

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

DISERTAČNÍ PRÁCE

BRNO 2016

MARTIN SOCHOREC

Mendelova univerzita v Brně
Agronomická fakulta
Ústav výživy zvířat a pícninářství



**Agronomická
fakulta**

**Mendelova
univerzita
v Brně**



**Vliv obhospodařování travních porostů na infiltraci
a povrchový odtok**
Disertační práce

Vedoucí práce:
doc. Ing. Stanislav Hejduk Ph.D.

Vypracoval:
Ing. Martin Sochorec

Brno 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Vliv obhospodařování travních porostů na infiltraci a povrchový odtok vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....
podpis

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat prof. Ing. Františku Hraběti, CSc., který mi při konzultaci diplomové práce nabídl možnost doktorského studia na Ústavu výživy zvířat a pícninářství. Doc. Ing. Stanislavu Hejdukovi, PhD. děkuji za cenné rady, připomínky, inspiraci a především za vedení při psaní této práce. Dále děkuji Ing. Pavlu Knotovi, PhD. za neustálou motivaci a vyvíjený tlak k pokračování v psaní.

Děkuji celému kolektivu Ústavu výživy zvířat a pícninářství za podporu a vytvoření podmínek pro výzkum, zejména paní Haně Jahnové. Pracovníkům Výzkumné pícninářské stanice Ing. Libuši Rosické, Barboře Machové a Mirku Strakovi děkuji za pomoc při ošetřování pokusných ploch a měření povrchových odtoků. Kolektivu Ústavu agrochemie, půdoznalství, mikrobiologie a výživy rostlin děkuji za pomoc při měření a vyhodnocování dat z pokusu v Jimramovských Pavlovicích, především Ing. Jiřímu Jandákovi, CSc. a Jitce Nováčkové.

V neposlední řadě děkuji své rodině, bez jejíž podpory by mé doktorské studium nebylo možné. Největší dík patří mé přítelkyni Ing. Janě Hrabalové, která mi s nekonečnou trpělivostí vytvářela podmínky pro dokončení této práce.

ABSTRAKT

Vliv obhospodařování travních porostů na infiltraci a povrchový odtok

Travní porosty plní v životním prostředí řadu pozitivních funkcí, pokud jsou správně obhospodařovány. Kromě produkce píce je často poukazováno na poskytování řady externalit spojených s jejich hydrologickými funkcemi v krajině. Avšak nadměrná pastva zvířat a velkovýrobní způsob obhospodařování vyvíjí tlak na půdu travních porostů. Výsledkem je zhutnění půdy pod travními porosty a ztráta jejich hydrologicky prospěšných funkcí.

Prvním cílem této práce bylo zhodnocení vlivu využívání travních porostů na fyzikální vlastnosti půdy, infiltraci a nasycenou hydraulickou vodivost. Pokus probíhal v letech 2011-2013 na třech typech travních porostů: louce (LO), sešlapávané pastvině (PA) a travním porostu bez vlivu zhutnění - pod ohradníkem (PN). U porostu bez vlivu zhutnění byla zjištěna průkazně vyšší ($p \leq 0,05$) rychlost infiltrace v první minutě měření ($v_{i(1)} = 34,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) v porovnání s velkovýrobně obhospodařovanou loukou ($12,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) a nadměrně sešlapávanou pastvinou ($7,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Při rozboru fyzikálních vlastností půdy byly zjištěny průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$) mezi variantami, které byly vyjádřeny pro objemovou hmotnost suché zeminy ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) v následujícím pořadí: PA (1,57) > LO (1,42) > PN (1,17) a pro pórovitost (%): PA (40,2) < LO (45,9) < PN (55,3) jako průměr tří let, termínů a hloubek odběru. Varianta bez vlivu zhutnění (PN) dále vykazovala průkazně vyšší ($p \leq 0,05$) nasycenou hydraulickou vodivost K_{fs} ($1,529 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$) než varianty LO ($0,264 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$) a PA ($0,067 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$). Z těchto výsledků vyplývá, že intenzivní využívání travních porostů vede z hlediska půdní hydrologie k několika negativním důsledkům: degradaci fyzikálních vlastností půdy, nadměrnému zhutnění, snižování rychlosti infiltrace, vodní retence a hydraulické vodivosti.

Dalším cílem bylo hodnocení povrchových odtoků z travních porostů (obhospodařovaných intenzivně a extenzivně), pšenice ozimé, silážní kukuřice, brambor a holé půdy. Během vegetačních období (2008-2013) byl zjištěn průkazně nižší ($p \leq 0,05$) průměrný odtokový součinitel u travních porostů (0,013) a pšenice ozimé (0,032) v porovnání s bramborami (0,097); silážní kukuřicí (0,099) a holou půdou (0,138). Travní porosty vykazovaly nejlepší ochranu proti vzniku povrchového odtoku. V zimním období a brzy na jaře (2008/2009-2013/2014) travní porosty ztratily

schopnost bránit vzniku povrchových odtoků a mezi jednotlivými variantami nebyly zjištěny průkazné rozdíly. Průměrný součinitel odtoku byl zjištěn u travních porostů 0,016; ozimé pšenice 0,034; strniště pšenice 0,023; strniště kukuřice a kypré půdy 0,027.

Posledním cílem bylo porovnání rychlosti postupu přeronové vlny u jednotlivých plodin. Z výsledků vyplývá, že travní porosty průkazně prodlužují ($p \leq 0,05$) dobu postupu přeronové vlny. Přeronová vlna z přítoku $0,423 \text{ l.s}^{-1}$ ($25,4 \text{ l.min}^{-1}$) překročila vzdálenost 4 000 mm na travním porostu po 7 minutách a 46 sekundách, u pšenice ozimé po 2 minutách a 47 sekundách a u kukuřice a holé půdy po 23 respektive 26 sekundách.

Klíčová slova: fyzikální vlastnosti půdy, zhutnění půdy, hydroopedologie, louky, pastviny, travní porosty, infiltrace, povrchový odtok, eroze půdy

ABSTRACT

Effect of grassland management on infiltration and surface runoff

Grasslands fulfil a range of positive functions in the environment if they are correctly managed. It is often pointed out that except of the production of forage, grasslands offer many externalities which are connected with their hydrologic functions in environment. However, excess grazing animals and heavy machinery exert pressure on the ground of grasslands. As a result, soil under grasslands can be compacted and they lose their hydrologically positive functions.

The first aim of this thesis was to evaluate the effect of grassland management on soil physics, infiltration rate and saturated hydraulic conductivity. The trial was assessed during the years 2011-2013 in three sward types: meadow (LO), cattle trampled pasture (PA) and uncompacted grassland - under the fence (PN). In uncompacted treatment reached significant higher ($p \leq 0.05$) infiltration rate in first minute ($v_{i(1)} = 34.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) compared to meadow ($12.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) and pasture ($7.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). The analysis of soil physical properties showed significant ($p \leq 0.05$) differences between variants at followed order in bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$): PA (1.57) > LO (1.42) > PN (1.17) and in porosity (%): PA (40.2) < LO (45.9) < PN (55.3) in average of all years, dates and depths. Uncompacted variant (PN) demonstrated markedly higher ($p \leq 0.05$) average saturated hydraulic conductivity K_{fs} ($1.529 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$) then variants LO ($0.264 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$) and PA ($0.067 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$). These results demonstrate how intensive grassland exploitation can lead to several negative consequences from the aspect of soil hydrology: degradation soil physical properties, excessive soil compaction, decrease infiltration rate, water storage and saturated hydraulic conductivity.

Next goal was to evaluate surface runoffs from grasslands (extensively and intensively managed), winter wheat, silage maize, potatoes and bare soil. During vegetation periods (2008-2013) average surface runoff coefficient was significantly lower ($p \leq 0.05$) in stand of grasslands (0.013) and winter wheat (0.032) compared to potatoes (0.097); silage maize (0.099) and bare soil (0.138). Grasslands expressed best protective effect and prevented effectively surface runoffs formation. In winter and early spring periods (2008/2009-2013/2014) grasslands lost their positive effect on surface runoff formation and no significant differences between variants were found. Average

surface runoff coefficient in stands of grasslands 0.016; winter wheat 0.034; stubble of wheat 0.023; corn stubble and loose soil 0.027 was detected.

The last goal was to compare the rate of flood wave from selected crops. Grasslands buffer strips can significantly increase ($p \leq 0.05$) time of flood wave action. Flood wave from rate of inflow 0.423 l.s^{-1} (25.4 l.min^{-1}) crossed the length of 4 000 mm after 7 minutes and 46 seconds on grassland, after 2 minutes and 47 seconds on winter wheat and after 23 respectively 26 seconds on silage corn and bare soil.

Keywords: soil physics, soil compaction, hydrogeology, meadow, pasture, grasslands, infiltration, surface runoff, soil erosion

OBSAH

1 ÚVOD.....	11
2 LITERÁRNÍ PŘEHLED	13
2.1 Trvalé travní porosty a pícniny na orné půdě.....	13
2.1.1 Význam a funkce travních porostů	14
2.2 Hydrologické poměry České republiky	16
2.3 Povrchový odtok	17
2.4 Infiltrace vody do půdy	25
2.5 Faktory ovlivňující infiltrační schopnost půd a povrchový odtok	25
2.5.1 Hydrologické a klimatické faktory v letním období.....	26
2.5.2 Hydrologické a klimatické faktory v zimním období.....	32
2.5.3 Morfologické faktory	33
2.5.4 Geologické a půdní faktory.....	34
2.5.5 Vliv vegetačního pokryvu.....	41
2.5.6 Vliv travních zasakovacích pásů na tvorbu povrchového odtoku a eroze.....	43
2.5.7 Způsob využívání a obhospodařování půdy	44
2.6 Obhospodařování travních porostů	47
2.6.1 Následky intenzivní pastvy zvířat na životní prostředí.....	48
2.6.2 Následky intenzivního ohospodařování lučních porostů a pícnin na orné půdě na životní prostředí	51
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	56
4 MATERIÁL A METODIKA	57
4.1 Vliv obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace, fyzikální vlastnosti půdy a nasycenou hydraulickou vodivost.....	57
4.1.1 Charakteristika pokusných ploch.....	57
4.1.2 Měření infiltrační rychlosti	59
4.1.3 Stanovení fyzikálních vlastností půdy	62
4.1.4 Postup měření nasycené hydraulické vodivosti	63
4.2 Vliv zemědělských plodin na povrchový odtok.....	66
4.2.1 Charakteristika pokusných ploch.....	66
4.2.2 Klimatická charakteristika lokality Vatín	68
4.2.3 Ošetřování pokusných ploch ve vegetačním období	69

4.2.4 Ošetřování pokusných ploch v zimním období	71
4.2.4 Statistické vyhodnocení povrchových odtoků a erozních smyvů	71
4.3 Vliv rozdílného obhospodařování půdy na rychlost postupu přeronové vlny a počátek povrchového odtoku	72
5 VÝSLEDKY A DISKUZE	74
5.1 Vliv obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace, fyzikální vlastnosti půdy a nasycenou hydraulickou vodivost.....	74
5.1.1 Vliv obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace.....	74
5.1.2 Vliv obhospodařování travních porostů fyzikální vlastnosti půdy	78
5.1.3 Vliv obhospodařování travních porostů na nasycenou hydraulickou vodivost .	87
5.2 Vliv zemědělských plodin na povrchový odtok.....	90
5.2.1 Vliv zemědělských plodin na povrchový odtok ve vegetačním období	90
5.2.2 Vliv zemědělských plodin na vodní erozi a přípustná ztráty půdy	94
5.2.3 Vliv jednotlivých nebezpečných dešťů na povrchový odtok a erozi.....	98
5.2.4 Povrchový odtok pesticidů.....	100
5.2.5 Termín výskytu odtokově i erozně nebezpečných dešťů.....	102
5.2.3 Analýza povrchově a erozně nebezpečných dešťů v jednotlivých letech.....	103
5.2.7 Vliv expozice svahu na povrchový odtok a erozi	105
5.2.8 Vliv zemědělských plodin na povrchový odtok v zimním období	107
5.2.9 Vybrané charakteristiky zimních období a vyhodnocení jednotlivých odtokových situací	110
5.2.10 Vliv expozice svahu na povrchový odtok v zimním období	114
5.3 Vliv rozdílného obhospodařování půdy na rychlost postupu přeronové vlny a počátek povrchového odtoku	115
6 ZÁVĚRY.....	120
7 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM	123
8 PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY	124
9 SEZNAM OBRÁZKŮ	134
10 SEZNAM TABULEK.....	138
11 SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	140
12 PŘÍLOHY.....	141
12.1 Seznam příloh.....	141

1 ÚVOD

Současný trend v zemědělství směřuje k využívání výkonnějších strojů k obhospodařování půdy. S nárůstem výkonu dochází ke zvyšování jejich hmotnosti, která následně působí větším tlakem na půdu. Van den Akker a Schjøning (2004) uvádí, že dříve (1980) bylo zatížení kol 50 kN považováno za vysoké, zatímco v dnešní době je běžné zatížení 120 kN. Pracovní operace, které dříve provádělo více lehčích strojů, provádí nyní mnohem méně velkých a výkonných strojů, což vede k časovému deficitu při obdělávání půdy a nutnosti provádět pracovní operace i za vyšší vlhkosti. Tím dochází k degradaci fyzikálních vlastností půdy, především ke snižování její retenční schopnosti, tedy schopnosti zadržovat vodu v krajině. V minulosti byl odtok vody z krajiny výrazně urychlen scelováním pozemků, rozoráváním mezí a remízků a napřimováním vodních toků. V dnešní době ke snižování retenční schopnosti půd přispívá omezené dodávání organické hmoty do půdy snižující půdní úrodnost a způsob hospodaření vedoucí ke zhoršení půdní struktury (absence osevních postupů a pěstování víceletých pícnin, vyšší podíl živin dodávaných minerálními hnojivy, snížená spotřeba vápenatých hnojiv, nadměrné zhutnění).

Riziko snižování retenční schopnosti půdy je dále umocněno probíhajícími klimatickými změnami. Mění se rozložení srážek během roku, kdy krajina přichází o typické zahradní deště na jaře. Zvyšováním teploty zemského povrchu se zvyšuje síla vzestupných proudů a zadržování srážek v oblacích. Následkem toho dochází k častějšímu výskytu intenzivních přívalových dešťů v letních měsících, které krajina není schopna zadržet. Voda tak rychle odtéká a dochází ke snižování zásoby půdní vláhy pro rostliny, zásobenosti podzemních vod, riziku vzniku povodňových situací a prodlužování období sucha, přestože celkový úhrn srážek se nemění. V zimním období dochází ke snižování množství sněhových srážek, které jsou zásadní pro tvorbu zásob půdní vláhy pro následující vegetační období. Snížená retence vody v půdě a sucho se tak v moderním zemědělství stává zásadním problémem.

Proto byly Evropskou unií nastaveny standardy pro udržitelné využívání půdy bez poškozování životního prostředí. Dodržování standardů „dobrého zemědělského a environmentálního stavu“ DZES (anglicky GAEC), je jednou z podmínek pro poskytnutí plné výše přímým podpor. Dalším opatřením proti poškozování životního prostředí vlivem špatného hospodaření jsou nařízení vlády České republiky pro udržení

kvality povrchové vody stanovením hodnot přípustného znečištění povrchových a odpadních vod.

Do popředí se tak dostává využívání travních porostů pro jejich mimoprodukční funkce v krajině. Travní porosty jsou všeobecně považovány za významné regulátory vodního režimu krajiny a předpokládá se u nich zejména funkce zasakovací, retenční a filtrační. Tyto funkce však nejsou trvalé a jejich úroveň se v průběhu času mění vlivem změn fyzikálních a biologických vlastností půdy. Při nevhodném způsobu hospodaření mohou travní porosty svou hydrologickou funkci v krajině zcela přestat plnit.

V Anglii a Walesu Newell-Price et al., (2013) zjistili, že v průměru 10 % půd pod travními porosty bylo z hlediska fyzikálních vlastností půdy ve špatném stavu, 60 % v mírně poškozeném stavu a pouze 30 % v dobrém stavu. Hlavním vlivem působícím na zhoršení fyzikálních vlastností půd pod travními porosty byla intenzita jejich využívání.

V práci je popsán význam travních porostů, hydrologické podmínky České republiky, hlavní vodohospodářsky ztrátové složky a faktory, které je ovlivňují. V další pasáži je popsáno, za jakých podmínek dochází při obhospodařování půdy k degradaci půdních vlastností souvisejících s propustností půdy pro vodu a její retenční schopností. V poslední části je upozorněno na rizikové způsoby obhospodařování travních porostů, které mohou negativně ovlivňovat kvalitu povrchových vod a zásoby vod podpovrchových.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED

2.1 Trvalé travní porosty a pícniny na orné půdě

Trvalé travní porosty (dále TTP), které jsou využívány jako louky a pastviny, jsou důležitou a neodmyslitelnou součástí zemědělské krajiny České republiky. V roce 1991 byla výměra TTP 864 000 ha. Za posledních 25 let došlo k mírnému nárůstu výměry travních porostů na současných 1 000 620 ha (ČUZK, 2016). TTP tvoří 23,7 % z rozlohy zemědělské půdy a 12,7 % z celkové výměry půdního fondu.

V některých zemích Evropy zabírají travní porosty několikanásobně větší podíl rozlohy ze zemědělské půdy např. Rakousko 57 %, Švýcarsko 72 %, Irsko 76%, Velká Británie 65 % (Peeters in Billota et al., 2007).

Poklesem stavů krav z 1 236 tis. ks v roce 1990 na 584 tis. ks (dojné krávy + krávy bez tržní produkce mléka) v roce 2016 (ČSÚ, 2016) došlo k nadprodukcí píce z TTP, která způsobila v řadě případů jejich zanedbávání.

V současné době lze očekávat tlak na nárůst TTP prostřednictvím podpory ze strany dotační politiky EU, vycházející ze směrnic a předpisů společné zemědělské politiky. Důvodem je fakt, že TTP plní řadu ekosystémových funkcí pro společnost. Skládanka in Skládanka et al. (2014) předpokládá nárůst jejich ploch na 1 200 000 ha. S tím bude spojena nutnost jejich vhodného obhospodařování.

Mimo TTP jsou dalším zdrojem píce pro hospodářská zvířata pícniny pěstované na orné půdě. Ty můžeme rozdělit na jednoleté (kukuřice na zeleno a siláž, krmné obilniny, luskoviny, luskovinoobilné směsky, brukvovité pícniny a krmné okopaniny) a víceleté (vojtěška setá, jetel luční, jetelovinotravní směsi). Průměrná výměra pícnin na orné půdě v České republice činí 484 835 ha (ČSU, 2016) a zaujímají tak 11,5 % rozlohy zemědělské půdy, z toho 183 943 ha připadá na víceleté pícniny a 300 892 ha na pícniny jednoleté.

Plochy jednoletých i víceletých pícnin na orné půdě neustále klesají. Výrazný propad od roku 1980 je u ploch s jetelem lučním (přibližně na třetinu) a vojtěškou setou (přibližně na čtvrtinu). Naopak tomu je u kukuřice na siláž, u které dochází k navýšení ploch v souvislosti s rozvojem bioplynových stanic.

Dohromady tak pícniny na orné půdě s trvalými travními porosty tvoří 35,3 % rozlohy zemědělské půdy.

2.1.1 Význam a funkce travních porostů

Travní porosty zajišťují v krajině dvě významné funkce - produkční a mimoprodukční.

Produkční význam travních porostů

Travní porosty tvoří na našem území nejčastěji druhotná společenstva, která byla v minulosti vytvořené člověkem pro zajištění produkce píce pro přežvýkavce a koně.

Produkční funkce zabezpečují výživu zvířat a následně člověka, a hrají důležitou roli při tvorbě dalších surovin. Výrazem produkční funkce je myšlena produkce sušiny vytvořené fotosyntetickou asimilací světelné energie rostlinami k tvorbě energeticky bohatých organických sloučenin (cukrů) z jednoduchých anorganických látek (oxidu uhličitého a vody), tzn. transformace sluneční energie do produkce fytomasy (Procházka et al., 1998).

U travních porostů využívaných extenzivně s nízkou úrovní výživy jsou dosahovány výnosy kolem 1,5 t.ha⁻¹ sušiny. Naopak na stanovištích s dostatkem vláhy, dobrou úrovní výživy (300 kg.ha⁻¹ N), větším počtem sečí (6 sečí) a odpovídající druhovou skladbou mohou poskytovat výnosy až 18 t.ha⁻¹ sušiny. V našich podmínkách je dosahována produkce 1,5 až 5,5 t.ha⁻¹ sušiny a to v závislosti na dostupnosti vláhy a živin stanoviště (Skládanka in Skládanka et al., 2014).

Mimoprodukční funkce travních porostů

Převážná část výměry travních porostů v ČR se nachází v méně příznivých (marginálních) oblastech (LFA – less favourable areas), nebo v oblastech s nejrůznějšími omezeními (Natura 2000), proto se stále více uplatňuje mimoprodukční význam těchto porostů.

Travní porosty mají velký význam při utváření krajinného rázu zemědělské i nezemědělské krajiny (travní porosty, les, orná půda, sady, vinohrady, vodní plochy). S krajino tvornou funkcí souvisí funkce estetická. Množství barev a tvarů jetelovin a trav přispívá k estetickému vnímání krajiny. Žďáření lesů a zakládání pastvin bylo spojeno s osídlením krajiny.

V současné době roste význam TTP a jejich rekreační funkce, umožňující turistiku a sportovní vyžití.

Travní porosty mají rovněž pozitivní vliv na biodiverzitu. Jsou rezervoárem rostlinných a živočišných genetických druhů a umožňují život velkému počtu bezobratlých živočichů, savců, ptáků a rostlin, které v jiných ekosystémech žít nemohou (Šarapatka et al., 2008). Dle Wilsona et al. (2012) se jedná o druhově nejbohatší společenstva v Evropě.

Hydrologický význam travních porostů v krajině spočívá ve výrazném omezení vodní eroze půdy a z hlediska ochrany kvality povrchových a podzemních vod. Travní porosty omezují velikost povrchového odtoku na svazích, zvyšují dotaci podzemních vod, zlepšují infiltrační schopnost půd a snižují rychlost a unášecí schopnost povrchově stékající vody (Hejduk, 2011). Travní porosty rovněž chrání povrch půdy svým celoročním vegetačním pokryvem před dopadem dešťových kapek a rozptylují tak jejich kinetickou energii při dopadu (Barnes et al., 2007).

TTP jsou významným zdrojem organické hmoty v půdě, která je důležitým parametrem ovlivňujícím úrodnost půdy. Je to dáno absencí kultivace a tím omezením mineralizace a rovněž vysokou produkcí podzemní biomasy a opadu (Nösberger et al., 2000).

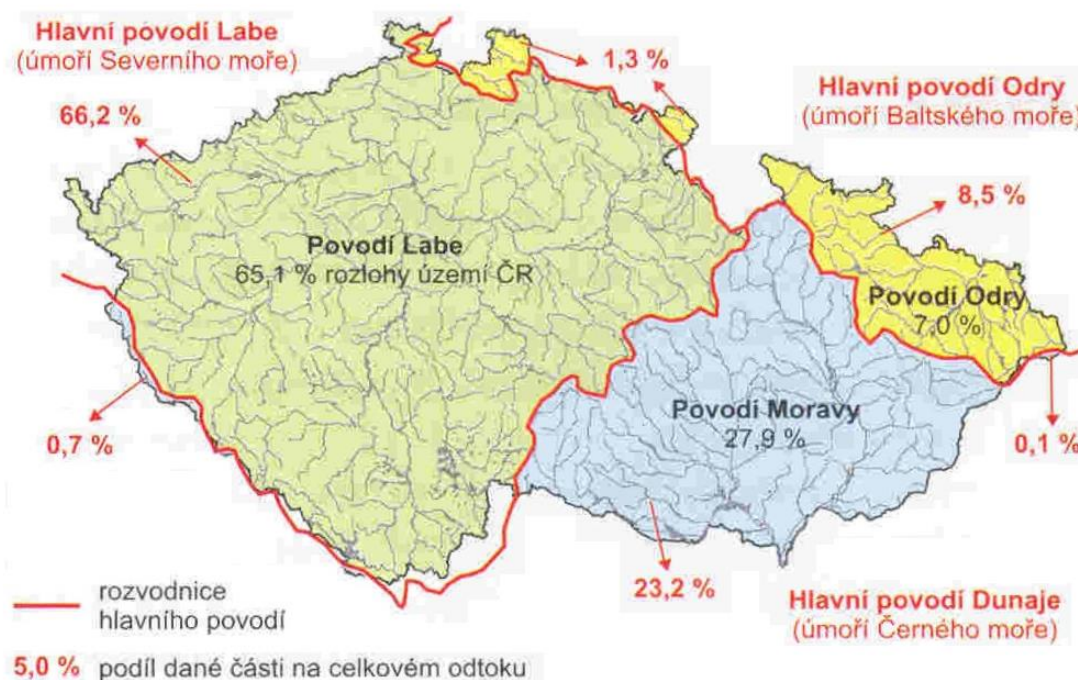
S nárůstem negativního tlaku průmyslu na životní prostředí v posledních desetiletích se stále více dostává do popředí schopnost travních porostů zlepšovat kvalitu ovzduší (Vertès et al., 2007). TTP poutáním (sekvestrací) uhlíku v půdě, patří mezi jednu z hlavních možností k snižování emisí skleníkových plynů. Především snížením nárůstu obsahu oxidu uhličitého v atmosféře (Soussana et al. 2010).

Symbiózou bobovitých rostlin s hlízkovými bakteriemi rodu *Rhizobium* dochází k poutání až 545 kg (u jetele plazivého) vzdušného dusíku na hektar za rok (Carlsson, 2003). Kořenové zbytky, zejména u jetelovin, zlepšují úrodnost půdy a mají meliorační a fytosanitární účinek na půdu. Součástí TTP jsou vyšší dvouděložné rostliny (byliny) s kůlovým kořenem, které dokáží pronikat přes ztuhluté vrstvy půdy a jsou tak potenciálním řešením v rekultivaci ztuhlých půd.

Travní porosty jsou rovněž schopny poutat těžké kovy a živiny v půdní organické hmotě a v kořenech. Tím brání jejich proplavování do podzemních vod a odnosu erozí do vod povrchových, čímž dochází k omezení jejich eutrofizace a znečištění (Mládek et al., 2006).

2.2 Hydrologické poměry České republiky

Česká republika bývá označována za „střechu Evropy“, jelikož všechny významnější toky, které u nás pramení, odvádějí vodu do sousedních států. Jedná se o hlavní evropská povodí Labe, Dunaje a Odry, která vycházejí z vrcholu Kralického Sněžníku. Podíl jednotlivých povodí na rozloze území našeho státu a celkový odtok je znázorněn na obrázku č. 1.



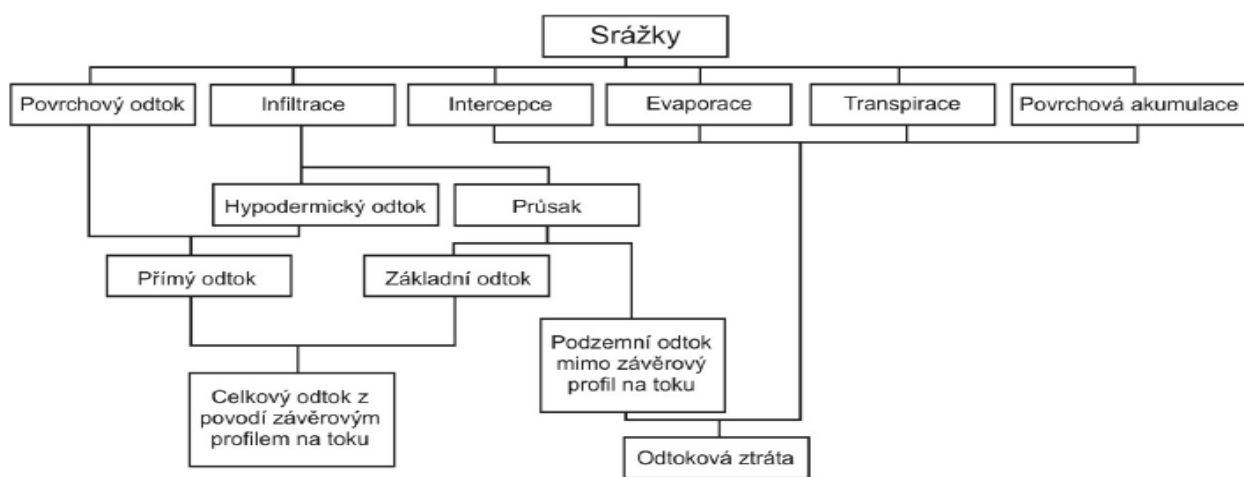
Obr. 1 Hlavní povodí České republiky (zdroj: <http://enviregion.pf.ujep.cz>, 2015)

Vzhledem k úplné závislosti našich vodních zdrojů na atmosférických srážkách je nutná zvýšená snaha o dlouhodobé zadržení vody v krajině a převedení rychle a povrchově odtékající vody do vod podzemních (obr. 2). Odtok vody z krajiny je v současné době urychlen nevhodným hospodařením na zemědělsky využívané půdě a klimatickými změnami. V zemědělské krajině ČR ještě stále převažuje velkovýrobní hospodaření, které je spojeno s využíváním velkých půdních celků a těžké zemědělské mechanizace. Vlivem změny klimatu v posledních desetiletích ve střední Evropě, roste nebezpečí výskytu hydrologických extrémů: povodní z přívalových srážek (Dufková a Toman, 2004) a dlouhotrvajícího sucha (Kovář et al., 2002).

Janeček et al. (2005) uvádí, že na našem území se průměrně vyskytne v každém místě za rok 5 až 6 krátkodobých přívalových dešťů se srážkovými úhrny nad 10 mm.

Tyto faktory vytvářejí podmínky pro vznik povrchového odtoku se všemi jeho negativními důsledky. Je tedy žádoucí omezit vodohospodářsky ztrátové složky – povrchový odtok a evaporaci, a podpořit infiltraci vody do půdy a zadržování vody podpovrchové v krajině.

Scénáře klimatické změny ve střední Evropě předvídají nárůst teploty vzduchu v důsledku zvýšené evapotranspirace (Brázdil et al., 2008) a počítají do konce tohoto století se zvýšením socio-ekonomických dopadů povodní na obyvatelstvo v důsledku klimatické změny. Alfieri et al., (2015) odhaduje nárůst populace každoročně postižené povodněmi ze současných 216 000 na 500-640 000 obyvatel v roce 2050 a předpokládá zvětšení rozsahu ekonomických škod při povodních ze současných 5,3 miliard Eur na 20-40 miliard.



Obr. 2 Distribuce srážek na povodí (Janeček et al., 2005)

2.3 Povrchový odtok

Povrchový odtok vzniká v důsledku překročení schopnosti půdy a porostu, po zaplnění prohlubní na povrchu půdy, absorbovat vodu ze srážek. Mezi hlavní faktory ovlivňující velikost a průběh povrchového odtoku patří intenzita, délka trvání a průběh srážek (případně rychlost tání sněhu); sklon, délka a expozice svahu; fyzikální vlastnosti půdy; aktuální nasycenost povrchu půdy a vegetační pokryv půdy.

Pokud úhrn a intenzita srážek překročí počáteční kapacitu povrchové akumulace vody na povrchu půdy a rychlost infiltrace dochází k povrchovému odtoku. Obdobně tomu je i při jarním tání, pokud se voda nestačí vsakovat do vodou nasycené, případně

zledovatělé půdy. Odtok vznikající v horních částech povodí stéká dolů různými druhy proudění, které jsou ovlivněny velkým počtem faktorů: rozdělením srážek v prostoru a čase, akumulací v povodí a korytech, hydraulikou vodního toku, vegetačním pokryvem, geologickým utvářením povodí, apod. (Janeček et al., 2005).

Plošný povrchový odtok při proudění v tenké vrstvě má převážně transportní účinek, který se při jeho malé hloubce velmi rychle vyčerpá. Při soustředování plošného odtoku (obr. 3) do sítě rýžek a rýh se jeho hloubka a rychlost rychle zvětšuje a tím také kinetická energie a tangenciální napětí a roste jeho erozní účinek a transportní schopnost. Přejdou-li transportované půdní částice do hydrografické sítě, je jejich další pohyb řízen zákonitostmi pohybu splavenin (Janeček et al., 2008).



Obr. 3 Soustředování plošného povrchového odtoku na poli s kukuřicí (Mařatice 28. 5. 2011, foto autor)

Na rozdíl od letního období, kdy se na tvorbě povrchových odtoků a propustnosti půdy z řady přírodních a antropogenních činitelů nejvíce podílí intenzivní dešť

s vysokou kinetickou energií, v zimním období je to teplota půdy a její vlhkost (obsah ledu).

2.3.1 Stanovení objemu povrchového odtoku

Po celém světě jsou hydrology vytvářeny různé modely srážkoodtokových vztahů, které jsou obvykle navrhovány pro velká povodí a vycházejí z dlouhodobě sledovaných průtoků v uzávěrových profilech povodí. Avšak pro malá povodí jsou tyto údaje k dispozici jen zřídka. A pokud jsou, nemusí být směrodatné, protože nezohledňují důsledky lidské činnosti v povodí.

Vyjádřit složitý srážkoodtokový proces pro malá povodí se snaží řada autorů. Služba na ochranu půdy (SCS) v USA zavedla v této souvislosti metodu čísel odtokových křivek – CN (US SCS, 1986). Jedná se o jednoduchý model pro výpočet přímého odtoku způsobeného přívalovým deštěm z povodí o velikosti do 10 km² (Janeček et al., 2008).

Přímý odtok dle obrázku č. 2 zahrnuje odtok povrchový a hypodermický. Podíly těchto odtoků se oceňují pomocí čísel odtokových křivek CN. K hypodermickému odtoku dochází za situace, kdy do půdy infiltrovaná voda stéká po mělce uložené, málo propustné vrstvě a vyvěrá opět na povrch. K základnímu odtoku dochází, když voda vsakuje až k hladině podzemní vody a vtéká do koryt toků. Základní odtok se objevuje zřídka tak brzy po přívalovém dešti, aby měl vliv na velikost povodňové vlny z přívalu. CN je tedy i ukazatelem pravděpodobnosti typu odtoku. Čím větší je CN, tím je pravděpodobnější, že se přímý odtok týká povrchového odtoku (Pasák et al., 1984). Podrobněji je metoda odtokových křivek CN popsána Janečkem et al., (2008).

Dalšími hydrologickými modely zohledňující antropogenní činnost v povodí jsou například: KNIFIL a KNIFIL 2 (Kovář et al., 2002), HEC-HMS (USACE, 2015) a také FLOOD_V (Kovář a Pleštilová in Kovář et al., 2011).

2.3.2 Důsledky povrchového odtoku v krajině

Povrchový odtok je považován za nežádoucí jev, který snižuje dotaci vody ze srážek do půdy a do podzemních vod, zvyrazňuje projevy sucha a může způsobovat lokální povodně a erozi půdy (Hejduk a Sochorec, 2012).

Povrchový odtok způsobuje rychlou ztrátu vody z krajiny, což způsobuje mimo riziko vzniku povodní také deficit vody v půdě a v podzemních zásobách. V posledních letech se tak v České republice stále častěji vyskytují projevy sucha. Jedná se o nedostatek srážek v řádu několika týdnů až měsíců a úbytek vody v krajině. Situaci v Česku monitoruje od roku 2012 Ústav výzkumu globální změny Akademie věd ČR (CzechGlobe), Mendelova univerzita v Brně a Masarykova univerzita, jež aktuální situaci zveřejňují na webových stránkách intersucho.cz. Příčinou sucha je klimatická změna, tedy výskyt teplotních a srážkových extrémů, kterému napomáhají i nevhodné antropogenní zásahy do přírody spojené s degradací půdy při nevhodném obhospodařování. Mezi nevhodné antropogenní zásahy můžeme zařadit likvidaci přirozených meandrů toků a rušení drobných nádrží. Od poloviny 19. století došlo k úbytku tří tisíc rybníků s akumulací plochou nad půl hektaru, dohromady i s menšími rybníky jich ubylo asi 20 tisíc (Šarapatka, 2015). Sucho působí problémy zejména v zemědělství, lesnictví a vodním hospodářství a dělí se podle dominujících projevů na čtyři typy (Wilhite et al., 2005):

1. meteorologické – záporná odchylka srážek od normálu během sledovaného období,
2. zemědělské – neboli sucho půdní s nedostatkem vláhy pro plodiny,
3. hydrologické – nastává při významném snížení hladin vodních toků,
4. socioekonomické – pokud mají projevy sucha dopad na kvalitu života.

Dalším negativním důsledkem povrchového odtoku je vznik povodňových situací, kterými se rozumí přechodné zvýšení hladiny toků nad úroveň břehů náhlým zvětšením průtoků nebo zmenšením průtočnosti koryta. Naprostá většina povodní v České republice je způsobena vydatnými dešti, v zimním půlroce rovněž oteplením a následně vyvolaným táním sněhové pokrývky, zvláště pokud je tání doprovázeno deštěm (Sklenář, 2007).

Mezi nejdůležitější faktory ovlivňující vznik povodní patří dle Langhammer (2009):

1. Meteorologické faktory předcházející povodni – dny až měsíce před jejím vznikem:

- Nasycenost povodí,
- Promrznutí půdy,
- Výška sněhové pokrývky a její vodní hodnota.

Rozhodující vlivy faktorů předcházející povodni jsou dle Matějčíka a Hladkého (1999):

- Intercepce – zadržení srážek vegetací.
- Detence – schopnost zpomalovat odtok ze srážek v terénních prohlubních.
- Infiltrace – vsak vody do půdních vrstev a zvodní podzemních vod.
- Objem říční sítě – plnění koryt toků a objemu rozlivů do inundačních území podél toku.

2. Meteorologické faktory příčinné – hodiny až dny před vznikem povodně, zejména:

- Úhrn a intenzita srážky,
- Rychlost tání sněhu a infiltrační schopnost půdy pod sněhem,
- Ucpávání říčních koryt ledovými krami.

Obdobně jako u sucha jsou významným činitelem působícím na povodňové riziko antropogenní změny. V posledních staletích dochází k rozsáhlé změně v intenzitě, charakteru a struktuře využití území, což působí změny odtokových poměrů povodí. Mezi hlavní faktory působící na změny srážko-odtokových procesů, a to zejména při extrémních událostech, můžeme dle Langhammera (2007) zařadit:

- Změny ve využití území, struktuře a kvalitě krajinného krytu,
- Plošné odvodnění krajiny,
- Zkrácení říční sítě,
- Úpravy koryt toků,
- Strukturu využití údolní nivy,
- Přítomnost překážek proudění v nivě.

Tyto projevy antropogenních zásahů do krajiny mají při výskytu povodňových situací odlišný dopad na jednotlivé složky odtokového procesu a rozdílně ovlivňují formování povodně, její postup, transformaci povodňové vlny a následky povodně v krajině (Langhammer, 2007).

Povodně můžeme v našich podmínkách rozdělit dle Sklenáře (2007) následovně:

- **zimní a jarní typ povodní** – kdy dojde ke zmenšení průtočnosti koryta. Vznikají v případech, kdy došlo k předchozímu zámrazu hladin vodních toků. Při oteplení se ledový pokryv toku naruší a jednotlivé kry jsou vodou vrstveny do ledových bariér. Ty následně přehrazují koryta toků a vzdouvají vodu nad sebou - dochází tak k rozlévání toku a při protržení ledových bariér vznikají povodňové vlny.

- **povodně ze specifických příčin** - vznikají při souvislosti s haváriemi hydrotechnických zařízení, nejčastěji se jedná o protržení hrází rybníků či přehrad.

- **letní povodně z trvalých dešťů** – vznikající při déletrvajících vydatných srážkách (případ katastrofických povodní v červenci 1997 (52 obětí) a v srpnu 2002 (17 obětí)). Dochází k nim při setrvávání tlakové níže nad střední Evropou a vypadávání intenzivních srážek na našem území. Zhoršení vývoje bývá způsobeno velkým plošným rozsahem srážek a zejména velkým předchozím nasycením povodí. Tyto záplavy vznikají především na středních a dolních úsecích vodních toků.

- **zimní a jarní povodně z tání sněhové pokrývky** – vznikají nejvíce na podhorských tocích, projevují se v nížinných úsecích velkých toků. Dochází k nim nejčastěji v březnu až dubnu (výjimečně v prosinci až únoru při dílčích oblevách). Rozhodujícím faktorem pro jejich vznik je tzv. vodní hodnota sněhové pokrývky, množství dešťových srážek v období tání, teplota vzduchu v období tání a průběh zimy, uplatňující se jako ledovitost půdy (hloubka promrznutí půdy, související s periodami tání a mrznutí v průběhu zimy). Příkladem je povodeň z přelomu března a dubna roku 2006.

- **letní povodně – vznikají při intenzivních přívalových srážkách** $1-3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ i více a při době trvání minimálně 10 minut. Postihují území menší rozlohy (většinou do desítek km^2) a mohou se vyskytnout kdekoli v ČR. Důsledkem bývá prudké, krátkodobé rozvodnění malých toků. Nejčastější výskyt těchto povodní je od druhé poloviny dubna do září. Největší problémy při těchto povodních způsobuje velká dynamická síla vody a jí unášeného materiálu a poměrně obtížná předpověď místa jejího výskytu. Příkladem může být povodeň z června a července 2006 na Dyji v Podhradí.

Tři poslední uvedené typy povodní mohou vykazovat různé přechodné formy, vyskytující se hlavně v jarních měsících, způsobené kombinací příčinných a dalších fyzicko-geografických faktorů (např. nasycenost povodí, promrznutí půdy). Pro naše území, jsou povodně nejčastějším přímým nebezpečím z možných živelných pohrom. Dochází při nich ke škodám ekonomickým, ekologickým a ke ztrátám na lidských životech. Vznik katastrofálních povodní je pak vázán na výskyt extrémních, popř.

rekordních hodnot těchto faktorů, jak ukázaly případy z let 1997 a 2002 (Brázdil, 2002). V tabulce č. 1 jsou uvedeny významné povodně v minulosti s vyčíslením výše škod (MŽP, 2011).

Tab. 1 Významné povodně na území ČR a vyčíslení výše škody (MŽP, 2011)

Povodeň	Typ povodně	Zasažená oblast	Max dosažená N-letost	Důsledky povodní
19. srpna 1974	zvláštní povodeň (během přírodní povodně)	Mnichovka, protržení hráze VD Hubačov	přírodní >100 zvláštní 5 x Q ₁₀₀	5 obětí, mater. škody nejsoú známy
březen 1981	jarní povodeň, tání sněhu a dešť	povodí horního Labe, povodí Ohře, Mže, Sázava, Morava	20 až 50, ojediněle 100	nejsoú známy
červenec 1981	letní povodeň, regionální deště	povodí Otavy, Berounky, dolní Vltava, Labe	50 až 100, ojediněle >100	nejsoú známy
červenec 1997	letní regionální, dvě povodňové vlny	celé povodí Odry a Moravy, část povodí horního Labe	100 až 500, výjimečně >500	62,6 mld. Kč 50-60 obětí
červenec 1998	přivalová povodeň	Dědina, Bělá (prav. přítoky Orlice)	>100	1,8 mld. Kč 6 obětí
březen 2000	jarní povodeň, tání a dešť	povodí horního Labe a Jizery	50 až 100, výjimečně >100	3,8 mld. Kč 2 obětí
srpen 2002	letní regionální, dvě povodňové vlny	povodí Vltavy a Berounky, dolní Labe	200 až 1000, někde >1000	73,1 mld. Kč 17-19 obětí
březen/duben 2006	jarní povodeň, tání a dešť	povodí Dyje, Moravy, Sázavy, Lužnice a další	50 až 100, výjimečně >100	6,0 mld. Kč 9 obětí
červen 2006	letní povodeň	povodí Dyje	100 až 200 ojediněle 1000	nejsoú známy
červen/červenec 2009	přivalové povodně	Novojičínsko, Jesenicko, Děčínsko	100, >100, někde >>100	8,5 mld. Kč 15 obětí
květen/červen 2010	letní regionální, dvě povodňové vlny	povodí Odry a Moravy	20 až 50, výjimečně >100	5,1 mld. Kč 3 obětí
srpen 2010	letní povodeň s prvky přivalové povodně	povodí Smědé, Lužické Nisy, Ploučnice a Kamenice	50 až 100, >100, výjimečně >1000	10,1 mld. Kč 5 obětí

2.3.3 Důsledky eroze půdy na životní prostředí

Eroze je definována jako komplexní proces, zahrnující rozrušování půdního povrchu, transport uvolněných půdních částic a jejich sedimentaci. K vodní erozi dochází, pokud dešťové kapky dopadají na nechráněný půdní povrch a uvolňují svojí kinetickou energií půdní částice (viz kapitola: Hydrologické a klimatické faktory v letním období), a vodním proudem přicházejícím z výše položených míst. Pakliže dojde k překročení vsakovací schopnosti půdy, dochází k plošnému povrchovému odtoku. Při postupném soustřeďování odtoku na pozemcích dochází k erozi plošné (obr. 4), výmolné nebo proudové. V zimě dochází k sněhové erozi, která se liší od eroze vodní tím, že kinetická energie sněhových srážek je zcela zanedbatelná a všechna energie tedy pochází pouze z odtékající vody.



