíše čerpali postupy z knihy “Hillslope Hydrology” (Kirkyby, 1978). Nejdříve bylo nutné vybrat konkrétní místa v bukovém lese a ve smrkové monokultuře. Především byl kladen důraz na podobnost těchto dvou území, jejich obdobný sklon, množství stromů a celkovou proveditelnost výkopových prací. Zároveň tyto plochy musí být v blízkosti samotných oplocených výzkumných stanic ve vzdálenosti několika metrů tak, aby bylo možné následné propojení přítomného dataloggeru datovým kabelem přímo do skříně rozvaděče.

Po vybrání těchto míst byl 8. listopadu 2022 zahájen výkop samotných žlabů, které slouží k zachytu půdní vody ze svrchní části půdního profilu. Svrchní část půdního profilu byla vymezena rozhraním horizontů Ah a Bv/Bvs. Experimentální vybavení na každé lokalitě zahrnovalo: (1) záznamové zařízení s člunkem pro stanovení množství zachycené vody, (2) plechové sběrné žlaby svádějící vodu ze zkoumané části půdního profilu do sběrného zařízení a (3) ohraničenou sběrnou plochu s lesní půdou.

Nejdříve byla vykopána přibližně jeden metr hluboká čtvercová jáma, do které bylo vloženo záznamové zařízení na bázi člunkového srážkoměru (tzv. klapák), do kterého voda proudí svrchu pomocí sběrného trychtýře (Obr. 6.). Z této čtvercové jámy byla následně z obou stran vybudována dvě podlouhlá ramena jdoucí po vrstevnici do vzdálenosti zhruba 2 m od záznamového zařízení. Tato ramena jsou natolik hluboká, aby se nejdříve mohl posoudit půdní profil daného území a zároveň ideálně hluboká, aby se dal jednoduše zasunout sběrný plech o šířce 15 cm, který odděluje pozorovanou vrstvu od hlubšího půdního profilu. Sběrné plechy byly mírně skloněny směrem k záznamovému

zařízení pro snadný odvod vody. Na straně vyčnívající z půdního profilu byly plechy ohnuty tak, aby umožnily svádění vody směrem k záznamovému zařízení. Vložené záznamové zařízení má člunek o objemu 126 ml. Po každém naplnění člunku se člunek převáží a vyšle signál do dataloggeru. Jedno toto klapnutí je tedy ekvivalentem 126 ml zachycené vody.

V bukovém lese byla zvolena hloubka sběrného plechu přibližně 8–12 cm, v této hloubce se již nacházelo pomezí dvou horizontů, přičemž jeden horizont byl tvořen především bukovým opadem, různým stádiem rozložení listů a myceliem a druhým horizontem (horizont Bv), který již byl tvořen písčitohlinitou zeminou (horizont Bv). Ve smrkovém lese byl plech zasunut do hloubky 13–17 cm. V této hloubce bylo rozhraní, ve kterém se ve svrchním horizontu nachází prokořenělá hrabanka (horizont Ah) a spodní horizont je tvořen světle hnědou až žlutavou hlinitou zeminou (horizont Bvs).

Poté byl celý výkop zakryt stříškou z OSB desek pokrytých igelitem tak, aby se zabránilo dopadu přímých srážek do odvodňovacích plechů, případně do samotného záznamového zařízení, zároveň bylo toto zařízení propojeno datovým kabelem do skříně rozvaděče, který se nachází uvnitř oplocených stanic.

Aby se co nejvíce zamezilo jakémukoliv protékání a prvotním nedokonalostem čerstvě vybudovaného experimentu, tak byl celý experiment až do následujícího léta ponechán k sesednutí. V létě v roce 2023 byly vsunuty vertikálně plechy v místě již vytyčené sběrné oblasti tak, aby se ono území ohraničilo a zamezilo se přítoku půdní vody z jiné oblasti, než je zkoumaná. Po přeměření obsahu sběrného území byla stanovena velikost u smrkového porostu 17 m² a u porostu bukového 15 m².

V tomto období se již zapnulo samotné záznamové zařízení. Samotná data z tohoto zařízení jsou v desetiminutových intervalech a vyjadřují množství klapnutí za tento interval.



Obr. 4 Zhotovování odvodňovací jámy ve smrkovém lese

Zdroj: vlastní fotografie



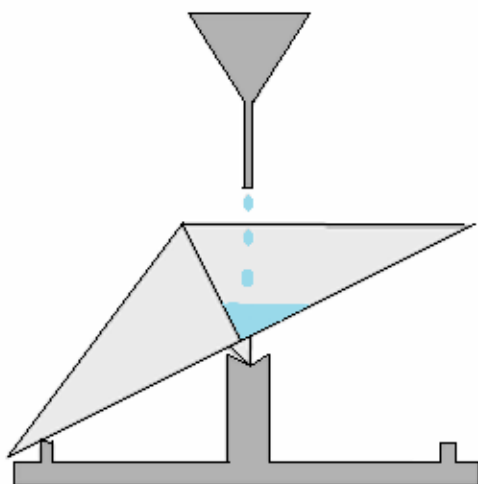
Obr. 5 Vybudovaný experiment v bukovém lese

Zdroj: vlastní fotografie



Obr. 6 Trychtýř s odvodňovacími plechy

Zdroj: vlastní fotografie



Obr. 7 Náčrtek trychtýře s člunkem

Zdroj: vlastní zpracování

6.1 Data

Pro potřeby experimentu byla využita data ze samotného záznamového zařízení, srážkoměrů (na otevřené ploše a podkorunových) a záznamy půdní vlhkosti. Veškerá vybavení a data byly poskytnuty Ústavem pro hydrodynamiku AV ČR.

6.1.1 Srážky

V rámci stanice Na Lizu je přítomno pět srážkoměrů v bukovém porostu a pět srážkoměrů v porostu smrkovém. Tyto srážkoměry jsou na bázi tzv. děleného překlápěcího člunku, což v praxi znamená, že měření srážek je založeno na principu počítání pulsů, přičemž každý puls představuje 0,1 mm srážek. Puls vzniká překlápěním onoho člunku a díky vytápění umožňuje nepřetržité měření srážek i v zimním období.

Druhým přítomným typem srážkoměrů, které se nacházejí ve stanicích jsou žlaby. Tyto žlaby nezaznamenávají na rozdíl od klasických srážkoměrů srážky z jednoho body, nýbrž z linie, kterou daný žlab prochází. Svedená voda ze žlabů taktéž teče do přístroje na bázi překlápěcího člunku, přičemž k zjištění srážky se jeden puls neboli klapnutí vynásobí koeficientem daného žlabu dle jeho délky a šířky. V případě této stanice je jeden puls ekvivalentem $0,060996 \text{ mm/m}^2$ srážky.

Data z jednotlivých srážkoměrů jsou sečtena v desetiminutových intervalech a pro zpracovávání dat jsou všechny podkorunové srážkoměry zprůměrované zvlášť pro bukový a zvlášť pro smrkový porost.

Intenzita srážek byla zhotovena z metody Kavky et al., (2019) a jedná se o tzv. průměrnou maximální intenzitu. Tato metoda odráží v rámci srážkové události její nejintenzivnější část za jednu hodinu. V praxi to znamená, že je vybrán nejvyšší součet šesti po sobě jdoucích hodnot ze srážkoměrů.

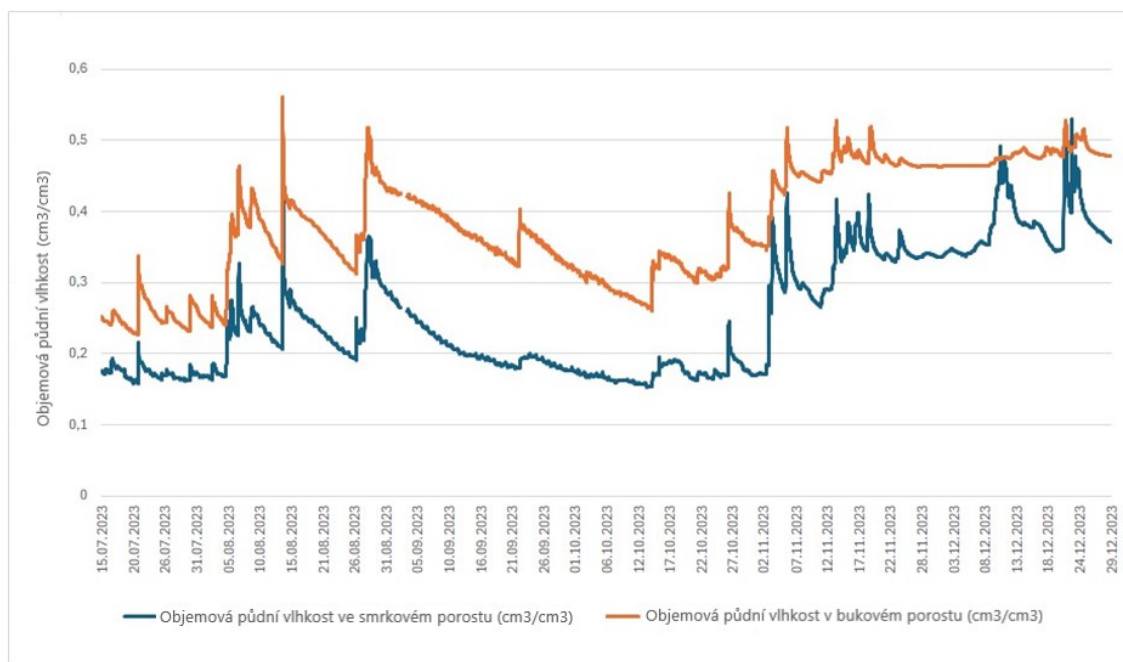
Tato metoda se pro tento výzkum osvědčila daleko více z důvodu pozorování srážky v lese, která má kvůli intercepci nejen pomalý nástup, ale taktéž velmi pomalu tato srážková událost z dat srážkoměrů odeznívá, jelikož z korun stromů přítomná voda stéká. Kvůli této skutečnosti intenzita spočítaná z celkového objemu srážky a celkovému času, kdy byly srážkoměry schopny zachytávat vodu byly intenzity velice nízké a hůře porovnatelné z důvodu hledání právě vyšších intenzit, při kterých vzniká odtoková událost.

6.1.2 Vlhkost

Ve stanicích v obou porostech je instalováno po pěti čidlech půdní vlhkosti TMS-4 od firmy TOMST. Tato čidla měří kontinuálně půdní vlhkost v patnácti minutových intervalech a kromě půdní vlhkosti měří i přízemní teplotu, teplotu půdy v hloubce šesti centimetrů a také teplotu vzduchu ve výšce dvanácti centimetrů. Primárně měří tzv. “Raw moisture signal”, což odpovídá počtu oběhů elektrického pulzu v tělese čidla. Počet oběhů lze převést na objemovou půdní vlhkost pomocí kalibrační rovnice v excelovském makru vytvořeném přímo výrobcem. Ve výpočtu jsou zahrnuty parametry dané půdy, přičemž pro toto území byla zvolena předdefinovaná možnost “Sandy loam B”, která byla speciálně navržena dle charakteristik půdy povodí Lizu.

Data jsou k dispozici pouze pro rok 2023, přičemž ke konci tohoto roku v bukovém porostu nejspíše čidlo neukazovalo přesné hodnoty vzhledem k snížení korelace mezi smrkovým a bukovým porostem a nereagování na významnější srážkové události.

Tato čidla byla použita i pro experiment umělého zavlažování. K dispozici bylo celkem šest půdních čidel, která byla rozmístěna na obou experimentálních územích.



Obr. 8 Porovnání objemové půdní vlhkosti a v bukovém a smrkovém porostu

Zdroj: vlastní zpracování

6.2 Umělé zavlažování

V rámci práce byly taktéž provedeny dva experimenty umělé závlahy. Dne 19. října 2023 bylo dovezeno celkově 300 litrů vody na zkoumané území a pomocí konve bylo skrápěno nejdříve smrkové a následně i bukové experimentální území. Pro každé místo bylo tedy vyhrazeno 150 litrů vody. Aby se srážka umocnila, byla skrápěna pouze část sběrné plochy, která byla ve vzdálenosti do jednoho metru od odvodňovacích plechů, což v rámci plochy bylo přibližně 4 m². Umělé zavlažování trvalo 35 minut. Tímto pokusem byla dosažena fiktivní srážka o přibližné intenzitě 60 mm/h.

Druhý experiment se konal 29. června 2024 a bylo zavlažováno 250 litry území v bukovém lese a 250 litry v lese smrkovém, přičemž byla využita voda z místního potoka. Zvýšený nebyl pouze celkový objem vody, ale i intenzita skrápění, kdy bylo skrápěno po dobu 35 minut území o velikosti 4 m². Výsledná fiktivní srážka byla o intenzitě 110 mm/h.

7 Výsledky

7.1 Přirozené odtokové události

Pozorování probíhalo od července roku 2023 do dubna roku 2024 a bylo v rámci experimentu zachyceno šestnáct odtokových událostí ve smrkovém porostu a dvě odtokové události v porostu bukovém. Obě události v buku probíhaly vždy ve stejných srážkových událostech, při kterých se taktéž projevil odtok ve smrkovém porostu.

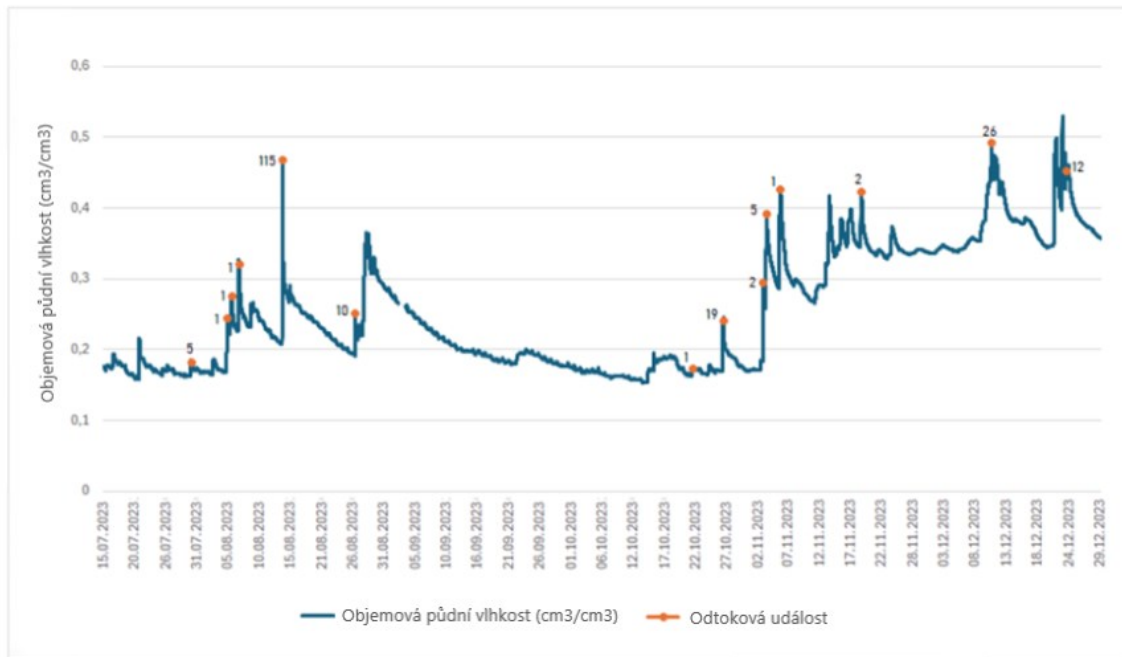
7.1.1 Analýza odtokových událostí

Odtokové události a vlhkost

Na grafu (Obr.9) je vidět průběh půdní objemové vlhkosti ve smrkovém lese a zachycené odtokové události znázorněné oranžovým bodem v čase uskutečnění. Hodnota vedle jednotlivých odtokových událostí ukazuje množství klapnutí, které odpovídá ekvivalentu 126 ml. Z obrázku vyplývá, že ve smrkovém porostu při většině významnějších navýšení půdní vlhkosti a tedy při větších srážkových událostech došlo k mělkému podpovrchovému odtoku. Výjimkou je srážka z 28. srpna 2023, která sice navýšila objemovou vlhkost o skoro 20 %, avšak dle experimentu nedošlo k odtoku.