Obr. 4 Vznik rýhové eroze ve Starém Městě u Uherského Hradiště (foto autor 30. 9. 2007)

Erozní procesy vznikající z povrchového odtoku ovlivňují kvalitu a úrodnost půdy (změnou půdní struktury, snížení obsahu organické hmoty, ztrátou živin a zmenšením mocnosti půdního profilu a tím snížení retence vody a živin) a kvalitu vod (zatěžování vody živinami, pesticidy, těžkými kovy, mikroorganismy, splaveninami a sedimenty) (Govers et al., in Schjøning et al., 2004; Janeček et al., 2008; Holý, 1994; Tlapák et al. 1992).

Více o určení erozní ohroženosti pozemků, příčinách a následcích eroze v životním prostředí je uvedeno autory Janeček et al., (2005); Janeček et al., (2012) a Holý (1994).

Tématem vodní eroze v lokalitě Uherské Hradiště jsem se zabýval ve své bakalářské a diplomové práci (Sochorec, 2008 a Sochorec, 2010).

2.4 Infiltrace vody do půdy

Infiltrační schopnost půd významně ovlivňuje vznik a průběh povrchového odtoku. Rychlost vsaku je závislá na vlastnostech půdy a na zdroji vody. V případě, že se povrch půdy náhle zaplaví vodou a pokud má půda stejné vlastnosti až hluboko do podloží, je rychlost vsaku na začátku vysoká a s postupem času se snižuje, až dosáhne hodnot nasycené hydraulické vodivosti. Zpočátku je zpomalení infiltrace rychlé a s postupem času již tak silně neklesá. Čím je půda před infiltrací vlhčí, tím menší je rychlost vsakování a to už od počátku. V případě, že je zdrojem vody déšť, je rychlost zasakující vody na začátku většinou stejná, jako je intenzita srážky. V případě, že intenzita srážky dosáhne vyšší hodnoty jako je rychlost vsakování, nestačí půda přijmout celou srážku a voda zůstává stát na povrchu nebo v závislosti na sklonu pozemku odtéká povrchovým odtokem (Kutílek, 2012).

Informace o infiltrační schopnosti půdy se získávají nejčastěji terénním infiltračním pokusem. Obvykle se vytváří na povrchu půdy zanedbatelná tlaková výška vodní vrstvy a měří se přítok vody, potřebný pro zachování získané tlakové výšky. Nejčastějšími metodami pro měření nasycené a nenasycené hydraulické vodivosti jsou:

- dvouválcová metoda (ASTM D 5093, 2008),
- tlakový infiltrometr (Matula a Kozáková, 1997),
- Mini Disk Infiltrometr (Decagon Devices, Inc., 2005),
- Hood infiltrometr IL-2700 (Umwelt Geräte Technik, GmbH. in Matula et al., 2015),
- Guelphský permeometr (Eijkelkamp, 2011).

2.5 Faktory ovlivňující infiltrační schopnost půd a povrchový odtok

Vznik, intenzitu a průběh povrchového odtoku ovlivňuje kombinace řady přírodních a antropogenně ovlivněných podmínek, které lze rozdělit obdobně jako faktory eroze (upraveno dle Janeček et al., (2005) a Holý (1994)) na:

- a) Hydrologické a klimatické
 - zeměpisná poloha, nadmořská výška, množství, rozdělení a intenzita srážek, teplota, oslunění, výpar, výskyt, směr a síla větrů.
- b) Morfologické
 - sklon území, délka a tvar svahu, expozice a návětrnost svahu.
- c) Geologické a půdní
 - povaha horninového substrátu, půdní druh a typ, zrnitost a struktura půdy, její vlhkost a zvrstvení, obsah humusu.
- d) Vegetační
 - hustota a délka trvání vegetačního pokryvu.
- e) Způsob využívání a obhospodařování půdy
 - poloha a tvar pozemků, směr a technologie obdělávání, střídání plodin.

2.5.1 Hydrologické a klimatické faktory v letním období

Charakteristiky srážek a stanovení jejich nebezpečnosti

Pro výzkum vzniku a průběhu povrchového odtoku je účelné hodnotit srážky podle přímého působení na půdní povrch. Rozdílný účinek mají srážky kapalné a pevné. Z šetření prováděných u nás i ve světě je patrné, že pro vznik a intenzitu povrchového odtoku mají ve většině případů rozhodující vliv **přívalové srážky**.

Přívalové deště jsou charakterizovány značnou intenzitou, krátkou dobou trvání, omezeným plošným rozsahem a výskytem převážně v horkém letním období. Výzkumem pravděpodobnosti výskytu přívalových dešťů na našem území se zabýval Trupl (1958). Vypočítal průměrné intenzity dešťů při různé době trvání (od 5 do 120 minut) s pravděpodobností opakování (jednou za 500 let až 5krát za rok). Tyto data jsou doposud u nás nejpoužívanější pro prognózu pravděpodobnosti výskytu deště.

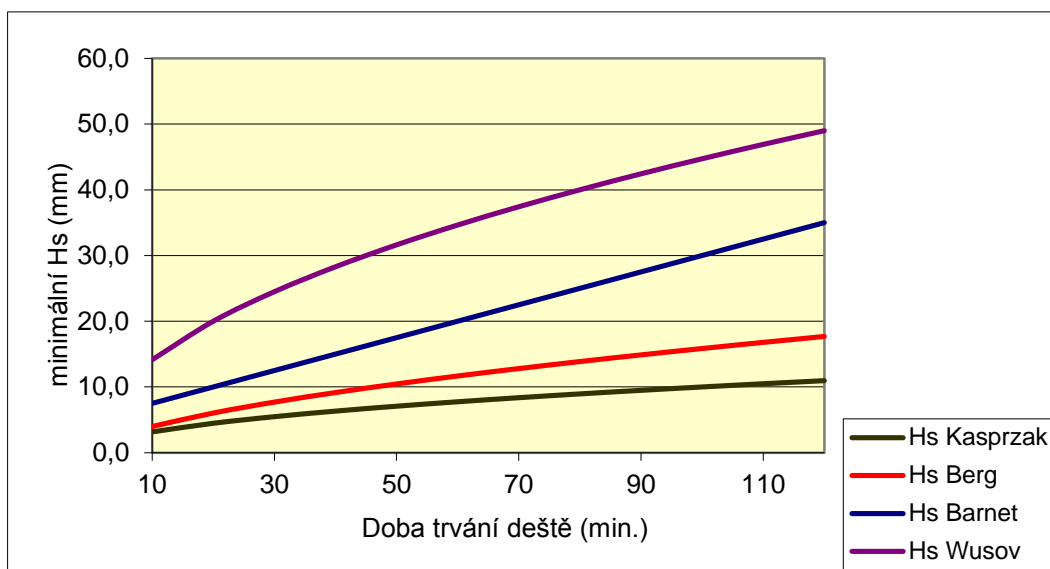
Řada autorů v zahraničí i u nás (Wischmeier a Smith in Janeček et al., (2005); Velikanov in Holý (1978); Wussov in Stehlík (1970); Jůva a Cáblik (1954); Trupl (1958); Holý (1978); Kasprzak in Braun et al. (1996); Janeček et al., (2005)) se snažilo o definici přívalového deště (případně erozně nebezpečného), avšak vzhledem k jeho variabilitě vznikla jen doporučení. Holý (1994) doporučuje považovat za přívalové

deště ty, jejichž průměrná intenzita při určité době trvání převyšuje hodnoty uvedené v tabulce č. 2 dle L. S. Berga. Jůva a Cáblik (1953) doporučují pro podmínky Moravy považovat za přivalové deště ty, jež při určité době trvání dosahují střední a maximální intenzity dle Horáka v tabulce č. 2.

Tab. 2 Hodnoty přivalových dešťů dle L. S. Berga a Horáka [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]

Trvání [min]	5	10	15	20	25	30	40	45
L. S. Berg $i_{min.}$ [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,5	0,38	0,33	0,3	0,27	0,27	0,24	0,23
Horák $i_{stř.}$ [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	1,405			0,98			0,74	
Horák $i_{max.}$ [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	3,743			2,24			1,922	
Trvání [min]	50	60	120	180	240	300	720	1440
L. S. Berg $i_{min.}$ [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,22	0,2	0,15		0,11		0,06	0,04
Horák $i_{stř.}$ [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,58	0,42	0,256	0,204	0,151	0,111		
Horák $i_{max.}$ [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	1,3	1,022	0,517	0,475	0,291	0,242		

Analýzou kritérií určujících odtokově a erozně nebezpečné deště se zabýval rovněž Hejduk (2011). Pro kritéria určující nebezpečné deště zvolil nový pojem *mohutnost deště* (M_D), který je funkcí intenzity deště i_s a doby jeho trvání t_D . Jako hraniční hodnotu, která určovala mez mezi dešti nebezpečnými a neškodnými byla zvolena 1,0. Nižší hodnoty než 1,0 byly označovány jako deště neškodné a deště s vyšší hodnotou byly označeny jako nebezpečné. Hodnoceny byly rozdílné kritéria výše zmiňovaných autorů L. S. Berga in Holý (1994), Wussova in Stehlík (1970), Kasprzaka in Braun et al. (1996) a Barnetta in Hejduk (2011). Z jejich rovnic byly odvozeny jednotné vztahy (kritéria) pro výpočet dolní meze minimálních úhrnů (H_s) přivalových dešťů (obr. 5).



Obr. 5 Grafické znázornění dolní meze úhrnu odtokově i erozně nebezpečných dešťů dle různých autorů (převzato Hejduk, 2011)

Následně byla zhodnocena míra spolehlivosti jednotlivých kritérií. Rozborem příčných dešťů (dešťů vyvolávajících odtok) na několika variantách holé půdy (po seťové orbě, uvláčené, bez přítomnosti půdní krusty i s ní) v období let 1966 až 2002 v Brně – Kníničkách. Odtokový součinitel dosáhl u příčných dešťů minimální hodnoty $\varphi_0 = 0,1$. Míra spolehlivosti uvedených kritérií byla určena tak, že každému příčnému dešti byla přiřazena jeho vypočtená hodnota. Poté byly porovnány dle jednotlivých autorů a jejich výpočtů deště bezpečné, které však dle výsledků měření ve skutečnosti byly odtokově i erozně nebezpečné. Zjistila se tak míra spolehlivosti kritéria, která je uvedena v tabulce č. 3.

Tab. 3 Vyhodnocení spolehlivosti testovaných kritérií mohutnosti deště dle jednotlivých autorů (převzato Hejduk, 2011)

Kritérium	Součinitel povrchového odtoku		
	> 0,1	> 0,25	> 0,5
	Míra spolehlivosti kritéria		
$M_{D(K)} \geq 1,0$	0,942	0,973	1,000
$M_{D(Be)} \geq 1,0$	0,871	0,925	0,993
$M_{D(Ba)} \geq 1,0$	0,680	0,879	0,946
$M_{D(W)} \geq 1,0$	0,483	0,636	0,874

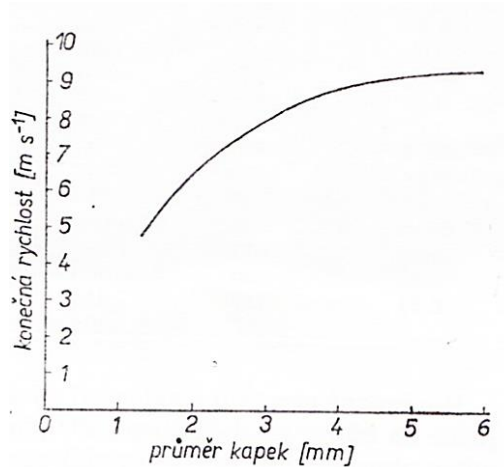
Z tabulky č. 3 je pak patrné, že nejvyšší míry spolehlivosti dosáhlo měřítko dle Kasprzaka. Naopak nejméně vhodné pro posuzování nebezpečnosti přívalových dešťů se jeví kritérium dle Wussova, u kterého 12,6 % přívalových dešťů vyvolávajících povrchový odtok, při kterém odteklo více než 50 % srážkové vody, nebylo hodnoceno jako nebezpečné (Hejduk, 2011).

Avšak i ty nejlepší kritéria, pro výpočet mohutnosti dešťů a určení míry povrchového odtoku na pozemku obvykle nezahrnují kritéria jako kolísání intenzity deště v čase, proměnlivost velikosti a tím kinetické energie dopadajících kapek, směr a rychlost větru doprovázejícího dešť. Tyto parametry jsou přiblíženy dále.

Pro podmínky ČR uvádí Jůva a Cáblik (1953) střední dobu trvání přívalových dešťů 15-20 minut, jen výjimečně déle než 30 minut. V průběhu deště **kolísá jeho intenzita**, zpočátku je nízká, pak se rychle zvýší do maxima a ke konci je opět nízká. Zvýší-li se intenzita deště po dočasném poklesu, je tento dešť označován jako dvojnásobný, třínásobný atd.

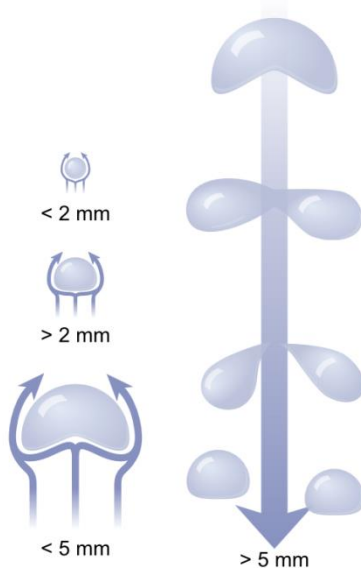
Děšť se skládá z kapek různé **velikosti**, dle měření různých autorů in Holý (1978) s horní hranicí průměru 5 mm. Kapky větší než 5 mm se při letu rozpadají vlivem odporu vzduchu na větší počet menších kapek (obr. 7). Podle Janečka et al., (2005) se při fázi rozpadu vzniklý toroid (prostorové těleso ve tvaru prstence), jehož průměr je 8 až 10krát větší než průměr původní kapky, rozpadá na větší (až 12) kapky menšího průměru. Regionální srážky s malou intenzitou se vyznačují menšími kapkami, zatímco přívalové deště jsou charakterizovány velkými rozměry kapek.

Dalším parametrem deště je **rychlost pádu vodní kapky**, na který má vliv gravitace a odpor vzduchu. Je-li dešť doprovázen **větrem**, projevuje se to na rychlosti letu kapek a výsledná dopadová rychlost může být vyšší než v bezvětrí. Vliv větru je však větší při regionálních srážkách s menším průměrem kapek než při přívalových deštích kdy je průměr kapek větší (Holý, 1994). Níže je uveden vztah mezi rychlostí a velikostí dešťových kapek (obr. 6) podle J. O. Lawse in Holý (1978).



Obr. 6 Vztah mezi rychlostí a průměrem dešťových kapek (J. O. Lawse in Holý, 1978)

Rychlost dopadu dešťových kapek na půdu, energetické vlastnosti kapek a jejich přetvorný účinek na půdní povrch je tak výsledkem výše popsanych parametrů. Tyto vlastnosti byly vyšetřovány řadou autorů, jak uvádí následující kapitola.



Obr. 7 Závislost tvaru kapky na její velikosti (upraveno en.wikipedia.org)

Vliv dopadu dešťových kapek na půdu

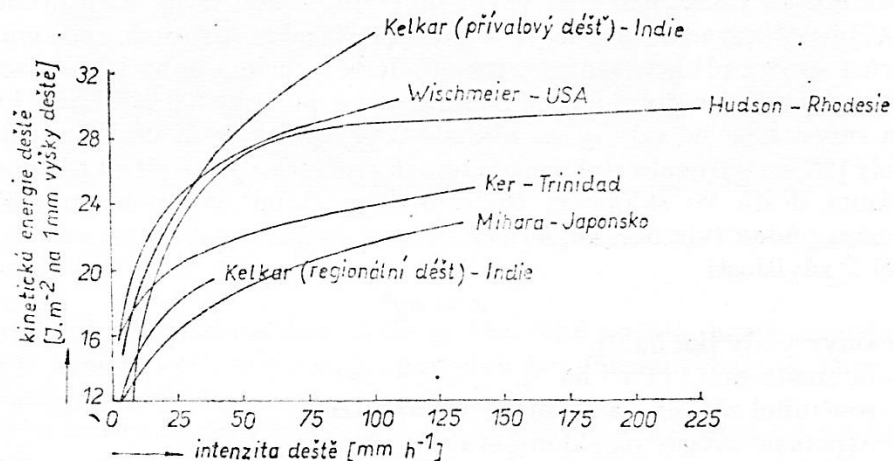
Na povrchu půd nedostatečně chráněných vegetací dochází vlivem kinetické energie dopadajícího deště ke vzniku půdní krusty. Z fyzikálního hlediska vykonávají kapky při dopadu na půdní povrch práci, která způsobuje:

- **rozbíjení půdních agregátů** - půdní částice jsou při dopadu dešťových kapek vyvrhovány z povrchu půdy do výše až 0,6 m nebo přemísťovány do stran až na vzdálenost 1,5 m a připravují tak stékající vodě materiál k odnosu,
- **uvolňování půdních částic** – kdy dochází k ucpávání pórů jemnými částicemi, které jsou uvolněny z rozpadajících se půdních agregátů,
- **zhuňování povrchové vrstvy** (Holý, 1994, Janeček et al., 2005).

Kinetická energie přívalových srážek je vzhledem k hmotě dešťových kapek a ustálené pádové rychlosti (do 9 m.s^{-1}) poměrně vysoká a často se hovoří o bombardování půdního povrchu (Janeček et al., 2005). Lull (1959) uvádí kinetickou energii kapek a jejich pádovou rychlost u různých typů deště v tabulce č. 4. Holý (1978) uvádí vztah mezi kinetickou energií a intenzitou deště podle různých autorů (obr. 8).

Výsledkem tohoto procesu je vytváření málo propustné vrstvy na povrchu půdy – půdní krusty (Morgan, 2005). Ta je tvořena tenkou povrchovou vrstvičkou 0,1 mm, pod kterou je další vrstva silná 1-3 mm, ve které jsou póry zaplněny uvolněným jemným materiálem. Dle Jury a Horton (2004) je propustnost na povrchu krusty redukována 2000krát a ve vrstvě pod krustou 200krát. Fohrer et al., (1999) uvádí, že po vzniku této krusty dojde ke 200 až 400násobnému snížení infiltrační schopnosti půdy.

Po vyschnutí půdní krusta následně omezuje infiltraci vody do půdy a výrazně zvyšuje povrchový odtok po celé vegetační období.



Obr. 8 Vztah mezi kinetickou energií a intenzitou deště podle různých autorů (Holý, 1978)

Tab. 4 Kinetická energie deště a pádová rychlost u různých typů deště (upraveno Lull, 1959)

Typ deště	Intenzita	Medián průměru	Pádová rychlost	Počet kapek	Kinetická energie na m ² za hod.
	(cm.h ⁻¹)	(mm)	(m.sec ⁻¹)	(n.m ⁻² .sec)	(joules/m ² .h)
Mlha	0,013	0,01	0,003	67 425 696	5,9 x 10 ⁻⁷
Mlha	0,005	0,10	0,021	27 018	1,2 x 10 ⁻³
Mrholení	0,025	0,96	4,1	150	2,2
Lehký déšť	0,010	1,24	4,8	280	12
Střední déšť	0,38	1,60	5,7	495	62
Hustý déšť	1,5	2,5	6,7	495	3,4 x 10 ²
Nadměrný déšť	4,1	2,40	7,3	820	3,2 x 10 ³
Intenzivní déšť	10,0	2,85	7,9	1 215	3,3 x 10 ³
Intenzivní déšť	10,0	4,00	8,9	440	4,0 x 10 ³
Intenzivní déšť	10,0	6,00	9,3	130	4,4 x 10 ³

2.5.2 Hydrologické a klimatické faktory v zimním období

Na rozdíl od letního období, kdy se na propustnosti půdy a tvorbě povrchových odtoků podílí z řady přírodních činitelů nejvíce intenzivní deště s vysokou kinetickou energií, v zimním období je to teplota půdy a půdní vlhkost. V zimním období dochází k povrchovému odtoku hlavně během tání sněhu. Tento efekt se zvyšuje s přílivem teplého vzduchu doprovázeného deštěm. Rychlost odtoku tavné vody je podstatně nižší než u odtoku z dešťových srážek. Je vyjadřována v mm za 24 hodin [mm.den⁻¹]. Největší rychlost povrchového odtoku z tání sněhu byla zaznamenána 0,001 do 0,08 mm.min⁻¹, zatímco největší rychlost odtoku z deště byla 4 až 5 mm.min⁻¹ (Pokladníková a Šťastná, 2006). Rychlost infiltrace bývá vlivem probíhajících mrazových procesů v půdě minimální a kolísá u jílovitých a hlinitých půd mezi 0,01 a 1,0 mm.den⁻¹.

Kryogenní (mrazové) procesy v půdě

V zimním období je infiltrační schopnost půd ovlivňována zejména promrzáním půdy. Při dlouhodobém promrzání půdy se voda z hlubších vrstev dostává k mrznoucímu pásmu a zde se mění v led v různých formách (ledové čočky, malé krystalky apod.) a mohou být v podstatě nepropustné pro vodu (Trimble et al., 1958, Dunne a Black, 1971). Toto pásmo, bylo dle Kasprzaka (1987) označeno jako tzv. pedoglačiální horizont.

Mezi dva hlavní zdroje vody pro tvorbu nepropustné vrstvy patří dle Hejduka a Kasprzaka (2010):

Voda z tajícího sněhu, popřípadě dešťové srážky, které se vyskytnou během tání (jako přerušovaný přísun půdní vláhy);

Voda přitékající z hlubších vrstev půdy k hranici promrzání (jako kontinuální přísun, který probíhá po celou dobu trvání záporných teplot půdy).

Vysoký obsah vody v půdě napomáhá vytvoření silnějšího pedoglačiálního horizontu, který následně více zpomaluje infiltraci (Kane a Stein, 1983).

Hejduk a Kasprzak (2010) ve svých pokusech prováděných v Brně - Kníničkách zjistili, že pedoglačiální horizont vzniká snadněji na půdách ulehých, bez podzimního agrotechnického zásahu (víceleté pícniny, strniště apod.), nebo při použití minimalizačního zpracování půdy.

Hejduk a Kasprzak (2004) uvádí, že se zvyšujícím se podílem ledu v půdě, klesá její infiltrační schopnost a v extrémních případech (pokud je zima dostatečně dlouhá a tuhá s větším počtem dílčích oblev) může být podíl povrchově odtékající vody ze srážek až 100 %. Naproti tomu promrzlá půda bez ledových čoček a krystalků může být více propustná a je zde vyšší infiltrační rychlost než u nezamrzlé půdy (Trimble et al., 1958).

2.5.3 Morfologické faktory

Mezi faktory ovlivňující průběh a velikost povrchového odtoku můžeme zařadit vliv sklonu a délky svahu. S rostoucí délkou svahu, tedy horizontální vzdáleností od místa vzniku povrchového odtoku k bodu, kde se sklon svahu snižuje natolik, že se plošný odtok soustředí do odtokové dráhy. Se vzrůstajícím sklonem svahu sílí unášecí síla povrchově odtékající vody a zároveň se zvyšují ztráty půdy, a to rychleji než je tomu

u délky svahu (Janeček et al., 2008). Naproti tomu Kasprzak (1990) uvádí, že v zimním období může dojít u jižních svahů s vyšší sklonitostí k většímu prohřátí půdy insolací a omezení tvorby zledovatělého horizontu, což následně vede ke snížení povrchového odtoku.

2.5.4 Geologické a půdní faktory

Zrnitostní složení půdy

Zrnitostní složení půdy je označováno jako textura a popisuje míru rozložení jednotlivých frakcí částic v půdě. Společně s dalšími charakteristikami určuje řadu fyzikálních a chemických parametrů půdy, má vliv na infiltraci vody, poměr kapilárních a nekapilárních pórů, obsah a složení edafonu a další půdotvorné procesy. Z pohledu technologických vlastností má zrnitost zásadní vliv na soudržnost (adheze, koheze) a konzistenci půdy. Těžké půdy umožňují vznik stabilní půdní struktury, která může zajišťovat vyšší infiltrační rychlost, než půdy písčité, které strukturu nevytváří a vždy obsahují podíl jemných částic ucpávajících póry mezi zrnky písku.

Při posuzování vlivu textury na propustnost půd je třeba brát v úvahu i vliv skeletu. Skeletovité půdy s obsahem malého procenta koloidní frakce se vyznačují obvykle velkou propustností (Holý, 1994).

Půdní struktura

Struktura půdy je dána vzájemným uspořádáním a vazbou půdních částic vytvářející menší či větší shluky, které se nazývají agregáty. Podle jejich velikosti je můžeme rozdělit na *mikroagregáty* (o průměru pod 0,25 mm), *makroagregáty* (o průměru nad 0,25 mm) a *megaagregáty* (o průměru nad 50 mm). Agregáty jsou ve vodě stabilní vlivem různých tmelících látek a dalšími vlivy popsány Kutílkem (1978). Půdy sypké, písčité a kamenité suti nevytvářejí agregáty, ale existence agregátů je zde většinou patrná (Kutílek, 1978).

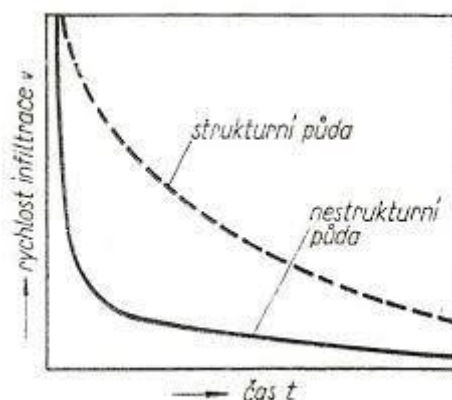
Umělým mechanickým způsobem (zhuťňováním půdní hmoty) za vyšší vlhkosti půdy dochází ke shlukování agregátů, popřípadě k deformaci shluků a vznikají nestabilní náhodné shluky půdní hmoty, tzv. *pseudoagregáty*.

Ideální strukturu půdy tvoří stabilní drobtovité agregáty o průměrné velikosti 1-10 mm. Pod travními porosty, které svým kořenovým systémem rozdrobují půdní hmotu a následně ji mírně zhuťňují, dochází ke vzniku ideálních drobtovitých agregátů o velikosti 1-5 mm (Kutílek, 1978).

Stabilita půdních agregátů je významnou agronomickou charakteristikou. Je zvyšována v přítomnosti dostatku kvalitních organických látek, vápníku a příznivého zrnitostního složení. Je snižována mechanickým působením dešťových kapek dopadajících na povrch holé půdy, nebo při nadměrném ovlhčení, za kterého dochází k vyplavování koloidů a vyluhování iontů Ca^{2+} . Obděláváním půdy těžkými mechanizmy za vysoké půdní vlhkosti, nebo vlhkosti blízké polní vodní kapacitě a vyšší. Může být snižována i peptizačními účinky průmyslových hnojiv (VFÚ, 2011), případně kombinací výše zmíněných faktorů

Při porovnání rychlosti infiltrace srážkové vody u středně těžké a těžké půdy nestrukturní s půdou strukturní, dochází u nestrukturní půdy k nižší počáteční rychlosti infiltrace, která se velmi rychle dále snižuje. U strukturní půdy, se počáteční vysoká rychlost infiltrace během času snižuje mírněji (obr. 9). Prudké snížení infiltrace na nestrukturní půdě je způsobeno rozpadem pseudoagregátů a vznikem půdního škraloupu. Vzduch uzavřený v pórech pod škraloupem zhoršuje průběh infiltrace, neboť bubliny vzduchu uzavírají makropóry a naopak u strukturní půdy nedochází k rozplavení agregátů a vzduch z půdních pórů uniká. Srážková voda se tak na nestrukturní půdě ztrácí povrchovým odtokem a výparem a v nedostatečné míře provhlčuje půdu v nižších horizontech. Na nestrukturní půdě se vytváří souvislé kapilární póry, kterými je voda při vysušení povrchové vrstvy přiváděna k povrchu z hlubších vrstev. Na strukturní půdě jsou kapiláry zpřetrhány vlivem existence agregátů, a proto se velmi pozvolna snižuje vlhkost hlubších vrstev (Kutílek, 1978).

Viljams in Holý (1994) uvádí, že půda s drobtovitou strukturou přijímá až 85 % srážkové vody, kdežto půda s prašnou strukturou (za vlhka slitou) pouze 30 %. Smolík in Holý (1994) zjistil, že drobtovité půdy vykazují plnou vsakovací schopnost a protierozní odolnost při sklonu půdního povrchu do 17 %.



Obr. 9 Průběh infiltrace na strukturní a nestrukturní půdě (Kutílek, 1978)

Půdy s příznivě vyvinutou půdní strukturou přijímají lépe srážkovou vodu a lépe s ní hospodaří, zatímco nestrukturní půda je z hlediska vodohospodářského nevýhodná, zvyšuje povrchové odtoky, zmenšuje příjem vody do půdního profilu a snadněji podléhá vysušování (Holý, 1994), (Kutílek, 1978).

Strukturu půdy lze posuzovat podle pórovitosti, nebo podle objemové hmotnosti suché půdy. Kutílek (1996) uvádí mezní hodnoty objemové hmotnosti suché půdy a pórovitosti pro strukturní stav humusového horizontu v tabulce č. 5.

Tab. 5 Strukturní stav humusového horizontu u středně těžkých a těžkých půd (Kutílek, 1996)

Strukturní stav humusového horizontu	Objemová hmotnost suché zeminy (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)
Výborný	< 1,2	> 54
Dobrý	1,2 - 1,4	46 - 54
Nevyhovující	1,4 - 1,6	39 - 46
Nestrukturní	1,6 - 1,8	31 - 39

Ve strukturní půdě je vyšší poměr pórů nekapilárních ke kapilárním. V kapilárních pórech může být po dlouhé období voda poutána kapilárními silami, zatímco nekapilární póry jsou obvykle vyplněny vzduchem (Holý, 1994), (Kutílek, 1978). V nestrukturní středně těžké a těžké půdě jsou přítomny především kapilární póry, a proto jsou tyto půdy více náchylné k zamokření srážkovou vodou ve vlhkém období (Kutílek, 1978).

Na strukturu půdy má příznivý vliv: absence hospodaření na pozemku během zimy, střídání cyklů vysychání a sycení půdy, tání a promrzání půdy, prokořeňování a biologická aktivita v půdě (Van den Akker a Schjønning, 2004; Van Eekeren et al., 2010).

Vlhkost půdy [Θ]

Vlhkost půdy má vliv na hodnotu odtokového součinitele a zároveň působí na soudržnost půdy. Přílišná počáteční vlhkost půdy snižuje infiltraci srážkové vody, jak uvádí Matula (2003) v soulase s Kutilek a Nielsen (1994), kteří zjistili, že počáteční vlhkost půdy má vliv na rychlost infiltrace v počáteční a střední fázi měření. To je způsobeno nasycením makropórů půdní vodou a jejich uzavírání pro vsakovanou vodu vlivem bobtnání půdních koloidů.

Hraniční hodnoty vlhkosti, jimiž jsou vzájemně odděleny jednotlivé kategorie vody v půdě, lze vyjádřit pomocí půdních hydrolimitů, jež jsou blíže popsány Kutílkem (1978).

Pórovitost půdy [P]

Půdní póry jsou prostory v půdě, které jsou zaplněny plynnou nebo kapalnou fází. Mohou být různé velikosti, tvaru a různým způsobem propojeny. Poměr objemu pórů k celkovému objemu půdy v přirozeném uložení se nazývá pórovitost půdy. Celková pórovitost zemědělských půd se ve vrchních vrstvách pohybuje v rozmezí 40-50 %. Ve spodních vrstvách klesá na 30-40 %. Póry se třídí podle druhu a velikosti sil, které působí na vodu v nich obsaženou, na tři skupiny. 1) Kapilární póry, v nichž je voda ovládána kapilárními silami, zadržují vodu a umožňují její pohyb proti působení gravitace. Tyto póry mají hlavní význam v zásobování rostlin vodou v období bez srážek a je v nich omezen pohyb vzduchu. 2) Nekapilární póry, u kterých neomezeně působí gravitace na vodu v nich obsaženou a významně se podílí na výměně plynné fáze mezi půdou a ovzduším. 3) Střední (semikapilární) póry jsou přechodem mezi kapilárními a nekapilárními póry.

Objem, tvar a velikost půdních pórů mají vliv na vlastnosti vody obsažené v půdě a na rychlost pohybu vody. Póry v půdě nejsou rozloženy rovnoměrně, ale tvoří systém půdních trhlin, prasklin a chodbiček, který označujeme jako makropóry. Makropóry

jsou větší nekapilární póry, které vznikají vlivem podmínek abiotických (viz síť půdních puklin), biotických (viz biologická aktivita půdy) a antropogenních. Mezi antropogenní činitele ovlivňující výskyt makropórů v půdě patří zejména kultivace půdy. Při pravidelné kultivaci dochází k narušení jejich kontinuity a nemůže přes ně proudit voda, zatímco při absenci kultivace u bezorebných technik a TTP se jejich kontinuita rychle obnovuje. Přestože funkční makropóry (ty, které jsou spojeny s povrchem půdy) tvoří pouze 1-5 % celkového objemu pórů, jsou schopny odvést až 50 % v případech, kdy intenzita deště převyšuje vsakovací schopnost půd (Litschmann a Straka 2000). Tento jev - zrychlení infiltrační schopnosti půd vlivem makropórů - je popisován jako preferenční proudění nebo makropórové proudění.

Kvalitativní a kvantitativní charakteristiky půdních pórů lze nejlépe určit prostřednictvím retenční křivky (pF křivka), která vyjadřuje schopnost půdy udržet půdní vodu proti působení vnějších sil (Tlapák, 1992).

Objemová hmotnost suché zeminy [ρ_d]

Objemová hmotnost suché zeminy je hmotnost vysušené objemové jednotky půdy v neporušeném stavu. Stanovuje se přímým měřením objemu a vážením, proto je základní hodnotou pro výpočet pórovitosti. Objemová hmotnost není konstantní ani neměnnou hodnotou, ale mění se během roku, v průběhu vegetačního období, při změnách vlhkosti (bobtnáním a smršťováním půdy), mrazem (jímž dochází k nakypřování), změnami půdní struktury, obděláváním, intenzivním rozvojem kořenového systému, aj. Většina těchto faktorů působí mnohem více v povrchových horizontech než ve spodních částech půdního profilu (Kutílek, 1978). Objemová hmotnost suché zeminy indikuje kyprost nebo ulehlost půdy a určuje její strukturní stav (tab. 5). Optimální hodnota ρ_v u travních porostů se dle Karabcové (2009) pohybuje okolo $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$. Čím je půda písčitéjší, tím je optimální ρ_v vyšší a pórovitost nižší.

Retenční vodní kapacita [RVK]

Retenční vodní kapacita znamená maximální množství vody, které je půda schopna trvaleji zadržet vlastními (kapilárními) silami v téměř rovnovážném stavu po nadměrném zavlažení. RVK zároveň určuje objem kapilárních pórů.

Optimální hodnoty jsou u středně těžkých až těžkých půd v rozpětí 20-35 %. Retenční schopnost půdy je snížena při nesprávném využívání travních porostů, při zhutnění půdy v důsledku používání mechanizace za vyšší vlhkosti nebo při nadměrném zatížení zvířaty na pastvě. Snížená retenční kapacita znamená menší schopnost půdy zadržovat vodu (Karabcová, 2009).

Minimální vzdušná kapacita [MVK]

Minimální vzdušná kapacita udává podíl nekapilárních pórů, ze kterých voda po závlaze rychle odtéká. V případě, že dojde k snížení MVK pod 10 % je ornice v kritickém stavu a vyžaduje agromeliorační zásah (Lhotský, 1984). U lučních půd je minimální hodnota udávána 5 % a hodnota pod 5 % značí nadměrně zhutněnou půdu náchylnou k zamokření (Kutílek, 1978).

Při nízké provzdušněnosti je zpomalena výměna vzduchu v půdě a tím i rozvoj aerobních mikroorganismů. Příliš vysoká provzdušněnost značí až přílišnou činnost těchto mikroorganismů a možnou mineralizaci humusu (Pokorný et al., 2007).

Biologická aktivita půdy

Půdní fauna má dle Trimble a Mendel (1995) pozitivní vliv na půdu: 1. zvyšováním pórovitosti a propustnosti půdy, 2. zlepšováním půdní struktury a 3. zlepšováním cyklu živin a úrodnosti půdy.

Mezi nejvíce prospěšný mezoedafon v souvislosti se zlepšováním půdní struktury bývají řazeny žížaly (*Lumbricina*), avšak nezanedbatelný vliv mají rovněž členovci aj. Ti jsou spolutvárci drobtovité struktury - vytvářejí chodbičky a vylučují stabilizující látky pro tvorbu půdních drobtů. Tím zvyšují pórovitost a propustnost půdy pro vodu a vzduch (Javůrek a Vach, 2008).

Půdní mikroedafon (bakterie, aktinomycety, houby a prvoci) se podílí na důležitých procesech přeměn organických látek i minerálních látek, tj. humifikace, oxidace amoniaku, rozklad síranů, dusičnanů atd. a má tedy vliv na kvalitu půdního humusu (Javůrek a Vach, 2008). Duiker (2004) uvádí, že v půdě pod travními porosty se nachází 1,25-2,5 tun bakterií a 2,5-5 tun mikroskopických hub na hektar.

Sít' půdních puklin

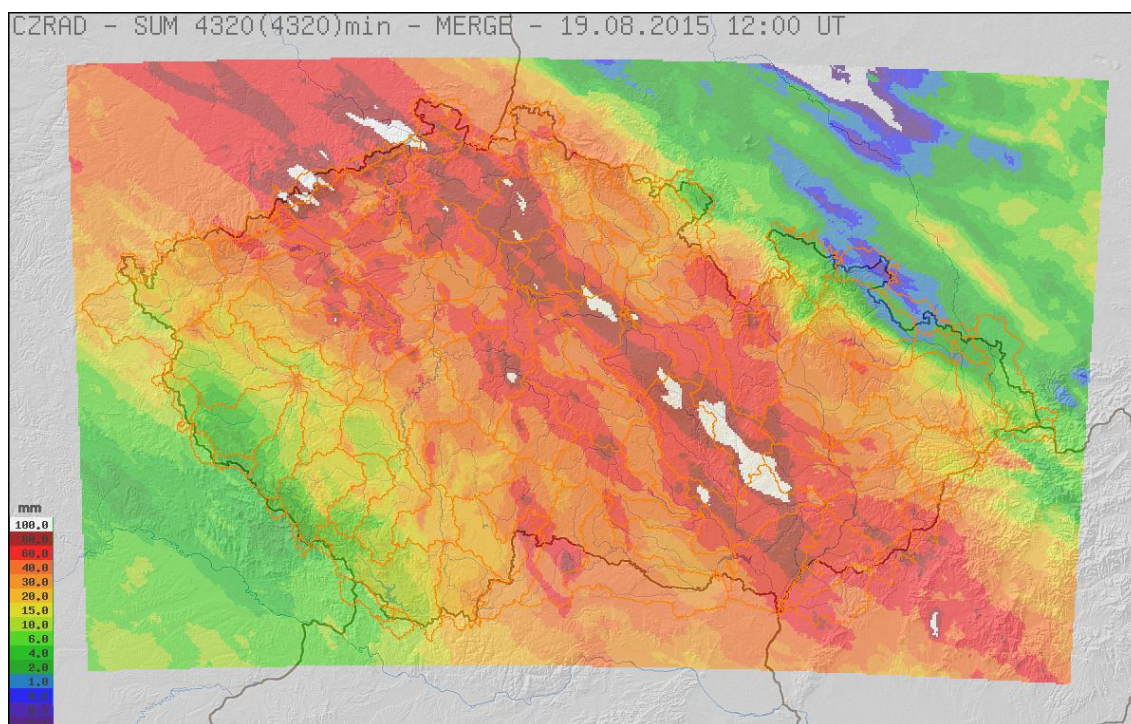
U těžších jílovitějších půd dochází při nadbytku vláhly k bobtnání jílovitých částic a při vysušování půdy k jejich smršťování což vede ke vzniku prasklin a trhlin větších rozměrů. Na extrémně těžkých půdách mohou dosahovat takto vzniklé trhliny šířky 4-7 cm a hloubky 50-120 cm Bedrna in Litschmann a Straka (2000). K rozšiřování půdních puklin dochází také při opakovaném promrzání a rozmrzání půdy, kdy dochází k postupné koncentraci střídavě tající a zamrzající vody v trhlinách.

V půdní hydrologii mají půdní pukliny velký vliv na infiltraci a počátek povrchového odtoku. Kutílek (1978) uvádí, že povrchový odtok z přívalové srážky je zdržen vlivem puklin o více než jeden řád časových jednotek. Pro podrobnější šetření infiltrace za sucha je tedy nutné puklinový systém určitým způsobem charakterizovat. Nejvýhodnější je údaj o celkové ploše puklin na topografickém povrchu půdy a o délce puklin na povrchu (Kutílek 1978).

Příkladem tohoto jevu můžou být deště, které byly zaznamenány 16.-19. 8. 2015 (obr. 10), kdy se na našem území vyskytly místy velmi vydatné srážky (ne však přívalové deště) ve velmi suchém období. Za jiných podmínek by došlo k významnému zvýšení hladin vodních toků. Avšak jak ukazuje tabulka č. 6, prakticky veškerá voda se buď vsákla do půdy, nebo se vypařila. Data v tabulce č. 6 navíc ukazují, jak velké množství vody je půda schopna absorbovat za sucha (ČHMÚ, 2015). To mohlo být zvýrazněno tvorbou půdních puklin, čímž došlo ke zvětšení vsakovací plochy a zejména povrchové retence.

Tab. 6 Úhrn srážek, odtoková výška a její podíl ze spadlých srážek na povodí k profilům vybraných vodoměrných stanic (ČHMÚ, 2015).

Tok	Stanice	Plocha povodí [km ²]	Srážky [mm]	Odtok [mm]	Podíl odtoku a srážek [%]
Loučná	Dašice	625	74.8	1.6	2.1
Klenice	Mladá Boleslav	169	92.4	4.0	4.3
Jevíčka	Chornice	180	76.6	4.6	6.0
Moštěnka	Prusy	230	83.8	2.6	3.1
Olšava	Uherský Brod	401	104.6	3.2	3.1
Velička	Strážnice	172	89.6	2.1	2.3
Svratka	Dalečín	367	99.3	4.9	4.9
Svitava	Bílovice n. Sv.	1 120	98.0	2.6	2.7



Obr. 10 Srážkový úhrn za 72 hodin v období od 16. 8. 2015 14:00 do 19. 8. 2015 SELČ
Zdroj: ČHMÚ (2015)

2.5.5 Vliv vegetačního pokryvu

Ochranný vliv vegetace je přímo úměrný pokryvnosti a hustotě porostu v době největšího výskytu přívalových dešťů (duben - září). Vliv vegetačního pokryvu půdy se projevuje dle Janečka (2008) následujícími způsoby:

- Přímou ochranou povrchu půdy před působením dopadajících dešťových kapek. Vegetační pokryv půd tlumí kinetickou energii dopadajícího deště a eliminuje jeho negativní působení na propustnost půdy. Celoroční disipační (tlumící) účinek některých druhů zemědělských plodin vyjádřil Kasprzak (1990) v tab. 8.
- Zpomalováním rychlosti povrchového odtoku. Pomocí Manningova součinitele drsnosti (n) pro plošný povrchový odtok (tab. 7) je vyjádřen vliv odporu povrchu půdy (vegetace) na proudění. A používá se v erodologii pro výpočet doby doběhu povrchového odtoku.
- Působením vegetace na půdní vlastnosti, zejména na zvyšování pórovitosti a propustnosti skrz kořenové kanálky, dodáváním organické hmoty do půdy a poskytováním vhodného prostředí pro půdní faunu (Thurow, 1991).
- Mechanickým zpevněním půdy kořenovým systémem. Duiker (2004) uvádí, že hektar půdy pod travním porostem průměrně obsahuje 25 tun živých travních kořínků a 100 tun mrtvé organické hmoty.