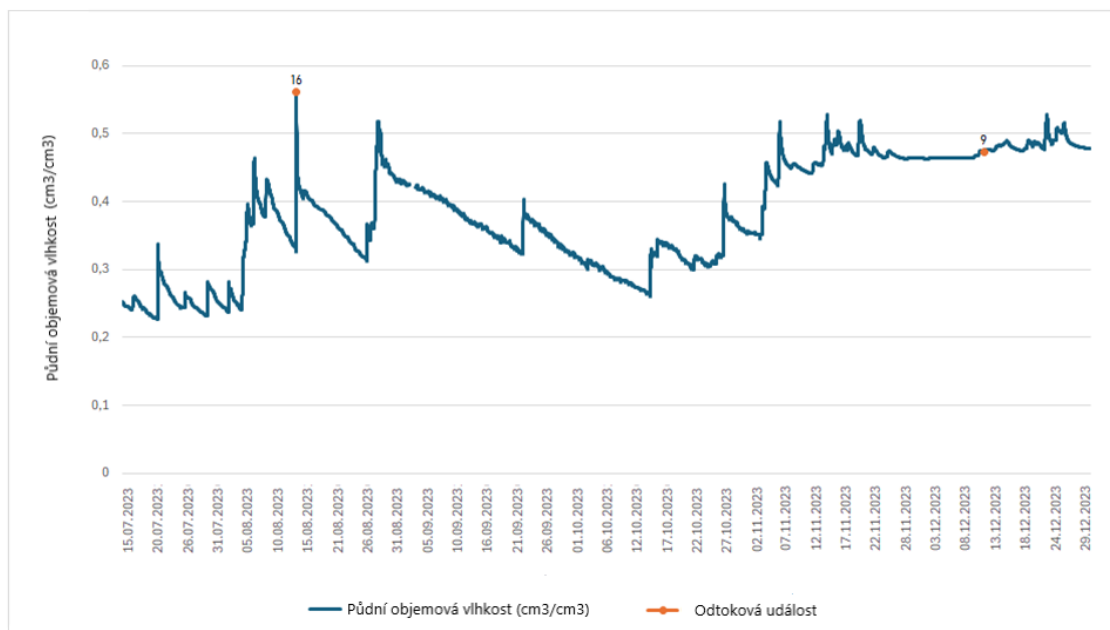
Zároveň je vidět, že nejen počáteční vlhkost před srážkovou událostí, ale i samotná vlhkost v době odtoku nemá vliv na uskutečnění samotného odtoku. Příkladem může být odtoková událost z 30. července 2023, kdy vlhkost i přes odtok se nezvýšila a zůstala na relativně nízkých hodnotách v rámci celého měření. Hodnoty objemových půdních vlhkostí před srážkovou událostí a v době samotného odtoku jsou zaznamenány v tabulce (Tab. 3).

Oproti tomu shodný graf v bukovém porostu ukazuje, že pouze nejvyšší navýšení vlhkosti v celém pozorovacím období se projevila na odtoku. Druhá odtoková událost, vzhledem k jinak korelujícím hodnotám vlhkosti mezi stanicí v bukovém a smrkovém porostu se nejspíše odehrála v době, kdy půdní čidlo v bukovém porostu nefungovalo. A taktéž jako ve smrkovém porostu, i při srážkové události 28. srpna 2023 nedošlo k žádnému odtoku.



Obr. 9 Objemová půdní vlhkost ve smrkovém porostu s odtokovými událostmi

Zdroj: vlastní zpracování



Obr. 10 Objemová půdní vlhkost v bukovém porostu s odtokovými událostmi

Zdroj: vlastní zpracování

| Lesní porost | Datum | Obj. vlhkost před srážkou (cm ³ /cm ³) | Obj. vlhkost při odtoku (cm ³ /cm ³) | Odtok (l) |
|--------------|---------------|---|---|-----------|
| SMRK | 30.7.2023 | 0,162 | 0,185 | 0,63 |
| | 5.8.2023 | 0,176 | 0,246 | 0,126 |
| | 6.8.2023 | 0,225 | 0,274 | 0,126 |
| | 7.8.2023 | 0,233 | 0,325 | 0,126 |
| | 14.8.2023 | 0,208 | 0,468 | 14,49 |
| | 26.8.2023 | 0,194 | 0,251 | 1,26 |
| | 22.10.2023 | 0,162 | 0,171 | 0,126 |
| | 27.10.2023 | 0,169 | 0,246 | 2,394 |
| | 2.11.2023 | 0,183 | 0,297 | 0,252 |
| | 3.11.2023 | 0,258 | 0,391 | 0,63 |
| | 5.11.2023 | 0,298 | 0,423 | 0,126 |
| | 19.11.2023 | 0,344 | 0,424 | 0,252 |
| | 10-11.12.2023 | 0,361 | 0,493 | 3,276 |
| | 23.12.2023 | 0,405 | 0,460 | 1,512 |
| | 22.1.2024 | Půdní objemová vlhkost neměřena | | |
| 18.4.2024 | | | | 0,126 |
| BUK | 14.8.2023 | 0,328 | 0,561 | 2,016 |
| | 10.12.2023 | 0,464 | 0,475 | 1,134 |

Tab. 3 Půdní objemové vlhkosti ve smrkovém i bukovém porostu

Zdroj: vlastní zpracování

Odtokové události a objem srážek

Jak již bylo naznačeno, celkové množství zachycených odtokových událostí mezi bukovým a smrkovým porostem se značně liší. Z pohledu množství jednotlivých srážek je zřejmé, že u bukového porostu pouze největší srážkové události umožnily mělký podpovrchový odtok v experimentálním území.

Získaná data z podkorunových srážkoměrů umožňují přepočítat napadané srážky na celkový objem vody dopadený na experimentální území. Zároveň díky desetiminutovým datům lze zjistit objem vody dopadený na území, než došlo k prvnímu klapnutí, tedy k prvnímu odtoku 126 ml vody. Avšak je nutné si uvědomit, že právě první klapnutí se může skládat i z odtoku z předchozí srážky, jakožto relikv odtečené srážky v klapacím zařízení.

Při porovnání odtokových událostí v bukovém a smrkovém lese je zřejmé, že pro bukový porost je nutné daleko větší množství podkorunových srážek na území, aby došlo k odtoku. V polovině srpna, kdy došlo k nejintenzivnější srážce za celé pozorované období, muselo na experimentální povodí v bukovém porostu spadnout 9 mm/m² srážky, tzn. 207 litrů na sběrné území, aby došlo k prvnímu klapnutí. Oproti tomu ve smrkovém porostu tomu bylo již při 0,7 mm/m², což odpovídá necelým 12 litrům srážky na sběrném území, při kterém došlo již k prvnímu klapnutí, tedy k zahájení odtoku ze sledované vrstvy půdy. Úskalím této srážkové události je skutečnost, že srážkoměry se především

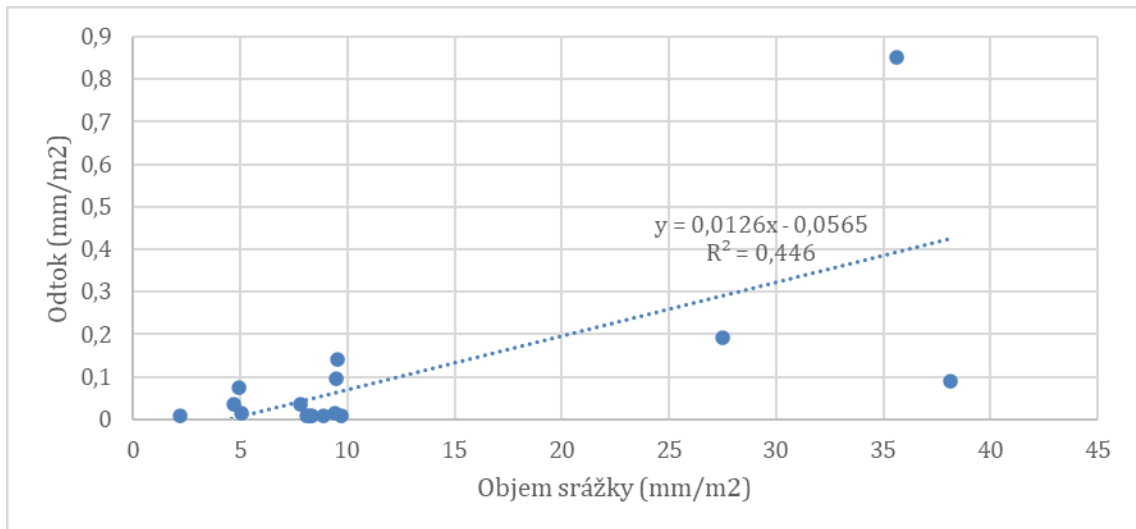
ve smrkovém porostu v takhle intenzivním dešti ucpávaly, a i když došlo v následujícím dni k jejich pročištění a voda z vybraných ucpaných srážkoměrů otekla a byla změřena tak celkový objem nemusí být přesný. V rámci této srážkové události proto byly stěžejní hodnoty ze žlabů, které byly zprůměrovány s hodnotami z bodových srážkoměrů, které se nejspíše v průběhu neucpaly.

Druhou společnou událostí je událost z prosince roku 2023, kdy v bukovém porostu muselo napadnout k prvnímu klapnutí dokonce 25 mm/m^2 což je ekvivalent 528 litrů vody pro pozorované sběrné území. Ve smrkovém lese při stejné srážkové události to bylo při 9 mm/m^2 , tedy 155 litrů na experimentální ploše.

Z dat ze smrkového lesa je vidět, že mělký podpovrchový odtok probíhal i při relativně malých srážkových událostech, například 22. října 2023 spadlo v lese pouze $2,12 \text{ mm/m}^2$, tzn. 36 litrů, aby došlo k dotečení jistého objemu vody do klapacího zařízení, aby jej převážilo.

Co se týče významnějších odtokových událostí, kdy došlo k více než jednomu klapnutí a tedy se jedná o již lépe stanovitelný objem, tak vznikaly tyto události již okolo 5 mm/m^2 tedy přibližně okolo 85 litrů vody. Mezi takové události se řadí 30. červenec 2023; 26. srpen 2023 a 2. listopad 2023, přičemž jejich první záznam o odtoku je již okolo 20–30 litrů, tedy do 2 mm/m^2 .

Pokud dáme ve smrkovém porostu do souvislosti odtok s celkovými srážkami za danou událost, tak na následujícím grafu (Obr. 11) nelze vidět přílišný vztah mezi těmito dvěma hodnotami. Pro vyjádření souvislosti byla zvolena statistická metoda koeficient determinace neboli R kvadrát a po proložení spojnice trendu byl zjištěn koeficient determinace na 0,44 neboli 44 %. Tato nízká hodnota závislosti je dána především poměrně vysokým rozptylem množství odtoku u událostí, které jsou výjimečné ve vysokém objemu srážky.



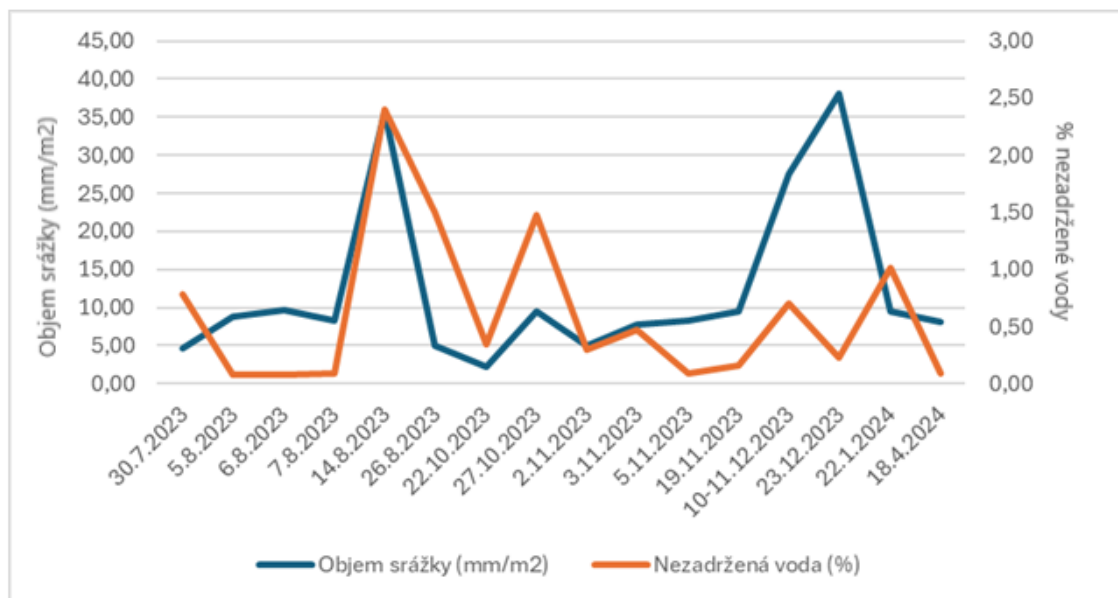
Obr. 11 Závislost odtoku a srážek ve smrkovém lese

Zdroj: vlastní zpracování

Podíl nezadržené vody

Z podílu celkového objemu vody ze srážkové události a množství odečtené vody z experimentálního území lze vypočítat procentuální množství vody, které nebylo zadrženo v půdním profilu a oteklo do odvodňovacích plechů a následně do klapacího zařízení.

Tento podíl nezadržené vody se pohybuje do jednoho procenta (Tab. 4), výjimečně u objemnějších srážek do 3 %. Zároveň tato hodnota relativně koresponduje se samotným objemem (množstvím) srážky (Obr. 12), výjimkou je událost z 23.12.2023, kdy však srážka byla nejspíše v pevném skupenství a tak většina odtoku nebyla z tohoto důvodu možná.