V erodologii je tento vliv ochranného vlivu vegetace jedním z faktorů (C) pro výpočet průměrné dlouhodobé ztráty půdy erozí z pozemků. U víceletých trav má nejnižší koeficient 0,005 u vojtěšky 0,02 a nejvyšší (nejhorší ochranný vliv) u širokořádkových plodin (až 0,90 u kukuřice).

Tab. 7 Manningův součinitel drsnosti (n) pro plošný povrchový odtok (Janeček et al., 2012)

Popis povrchu	Manningův součinitel drsnosti (n) pro plošný povrchový odtok
Hladký povrch (beton, asfalt, štěrk, holá půda)	0,011
Úhor bez posklizňových zbytků	0,05
Obdělávaná půda s posklizňovými zbytky < 20 % povrchu	0,06
Obdělávaná půda s posklizňovými zbytky > 20 % povrchu	0,17
Travní porost nízký	0,15
Travní porost střední	0,24
Travní porost vysoký, hustý	0,41
Les s bylinným porostem řídkým	0,40
Les s bylinným porostem hustým	0,80

Tab. 8 Hodnoty součinitel disipačního účinku plodin (Kasprzak, 1990)

Plodina	Disipační účinek
Víceletá tráva a louky	0,995
Jetel červený	0,985
Vojtěška	0,980
Pšenice ozimá po jetelovinách	0,920
Pšenice ozimá po obilovinách	0,860
Ječmen jarní	0,830
Brambory	0,540
Cukrovka	0,460
Kukuřice	0,400
Holá půda	0,000

2.5.6 Vliv travních zasakovacích pásů na tvorbu povrchového odtoku a eroze

Otázkou ochrany krajiny před nadměrným povrchovým odtokem a erozí se zabývala řada autorů. Byl tak vytvořen ucelený soubor způsobů ochrany proti těmto jevům v podobě organizačních, agrotechnických a technických opatření.

Bylo zjištěno, že zapojený travní porost je nejlepší protierozní ochranou (Janeček et al., 2008) při výběru vhodných druhů (Vítek a Hrabě, 1983). Nejpoužívanější a investičně nejméně náročné opatření pro ochranu půdy a povrchových vod před produkty eroze je vytvoření zasakovacích zatravněných pásů (Pasák et al., 1984; Hejduk a Kasprzak, 2004). Travní zasakovací pásy se navrhují na svažitéch pozemcích podél vrstevnic, kde se střídají s pásy plodin s nedostatečně chránících půdu před erozí, případně se jimi lemují vodoteče a nádrže, které chceme chránit. Zvýšení infiltrační schopnosti těchto pásů je zabezpečeno trvalým vegetačním pokryvem, který chrání půdu před deformačním účinkem dešťů, poutá půdu kořenovým systémem, vytváří příznivou půdní strukturu a vhodné prostředí pro rozvoj půdního edafonu, který vytváří půdní chodbičky a kanálky.

V příspěvku k návrhu šířky ochranných zatravněných pásů Hejduk a Kasprzak (2004) uvádí, že v případě ochrany vodního toku nebo nádrže pod svahem o délce 100 m by při přívalovém dešti o intenzitě $1,03 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, s dobou trvání 20 min byla dostatečná šířka ochranného zatravněného pásu u jednou ročně koseného travního porostu (bez vlivu zhutnění) 4000 mm.

2.5.7 Způsob využívání a obhospodařování půdy

Způsob využívání a obhospodařování půdy záleží na volbě a polohovém rozmístění kultur, na jejich rozmístění do vhodného osevního postupu a na provedení pracovních operací. Každá pracovní operace vyvolává změny v propustnosti půdy.

Na orné půdě se jedná především o tyto agrotechnické operace: podmítka, orbu, smykování, vláčení, diskování, válení, meziřádkovou kultivaci povrchu, podrývání, výsadbu, setí, sklizeň, různé způsoby hnojení apod. Tyto operace obecně zlepšují propustnost půdy pro vodu. Rizikem, které má vliv na rychlost infiltrace, může být jednak nadměrné zhutňování půdy, které bude popsáno v následující kapitole, ale také již méně zmiňované provádění agrotechnických operací stále ve stejné hloubce. Dochází tak k vytvoření nestrukturní zhutnělé jílovité vrstvy pod povrchem půdy. Pakliže na tuto vrstvu narazí čelo zvlčení, dochází ke zpomalení rychlosti vsaku. Nápravou může být rozrušení této vrstvy podrýváním nebo změnou hloubky orby (Kutílek, 2012).

Nadměrné zhutnění půdy

Současný nepříznivý stav fyzikálních vlastností zemědělských půd v České republice je negativně ovlivněn jednostrannými a nevhodným intenzifikačními opatřeními. Nejzávažnější příčinou nadměrného zhutňování půd z technologického hlediska jsou opakované přejezdy těžkých mechanismů po pozemcích za vysoké vlhkosti, kdy je půda snadno zranitelná (Pokorný et al., 2001; Javůrek a Vach 2008). Podle Javůrka a Vacha (2008) jsou další příčiny nadměrného zhutňování ve vysokých dávkách a nesprávné volbě minerálních hnojiv, nedostatečném přísunu organické hmoty do půdy, a v celé řadě dalších faktorů kdy nebyly využity kompenzační vazby preventivního charakteru a agrobiologická opatření vedoucí k omezování nadměrného zhutnění půdy. Podle průzkumu provedeného v 80. letech minulého století bylo nadměrným zhutněním postiženo kolem 38 % výměry orné půdy na území současné ČR.

Avšak ani v dnešní době nedochází k zlepšení stavu zhutnění půdy na našem území. Dle Situační a výhledové zprávy *Půda* (MZe ČR, 1999) je nadměrným zhutněním v různém stupni postiženo přibližně 45 % zemědělského půdního fondu. Z toho je 15 % zhutnění genetické (dané přirozenými vlastnostmi těžkých půd) a 30 % zhutnění technogenní v důsledku nevhodného způsobu strojního obdělávání půdy.

Hlavní příčina nadměrného zhutnění je dnes, stejně jako v minulosti, zejména antropogenního původu. Jedná se o:

- Vysoký měrný tlak stále větších a těžších strojů na půdu,
- velikost a uspořádání půdního fondu - při absenci sítě polních cest a vlivem obhospodařování velkých půdních bloků, které vznikly za minulého režimu,
- dobu vstupu strojů na pozemky a počet pracovních operací.

V současnosti je situace o to složitější, že ve velké míře je půda dlouhodobě degradována zhutněním v podorničních horizontech. Zhutnění v těchto hloubkách lze eliminovat jen obtížně a je odstranitelné pouze v dlouhodobém časovém horizontu (Javůrek a Vach, 2008). Na stupni zhutnění závisí schopnost půdy přijímat srážkovou vodu a vytvářet nebo omezovat povrchový odtok (Braun et al., 1996).

Efektivnímu řešení této problematiky jak na orné půdě, tak na travních porostech se dosud zemědělská praxe věnuje jen velmi málo. Mnoho výrobců strojů na zpracování půdy nyní nabízí podrýváky na zmírnění následků zhutnění. Avšak jak ukazuje praxe, jejich použití je často za vysoké vlhkosti půdy a zároveň i v nevhodné hloubce. Setkáme se s případy, kdy je podrývák, díky plovoucí poloze hydrauliky, nastavený na co nejmenší prokluz kol. V tomto případě je podrývání nad zhutnělou vrstvou půdy a nedochází k jejímu rozrušování, ale jen k hloubkovému kypření. Případně se zemědělec snaží podrývat pod zhutnělým horizontem a rozrušit tak celou zhutnělou vrstvou, která se vytvářela mnoho let, za jednu pracovní operaci. Tím však dochází k promíchávání humusového horizontu se strukturně narušenou a na živiny chudou zhutnělou vrstvou a jeho degradaci. Vzhledem k těmto důvodům se zhutnění stává stále větším problémem nejen svým rozsahem, ale i stupněm degradace.

Následky nadměrného zhutnění půdy

Zhutnění půdy má za následek zvýšení objemové hmotnosti půdy, snížení pórovitosti a při vyšším stupni dochází k destrukci půdních agregátů. To vede k omezení propustnosti půdy pro vodu i pro vzduch, a snižuje retenci vody v krajině. Rovněž pak dochází ke snížení obsahu půdního vzduchu a pomalému prohřívání půdy.

Snížení infiltrační schopnosti půdy vede se zvýšením povrchového odtoku na svažitéch pozemcích a k tvorbě kaluží a vzniku zamokření na pozemcích rovinatých. Při povrchovém odtoku ze svažitéch pozemků dochází ke smyvu nejurodnější části půd

včetně živin a agrochemikálií v ní obsažených. Tvorba kaluží a podmáčených míst má za následek jednak úhyn vegetace, ale také brání vstupu na pozemek a tím zpožďuje zahájení agrotechnických operací a dodržování agronomických termínů.

Při nadměrném zhutnění půdy dochází k omezení biologické aktivity v půdě. Rozvoj a výskyt půdních organismů je v půdách podmíněn nejen dostatečnou zásobou organických látek ale i dostatečnou provzdušněností a vlhkostí. Příkladem je studie z Austrálie, zkoumající vliv zhutnění při 10 tunovém zatížení nápravy na makrofaunu půdy (tab. 9) (Radford et al. 2001). Vlivem nadměrného zhutnění došlo k omezení počtu žížal na pozemku o ploše 1 ha ze 415 000 na 20 000. Při zhutnění dochází k omezení aktivity mezoedafonu a mikroedafonu vlivem snižování pórovitosti, jelikož tento edafon patří mezi aerobní organismy (Newell-Price et al., 2013). Biologicky aktivní půda je podmínkou pro intenzivní a vyvážený příjem živin a jejich mobilizaci rostlinami. Javůrek a Vach (2008) uvádí, že u nadměrně zhutnělých půd, při objemové hmotnosti nad $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$ u středně těžkých půd se značně snižuje efektivnost hnojení a zejména se projevuje nedostatek přijatelného dusíku.

Tab. 9 Vliv zhutnění půdy na počet žížal v Austrálii (průměr za 5 let - upraveno podle Radforda et al., 2001)

Způsob ošetřování	Počet žížal (na 1 ha)
Bez zhutnění	415 000
Roční zhutňování vlhké půdy při 10 tunovém zatížení nápravy	20 000
Roční zhutňování vlhké půdy při 6 tunovém zatížení nápravy	50 000
Roční zhutňování suché půdy při 6 tunovém zatížení nápravy	550 000
Zhutnění pouze v prvním roce	275 000
Podrývání po zhutnění v prvním roce	250 000

Dále bylo zjištěno, že nadměrné zhutnění půdy redukuje růst a vývoj plodin. Dochází k omezenému růstu kořenů (jsou ztlustlé a neprorůstají do spodních vrstev půdy). Následkem je snížení výnosů rostlin.

V tabulce č. 10 jsou znázorněny limitní hodnoty vybraných fyzikálních vlastností půdy, při jejichž překročení dochází k degradaci fyzikálních vlastností půdy, škodlivému působení na rostliny, půdní edafon a na efektivitu využití aplikovaných hnojiv.

Tab. 10 Limitní hodnoty vybraných fyzikálních vlastností zhutnělé půdy (Lhotský, 2000)

Fyzikální vlastnosti	Půdní druh					
	J	JV-JH	H	PH	HP	P
Objemová hmotnost (g.cm ⁻³)	> 1,35	> 1,40	> 1,45	> 1,55	> 1,60	>1,70
Pórovitost (% obj.)	< 48	< 47	< 45	< 42	< 40	< 38
Penetrační odpor půdy (MPa)	2,8 – 3,2	3,3 – 3,7	3,8 -4,2	4,5 – 5,0	5,5	> 6,0
Při vlhkosti % hmot.	28 - 24	24 - 20	18 - 16	15 - 13	12	10

Legenda: J – jílovitá; JV – jílovitá půda; JH – jílovitohlinitá půda; H – hlinitá půda; PH – písčitohlinitá půda; HP – hlinitopísčitá půda; P – písčitá půda.

2.6 Obhospodařování travních porostů

Travní porosty můžeme dle hlavního způsobu využití rozdělit na luční porosty a některé víceleté pícniny na orné půdě obhospodařované sečením, nebo pastevní porosty využívané pro pastvu zvířat.

Dobře obhospodařované travní porosty mají v krajině řadu ekonomických a environmentálních funkcí, avšak jsou-li obhospodařovány nesprávně, za vysoké vlhkosti a při velkém zatížení půdy, dochází k degradaci půdy (půdní struktury), snižování dostupnosti půdní vláhy a zásob podzemních vod, zhoršování kvality vod povrchových a okolního životního prostředí (Evans, 1997; Billota et al., 2007; Franzluebbbers, 2011; Lemaire et al., 2011). Intenzivní obhospodařování travních porostů je dle Billoty et al. (2007) charakterizováno vysokým zatížením zvířaty, vysokými vstupy agrochemikálií (pesticidy, hnojiva) a energetickými vstupy (traktory, zemědělské stroje).

Obhospodařování travních porostů se skládá především z těchto pracovních operací: zakládání, smykování, válení a obnovu travních porostů. Rozhodující vlivy působí sečení, manipulace s pící, sklizeň nebo pastevní technika. Účinek na půdu je ovlivněn nejen intenzitou zatížení, ale také tím, zda se sklizeň nebo pastva provozuje za sucha nebo za vysoké vlhkosti půdy (Kapsrzak, 1990).

2.6.1 Následky intenzivní pastvy zvířat na životní prostředí

Mezi faktory, které nejvíce ovlivňují velikost vlivu pastvy na životní prostředí, patří: druh a stáří zvířete, zatížení pastviny, vlhkost půdy v době pastvy a kvalita vegetačního pokryvu.

Intenzivní pastva zvířat v historii

Následky intenzivní pastvy nejsou známy jenom ze současnosti, ale lze je datovat až do starověku. Lidská společnost ve starověku byla z velké části založena na kočovném pastevnictví, a proto využívala půdu nejvíce jako pastviny. Ty byly spásány velmi radikálně, zejména pokud byl jejich nedostatek. Dobytek byl držen na pastvině co nejdéle, byly spásány nejen nížinné, ale i svahové pastviny a páslo se při velkém počtu dobytka až do úplného spasení porostu. Poté se hledali pastviny nové, zatímco se pastvou zpustošené krajiny (dnešní turkestanské pouště) měnily erozí v písčité pouště. Takto byly ve starověku zničeny středoasijské stepi, jejichž kočovní obyvatelé byli nedostatkem pastvin donucováni k stěhování do vlhčích západních krajín (stěhování národů v 5. a 6. stol. n. l.) (Jůva a Cáblik, 1953).

V Evropě, ještě za pozdního středověku, nebylo bráněno kácení lesů, pastvě a polaření ve vyšších polohách. Teprve v roce 1453 ve švýcarském kantonu Fribourg poprvé vydán zákaz volné pastvy ovcí a koz, zejména v mlazinách a později byl vydán i v jiných kantonech. V roce 1515 ve Francii byla zakázána královským dekretem pastva ovcí a koz v královských lesích (Jůva a Cáblik, 1953).

Postupně se přicházelo na to, že špatně provozované pastevnictví silně narušuje půdu tím, že intenzivně spásaný a paznehty zničený travní porost netvoří souvislou pokrývku a vystavuje tak povrch půdy účinkům větrné a vodní eroze.

Intenzivní pastva zvířat dnes

Na špatný a erozně nebezpečný stav našich a zejména slovenských pastvin poukázal V. Úlehla in Jůva a Cáblik (1954), který zjistil na hoře Stohu na Malé Fatře, kde se v létě 1947 pásli krmní voly, že 55-60 % veškeré luční půdy bylo proměněno paznehty zvířat v úplná holá, sutí pokrytá místa. Jůva a Cáblik (1954) dále uvádí, že horské pastviny

a poloniny jsou většinou protkány ovčími a kravskými chodníčky, které snižují travnatou plochu až na polovinu.

Síla, kterou zvířata působí na půdu, je závislá na jejich hmotnosti a kontaktní ploše paznehtu či kopyta s půdou. Di et al., (2001) ve svých pokusech uvádí, že statický tlak paznehtů krav na půdu se pohybuje od 130 kPa, když zvíře stojí, až do 220 kPa pokud se zvíře pohybuje a má tak pouze dvě nebo tři nohy v kontaktu s půdou. Jakmile se nejedná o rovný povrch, nebo při zrychlování a brždění zvířete nastává tlak dynamický, který může být vyšší než 400 kPa (Climo a Richradson in Di et al., 2001). U ovcí se tlak na půdu pohybuje od 50 do 80 kPa a může narůst až na 200 kPa při pohybu. (Willat a Pullar in Billota et al., 2007). Lhotský (2000) uvádí, že zhutnění půdy vyvolávají tlaky překračující okamžitou únosnost půdy. U strojů jsou limitem kontaktní tlaky v rozmezí 50 až 150 kPa, po jejichž překročení dochází k negativním změnám fyzikálních vlastností půdy.

Spásání porostů při vysoké vlhkosti a vysokém zatížení zvířaty působí negativně na fyzikální vlastnosti půdy. Dochází k degradaci půdní struktury a poklesu infiltrační schopnosti pastvin (Donkor et al., 2002; Rocky, 2011). V případě výskytu intenzivních dešťů tak dochází k povrchovým odtokům. Paznehty hospodářských zvířat narušují travní drn a vystavují povrch půdy erozi. Následný povrchový odtok z narušených míst je schopen transportovat větší množství zeminy, rostlinných zbytků a zvířecích exkrementů do povrchových vod (Billota et al., 2007). Transportovaný materiál pak zůstává v povrchových vodách (Walling et al. 2003), čímž dochází ke zhoršení její kvality - zanášení vodních staveb, eutrofizaci (Hubbard et al., 2004) a může dojít ke kontaminaci vody patogeny (Trevisan et al., 2010; Muirhead et al., 2005; Rais 1990).

Ve své práci *Vliv pastvy na fyzikální vlastnosti půdy*, Greenwood a McKenzie (2001) upozorňují na to, jak málo pozornosti je věnováno změnám fyzikálních vlastností půdy u pastvin, na rozdíl od orné půdy, navzdory tomu, že v mnoha případech je malá šance využít jakékoliv regeneračních opatření na pastvinách.

Zvýšeným pastevním tlakem dochází k ovlivnění výnosů píce nepřímo (zhutněním půdy), ale také přímým narušováním drnu paznehty. Di et al. 2001 zjistil, že kombinací těchto faktorů po dobu 5 – 8 měsíců, při mechanické simulaci zhutnění paznehtů skotu, došlo k redukci výnosů suché hmoty jílku vytrvalého o 9 %.

Exkrementy hospodářských zvířat jsou bohatým zdrojem živin, které představují největší riziko eutrofizace povrchových vod (především dusíku a fosforu). Pouze malé

procento živin (3 - 30 %) je opravdu využito pro stavbu těla zvířat a tvorbu mléka. Většina přijatých živin je vyloučena výkaly a močí (Billota et al., 2007). Hubbard et al., (2004) uvádí, že hmotnost exkrementů vyprodukovaných na 1000 kg živé váhy za den na pastvě je u ovcí 40 a u skotu 86 kg.

Přebytek dusíku a fosforu, který není vstřebán rostlinami nebo zadržen v půdě, může obohacovat povrchové vody o dusičnany, dusitaný a fosforečnany. Pakliže se tyto živiny dostanou do vodních toků, rybníků a nádrží způsobují eutrofizaci a zhoršují kvalitu pitné vody.

Obsah dusičnanů a dusitanů v pitné vodě je v České republice upraven vyhláškou 252/2004 Sb. (MZČR) a nesmí překročit hodnotu $0,5 \text{ mg.l}^{-1}$ u dusitanů a 50 mg.l^{-1} u dusičnanů pro dospělé i pro kojence (dříve uváděná norma 15 mg.l^{-1} již neplatí). Vyšší obsah dusičnanů ve vodě může vést u kojenců k methemoglobinémii, avšak v České republice byly hlášeny její ojedinělé případy, u kterých nebylo navíc zřejmé, jestli vznikly v souvislosti s pitnou vodou (Kožíšek, 2007).

Bachor a zažívací trakt hospodářských zvířat jsou hostitelem bohaté mikroflóry zejména bakterií. Mezi patogenní mikroorganismy vyskytující se ve výkalech hospodářských zvířat jsou nejčastěji *Escherichia coli* O157:H7, *Campylobacter jejuni*, *Salmonella* sp., a další (Hubbard et al., 2004). Reservoárem patogenu *E. coli* O157:H7 jsou především přežvýkavci. Přenos na člověka je způsoben kontaminovanou potravou, nebo při fekálním znečištění vody.

V České republice byl poslední případ výskytu tohoto patogenu zachycen v roce 1995, po konzumaci kontaminované potravou. Epidemie *E. coli* O157:H7 je vážným problémem především Severní Ameriky, Japonska, Jižní Afriky, Austrálie a v současnosti také některých oblastí Evropy (Deutsch, 2011).

Způsoby kontaminace patogeny (převzato z McDowell et al., 2008) jsou znázorněny na obrázku č. 11. McDowell et al., (2008) rovněž uvádějí několik studií, ve kterých byla měřena koncentrace patogenních mikroorganismů ve výkalech. Průměrná koncentrace se pohybovala v rozmezí od 10^3 do 10^6 kolonií tvořících jednotky (CFU) na 100 mL^{-1} . Jelikož se jedná o živé organismy, může jejich koncentrace vlivem prostředí narůstat nebo se snižovat až na nulu. Je to ovlivňováno časovou prodlevou mezi vypuštěním exkrementu a srážkovou událostí, případně povrchovým odtokem.



Obr. 11 Koloběh patogenních organismů hospodářských zvířat v životním prostředí (upraveno McDowell et al., 2008)

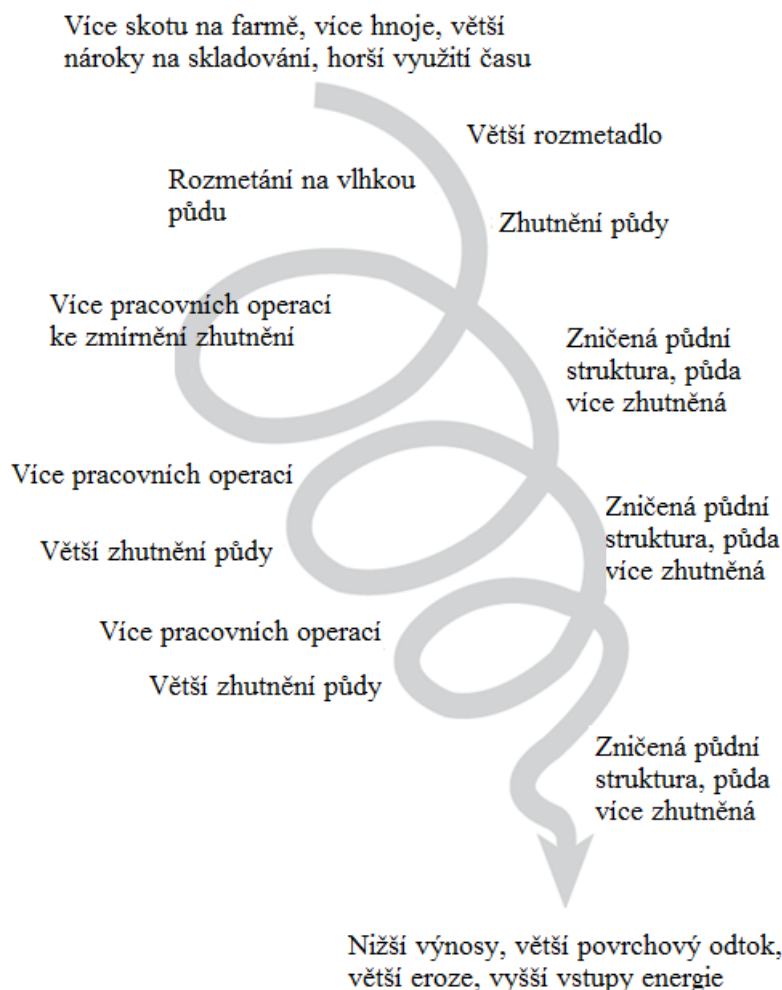
2.6.2 Následky intenzivního ohospodařování lučních porostů a pícnin na orné půdě na životní prostředí

Tradiční využití lučních porostů jako zdroj píce hospodářských zvířat má v posledních desetiletích snižující se význam. Je to především z důvodu poklesu stavu přežvýkavců, zejména skotu po roce 1990 v ČR. Objevují se proto snahy o alternativní využití fytomasy travních porostů pro energetické využití k přímému spalování nebo k anaerobní plynové fermentaci.

Na lučních porostech je píce buď sečena ke konzervaci, nebo v menší míře jako zelené krmení. Celý proces na stanovišti zahrnuje sečení, sušení, obracení, shrnování a sběr píce. Baker (1991) uvádí, že největší změny fyzikálních vlastností půdy působí sečení, manipulace s pící a její sběr a odvoz, popřípadě pastva zvířat, neboť se tyto operace musí provádět v krátkém časovém období za příznivého počasí, často bez ohledu na vlhkost půdy. K nadměrnému zhutňování půdy přispívá používání stále těžší mechanizace, která umožňuje dosahování vysoké produktivity práce. Po loukách tak jezdí při různých pracovních operacích traktory s celou řadou tažených i nesených strojů, ale také nákladní automobily.

Následkem je zvýšená spotřeba fosilních paliv, která vede k vyšším emisím skleníkových plynů (oxidu uhličitého, oxidu dusného) a snižování propustnosti pro

vodu a retenční kapacity půdy. Větší povrchový odtok způsobuje erozi a přísun živin včetně agrochemikálií do povrchových vod a zároveň dochází ke snižování zásob podzemních vod. Tak vzniká spirála pracovních operací, které více a více degradují půdu a životní prostředí, jak je patrné z obrázku č. 12 (Duiker, 2004).



Obr. 12 Vliv intenzivní živočišné výroby na půdu - spirála pracovních operací vedoucích k degradaci půdy (převzato Duiker, 2004)

I když je směr postupu strojů většinou každý rok stejný, mění se dle Douglase (1994) umístění stopy kol v rámci směru postupu strojů naprosto nahodile. Kola strojů tak poškozují povrch půdy, rostliny a zhoršují fyzikální vlastnosti půdy.

Duiker (2004) zjistil, že stopy kol způsobují u vojtěšky a travního drnu snížení průměrných ročních výnosů vlivem pojezdu až o 1-34 %, přičemž zásadní roli hrálo načasování odvozu píce z pozemku. K mnohem většímu snížení výnosů došlo, pokud

byla vojtěška odvážena 5 dní po posečení, než 2 dny po posečení. Vlivem zhutnění půdy dochází ke snižování výnosů píce nejen přímo ve stopách kol traktorů ale i v blízkosti kol, jak ukazují pokusy Jorajuria et al. (1997). Doprovodným jevem zhutnění je předčasné vadnutí rostlin v suchých letech a zamokření pozemků v letech vlhkých (Van den Akker a Schjønning, 2004). Dle Kasprzaka (1990) vykazovaly velkovýrobně obhospodařované travní porosty o řád nižší infiltrační rychlost ve srovnání s travními porosty sklizenými lehkou mechanizací.

Hansen (1995) uvádí, že při pokusech v Norsku došlo vlivem zhutnění koly traktoru ke snížení výnosů sušiny píce u lučních porostů z 9.0 na 6.6 t.ha⁻¹. V tomto případě byl vliv zhutnění významnějším faktorem na výnos píce než minerální hnojení a termín jeho aplikace.

V tabulce č. 11 je teoreticky vyjádřen vliv šířky pneumatiky a hmotnosti stroje na kontaktní tlak. Pro výpočet kontaktního tlaku byla použita rovnice $q_s = Y/S$ (tíha/plocha). V praxi je však nutné počítat s tím, že vlivem zatížení závaží a tahové síly traktoru se přední kola mírně odlehčí a rozložení hmotnosti traktoru nebude na obě nápravy stejné (Bačák, 2011). Bereme-li v úvahu limitní kontaktní tlak dle Lhotského (2000) 50 až 150 kPa, dojdeme k závěru, že již u lehkého traktoru může docházet k negativním změnám fyzikálních vlastností půdy. Jorajuria et al. (1997) uvádí, že lehčí traktor s větším počtem přejezdů může způsobovat v povrchové vrstvě půdy stejné nebo dokonce ještě větší škody než použití těžšího traktoru s menším počtem přejezdů. Při zkoumání počtů přejezdů na výnos píce z travních porostů prokázali, že při stejném počtu přejezdů byl u těžšího traktoru zjištěn nižší výnos, než při použití lehčího traktoru.

K maximálnímu zhutnění půdy dochází za vlhkosti blízké polní kapacitě. Při vyšší vlhkosti je v půdě nedostatek vzduchu a voda v pórech je nestlačitelná. Dochází však k poškození až devastaci půdní struktury. Adams a Gibbs (2004) uvádí, že fyzikální vlastnosti většiny přirozených půd jsou závislé na přítomnosti a stabilitě agregátové struktury a mohou být radikálně změněny, pokud je tato struktura zničena mechanickým tlakem. V povrchové a podpovrchové vrstvě půdy tak dochází ke zhutnění vrstev, které se díky nákladnosti a často nízké účinnosti regeneračních opatření mohou stát i trvalými (Häkansson a Reeder, 1994).

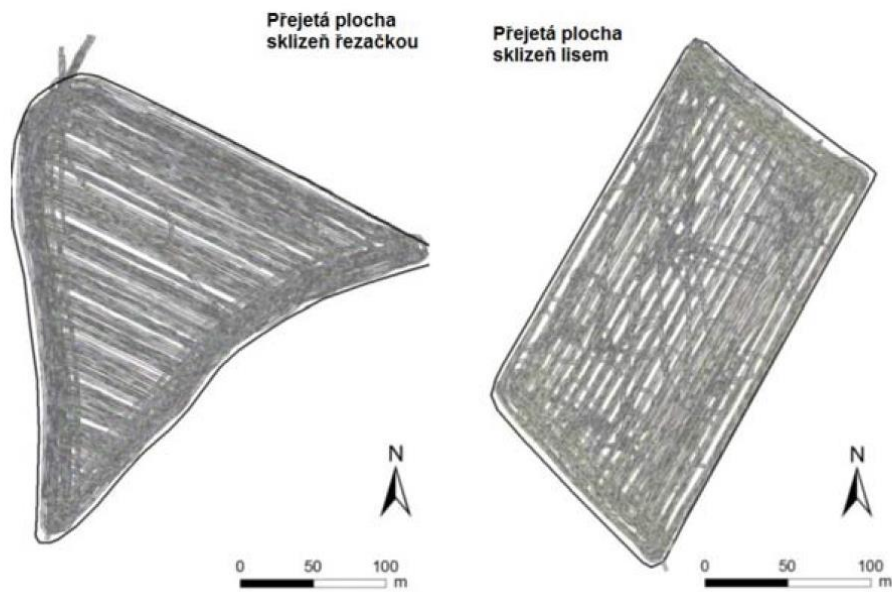


Obr. 13 Vliv pojezdu zemědělské techniky na travním porostu (foto S. Hejduk)

Tab. 11 Vliv hmotnosti stroje a šířky pneumatik na kontaktní tlak na půdu (Bačák, 2011)

Stroj	lehký traktor	výkonný traktor	výkonný traktor
Pneumatiky	standartní	standartní	dvoumontáž vzadu
Rozměr pneumatiky vpředu	480/65 R24	600/65 R34	600/65 R34
Rozměr pneumatiky vzadu	540/45 R38	650/85 R38	650/85 R38
Celková hmotnost (kg)	5400	11500	11800
Hmotnost na přední nápravu (kg)	2700	5750	5750
Hmotnost na zadní nápravu (kg)	2700	5750	6050
Styčná plocha vpředu (m ²)	2 x 0,16	2 x 0,22	2 x 0,22
Styčná plocha vzadu (m ²)	2 x 0,21	2 x 0,27	4 x 0,20
Celková styčná plocha (m ²)	0,74	0,98	1,24
Střední kontaktní tlak vpředu (kPa)	84,4	130,7	130,7
Střední kontaktní tlak vzadu (kPa)	64,3	106,5	75,6

Problémům intenzivních a náhodných přejezdů při sklizni pícnin na orné půdě a víceletých travních porostů se věnuje Kumhála et al. (2013). Obrázek č. 14 dokládá intenzitu přejezdů sklizně pícnin řezačkou a lisem. V případě sklizně samojízdné řezačky bylo pneumatikami přejetu okolo 64 % sledované plochy a v případě svinovacího lisu to bylo okolo 63 %. Nejčastěji byly zaznamenány dvakrát opakované přejezdy.



Obr. 14 Grafické vyjádření přejezdů při sklizni samojízdnou řezačkou (vlevo) a přejezdů při sklizni svinovacím lisem (vpravo) (převzato: Kumhála et al., 2013)

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Tato práce si klade za cíl přispět k objasnění vlivu obhospodařování travních porostů na hydrologické charakteristiky půd.

Prvním dílčím cílem je zjistit změny fyzikálních vlastností půdy, rychlosti infiltrace a nasycené hydraulické vodivosti pod nadměrně sešlapávanými pastevními porosty a velkovýrobně obhospodařovanými lučními porosty.

Dalším cílem bylo srovnat ochranný účinek rozdílně obhospodařovaných travních porostů s běžnými polními plodinami a s holou půdou při výskytu srážek a povrchových odtoků v průběhu celého roku.

Posledním cílem bylo vyhodnotit vliv travních porostů a zemědělských plodin na rychlost postupu povrchového odtoku.

4 MATERIÁL A METODIKA

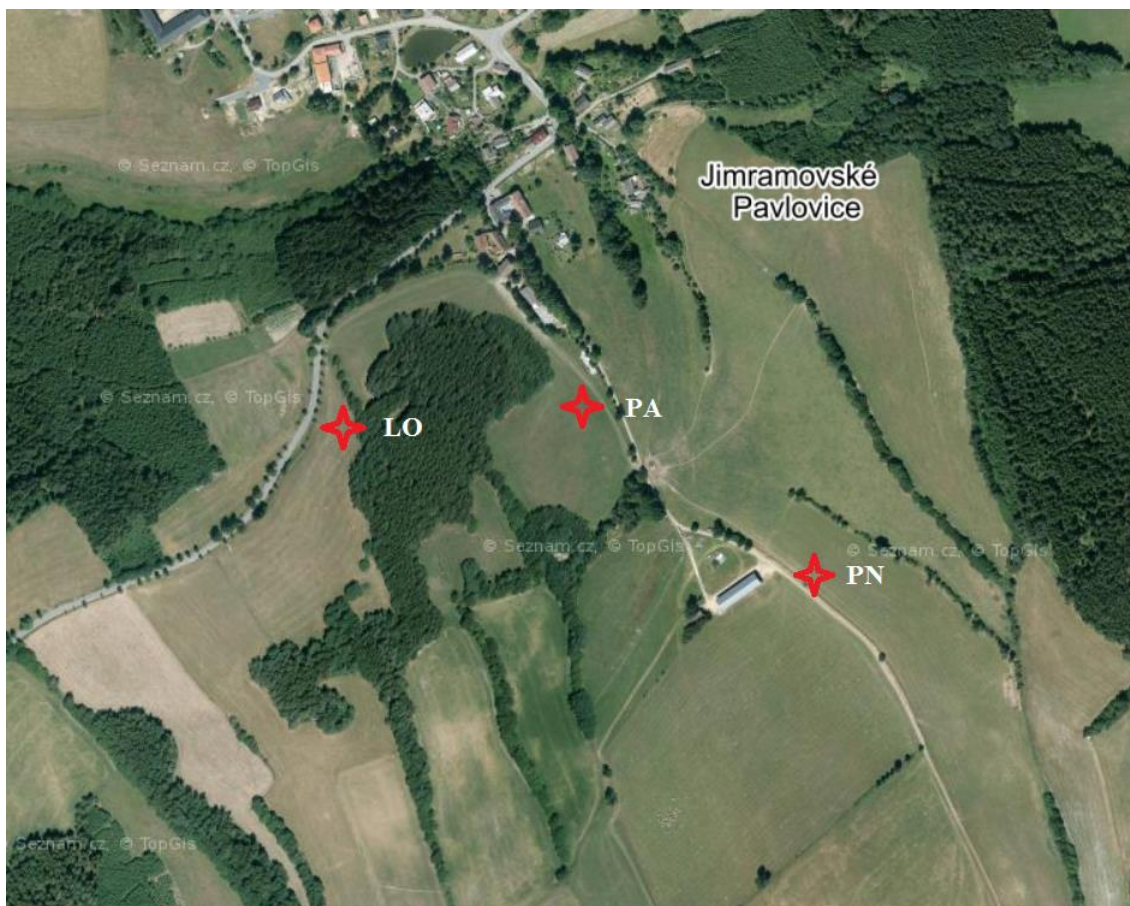
4.1 Vliv obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace, fyzikální vlastnosti půdy a nasycenou hydraulickou vodivost

4.1.1 Charakteristika pokusných ploch

Pokus byl založen v letech 2011-2013 v oblasti Českomoravské vrchoviny v katastru obce Jimramovské Pavlovice 49°36'42.039"N, 16°12'19.625"E. Pokusné varianty se nachází v nadmořské výšce 600 m, průměrná roční teplota zde činí 5.9 °C, roční úhrn srážek 751 mm. Měření bylo prováděno na třech různě obhospodařovaných travních porostech:

1. bez vlivu zhutnění tj. pod ohrazením pastviny (PN) ručně sečený porost, dominantní druhy *Elytrigia repens* L., *Lolium perenne* L.
2. na intenzivně zatíženém pastevním porostu (PA) spásaném skotem plemene Blonde d'Aquitaine (v blízkosti zimního ustájení, ke kterému mají zvířata neustálý přístup). Přibližně 30 ks krav o hmotnosti 900 – 1000 kg spásající oblast 50 ha od začátku dubna do konce října; dominantní druhy *Lolium perenne* L., *Poa annua* L., *Poa pratensis* L., *Trifolium repens* L., *Plantago major* L.
3. na lučním porostu velkovýrobně obhospodařovaném těžkou mechanizací (LO), píče sklizená na výrobu siláží třikrát ročně, traktorem o hmotnosti 7 000 kg a rozměry předních pneumatik 480/70R28 a zadních 580/70 R38; dominantní druhy *Dactylis glomerata* L., *Festuca pratensis* Huds., *Trisetum flavescens* (L.) P. Beauv., *Arrhenatherum elatius* (L.) P. Beauv. Ex J. Presl & C. Presl, *Heracleum sphondylium* L.

Vzdálenost mezi jednotlivými stanovišti nebyla větší než 400 m (obr. 15).



Obr. 15 Ortofotomapa s umístěním jednotlivých variant obhospodařování travních porostů (upraveno www.mapy.cz)

Na pokusných variantách se dle Novákovy zrnitostní klasifikace (Vopravil et al., 2010) jedná o půdu střední, písčitohlinitou, půdní typ kambizem. Půdním druhem dle trojúhelníkového diagramu zrnitosti jsou na stanovišti PN a PA hlinitá půda, na stanovišti ME písčito-hlinitá. Referenční půdní skupina Kambizem haplická (IUSS-ISRIC-FAO, 2006). Zrnitostní rozbor byl proveden na jednotlivých pokusných variantách v roce 2011 z hloubky 50-150 mm (tab. 12).

Tab. 12 Obsah půdních částic na jednotlivých stanovištích (%)

Ošetření	Velikost částic (mm)					
	2,00 -0,25	0,25 -0,05	0,05 -0,01	0,01 - 0,001	< 0,01	< 0,001
PN	27,1	28,2	20,1	18,4	24,6	6,2
PA	24,9	22,8	26,8	19,0	25,5	6,5
ME	32,6	24,2	21,6	16,5	21,5	5,0

4.1.2 Měření infiltrační rychlosti

Ke stanovení infiltrační schopnosti půdy byla použita dvoukruhová metoda (ASTM D 5093, 2008) za využití kruhů o průměru vnitřního kruhu 170 mm a 124 mm a vnějšího kruhu 310 mm a 264 mm (obr. 19). Metoda je založena na měření rychlosti poklesu hladiny vody ve vnitřním kruhu, zatímco vnější kruh má zachovat svislé proudnice pod vnitřním válcem (obr. 16).

Termíny měření byly před první sečí (duben), po první sečí (červenec) a na konci vegetace (říjen). Na jednotlivých variantách byla infiltrační rychlost měřena vždy ve třech opakováních.

V programu Excel (kancelářské sady Microsoft Office) byl vytvořen formulář (příloha č. 1), do kterého byly zaznamenány naměřené data dolítí vody do vnitřního válce v závislosti na čase. Tak byl zjištěn objem infiltrované vody (ml) a interval mezi dodáním vody v sekundách. Hodnoty infiltrace byly převedeny na mm a intervaly dolítí vody byly převedeny na minuty. Tak byla vypočtena hodnota okamžité rychlosti infiltrace v_i ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) a kumulativní infiltrace i_t (mm).

Dále bylo vytvořeno pomocí programu Excel grafické znázornění průběhu infiltrace pomocí bodového grafu (obr. 17). Na osu X byly vynášeny hodnoty času (min) a na osu Y byla vynášena rychlost infiltrace v_i (mm/min). Pro zobrazení grafu bylo použito logaritmické měřítko a jednotlivé body byly proloženy mocninnou spojnicí trendu s rovnicí regrese. Hodnoty z rovnice regrese byly použity do obecné rovnice pro výpočet rychlosti infiltrace v_t .

Vzorec pro výpočet rychlosti infiltrace Kutílek (1978):

$$v_t = v_1 \cdot t^{-\alpha} \text{ (mm}\cdot\text{min}^{-1}\text{)},$$

kde:

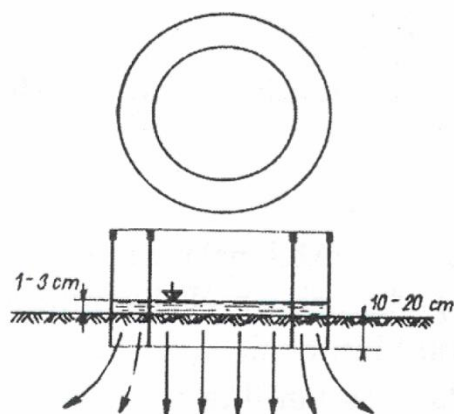
v_1 – koeficient vsakovací schopnosti půd na konci první časové jednotky (min),

t – čas od počátku měření (min),

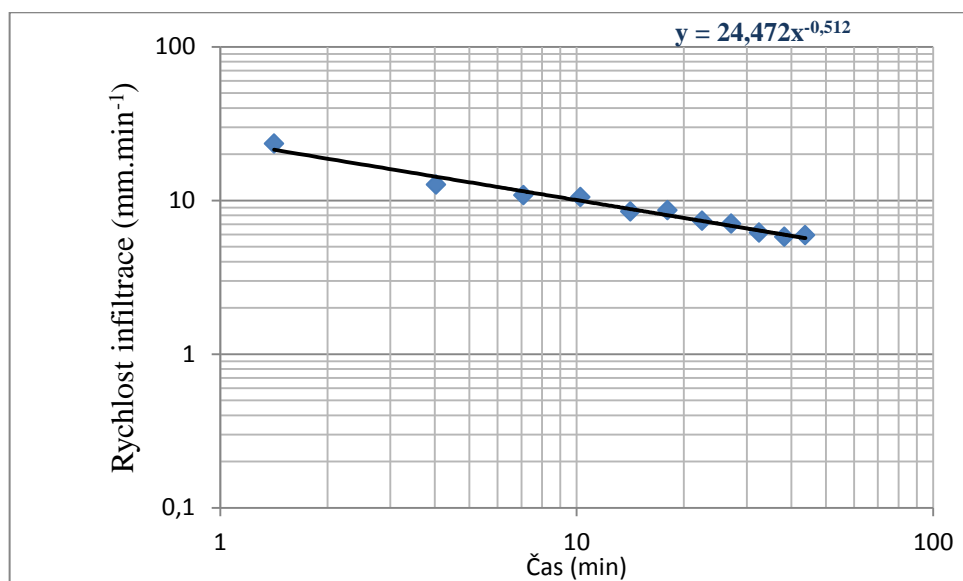
α – konstanta daná půdními vlastnostmi, odvozená z rovnice regrese.

Experiment byl ukončen po ustálení infiltrační rychlosti nebo po 2 hodinách měření (při velmi nízké infiltrační rychlosti), případně po získání alespoň 10 individuálních měření. Důvodem pro kratší dobu měření je fakt, že výskyt nejnebezpečnějších srážek způsobujících erozi půdy a povrchový odtok v České republice obvykle netrvá déle než 20 minut, jen výjimečně trvá déle než 30 minut (Trupl, 1958) a (Jůva a Cáblik, 1954).