Obr. 12 Srážky a nezadržená voda smrkovém porostu

Zdroj: vlastní zpracování

| Lesní porost | Datum | Objem srážky (mm/m ²) | Objem srážky (l) | Objem srážky (mm/m ²) do prvního klapnutí | Objem srážky (l) do prvního klapnutí | Odtok (l) | Podíl nezadržené vody (%) |
|--------------|---------------|-----------------------------------|------------------|---|--------------------------------------|-----------|---------------------------|
| SMRK | 30.7.2023 | 4,72 | 80,24 | 1,32 | 22,44 | 0,63 | 0,79 |
| | 5.8.2023 | 8,86 | 150,62 | 8,32 | 141,44 | 0,13 | 0,08 |
| | 6.8.2023 | 9,70 | 164,90 | 6,30 | 107,10 | 0,13 | 0,08 |
| | 7.8.2023 | 8,22 | 139,74 | 7,86 | 133,62 | 0,13 | 0,09 |
| | 14.8.2023 | 35,60 | 605,20 | 0,70 | 11,90 | 14,49 | 2,39 |
| | 26.8.2023 | 4,96 | 84,32 | 1,76 | 29,92 | 1,26 | 1,49 |
| | 22.10.2023 | 2,18 | 37,06 | 2,12 | 36,04 | 0,13 | 0,34 |
| | 27.10.2023 | 9,54 | 162,18 | 2,68 | 45,56 | 2,39 | 1,48 |
| | 2.11.2023 | 5,06 | 86,02 | 3,04 | 51,68 | 0,25 | 0,29 |
| | 3.11.2023 | 7,82 | 132,94 | 5,24 | 89,08 | 0,63 | 0,47 |
| | 5.11.2023 | 8,36 | 142,12 | 8,20 | 139,40 | 0,13 | 0,09 |
| | 19.11.2023 | 9,44 | 160,48 | 2,42 | 41,14 | 0,25 | 0,16 |
| | 10-11.12.2023 | 27,52 | 467,84 | 9,12 | 155,04 | 3,28 | 0,70 |
| | 23.12.2023 | 38,14 | 648,38 | 13,66 | 232,22 | 1,51 | 0,23 |
| 22.1.2024 | 9,50 | 161,50 | 4,10 | 69,70 | 1,64 | 1,01 | |
| 18.4.2024 | 8,10 | 137,70 | 3,36 | 57,12 | 0,13 | 0,09 | |
| BUK | 14.8.2023 | 60,48 | 1270,08 | 9,86 | 207,06 | 2,02 | 0,16 |
| | 10-11.12.2023 | 32,42 | 680,82 | 25,16 | 528,36 | 1,13 | 0,17 |

Tab. 4 Objem srážek jednotlivých událostí

Zdroj: vlastní zpracování

Odtokové události a intenzita srážek

Dle několika výzkumů zabývajících se podpovrchovým odtokem v lesích je kromě celkového objemu srážek stěžejní pro samotný vznik i intenzita srážek. Tento faktor ovlivňuje nejen samotnou existenci odtoku, ale případně i množství odečtené vody, přičemž čím intenzivnější srážka, tím je větší pravděpodobnost odtoku.

Byla zvolena metoda tzv. průměrné nejvyšší intenzity, která si klade za cíl určit nejvyšší přítomnou intenzitu v průběhu celé efektivní srážky. Konkrétně se jedná o nejvyšší hodinovou srážku v rámci celé srážkové události.

Tyto hodnoty jsou zaneseny v tabulce (Tab. č. 5) a je zřejmé, že i zde se vyjímá srážka ze 14. srpna 2023, která má přibližně desetkrát vyšší intenzitu než jiné srážkové události. Oproti tomu jsou přítomny i intenzity srážek do 2 mm/h, přičemž taková srážka je klasifikována jako slabá.

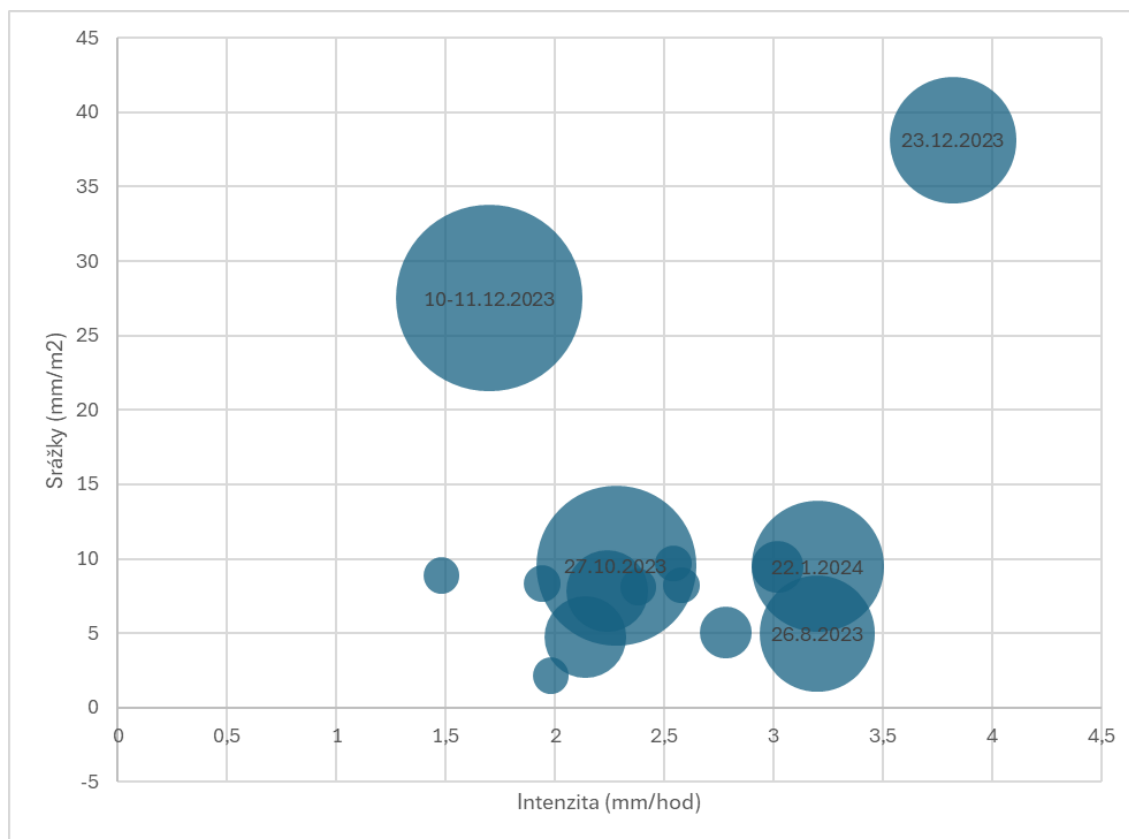
| lesní porost | Datum | Intenzita (mm/hod) |
|--------------|----------------|--------------------|
| SMRK | 30.7.2023 | 2,14 |
| | 5.8.2023 | 1,48 |
| | 6.8.2023 | 2,54 |
| | 7.8.2023 | 2,58 |
| | 14.8.2023 | 26,2 |
| | 26.8.2023 | 3,2 |
| | 22.10.2023 | 1,98 |
| | 27.10.2023 | 2,28 |
| | 2.11.2023 | 2,78 |
| | 3.11.2023 | 2,24 |
| | 5.11.2023 | 1,94 |
| | 19.11.2023 | 3,02 |
| | 10-11.12.2023 | 1,7 |
| | 23.12.2023 | 3,82 |
| | 22.1.2024 | 3,2 |
| 18.4.2024 | 2,38 | |
| BUK | 14.8.2023 | 34,93 |
| | 10.-11.12.2023 | 2,4 |

Tab. 5 Intenzita srážek jednotlivých událostí

Zdroj: vlastní zpracování

Následující graf (Obr. 13) ukazuje souvislost mezi objemem srážky a intenzitou dané srážkové události ve smrkovém lese, přičemž množství odečtené vody v rámci dané události je dáno velikostí kruhu. V grafu úmyslně chybí odtoková událost ze 14. srpna 2023, jelikož tato událost se natolik liší od ostatních, že by je v tomto grafu upozadila.

Graf demonstruje skutečnost, že kromě 27. října 2023 veškeré významnější odtokové události se buď vyznačovaly vysokou maximální intenzitou nebo velkým celkovým objemem srážky, který napadl při odtokové události.

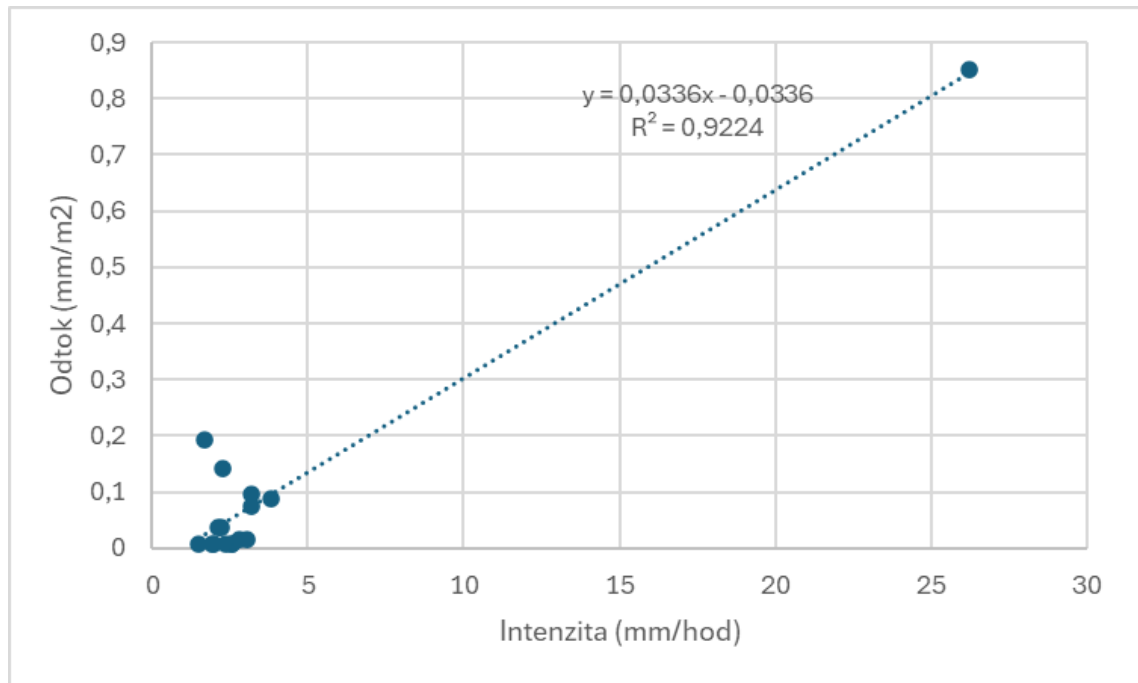


Obr. 13 Závislost objemu srážek a intenzity ve smrkovém lese

Zdroj: vlastní zpracování

Na dalším grafu (Obr. 14) je vyobrazen vztah intenzity s odtokem ve smrkovém lese. Pro vyjádření souvislosti byla zvolena statistická metoda koeficient determinace neboli R kvadrát. Po proložení hodnot spojnicí trendu a stanovení koeficientu determinace lze říci, že existuje poměrně velká závislost těchto dvou proměnných, jelikož R^2 vykazuje hodnotu 0,92, tzn. 92 %. Opět musíme vzít v úvahu, že graf je silně ovlivněn extrémní událostí ze 14. srpna 2023, která byla v tomto případě stěžejní pro směrnici trendu.

Vzhledem ke skutečnosti, že v bukovém porostu jsou pouze dvě události, je jejich grafické zpracování, porovnávání a vyhodnocování značně omezeno.



Obr. 14 Závislost odtoku na intenzitě srážek ve smrkovém porostu

Zdroj: vlastní zpracování

7.1.2 Jednotlivé události

14. srpna 2023

První vybraná událost je z 14. srpna 2023. Tato událost vznikla za extrémně intenzivního deště, který dosahoval intenzity za 10 minut až 15 mm/m². Nejspíše díky této vysoké intenzitě dosáhla nejvyššího mělkého podpovrchového odtoku nejen ve smrkovém porostu, ale i v porostu bukovém. Konkrétně 14,49 litru (0,85 mm/m²) v experimentálním území v smrkovém lese a 2 litry (0,13 mm/m²) v lese bukovém.

Srážkoměry zachytily první srážkovou vodu v 14:00, avšak až do 14:20 se jednalo o velmi slabou srážku, kterou tlumila intercepce lesa. Avšak od 14:20 se intenzita srážky v buku i smrku prudce zvýšila, to mělo za následek první zaznamenaný odtok, konkrétně v rozmezí 14:20–14:30 ve smrkovém porostu oteklo 0,25 l (0,015 mm/m²) vody a v bukovém porostu 0,126 l (0,008 mm/m²). V tomto čase se již ve smrkovém lese začaly ucpávat srážkoměry, které vykazovaly velmi rozdílné hodnoty.

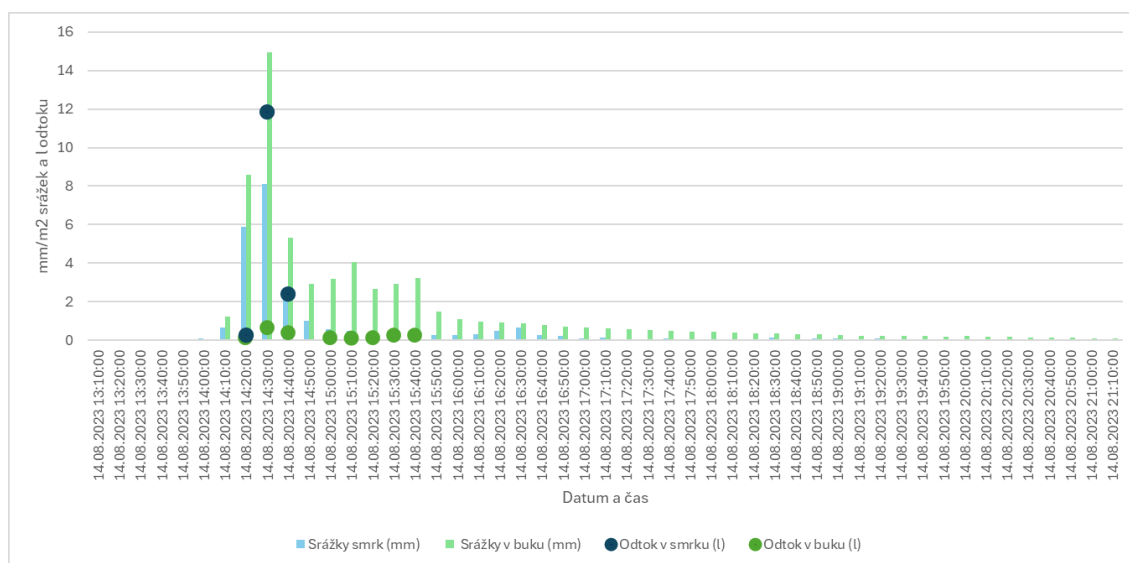
V následujícím desetiminutovém intervalu, tedy od 14:30–14:40 vygradovala intenzita srážky na své maximum. V tomto momentě vystoupala objemová půdní vlhkost na 47 %, což je taktéž nejvyšší hodnota za celou dobu měření. V tomto desetiminutovém intervalu došlo k rekordnímu odtoku, odtok tedy reagoval zcela okamžitě na srážkovou

událost. Ve smrkovém porostu oteklo za těchto 10 minut 11,85 litru (0,69 mm/m²) vody a v bukovém 0,63 litru (0,042 mm/m²).

Ve smrkovém porostu ještě dozníval odtok i v dalším intervalu tj. 14:40–14:50, kdy oteklo 2,4 l (0,14 mm/m²) vody. V tomto období srážková událost již slábla, avšak stále za těchto deset minut spadlo 2,7 mm/m². Oproti tomu v bukovém lese z dat ze srážkoměrů byl déšť intenzivnější, konkrétně 5,3 mm/m² a z experimentálního území oteklo 0,38 litru (0,025 mm/m²) vody.

V následujících 60 minutách se ve smrkovém lese značně snížila intenzita deště a již nedocházelo k samotnému odtoku. Oproti tomu v bukovém lese stále docházelo k velké efektivní srážce, kdy každých deset minut dopadlo na povrch okolo 3 mm/m². V této hodině docházelo pravidelně v každém desetiminutovém intervalu k jednomu až dvěma klapnutí, což odpovídá ekvivalentu 0,126–0,252 l (0,0084–0,016 mm/m²) odtečené vody.

Celá srážková událost je zobrazena v grafu (Obr. 15), kdy srážky v bukovém porostu jsou zachyceny světle zelenou barvou a tmavě zeleným bodem je vykreslen objem odtečené vody v daném desetiminutovém intervalu. Oproti tomu srážky ve smrkovém porostu jsou vyznačeny světle modrou a jednotlivé tmavomodré body znázorňují objem odtečené vody, přičemž výsledné hodnoty jsou taktéž v tabulce (Tab. 6), ve které jsou zvýrazněny časy, ve kterých došlo k samotnému odtoku.