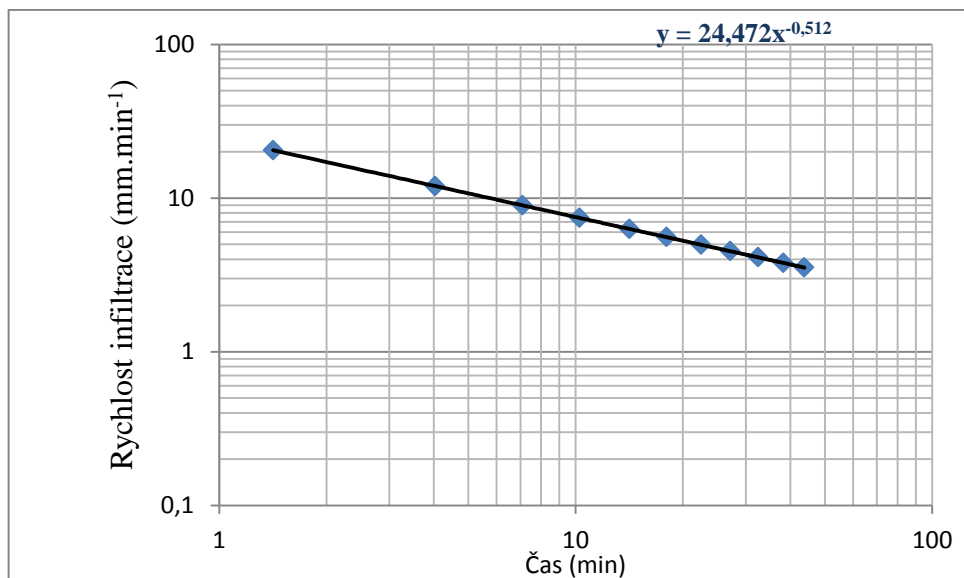
Naměřená data byly vyhodnocovány pomocí empirických rovnic v programu Excel (obr. 18). Pro statistické zpracování dat byla použita jednofaktorová analýza rozptylu ANOVA (Statistica 12, StatSoft) s následným testováním podle Tukeye na hladině významnosti $p = 0,05$.



Obr. 16 Princip měření infiltrace metodou soustředných válců (Kutílek, 1978)



Obr. 17 Znáznornění průběhu infiltrace na variantě bez vlivu zhutnění (PN) 27. 4. 2013 s patrným ustálením rychlosti infiltrace po 30 minutách měření



Obr. 18 Znáznornění průběhu infiltrace po vyhodnocení pomocí obecné rovnice infiltrace na variantě bez vlivu zhutnění (PN) 27. 4. 2013



Obr. 19 Pomůcky pro měření infiltrace pomocí metody soustředných válců (foto S. Hejduk)



Obr. 20 Měření infiltrace na konci vegetačního období (11. 10. 2012, foto autor)

4.1.3 Stanovení fyzikálních vlastností půdy

Ke stanovení vybraných fyzikálních vlastností půdy byly odebrány neporušené půdní vzorky prostřednictvím Kopeckého válečků o objemu 100 cm^3 (obr. 21). Vzorky byly odebírány v termínech měření infiltrace v bezprostřední blízkosti místa, kde byla infiltrace měřena. Hloubky odběru byly 20-70 mm, 120-70 mm a 220-270 mm vždy ve třech opakováních.

Princip a postup rozboru neporušeného vzorku půdy je detailněji popsán v Karabcová (2009). Analýza odebraných vzorků probíhala v laboratořích Ústavu agrochemie, půdoznalství, mikrobiologie a výživy rostlin. Byly stanoveny následující charakteristiky: měrná hmotnost (g.cm^{-3}), objemová hmotnost suché zeminy (g.cm^{-3}), celková pórovitost (% obj.), číslo pórovitosti, retenční vodní kapacita a póry kapilární (% obj.), póry semikapilární (% obj.), póry nekapilární (% obj.), vlhkost půdy (% obj.), číslo vlhkosti, polní vodní kapacita (% obj.), vlhkost 30minutová (% obj.), maximální kapilární vodní kapacita (% obj.), provzdušenost (% obj.), momentální stupeň provzdušení (% rel.), minimální vzdušná kapacita (% obj.), stupeň provzdušnění při stavu MKK (% rel.) a číslo provzdušenosti.

Pro vyhodnocení pokusu byly vybrány charakteristiky se zřetelem na vliv infiltrace a utužení půdy: objemová hmotnost suché zeminy (ρ_d), retenční vodní kapacita (RVK = kapilární pórovitost), objem pórů nekapilárních, pórovitost (P) a objemová vlhkost půdy (Θ).

Ke zpracování dat bylo použito programu Excel a pro statistické vyhodnocení dat byla použita jednofaktorová a vícefaktorová ANOVA (Statistica 12, StatSoft) s následným testováním podle Tukeye ($p < 0,05$).



Obr. 21 Odběr neporušených vzorků půdy pro stanovení fyzikálních vlastností půdy (foto autor)

4.1.4 Postup měření nasycené hydraulické vodivosti

Měření nasycené hydraulické vodivosti bylo provedeno Ing. Jiřím Jandákem, CSc. souběžně se stanovováním infiltrační rychlosti a odběru neporušených vzorků půdy. Přístrojem použitým pro měření byl Guelphský permeametr založený na principu Marriottovy láhve v podmínkách ustáleného proudění. Jedná se o závrtný infiltrometr, který se skládá ze zásobního válce na vodu a trubice, která je na spodním konci děrovaná (obr. 22). Měří se úbytek vody ze zásobního válce do půdy. Podrobná metodika a postup měření je popsán společností Eijkelkamp (2011).

K vyhodnocení dat bylo použito programu Excel a pro statistické zpracování byla použita jednofaktorová a vícefaktorová ANOVA (Statistica 12, StatSoft) s následným testováním podle Tukeye ($p < 0,05$).

Výpočty nasycené hydraulické vodivosti byly uskutečněny podle Gloverova vzorce (Glover, 1953):

$$K_{fs} = \frac{CQ}{2\pi H^2}$$

$$C = \arg \sin E - \left[\left(\frac{1}{E} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} + \frac{1}{E}$$

$$E = \frac{H}{a}$$

kde:

K_{fs} – nasycená hydraulická vodivost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

Q – množství vody vyžadující zachování konstantní hladiny ve vrtu ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$),

π – 3,14,

H – výška hladiny nad dolní částí vrtu (m),

a – poloměr vrtu (m),

C – součinitel tvaru (bezrozměrné).



Obr. 22 Guelphský permeametr a pomůcky potřebné pro měření (převzato z www.eijkelkamp.com)



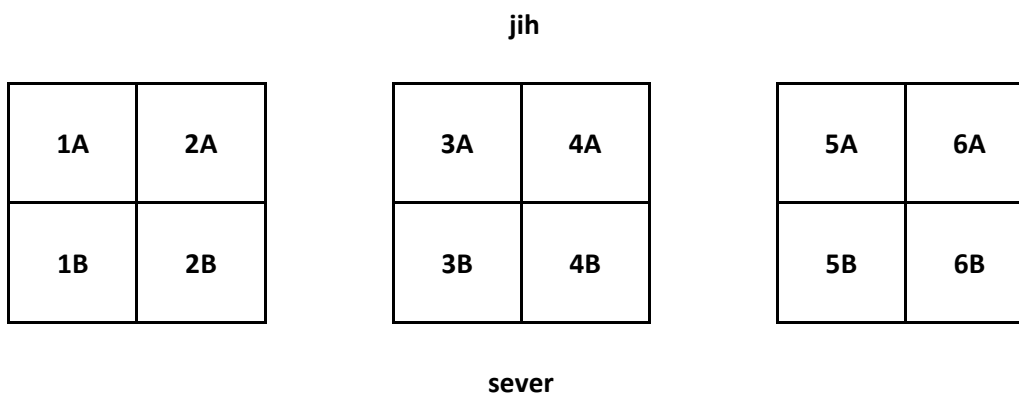
Obr. 23 Měření Guelphským permeametrem na konci vegetačního období (11. 10. 2012, foto autor)

4.2 Vliv zemědělských plodin na povrchový odtok

4.2.1 Charakteristika pokusných ploch

Pokus probíhal na Výzkumné pícninářské stanici Mendelovy univerzity ve Vatíně (49°15'5"N,15°58'15"E) viz obr. 25. Obec Vatín se nachází v regionu Českomoravské vrchoviny, 7 km jižně od Žďáru nad Sázavou na jižní hranici CHKO Žďárské vrchy.

Soustava odtokoměrných ploch se leží v nadmořské výšce 540 m a skládá se z 12 ploch o velikosti 10,0 m² (délka je 4,0 m a šířka parcel 2,5 m) se svažítostí 5°. Půdním představitelem je písčitohlinitá kambizem vytvořená na deluviu orthorul. Polovina ploch je orientována na jih (označena A) a další polovina na sever (označena B) (obr. 24).



Obr. 24 Expozice odtokoměrných ploch dle světových stran

Každá z šesti variant s odlišným vegetačním pokryvem je přítomna na obou expozičních plochách. Plochy jsou přizpůsobeny pro měření povrchových odtoků tak, že spodní část parcel je zakončena žlábkem, který zachycuje povrchový odtok (obr. 26). Záchytný žlábek je krytý proti dopadu srážek a případnému zanášení nečistotami a odvádí zachycenou vodu, případně splaveniny do záchytné nádrže o objemu 160 litrů (obr. 27).



Obr. 25 Ortofotomapa s polohou VPS Vatín a umístěním odtokoměrných ploch (upraveno www.mapy.cz)



Obr. 26 Detail záchytného žlábků (vlevo) a pohled na jižní expozici odtokoměrných ploch (vpravo) - foto autor



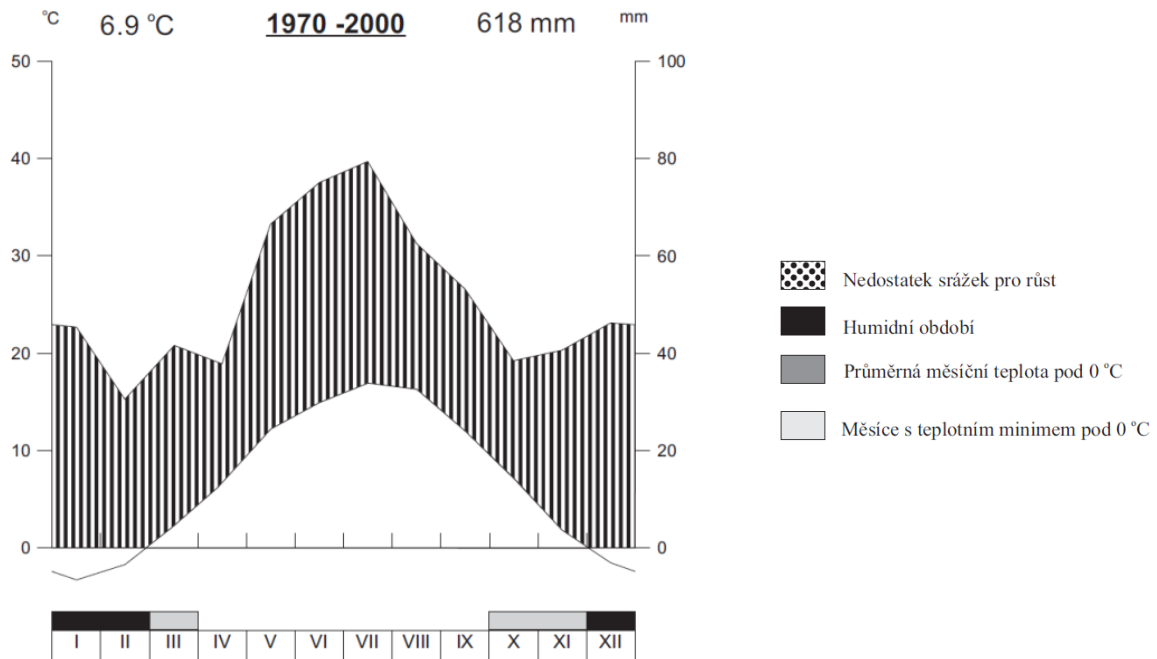
Obr. 27 Počátek povrchového odtoku na variantě s kukuřicí (vlevo) a detail záchytné nádrže při měření odtoku (vpravo) 16. 6. 2011 - foto autor

4.2.2 Klimatická charakteristika lokality Vatín

Průměrný třicetiletý roční úhrn srážek činí 618 mm, ve vegetačním období 440 mm a průměrná roční teplota je 6,9 °C, ve vegetačním období 12,2 °C. Na obrázku č. 29 je znázorněn klimadiagram za třicetileté období (1970-2000). V blízkosti odtokových ploch se nachází člunkový srážkoměr (obr. 28) se záchytnou plochou 200 cm² pro kontinuální měření srážek během vegetačního období a zjišťování jejich intenzity. Data pro měření srážek v mimovegetačním období byla získána z měření na Výzkumné pícninářské stanici.



Obr. 28 Srážkoměr v blízkosti odtokových polí (foto S. Hejduk)



Obr. 29 Klimadiagram VPS Vatín za období 1970-2000

4.2.3 Ošetřování pokusných ploch ve vegetačním období

Během vegetačního období byly jednotlivé varianty obdělávány následovně:

1. Trvalý travní porost se standardním způsobem obhospodařování (dále TTP intenzivní), tři sečný – ručně lištovou sekačkou MF 70, hnojený 100 kg N+PK.
2. Trvalý travní porost s extenzivním způsobem obhospodařování (dále TTP extenzivní), 2 seče prováděné lištovou sekačkou MF 70, bez hnojení.

Oba trvalé travní porosty byly založeny v roce 2001. Dominantními druhy byly: *Dactylis glomerata* L., *Arrhenatherum elatius* (L.) P. Beauv. Ex J. Presl & C. Presl; na nehnojené variantě převládala *Festuca rubra* L.

3. Holá půda (kontrolní varianta) – povrch byl udržován v bezplevelném stavu pomocí herbicidů, popřípadě byly jednotlivé plevele ručně vytrhávány.
4. Pšenice ozimá vysetá bez orby po sklizni brambor - koncem září nebo na počátku října.
5. Silážní kukuřice (dále kukuřice) vysetá do řádků s roztečí 75 cm na počátku května po orbě (po výsevu byl povrch půdy ošetřen preemergentním herbicidem).

6. Brambory jako typická plodina v dané oblasti - rozteč hrůbků byla 70 cm (po výsadbě ošetření povrchu preemergentním herbicidem).

Varianty 3 až 6 byly střídány v rámci rotace způsobem, jaký ukazuje tabulka č. 13. Hnojení bylo k jednotlivým plodinám aplikováno podle metodických postupů a před plánovanou výsadbou brambor byl zaorán chlévský hnůj v dávce 40 t.ha⁻¹.

Pokud povrchový odtok způsobil smyv půdy, byly odebrány vzorky odtoku pro stanovení množství erodovaného materiálu. Po dekantaci usazenin byl změřen objem odteklé vody a slit relativně čistý podíl vody. Následně byl zbytek vody se splaveninami rozmíchán a odebrán vzorek suspenze o objemu 2 l, který se zfiltroval, usušil a zvažil. Zjištěné množství bylo vyjádřeno jako erozní smyv v t.ha⁻¹.

Obsah agrochemikálií ve vzorcích vody odteklé ze silážní kukuřice byl vzhledem k finanční náročnosti vyhodnocen v omezeném rozsahu. Analýzu provedl Ústav veterinárního lékařství a toxikologie FVHE, VFU Brno Mgr. Petr Maršálek, Ph.D. Stanovení pesticidů ve vodách bylo provedeno metodou GC/MS spektrometrie. Jedná se o spojení plynové chromatografie (GC) s hmotnostním spektrometrickým (MS) detektorem pro analýzy, které kombinují vysokou separační schopnost plynové chromatografie s detekcí vysoce specifickou pro daný analyt (Klouda, 2003).

Tab. 13 Způsob střídání plodin v jednotlivých letech vegetačního období

Rok	Obhospodařování					
	1A 1B	2A 2B	3A 3B	4A 4B	5A 5B	6A 6B
2008	TTP Int.	TTP Ext.	Holá půda	Kukuřice	Brambory	Pšenice ozimá
2009	TTP Int.	TTP Ext.	Brambory	Holá půda	Pšenice ozimá	Kukuřice
2010	TTP Int.	TTP Ext.	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Holá půda
2011	TTP Int.	TTP Ext.	Kukuřice	Pšenice ozimá	Holá půda	Brambory
2012	TTP Int.	TTP Ext.	Holá půda	Kukuřice	Brambory	Pšenice ozimá
2013	TTP Int.	TTP Ext.	Brambory	Holá půda	Pšenice ozimá	Kukuřice

4.2.4 Ošetřování pokusných ploch v zimním období

Během zimního období byly jednotlivé varianty ošetřovány následovně (tab. 14):

1. Trvalý travní porost před začátkem zimního období posečený.
2. Trvalý travní porost s ponechanou výškou rostlin 100 – 200 mm.
3. Kyprá půda s urovnaným povrchem po orbě (rytí) do hloubky 200 mm (dále kyprá půda).
4. Strniště pšenice.
5. Strniště kukuřice.
6. Ozimá pšenice vysetá do půdy bez orby po sklizni brambor.

Tab. 14 Způsob střídání plodin v jednotlivých letech mimovegetačního období

Rok	Obhospodařování					
	1A 1B	2A 2B	3A 3B	4A 4B	5A 5B	6A 6B
08/09	TTP Int.	TTP Ext.	Kyprá půda	Strniště kukuřice	Pšenice ozimá	Strniště pšenice
09/10	TTP Int.	TTP Ext.	Pšenice ozimá	Kyprá půda	Strniště pšenice	Strniště kukuřice
10/11	TTP Int.	TTP Ext.	Strniště pšenice	Pšenice ozimá	Strniště kukuřice	Kyprá půda
11/12	TTP Int.	TTP Ext.	Strniště kukuřice	Strniště pšenice	Kyprá půda	Pšenice ozimá
12/13	TTP Int.	TTP Ext.	Kyprá půda	Strniště kukuřice	Pšenice ozimá	Strniště pšenice
13/14	TTP Int.	TTP Ext.	Pšenice ozimá	Kyprá půda	Strniště pšenice	Strniště kukuřice

4.2.4 Statistické vyhodnocení povrchových odtoků a erozních smyvů

Statistické analýzy povrchových odtoků z jednotlivých variant ve vegetačním a zimním období byly provedeny za použití programu ANOVA (Statistica 12, StatSoft), metodou analýzy rozptylu s následným testováním podle Tukeye ($p < 0,05$).

Vzhledem k nehomogenitě rozptylu naměřených objemů odtoků a smyvů půdy ve vegetačním období z jednotlivých variant byla data logaritmicky transformována.

4.3 Vliv rozdílného obhospodařování půdy na rychlost postupu přeronové vlny a počátek povrchového odtoku

Pokus byl proveden 15. 9. 2011 na VPS Vatín na soustavě odtokoměrných ploch popsaných výše. Jako varianty pokusu byly vybrány:

- Holá půda – na parcele byl vyvinutý půdní škraloup po přivalovém dešti z 6. 9. 2011. Plocha byla z 5 % pokryta plevem.
- Strniště pšenice – pokryto plevem z 30 % (s 80 % dominancí *Poa annua* L., dále *Capsella bursa-pastoris* L., *Taraxacum sect. Ruderalia* K. a *Viola arvensis* M.
- Kukuřice.
- Travní porost intenzivní – bezprostředně po posečení, s výškou strniště 50 mm.

Měření probíhalo v pásích vymezených plastovými pláty o rozměrech 4000 x 1500 x 50 mm, které byly zatlačeny do hloubky přibližně 50 mm (obr. 30). V těsné blízkosti těchto plátů byla nasypána půda (odebraná z blízkosti měřicí pásů) a zhutněna, aby nedocházelo k prosakování vody pod tyto pláty. Na horní hranu pásů byla přiváděna voda o přítoku od 0,406 (24,4 l.min⁻¹) do 0,449 l.s⁻¹ (26,9 l.min⁻¹) respektive 0,812 až 0,898 l.s⁻¹.m⁻¹, přítok byl měřen před začátkem pokusu, v jeho průběhu a na konci. Z těchto měření byla stanovena průměrná hodnota přítoku u jednotlivých variant. Pás byl označen po metrových vzdálenostech, aby bylo možné zjišťovat rychlost postupu přeronové vlny (čela zvlhčení) a začátek povrchového odtoku z těchto pásů (po překonání 4 metrů) do sběrného žlábků odtokové parcely. Měření na každé variantě probíhalo třikrát.

V pokuse nebylo zohledněno zakolmatování půdních pórů vlivem zasakující suspenze jemných částic půdy přitékajících z výše položených míst.

Před měřením byly odebrány neporušené vzorky půdy dle metodiky Karabcové (2009) do Kopeckého válečků o objemu 100 cm³ v těsné blízkosti pásů z hloubky 0 - 50 mm ve třech opakováních. Fyzikální vlastnosti půdy byly stanoveny v laboratořích na VPS Vatín. Ze základních fyzikálních a hydrofyzikálních parametrů byly vybrány vlastnosti s přímým vlivem na infiltrační schopnost půd: objemová hmotnost suché zeminy, pórovitost, retenční vodní kapacita, objemová vlhkost a jako doplňující minimální vzdušná kapacita.



Obr. 30 Příprava na měření rychlosti postupu přeronové vlny v porostu kukuřice (vlevo) a v TTP (vpravo) foto S. Hejduk

Dále bylo provedeno měření infiltrace pomocí soustředných válců (ASTM D 5093, 2008) za využití kruhů o průměru vnitřního kruhu 170 mm a 124 mm a vnějšího kruhu 310 mm a 264 mm ve třech opakováních. Metodiky postupu a vyhodnocení měření infiltrace a odběru neporušených vzorků půdy byly popsány výše.

Před založením pokusu a v jeho průběhu byla snaha o zachování a co nejmenší narušení povrchové půdní krusty, která vznikla v průběhu vegetačního období.

Data byla statisticky zpracována programem ANOVA (Statistica 12, StatSoft), analýzou rozptylu s následným testováním podle Tukeye ($p < 0,05$).

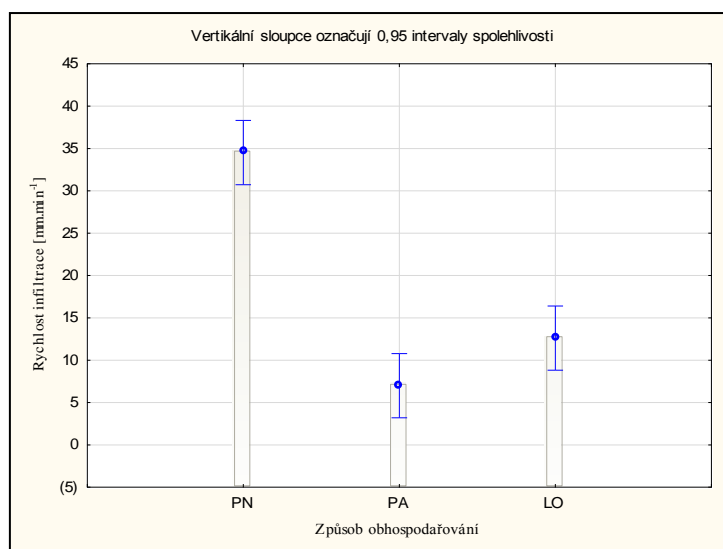
5 VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 Vliv obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace, fyzikální vlastnosti půdy a nasycenou hydraulickou vodivost

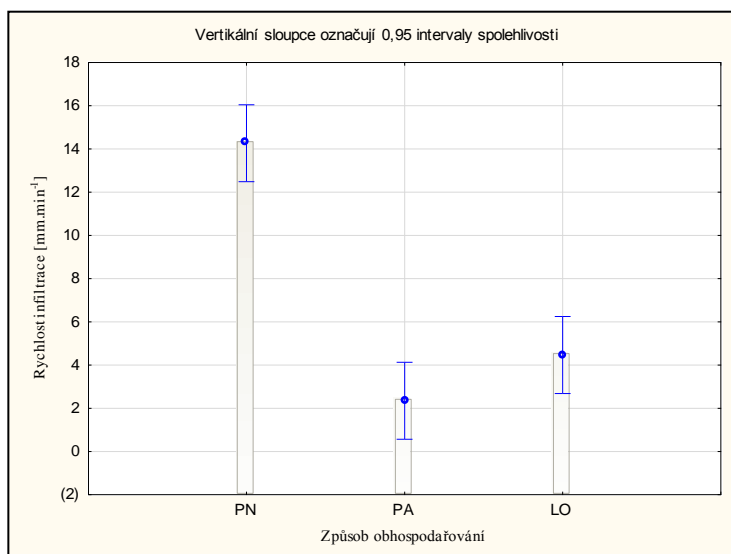
5.1.1 Vliv obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace

Průběh infiltrace u jednotlivých variant jako průměr ze tří opakování v jednotlivých termínech měření je uveden v přílohách č. 2-10.

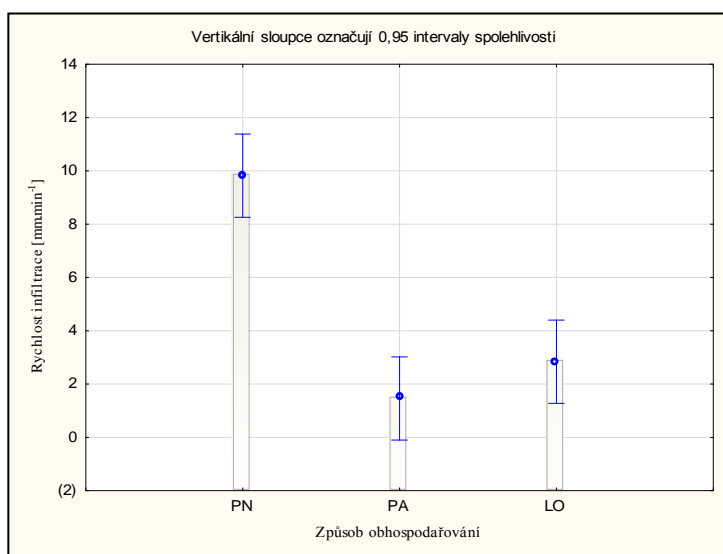
Rychlost infiltrace v průměru termínů měření za sledované období (2011-2013) byla u porostu bez zhutnění (PN) průkazně nejvyšší ($v_{i(1)} = 34,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($v_{i(10)} = 14,3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$; $v_{i(30)} = 9,8 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) ve srovnání s lučním porostem (LO) $12,6 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($v_{i(10)} = 4,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$; $v_{i(30)} = 2,8 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) a pastvinou (PA) $7,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ($v_{i(10)} = 2,3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$; $v_{i(30)} = 1,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). Z konfidenčních intervalů obrázků č. 31-33 je patrná průkaznost rozdílů v rychlosti infiltrace u jednotlivých variant obhospodařování.



Obr. 31 Vliv různého obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace v první minutě měření $v_{i(1)}$ v období 2011-2013 (průměr tří termínů měření)



Obr. 32 Vliv různého obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace v desáté minutě měření $v_{i(10)}$ v období 2011-2013 (průměr tří termínů měření)



Obr. 33 Vliv různého obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace v třicáté minutě měření $v_{i(30)}$ v období 2011-2013 (průměr tří termínů měření)

V tabulce č. 15 je patrná vysoká infiltrační rychlost v první minutě $v_{i(1)}$ na variantě bez vlivu zhutnění (PN), která se v průběhu roku mírně snižovala z $38,9 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ v dubnu na $26,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ v říjnu. Nejnižší infiltrační schopností se vyznačují sešlapávané pastviny (PA), u kterých nebyl zjištěn výrazný výkyv rychlosti infiltrace v první minutě v jednotlivých termínech měření během roku. Mechanizací obhospodařovaný luční porost (LO) vykazoval v průběhu roku nárůst $v_{i(1)}$ v červenci

a naopak výrazný pokles v říjnu, který mohl být způsoben vlivem zhutnění pojezdy mechanizace na konci vegetačního období.

Tab. 15 Infiltrační rychlost u travních porostů v první minutě měření $v_{i(1)}$ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) v jednotlivých měsících (2011-2013)

Rok	Duben			Červenec			Říjen		
	PN	PA	LO	PN	PA	LO	PN	PA	LO
2011	53,0	12,7	8,5	29,3	7,7	7,2	21,1	5,9	10,4
2012	38,2	4,5	14,8	26,1	5,1	22,0	26,5	4,9	8,1
2013	25,6	5,0	11,5	60,1	9,2	21,6	30,8	7,8	9,5
Průměr	38,9 b	7,4 a	11,6 a	38,5 b	7,4 a	16,9 ac	26,1 bc	6,2 a	9,3a
σ	13,9	4,5	4,5	18,4	3,3	8,5	6,5	2,4	2,6
Porovnání s PN (%)	100,0	19,0	29,8	100,0	19,2	43,9	100,0	23,8	35,6

σ Směrodatná odchylka

Hodnoty charakterizované různými písmeny v řádku vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

Při porovnávání vlivu pastvy (PA) na rychlost infiltrace s variantou PN bylo zjištěno, že dochází k průkaznému poklesu rychlosti infiltrace $v_{i(1)}$, $v_{i(10)}$ a $v_{i(30)}$ ve všech termínech měření. V porovnání s PN se rychlost infiltrace v průměru za celý rok postupně snižovala (tab. 15-17) při $v_{i(1)}$ o 79,3 %; v 10. minutě měření $v_{i(10)}$ o 83,3 % a u $v_{i(30)}$ o 84,8 %.

U velkovýrobně obhospodařované louky (LO) byla v porovnání s PN průkazně nižší infiltrace $v_{i(1)}$ a $v_{i(10)}$ ve všech termínech měření (tab. 15-17) a u $v_{i(30)}$ v měsících dubnu a červenci. V červenci u varianty LO nebyl zjištěn průkazný rozdíl v porovnání s variantou PN v říjnu. To může být dáno náhodným výběrem místa měření mimo stopy mechanizace u lučního porostu LO. V průměru došlo vlivem pojezdů na loukách v porovnání s PN ke snížení rychlosti infiltrace $v_{i(1)}$ o 63,6 %; $v_{i(10)}$ o 68,1 %; a $v_{i(30)}$ o 69,8 %.

Tab. 16 Infiltrační rychlost u travních porostů v desáté minutě měření $v_{i(10)}$ (mm.min⁻¹) v jednotlivých měsících (2011-2013)

Rok	Duben			Červenec			Říjen		
	PN	PA	LO	PN	PA	LO	PN	PA	LO
2011	15,1	4,0	4,3	21,8	2,2	3,0	7,5	1,3	3,0
2012	17,0	1,8	5,5	11,9	1,1	6,8	11,4	1,4	4,4
2013	11,8	2,1	4,5	18,3	4,3	4,7	13,6	3,0	4,0
Průměr	14,6 c	2,6 a	4,8 ab	17,3 c	2,5 a	4,8 ab	10,8 bc	1,9 a	3,8 a
σ	5,9	1,9	2,2	9,5	1,7	2,2	4,7	0,8	1,0
Porovnání s PN (%)	100,0	17,9	32,5	100,0	14,6	27,9	100,0	17,5	35,2

σ Směrodatná odchylka

Hodnoty charakterizované různými písmeny v řádku vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

Tab. 17 Infiltrační rychlost u travních porostů v třicáté minutě měření $v_{i(30)}$ (mm.min⁻¹) v jednotlivých měsících (2011-2013)

Rok	Duben			Červenec			Říjen		
	PN	PA	LO	PN	PA	LO	PN	PA	LO
2011	8,5	2,4	3,3	19,1	1,2	2,0	4,6	0,7	1,7
2012	11,6	1,2	3,5	8,4	0,6	3,9	7,7	0,8	3,4
2013	8,3	1,4	2,9	10,5	3,1	2,3	9,6	1,9	2,7
Průměr	9,5 c	1,7 ab	3,2 ab	12,7 c	1,6 ab	2,7 ab	7,3 bc	1,1 a	2,6 ab
σ	4,5	1,3	1,9	9,0	1,4	1,2	4,2	0,6	0,9
Porovnání s PN (%)	100,0	17,4	34,0	100,0	12,7	21,5	100,0	15,4	35,2

σ Směrodatná odchylka

Hodnoty charakterizované různými písmeny v řádku vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

Kasprzak (1969) uvádí, že uměle prováděné vsakovací pokusy nevystihují zcela přesně poměry, za nichž probíhá proces infiltrace dešťových srážek. Je zde vyloučen především vliv mechanického účinku kapek na povrch půdy, vliv změny barometrického tlaku vzduchu, která obvykle předchází extrémním srážkám apod. Mezi metodickými nedostatky zmiňuje, že při pokusech se nejedná o vsak v pravém smyslu slova, ale o infiltraci vody do půdy za určitého přetlaku. Rovněž při pokusech nelze úplně vyloučit zvětšený únik vody, ke kterému dochází po obvodu válce. Závažným

nedostatkem může být také skutečnost, že vsakovací pokus má lokální charakter a vystihuje pouze poměry na malé ploše povrchu půdy, které se mohou do značné míry lišit od průměrných poměrů plošně rozsáhlejšího povodí.

Uvedené okolnosti tak zpravidla vedou k vyšším hodnotám vsakovací schopnosti půdy než je tomu v přirozených podmínkách vsaku srážkové vody. Důkazem je, že skutečná vsakovací schopnost půdy v době srážky je vždy menší, než jak byla určena vsakovacími pokusy. Metody měření infiltrace je však možné použít tehdy, chceme-li posoudit a vzájemně porovnat infiltraci u dvou kvalitativně různých druhů půdního povrchu (Kasprzak, 1969).

V pokusech Kasprzaka (1990) byl porovnáván vliv mechanizace při obhospodařování plodin na rychlost infiltrace. Infiltrace v první minutě byla zjištěna téměř 50násobně nižší ve stopě kola traktoru při sklizni vojtěšky než u ručně obhospodařované louky (louka $23,3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$; stopa kola ve vojtěšce $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$), bez znatelné stopy byla rychlost ve vojtěšce 4krát vyšší ($v_{i(1)} = 1,98 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). U velkovýrobně obhospodařovaných luk Kasprzak (1990) zjistil $v_{i(1)} = 4,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. V našem případě mohou být vyšší hodnoty infiltrace v první minutě u velkovýrobně obhospodařovaného lučního porostu dány náhodným uspořádáním pokusu, kdy došlo k měření infiltrace i mimo stopy kol sklizňové techniky.

Franzluebbers et al. (2011) zjistil, že na neobdělávaném TP byla rychlost infiltrace 2,8krát vyšší než na pastvině a louce během vlhkého období a 1,5krát vyšší během suchého období. Hejduk (2000) zkoumal infiltrační rychlosti mezi sešlapávaným a nesešlapávaným porostem při pastvě skotu v Rapotíně. Autor uvádí 40krát vyšší rychlost infiltrace pod oplocením pastviny na nezhutněné půdě než na intenzivně zhutněné půdě na stezce zvířat. V jednotlivých stopách zvířat byla infiltrační rychlost vody nižší 4,5krát.

5.1.2 Vliv obhospodařování travních porostů fyzikální vlastnosti půdy

Při sledování vlivu obhospodařování na fyzikální vlastnosti půdy u pokusných variant bylo zjištěno, že intenzivní pastva a velkovýrobně obhospodařované louky prokazatelně zvyšují hodnoty objemové hmotnosti PA $1,57 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, LO $1,42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a pórovitosti PA 40,2 %, LO 45,9 % v porovnání s variantou bez vlivu zhutnění PN (tab. 18). Zároveň byl u těchto variant zjištěn prokazatelně nižší objem nekapilárních pórů. Naměřená data

byla zpracovaná jako průměr z jednotlivých let, hloubek a termínů odběru. Zároveň byl zjištěn průkazný rozdíl mezi pastvinou (PA) a loukou (LO) v objemové hmotnosti, pórovitosti a objemu nekapilárních pórů.

Provedeme-li srovnání s nezhuštěnou variantou PN, byla zjištěna vyšší objemová hmotnost u LO o 21 % u PA o 34 %. Hodnota pórovitosti půdy byla nižší u LO o 17 % a u PA o 28 %. Retenční vodní kapacita byla u obou variant nižší přibližně o 13 %. Objem nekapilárních pórů byl nižší u LO o 27 % a u PA o 52 %.

Vyhodnocení vybraných fyzikálních vlastností půdy v jednotlivých měsících v závislosti na hloubce odběru jako průměr ze tří let jsou uvedeny v přílohách č. 11-17.

Tab. 18 Fyzikální vlastnosti půdy pod jednotlivými porosty v letech 2011-2013 (v průměru termínů a hloubek odběru)

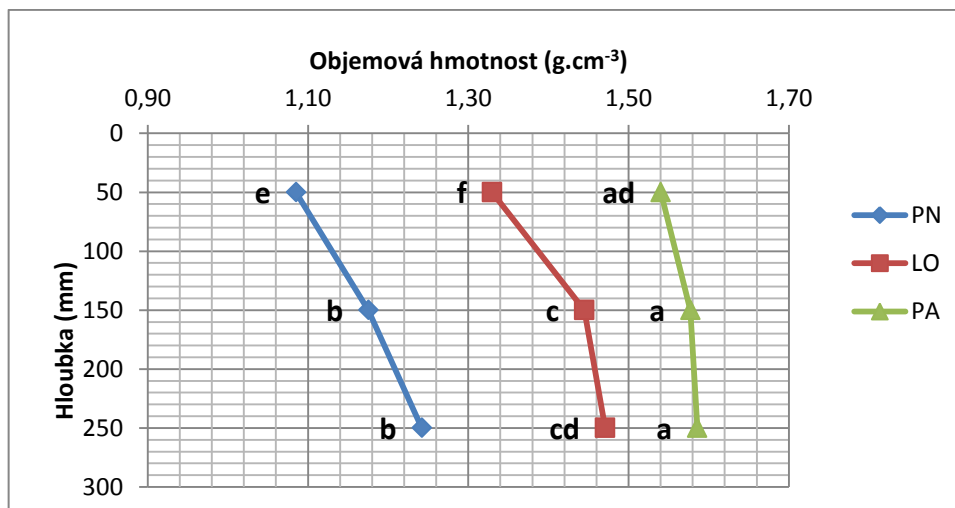
Varianta	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)	RVK (%)	Objem nekapilárních pórů (%)	Vlhkost (%)
PN (bez zhutnění)	1,17 a	55,6 c	34,4 b	21,1 c	29,4 a
LO (louka)	1,42 b	45,9 b	30,3 a	15,5 b	28,3 a
PA (pastvina)	1,57 c	40,2 a	30,0 a	10,2 a	28,8 a

Hodnoty charakterizované různými písmeny ve sloupci vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

Následně byl vyhodnocen vliv obhospodařování travních porostů na fyzikální vlastnosti půdy v jednotlivých hloubkách. Data byla statisticky porovnána analýzou rozptylu s následným testováním dle Tukeye $p = 0,05$ jako průměr tří let a termínů odběru.

S klesající hloubkou měření (obr. 34) došlo k průkaznému zvýšení objemové hmotnosti suché zeminy u porostu PN a LO. U obou porostů byl zjištěn průkazně vyšší rozdíl mezi povrchovou vrstvou 20-70 mm a hlubšími měřeními. To je dáno přirozenou ulehlostí půdy a nižší aktivitou edafonu v hlubších vrstvách půdy. U porostu LO je příčina nadměrného zhutnění podorničí technogenního původu.

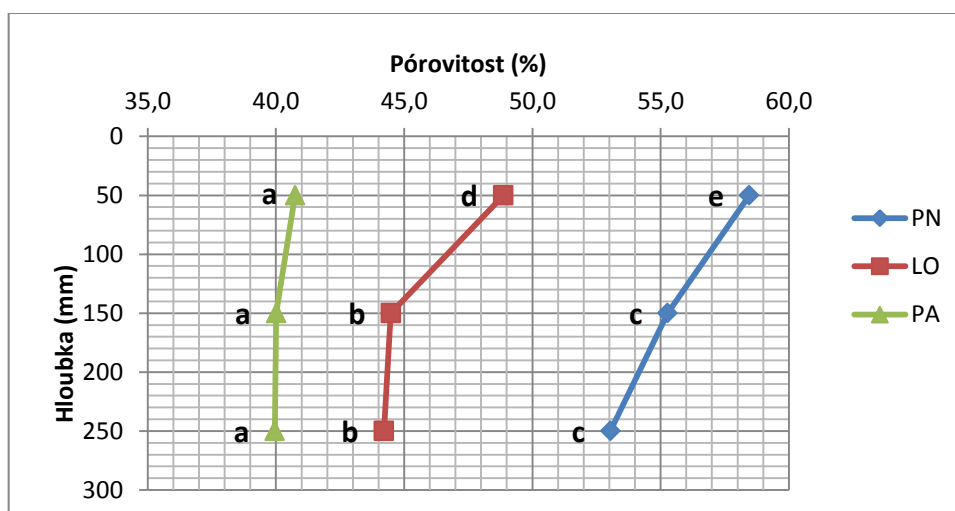
U varianty PA byly naměřeny nejvyšší hodnoty obou sledovaných charakteristik bez významné změny s hloubkou odběru. V povrchové vrstvě nebyl zjištěn průkazný rozdíl v porovnání s LO v hloubce 220-270 mm.



Obr. 34 Vliv obhospodařování porostů na objemovou hmotnost ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) v hloubce (mm)

Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

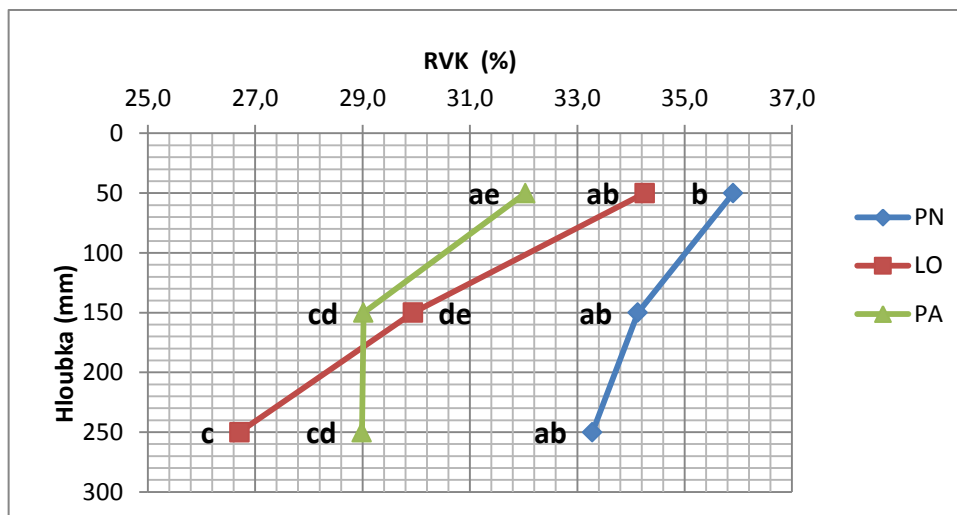
Z naměřených dat pórovitosti (obr. 35) byl zjištěn průkazný rozdíl mezi variantami PN, LO a PA. U stanovišť PN a LO je patrný průkazný rozdíl v povrchové vrstvě 20-70 mm s nižšími hloubkami odběru.



Obr. 35 Vliv obhospodařování porostů na pórovitost (%) v hloubce (mm)

Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

Hodnoty retenční vodní kapacity (obr. 36) byly nejvyšší u varianty PN a LO v povrchové vrstvě. Průkazný rozdíl v této hloubce byl zjištěn mezi variantou PN a PA. V hloubce 120-170 mm a 220-270 mm byla průkazně vyšší RVK u porostu PN v porovnání s PA a LO.

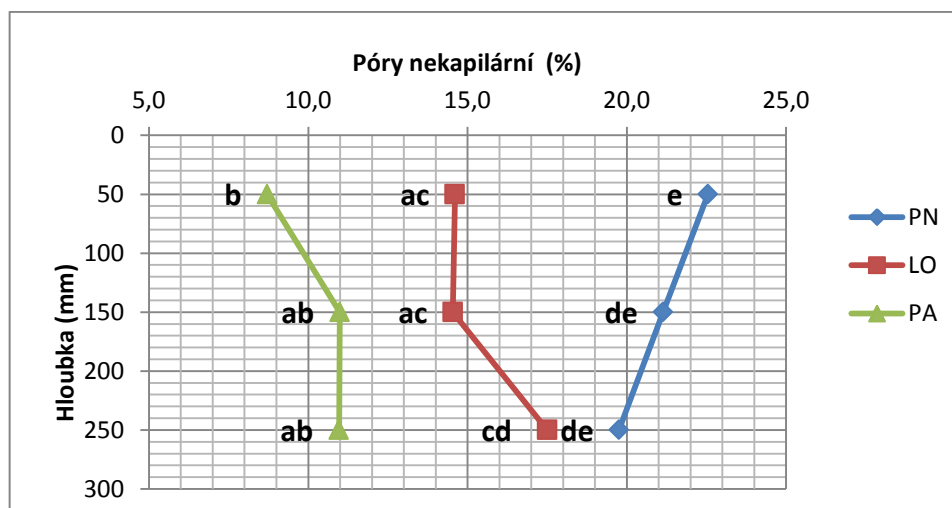


Obr. 36 Vliv obhospodařování porostů na RVK (%) v hloubce (mm)

Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

Objem nekapilárních pórů v jednotlivých hloubkách je patrný z obrázku 37. U varianty PN byl největší objem nekapilárních pórů zaznamenán v povrchové vrstvě a postupně se snižoval s hloubkou. Naopak tomu bylo u varianty PA a LO, kdy byl objem nekapilárních pórů v povrchové vrstvě nižší a s hloubkou došlo k jejich nárůstu.