Obr. 15 Odtoková událost z 14. srpna 2024

Zdroj: vlastní zpracování

| čas | Srážky smrk (mm) | Odtok v smrku (l) | Srážky v buku (mm) | Odtok v buku | čas |
|-------|------------------|-------------------|--------------------|--------------|-------|
| 13:10 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 13:10 |
| 13:20 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 13:20 |
| 13:30 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 13:30 |
| 13:40 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 13:40 |
| 13:50 | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 13:50 |
| 14:00 | 0,1 | 0 | 0,03 | 0 | 14:00 |
| 14:10 | 0,65 | 0 | 1,23 | 0 | 14:10 |
| 14:20 | 5,9 | 0,252 | 8,60 | 0,126 | 14:20 |
| 14:30 | 8,1 | 11,844 | 14,93 | 0,630 | 14:30 |
| 14:40 | 2,7 | 2,394 | 5,30 | 0,378 | 14:40 |
| 14:50 | 1 | 0 | 2,90 | 0 | 14:50 |
| 15:00 | 0,55 | 0 | 3,20 | 0,126 | 15:00 |
| 15:10 | 0,5 | 0 | 4,07 | 0,126 | 15:10 |
| 15:20 | 0,4 | 0 | 2,67 | 0,126 | 15:20 |
| 15:30 | 0,3 | 0 | 2,90 | 0,252 | 15:30 |
| 15:40 | 0,3 | 0 | 3,23 | 0,252 | 15:40 |
| 15:50 | 0,25 | 0 | 1,47 | 0 | 15:50 |
| 16:00 | 0,25 | 0 | 1,10 | 0 | 16:00 |
| 16:10 | 0,3 | 0 | 0,97 | 0 | 16:10 |
| 16:20 | 0,5 | 0 | 0,93 | 0 | 16:20 |
| 16:30 | 0,65 | 0 | 0,87 | 0 | 16:30 |
| 16:40 | 0,25 | 0 | 0,77 | 0 | 16:40 |
| 16:50 | 0,2 | 0 | 0,70 | 0 | 16:50 |
| 17:00 | 0,1 | 0 | 0,67 | 0 | 17:00 |
| 17:10 | 0,15 | 0 | 0,60 | 0 | 17:10 |
| 17:20 | 0,05 | 0 | 0,57 | 0 | 17:20 |
| 17:30 | 0,05 | 0 | 0,53 | 0 | 17:30 |
| 17:40 | 0,1 | 0 | 0,50 | 0 | 17:40 |
| 17:50 | 0,05 | 0 | 0,43 | 0 | 17:50 |
| 18:00 | 0,05 | 0 | 0,43 | 0 | 18:00 |
| 18:10 | 0,05 | 0 | 0,40 | 0 | 18:10 |
| 18:20 | 0,05 | 0 | 0,37 | 0 | 18:20 |
| 18:30 | 0,15 | 0 | 0,33 | 0 | 18:30 |
| 18:40 | 0,05 | 0 | 0,30 | 0 | 18:40 |
| 18:50 | 0,1 | 0 | 0,30 | 0 | 18:50 |
| 19:00 | 0,1 | 0 | 0,27 | 0 | 19:00 |
| 19:10 | 0,05 | 0 | 0,23 | 0 | 19:10 |
| 19:20 | 0,1 | 0 | 0,20 | 0 | 19:20 |
| 19:30 | 0,05 | 0 | 0,23 | 0 | 19:30 |
| 19:40 | 0,05 | 0 | 0,20 | 0 | 19:40 |
| 19:50 | 0,05 | 0 | 0,17 | 0 | 19:50 |
| 20:00 | 0,05 | 0 | 0,20 | 0 | 20:00 |
| 20:10 | 0,05 | 0 | 0,17 | 0 | 20:10 |
| 20:20 | 0 | 0 | 0,17 | 0 | 20:20 |
| 20:30 | 0,05 | 0 | 0,13 | 0 | 20:30 |
| 20:40 | 0 | 0 | 0,13 | 0 | 20:40 |
| 20:50 | 0 | 0 | 0,13 | 0 | 20:50 |
| 21:00 | 0,05 | 0 | 0,10 | 0 | 21:00 |

Tab. 6 Data ze srážkové události z 14.8.2023

Zdroj: vlastní zpracování

10.–11. prosince 2023

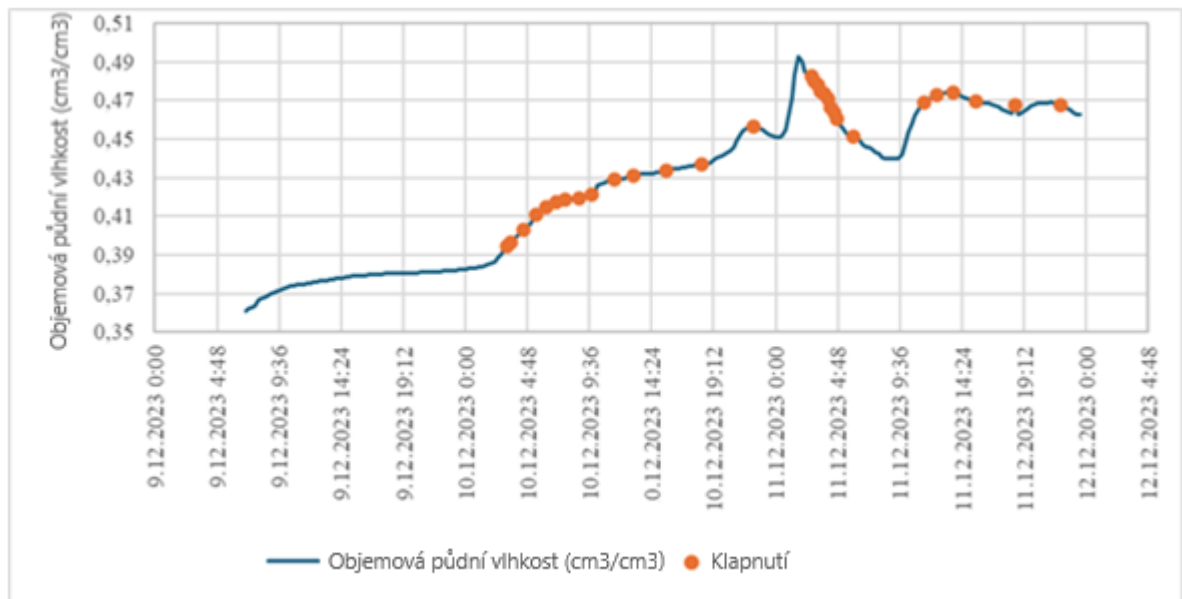
Druhá významná odtoková událost proběhla v rozmezí 10. až 11. prosince 2023. Tento mělký podpovrchový odtok byl vyvolán dlouhotrvající srážkovou událostí, která trvala přibližně 72 hodin. Již od rána 9. prosince začíná ve smrkovém porostu velmi slabá srážka na hranici detekce srážkoměrů a tato efektivní srážka o velmi slabé intenzitě přetrvává až do půlnoci. Oproti tomu v bukovém porostu tento den prakticky neprší.

Od půlnoci se tato intenzita zvýšila jak v bukovém, tak i v smrkovém porostu na přibližně $1 \text{ mm/m}^2/\text{hod}$ a celý den dopadala srážka o podobné intenzitě až do 22:00. V rámci tohoto dne napadlo v obou porostech přibližně 20 mm/m^2 efektivní srážky. Zatímco v bukovém porostu za celý den nedošlo k žádnému odtoku, tak ve smrkovém lese již první signál z klapáku byl zaznamenán v 4:00 a v průběhu celého dne oteklo $1,6 \text{ l}$ ($0,094 \text{ mm/m}^2$) vody. V průměru každý 1 mm/m^2 efektivní srážky způsobil jedno klapnutí ($0,126 \text{ l}$; $0,0074 \text{ mm/m}^2$ vody), což v rámci experimentálního území znamená, že na každé klapnutí bylo potřeba přibližně 17 litrů napadané vody. Těsně před půlnocí srážková událost opět zeslábla na hranici detekce srážkoměrů.

Ihned v 1:00 11. prosince však přišla nejvíce intenzivní srážka této události, kdy ve smrkovém i bukovém porostu za každých 10 minut napadlo až $0,5 \text{ mm/m}^2$. Zajímavostí je rozdíl celkového objemu vody, které naměřily srážkoměry. Ve smrkovém lese za tuhle část události napadlo přibližně $2,5 \text{ mm/m}^2$ srážky, avšak u bukového lesa tato srážka pokračovala o několik hodin déle a srážkoměry naměřily přes 5 mm/m^2 srážky. V porostu smrku ihned po zvýšení intenzity deště začala odtékat voda do klapacího zařízení a v průběhu této srážky otekli jeden litr vody ($0,059 \text{ mm/m}^2$). O hodinu později, v době, kdy intenzita srážkové události spíše odeznívala, začalo odtékat i z experimentálního území v bukovém lese. Tento odtok proběhl daleko intenzivněji a rychleji než u smrkového lesa, kde byl zaznamenány jednotlivé pulsy v klapáku v průměru každých 30 minut. V bukovém lese veškerý odtok proběhl za jednu a půl hodiny a celkově oteklo $1,13 \text{ litru}$ ($0,075 \text{ mm/m}^2$) vody.

Po této intenzivnější srážce se již velmi liší hodnoty ze srážkoměrů. V bukovém lese pokračuje déšť až do nočních hodin o intenzitě kolem $1\text{--}3 \text{ mm/hod}$, avšak již nedochází k žádnému odtoku. Ve smrkovém lese sice dle srážkoměrů nedochází k žádným srážkám, avšak je zaznamenán v průběhu dne několikrát puls o odečtení vody. Zároveň se však významně mění objemová půdní vlhkost, která se v tomto období

navýšila i přes absenci srážky. Bohužel v rámci této celé události půdní čidla vlhkosti v bukovém lese nefungovala a tak není možné tyto hodnoty porovnat.



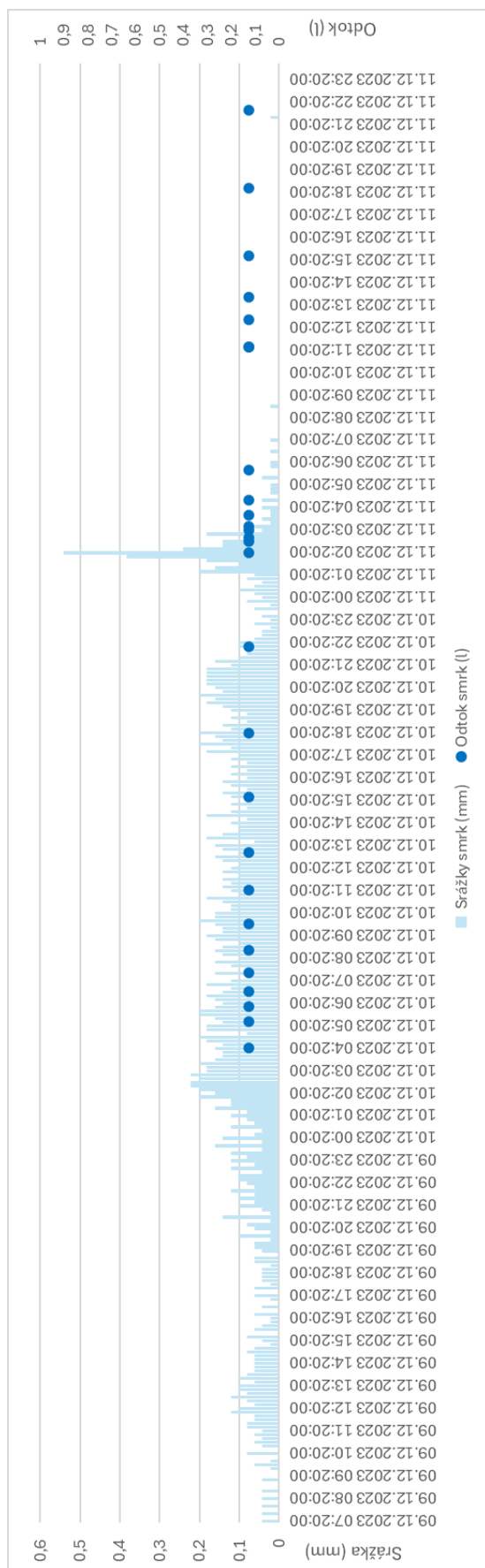
Obr. 16 Jednotlivá klapnutí vůči změně půdní vlhkosti

Zdroj: vlastní zpracování



Obr. 17 Odtok ve smrkovém porostu

Zdroj: vlastní zpracování



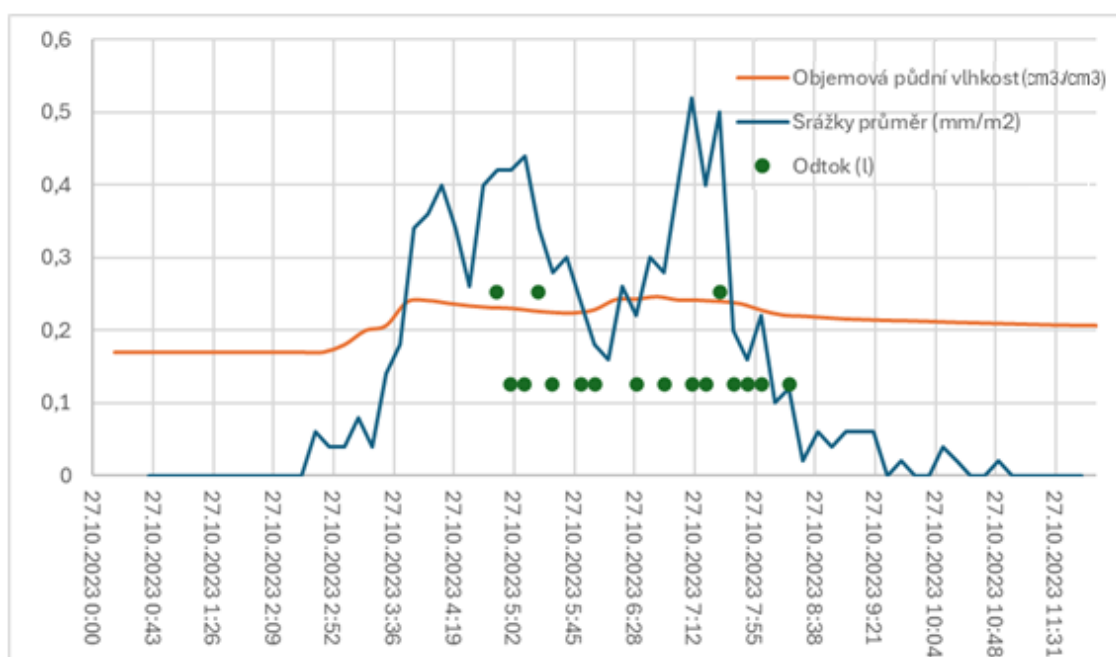
Obr. 18 Odtok ve bukovém porostu

Zdroj: vlastní zpracování

27. října 2023

Minulé dvě události, kterým se tato práce věnovala byly vybrány především kvůli možnosti porovnání mezi bukovým a smrkovým porostem, jelikož vznikl mělký podpovrchový odtok v obou experimentálních územích.

Oproti tomu 27. října 2023 vznikla nejvýznamnější odtoková událost ve smrkovém lese, aniž by došlo k odtoku v bukovém porostu. V rámci tohoto dne vznikla odtoková událost, při které oteklo celkově 2,394 litru ($0,14 \text{ mm/m}^2$). Tato srážka trvala od 3:00 ráno do přibližně 10:00 dopoledne a celkově napršelo $9,53 \text{ mm/m}^2$. Objemová půdní vlhkost se v průběhu srážky zvýšila z $0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ na $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Jak objem srážek, jejich intenzita či vlhkost nevykazují výjimečné hodnoty oproti jiným událostem, které mají daleko nižší odtok.



Obr. 19 Graf události z 27. října 2023

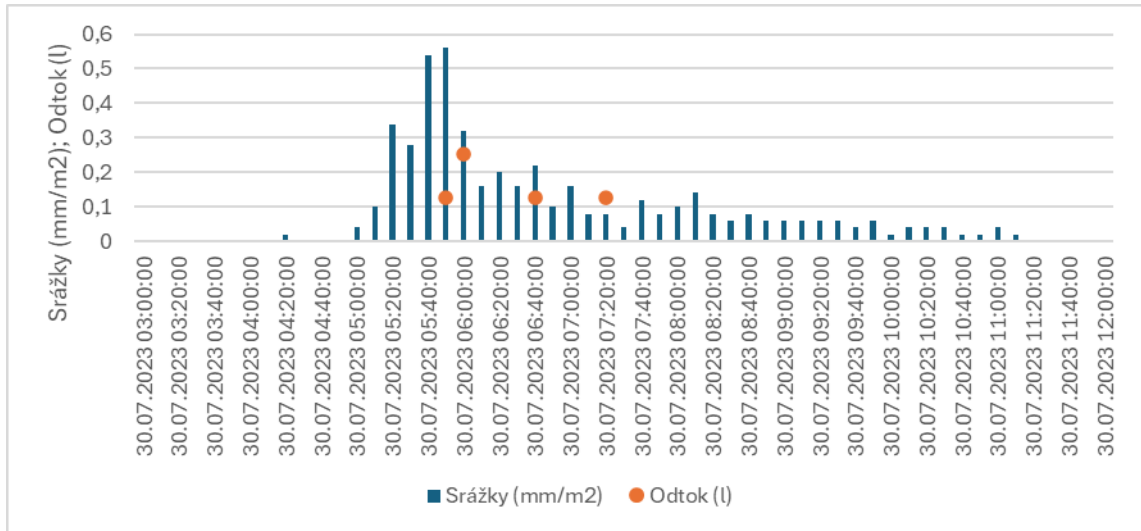
Zdroj: vlastní zpracování

Ostatní události

Níže jsou vyobrazeny jednotlivé grafy odtokových událostí ve smrkovém porostu, jejichž objem odtoku je sice nižší, avšak stále relativně dobře stanovitelný, jelikož byly zachyceny v člunkovém srážkoměru minimálně 2 klapnutí.

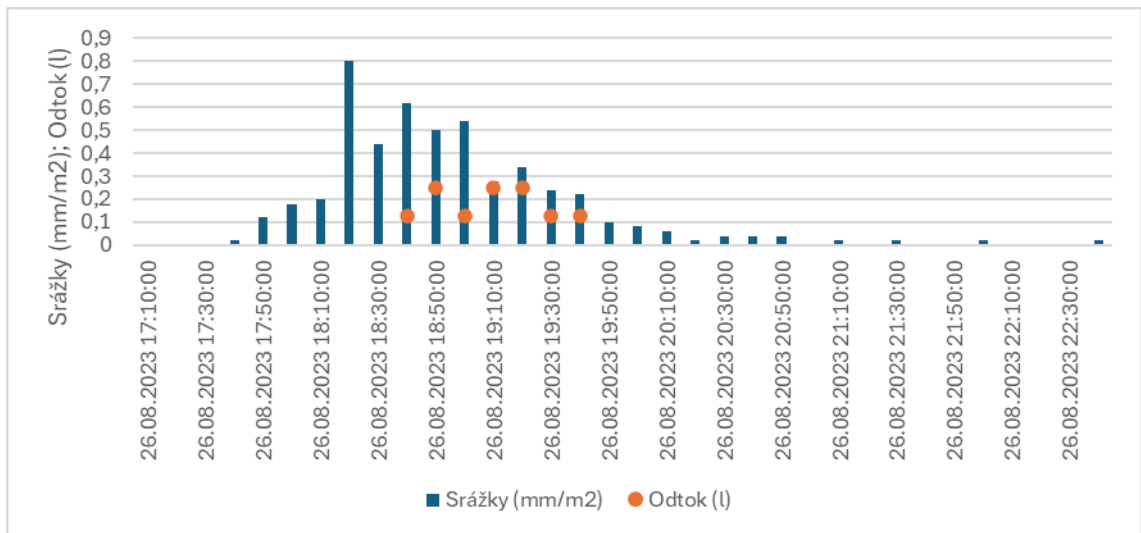
Při analýze těchto dat byla zjištěna velká variabilita odtokových událostí, avšak z grafů je jasné, že odtok většinou vzniká ihned při dosažení maximální intenzity dešťové

srážky, případně u významnějších odtoků při nejvyšších intenzitách deště dochází ihned k největšímu odtoku.



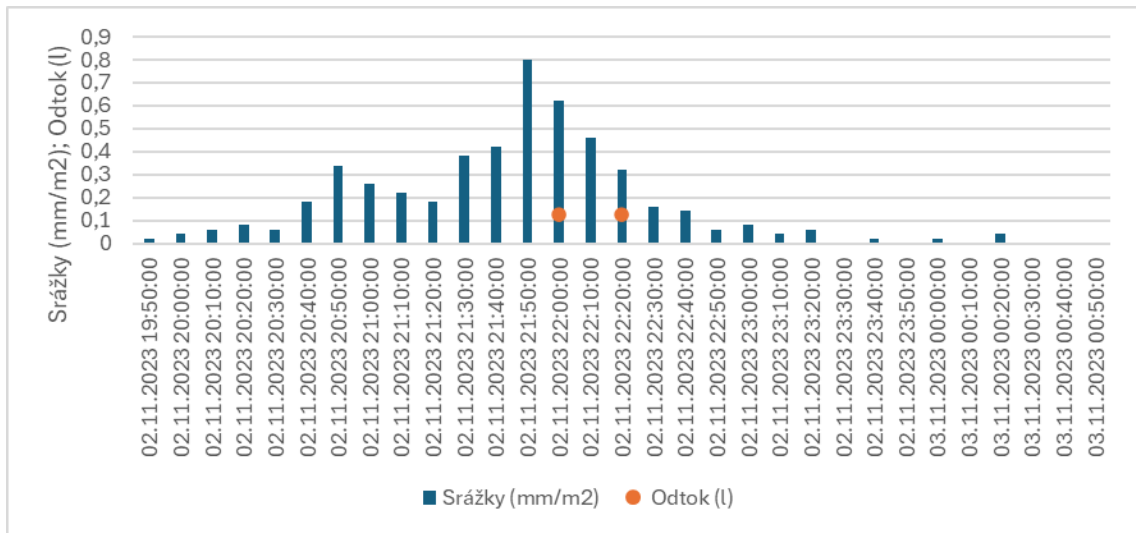
Obr. 20 Odtoková událost z 30. července 2023

Zdroj: vlastní zpracování



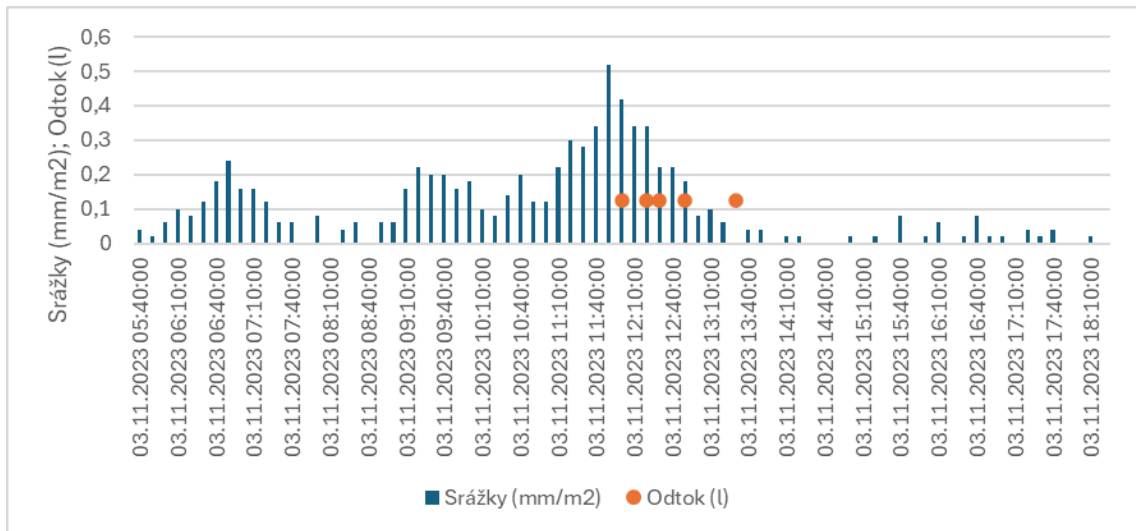
Obr. 21 Odtoková událost z 26. srpna 2023

Zdroj: vlastní zpracování



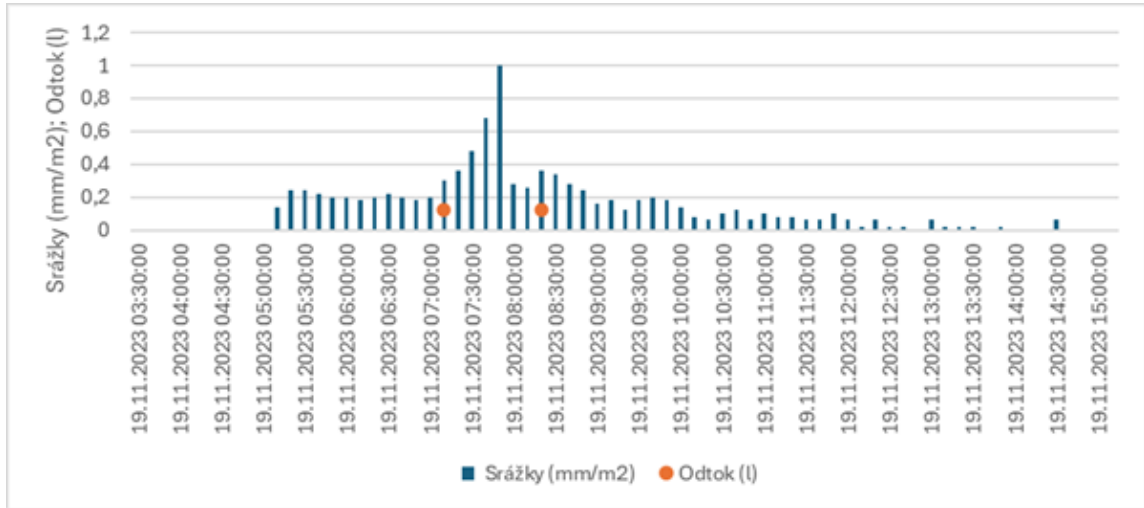
Obr. 22 Odtoková událost z 2. listopadu 2023

Zdroj: vlastní zpracování



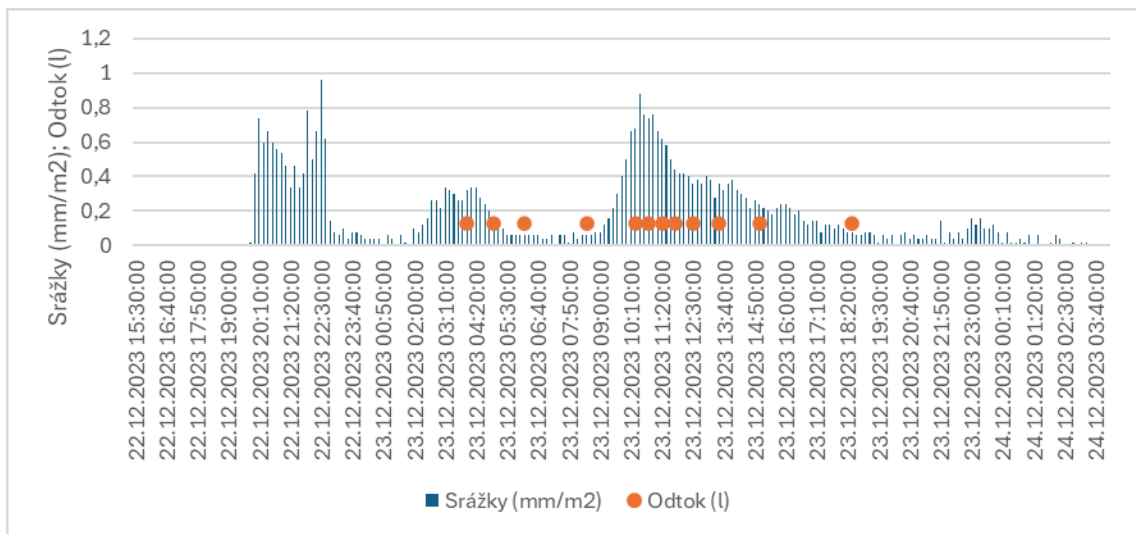
Obr. 23 Odtoková událost z 3. listopadu 2023

Zdroj: vlastní zpracování



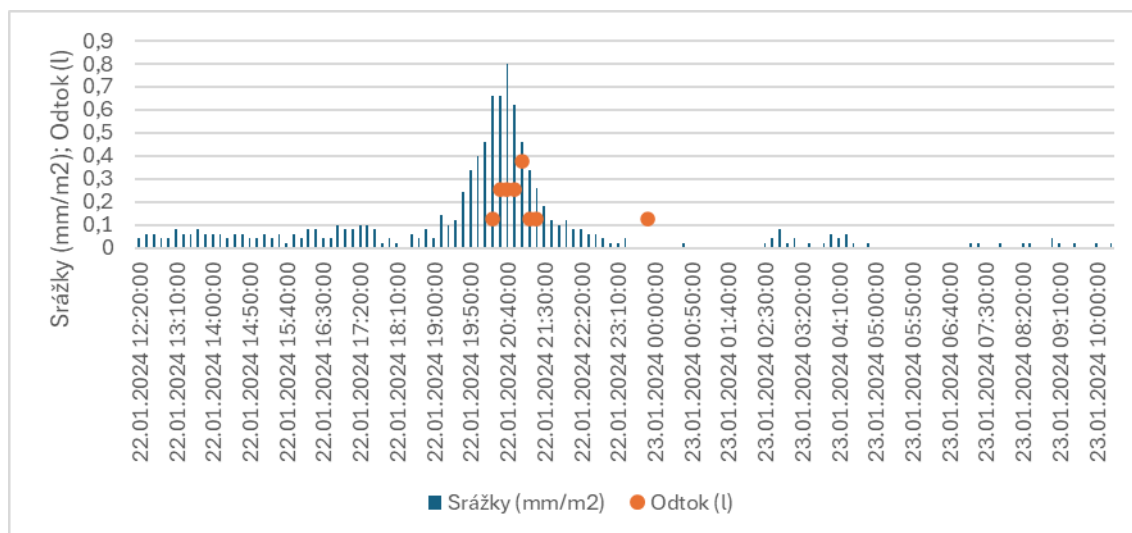
Obr. 24 Odtoková událost z 19. listopadu 2023