V tabulce č. 19 je uveden poměr kapilárních pórů (RVK) k celkové pórovitosti, jehož optimální hodnota by se měla dle Kutílka (1978) pohybovat okolo 2/3 (tedy 66,6 %). Na porostech PN a LO byl tento poměr blízký optimu. U varianty PA je v povrchové vrstvě vyšší o 12 %. Vysoký podíl kapilárních pórů znesnadňuje infiltraci vody do půdy a je další z příčin nízké infiltrační rychlosti u toho způsobu využívání travních porostů.



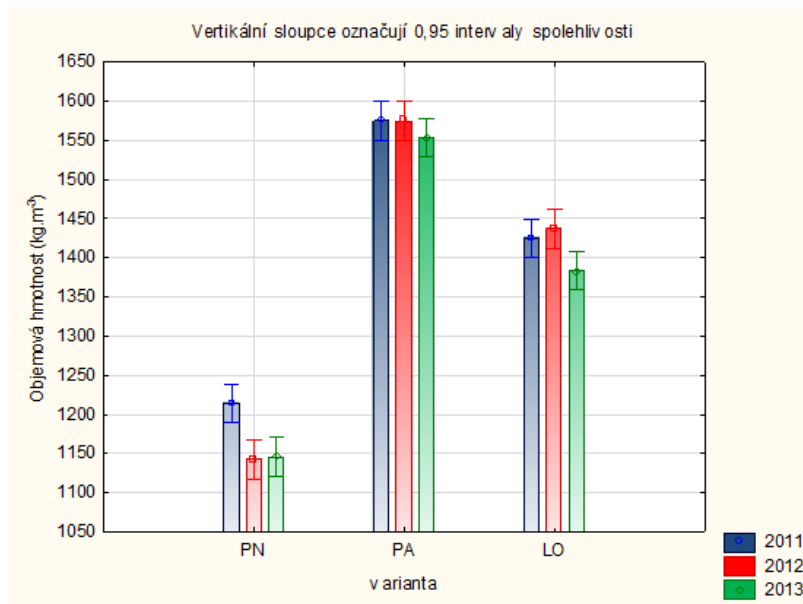
Obr. 37 Vliv obhospodařování porostů na objem nekapilárních pórů (%) v hloubce (mm). Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

Tab. 19 Poměr kapilární pórů k celkové pórovitosti u jednotlivých variant v hloubce odběru (mm)

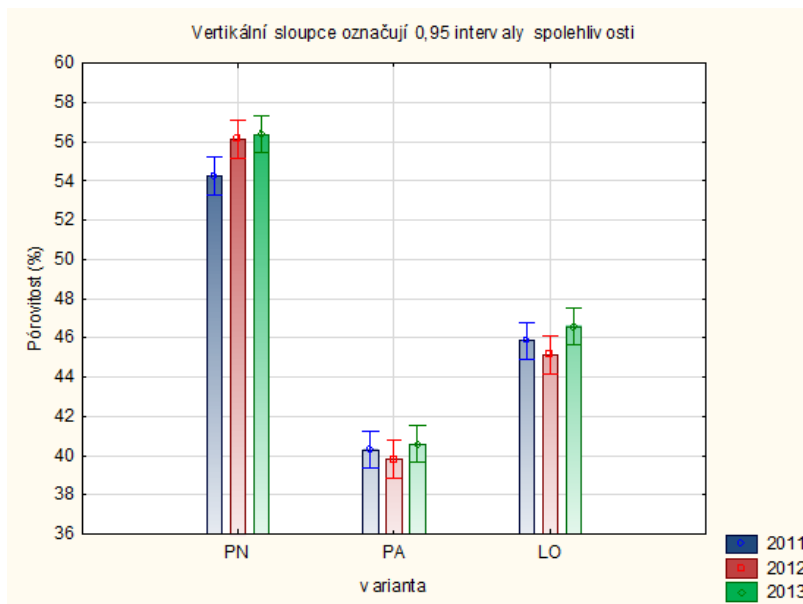
Varianta	Hloubka (mm)	Poměr RVK/P	Rozdíl od poměru 2/3
PN	20-70	61,4	-5,2
	120-170	61,7	-4,9
	220-270	62,8	-3,8
LO	20-70	70,1	+3,5
	120-170	67,3	+0,7
	220-270	60,4	-6,2
PA	20-70	78,6	+12,0
	120-170	72,5	+5,9
	220-270	72,6	+6,0

Vliv roku měření na charakteristiky objemové hmotnosti, pórovitosti, retenční vodní kapacity a objemu nekapilárních pórů je patrný z obrázku č. 38-41. Byla zjištěna vyšší objemová hmotnost ($p \leq 0,05$) ve všech letech mezi variantami PN, PA a LO. V pórovitosti byl na stanovišti PN průkazně vyšší rozdíl ($p \leq 0,05$) ve srovnání s PA a LO mezi rokem 2011 a 2013. V roce 2011 byly u porostu PN naměřeny stejné hodnoty RVK jako u porostů PA 2013 a LO 2013. Na stanovišti PN byl průkazný rozdíl zjištěn v roce 2011 a 2012.

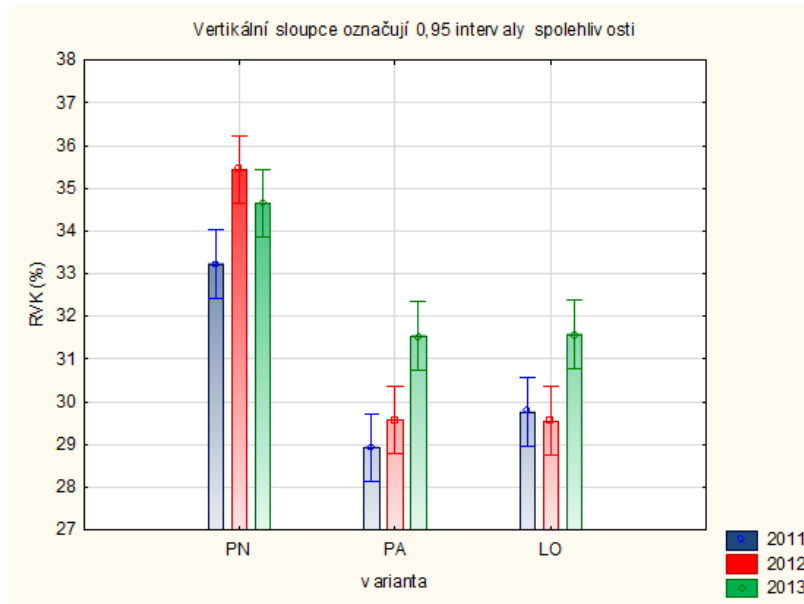
Z obrázku 41 je patrný postupný pokles objemu nekapilárních pórů v jednotlivých letech vlivem obhospodařování travních porostů (PA a LO), zatímco varianta PN vykazovala vyrovnané průkazně vyšší hodnoty ve všech třech letech.



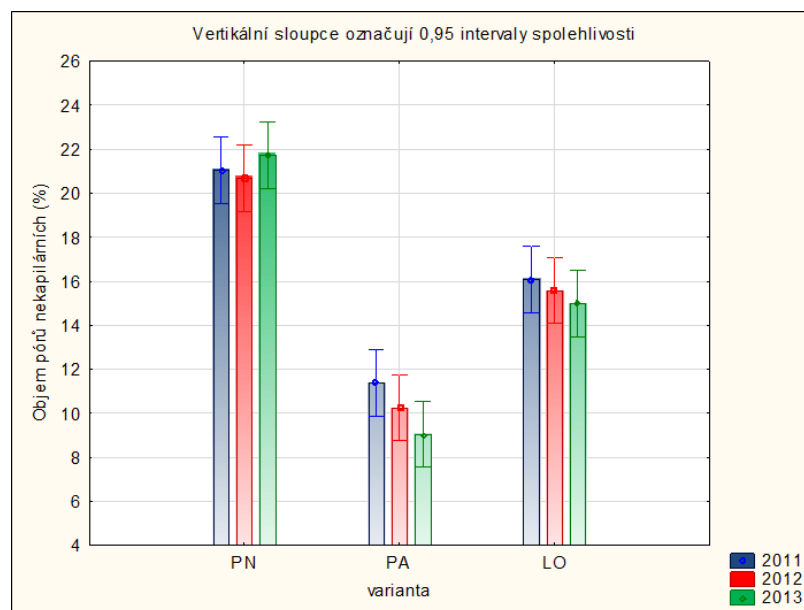
Obr. 38 Vliv ročníku na hodnoty objemové hmotnosti (kg.m⁻³) u jednotlivých variant obhospodařování TP



Obr. 39 Vliv ročníku na hodnoty pórovitosti (%) u jednotlivých variant obhospodařování TP



Obr. 40 Vliv ročníku na RVK (%) u jednotlivých variant obhospodařování TP



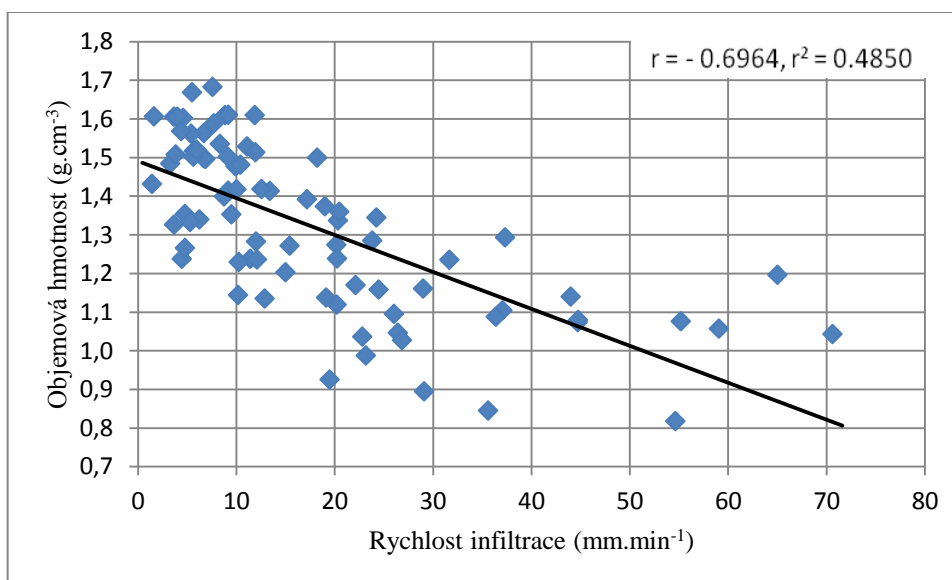
Obr. 41 Vliv ročníku na objem nekapilárních póru (%) u jednotlivých variant obhospodařování TP

Při vyhodnocování jednotlivých termínů měření na fyzikální vlastnosti bylo zjištěno, že limitní hodnoty objemové hmotnosti a pórovitosti pro zhutněných půd stanovených Lhotským (2000) byly překročeny u varianty PA ve všech hloubkách a ve všech termínech měření. U LO se naměřené hodnoty přibližovaly k limitním hodnotám v hloubce 220-270 mm v dubnu, ale nebyly překročeny. Překročení limitních hodnot je znakem degradace půdní struktury vlivem zhutňování. U porostu LO bylo zjištěno

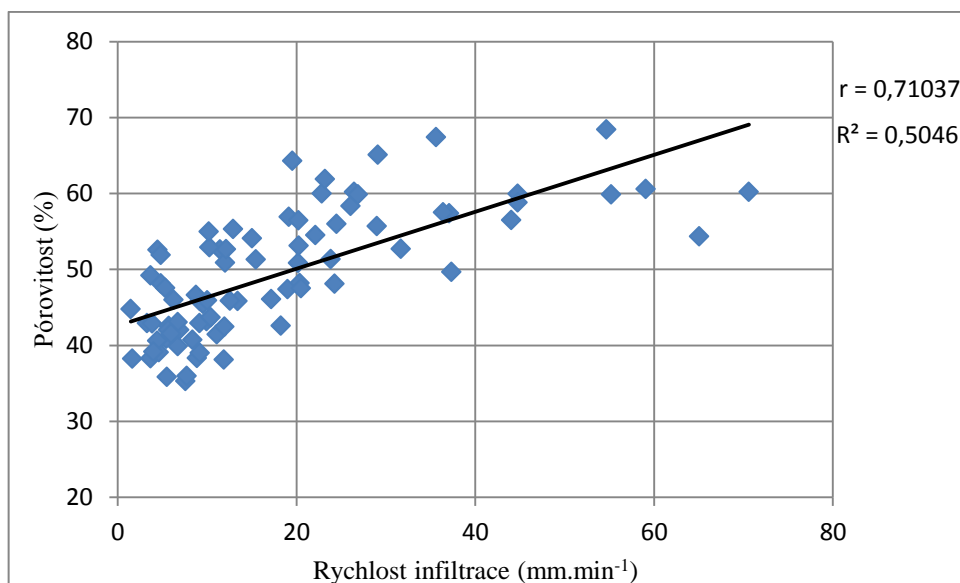
nadměrné zhutnění v podorničí v hloubce 220-270 mm. U varianty PA intenzivní pastva zapříčinila zhutnění v celém profilu 20-270 mm.

U všech 81 měření (3 roky měření x 3 termíny měření x 3 x způsoby obhospodařování x 3 opakování) byla hodnocena korelace mezi rychlostí infiltrace v první minutě, objemovou hmotností a pórovitostí z hloubky 0-50 mm. Retenční vodní kapacita a vlhkost nebyla hodnocena. Na obrázku č. 42 je znázorněna negativní korelace (korelační koeficient $r = -0,6964$) mezi objemovou hmotností a infiltrační rychlostí. S rostoucí objemovou hmotností klesá průkazně ($p \leq 0,01$) rychlost infiltrace. Pozitivní závislost rychlosti infiltrace na pórovitosti $r = 0,71037$ je zobrazena na obrázku č. 43. S rostoucí pórovitostí stoupá infiltrační rychlost. Relativně nízká hodnota koeficientů determinace je pravděpodobně způsobena mírným posunem místa odběru vzorků od místa měření infiltrace, náhodným rozložením makropórů a zhutněním lokalizovaným v malých ploškách.

Franzluebers et al., (2011) zkoumal vliv obhospodařování TP na korelační závislost rychlosti infiltrace a objemové hmotnosti na pastvině a louce v jižním Piedmontu USA. Během vlhkého období (61 % pórů zaplněno vodou) byla zjištěna negativní závislost ($p \leq 0,01$) rychlosti infiltrace na objemové hmotnosti v hloubce 3-6 cm ($r = -0,53$) a v hloubce 0-12 cm ($r = -0,42$).



Obr. 42 Závislost mezi rychlostí infiltrace (mm.min⁻¹) a objemovou hmotností (g.cm⁻³)



Obr. 43 Závislost mezi rychlostí infiltrace (mm.min⁻¹) a pórovitostí (%)

Kasprzak (1990) porovnával vliv obhospodařování lučních porostů na fyzikální vlastnosti půdy. Na velkovýrobně obhospodařované louce naměřil v povrchové vrstvě objemovou hmotnost 1,28 g.cm⁻³ a pórovitost 51,6 %, zatímco na ručně obhospodařované 1,19 g.cm⁻³ respektive 55 %. Podobné hodnoty byly zjištěny v našem pokuse u varianty bez vlivu zhutnění.

K nadměrnému zhutnění pastvin dochází zejména při pasení velkých stád, v blízkosti příkrmišť, napajedel, vchodů do napajedel a jiných frekventovaných míst (Billota et al. 2007, Novosad, 1980). Hubbard et al. (2003) upozorňuje na nebezpečí koncentrace živin a patogenů v blízkosti příkrmišť, přístřešků a napajedel na pastvinách. V těchto místech je půda zvláště náchylná k zhutnění zejména díky vysokému zatížení zvířaty. Takto poškozené travní porosty se mohou stát vlivem nízké infiltrační schopnosti příčinou povrchových odtoků a znečištění vodních toků, zhoršení kvality povrchových vod (Page et al., 2005) a jsou příčinou předčasné obnovy pastevních porostů (Hejduk, 2000).

Poškození fyzikálních vlastností půdy hospodářskými zvířaty dle autorů (Drewry a Paton, 2000 a Kurz et al., 2006) zasahuje do vrstvy 0-150 mm. V našich podmínkách se projevovalo nadměrné zhutnění do hloubek 270 mm. Tyto výsledky více souhlasí s pokusy Schoefielda a Halla (1986), kteří v podmínkách Velké Británie zjistili, že sešlapávání skotem může způsobit zhutnění ve větší hloubce než 100 mm.

Di et al., (2001) porovnávali vliv pastvy po 5-8 měsících na fyzikální vlastnosti půdy. V hloubce 0-10 cm bylo zjištěno zvýšení objemové hmotnosti a objem makropórů ($> 30 \mu\text{m}$) z $1,18 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ resp. 16,5 % u varianty bez pastvy na $1,29 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ resp. 10 % v horních 10 cm u dvakrát sešlapaného porostu mechanicky sestrojeným paznehtem simulujícím sešlap skotu po každé seči po dobu 5-8 měsíců.

Nie et al. (1997) zjistili, že vyloučení pastvy během jedné vegetační sezóny zlepšilo hydraulickou vodivost, objemovou hmotnost a provzdušněnost půdy. Ve svých pokusech uvádí, že vynechání pastvy po dobu 8 měsíců zvýšilo provzdušněnost půdy o 38 % oproti pastvině spásané ovce.

Drewry a Paton (2000) v pokuse zkoumajícím vliv intenzity pastvy skotu na přirozené zlepšení fyzikálních vlastností půdy na Novém Zélandě zjistili, že nenasycená hydraulická vodivost v hloubce 0-5 cm byla prokazatelně nižší u varianty po permanentně spásaného porostu (100 %) v porovnání s dobou pastvy 90 %; 70 %; 50 % a nepaseným porostem (0 %). V hloubce 5-10 cm byla vyšší nenasycená hydraulická vodivost zjištěna u varianty bez pastvy (0 %) oproti ostatním variantám. Intenzita pastvy byla 70-90 dojníc. ha^{-1} obvykle po dobu 24 hodin u permanentně spásaného porostu. Největší zlepšení fyzikálních vlastností půdy bylo dosaženo při pastvě 70 % a 0 %. Tyto intenzity pastvy vykazovaly vyšší hodnoty makropórovitosti, provzdušněnosti a hydraulické vodivosti. V praxi to znamená, že zhutnění půdy intenzivní pastvou může být zmírňováno přirozenou meliorací půd. Využívání výběhů pro periodické střídání pastvy a sečení může být praktickou cestou pro přirozené snížení míry zhutnění půdy.

5.1.3 Vliv obhospodařování travních porostů na nasycenou hydraulickou vodivost

Průkazně nejvyšší hodnoty nasycené hydraulické vodivosti (dále jen K_{fs}) byly zjištěny u varianty PN v průměru $1,529 \text{ m}\cdot\text{den}^{-1}$ (tab. 21). Dle klasifikace Němce (1975) v tabulce č. 20 se jedná o vysokou hydraulickou vodivost. Na lučním porostu LO činila průměrná K_{fs} $0,264 \text{ m}\cdot\text{den}^{-1}$ a je označována jako mírná vodivost. Nejnižší hodnoty K_{fs} byly naměřeny na pastvině PA $0,067 \text{ m}\cdot\text{den}^{-1}$ a jedná se o velmi nízkou hydraulickou vodivost. Mezi variantami PA a LO nebyl vzhledem k vysoké variabilitě dat zjištěn průkazný rozdíl.

Tab. 20 Klasifikace propustnosti půd podle naměřených hodnot nasycené hydraulické vodivosti K_{fs} ($m.den^{-1}$) dle Němce (1975)

Číslo třídy	Označení propustnosti	K_{fs} ($m.den^{-1}$)
I	velmi nízká	pod 0,12
II	nízká	0,12 - 0,24
III	mírná	0,24 - 0,45
IV	střední	0,45 - 1,1
V	vysoká	1,1 - 2,3
VI	značně vysoká	2,3 - 5,5
VII	velmi vysoká	nad 5,5

V rámci ročníku (průměr termínů měření) docházelo ke značným rozdílům naměřených hodnot K_{fs} (obr. 44). V roce 2011 byly u varianty PN a LO stanoveny nejvyšší průměrné hodnoty K_{fs} 3,010 $m.den^{-1}$ a 0,375 $m.den^{-1}$ a u PA 0,073 $m.den^{-1}$.

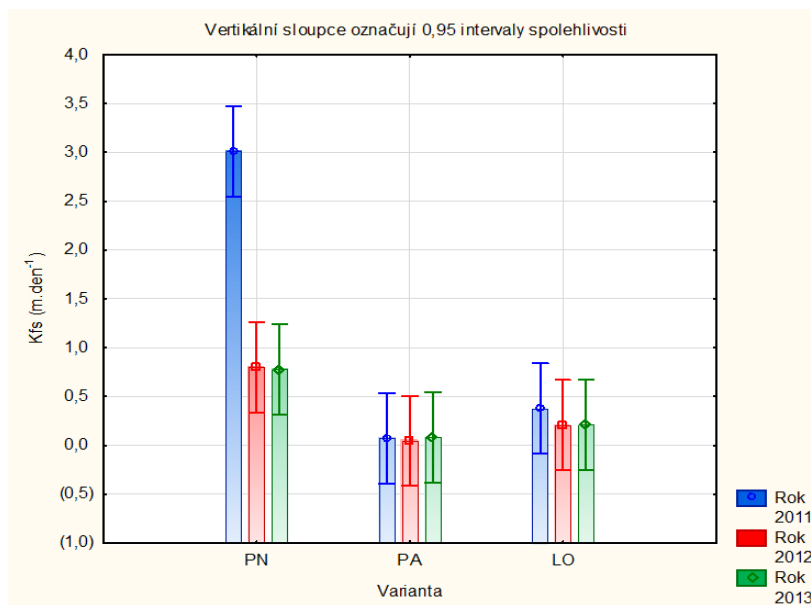
V roce 2012 a 2013 došlo k výraznému poklesu K_{fs} na stanovišti PN 0,780 $m.den^{-1}$ resp. 0,767 $m.den^{-1}$; na stanovišti PA byla zjištěna K_{fs} 0,045 resp. 0,084 $m.den^{-1}$ a u LO došlo k poklesu K_{fs} na 0,205 $m.den^{-1}$ resp. 0,264 $m.den^{-1}$.

Naměřené hodnoty u porostu bez vlivu zhutnění (PN) v roce 2012 a 2013 jsou srovnatelné s naměřenými hodnotami K_{fs} Jandákem et al., (2012), který zkoumal nasycenou hydraulickou vodivost u travních porostů (kostřavy červené) a jetelotravní směsi na lokalitě Vatín. U ručně obhospodařovaných porostů kostřavy červené byla naměřena K_{fs} 0,682 $m.den^{-1}$ a u jetelotravní směsky 0,729 $m.den^{-1}$.

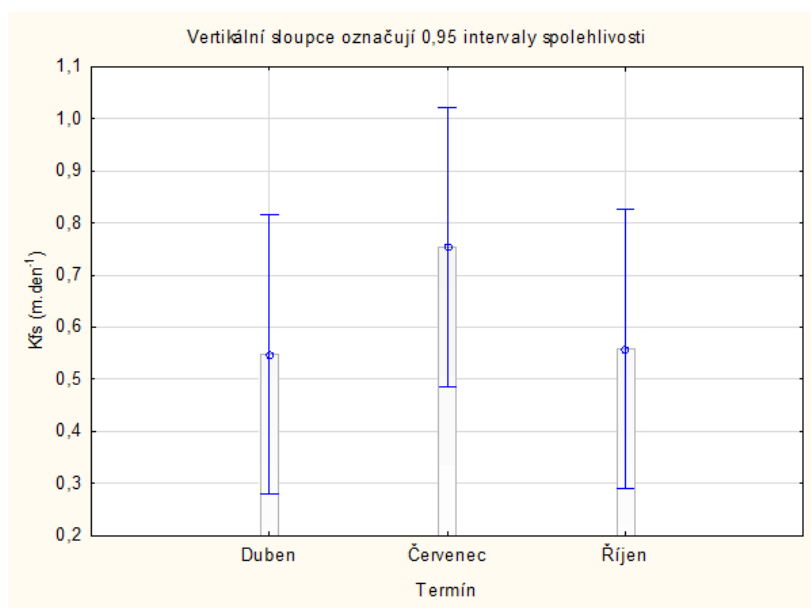
Tab. 21 Nasycená hydraulická vodivost K_{fs} ($m.den^{-1}$) u jednotlivých variant

		PN	PA	LO
2011	Duben	2,734	0,152	0,417
	Červenec	2,618	0,038	0,575
	Říjen	3,679	0,030	0,133
2012	Duben	0,780	0,060	0,276
	Červenec	1,425	0,049	0,297
	Říjen	0,195	0,028	0,043
2013	Duben	0,372	0,068	0,075
	Červenec	1,297	0,138	0,347
	Říjen	0,660	0,044	0,211
Průměr celkem*		1,529 b	0,067 a	0,264 a

*Rozdílná písmena v řádku označují statisticky průkazný rozdíl ($p < 0,05$)



Obr. 44 Vliv roku měření na nasycenou hydraulickou vodivost K_{fs} ($m.den^{-1}$) u jednotlivých variant obhospodařování TP



Obr. 45 Vliv termínu měření na nasycenou hydraulickou vodivost K_{fs} ($m.den^{-1}$)

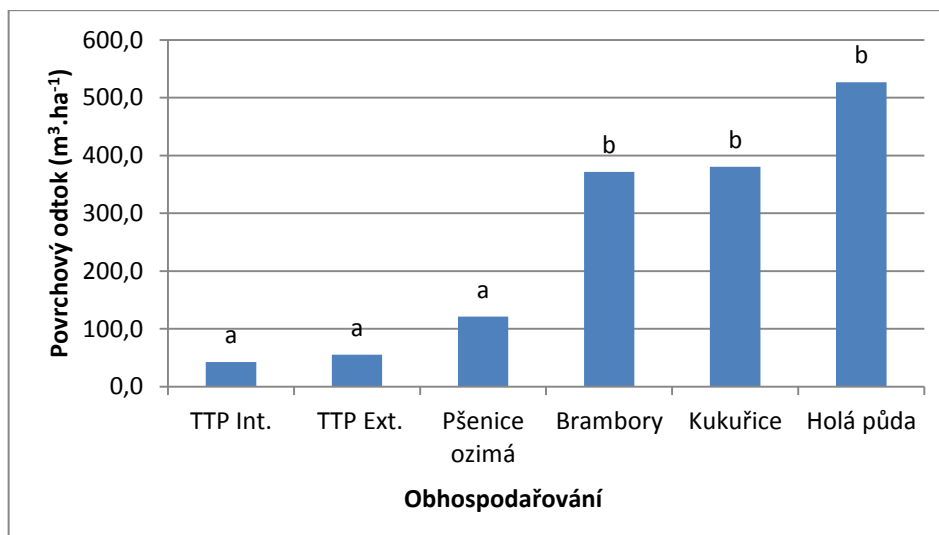
Z výsledků vyplývá, že vlivem zhutnění pojezdy mechanizace u lučních porostů došlo ke snížení hydraulické vodivosti téměř 6krát a vlivem zhutnění při pastvě zvířat téměř 23krát ve srovnání s půdou bez vlivu zhutnění. Příčinou je zhutnění půdy pod lučními porosty a nadměrné zhutnění pastvin sahající do hloubky 270 mm, jak bylo zjištěno z rozborů fyzikálních vlastností půdy.

5.2 Vliv zemědělských plodin na povrchový odtok

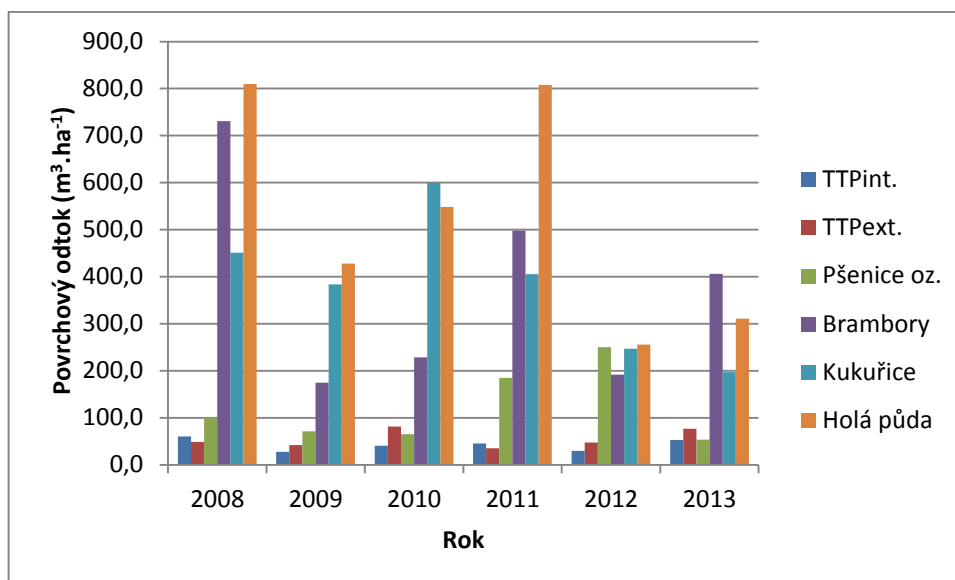
5.2.1 Vliv zemědělských plodin na povrchový odtok ve vegetačním období

Z výsledků pokusu měření povrchových odtoků za vegetační období let 2008 až 2013 vyplývá, že průkazně nejvyšší odtoky byly zjištěny u holé půdy a širokořádkových plodin a nejnižších u travních porostů a pšenice ozimé (obr. 46). Průměrný úhrn srážek za sledované vegetační období let 2008-2013 byl 382,5 mm. Na obrázku č. 47 jsou znázorněny povrchové odtoky naměřené v jednotlivých letech u hodnocených plodin.

Pro statistické vyhodnocení jednotlivých odtokových událostí byla použita logaritmická transformace dat. Následně byla provedena analýza rozptylu na hladině významnosti $p = 0,05$. Nezávisle proměnnou hodnotou byly varianty obhospodařování a závisle proměnná odtoky stanovené jako průměr z obou expozic. Bylo hodnoceno celkem 118 odtokových situací u každého způsobu obhospodařování za sledované období. Vzhledem k nehomogenitě rozptylu odtoků z jednotlivých variant, byla data logaritmicky transformována.



Obr. 46 Porovnání povrchového odtoku u jednotlivých variant ve vegetačním období. Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)



Obr. 47 Porovnání velikosti povrchového odtoku u jednotlivých plodin za vegetační období sledovaných let

Celkový srážkový úhrn byl přepočten na množství vody, která dopadla na odtokoměrnou plochu o velikosti 10 m^2 . Při úhrnu $382,5 \text{ mm}$ bylo celkové množství vody $382,5 \text{ l.m}^2$ následně převedeno na $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ ($3825 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$). Stejným způsobem byl převeden povrchový odtok z parcely. Při odtoku $1 \text{ litr}.10 \text{ m}^2$ byl převeden na $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ po vynásobení 1000 , tedy $1 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$. Tyto údaje byly následně použity pro srovnání velikosti povrchových odtoků ze srážek (tab. 22).

Uvažujeme-li povrch holé půdy jako maximum pro tvorbu povrchového odtoku (tab. 22) za dané období ($526,6 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$), pak z porostů kukuřice povrchově odteklo $72,3 \%$ vody ($380,5 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$), z brambor $70,5 \%$ ($371,5 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$), z pšenice ozimé $23,0 \%$ ($121,0 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$), z travních porostů obhospodařovaných extenzivně $10,5 \%$ ($55,2 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$) a z intenzivně obhospodařovaných $8,1 \%$ ($42,6 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$).

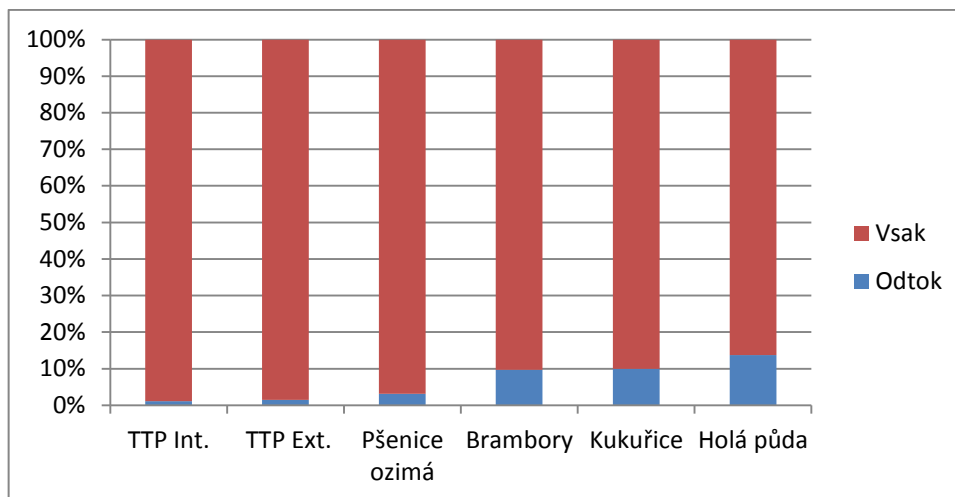
Z těchto údajů lze stanovit ochranný účinek vegetace proti tvorbě povrchového odtoku za dané období jako poměr vody, která odtekla z jednotlivých parcel k holé vegetací nechráněné půdě, u které byl stanoven ochranný účinek jako nulový. Nejvyšší ochranný účinek vegetace měly TTP intenzivní $91,9 \%$, TTP extenzivní $89,5 \%$, pšenice ozimá $77,0 \%$, brambory $29,5 \%$ a nejnižší kukuřice $27,7 \%$.

Tab. 22 Povrchový odtok ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) za vegetační období (květen až září) z jednotlivých variant

Rok	Srážky (mm)	Způsob obhospodařování					
		TTP Int.	TTP Ext.	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Holá půda
2008	390,5	60,1	48,8	100,5	730,6	451,3	810,0
2009	358,2	27,7	41,9	71,4	174,5	383,5	427,7
2010	500,9	40,5	81,3	65,0	228,6	599,1	548,1
2011	376,4	45,0	35,4	185,2	498,0	405,7	807,7
2012	283,0	29,8	47,4	250,3	191,4	246,6	255,7
2013	385,9	52,8	76,6	53,4	406,0	196,9	310,8
Průměr	382,5	42,6 a	55,2 a	121,0 a	371,5 b	380,5 b	526,6 b
Srovnání s holou půdou (%)		8,1	10,5	23,0	70,5	72,3	100,0
Odtokový součinitel		0,011	0,014	0,032	0,097	0,099	0,138

Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

Dále byl hodnocen poměr celkového úhrnu příčinného deště a odteklého množství srážkové vody (odtokový součinitel) za vegetační období u jednotlivých plodin v průměru let 2008-2013. Nejvyšší hodnoty odtokového součinitele byly naměřeny u holé půdy 0,138. U kukuřice byla hodnota odtokového součinitele 0,099; u brambor 0,097; u pšenice ozimé 0,032; u TTP extenzivního 0,014 a TTP intenzivního 0,011. Na obrázku č. 48 je po vynásobení odtokového součinitele x100 znázorněný podíl vody odtečené ze sledovaných variant za vegetační období k srážkové vodě. Tento podíl vyjadřuje, o kolik se sníží celkové množství vody dostupné pro rostliny. U širokořádkových plodin je to až 10 % u pšenice 3 % a u TTP 1 – 1,5 %. Je nutné podotknout, že tento odtokový součinitel byl stanoven jako dlouhodobý průměr let 2008-2013 a byl počítán i ze srážek, které nezpůsobily odtok.



Obr. 48 Poměr povrchového odtoku k vsaku vody do půdy u jednotlivých variant

Srovnání odtoků z pozemku bez vegetace s travním porostem hodnotili i Holý a Váška in Holý (1978). Za pozorovací období 1960 – 1969 odteklo povrchově ze zatravněné plochy o sklonu 44,5 % a velikosti 20 x 6 m o 96 % méně srážkové vody než ze stejně velké plochy bez vegetace.

Na pozitivní vliv travních porostů proti vzniku odtoku upozornil i H. H. Bennet in Jůva a Cáblik (1954). Na pozorováních prováděných na plochách o sklonu 9 – 12,5 % uvádí, že odtok u travního porostu činil 0,3 – 5,5 % srážky a u lesního porostu činil 0,1 – 3,6 %. Takže oba tyto porosty lze považovat při dobrém způsobu obhospodařování za rovnocenné.

Vliv vegetačního krytu u jednotlivých plodin byl významným prvkem působícím na velikost povrchového odtoku. U zapojených porostů působí vegetační kryt jako disipátor kinetické energie deště a chrání povrch půdy před jejím přímým působením a vznikem půdní krusty. Největším disipiačním účinkem se vyznačují víceleté trávy, přičemž tento účinek dle Kasprzaka (1990) roste exponenciálně s přibývajícím hmotností nadzemních orgánů. Autor dále zjistil, že při hmotnosti sušiny nadzemní biomasy 0,18 t.ha⁻¹ je disipace dešťových kapek dopadajících do plně zapojeného porostu téměř 100%. Dle Hejduka (2000) spočívají další hydrologicky významné vlastnosti travních porostů v intercepci, zvýšení infiltrační schopnosti půdy, ve snížení rychlosti a unášecí schopnosti povrchově stékající vody a v mechanickém zpevnění půdy kořeny.

Výsledky potvrzují obecně známý fakt, že u širokořádkových plodin dochází k několika násobně většímu povrchovému odtoku v porovnání s pšenicí a travními porosty. V tomto pokusu je však nutné zhodnotit specifické podmínky

obhospodařování, při jakých dochází k formaci povrchového odtoku. U travních porostů dochází jen k mírnému zhutňování v důsledku použití lehké mechanizace, které je nesrovnatelně nižší než velkovýrobní obhospodařování. U ostatních porostů není brán v potaz vliv pojezdů těžké mechanizace, který negativně působí na změnu propustnosti půdy a vliv organického hnojení, které působí na propustnost půdy pozitivně. Lze tedy předpokládat, že u travních porostů jsou naměřené hodnoty odtokového součinitele srovnatelné s praxí při ručním obhospodařování, avšak u ostatních plodin by došlo k jeho výraznému navýšení.

Z měření provedených v předchozím pokusu je patrné, že i u TTP dochází v závislosti na intenzitě obhospodařování k omezení infiltrační rychlosti vlivem zhutnění pastevními zvířaty a vlivem mechanizačních prostředků a tím ke zvýšení povrchového odtoku. Například Heathwaite et al. (1990) uvádí 12násobné zvětšení povrchového odtoku na intenzivně spásaných TP ve srovnání s nespásanými porosty.

Snížením množství dostupné vody pro rostliny vlivem povrchového odtoku je limitním faktorem pro výnos rostlin především v suchých letech. Pimentel a Kounang (1998) při porovnání výsledků několika autorů zjistili, že pokud klesne využitelná vodní kapacita půd o 20-40 % oproti optimu, výnos rostlin je snížen o 10 až 25 %.

5.2.2 Vliv zemědělských plodin na vodní erozi a přípustná ztráty půdy

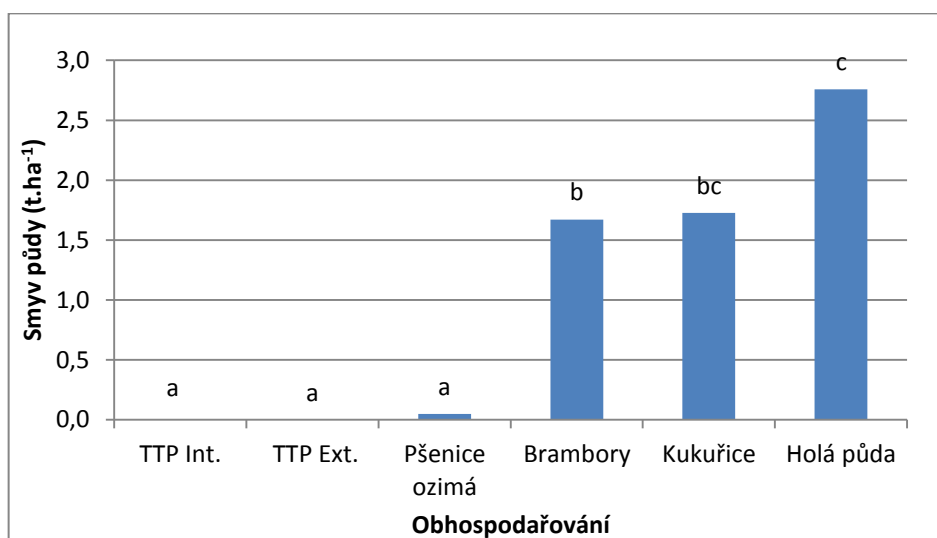
V tabulce č. 23 jsou uvedeny průměrné roční hodnoty z obou expozičních naměřeného smyvu půdy za vegetační období let 2008-2013. Celkem bylo zaznamenáno 36 případů srážek, které způsobily erozi. U holé půdy jako kontrolní varianty byla průměrná roční ztráta půdy 2,76 t.ha⁻¹, u kukuřice a brambor 1,73 t.ha⁻¹ (62,6 % oproti kontrolní variantě) respektive 1,67 t.ha⁻¹ (60,6 %), u pšenice ozimé 0,05 t.ha⁻¹ (1,8 %) a u TTP nebyla eroze měřitelná. To bylo způsobeno zejména vysokým ochranným účinkem travních porostů a krátkou délkou svahu (4 m), kdy plošný povrchový odtok nestačil přejít v odtok soustředěný s větším erozním a transportním účinkem.

Při porovnání vlivu obhospodařování půdy na celkovou erozi byl zjištěn na variantě s kukuřicí a bramborami 62,6% resp. 60,6% smyv v porovnání s holou půdou. U pšenice byl naměřen 1,8% smyv ve srovnání s holou půdou. Podobně i Janeček (2005) uvádí, že u kukuřice a okopanin dosahoval smyv 60 % oproti černému úhoru a u víceletých travních porostů jen 0,02 %.

Tab. 23 Smyv půdy ($t \cdot ha^{-1}$) u jednotlivých variant – průměr z obou expozičních a roku

Rok	Smyv půdy ($t \cdot ha^{-1}$)					
	TTP Int.	TTP Ext.	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Holá půda
2008	0	0	0,00	5,10	3,27	3,99
2009	0	0	0,05	0,09	1,26	2,29
2010	0	0	0,02	0,37	4,49	2,19
2011	0	0	0,13	0,46	0,66	4,30
2012	0	0	0,10	0,01	0,40	0,64
2013	0	0	0,00	4,01	0,29	3,14
Celkem	0	0	0,29	10,03	10,36	16,55
Průměr	0 a	0 a	0,05 a	1,67 b	1,73 bc	2,76 c
Porovnání s holou půdou (%)	0	0	1,8	60,6	62,6	100,0

Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)



Obr. 49 Průměrný smyv půdy ($t \cdot ha^{-1}$) u jednotlivých variant za sledované období

K posouzení míry erozního ohrožení pozemků slouží kritérium přípustné ztráty půdy vodní erozí, která je definována jako maximální ztráty půdy dovolující trvale udržovat úrodnost půdy. Hodnoty přípustné ztráty půdy jsou stanoveny dle Novotného (2014) podle hloubky půdního profilu jako povolená dlouhodobá průměrná ztráta u půd středně hlubokých (30-60 cm) i hlubokých (nad 60 cm) $4 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$, namísto dříve doporučených $10 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ u hlubokých půd. U půd mělkých (do 30 cm) je doporučeno je převést na TTP (Janeček et al., 2012). Teoreticky se průměrná

dlouhodobá ztráta půdy erozí vypočítává z univerzální rovnice dle Wischmeiera a Smithe in Janeček et al., (2012). V našem případě byla aktuální ztráta stanovena empiricky z měření na odtokových polích.