Zdroj: vlastní zpracování



Obr. 25 Odtoková událost z 23. prosince 2023

Zdroj: vlastní zpracování

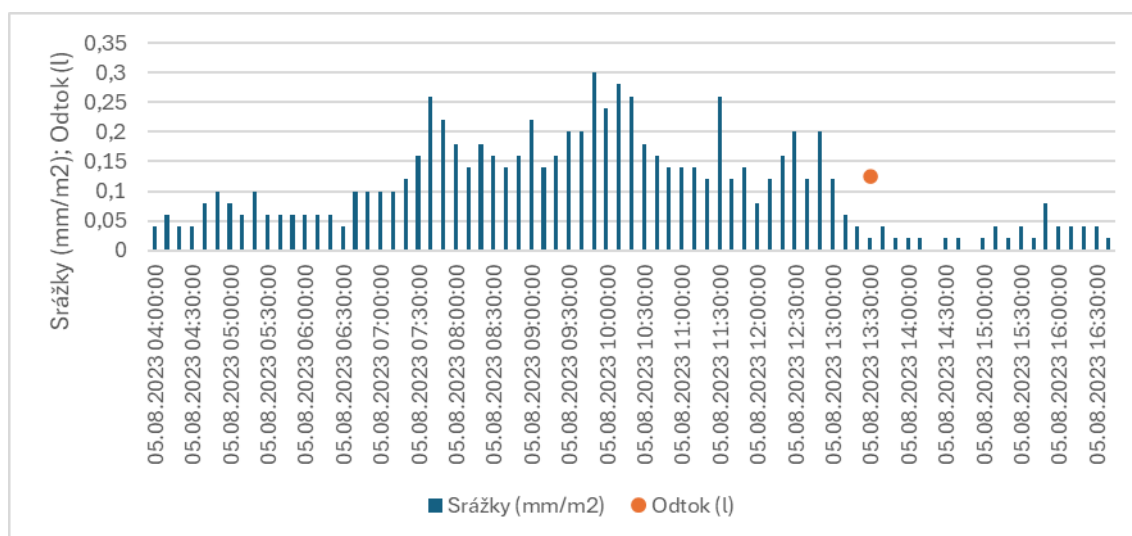


Obr. 26 Odtoková událost z 22. ledna 2024

Zdroj: vlastní zpracování

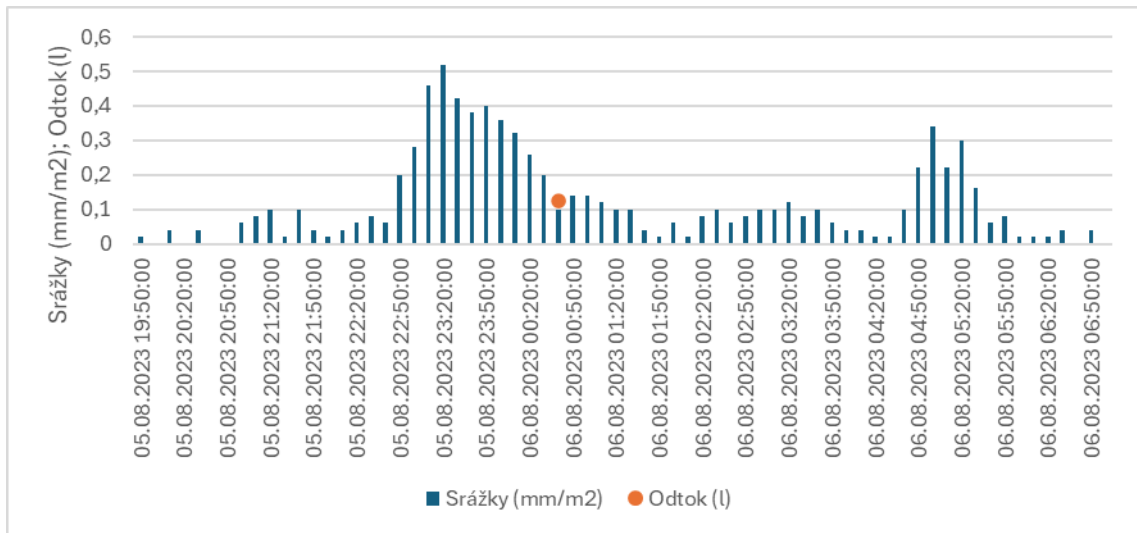
Události do 0,126 l

I když bylo celkově ve smrkovém porostu detekováno šestnáct událostí, v šesti z nich došlo pouze odtoku velmi malého neurčitého množství, při kterém došlo pouze jedenkrát převážení klapacího zařízení. Tyto události se staly 5. srpna 2023; 6. srpna 2023; 7. srpna 2023; 22. října 2023; 5. listopadu 2023 a 18. dubna 2024. Z malých odtoků je zřejmé, že pro uskutečnění vzniku odtoku je nutné buď relativně velký objem srážkové vody, jako tomu je například 5. srpna 2023 nebo vysoká intenzita srážky, která byla 22. října 2023.



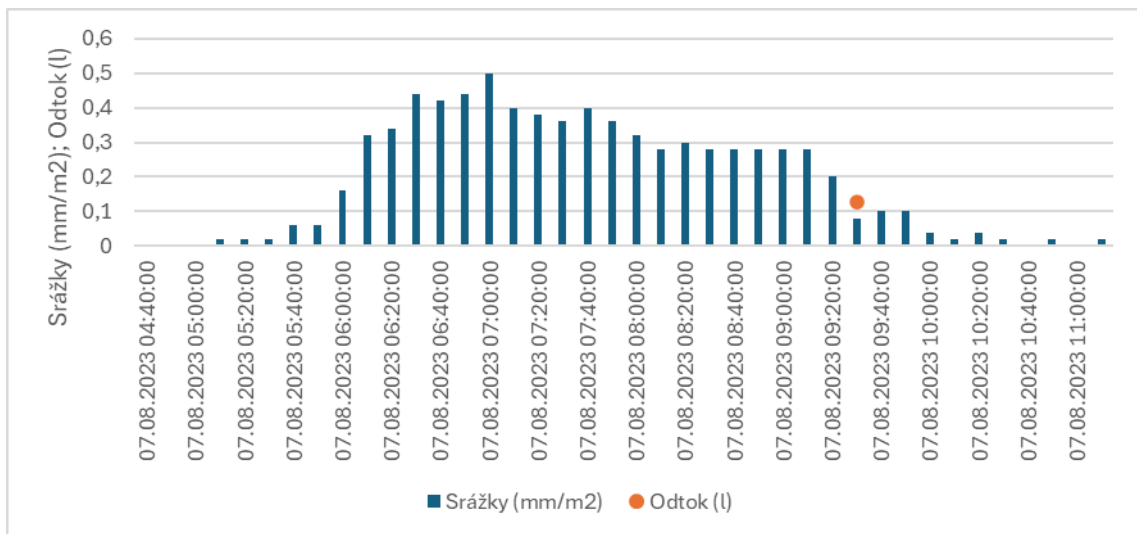
Obr. 27 Odtoková událost z 5. srpna 2023

Zdroj: vlastní zpracování



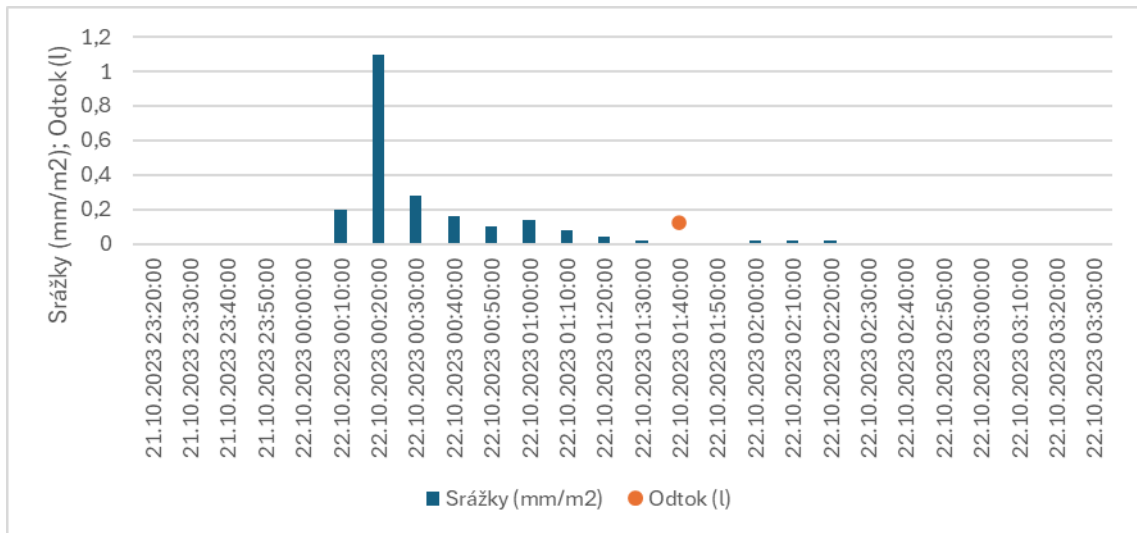
Obr. 28 Odtoková událost z 6. srpna 2023

Zdroj: vlastní zpracování



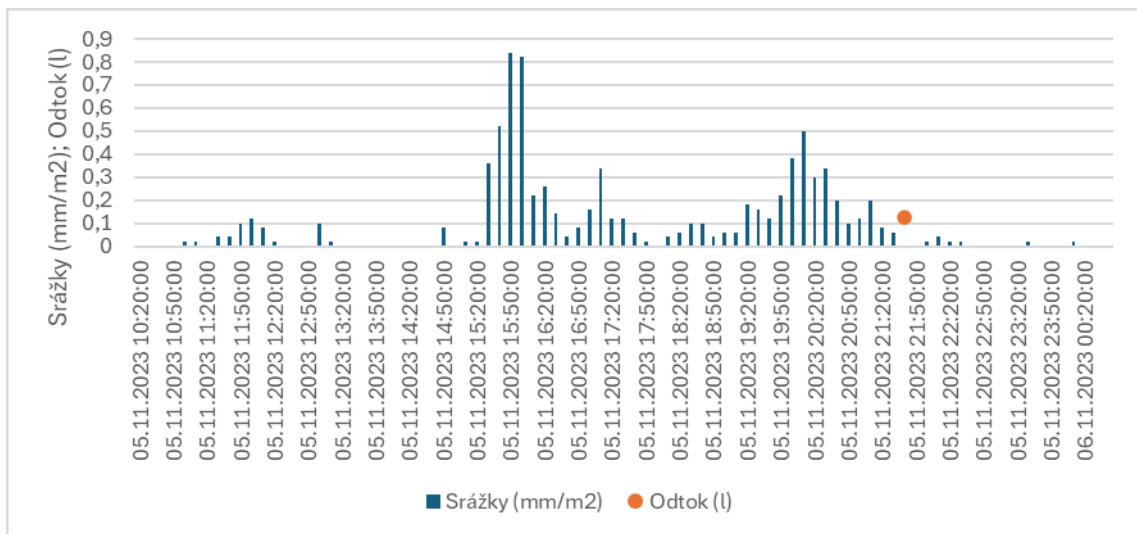
Obr. 29 Odtoková událost z 7. srpna 2023

Zdroj: vlastní zpracování



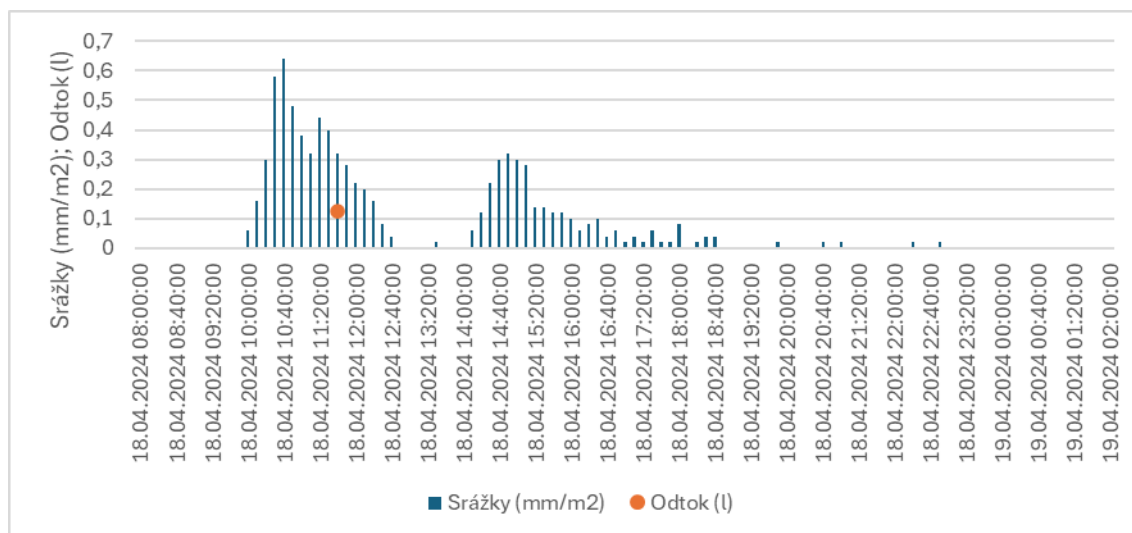
Obr. 30 Odtoková událost z 22. října 2023

Zdroj: vlastní zpracování



Obr. 31 Odtoková událost z 5. listopadu 2023

Zdroj: vlastní zpracování



Obr. 32 Odtoková událost z 18. dubna 2024

Zdroj: vlastní zpracování

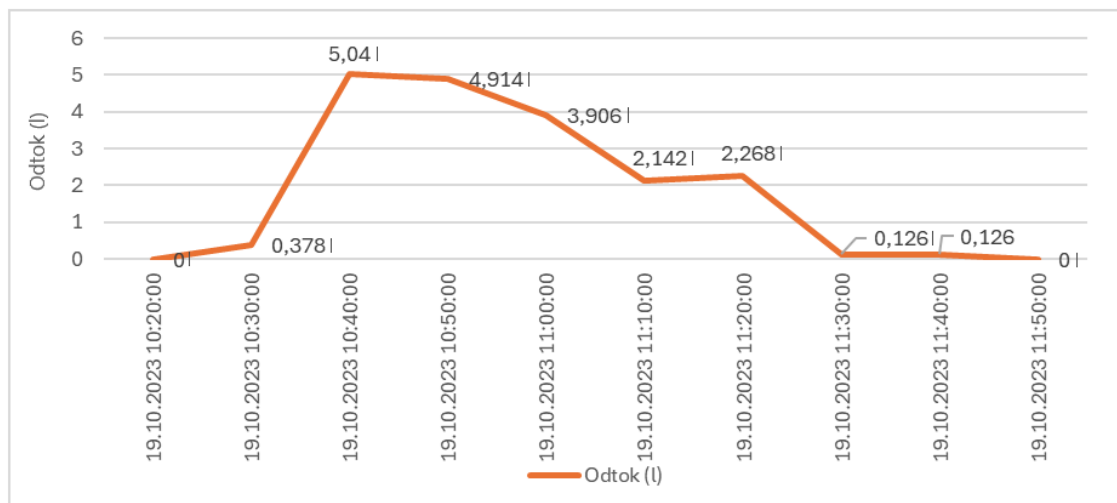
7.2 Umělé odtokové události

V rámci této práce byly taktéž provedeny 2 fiktivní srážkové události. První srážková událost byla koncipována k dosažení intenzity 60 mm/h/m^2 , druhá byla navržena na intenzitu 110 mm/h/m^2 .

7.2.1 První experiment

První experiment byl proveden 19. října 2023, přičemž se začalo skrápět ve smrkovém porostu v 10:26. Před samotným zavlažováním byla půdní objemová vlhkost 16 %, avšak ihned po začátku zavlažování se vlhkost zvýšila na 59 %.