Uvažujeme-li pro půdní typ kambizem na odtokových polích přípustnou ztrátu půdy erozí $4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ zjistíme, že byla překročena minimálně u jedné z variant v letech 2008, 2010 a 2013 (tab. 23).

Řada autorů in Holý (1978) nicméně uvádí, že rychlost tvorby půdy se pohybuje za příznivých podmínek při vhodném způsobu hospodaření a účinné ochraně půdy okolo 1 až $1,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Dle Hudsona (1973) by neměla překročit $1,25 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Dále je třeba vzít v úvahu i fakt, že se eroze půdy v současné době stává výrazným znečišťovatelem vodních zdrojů, díky transportu živin, pesticidů, a v případě travních porostů i patogenních látek (viz kapitola 3.6.1). V případě transportu erozního materiálu může docházet i k zanášení nádrží a toků v povodí. Z tohoto důvodu Janeček et al., (2012) uvádí přípustnou ztrátu půdy s ohledem na jakost vod. Limit, který nezpůsobuje eutrofizaci vod přísunem fosforu z eroze, se pohybuje v rozmezí $0,5\text{-}2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Posouzení přípustné ztráty půdy s ohledem na jakost vod je nutné stanovit s ohledem na územní podmínky, charakter vodního toku a celého povodí.

Pokud by byla v našem pokusu stanovena přípustná mez eroze pro ochranu jakosti vod na hodnotu $1,25 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, překročení těchto hodnot by nastalo na stanovišti brambor v letech 2008 a 2013. Na porostu kukuřice v roce 2008, 2009 a 2010 a na holé půdě ve všech letech kromě roku 2012. K nejvyššímu překročení by došlo na stanovišti brambor (4 násobnému), poté u kukuřice a holé půdy (3,5 násobnému). U pšenice ozimé a obou travních porostů nebyla tato mez překročena.

Z těchto výsledků je patrné, že již na malé délce svahu (4 m) při sklonu svahu 5° (8,75 %) může na porostech širokořádkových plodin docházet k erozi, která ohrožuje jakost a kvalitu povrchových vod a z hlediska udržitelnosti využívání půdy trvale snižuje její úrodnost.

Pro statistické hodnocení byla data transformována logaritmicky (obr. 50) a následně byla provedena analýza rozptylu a Tukeyův HSD test ($p < 0,05$). V porovnání s holou půdou, kukuřicí a bramborami byl zjištěn průkazně nižší smyv na obou typech travních porostů a pšenici ozimé. Nebyl prokázán rozdíl smyvů z plochy s kukuřicí ve srovnání s bramborami a holou půdou. U holé půdy byl zjištěn průkazně vyšší smyv než u brambor.

Tukeyův HSD test; proměnná Smyv_Log (Tabulka2)					
Homogenní skupiny, alfa = ,05000					
Chyba: meziskup. PČ = ,44356, sv = 175,00					
Č. buňky	Obhosp.	Smyv_Log Průměr	1	2	3
4	TTP	0,000000	****		
5	Pšenice ozimá	0,038250	****		
1	Brambory	0,510630		****	
2	Kukuřice	0,625853		****	****
3	Holá půda	1,012143			****

Obr. 50 Statistické vyhodnocení smyvu půdy dle Tukeye po logaritmské transformaci naměřených hodnot u jednotlivých variant



Obr. 51 Počátek plošné eroze na odtokových políčkách s kukuřicí (foto autor 16. 6. 2011)



Obr. 52 Erozní smyv z odtokových ploch (foto S. Hejduk)

5.2.3 Vliv jednotlivých nebezpečných dešťů na povrchový odtok a erozi

V této části byl vyhodnocen déšť vyvolávající odtokově a erozně nebezpečné situace v krajině vyskytující se dle Trupla (1958) v povodí Odry a Moravy 1krát ročně. Dne 14. 7. 2011 (tab. 24) při přívalovém dešti s celkovým úhrnem 13,6 mm z toho efektivní část byla 11,2 mm; doba trvání efektivního deště $t_D = 21$ minut; intenzita efektivního deště $0,53 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; mohutnost deště $M_D = 3,78 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-0,5}$. Povrch půdy před deštěm byl vlhký, TTP měl výšku 33 cm, kukuřice 120 cm, pšenice 75 cm a brambory 45cm.

Tab. 24 Povrchový odtok ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) a smyv půdy ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) naměřený 14. 7. 2011.

Varianta	Povrchový odtok ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	Odtokový součinitel	Smyv ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)
Holá půda	85	0,625	4,49
TTP intenzivní	0,3	0,002	0,00
TTP extenzivní	1,05	0,008	0,00
Kukuřice	34,5	0,254	0,21
Pšenice ozimá	6,5	0,048	0,00
Brambory	38,5	0,283	0,30

Efektivní částí deště se rozumí část přirozeného deště, popřípadě celý přirozený déšť, který vyvolává povrchový odtok na holé půdě. Dopadá-li déšť na vlhkou půdní

membránu (za sucha krustu), je jeho intenzita $0,05 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ dostatečná k vyvolání povrchového odtoku. Pokud na povrchu tato membrána není, je třeba ke vzniku povrchového odtoku dešť s intenzitou minimálně $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (Hejduk, 2011).

Mohutnost deště byla vypočtena z ombrogramu podle vztahu dle Kasprzaka in Brauna et al., (1996):

$$M_D = i_s \cdot \sqrt{t_D}$$

kde:

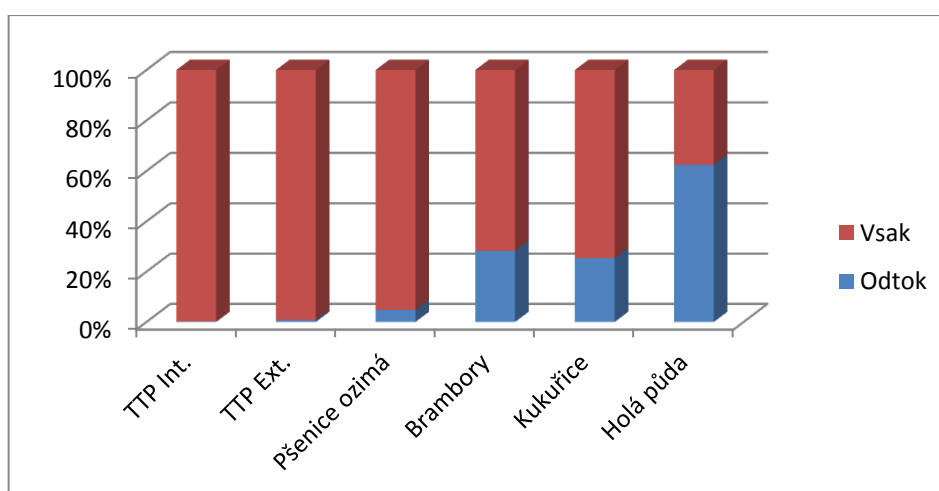
M_D – mohutnost deště ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-0,5}$),

i_s – střední intenzita deště ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$),

t_D – doba trvání deště (min).

Analýzou jednotlivých nebezpečných dešťů zjistíme, že odtokový součinitel a eroze dosahují mnohem vyšších hodnot než je průměr za celé vegetační období. Hejduk (2011) uvádí, že při vyšších intenzitách deště a delší době trvání se rozdíly mezi odtoky z travních porostů popřípadě z pšenice ozimé zvyšují, což je patrné i z tabulky č. 24.

Hejduk (2011) při pokusech prováděných v Kníničkách a ve Vatíně dále zjistil, že na stanovištích se silážní kukuřicí dosahují extrémní hodnoty objemu povrchového odtoku z přívalových dešťů stejných hodnot jako na holé půdě. To vysvětluje výskytem dešťů s mohutností nad $M_D = 1,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-0,5}$ v období května a června, kdy není půda na stanovišti s kukuřicí chráněna vegetací.



Obr. 53 Poměr povrchového odtoku k vsaku vody do půdy u jednotlivých variant po přívalovém dešti 14. 7. 2011

Z výsledků rozboru odtokově a erozně nebezpečných dešťů je patrný zásadní vliv doby výskytu přívalových dešťů na velikost smyvu půdy. V případě, že se přívalový déšť vyskytne v období nezapojeného porostu, dochází vlivem energie dopadajících kapek na nechráněnou půdu k přetváření její propustnosti. Vytvoří se tím půdní krusta (viz kapitola 3.5.1), která omezuje vsak vody po celé vegetační období. V letech sušších v níže položených a sušších oblastech, kdy se nestačila vytvořit zásoba půdní vláhy během zimního období, dochází ke snižování dostupnosti vláhy pro rostliny a vede to k jejich stresu suchem. Tento jev může nastat i v případě, kdy je celkový srážkový úhrn za vegetační období dostatečný, neboť podíl vody, která povrchově odtéká z přívalových dešťů, může dosáhnout i 60 % jejich úhrnu. Tyto situace jsou spojeny se zvýšeným rizikem vzniku náhlých povodní v letním období.

Podle Kasprzaka (1969) na půdách s holým urovnaným povrchem vzniká povrchový odtok při srážkách s intenzitou $0,1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ v závislosti na vlhkostním stavu povrchu půdy před srážkou a časovém průběhu srážky. Mechanický účinek deště o intenzitě větší než $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ se projevuje do hloubky 5 až 8 mm a způsobuje více než 30násobné zmenšení infiltrační schopnosti původně kyprého povrchu půdy (Kasprzak, 1969).

5.2.4 Povrchový odtok pesticidů

V roce 2011 byly parcely obou expozičních kukuřice ošetřeny preemergentním herbicidem Gardoprim Plus Gold 500 SC v doporučené aplikační dávce 4 litry na hektar. Hebicide obsahuje účinné látky Terbutylazine v množství $187,5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a S-metolachlor $312,5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$. Na odtokoměrnou plochu 10 m^2 tak bylo aplikováno $750\,000 \mu\text{g}$ Terbutylazine a $1\,250\,000 \mu\text{g}$ S-metolachloru.

Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. uvádí dle norem environmentální kvality pro specifické znečišťující látky pro útvary povrchových vod maximální celoroční průměrnou koncentraci látek Terbutylazine a S-metolachlor v povrchových vodách $0,2$ a $0,5 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$.

V tabulce č. 25 jsou uvedeny vybrané charakteristiky přívalových dešťů z 14. 6., 16. 6. a 23. 6., které způsobily povrchový odtok u kukuřice. Následně proběhlo odebrání vzorků vody, které byly bezprostředně po odběru zamrazeny a předány do laboratoře. Poté byl proveden chemický rozbor ke stanovení koncentrace pesticidů v povrchově

odteklé vodě. Bylo zjištěno, že celkem po třech přívalových deštích v červnu došlo k 1135 násobnému překročení koncentrace Terbutylazine a 314 násobnému překročení koncentrace S-metolachloru v povrchových vodách. Vzhledem k vysoké adsorbci půdních herbicidů na koloidní částice půdy je pravděpodobné, že mnohem větší množství herbicidu bylo vázáno na erozním smyvu. Analýza smyvu v zeminách je mnohem obtížnější než ve vodě a je zde mnohem vyšší prahová hodnota, proto nebyla analýza smyvu realizována.

Tab. 25 Vybrané charakteristiky prvních přívalových dešťů roku 2011 vybraných pro rozbor chemické analýzy vody a velikost povrchového odtoku u kukuřice

Datum	Srážky (mm)	Efektivní srážky (mm)	Maximální intenzita ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	Doba efektivního deště (min)	MD	Povrchový odtok ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$)	Odtokový součinitel
14.6.	11,7	11,7	0,8	39	1,87	24,0	0,205
16.6.	5,8	5,8	0,8	24	1,31	12,8	0,221
23.6.	10,1	10,1	1,0	70	1,22	27,0	0,267

Legenda: MD – mohutnost deště ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-0,5}$)

Tab. 26 Koncentrace pesticidů v povrchovém odtoku ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) a jejich poměr k aplikované dávce (%)

Datum	Terbutylazine		S-metolachlor	
	Koncentrace v odtoku ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)	Poměr k aplikované dávce (%)	Koncentrace v odtoku ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)	Poměr k aplikované dávce (%)
14.6.	96,0	0,31	64,0	0,12
16.6.	70,0	0,12	58,0	0,06
23.6.	61,0	0,22	35,0	0,08
Celkem	227	0,65	157	0,26

Vlivem výskytu přívalových dešťů v měsících, kdy není půda dostatečně chráněna vegetací, dochází k mnohonásobnému překročení přípustného znečištění povrchových vod pesticidními látkami. Dle zjištění termínů výskytu odtokově nebezpečných dešťů se vyskytlo v období května a června 46,2 % dešťů vyvolávajících povrchový odtok. Zejména v tuto dobu dochází k vysokým koncentracím nebezpečných látek v povrchových vodách, které mají negativní vliv na organismy v něm žijící.

5.2.5 Termín výskytu odtokově i erozně nebezpečných dešťů

Výskyt odtokově i erozně nebezpečných dešťů je vázán zejména na horké letní období roku. V tabulce č. 27 jsou uvedeny případy, kdy byl minimálně na jedné odtokové parcele zaznamenán povrchový odtok. Celkem bylo zaznamenáno 117 těchto dešťů.

V měsících květnu a červnu se vyskytlo 46,2 % nebezpečných dešťů, které vyvolávaly povrchový odtok. Z výsledků jasně vyplývá, že v tomto období je riziko povrchových odtoků a eroze největší, jelikož porost pěstovaných plodin ještě není plně zapojen, aby chránil její povrch před erozními účinky a tvorbou půdní krusty. Výška porostu kukuřice na odtokoměrných plochách dosahovala ke konci měsíce června v průměru všech let 30 cm (obr. 51). Od května do srpna se vyskytlo 85,5 % odtokově nebezpečných dešťů.

Tab. 27 Četnost výskyt odtokově nebezpečných dešťů v jednotlivých měsících

Rok	Měsíc					Celkem
	V	VI	VII	VIII	IX	
2008	3	6	3	3	2	17
2009	2	6	8	3	0	19
2010	7	4	2	4	2	19
2011	3	5	4	5	4	21
2012	1	5	7	3	2	18
2013	7	5	1	3	7	23
Celkem	23	31	25	21	17	117
% výskytu	19,7	26,5	21,4	17,9	14,5	100,0

Dále byla vyhodnocena četnost výskytu erozně nebezpečných dešťů (tab. 28), kdy minimálně na jedné z parcel byl zaznamenán výskyt eroze. Z výsledků je opět patrný největší výskyt erozně nebezpečných dešťů na půdách nedostatečně krytých vegetací v měsíci červnu 36,1 % a následně v červenci 33,3 %. Janeček et al., (2012) uvádí, že v období června až srpna se v našich podmínkách vyskytuje 78 % erozně nejnebezpečnějších přívalových dešťů. Z výsledků našeho pozorování je patrné, že se v tomto období v podmínkách Českomoravské vrchoviny vyskytlo 91,6 % dešťů, které způsobily erozi. Z tohoto důvodu je v tomto období ochrana půdy nejdůležitější.

Tab. 28 Četnost výskytu erozních smyvů v jednotlivých měsících

Rok	Měsíc					Celkem
	V	VI	VII	VIII	IX	
2008	0	5	2	2	0	9
2009	0	1	3	1	0	5
2010	1	3	2	1	0	7
2011	0	4	3	2	1	10
2012	0	0	1	1	0	2
2013	1	0	1	1	0	3
Celkem	2	13	12	8	1	36
% výskytu	5,6	36,1	33,3	22,2	2,8	100,0

5.2.3 Analýza povrchově a erozně nebezpečných dešťů v jednotlivých letech

V následující části jsou podrobně popsány případy eroze půdy, které nastaly v jednotlivých letech, jelikož průměrné hodnoty za celé období dostatečně přesně nevyjadřují velikost povrchového odtoku a eroze na sledovaných stanovištích.

Při brzkém výskytu přívalových dešťů do poloviny června byl zjištěn větší povrchový odtok a eroze u širokořádkových plodin než u holé půdy. Příkladem je rok 2010, kdy z kukuřice odteklo celkově o 9,3 % více vody než z holé půdy a eroze byla dvojnásobná. V roce 2013 byly zjištěny o 30 % větší hodnoty odtoku a eroze u brambor. V případě kukuřice to může být způsobeno kombinací silně vyvinuté půdní krusty. U brambor vlivem půdní krusty a zvětšení povrchu půdy vlivem vytvořených hrůbků a soustředěním odtoku v meziřádcích.

Pokud se přívalové deště nevyskytnou v období května a června a širokořádkové plodiny vytvoří zapojený porost chránící půdu před dopadajícím deštěm, nestihne se vytvořit málo propustná půdní krusta. Příkladem jsou roky 2009 a 2011, kdy byly zaznamenány výrazně nižší odtoky a smyvů u širokořádkových plodin než u holé půdy.

Erozně a odtokově nebezpečné deště v roce 2008

V příloze č. 19 byly popsány jednotlivé případy srážek vyvolávajících erozi v roce 2008. Bylo zjištěno 20 případů srážek, které způsobily povrchový odtok, z čehož 9 dešťů bylo příčinou eroze. Eroze na parcelách osázených bramborami byla téměř dvojnásobná oproti holé půdě.

Ačkoliv byl rok 2008 za vegetační období srážkově průměrný (382,5 mm), docházelo zde k výrazným odtokům a smyvům půdy. Příčinou byla brzká formace málo propustné povrchové půdní krusty. V porovnání s holou půdou odteklo u brambor průměrně o 10 % méně vody, avšak o 28 % větší byla eroze. U kukuřice byl povrchový odtok nižší o 45 % a eroze o 18 %. U pšenice nebyl zaznamenán smyv půdy a povrchový odtok byl redukován o 88 %.

Erozně a odtokově nebezpečné deště v roce 2009

V roce 2009 bylo zaznamenáno 19 srážkových událostí vyvolávajících povrchový odtok, z čehož 5 bylo příčinou eroze (příloha č. 20). Největší smyv byl naměřen u holé půdy 11,5 t.ha⁻¹ a kukuřice 6,3 t.ha⁻¹, což bylo 55,1 % v poměru k holé půdě a povrchový odtok byl nižší o 10 %. U brambor a pšenice byla eroze nižší o 96 % respektive 98 % a povrchový odtok byl nižší o 59 % respektive 83 %.

Erozně a odtokově nebezpečné deště v roce 2010

Rok 2010 byl ve vegetačním období srážkově nadprůměrný s naměřenými 500,9 mm na stanovišti oproti třicetiletému průměru (1970 - 2000) 334,7 mm. Bylo zaznamenáno 20 případů srážek vyvolávajících povrchový odtok a 7 erozi (viz příloha č. 21).

U kukuřice byl erozní smyv větší o 105,2 % v porovnání s holou půdou a povrchový odtok byl větší o 9,3 %. U brambor byla eroze o 83 % menší ve srovnání s holou půdou a odtok o 68 %. Porost pšenice dokázal redukovat erozi o více než 99 % a odtok o 88 %.

Erozně a odtokově nebezpečné deště v roce 2011

V srážkově mírně nadprůměrném roce 2011 (376,4 mm) se vyskytlo 21 případů srážek, které vyvolaly povrchový odtok, z čehož 11 vyvolalo erozi (viz příloha č. 22). Po celou dobu pokusu se nepodařilo udržet holou půdu v bezplevelném stavu. Průměrná pokryvnost pleveli byla 16. 6. - 10 %, 14. 7. - 7 %, 28. 7. - 15 % a od 8. 8. trvale 5 %. I přes tento fakt byla nejvyšší eroze sledována u holé půdy, u kukuřice byla o 85 % nižší

a u brambor o 90 %. Celkový odtok byl oproti holé půdě u kukuřice o 50 % nižší a u brambor o 40 %. Přívalové deště se vyskytly 11. 6., 14. 6., 16. 6., 23. 6., 14. 7., 28. 7. a 6. 9.

Největší odtok a smyv půdy byl zaznamenán dne 6. 9. Napršelo 60,7 mm při přívalovém dešti. U holé půdy byl smyv 7krát vyšší než u kukuřice a brambor. U pšenice byl smyv $1,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, což byla nejvyšší hodnota za celé sledované období (2008-2013).

Erozně a odtokově nebezpečné deště v roce 2012

Rok 2012 byl ve vegetační sezóně srážkově podprůměrný s 283,0 mm. Celkem bylo zaznamenáno 18 dešťů vyvolávajících povrchový odtok z toho 2 vyvolávajících erozi (viz příloha č. 23). Celková eroze byla nejvyšší u holé půdy. Poměr odtoku k holé půdě byl u porostů kukuřice a pšenice srovnatelný, u brambor byl o třetinu nižší. Do hodnocení eroze není započítán přívalový déšť ze dne 4. 7. 2012 o úhrnu 58,8 mm a maximální intenzitě $2,9 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, který způsobil extrémní odtok, avšak erozní smyv nebyl odebrán. Proto nebyl v tomto roce zjištěn mezi variantami výrazný rozdíl mezi povrchovými odtoky a erozí.

Erozně a odtokově nebezpečné deště v roce 2013

V roce 2013 bylo zaznamenáno 23 případů dešťů vyvolávajících povrchový odtok, z čehož 3 způsobil erozi (viz příloha č. 24). U stanoviště s bramborami byl zjištěn téměř o 30 % větší odtok i eroze v porovnání s holou půdou. Při porovnání plochy s kukuřicí byl povrchový odtok nižší o 37 % a eroze o 90 % oproti holé půdě.

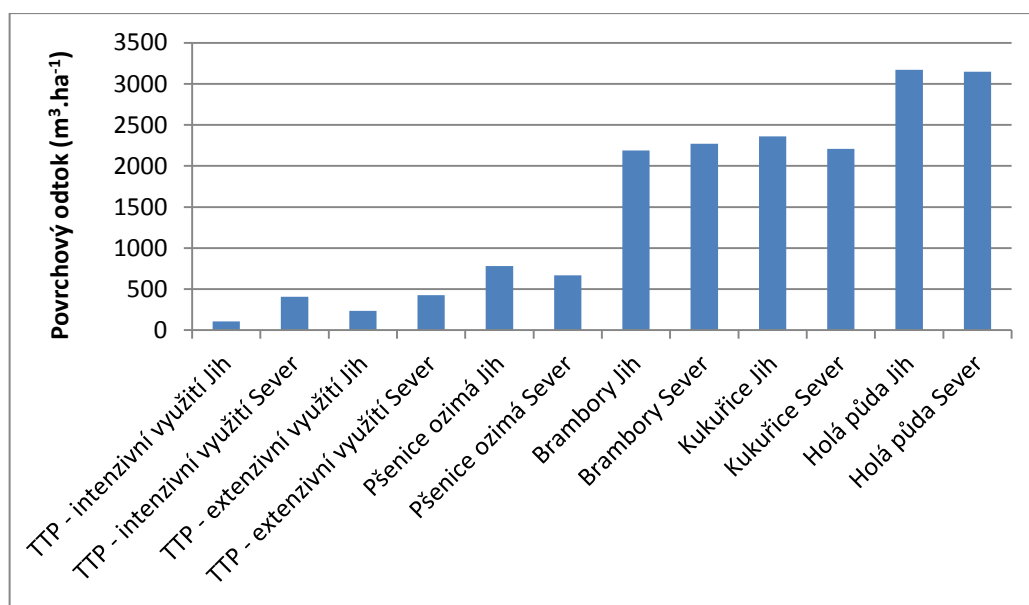
5.2.7 Vliv expozice svahu na povrchový odtok a erozi

Vliv expozice svahu na povrchový odtok u jednotlivých plodin je graficky znázorněn na obrázku č. 54. Největší rozdíly v povrchovém odtoku mezi severní a jižní expozicí byly zjištěny u TTP intenzivně obhospodařovaného o 286,3 %, dále u TTP extenzivního 81,7 % a u brambor 3,7 %. U pšenice ozimé byly odtoky na severní expozici nižší o 14,5 %, u kukuřice o 6,5 % a u holé půdy o 0,7 %. Vliv expozice na povrchový odtok byl

pravděpodobně ovlivněn převládajícím směrem větru při výskytu srážek, disipiačním účinkem plodin a vlhkostí půdy. Dále faktem, že při výskytu nejmohutnější srážek nestačila kapacita záchytných nádrží (160 l) zadržet všechn odtok u parcel s pšenící ozimou, bramborami, kukuřicí a holou půdou. Všechn odtok byl zachycen u obou TTP. U travních porostů docházelo k vyšším povrchovým odtokům na severní expozici pravděpodobně vlivem zastínění povrchu půdy porostem. Tím dochází k nižší evaporaci a vyšší vlhkosti půdy, která poté hůře přijímá vodu ze srážek.

Tab. 29 Vliv expozice na povrchový odtok ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) za sledované období 2008-2013

Plodina	Expozice	Suma	Poměr Sever/Jih (%)
TTP - intenzivní využití	Jih	105,2	286,3
	Sever	406,4	
TTP - extenzivní využití	Jih	235,3	81,7
	Sever	427,6	
Pšenice ozimá	Jih	782,4	-14,5
	Sever	669,2	
Brambory	Jih	2188,8	3,7
	Sever	2269,3	
Kukuřice	Jih	2359,6	-6,5
	Sever	2206,7	
Holá půda	Jih	3171,0	-0,7
	Sever	3148,7	

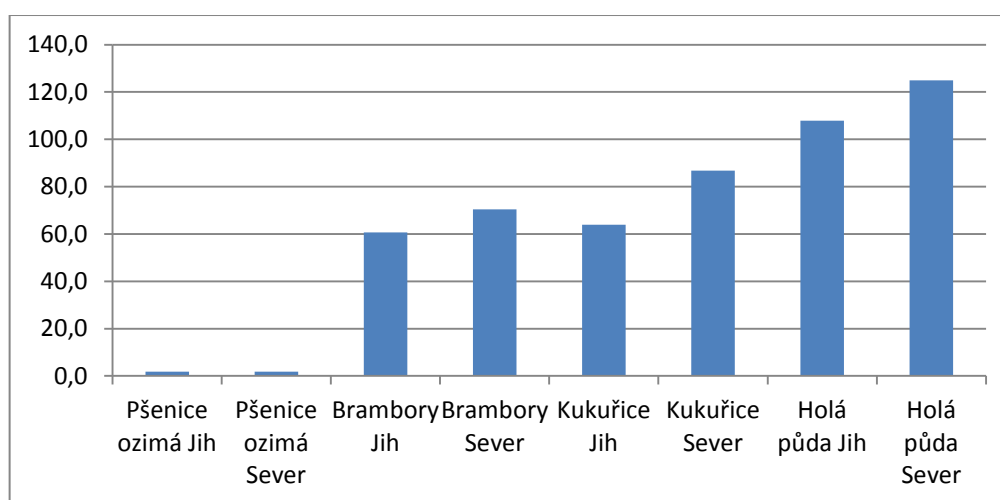


Obr. 54 Vliv expozice svahu na povrchový odtok u jednotlivých plodin

Vliv expozice svahu na smyv půdy u jednotlivých plodin za sledované období je graficky znázorněn na obrázku č. 55. Z naměřených hodnot smyvu ze severní a jižní expozice (tab. 30) vyplývá, že u pšenice ozimé byl celkový smyv na severní expozici vyšší o 4,2 %, u brambor o 16,1 %, u kukuřice 35,8 % a u holé půdy o 15,7 %. Vyšší hodnoty smyvu půdy u severní expozice mohou být dány větší vlhkostí půdy, čímž dochází k bobtnání koloidů a zmenšení průchodnosti vody makropóry. A také převládajícím směrem proudění větrů na daném stanovišti.

Tab. 30 Vliv expozice na smyv půdy ($t \cdot ha^{-1}$) za sledované období 2008-2013

Plodina	Pšenice ozimá		Brambory		Kukuřice		Holá půda	
	Jih	Sever	Jih	Sever	Jih	Sever	Jih	Sever
Smyv půdy ($t \cdot ha^{-1}$)	1,8	1,9	60,7	70,4	64,0	86,8	107,9	124,9
Poměr Sever/Jih (%)	4,2		16,1		35,8		15,7	



Obr. 55 Vliv expozice svahu na smyv půdy u jednotlivých plodin za sledované období

5.2.8 Vliv zemědělských plodin na povrchový odtok v zimním období

V zimním období (říjen až duben) byl největší odtok za sledované období (2008/2009-2013/2014) naměřen u varianty s pšenicí ozimou $95,0 m^3 \cdot ha^{-1}$, dále sestupně na kypré půdě po orbě $76,4 m^3 \cdot ha^{-1}$, na strništi po kukuřici $74,5 m^3 \cdot ha^{-1}$, na strništi po pšenici $64,4 m^3 \cdot ha^{-1}$, trvalém travním porostu intenzivním $48,8 m^3 \cdot ha^{-1}$ a extenzivním $39,9$

$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. V tabulce č. 31 jsou odtoky brány jako průměry ze severní a jižní expozice. Pro statistické zpracování byly naměřené odtoky z obou expozic zprůměrovány a vyhodnoceny analýzou rozptylu na hladině významnosti $p = 0,05$. Mezi sledovanými variantami nebyl zjištěn statisticky průkazný rozdíl (obr. 56). Na obrázku č. 57 jsou znázorněny povrchové odtoky naměřené v jednotlivých letech u hodnocených plodin v zimním období.

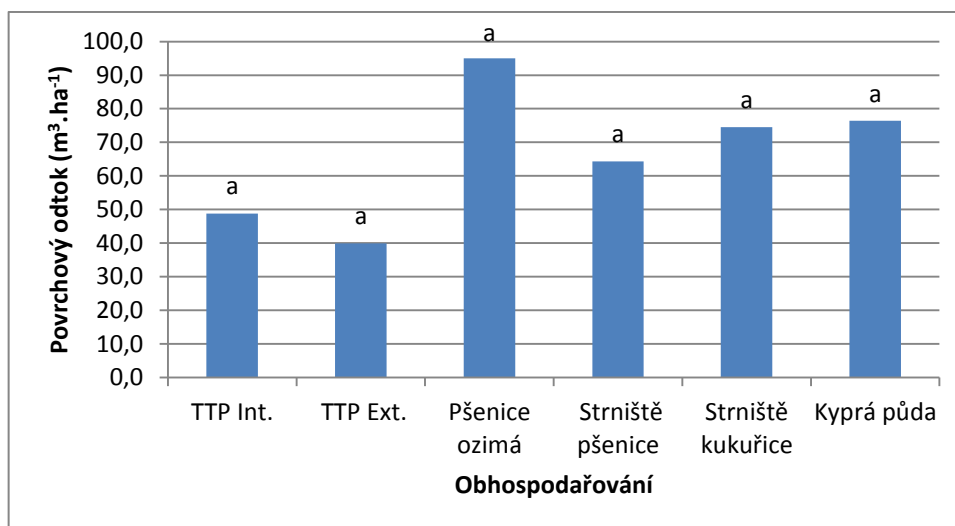
Hejduk a Kasprzak, (2010) ve svých pokusech v Brně-Kníničkách při porovnávání povrchového odtoku během deseti hodnocených zimních období zjistili, že díky tvorbě pedoglaciálního horizontu, který vzniká snadněji na půdách ulehých bez podzimního agrotechnického zásahu (víceleté pícniny, strniště apod.), byl povrchový odtok z víceletých pícnin průkazně vyšší (2,05krát) než z pšenice vyseté do zorané půdy. Ve zde popisovaných pokusech byl povrchový odtok u pšenice 2krát vyšší než u travních porostů. To může být způsobeno nedostatečnou hloubkou promrání půdy vlivem vyšší sněhové pokrývky a nižším promráním půdy než v Brně-Kníničkách. Nedošlo tak k tvorbě pedoglaciálního horizontu, ale k postupnému tání sněhové pokrývky vlivem povětrnostních podmínek a kladných teplot.

Tab. 31 Povrchový odtok ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) v zimním období (říjen-duben) průměr z obou expozic za sledované období 2008/2009-2013-2014

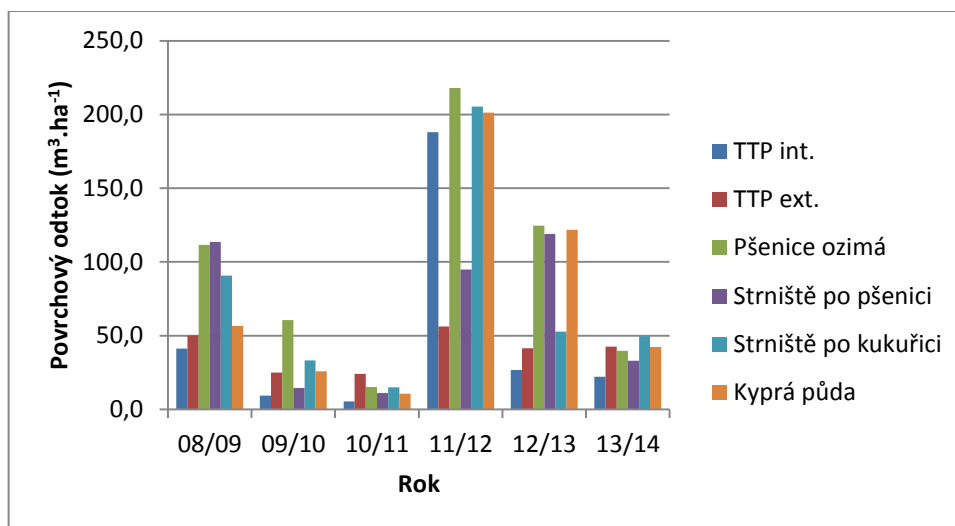
Rok	Srážky (říjen až duben) (mm)	Způsob obhospodařování					
		TTP Int.	TTP Ext.	Pšenice ozimá	Strniště pšenice	Strniště kukuřice	Kyprá půda
08/09	318,6	41,2	50,3	111,5	113,6	90,9	56,7
09/10	372,2	9,3	25,0	60,6	14,6	33,2	25,9
10/11	236,8	5,5	24,1	15,2	11,0	15,1	10,8
11/12	278,6	188,0	56,2	218,1	94,9	205,4	201,3
12/13	346,9	26,8	41,5	124,7	119,0	52,8	121,7
13/14	219,0	22,2	42,7	39,8	33,0	49,7	42,4
Průměr	295,4	48,8 a	39,9 a	95,0 a	64,4 a	74,5 a	76,4 a
Srovnání s holou půdou (%)		63,9	52,3	124,2	84,2	97,4	100,0
Odtokový součinitel		0,018	0,014	0,034	0,023	0,027	0,027

Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

Při výpočtu odtokového součinitele byl zohledněn výpar ze sněhové pokrývky za dané zimní období (tab. 32). Vzhledem k technické náročnosti měření výparu v terénu byl průměrný denní výpar stanoven dle měření uskutečněných Novákem (1995) v nížinných oblastech střední Evropy. Průměrný denní výpar činil $0,21 \text{ mm.den}^{-1}$.



Obr. 56 Vliv obhospodařování půdy na velikost povrchového odtoku v zimním období. Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)



Obr. 57 Porovnání velikosti povrchového odtoku u jednotlivých plodin za zimní období sledovaných let

5.2.9 Vybrané charakteristiky zimních období a vyhodnocení jednotlivých odtokových situací

Pro vyhodnocení velikosti povrchových odtoků v mimovegetačním období (říjen až duben) byly vyhodnoceny charakteristiky zimního období v tabulce č. 32. Část dat z měření promrznutí půdy v hloubce 10 cm v měsících lednu a únoru 2013 nebyla zachycena kvůli poruše měřicího čidla.

Tab. 32 Vybrané charakteristiky zimních období (2008/2009-2013/2014)

Datum vzniku a zániku sněhové pokrývky	Počet oblev (úplné rozpuštění sněhu)	Srážky říjen až duben (mm)	Max. výška sněhu (cm)	Počet dnů se sněhovou pokrývkou	Výpar ze sněhové pokrývky (mm)	Počet dnů s promrznutím půdy v 10 cm
18.11.2008 - 27.3.2009	10	318,6	33	100	21,0	75
15.10.2009 - 28.3.2010	4	372,2	38	101	21,2	62
24.11.2010 - 20.3.2011	5	236,8	41	76	16,0	64
18.12.2011 - 11.3.2012	6	278,6	26	72	15,1	46
27.10.2012 - 10.4.2013	5	346,9	24	97	20,4	54*
25.11.2013 - 10.2.2014	3	219,0	10	26	5,5	10
Průměr	5,5	295,4	28,7	70,5	16,5	51,8

*výpadek měření v lednu a únoru vlivem poruchy měřicího čidla

Z měření provedených v zimním období byly vybrány pro detailnější zpracování termíny, u kterých se alespoň na jednom stanovišti vyskytl odtok větší než $20 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (2 mm) (tab. 33). Dne 7. 2. 2009, 5. 3. 2009, 6. 3. 2009 a 26. 2. 2012 nastal povrchový odtok denního tání sněhu vlivem dílčích oblev na promrzlé půdě a v případě 4. 1. 2010, 28. 2. 2012 a 27. 2. 2013 i v kombinaci se srážkami. Statistické vyhodnocení těchto případů bylo provedeno analýzou variance s následným testováním dle Tukeye ($p < 0,05$). Závislou proměnou byl objem odtoků včetně expozic, které byly brány jako opakování. Nezávisle proměnou byl způsob obhospodařování parcely. Mezi variantami nebyl zjištěn průkazný rozdíl.

Tab. 33 Povrchový odtok ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) v jednotlivých dnech (průměr obou expozií) a teplota půdy v hloubce 10 cm v době tvorby odtoku

Datum	Srážky	TTP Int.	TTP Ext.	Pšenice ozimá	Strniště pšenice	Strniště kukuřice	Kyprá půda	Teplota půdy v 10 cm ($^{\circ}\text{C}$)
7.2.2009	0,0	17,7	8,8	35,5	11,3	45,0	21,0	-0,6
5.3.2009	0,0	0,1	0,1	26,8	20,8	2,3	0,1	-0,5
6.3.2009	0,0	0,1	1,4	14,6	3,4	4,8	0,1	-0,5
4.1.2010	8,0	0,3	1,4	31,5	2,0	25,8	5,0	-0,1
26.2.2012	0,0	137,5	6,0	140,0	55,0	127,5	145,0	-0,7
28.2.2012	10,9	35,0	25,0	37,5	7,5	57,5	32,5	-0,6
27.2.2013	25,5	0,2	0,0	81,8	44,8	2,4	81,8	-0,4
Průměr*		27,2a	6,1a	52,7a	20,7a	37,9a	40,8a	

*Rozdílná písmena v řádku označují statisticky průkazný rozdíl ($p < 0,05$)

Největší odtoky byly naměřeny 26. 2. 2012, kdy po nízkých teplotách vzduchu (21. 2. byla naměřena minimální teplota $-15,6^{\circ}\text{C}$) došlo během 7 dnů k rozpuštění 13 cm sněhové pokrývky na zamrzlé půdě (tab. 34). Teplota půdy byla zaznamenána teplotním čidlem v hloubkách 10 cm a 20 cm (viz příloha č. 18). Naměřené odtoky jsou zaznamenány v tabulce č. 35, kde jsou patrné srovnatelné odtoky u všech variant s výjimkou extenzivního TP.

U TP extenzivního byl zaznamenán odtok ve srovnání s ostatními variantami průměrně 20krát nižší. Extenzivně obhospodařované travní porosty vytváří díky drnové vrstvě izolační vrstvu na půdě, která pomalu promrzá a při oblevě naopak pomalu taje. Zde byla perioda mrazů příliš krátká na to, aby půda promrzla pod travní biomasou, zatímco oraná půda bez vegetace promrzla více a stačil se zde vytvořit zledovatělý málo propustný horizont. TTP extenzivní byl na zimu ponechán neposečený, proto zde byla zřejmě větší aktivita makroedafonu, protože měl úkryt a dostatek potravy na povrchu a půda byla více prokypřena chodbičkami žížal.

Dle Hejduka a Kasprzaka (2003) platí, že čím je zima chladnější a delší a čím je absence mechanické kultivace půdy dlouhodobější, tím jsou odtokové ztráty větší a zásoba půdní vláhy menší. Výjimku tvoří extenzivně využívané travní porosty

(nekosené nebo 1krát ročně kosené) vlivem příznivého mikroklimatu pro rozvoj edafonu a absence pojezdů mechanizace.

Tab. 34 Vybrané meteorologické charakteristiky předcházející povrchovému odtoku 26. 2. 2012 a 28. 2. 2012

Datum	Max. teplota vzduchu (°C)	Min. teplota vzduchu (°C)	Srážky (mm)	Výška sněhové pokrývky (cm)	Teplota půdy v hloubce 10 cm (°C)	Teplota půdy v hloubce 20 cm (°C)
20.2.2012	0,5	-9,4		13 cm	-0,76	-0,49
21.2.2012	2,2	-16,2			-0,72	-0,46
22.2.2012	3,7	-3,7			-0,72	-0,45
23.2.2012	3,2	-3,5	1,6 sněhové	8 cm	-0,69	-0,43
24.2.2012	5,7	2,1			-0,68	-0,41
25.2.2012	5,7	2,7	2,8 smíšené		-0,67	-0,41
26.2.2012	2,6	-2,3		zbytky sněhu	-0,66	-0,40
27.2.2012	0,9	-6,3	1,7 sněhové	2 cm	-0,64	-0,39
28.2.2012	4,1	-1,1	10,9	zbytky sněhu	-0,64	-0,38

Tab. 35 Povrchový odtok naměřený 26. 2. 2012 u jednotlivých variant

Varianta	Expozice	Odtok (m ³ .ha ⁻¹)
TTP Int.	Jih	125,0
	Sever	150,0
TTP Ext.	Jih	5,0
	Sever	7,0
Pšenice ozimá	Jih	165,0
	Sever	115,0
Strniště pšenice	Jih	90,0
	Sever	20,0
Strniště kukuřice	Jih	95,0
	Sever	160,0
Kyprá půda	Jih	130,0
	Sever	160,0

O dva dny později 28. 2. 2012 došlo k dešti s úhrnem 10,9 m na promrzlou půdu. Nejnižší odtok byl zaznamenán u strniště pšenice. Příčinou mohla být existence

preferenčních cest umožňujících rychlejší zasakování vody při tvorbě povrchového odtoku.

Vyšší hodnoty povrchového odtoku u travních porostů oproti strništi kukuřice a pšenice lze vysvětlit tím, že sníh na travních porostech taje rychleji (v případě, že je půda pod drnem promrzlá). To je dáno zavěšením sněhové pokrývky na porostu, což vede k přístupu tepla i zesponu, zatímco na ostatních variantách taje sníh pouze shora. Tento jev je patrný na obrázku č. 58, kde je vidět půda po kukuřici se sněhovou pokrývkou a v pozadí plocha s travními porosty bez ní.

Vyšší odtoky u severních expozic mohly být způsobeny větším promrznutím půdy vlivem nižší insolace. Nižší insolace na severní expozici způsobuje v půdě rychlejší a hlubší promrzání a pomalejší rozmrzání. Půda je poté náchylnější k tvorbě povrchových odtoků po delší dobu. Na straně druhé vyšší sněhová pokrývky chrání půdu před promrzáním povrchových vrstev. Větší odtoky ze severní expozice nenastaly u všech variant v tomto konkrétním případě ani z dlouhodobého hlediska (tab. 36), proto z nich nelze vytvořit jednoznačné závěry.

Obecně platí, že největší odtoky v zimě nastávají při dílčích oblevách sněhové pokrývky v kombinaci s dešti při vytvořené kryogenní půdní kůře, která snižuje rychlosti infiltrace vlivem blokace půdních pórů ledem.

Kasprzak (1982) uvádí, že velikost povrchového odtoku v zimním období spočívá v rozdílných podmínkách vzniku a kvalitě kryogenní půdní vrstvy, která výrazně snižuje vsak vody ze zimních srážek. Velký vliv na povrchový odtok může mít také členitost agroreliefu. Na oraništích středně těžkých a těžkých půd může dosáhnout retence vody až 40 mm, po ozimých obilovinách 4-11 mm a na louce pouze 2 mm.

Hejduk a Kasprzak (2010) a Kasprzak (1990) na pokusech prováděných v Kníničkách dále zjistili, že pokud jsou srážkové i teplotní podmínky v průběhu zimy příznivé pro vývoj zledovatělé půdní vrstvy, může se stát půda pro vodu zcela nepropustnou, bez ohledu na to byla-li půda agrotechnicky upravená nebo neupravená. Součinitel povrchového odtoku pak dosahuje hodnot blízkých 1,0. Na druhé straně promrzlá půda bez vyvinuté zledovatělé půdní vrstvy je pro vodu dobře propustná (Hejduk a Kasprzak, 2004).

Tyto situace, jak je patrné i z velikosti odtoků 26. 2. 2012, mohou vytvářet náhle povodně v období tání sněhu a z hlediska zemědělského dochází k ochuzování zásob půdní vláhy pro následující vegetační období.