Již v prvních čtyřech minutách srážky se vytvořil odtok. Dále v následujících desetiminutových intervalech docházelo k relativně vysokému odtoku, avšak v průběhu zalévání se objem odečtené vody snižoval. Umělé zavlažování skončilo v 11:12, přičemž v intervalu od 11:10 do 11:20 ještě odteklo poměrně významné množství vody. Následně po ukončení experimentu již odtok prakticky neprobíhal. Celkově odteklo 18,9 litru ($4,725 \text{ mm/m}^2$) vody, což je 12,6 % z celkového objemu vody, které bylo na území skrápěno.



Obr. 33 Umělé zavlažování 19. října 2023 ve smrkovém porostu

Zdroj: vlastní zpracování

Oproti tomu v bukovém lese byla dodržena stejná intenzita, jako u smrkového porostu, avšak zde nedošlo k žádnému odtoku. Sice dle půdních čidel došlo k nárůstu půdní objemové vlhkosti z 30 % na 70 %, ale odvodňovací plechy zůstaly suché.

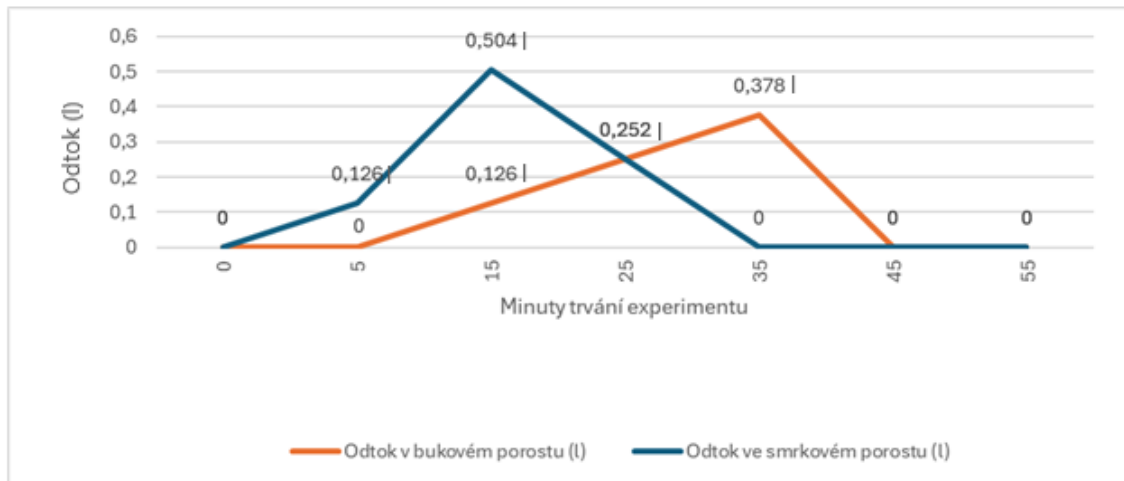
7.2.2 Druhý experiment

Po zkušenosti z minulého experimentu byl druhý experiment koncipován s myšlenkou vytvoření daleko vyšší intenzity, přičemž pomocí konví byla simulována srážka o intenzitě 110 mm/hod/m².

Ve smrkovém porostu experiment započal v 12:05, v době, kdy půdní objemová vlhkost byla 15 %, avšak ihned po zahájení skrápění vystoupala půdní vlhkost na 55 %. Podobně jako při minulém experimentu i zde prakticky ihned po zahájení skrápění vznikl odtok. Hlavním rozdílem však byl objem samotného odtoku, jelikož i když křivka odtokové události je podobná, velmi se liší objem celkové odtečené vody, poněvadž celkově odteklo pouze 0,882 l, tedy 0,05 mm/m². Experiment trval do 12:40 tj. 35 minut a po skončení experimentu již žádný odtok neprobíhal a z 250 litrů vody, která byla skrápěna odteklo do odvodňovacích plechů 0,35 %

V bukovém porostu byly veškeré parametry experimentu shodné jako ve smrkovém porostu, podobně jako u smrkového porostu i zde půdní vlhkoměry okamžitě zareagovaly na změnu objemové půdní vlhkosti, přičemž vlhkost se zvýšila z 31 % na 69 %. I přes to, že odteklo podobné množství vody – konkrétně 0,756 litrů je zde patrný trend opoždění odtoku, jelikož první klapnutí proběhlo až v intervalu od 5 do

15 minut po začátku skrápění a nejvyšší odtok byl zaznamenán až na konci simulovaného deště v době, kdy již ve smrkovém lese žádná voda neodtékala. Avšak dle pozorování experimentu je nutné zmínit, že odtečená voda pochází především z povrchového odtoku a podobně jako u smrkového porostu i zde z celkového množství skrápěné vody odteklo pouze 0,3 % vody.



Obr. 34 Umělé zavlažování 29. června 2024

Zdroj: vlastní zpracování

8 Diskuze

I přes několik případových studií, které se věnovaly přímo rozdílům odtoku mezi bukovým a smrkovým lesem má tato práce několik specifík, které se vyjímají a stěžují porovnávání výsledků.

Prvním rozdílem je zaměření se pouze na svrchní část půdního profilu, přičemž většina prací se věnuje hlubším vrstvám horizontu, popřípadě pokud ze sledovaného profilu výzkumy sledují více úrovní, ten nejsvrchnější odvodňovací plech je v daleko větší hloubce než v této práci. Druhým rozdílem je sklon experimentálního území, které v případě této práce je okolo 10 %, avšak řada nalezených studií byly prováděny ve strmějších svazích. Posledním rozdílem je celkové provedení experimentu. Cílem této práce byla analýza odtoků vzniklých z přírodních srážkových událostí, oproti tomu ostatní výzkumy volily cestu umělého zavlažování s cílem dosažení extrémní intenzity.

Všechny tyto rozdíly mají predispozici k větším podpovrchovým odtokům, než mají výsledky této práce.

Jediný nalezený experiment, který se věnoval svrchní části půdního profilu je výzkum Holzmann a Sereininga (1997), který mimo jiné separoval podpovrchový odtok v hloubce 0–20 cm. Z tohoto výzkumu je zřejmé, že rozdíly v bukovém a smrkovém lese jsou v této vrstvě minimální, přičemž v obou experimentálních územích docházelo v průběhu roku k daleko většímu odtoku než v mé práci. Jelikož v rámci experimentu zkoumali půdní profil ve více úrovních až do 160 cm, dokázali stanovit, že v této svrchní části odtéká 70 % veškerého podpovrchového odtoku, což se příliš neshoduje s výsledky této práce, kde se ze zkušeností z umělého zavlažování většina vody u obou porostů nejspíše vsakuje do hlubších vrstev. Důvodem je pravděpodobně skutečnost, že experiment (Holzmann a Sereining, 1997) byl prováděn ve 40 % svahu, a tak srážková voda se nestihla vsáknout do hlubších vrstev a odtékala primárně ve svrchní části odtoku a zároveň kvůli dynamičnosti takto strmého svahu se nejspíše odmazaly rozdíly mezi bukovým a smrkovým porostem.

O tom, že je sklonitost pozorovaného svahu zásadní dokládá i výzkum Hümana et al. (2011), kteří měli podobný sklon území jako byl vybrán v mé práci a nejspíše kvůli tomuto faktoru měli v rámci umělých zavlažování velmi nízké, na nějakých lokalitách dokonce nulové odtokové události.

V mé práci ze srážkových událostí, při kterých došlo k odtoku v bukovém i smrkovém lese je zřejmé, že obecně větší objem vody odtéká ve smrkovém lese. Toto tvrzení se shoduje s ostatními výzkumy nehledě na svah území, intenzitu či objem dané srážkové události. Dle Josta a Weilera (2006), kteří uměle zavlažovali o shodné intenzitě své experimentální území došli k závěru, že ve smrkovém lese většina vody odtekla v hloubce do 40 cm, kdežto v bukovém lese se voda infiltrovala do hlubších vrstev a odtékala především v této části půdního profilu, konkrétně do hloubky 80 cm. Tato vrstva je tedy daleko hlouběji, než byla v mém výzkumu zkoumána a je to tedy nejspíše důvod absence odtoku nejen v prvním experimentu umělého zavlažování, ale také v průběhu celého roku, kdy docházelo pravidelně k odtoku ve smrkovém porostu.

Zároveň ze společných odtokových událostí, které byly jak v bukovém, tak i v smrkovém lese, popřípadě i v rámci druhého umělého zavlažování vyšlo, že odtoková odezva ve smrkovém porostu je daleko rychlejší než v bukovém. Rychlostem odezvy se zabýval výzkum Nordmanna et al. (2009), který taktéž potvrdil že bukové, popřípadě smíšené listnaté lesy mají daleko delší odtokovou odezvu.

Vyšší odtoková odezva, pozorovaná v prvním experimentu umělého zadeštění, mohla být způsobena časovou proměnlivostí hydraulických vlastností půdy v průběhu sezóny. Zejména se jedná o vyšší nasycenou hydraulickou vodivost, která byla v letních měsících pozorována řadou autorů (Bodner a Klaasen, 2008; Zhou et al., 2008; Schwen et al., 2011). Na zájmovém území byla také v roce 2022 měřena nasycená hydraulická vodivost v průběhu jednoho roku jednoválcovým infiltrometrem a bylo zjištěno, že v letních měsících je nasycená hydraulická vodivost zhruba 2,5krát vyšší než měsících podzimních a zimních (Šípek et al., nepublikováno). V říjnu tedy může mohla tedy být nižší nasycená hydraulická vodivost důvodem vyšší odtokové odezvy i při nižší intenzitě srážky.

9 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na sledování formování mělkého podpovrchového odtoku ze svahu na dvou lokalitách s odlišným vegetačním krytem. První lokalita byla pokryta smrkovou a druhá bukovou monokulturou. Na obou místech byl sledován mělký podpovrchový odtok na rozhraní horizontů Ah a Bv/Bvs. Kontinuální pozorování přirozeného odtoku probíhalo od července roku 2023 do dubna roku 2024. Experiment byl doplněn dvěma pozorováními, kdy odtok byl iniciován umělým zadeštěním o dvou velmi vysokých intenzitách deště.

V rámci zájmového období byly zachyceny dvě přirozené odtokové události v bukovém porostu a celkově šestnáct událostí ve smrkovém porostu, přičemž události, které vznikly v bukovém porostu vznikaly vždy v době, kdy taktéž probíhal mělký podpovrchový odtok v porostu smrkovém. Odtok ve svrchní části půdního profilu tedy vzniká snáze ve smrkovém lese než v lese bukovém. Zároveň ze společných událostí a z umělého zavlažování lze říci, že odtoková odezva v bukovém porostu je pomalejší a oproti tomu ve smrkovém lese maximální odtok vzniká prakticky ihned, v době, kdy na experimentální území dopadá nejintenzivnější efektivní srážka.

Nebyla nalezena žádná souvislost mezi počátečním nasycením půdy vodou a vznikem mělkého podpovrchového odtoku. Oproti tomu objem příčinné srážky a její intenzita měly stěžejní význam na vznik odtokové události, případně i na množství odečtené vody. Bylo zjištěno, že nejvýznamnější odtokové události pochází buď z dešťů, které měly vysokou intenzitu, jako je například událost z 14. srpna 2023, kdy intenzita deště byla až okolo 30 mm/m²/hod nebo celkový objem srážky byl výjimečně velký, příkladem takové události je srážka z 10. – 11. prosince 2023, při které napršelo ve smrkovém i bukovém lese přes 25 mm/m² vody. Tyto události jsou zároveň jediné odtokové události, při kterých došlo k odtoku i v bukovém porostu, přičemž v rámci smrkového porostu jsou tyto odtoky nejvyšší z celého pozorovaného období.

Pokud budou nadále přetrvávat myšlenky a kroky přibližování lesů k přirozenější skladbě v České republice, tak je zřejmé, že tyto změny budou mít vliv nejen na celkový vodní režim, ale také na samotný půdní odtok. Bukový porost, který díky svým preferenčním cestám umožňuje snazší vertikální pohyb vody do hlubších vrstev půdy může potenciálně jednodušeji dotovat podzemní vody, případně alespoň zvyšovat dobu

retence vody v krajině. Zároveň díky pomalejší odtokové odezvě se bukový porost stává vhodnějším porostem v kontextu změny klimatu, jelikož nejspíše bude v budoucnu docházet k většímu množství extrémních srážek o vysoké intenzitě.

Seznam použité literatury

- BERG, Björn a Charles MCCLAUGHERTY, 2008. Plant litter : decomposition, humus formation, carbon sequestration. 2. Springer. ISBN 9783540749226.
- BERGER, Torsten W, Herbert HAGER, 2000. Physical top soil properties in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. *Forest Ecology and Management*. 136(1-3), 159-172.
- BERGER, Torsten W., Hubert UNTERSTEINER, Helmut SCHUME a Georg JOST, 2008. Throughfall fluxes in a secondary spruce (*Picea abies*), a beech (*Fagus sylvatica*) and a mixed spruce-beech stand. *Forest Ecology and Management*. 255(3-4), 605-618.
- BLÁHA, Jaromír, Zuzana ŠTROUFOVÁ, Zdeněk POŠTULKA a Vojtěch KOTECKÝ, 2020. Druhové složení českých lesů [online]. Hnutí DUHA [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: https://hnutiduha.cz/sites/default/files/publikace/2020/04/druhova_skladba_www.pdf
- BOGGS, Johnny, Ge SUN a Steven MCNULTY, 2006. Effects of Timber Harvest on Water Quantity and Quality in Small Watersheds in the Piedmont of North Carolina. *Journal of Forestry*. 114(1), 27-40.
- BORMANN, Helge a K. KLAASSEN, 2008. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. *Geoderma*. 145(3-4), 295-302.
- CASSAGNE, Nathalie, Marie-Claude BAL-SERIN, Charles GERS a Thierry GAUQUELIN, 2004. Changes in humus properties and collembolan communities following the replanting of beech forests with spruce. *Pedobiologia*. 48(3), 267-276.
- ČERNÍKOVÁ, Zuzana, 2011. Analýza potenciálního rozšíření dřevin v lesích Šumavy. České Budějovice. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Karel Matějka, CSc.
- ČERNOHOUS, Vladimír a František ŠACH, 2023. Funkce lesa a voda. In: *Voda v lesních ekosystémech*. Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, s. 9-15. ISBN 978-80-7417-246-5.
- ČHMÚ, Slovníček základních pojmů [online]. Praha: CHMI, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/zmena-klimatu/slovnicek-zakladnich-pojmu>
- ČÍŽKOVÁ, Pavla, 2018. Neuchopitelné bučiny Šumavy. *Šumava*. 45(1), 8-9.
- Evapotranspiration and the Water Cycle. U.S. Geological Survey [online]. Reston: Water Science School, 2018 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/evapotranspiration-and-water-cycle>
- FALIŃSKI, Janusz B. a Krystyna FALIŃSKA, 1986. *Vegetation Dynamics in Temperate Lowland Primeval Forests*. Springer Dordrecht. ISBN 978-94-010-8631-8.

- FENCL, Josef, 1980. Z dějin lesů a lesního hospodářství střední Šumavy. In: Sborník vlastivědných prací k 650. výročí města Kašperské Hory. Kašperské hory: MěstNV Kašperské Hory, s. 171-176. ISBN neuvedeno.
- FIALA, Přemysl, Miroslav TESAŘ, Pavla JIRSOVÁ a Lukáš VLČEK, 2019. Půdoznalecké dny: Půda, nedílná součást ekosystémů. Srní, 1-11. Exkurzní průvodce.
- FLORIANCIC, Marius G., Scott T. ALLEN, Raphael MEIER, Lucas TRUNIGER, James W. KIRCHNER a Peter MOLNAR, 2023. Potential for significant precipitation cycling by forest-floor litter and deadwood. *Ecohydrology*. 16(2), 1-16.
- GAUQUELIN, Thierry, Charles GERS a Louis DEHARVENG, 1996. Physico-chemical heterogeneity of superficial soil layers in conifer plantations versus original broad leaf forests in Ariège (Pyrenees, France). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 27(9-10), 2361-2380.
- HEIL, Bálint, Dávid HEILIG a Gábor KOVÁCS, 2020. Comparison of Physical, Chemical and Biological Soil Properties under Norway Spruce, European Beech and Sessile Oak—a Case Study. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica*. 16(1), 51-63.
- HILL, Mark Oliver, 1987. Opportunities for vegetation management in plantation forests. In: *Environmental Aspects of Plantation Forestry in Wales* [online]. s. 64-69 [cit. 2024-05-29]. Dostupné z: <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/4989/1/2203.pdf>
- HOLZMANN, Hubert a Norbert SEREINIG, 1997. In situ measurements of hillslope runoff components with different types of forest vegetation. In: *FRIEND'97-Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Managemen*. International Association of Hydrological Sciences 1997. Wallingford: IAHS Press, s. 317-324. ISBN 1-901502-35-X. ISSN 0144-7815.
- HRUŠKA, Jakub, Filip OULEHLE a Anna LAMAČOVÁ, 2021. Is the hydrological balance in forest catchment areas influenced more by climatic or vegetation drivers? *Nature Conservation*. 13(3), 12-22.
- HUBENÝ, Pavel, 2010. Šumavské smrky I. *Šumava*. 47(2), 12-13.
- HÜMANN, Marco, Gebhard SCHÜLER, Christoph MÜLLER, Raimund SCHNEIDER, Margret JOHST a Thomas CASPARI, 2011. Identification of runoff processes – The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. *Journal of Hydrology*. 409(3-4), 637-649.
- CHANG, Mingteh, 2013 *Forest Hydrology: An introduction to water and forests*. 3. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1439879948.
- JÁČKA, Lukáš, Marta KUŽELKOVÁ, Martin KOVÁŘ, Václav HRADILEK, Jan KOMÁREK a Petr MÁCA, 2022. Vliv buku, smrku a modřínu na vlhkostní a teplotní režim lesní půdy – první rok monitoringu na lokalitě Amálie. In: *Lesická hydrologie 2022* [online]. Kouty [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: https://www.vulhm.cz/files/uploads/2022/10/18_Jacka-et-al._Hydrologie-2022.pdf
- JOHNSON, Mark S., Georg JOST a Tadashi TANAKA, 2011. Ecohydrology and Biogeochemistry of the Rhizosphere in Forested Ecosystems. In: *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*. Springer, s. 483–498. ISBN 978-94-007-1362-8.

- JOST, Georg a Markus WEILER, 2006. The Influence of Tree Species on Subsurface Stormflow at the Hillslope Scale. Dostupné také z:
https://www.researchgate.net/publication/253519373_The_Influence_of_Tree_Species_on_Subsurface_Stormflow_at_the_Hillslope_Scale
- JOST, Georg, Helmut SCHUME, Herbert HAGER, Gerhard MARKART a Bernhard KOHL, 2012. A hillslope scale comparison of tree species influence on soil moisture dynamics and runoff processes during intense rainfall. *Journal of Hydrology*. 420-421, 112-124.
- KANTOR, Petr, 1981. Intercepce horských smrkových a bukových porostů. *Lesnictví*. 27(2), 171-192.
- KANTOR, Petr, 1983. Intercepční ztráty smrkových a bukových porostů. *Vodohospodářský časopis*. 31(6), 643 - 651.
- KANTOR, Petr, 1987. Evaporace z povrchu půdy a z přízemní vegetace ve smrkových a bukových lesích. *Vodohospodářský časopis*. 35(1), 81-93.
- KANTOR, Petr, 1990. Základní vazby celkového výparu a odtoku vody ze smrkových a bukových lesů. *Vodohospodářský časopis*. 38(3), 327-348.
- KANTOR, Petr, František ŠACH a Vladimír ČERNOHOUS, 2011. Vodní režim smrku a buku v Orlických horách ve vegetačních obdobích 2009 a 2010. In: *Hydrologie malého povodí*. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AVČR, s. 219-224. ISBN 978-80-02-02290-9.
- KAVKA, Petr, Luděk STROUHAL a Miloslav MÜLLER, 2019. Návrhové srážky pro potřeby hydrologického modelování: Rybníky 2019. FSv ČVUT v Praze.
- KIRKBY, Mike, 1978. *Hillslope Hydrology*. Wiley. ISBN 047199510X.
- KOSTIĆ, Olga, Miroslava MITROVIĆ, Gordana GAJIĆ a Marija PAVLOVIĆ, 2012. The effects of forty years of spruce cultivation in a zone of beech forest on mt. Maljen (Serbia). *Archives of Biological Sciences*. 64(3), 1181-1195.
- KOZEL, Ján, 2021. Jak se změnilы lesy v národním parku Šumava. *Lesnická práce: časopis pro lesnicko-dřevařskou vědu a praxi*. Písek: Lesnická práce: Státní zemědělské nakladatelství: *Matice lesnická*, 100(5), 14-16. ISSN 0322-9254.
- KRAVKA, Miroslav, 2009. *Základy lesnické a krajinářské hydrologie a hydrauliky*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 978-80-7375-338-2.
- KREČMER, Vladimír, Petr KANTOR, František ŠACH, Vladimír ŠVIHLA a Vladimír ČERNOHOUS, 2003. *Lesy a povodně : souhrnná studie*. Ministerstvo životního prostředí. ISBN 80-7212-255-X.
- KUČERA, Jiří a Vít ŠRÁMEK, 2022. *Lesnická hydrologie - věda a praxe: Sborník abstraktů z konference*. In: *Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti [online]*. Kouty: VULHM, [cit. 2023-08-20]. Dostupné z:
https://www.vulhm.cz/files/uploads/2022/10/Sbornik-abstraktu_Hydrologie-2022.pdf
- KULASOVÁ, Alena, Šárka BLAŽKOVÁ, Lukáš VLČEK a Bohumír JANSKÝ, 2019. Sledování formování odtoku na svazích Jizerských hor a Šumavy pomocí stopovacích experimentů, které jsou podkladem pro použití modelu MIPs. *VTEI*. (3), 23-30.

- LENOCH, Josef, 2014. Dějiny lesního hospodářství a dřevozpracujícího průmyslu [online]. 1. Brno: Mendelova univerzita v Brně [cit. 2023-04-28]. ISBN neuvedeno. Dostupné z: https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/skripta/Dejiny_lesniho_hospodarstvi_a_drevozpracujiciho_prumyslu_2014_03_31.pdf
- MARTAN, Petr, 2008. Šumava umírající a ohrožená: co je ohroženo? fragmenty divočiny - nebo lesy celé Šumavy a Předhůří?. 1. Čkyně: Komunita pro duchovní rozvoj. ISBN 978-80-904111-0-4.
- MARTAN, Petr, 2011. Suchá opona Šumavy: přeměna krajiny, která se neměla stát : 1991-2011. 1. Čkyně: Komunita pro duchovní rozvoj. ISBN 978-80-904111-5-9.
- MATĚJKA, Karel, 2018. Výzkum na Šumavě. Information and data systems [online]. Praha: infodatasys.cz [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.infodatasys.cz/sumava/default.htm>
- NĚMEČEK, Karel, 2023. Elektronický taxonomický klasifikační systém půd ČR [online]. [cit. 2023-09-29]. Dostupné z: <https://klasifikace.pedologie.czu.cz/index.php?action=showFormyNadloznihoHumusu>
- NIHLGÅRD, Bengt, 1971. Pedological Influence of Spruce Planted on Former Beech Forest Soils in Scania, South Sweden. *Oikos*. 22(3), 302-314.
- NORDMANN, Bastian, Axel GÖTTLEIN a Franz BINDER, 2009. Influence of different tree species on runoff formation – an example of a catchment in the low-mountain range Franconian Forest, Germany. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. 53(2), 80-96.
- NOŽIČKA, Josef, 1957. Přehled vývoje našich lesů. 1. Praha: Státní zemědělské nakladatelství. ISBN neuvedeno.
- NOŽIČKA, Josef, 1972. Původní výskyt smrku v českých zemích. 1. Praha: Státní zemědělské nakladatelství. ISBN neuvedeno.
- PELÍŠEK, 1964. Lesnické půdoznalství. 2. Státní zemědělské nakladatelství. ISBN neuvedeno.
- PERKOVIĆ, Ivan, Nikola PERNAR, Vabor ROJE, Darko BAKŠIĆ a Matej BANEKOVIĆ, 2019. Impacts of Norway spruce (*Picea abies* L., H. Karst.) stands on soil in continental Croatia. *IForest - Biogeosciences and Forestry*. 12(6), 511-517.
- PEŘINA, Vladimír, 1973. Možnosti víceúčelového hospodaření s cíli produkčními a vodohospodářskými na příkladu Orlických hor. In: *Práce VÚLHM*. Opočno, s. 69-118
- POBĚDINSKIJ, Avramij Vladimirovič a Vladimír KREČMER, 1984. Funkce lesů v ochraně vod a půdy. Státní zemědělské nakladatelství. ISBN neuvedeno.
- PRAŽÁK, Josef, Miloslav ŠÍR a Miroslav TESAŘ, 1994. Estimation of plant transpiration from meteorological data under conditions of sufficient soil moisture. *Journal of Hydrology*. 162(3-4), 409-427.
- RIEDL, Otakar, 1973. Lesotechnické meliorace. Státní zemědělské nakladatelství. ISBN 0444996133.
- ROTHER, Andreas, Karl KREUTZER a Helmut KÜCHENHOFF, 2002. Influence of tree species composition on soil and soil solution properties in two mixed spruce-beech stands with contrasting history in Southern Germany. *Plant and Soil*. 240, 47-56.

- RÖTZER, Thomas, Karl-Heinz HÄBERLE, Rainer MATYSSEK, Christian KALLENBACH, Gerhard SCHÜTZE a Hans PRETZSCH, 2017. Tree species and size drive water consumption of beech/spruce forests - a simulation study highlighting growth under water limitation. *Plant and Soil*. 418(1), 337–356.
- SCHLESINGER, William H. a Scott JASECHKO, 2014. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*. 189-190(1), 115-117.
- SCHUME, Helmut, Georg JOST a Klaus KATZENSTEINER, 2003. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)–European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand. *Geoderma*. 112(3-4), 273-287.
- SCHWEN, Andreas, Gernot BODNER, Peter SCHOLL, Graeme BUCHAN a Willibald LOISKANDL, 2011. Temporal dynamics of soil hydraulic properties and the water-conducting porosity under different tillage. *Soil and Tillage Research*. 113(2), 89-98.
- SIDLE, Roy C., Tomonori HIRANO, Takashi GOMI a Tomomi TERAJIMA, 2007. Hortonian overland flow from Japanese forest plantations—an aberration, the real thing, or something in between? *Hydrological Processes*. 21(23), 3237-3247.
- SKAGGS, Richard W., G.M. CHESCHEIR, G. P. FERNANDEZ a Devendra M. AMATYA, 2011. Effects of Land Use on Soil Properties and Hydrology of Drained Coastal Plain Watersheds. *ASBE*. 54(4), 0357-1365.
- SNĚHOTA, Michal, Matej DUBOVEC, Michal DOHNAL a Milena CÍSLEROVÁ, 2009. Retention Curves of Soil from the Liz Experimental Catchment Obtained by three Methods. *Soil and Water Research*. 4(2), 6-13.
- SUN, Ge, Jean-Christophe DOMEK a Devendra M. AMATYA, 2016. Forest Evapotranspiration: Measurement and Modelling at Multiple Scales. In: AMATYA, Devendra M., Thomas M. WILLIAMS, Leon BREN a Carmen de JONG, ed. *Forest Hydrology: Processes, management, assessment*. 1. Boston: CABI, s. 32-50. ISBN 9781780646602.
- SYDES, C. L. a John Philip GRIME, 1981. Effects of Tree Leaf Litter on Herbaceous Vegetation in Deciduous Woodland: II. An Experimental Investigation. *Journal of Ecology*. 69(1), 249-262.
- ŠÍPEK, Václav a Miroslav TESAŘ, 2015. Validation of a mesoscale hydrological model in a small-scale forested catchment. *Hydrology Research*. 47(1), 27-41.
- ŠKODA, Stanislav a Peter PÁLENSKÝ, 2004. Nález žulového masivku u Albrechtce na Zdíkovsku, Šumava. *Geoscience Research Reports*. 38, 73-75.
- ŠPULÁK, Ondřej, 2023. Sněhové srážky a sníh. In: *Voda v lesních ekosystémech*. Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, s. 33-43. ISBN 978-80-7417-246-5.
- ŠRÁMEK, Vít a Věra FADRHOŇSOVÁ, 2023. Srážky na volné ploše a v lesním porostu. In: *Voda v lesních ekosystémech*. Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, s. 16-32. ISBN 978-80-7417-246-5.
- TESAŘ, Miroslav a Miloslav ŠÍR, 2013. Hydroekologický výzkum na Šumavě. In: *Vodohospodářský bulletin 2013*. České Budějovice: Česká společnost vodohospodářská, s. 9-11. ISSN 1805- 1022.

- TESAŘ, Miroslav, Jaroslav BALEK a Miloslav ŠÍR, 2006. Hydrologický výzkum v povodí Volyňky a autoregulace hydrologického cyklu v povodí Liz. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 54(2), 137-150.
- TRENBERTH, Kevin E., John FASULLO a Jeffrey KIEHL, 2009. Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 90(3), 311–324.
- TUŽINSKÝ, Ladislav, 2000. Spruce and beech forest stands water balance. *Ekológia*. 19(2), 198–210.
- TUŽINSKÝ, Ladislav, 2002. Water regime research of forest soils under forest ecosystems in the period 1970-2000. *Zprávy Lesnického Výzkumu*. 47(2), 61-68.
- ÚRADNÍČEK, Luboš a Jindřich CHMELAR, 1998a. Dendrologie lesnická: Část 2; Listnáče I. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-7157-169-5.
- ÚRADNÍČEK, Luboš a Jindřich CHMELAR, 1998b. Dendrologie lesnická: Část 1; Jehličnany. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-7157-162-8.
- VAVŘÍČEK, Dušan a Aleš KUČERA, 2017. Základy lesnického půdoznalství a výživy lesních dřevin. *Lesnická práce*. ISBN 978-80-7458-103-8.
- VESELÝ, Václav, 1957. *Lesnické meliorace : Určeno pro posluchače fak. lesnické. Státní nakladatelství technické literatury*. ISBN nevedeno.
- VICENA, Ivo, 1995. Kůrovec na Šumavě, historie, současnost a poučení. *Šumava*. 22(7), 15-16.
- VOTRUBOVÁ, Jana, Michal DOHNAL, Tomáš VOGEL, Martin ŠANDA a Miroslav TESAŘ, 2017. Episodic runoff generation at Central European headwater catchments studied using water isotope concentration signals. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 65(2), 1-9.
- WILLIAMS, Thomas M., 2016. Forest Runoff Processes. In: *Forest Hydrology: Processes, Management and Assessment*. CABI, s. 17-31. ISBN 9781780646602.
- ZÁLOHA, Jiří, Marie ERHARTOVÁ a Josef ERHART, 1984. *Šumava od A do Z. 2., dopl. a upravené vyd.* České Budějovice: Jihočeské nakladatelství. ISBN nevedeno.
- ZHOU, Xiaobo, Henry LIN a E.A. WHITE, 2008. Surface soil hydraulic properties in four soil series un different land uses and their temporal changes. *CATENA*. 73(2), 180-188.