Vysoké odtoky mohou rovněž vznikat při výskytu deště s podchlazenými kapkami, které po nárazu na povrch půdy vytvoří tenkou vrstvu ledu. Dle Hejduka (2000) poté vzniká nepropustná ledovka, po které srážková voda povrchově odtéká a může se stát příčinou rozsáhlých povodní (leden, 2000).

5.2.10 Vliv expozice svahu na povrchový odtok v zimním období

Při porovnání povrchového odtoku ze severní a jižní expozice (tab. 36) byl zjištěn vyšší odtok na severní expozici u TTP intenzivního o 102,4 %, extenzivního o 70,8 % u pšenice ozimé o 38,7 % a kypré půdy o 27,9 %. U strniště po pšenici a kukuřici byly hodnoty odtoku ze severní strany nižší o 54,5 % a 16,8 %. Důvod nižšího odtoku na severní expozici strniště pšenice a kukuřice byl pravděpodobně způsoben náhodnými faktory při úpravě políček (myší dírou, prasklinou, případně jiným únikem odtoku). Z výsledků vlivu expozice na tvorbu povrchového odtoku je však patrné, že tyto rozdíly nebyly zjišťovány dlouhodobě a u všech variant, a proto z nich nelze učinit jednoznačné závěry.

Na obrázku č. 58 je patrná pomalejší rychlost tání sněhu zaznamenaná dne 22. 2. 2011 na severní expozici vlivem nižší insolace.

Tab. 36 Porovnání celkového povrchového odtoku ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) podle expozice v zimním období 2008-2013

Plodina	Expozice	Suma ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	Poměr Sever/Jih (%)
TTP intenzivní	Jih	193,8	102,4
	Sever	392,2	
TTP extenzivní	Jih	177,0	70,8
	Sever	302,4	
Pšenice ozimá	Jih	477,5	38,7
	Sever	662,3	
Strniště pšenice	Jih	531,0	-54,5
	Sever	241,4	
Strniště kukuřice	Jih	487,9	-16,8
	Sever	406,0	
Kyprá půda	Jih	402,6	27,9
	Sever	514,8	



Obr. 58 Vliv expozice na rychlost tání sněhu (vlevo severní, vpravo jižní) – od nejbližší varianty: kyprá půda, strniště kukuřice, pšenice ozimá – foto autor (22. 2. 2011)

5.3 Vliv rozdílného obhospodařování půdy na rychlost postupu přerónové vlny a počátek povrchového odtoku

V tabulce č. 37 je uvedena průměrná doba postupu čela přerónové vlny při dosažení uvedené vzdálenosti od rozvodnice. Nejrychlejší postup přerónové vlny byl zaznamenán na parcele s kukuřicí a holou půdou u všech vzdáleností. Povrchový odtok po dosažení vzdálenosti přerónové vlny 4 metry nastal velmi rychle, v průměru po 23 respektive 26 sekundách.

Varianta se strništěm po pšenici vykazovala 6krát pomalejší rychlost postupu čela zvlhčení oproti kukuřici a holé půdě. Odtok zde nastal v průměru po 2 minutách a 46 sekundách. Příčinou zpomalení postupu povrchového odtoku byly posklizňové zbytky pšenice a výskyt plevelů, s pokryvností 30 % na dané ploše.

Trvalý travní porost intenzivní vykazoval největší míru zpomalení čela zvlhčení. Průkazně větší zpomalení postupu přerónové vlny oproti všem variantám bylo zjištěno po prvním a čtvrtém metru od rozvodnice. U druhého a třetího metru byl průkazný rozdíl od stanoviště s holou půdou a kukuřicí.

TTP zpomalil postup čela zvlhčení po 4 metrech vůči zaplevelenému strništi pšenice 2,5krát a v porovnání s holou půdou a kukuřicí 17krát respektive 19krát. Od okamžiku zahájení měření došlo k povrchovému odtoku v průměru až po 7 minutách a 27 sekundách (obr. 59).

Rychlost infiltrace u TTP byla v první minutě $38,8 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$; v desáté minutě $10,9 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a v třicáté minutě $6,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. V desáté minutě byl zjištěn průkazný rozdíl oproti všem variantám a v třicáté minutě pouze vůči holé půdě. Avšak ve všech časech měření byla zjištěna téměř dvojnásobná infiltrační rychlost u TTP oproti ostatním variantám.

Rychlost infiltrace na plochách s kukuřicí a holou půdou byla nejnižší v 1. minutě měření. V 10. a 30. minutě byla rychlost infiltrace nejnižší u holé půdy ($3,3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ respektive $1,4 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$), u porostu s kukuřicí byla srovnatelná se strništěm po pšenici ($5,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ respektive $2,6 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). Výsledky byly dány přítomností vyvinuté půdní krusty, která snižovala infiltraci a zvyšovala podíl povrchově odtékající vody v těchto případech i ke konci vegetačního období.

Z obrázku č. 60 je patrné grafické srovnání průběhu infiltrace na jednotlivých variantách. Na stanovišti holé půdy byl průběh křivky s patrným výrazným poklesem v čase oproti ostatním variantám. To může být způsobeno zasakující suspenzí jemných částic půdy při formování půdní krusty, která ucpává půdní póry a snižuje rychlost infiltrace.

Kasprzak (1990) zjistil, že nejmenší infiltrační schopností se vyznačují holé rovinné půdy s kůrou vzniklou po intenzivních deštích, kdy naměřil rychlost infiltrace ve 30. minutě $0,04 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Kasprzak (1969) ve svých infiltračních pokusech zjistil, že vsakovací schopnost holé půdy po vytvoření půdního škraloupu je v průměru 10krát menší než jakou má povrch půdy se vzrostlým travním nebo obilným porostem.

Tab. 37 Doba postupu čela přerovné vlny (s) u jednotlivých variant (průměr ze tří měření)

Varianta	Průměrný přítok (l.s ⁻¹)	Doba postupu čela přerovné vlny (s) potřebná k dosažení vzdálenosti od rozvodnice (m)			
		1 m	2 m	3 m	4 m
Holá půda	0,449	6 a	13 a	20 a	26 a
Strniště pšenice	0,406	13 a	31 ab	77 ab	166 a
Kukuřice	0,417	5 a	10 a	15 a	23 a
TTP intenzivní	0,422	29 b	111 b	245 b	447 b

Hodnoty charakterizované různými písmeny ve sloupci vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)

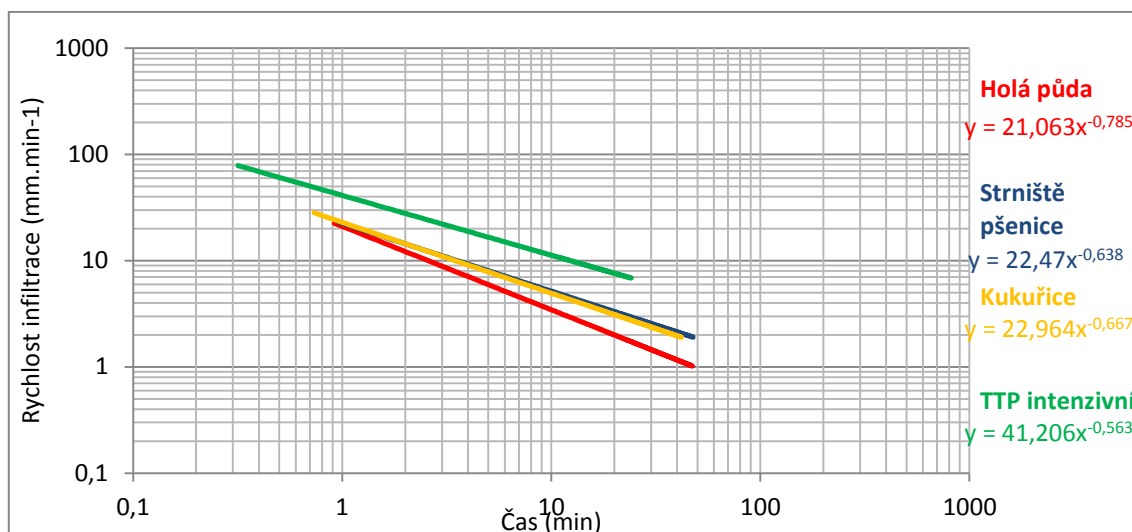


Obr. 59 Počátek povrchového odtoku z varianty s TTP (vlevo) a ukončení měření na variantě s holou půdou (vpravo)

Tab. 38 Průměrná rychlost infiltrace (mm.min⁻¹) u jednotlivých variant

Varianta	Rychlost infiltrace v čase měření (min.)		
	1.	10.	30.
Holá půda	19,8 a	3,3 a	1,4 a
Strniště pšenice	20,0 a	5,0 a	2,6 ab
Kukuřice	19,9 a	4,9 a	2,6 ab
TTP intenzivní	38,8 a	10,9 b	6,0 b

Různá písmena ve sloupci vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)



Obr. 60 Průběh infiltrace u jednotlivých variant – průměr z opakování

Z dat uvedených v tabulce č. 39 vyplývá, že holá půda vykazuje podobné fyzikální vlastnosti jako půda pod kukuřicí a průkazně se neliší ani u jedné ze sledovaných hodnot. I přesto, že strniště pšenice a TTP vykazují nejvyšší hodnoty objemové hmotnosti a nejnižší hodnoty pórovitosti, byla zde zjištěna nejvyšší infiltrační rychlost. Hlavní příčinou je přítomnost makropórů nepřerušovaných kultivací, které jsou schopny rychle odvádět povrchově stékající vodu do hloubky.

Dobrý strukturální stav všech hodnocených variant byl dán absencí zhutnění v důsledku pojezdů mechanizačních prostředků a u variant holé půdy, strniště pšenice a kukuřice vlivem pravidelného organického hnojení statkovými hnojivy 1krát za 4 roky (chlévkového hnoje v dávce 40 t.ha⁻¹). U strniště pšenice a TTP byl zjištěn průkazně vyšší hodnoty retenční vodní kapacity a vlhkosti ve srovnání s ostatními variantami.

Tab. 39 Hodnoty vybraných fyzikálních vlastností půdy u jednotlivých variant v hloubce 0-50 mm

Varianta	ρ_d (g.cm ⁻³)	Vlhkost (%)	Pórovitost (%)	RVK (%)	MVK (%)
Holá půda	1,237 a	17,3 a	53,0 a	21,4 a	25,0 bc
Strniště pšenice	1,291 a	23,1 b	50,9 a	26,0 b	18,7 ab
Kukuřice	1,197 a	17,6 a	54,5 a	21,7 a	26,0 c
TTP intenzivní	1,315 a	28,9 c	50,0 a	30,8 c	12,4 a

Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$) Legenda: ρ_d - objemová hmotnost suché zeminy; Vlhkost – objemová; RVK – retenční vodní kapacita; MVK – minimální vzdušná kapacita.

Z výsledků pokusu, který měl za úkol hodnotit rozdíly v rychlosti postupu přeronové vlny je zřejmé, že TTP výrazně zvyšuje drsnost povrchu půdy, což zpomaluje povrchový odtok a prodlužuje dobu infiltrace. TTP svým celoročním pokryvem chrání povrch půdy před vznikem půdní krusty, která u ostatních variant zvyšuje rychlost postupu čela zvlhčení a to i na konci vegetačního období.

Z rozboru fyzikálních vlastností půdy mezi jednotlivými variantami vyplývá větší ulehlost a vlhkost půdy pod TTP a vyšší hodnoty retenční vodní kapacity, tedy objemu kapilárních pórů. I přesto zde bylo zjištěno největší zpomalování postupu přeronové vlny způsobené absencí kultivačních zásahů u TTP přispívající k vysokému podílu makropórů, které jsou schopny výrazně zrychlit infiltraci povrchově stékající vody.

Významnou roli v rychlosti postupu přeronové vlny hraje způsob obhospodařování TP. Jak vyplývá z výsledků předchozích pokusů, na pozemcích velkovýrobně obhospodařovaných TP dochází vlivem zhutnění a narušení makropórů k výraznému zpomalení rychlosti infiltrace a tím urychlení postupu přeronové vlny. Jako nejvhodnější způsob obhospodařování TP z hlediska návrhu ochranných zasakovacích pásů vod se jeví ruční sečení.

Hejduk a Kasprzak (2005) v příspěvku k návrhu šířky ochranných zatravněných pásů srovnávali rychlost postupu přeronové vlny v Brně – Kníničkách na jednosečném travním porostu, čtyřsečném travním porostu a kypré holé půdě. Při přítoku $1,10 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ došlo na holé orné půdě k povrchovému odtoku na vzdálenost 4,0 m po 38-45 sekundách, zatímco na jednosečném porostu dosáhlo čelo zvlhčení maximální vzdálenosti 3,5 m po 55 až 1 hodině a 5 minutách. U čtyřsečného porostu došlo k odtoku do záchytného žlábků (4,0 m od rozvodnice) po 5,5 až 18,0 minutách do začátku přítoku. Při tomto pokuse zjistili, že omezení frekvence kosení travních porostů vede k průkaznému zvýšení infiltrační rychlosti a snížení rychlosti povrchového proudění vody. Prostředí pod TP je příznivé pro rozvoj a činnost edafonu a drobných savců, kteří významně přispívají ke zvyšování propustnosti stanovišť s infiltračními pásy.

6 ZÁVĚRY

Z výsledků prvního pokusu, zabývajícího se vlivem různého obhospodařování travních porostů na hydrologické charakteristiky půd, je patrný průkazný vliv obhospodařování na infiltrační rychlost, fyzikální vlastnosti půdy a nasycenou hydraulickou vodivost.

Při porovnání rychlosti infiltrace s variantou bez vlivu zhutnění – pod oplocením ($34,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) byla zjištěna u intenzivně sešlapávané pastviny nižší infiltrační rychlost o 79,3 % ($7,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) a u velkovýrobně obhospodařovaného lučního porostu o 63,6 % ($12,6 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$).

Rozhodujícím faktorem určujícím propustnost půdy pro vodu byla změna fyzikálních vlastností půdy, tedy objemové hmotnosti suché zeminy a pórovitosti. U kontrolní varianty byla zjištěna objemová hmotnost $1,17 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a pórovitost 55,6 %.

Vlivem sešlapávání porostu pastvin paznehty skotu došlo ke zvýšení objemové hmotnosti o 34,2 % a snížení pórovitosti o 27,7 %. Vysoké zatížení pastviny dané blízkostí zimního ustájení zapříčinilo překročení limitních hodnot fyzikálních vlastností půdy.

U lučních porostů vlivem pojezdů zemědělské techniky byl zjištěn nárůst objemové hmotnosti o 21,4 % a pokles pórovitosti o 17,4 % oproti nezhutněné půdě pod dráty.

Mezi objemovou hmotností a infiltrační rychlostí byla zjištěna negativní závislost $r = -0,696$ a mezi pórovitostí a infiltrační rychlostí byla závislost pozitivní $r = 0,710$.

Objem nekapilárních pórů byl u nesešlapávané varianty 21,1 %, u louky byl průkazně nižší o 27 % a u pastviny průkazně o 52 %. Retenční vodní kapacita byla u kontrolní varianty 34,4 %, u obou využívaných porostů byly průkazně nižší kapilární póry o 12 % (louka) respektive 13 % (pastvina).

Vyhodnocení vlivu obhospodařování na nasycenou hydraulickou vodivost prokázalo ($p \leq 0,05$) její 6násobné respektive 23násobné snížení u mechanizací obhospodařované louky a nadměrně sešlapávané pastviny v porovnání s variantou bez vlivu zhutnění.

Vysokým zatížením pastvin a při velkovýrobním obhospodařování luk dochází k narušení vlastností půdy, které snižují její schopnost přijímat a zadržovat vodu. Následkem může být výskyt povrchových odtoků z travních porostů, které omezují

množství dostupné vody v půdě a tvorbu zásob vod podzemních, zhoršují kvalitu vod povrchových a mohou zvyšovat riziko vzniku povodňových situací.

Na odtokoměrných plochách ve Vatíně byl zkoumán vliv obhospodařování půdy na velikost povrchového odtoku vody ze srážek. Nejvyšší povrchové odtoky za sledované vegetační období (2008-2013) byly naměřeny z holé půdy (13,8 % srážkové vody), z kukuřice (9,9 %) a brambor (9,7 %). Nejnížší odtoky byly zjištěny u pšenice ozimé (3 % ze srážkové vody) a travních porostů (1,3 %). Bylo zjištěno, že na velikost povrchového odtoku mají zásadní vliv termín výskytu (míra zapojení porostu) a intenzita a doba trvání deště, vegetační pokryv a půdní podmínky (vlhkost a přítomnost půdní krusty).

Při rozboru jednotlivých situací, které způsobují povrchových odtok z přívalového deště, byly zjištěny mnohem vyšší hodnoty odtoků, než je tomu při hodnocení průměrů za celé období. Rozdíly mezi jednotlivými plodinami se výrazně zvyšovaly a docházelo k odtoku až 60 % srážkové vody. Následkem výskytu přívalových dešťů se u širokořádkových plodin zvyšuje riziko ochuzování rostlin o dostupnou vláhu, vznik náhlých povodní a znečišťování vod transportem sedimentů a agrochemikálií.

Přívalové deště způsobily erozi ve vegetačním období v 36 případech. U holé půdy a širokořádkových plodin dlouhodobá ztráta půdy erozí překročila hodnoty přípustné ztráty půdy ($4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) ve 3 letech. Pokud bychom brali v úvahu přípustnou mez pro ochranu jakosti vod ($1,25 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$) byly by hodnoty překročeny v 5 letech.

Se ztrátou půdy dochází k transportu pesticidů. Po aplikaci preemergentního herbicidu do kukuřice byl v červnu v rozmezí 9 dnů (od 14. 6. 2011 do 23. 6. 2011) 3krát zaznamenán přívalový déšť. Celkem byly za toto období překročeny normy stanovující maximální koncentraci škodlivých látek v povrchových vodách 1 135krát u Terbuthylazinu a 314krát u S-metolachloru.

V mimovegetačním období nebyl zjištěn průkazný rozdíl ve velikosti povrchového odtoku mezi jednotlivými variantami. V tomto období je velikost odtoku závislá zejména na vlhkosti půdy a době a hloubce jejího promrznutí. Čím je půda vlhčí a déle promrzlá tím dochází větší tvorbě nepropustného ledového horizontu. V případě lokality Vatín nedocházelo k dlouhodobému a intenzivnímu promrznutí půdy vlivem vyšší sněhové pokrývky, která působila jako izolační vrstva půdy.

Největší odtok byl zaznamenán 26. 2. 2012 po intenzivním roztání 13 cm sněhu na promrzlé půdě. U všech variant s výjimkou TTP extenzivního byly zaznamenány

nadměrné odtoky způsobené výskytem málo propustného pedoglačiálního horizontu. Nevětší odtoky byly naměřeny u kypré půdy $145 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; pšenice ozimě $140 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; TTP intenzivního $137,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$; strniště kukuřice $127,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ a strniště pšenice $55 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Zatímco u extenzivního TTP odteklo $6,0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ tedy v průměru 20krát méně než u ostatních variant. Rozhodujícím faktorem byl vegetační pokryv extenzivního travního porostu. Travní biomasa společně s vrstvou sněhu tvořila silnější izolační vrstvu půdy než u ostatních variant. Nedošlo tak k promrznutí půdy a snížení její propustnosti, ale k pozvolnému vsakování tající vody. Extenzivní obhospodařování TTP vlivem příznivého mikroklimatu, vhodných podmínek pro rozvoj edafonu a absence pojezdů mechanizace příznivě působí na zásoby půdní vláhly a retenční schopnost půdy.

Z pokusu hodnotícího vliv rozdílného obhospodařování půdy na rychlost postupu přeronové vlny je patrné, že TTP průkazně zpomalují rychlost postupu čela zvlhčení. Po čtyřech metrech byla přeronová vlna vytvořená z průměrného přítoku $0,423 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ ($25,4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) u TTP zpomalena ve srovnání s kukuřicí 19krát, holou půdou 17krát a strništěm pšenice 2,5krát. Doba, za kterou čelo zvlhčení překonalo vzdálenost 4 000 mm, byla u TTP 7 minut a 27 sekund, u strniště pšenice 2 minuty a 46 sekund, u kukuřice a holé půdy 23 respektive 26 sekund. Infiltrační rychlost v první, desáté a třicáté minutě měření byla u TTP v průměru 2krát vyšší než u variant strniště pšenice a kukuřice. V desáté minutě byla infiltrace rychlejší u TTP v porovnání s holou půdou 3krát a ve třicáté minutě 4krát.

Travní porosty permanentním pokryvem zvyšují drsnost povrchu půdy, chrání povrch půdy před vznikem půdní krusty, erozí půdy a vytváří ideální prostředí příznivé pro rozvoj a činnost edafonu, který má příznivý vliv na obsah makropórů a urychlování infiltrace.

7 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM

Navazujícím výzkumem by v budoucnu mohlo být ověření dostupných regeneračních opatření proti zhutnění půdy a schopnosti přirozené regenerace u nadměrně zatěžovaných travních porostů.

Výzkum jednoduchých systémů vizuálního hodnocení hydrofyzikálních vlastností půdy pod travními porosty, případně ověření funkčnosti a etablování již existujících zahraničních systémů pro podmínky České republiky.

Výzkum interakčního vztahu mezi srážkoodtokovými poměry a travními porosty, případně dalšími zemědělskými plodinami, při kritických meteorologických situacích během roku s přihlédnutím k probíhající klimatické změně.

Výzkum vlivu obhospodařování travních porostů na kvalitu odtokových a průsakových vod.

8 PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

- Alfieri L., Feyen L., Dottori F., Bianchi A., 2015: Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios, *Global Environmental Change*, Volume 35, Pages 199-212, ISSN 0959-3780,
Dostupné na: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378015300406>
- Adams W. A., Gibbs R. J., 2004: *Natural Turf for Sport and Amenity: Science and Practice*. CAB International, Cambridge, 3rd edition, 404 p., ISBN 0 85198 720 6.
- ASTM D5093 02, 2008: Standard Test Method for Field Measurement of Infiltration Rate Using Double-Ring Infiltrometer with Sealed-Inner Ring.
- Barnes R. F., Nelson J., Moore K. J., Collins M., 2007: *Forages: The Science of Grassland Agriculture, 6th Edition*, ISBN: 978-0-8138-0232-9.
- Billota G. S., Brazier R. E., Haygarth P. M., 2007: The Impacts of Grazing Animals on the Quality of Soils, Vegetation, and Surface Waters in Intensively Managed Grasslands. *Advances in Agronomy*, 94: 237-280.
- Braun B., Kasprzak K., Kolář I., 1996: The effect of alfalfa stand on surface runoff and water erosion. *Rostlinná výroba*, 42: 375-379.
- Bačák J., 2011: Problematika utužení a zhutnění půd technikou v rostlinné výrobě. Mendelova univerzita v Brně. Diplomová práce, 75 stran.
- Baker S. W., 1991: *Compaction: a problem of wear and tear*. Turf Management, pp. 11-13.
- Brázdil R., 2002: Meteorologické extrémy a povodně v České republice - přirozený trend nebo následek globálního oteplování? *Geografie - Sborník České geografické společnosti*, Praha: Česká geografická společnost, 2002, roč. 107, č. 4, s. 349-370. ISSN 1212-0014.
- Brázdil R., Trnka M., Dobrovolný P., Chromá K., Hlavinka P., Žalud Z., 2008: Variability of droughts in the Czech Republic, 1881 – 2006. *Theoretical and Applied Climatology*, 97: 297-315
- Carlsson G., Huss-Danell K., 2003: Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field. *Plant and Soil*, 253: 353-372.
- ČHMÚ, 2015: Odtok ze suché krajiny. Český hydrometeorologický ústav. Publikováno 18. 09. 2015. Citováno dne: 10. 12. 2015. Dostupné na:
http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/ruzne/Odtok_na_sucho_1508_5d.pdf.

- ČSÚ, 2016: *Soupis hospodářských zvířat - k 1. 4. 2016*. Český statistický úřad. Citováno dne 30. 7. 2016. Dostupné na: <https://www.czso.cz>.
- ČÚZK, 2016: Souhrnné přehledy o půdním fondu z údajů katastru nemovitostí České republiky. Český úřad zeměměřický a katastrální. Praha 2016. Citováno dne 30. 7. 2016. Dostupné na: <http://www.cuzk.cz>.
- Decagon Devices, Inc., 2005: Minidisk infiltrometer, User's manual.
- Deutsch O., 2011: Onemocnění způsobované E. coli. Dostupné na: www.bezpecnostpotravin.cz/escherichia-coli-o157-h7.aspx. Citováno dne 12. 6. 2015.
- Di H. J., Cameron K. C., Milne J., Drewry J. J., Smith N. P., Hendry T., Moore S., Reijnen B., 2010: A mechanical hoof for simulating animal treading under controlled conditions. *New Zealand journal of agricultural research*, 44:1, 111-116.
- Douglas J. T., 1994: Responses of perennial forage crops to soil compaction. *Soil compaction in crop production*. pp. 343-364. London: Elsevier Science BV.
- Drewry J. J., Paton R. J., 2001: Effects of cattle treading and natural amelioration on soil physical properties and pasture under dairy farming in Southland, New Zealand. *New Zealand journal of agriculture research*. 43:3, 377-386.
- Dufková J., Toman F., 2004: *Soil erosion in climate change conditions* (Eroze půdy v podmínkách klimatické změny). In *mezinárodní vědecká konference Extrémny počasí a podnebí*. Brno: Brno ČHMÚ.
- Duiker S. W., 2004: Effects of soil compaction. The Pennsylvania State Univ., University Park.
- Dunne T., Black R. D., 1971: Runoff processes during snowmelt. *Water resources research*, 7: 1160-1172.
- Donkor N. T., Gedir J. V., Hudson R. J., Bork E. W., Chanasyk D. S., Naeth M. A., 2002: Impacts of Grazing Systems on Soil Compaction and Pasture production in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science* 82: 1-8.
- Evans R., 1997: Soil erosion in the UK initiated by grazing animals: a need for a national survey. 17: 127-14.
- Eijkelkamp, 2011: Guelph constant head permeametr. Operatin instructions Guelph permeametr. November 2011. Dostupné na: <https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/guelph-constant-head-permeameter.html>

- Franzluebbers A. J., Stuedemann J. A., Franklin D. H., 2011: Water infiltration and surface-soil structural properties as influenced by animal traffic in the Southern Piedmont USA. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 27 (04): December 2012, pp 256-265, DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S1742170511000378> Published online: 26 August 2011.
- Fohrer N., Berkenhagen J., Hecker J. M., Rudolph A., 1999: Changing soil and surface conditions during rainfall single rainstorm/subsequent rainstorms. *Catena* 37: 355-375.
- Glover R. E., 1953: Flow from a test-hole located above ground waterlevel. In: Zangar C. N.: Theory and problems of water percolation. Engineering Monograph No. 8, U. S. Dept. Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA. Appendix B, pp. 69-71.
- Greenwood K. L., McKenzie B. M., 2001: Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: A review. *Animal Production Science* 41(8):1231-1250 · December 2001
- Hansen S., 1995: *Effect of manure treatment and soil compaction on plant production of a dairy farm system converging to organic farming practice*. Agriculture, ecosystems and environment, 56 (3): 173-186.
- Håkansson I., Reeder R. C., 1994: Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, 29, 277 – 304.
- Heathwaite A. L., Burt T. P., Trudgill S. T., 1990: Land-use controls on sediment production in a lowland catchment, south-west England. In: Soil erosion on agricultural land (Boardman J., Foster I. D. L., Dearing J. A., (eds.)). Pp 70-86. John Wiley and Sons LTD., Chichester.
- Hejduk S., 2000: *Vliv extenzivního obhospodařování pastevních porostů ve vztahu k porostovým a hydrologickým parametrům*. Disertační práce. Brno: MENDELU Brno. 167 s.
- Hejduk S., 2011: *Vliv pícních porostů na vznik povrchových odtoků srážkových vod a náhlých povodní*. Habilitační práce. Brno: MENDELU Brno. 129 s.
- Hejduk S., Kasprzak K., 2003: Tvorba předjarních zásob půdní vláhy na stanovištích vybraných zemědělských plodin, *Soil and Water* (2): 47-60.

- Hejduk S., Kasprzak K., 2004: Mrazový index a hloubka promrzání jako možné ukazatele změny klimatu. In: Rožnovský J., Litschmann T., (eds.): *Extrémy počasí a podnebí*. Česká bioklimatologická společnost, 11. 3. 2004, Brno, 14-15.
- Hejduk S., Kasprzak K., 2005: Příspěvek k návrhům šířky ochranných zatravněných pásů. *Soil and Water* (4):30-35.
- Hejduk S., Kasprzak K., 2010: Specific features of water infiltration into soil with different management in winter and early spring period. *J. Hydrol. Hydromech.*, 58 (3): 157-180.
- Hejduk S., Sochorec M., 2012: Is surface runoff an important component of water balance on agricultural land in growing season?. *Növénytermelés (Crop Production)*. Sv. 61, č. 1, s. 239 - 242. ISSN 0546-8191.
- Holý M., 1978: *Protierozní ochrana*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 283 s.
- Holý M., 1994: *Eroze a životní prostředí*. ČVUT Praha, 383 s. ISBN 80-01-01078-3.
- Hrabě F., Knot P., 2011: The effect of trophism level and exploitation intensity on the production characteristics of grassland community dominated by *Festuca arundinacea* Schreb. *Plant, Soil and Environment*. 57: 160-165. ISSN 1214-1178.
- Hubbard R. K., Newton G. L., Hill G. M., 2004: Water quality and the grazing animal. (Review). *Jouranal of animal science*. 82: E255-263.
- IUSS-ISRIC-FAO, 2006: World reference base for soil resources 2006 – A framework for international classification, correlation and communication. *World Soil Resources Reports*, FAO Rome, 128 p.
- Janeček M. (ed.), 2005 *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. ISV Praha, 195 s.
- Janeček M. (ed.), 2008 *Základy erodologie*. Česká zemědělská univerzita, Praha, 172 s.
- Janeček M. (ed.), 2012: *Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika*. Praha: Powerprint, ISBN 978-80-87415-42-9.
- Javůrek M., Vach M., 2008: *Negativní vlivy zhutnění půd a soustava opatření k jejich odstranění*. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., Praha, 24 s.
- Jorajuria D., Draghi L., Aragon A., 1997: The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of *Lolium/Trifolium* grassland. *Soil and Tillage Research*. 41: 1-12.
- Jury W. A., Horton R., 2004: *Soil physics*, 6th edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken (N. J.). 384 p. ISBN: 978-0-471-05965-3

- Jůva K., Cáblik J., 1954: *Protierosní ochrana půdy*. SZN Praha. 254 s.
- Kane D. L., Stein J., 1983: Water movement into seasonally frozen soils. *Water resources research*, 19: 1547-1557.
- Karabcová H., 2009: *Metodické postupy a zásady vyhodnocování fyzikálních parametrů půd pod trvalými travními porosty*. Rapotín: Agrovýzkum Rapotín. ISBN 978-80-87144-07-7.
- Kasprzak K., 1969: Vliv některých druhů zemědělských plodin na tvorbu povrchového odtoku srážek a erozních jevů. Sborník VUT v Brně. Ročník 1969, číslo 1-2: 209-216.
- Kasprzak K., 1982: Retenční vlastnosti půdního agroreliefu. Výzk. zpráva. Brno: VUT Brno, 74 s.
- Kasprzak K., 1987: Příspěvek k hydrologicky významným formám přetváření propustnosti orných půd. *Vodohosp. Časopis*, 35 (1): 62-80.
- Kasprzak K., 1990: Vliv fyzikálních vlastností agropedosféry na tvorbu zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva, VUT Brno, 86 s.
- Klouda p., 2003: *Moderní analytické metody*, nákladem vlastním, Ostrava, ISBN 80-86369-07-2
- Kovář P., Cudlín P., Heřman M., Zemek F., Korytář M., 2002: Analysis of Flood Events on Small River Catchments using the KINFIL Model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 50(2), s. 157-171.
- Kovář P., Štibinger J., Pešková J., Kasl M., 2011: Metodika návrhu a realizace infiltračních a záchytných opatření v rámci obnovy hydrologických poměrů a způsobů hospodaření v krajině. ČZU Praha, Fakulta životního prostředí.
- Kožíšek F., 2007: Je vodovodní voda vhodná pro přípravu kojenecké stravy? Státní zdravotní ústav, Praha. *Praktický lékař*, 87, No. 4, pp. 224-227.
- Kumhála F., Gutu D., Hůla J., Chyba J., Kovaříček P., Kroulík M., Kvíz Z., Mašek J., Vlášková M., 2013: Technologie řízených přejezdů po pozemcích. Uplatněná certifikovaná metodika. Praha: ČZU, 2013. 42 s. ISBN 978-80-213-2425-1
- Kurz I., O'Reilly C. D., Tunney H., 2006: Impact of cattle on soil physical properties and nutrient concentrations in overland flow from pasture in Ireland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 113, 378-390
- Kutilek M., Nielsen D. R., 1994: *Soil hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen-Dested, Germany.

- Kutílek M., 1978: *Vodohospodářská pedologie*. Praha: SNTL/ALFA, 261 s.
- Kutílek M., Kuráž V., Císlerová M., 1996: *Hydropedologie*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 150 s.
- Kutílek M., 2012: *Půda planety Země*. Praha: Dokořán. Bod. ISBN 978-80-7363-212-0.
- Langhammer J., 2007: Současné přístupy k hodnocení a modelování povodňového rizika. In: Langhammer, J. (ed): *Povodně a změny v krajině*. MŽP a PřF UK, Praha, pp. 13-32.
- Langhammer J., 2009: Typologie povodní, extrémní povodně v Evropě a ČR. Citováno: dne 15. 3. 2016. Dostupné na:
https://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/floods/prezentace/langhammer_1_uvod_historicke_extremni_povodne.pdf.
- Lemaire G., Hodgson J., Chabbi A. (eds.), 2011: *Grassland productivity and ecosystem services*. CAB International, Wallingford, 287 pp., ISBN -13:978 1 84593 809 3.
- Lhotský J., Ehrlich P., Váchal J., 1984: *Soustava opatření k zúrodnování zhutněných půd*. Praha: Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství (*Metodiky pro zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe*).
- Lhotský J., 2000: *Zhutňování půd a opatření proti němu: (studijní zpráva)*. Praha: Ústav zemědělských a potravinářských informací, 61 p. ISBN 80-7271-067-2. (in Czech)
- Litschmann T., Straka J., 2000: Makropórové zasakování vody v travních porostech. *Úroda*. sv. 48, č. 8, s. 25. ISSN 0139-6013.
- Lull H. W., 1959: *Soil Compaction on Forest and Range Lands*, U.S. Dept. of Agriculture, Forestry Service, Misc. Publication No. 768.
- Matula S., Kozáková H., 1997: A simple pressure infiltrometer for determination of soil hydraulic properties by in situ infiltration measurements. *Rostlinná výroba*, 43, 405-413.
- Matula S., 2003: The influence of tillage treatments on water infiltration into soil profile. *Plant, Soil and Environment*. ISSN: 1214-1178, 49, (7), 298-306.
- Matula S., Miháliková M., Lufinková J., Bát'ková K., 2015: The role of the initial soil water content in the determination of unsaturated soil hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Plant Soil Environ.*, 61: 515-521.
- Matějčíček J., Hladný J., 1999: *Povodňová katastrofa 20. století na území České republiky*. Praha: Ministerstvo životního prostředí. ISBN 80-7212-130-8.

- McDowell R.W., Houlbrooke D. J., (eds.) 2008: *Grazed Pastures and Surface Water Quality*. Nova Science Publishers Inc. 238 p. ISBN 978-1604560251
- Mládek J., Pavlů V., Hejman M., Gaisler J. (eds.), 2006: Půdní poměry. In: *Grazing as a management of grasslands in protected areas*. VÚRV Praha.
- Morgan R. P. C., 2005. *Soil erosion and conservation*, 3rd edition. Blackwell publishing. Oxford. 304 pp.
- Muirhead R. W., Collins R. P., Bremer P. J., 2005: Erosion and subsequent transport state of *Escherichia coli* from cowpats. 71: 2875-2879.
- MZe ČR, 1999: Situační a výhledová zpráva Půda. Vydalo: Ministerstvo zemědělství ČR. Dostupné na: <http://eagri.cz/public/web/mze/potravinovy/publikace-a-dokumenty/situacni-a-vyhledove-zpravy/puda/> Citováno: 12. 6. 2015
- MŽP, 2011: Předběžné vyhodnocení povodňových rizik v České republice. Zdroj: http://www.povis.cz/mzp/smernice/2011/CZ_zprava_PFRA_APSFR.pdf. Vydalo Ministerstvo životního prostředí. Publikováno: prosinec 2011. Citováno: 12. 6. 2015.
- Newell-Price J. P., Whittingham M. J., Chambers B. J., Peel S., 2013: Visual soil evaluation in relation to measured soil physical properties in a survey of grassland soil compaction in England and Wales. *Soil and Tillage Research*, Volume 127, Pages 65-73, ISSN 0167-1987, <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.03.003>.
- Novak V., 1995: *Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania*. 253 s. Veda, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied. ISBN 80-224-049-8.
- Novosad J., 1980: *Využívání travní hmoty jalovicemi při velkovýrobní technologii pastvy*. Kandidátská disertační práce, Mendelu Brno, 105 s.
- Novotný I., (eds.) 2014: *Průručka ochrany proti vodní erozi*. 2. vyd. Praha: Ministerstvo zemědělství, 73 s.
- Nösberger J., Blum H., Fuhrer J., 2000: Crop Ecosystem Responses to Climatic Change: Productive Grasslands. *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB international, p. 271-291.
- Page T., Haygarth P., Beven K., Joynes A., Butler T., Keeler C., Freer J., Owens P. O., Wood G. A., 2005: Spatial variability of soil phosphorus in relation to the topographic index and critical source areas: Sampling for assessing risk to water quality. *J. Environ. Qual.* 34, 2263-2277.
- Pasák V., (ed.) 1984: *Ochrana půdy před erozí*. Praha SZN, 164 s.

- Pimentel D., Kounang N., 1998: Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems* 1: 416-426.
- Pokorný E., Filip J., Láznička V., 2001: *Rekultivace*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 128 s.
- Pokorný E., Šarapatka B., Hejátková K., 2007: *Hodnocení kvality půdy v ekologicky hospodařícím podniku: metodická pomůcka*. Náměšť nad Oslavou: ZERA - Zemědělská a ekologická regionální agentura. ISBN 978-80-903548-5-2.
- Pokladníková H., Šťastná M., 2006: Intensity of Soil Erosion in Spring Period in Chosen Areas of Moravia. In Lapin, M. - Matejka, F. *Bioclimatology and water in the land*. Bratislava: Library and Publishing Center of the Fakulty FMFI, 2006, s. 91. ISBN 80-89186-12-2.
- Pozdíšek J., (eds.) 2008: *Metodická příručka pro chovatele k výrobě konzervovaných krmiv (siláží) z víceletých pícnin a trvalých travních porostů*. Rapotín: Výzkumný ústav pro chov skotu, s.r.o. Rapotín. ISBN 978-80-87144-06-0.
- Procházka S., Macháčková I., Krekule J., Šebánek J. (eds.), 1998: *Fyziologie rostlin*. Academia, Praha, 488 stran.
- Radford B. J., Wilson-Rummenie A. C., Simpson G. B., Bell K. L., Ferguson M. A., 2001: Compacted soil affects soil macrofauna populations in a semi-arid environment in central Queensland. *Soil Biology & Biochemistry*, 33 (12-13), 1869–1872.
- Rais I., Královec J., Kopta A., 1990: Quality of surface waters in the pasture area. *Rostlinná výroba*, 36, (5): 481-487
- Rocky L., 2011: Breaking soil compaction: Does it increase forage production? Mississippi State University Extension Service. Volume 4, Issue 1.
- Scholefield D., Patto P. M., Hall D. M., 1986: Laboratory research on the compressibility of four topsoils from grassland. *Soil tillage research*, 6, 1-16.
- Skládanka J., Cagaš B., Doležal P., Havlíček Z., Hejduk S. (eds.), 2014: *Pícninářství*. 1. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 368 s. ISBN 978-80-7509-111-6.
- Sklenář L., 2007: Povodně na území české republiky a povodňová měření. *Spisy zeměpisného sdružení*. Ročník 6, číslo 1 (17). ISSN 1214-0848.
- Sochorec M., 2008: Ohrožení zemědělských půd erozí v katastrálním území Uherské Hradiště. *Bakalářská práce* (in MS, dep. knihovna Mendlovy univerzity v Brně), MENDELU Brno, 47 s.

- Sochorec M., 2010: Návrh protierozních opatření v katastrálním území Uherské Hradiště. *Diplomová práce* (in MS, dep. knihovna Mendlovy univerzity v Brně), MENDELU Brno, 87 s.
- Statsoft Inc., 2007: STATISTICA data analysis software system, version 12.0., www.statsoft.com.
- Šarapatka B., Niggli U., 2008: *Zemědělství a krajina: cesty k vzájemnému souladu*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 271 s.
- Šarapatka B., 2015: Na sucho si musíme zvyknout. Jde o miliardy. Rozhovor pro Lidové noviny. Citováno dne: 12. 10. 2015 Dostupné na: http://ceskapozice.lidovky.cz/na-sucho-si-musime-zvyknout-jde-o-miliardy-fjz-/tema.aspx?c=A150904_153324_pozice-tema_kasa&galerie.
- Soussana J. F., Tallec T., Blanfort V., 2010: Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grassland. *Animal*, 4, 334-350.
- Stehlík O., 1970: *Geografická rajonizace eroze půdy v ČSR: metodika zpracování*. Brno: Geografický ústav ČSAV, 40 s.
- Thurow T. L., 1991: Hydrology and erosion. In Heitschmidt R. K. a Stuth J. W. (eds.), *Grazing management: an ecological perspective*. Portland, Oregon: Timber press, Inc., 141-159.
- Tlapák V., Šálek J., Legát V., 1992: Voda v zemědělské krajině. 1. Praha: Brázda. 320 s. ISBN 80-209-0232-5.
- Trevisan D., Dorioz J. M., Poulenard J., Quetin P., Prigent Combaret C., Merot P., 2010: Mapping of critical source areas for diffuse fecal bacterial pollution in extensively grazed watersheds. 44: 3847-3860.
- Trimble G. R., Richrad J. R., Sartz S., Pierce R. S., 1958: How type of soil frost affects infiltration. *Journal of soil and water conservation*, 13: 81-82.
- Trimble S. W., Mendel A. C., 1995: The cow as a geomorphic agent — A critical review, *Geomorphology*, Volume 13, Issue 1, Pages 233-253, ISSN 0169-555X, [http://dx.doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00028-4](http://dx.doi.org/10.1016/0169-555X(95)00028-4).
- Trupl, J., 1958: Intenzity krátkodobých dešťů v povodí Labe, Odry a Moravy. VÚV Praha Podbaba, Práce a studie, sešit 97, 50 s. (text in Czech)
- US SCS, 1986: Urban hydrology for small watersheds. U. S. Soil Conservation. Technical Release, 55, 1986, 13, Service, Washington.

- USACE, 2015: Hydrologic Modeling System HEC-HMS Version 4.1 July 2015, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Citováno dne 18. 1. 2016. Dostupné na: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- Van den Akker J. J. H., Schjønning P., 2004: Subsoil compaction and ways to prevent it. In: *Managing soil quality: challenges in modern agriculture*. Edited by Schjønning P., Elmholt S., Christensen B. T, CABI Publishing, 344 p.
- Van Eekeren N., De Boer H., Hanegraaf M., Bokhorst J., Nierop D., Bloem J., Schouten T., De Goede R., Brussaard L., 2010: Ecosystem services in grassland associated with biotic and abiotic soil parameters. *Soil Biology and Biochemistry*, 42 (9): 1491-1504.
- Vertès F., Hatch D., Velthof G., Taube F., Laurent F., Loiseau P., Recous S., 2007: Short-term and cumulative effects of grassland cultivation on nitrogen and carbon cycling in ley-arable rotations. *Grassland science in Europe*, 12: 227-246
- VFÚ, 2011: Definice význam a funkce půdy. Citováno dne 12. 6. 2016. Dostupné na: http://cit.vfu.cz/ivbp/wp-content/uploads/2011/07/Definice_vyznam_a_funkce_pudy.pdf
- Vítek L., Hrabě F., (eds.) 1983: Travní porosty na vodohospodářských stavbách. Hydroprojekt Brno a katedra pícninářství VŠZ v Brně, Brno, 73 s.
- Vopravil J. (ed.), 2010: *Soil and its evaluation in the Czech republic. Půda a její hodnocení v ČR*. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2009 - 2011. 2 sv. ISBN 978-80-87361-02-3. (in Czech)
- Walling D. E., Collins A. L., McMellin G. K., 2003: A reconnaissance survey of the source of interstitial fine sediment recovered from salmonid spawning gravels in England and Wales. 497: 91-108.
- Wilhite D. A. (ed.) 2005: *Drought and Water Crises: Science, Technology and Management Issues*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Wilson J. B., Peet R. K., Dengler J., Pärtel M., 2012: Plant species richness: the world records. *Journal of vegetation science*. 23:796-802.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Hlavní povodí České republiky (zdroj: http://enviregion.pf.ujep.cz , 2015).....	16
Obr. 2 Distribuce srážek na povodí (Janeček et al., 2005)	17
Obr. 3 Soustředování plošného povrchového odtoku na poli s kukuřicí (Mařatice 28. 5. 2011, foto autor)	18
Obr. 4 Vznik rýhové eroze ve Starém Městě u Uherského Hradiště (foto autor 30. 9. 2007)	24
Obr. 5 Grafické znázornění dolní meze úhrnu odtokově i erozně nebezpečných dešťů dle různých autorů (převzato Hejduk, 2011)	28
Obr. 6 Vztah mezi rychlostí a průměrem dešťových kapek (J. O. Lawse in Holý, 1978)	30
Obr. 7 Závislost tvaru kapky na její velikosti (upraveno en.wikipedia.org)	30
Obr. 8 Vztah mezi kinetickou energií a intenzitou deště podle různých autorů (Holý, 1978)	31
Obr. 9 Průběh infiltrace na strukturní a nestrukturní půdě (Kutílek, 1978).....	36
Obr. 10 Srážkový úhrn za 72 hodin v období od 16. 8. 2015 14:00 do 19. 8. 2015 SELČ	41
Obr. 11 Koloběh patogenních organismů hospodářských zvířat v životním prostředí (upraveno McDowell et al., 2008)	51
Obr. 12 Vliv intenzivní živočišné výroby na půdu - spirála pracovních operací vedoucích k degradaci půdy (převzato Duiker, 2004)	52
Obr. 13 Vliv pojezdu zemědělské techniky na travním porostu (foto S. Hejduk).....	54
Obr. 14 Grafické vyjádření přejezdů při sklizni samojízdou řezačkou (vlevo) a přejezdů při sklizni svinovacím lisem (vpravo) (převzato: Kumhála et al., 2013).....	55
Obr. 15 Ortofotomapa s umístěním jednotlivých variant obhospodařování travních porostů (upraveno www.mapy.cz)	58
Obr. 16 Princip měření infiltrace metodou soustředných válců (Kutílek, 1978).....	60
Obr. 17 Znázornění průběhu infiltrace na variantě bez vlivu zhutnění (PN) 27. 4. 2013 s patrným ustálením rychlosti infiltrace po 30 minutách měření.....	60
Obr. 18 Znázornění průběhu infiltrace po vyhodnocení pomocí obecné rovnice infiltrace na variantě bez vlivu zhutnění (PN) 27. 4. 2013	61

Obr. 19 Pomůcky pro měření infiltrace pomocí metody soustředných válců (foto S. Hejduk)	61
Obr. 20 Měření infiltrace na konci vegetačního období (11. 10. 2012, foto autor).....	62
Obr. 21 Odběr neporušených vzorků půdy pro stanovení fyzikálních vlastností půdy (foto autor)	63
Obr. 22 Guelphský permeametr a pomůcky potřebné pro měření (převzato z www.eijkelkamp.com).....	64
Obr. 23 Měření Guelphským permeametrem na konci vegetačního období (11. 10. 2012, foto autor)	65
Obr. 24 Expozice odtokoměrných ploch dle světových stran	66
Obr. 25 Ortofotomapa s polohou VPS Vatín a umístěním odtokoměrných ploch (upraveno www.mapy.cz).....	67
Obr. 26 Detail záchytného žlábků (vlevo) a pohled na jižní expozici odtokoměrných ploch (vpravo) - foto autor.....	67
Obr. 27 Počátek povrchového odtoku na variantě s kukuřicí (vlevo) a detail záchytné nádrže při měření odtoku (vpravo) 16. 6. 2011 - foto autor	68
Obr. 28 Srážkoměr v blízkosti odtokových polí (foto S. Hejduk).....	68
Obr. 29 Klimadiagram VPS Vatín za období 1970-2000.....	69
Obr. 30 Příprava na měření rychlosti postupu přeronové vlny v porostu kukuřice (vlevo) a v TTP (vpravo) (foto S. Hejduk).....	73
Obr. 31 Vliv různého obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace v první minutě měření $v_{i(1)}$	74
Obr. 32 Vliv různého obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace v desáté minutě měření $v_{i(10)}$	75
Obr. 33 Vliv různého obhospodařování travních porostů na rychlost infiltrace v třicáté minutě měření $v_{i(30)}$	75
Obr. 34 Vliv obhospodařování porostů na objemovou hmotnost ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) v hloubce (mm).....	80
Obr. 35 Vliv obhospodařování porostů na pórovitost (%) v hloubce (mm).....	80
Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)	80
Obr. 36 Vliv obhospodařování porostů na RVK (%) v hloubce (mm).....	81

Obr. 37 Vliv obhospodařování porostů na objem nekapilárních pórů (%) v hloubce (mm). Hodnoty charakterizované různými písmeny vyjadřují statisticky průkazné rozdíly ($p \leq 0,05$)	82
Obr. 38 Vliv ročníku na hodnoty objemové hmotnosti ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) u jednotlivých variant obhospodařování TP	83
Obr. 39 Vliv ročníku na hodnoty pórovitosti (%) u jednotlivých variant obhospodařování TP	83
Obr. 40 Vliv ročníku na RVK (%) u jednotlivých variant obhospodařování TP	84
Obr. 41 Vliv ročníku na objem nekapilárních pórů (%) u jednotlivých variant obhospodařování TP	84
Obr. 42 Závislost mezi rychlostí infiltrace ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) a objemovou hmotností ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	85
Obr. 43 Závislost mezi rychlostí infiltrace ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) a pórovitostí (%).....	86
.....	89
Obr. 44 Vliv roku měření na nasycenou hydraulickou vodivost K_{fs} ($\text{m}\cdot\text{den}^{-1}$) u jednotlivých variant obhospodařování TP	89
Obr. 45 Vliv termínu měření na nasycenou hydraulickou vodivost K_{fs} ($\text{m}\cdot\text{den}^{-1}$).....	89
Obr. 46 Porovnání povrchového odtoku u jednotlivých variant ve vegetačním období	90
Obr. 47 Porovnání velikosti povrchového odtoku u jednotlivých plodin za vegetační období sledovaných let	91
Obr. 48 Poměr povrchového odtoku k vsaku vody do půdy u jednotlivých variant	93
Obr. 49 Průměrný smyvu půdy ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) u jednotlivých variant za sledované období	95
Obr. 50 Statistické vyhodnocení smyvu půdy dle Tukeye po logaritmické transformaci naměřených hodnot u jednotlivých variant.....	97
Obr. 51 Počátek plošné eroze na odtokových políčkách s kukuřicí (foto autor 16. 6. 2011).....	97
Obr. 52 Erozní smyv z odtokových ploch (foto S. Hejduk)	98
Obr. 53 Poměr povrchového odtoku k vsaku vody do půdy u jednotlivých variant po přívalem dešti 14. 7. 2011.....	99
Obr. 54 Vliv expozice svahu na povrchový odtok u jednotlivých plodin	106
Obr. 55 Vliv expozice svahu na smyv půdy u jednotlivých plodin za sledované období	107

Obr. 56 Vliv obhospodařování půdy na velikost povrchového odtoku v zimním období	109
Obr. 57 Porovnání velikosti povrchového odtoku u jednotlivých plodin za zimní období sledovaných let	109
Obr. 58 Vliv expozice na rychlost tání sněhu (vlevo severní, vpravo jižní) – od nejbližší varianty: kyprá půda, strniště kukuřice, pšenice ozimá – foto autor (22. 2. 2011).....	115
Obr. 59 Počátek povrchového odtoku z varianty s TTP (vlevo) a ukončení měření na variantě s holou půdou (vpravo)	117
Obr. 60 Průběh infiltrace u jednotlivých variant – průměr z opakování	118

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Významné povodně na území ČR a vyčíslení výše škody (MŽP, 2011)	23
Tab. 2 Hodnoty přívalových dešťů dle L. S. Berga a Horáka [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	27
Tab. 3 Vyhodnocení spolehlivosti testovaných kritérií mohutnosti deště dle jednotlivých autorů (převzato Hejduk, 2011)	28
Tab. 4 Kinetická energie deště a pádová rychlost u různých typů deště (upraveno Lull, 1959)	32
Tab. 5 Strukturní stav humusového horizontu u středně těžkých a těžkých půd (Kutílek, 1996)	36
Tab. 6 Úhrn srážek, odtoková výška a její podíl ze spadlých srážek na povodí k profilům vybraných vodoměrných stanic (ČHMÚ, 2015).....	41
Tab. 7 Manningův součinitel drsnosti (n) pro plošný povrchový odtok (Janeček et al., 2012)	42
Tab. 8 Hodnoty součinitel disipačního účinku plodin (Kasprzak, 1990)	43
Tab. 9 Vliv zhutnění půdy na počet žížal v Austrálii (průměr za 5 let - upraveno podle Radforda et al., 2001)	46
Tab. 10 Limitní hodnoty vybraných fyzikálních vlastností zhutnělé půdy (Lhotský, 2000)	47
Tab. 11 Vliv hmotnosti stroje a šířky pneumatik na kontaktní tlak na půdu (Bačák, 2011)	54
Tab. 12 Obsah půdních částic na jednotlivých stanovištích (%)	58
Tab. 13 Způsob střídání plodin v jednotlivých letech vegetačního období	70
Tab. 14 Způsob střídání plodin v jednotlivých letech mimovegetačního období.....	71
Tab. 15 Infiltrační rychlost u travních porostů v první minutě měření $v_{i(1)}$ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) v jednotlivých měsících (2011-2013)	76
Tab. 16 Infiltrační rychlost u travních porostů v desáté minutě měření $v_{i(10)}$ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) v jednotlivých měsících (2011-2013)	77
Tab. 17 Infiltrační rychlost u travních porostů v třicáté minutě měření $v_{i(30)}$ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) v jednotlivých měsících (2011-2013)	77
Tab. 18 Fyzikální vlastnosti půdy pod jednotlivými porosty v letech 2011-2013 (v průměru termínů a hloubek odběru)	79

Tab. 19 Poměr kapilární pórů k celkové pórovitosti u jednotlivých variant v hloubce odběru (mm)	82
Tab. 20 Klasifikace propustnosti půd podle naměřených hodnot nasycené hydraulické vodivosti K_{fs} ($m \cdot den^{-1}$) dle Němce (1975)	88
Tab. 21 Nasycená hydraulická vodivost K_{fs} ($m \cdot den^{-1}$) u jednotlivých variant.....	88
Tab. 22 Povrchový odtok ($m^3 \cdot ha^{-1}$) za vegetační období (květen až září) z jednotlivých variant	92
Tab. 23 Smyv půdy ($t \cdot ha^{-1}$) u jednotlivých variant – průměr z obou expozic a roku	95
Tab. 24 Povrchový odtok ($m^3 \cdot ha^{-1}$) a smyv půdy ($t \cdot ha^{-1}$) naměřený 14. 7. 2011.....	98
Tab. 25 Vybrané charakteristiky prvních příválových dešťů roku 2011 vybraných pro rozbor chemické analýzy vody a velikost povrchového odtoku u kukuřice.....	101
Tab. 26 Koncentrace pesticidů v povrchovém odtoku ($\mu g \cdot l^{-1}$) a jejich poměr k aplikované dávce (%).....	101
Tab. 27 Četnost výskyt odtokově nebezpečných dešťů v jednotlivých měsících	102
Tab. 28 Četnost výskytu erozních smyvů v jednotlivých měsících.....	103
Tab. 29 Vliv expozice na povrchový odtok ($m^3 \cdot ha^{-1}$) za sledované období 2008-2013.....	106
Tab. 30 Vliv expozice na smyv půdy ($t \cdot ha^{-1}$) za sledované období 2008-2013.....	107
Tab. 31 Povrchový odtok ($m^3 \cdot ha^{-1}$) v zimním období (říjen-duben) průměr z obou expozic za sledované období 2008/2009-2013-2014.....	108
Tab. 32 Vybrané charakteristiky zimních období (2008/2009-2013/2014)	110
Tab. 33 Povrchový odtok ($m^3 \cdot ha^{-1}$) v jednotlivých dnech (průměr obou expozic) a teplota půdy v hloubce 10 cm v době tvorby odtoku.....	111
Tab. 34 Vybrané meteorologické charakteristiky předcházející povrchovému odtoku 26. 2. 2012 a 28. 2. 2012.....	112
Tab. 35 Povrchový odtok naměřený 26. 2. 2012 u jednotlivých variant.....	112
Tab. 36 Porovnání celkového povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) podle expozice v zimním období 2008-2013	114
Tab. 37 Doba postupu čela přeronové vlny (s) u jednotlivých variant (průměr ze tří měření).....	117
Tab. 38 Průměrná rychlost infiltrace ($mm \cdot min^{-1}$) u jednotlivých variant.....	117
Tab. 39 Hodnoty vybraných fyzikálních vlastností půdy u jednotlivých variant v hloubce 0-50 mm	118

11 SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

TTP – trvalý travní porost,

VPS – Výzkumná pícninářská stanice,

RVK - retenční vodní kapacita (%),

MVK – minimální vzdušná kapacita (%),

ρ_d - objemová hmotnost suché zeminy ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),

K_{fs} - nasycené hydraulické vodivosti ($\text{m}\cdot\text{den}^{-1}$),

$v_{i(x)}$ – rychlost infiltrace v x té minutě měření ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$),

M_D – mohutnost deště ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-0,5}$),

PN – porost bez vlivu zhutnění,

PA – pastvina sešlapávaná dobyt看,

LO – velkovýrobně obhospodařovaná louka,

σ - směrodatná odchylka.

12 PŘÍLOHY

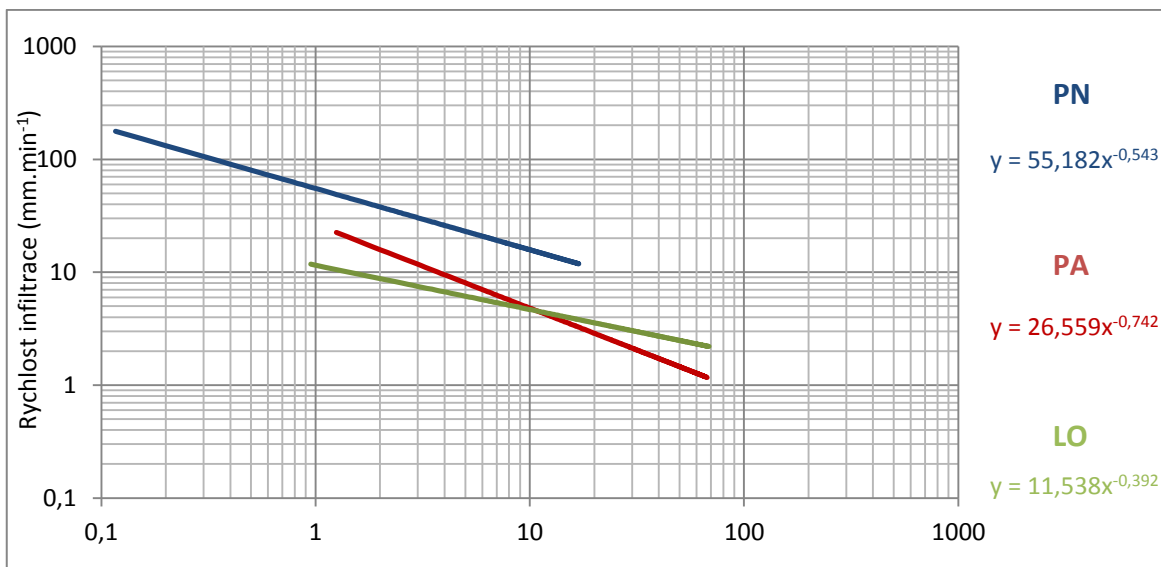
12.1 Seznam příloh

Příloha 1 Příklad vyplněné tabulky pro záznam dat z terénního měření infiltrace.....	143
Příloha 2 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Duben 2011	144
Příloha 3 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Červenec 2011.....	144
Příloha 4 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Říjen 2011	145
Příloha 5 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Duben 2012	145
Příloha 6 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Červenec 2012.....	146
Příloha 7 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Říjen 2012.....	146
Příloha 8 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Duben 2013	147
Příloha 9 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Červenec 2013.....	147
Příloha 10 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Říjen 2013	148
Příloha 11 Objemová hmotnost (g.cm^{-3}) a pórovitost (%) v hloubce 20-70 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.....	148
Příloha 12 Objemová hmotnost (g.cm^{-3}) a pórovitost (%) v hloubce 120-170 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.....	148
Příloha 13 Objemová hmotnost (g.cm^{-3}) a pórovitost (%) v hloubce 220-270 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.....	149
Příloha 14 Retenční vodní kapacita (%) a vlhkost (%) v hloubce 20-70 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.....	149
Příloha 15 Retenční vodní kapacita (%) a vlhkost (%) v hloubce 120-170 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.....	149

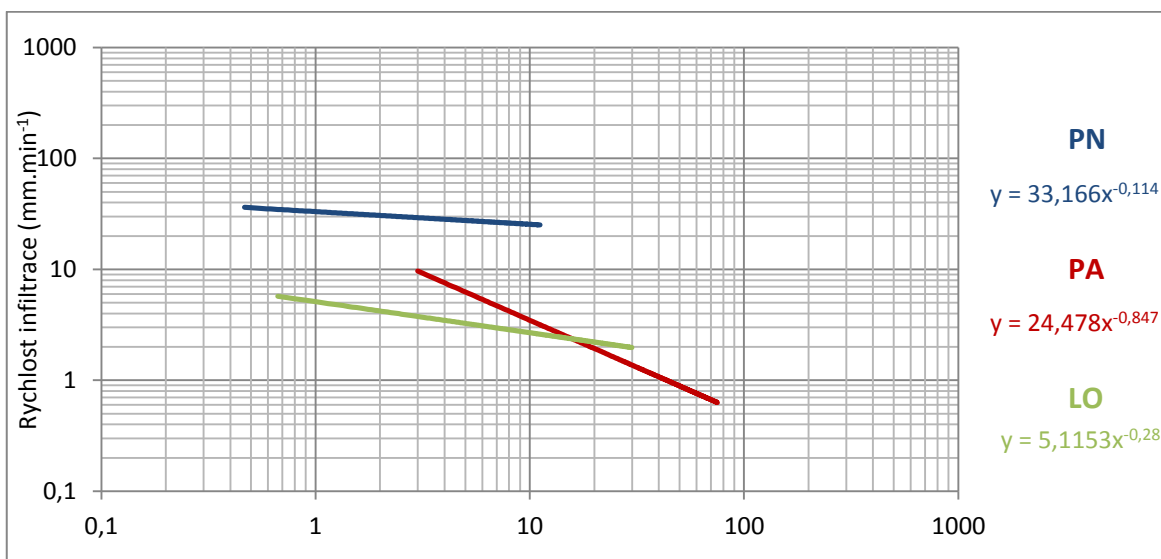
Příloha 16 Retenční vodní kapacita (%) a vlhkost (%) v hloubce 220-270 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.....	149
Příloha 17 Objem nekapilárních pórů (%) v hloubce 20-270 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.....	150
Příloha 18 Záznam teploty půdy v hloubkách 10 a 20 cm a průběh denních teplot na odtokoměrných plochách ve Vatíně v roce 2012.....	150
Příloha 19 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2008	151
Příloha 20 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2009	151
Příloha 21 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2010	152
Příloha 22 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2011	152
Příloha 23 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2012	153
Příloha 24 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2013	153

Příloha 1 Příklad vyplněné tabulky pro záznam dat z terénního měření infiltrace

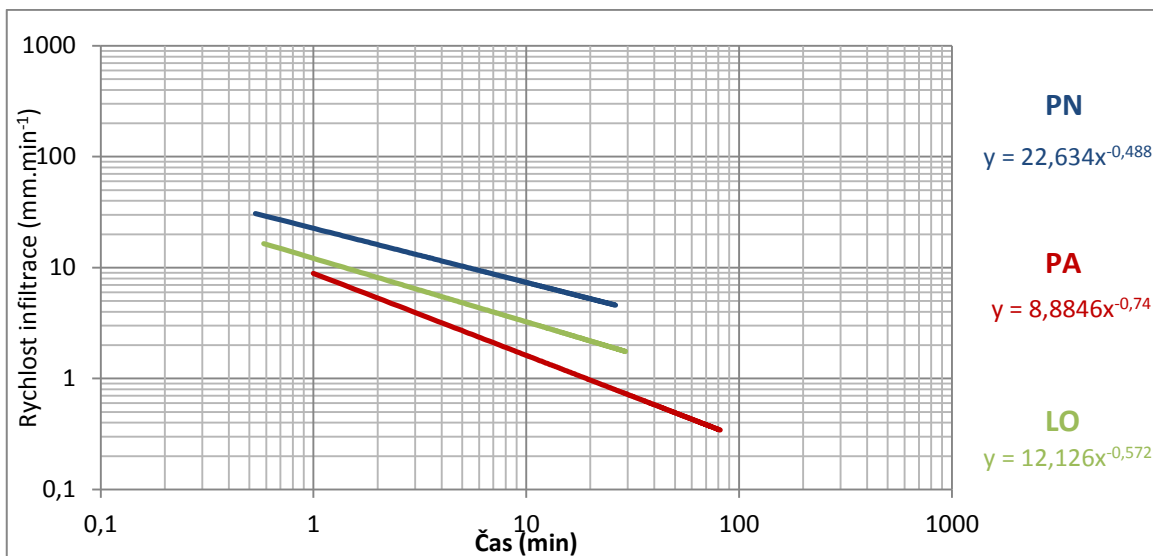
Místo: TP bez vlivu zhutnění (PN)								
Datum: 27. 4. 2013								
Průměr kruhu: 124 mm								
čas 1. nalití:								
Časy měření	Min	Sec	Objem (ml)	Čas (s)	Kumulativní výška inf. (mm)	v_i (mm/min)	Kumul. čas t (min)	v_t (mm/min)
1	1	25	400	85	33,1	23,4	1,4	20,5
2	4	2	400	157	66,2	12,6	4,0	12,0
3	7	6	400	184	99,3	10,8	7,1	9,0
4	10	15	400	189	132,4	10,5	10,3	7,4
5	14	10	400	235	165,5	8,5	14,2	6,3
6	18	0	400	230	198,6	8,6	18,0	5,6
7	22	29	400	269	231,7	7,4	22,5	5,0
8	27	10	400	281	264,8	7,1	27,2	4,5
9	32	32	400	322	297,9	6,2	32,5	4,1
10	38	15	400	343	331	5,8	38,3	3,8
11	43	50	400	335	364,1	5,9	43,8	3,5
12								
13								
14								
15								
16								
17								



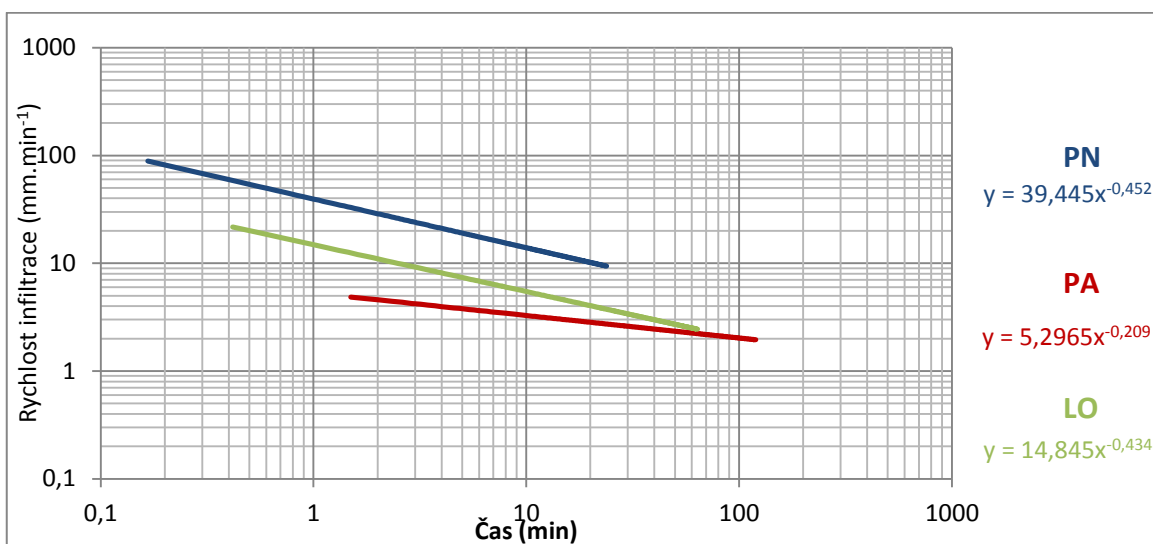
Příloha 2 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tří opakování Duben 2011



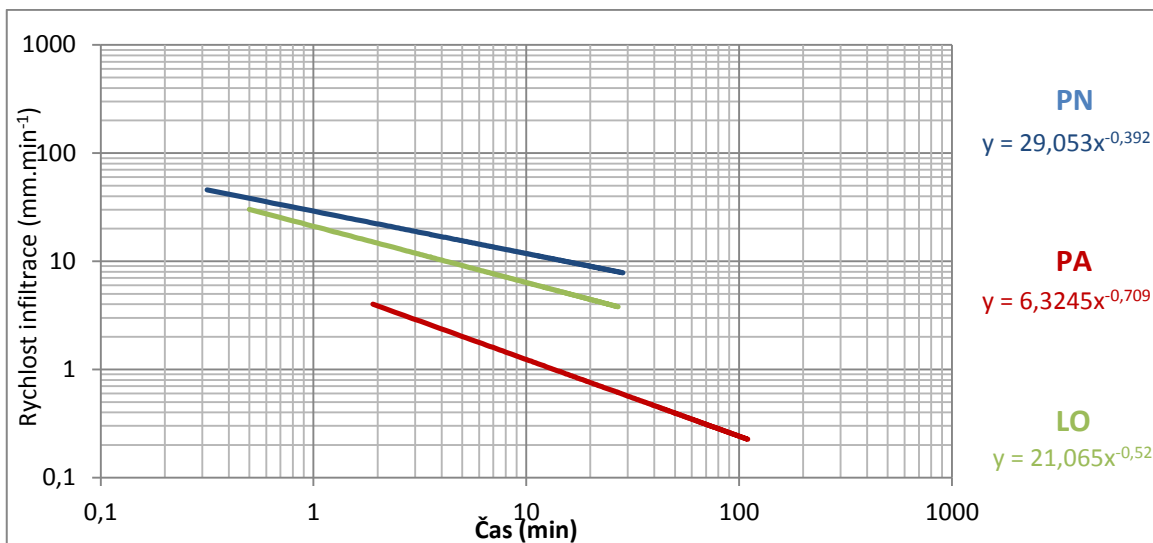
Příloha 3 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tří opakování Červenec 2011



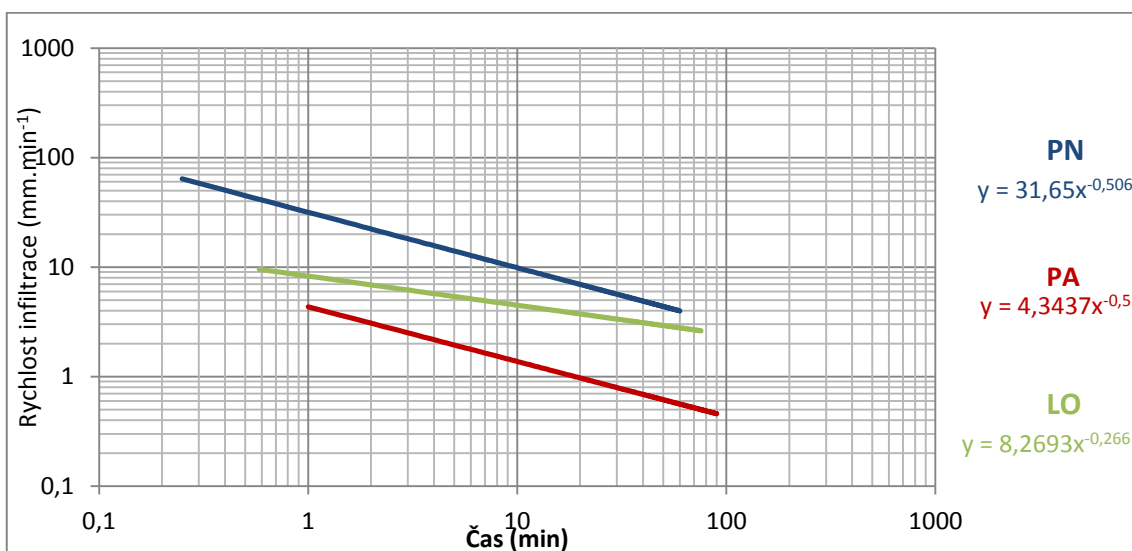
Příloha 4 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Říjen 2011



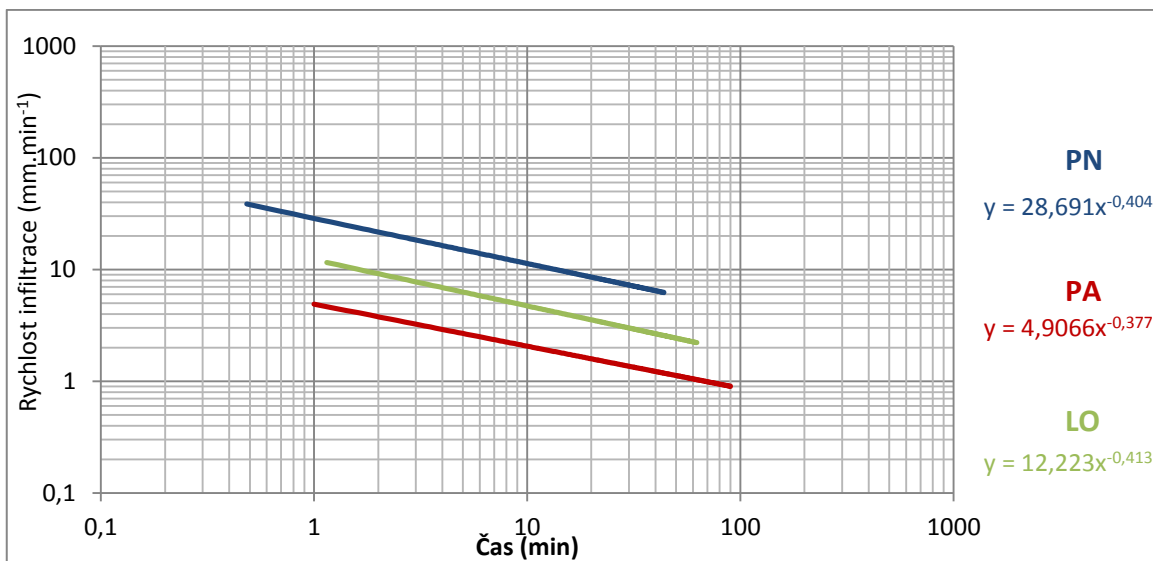
Příloha 5 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tři opakování Duben 2012



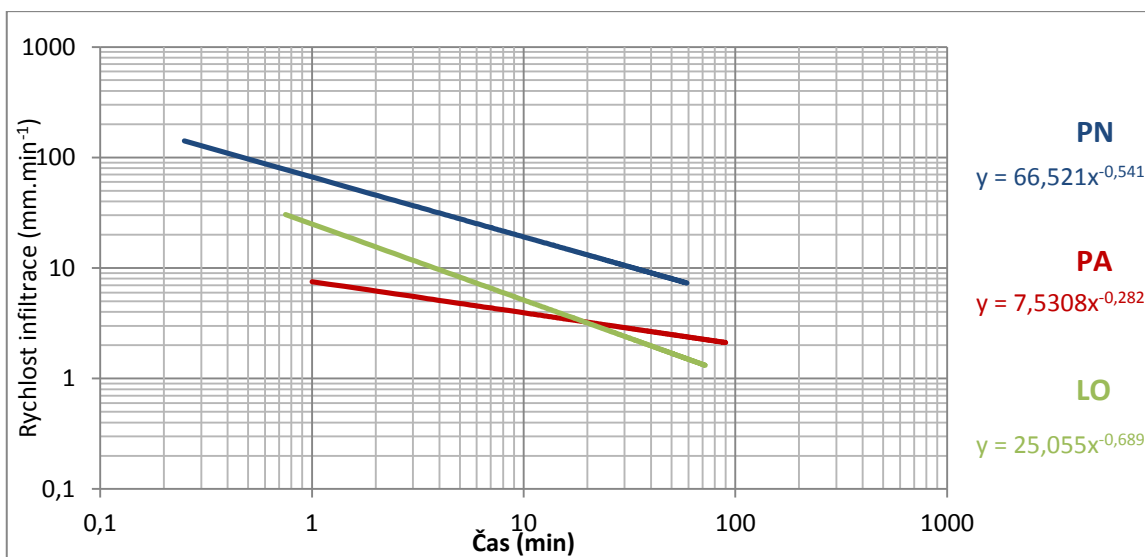
Příloha 6 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tří opakování Červenec 2012



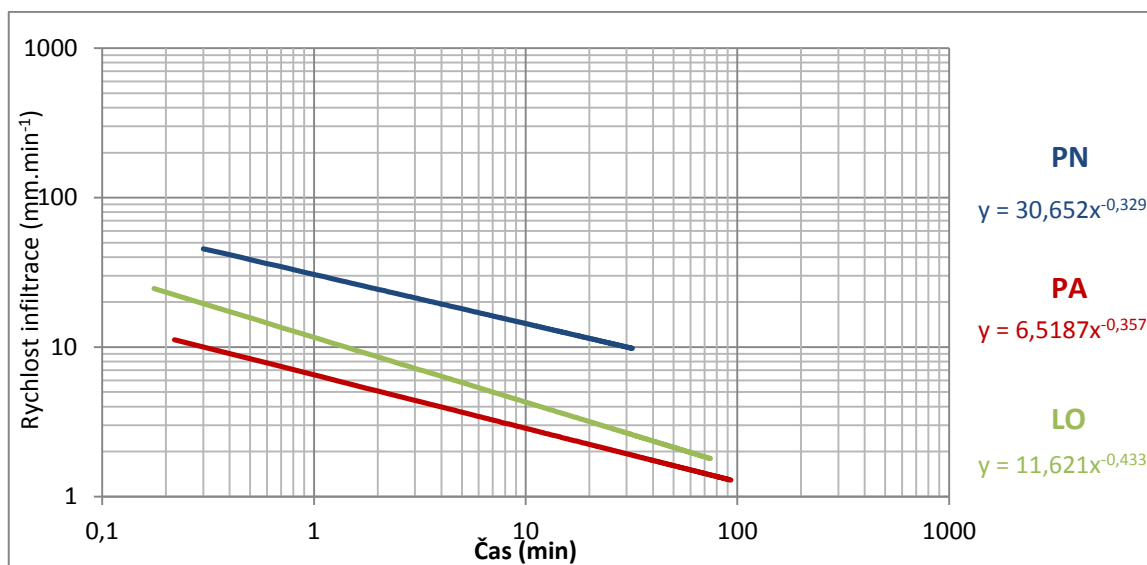
Příloha 7 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tří opakování Říjen 2012



Příloha 8 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tří opakování Duben 2013



Příloha 9 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tří opakování Červenec 2013



Příloha 10 Průměrná závislost infiltrace na čase u jednotlivých porostů - průměr tří opakování Říjen 2013

Příloha 11 Objemová hmotnost (g.cm^{-3}) a pórovitost (%) v hloubce 20-70 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.

Varianta	Duben		Červenec		Říjen	
	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)
PN	1,05a	60,1c	1,06 a	59,2 c	1,14 a	56,0 c
PA	1,54c	41,1a	1,52 c	41,7 a	1,56 c	39,5 a
LO	1,33b	48,8b	1,31 b	49,5 b	1,34 b	48,3 b

Rozdílná písmena ve sloupci označují statisticky průkazný rozdíl ($p < 0,05$)

Příloha 12 Objemová hmotnost (g.cm^{-3}) a pórovitost (%) v hloubce 120-170 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.

Varianta	Duben		Červenec		Říjen	
	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)
PN	1,11 a	57,7 c	1,15 a	56,5 c	1,26 c	51,6 c
PA	1,60 c	39,1 a	1,57 c	40,4 a	1,57 a	40,5 a
LO	1,45 b	44,3 b	1,45 b	44,9 b	1,44 b	44,3 b

Rozdílná písmena ve sloupci označují statisticky průkazný rozdíl ($p < 0,05$)

Příloha 13 Objemová hmotnost (g.cm^{-3}) a pórovitost (%) v hloubce 220-270 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.

Varianta	Duben		Červenec		Říjen	
	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)	ρ_d (g.cm^{-3})	Pórovitost (%)
PN	1,22 a	54,0 c	1,20 a	54,6 c	1,31 a	50,5 c
PA	1,62 c	38,8 a	1,58 c	40,2 a	1,56 c	40,8 a
LO	1,50 b	43,4 b	1,45 b	44,9 b	1,46 b	44,3 b

Rozdílná písmena ve sloupci označují statisticky průkazný rozdíl ($p < 0,05$)

Příloha 14 Retenční vodní kapacita (%) a vlhkost (%) v hloubce 20-70 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.

Varianta	Duben		Červenec		Říjen	
	RVK (%)	Vlhkost obj. (%)	RVK (%)	Vlhkost obj. (%)	RVK (%)	Vlhkost obj. (%)
PN	34,1 a	30,9 a	38,4 b	23,7 a	35,3 a	36,5 b
PA	31,8 a	31,5 a	32,0 a	24,8 a	32,3 a	31,8 a
LO	33,6 a	33,1 a	36,9 ab	26,6 a	32,3 a	34,2 ab

Rozdílná písmena ve sloupci označují statisticky průkazný rozdíl ($p < 0,05$)

Příloha 15 Retenční vodní kapacita (%) a vlhkost (%) v hloubce 120-170 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.

Varianta	Duben		Červenec		Říjen	
	RVK (%)	Vlhkost obj. (%)	RVK (%)	Vlhkost obj. (%)	RVK (%)	Vlhkost obj. (%)
PN	32,0 b	28,8 a	36,3 b	23,7 a	34,1 b	34,2 b
PA	28,9 a	28,7 a	29,6 a	25,4 a	28,5 a	30,0 a
LO	27,7 a	26,7 a	31,7 ab	23,8 a	30,4 a	31,3 a

Rozdílná písmena ve sloupci označují statisticky průkazný rozdíl ($p < 0,05$)

Příloha 16 Retenční vodní kapacita (%) a vlhkost (%) v hloubce 220-270 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.

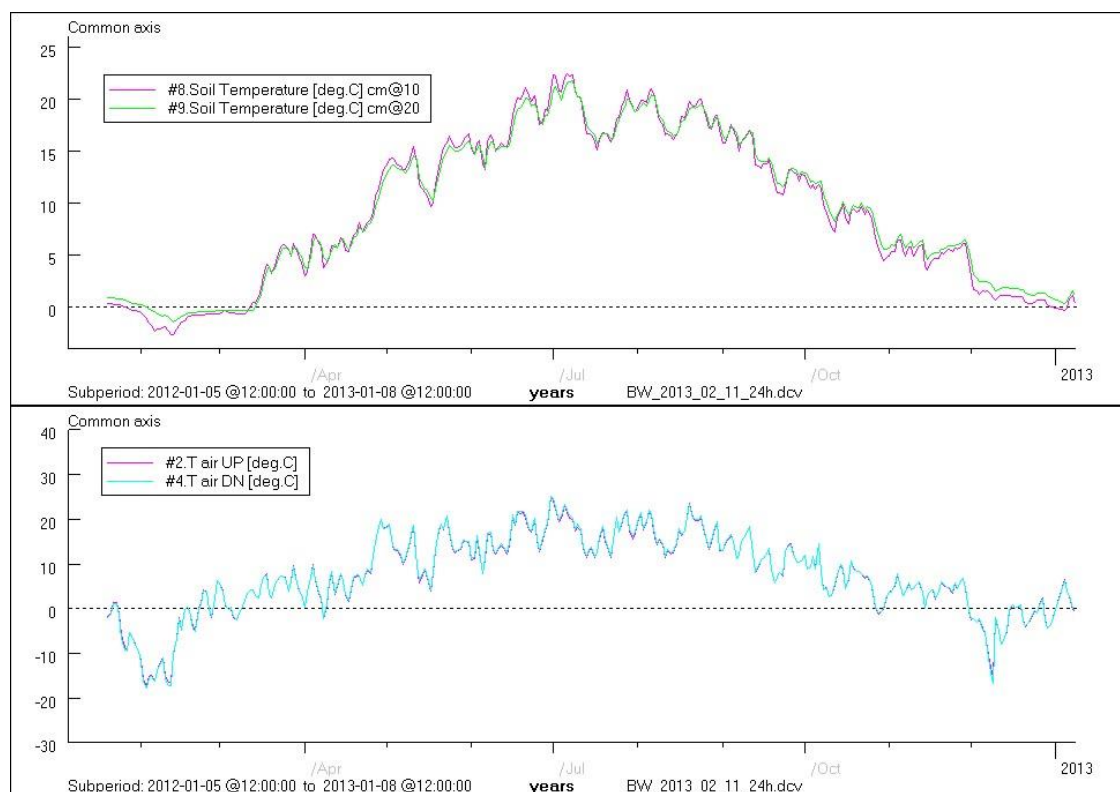
Varianta	Duben		Červenec		Říjen	
	RVK (%)	Vlhkost obj. (%)	RVK (%)	Vlhkost obj. (%)	RVK (%)	Vlhkost obj. (%)
PN	32,3 b	30,1 b	34,3 c	22,2 a	33,2 b	34,5 c
PA	28,7 a	29,1 ab	30,1 b	26,9 a	28,2 a	30,8 b
LO	26,3 a	27,3 a	26,3 a	23,7 a	27,5 a	28,4 a

Rozdílná písmena ve sloupci označují statisticky průkazný rozdíl ($p < 0,05$)

Příloha 17 Objem nekapilárních pórů (%) v hloubce 20-270 mm v jednotlivých měsících – průměr ze tří let.

Varianta	Duben			Červenec			Říjen		
	20-70	120-170	220-270	20-70	120-170	220-270	20-70	120-170	220-270
PN	26,0 c	25,7 c	21,8 c	20,9 b	20,2 b	20,3 b	20,8 b	17,5 b	17,3 b
PA	9,2 a	10,2 a	10,1 a	9,7 a	10,8 a	10,1 a	7,2 a	12,0 a	12,7 a
LO	15,2 b	16,6 b	17,1 b	12,6 a	13,2 a	18,6 b	16,0 b	13,9 ab	16,8 ab

Rozdílná písmena ve sloupci označují statisticky průkazný rozdíl ($p < 0,05$)



Příloha 18 Záznam teploty půdy v hloubkách 10 a 20 cm a průběh denních teplot na odtokoměrných plochách ve Vatíně v roce 2012

Příloha 19 Velikost eroze ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) a povrchového odtoku ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2008

Datum	Srážky	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Holá půda
3.6.2008	45,4	0,0	18,2	20,4	19,4
4.6.2008	16,1	0,0	8,3	5,2	4,5
7.6.2008	10,4	0,0	0,1	0,0	0,1
11.6.2008	11,6	0,0	0,2	0,1	0,3
25.6.2008	15,3	0,0	0,1	0,2	0,5
3., 4., 6. a 7.7.2008	105,7	0,0	15,3	3,5	8,7
12.7.2008	13,0	0,0	0,0	0,0	0,5
15.8.2008	43,2	0,0	3,8	0,0	1,9
16.8.2008	31,5	0,0	0,0	0,0	0,1
Celkový smyv ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)		0,0	45,9	29,4	35,9
Poměr smyvu k holé půdě (%)		0,0	127,7	81,9	100,0
Celkový odtok ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$)		100,5	730,6	451,3	810,0
Poměr odtoku k holé půdě (%)		12,4	90,2	55,7	100,0

Příloha 20 Velikost eroze ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) a povrchového odtoku ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2009

Datum	Srážky	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Holá půda
30.6.2009	33,5	0,0	0,3	1,4	2,0
2.7.2009	33,3	0,0	0,0	0,3	1,1
22.7.2009	35,5	0,2	0,0	4,3	7,8
24.7.2009	15,3	0,0	0,1	0,2	0,4
2.8.2009	36,1	0,0	0,1	0,1	0,1
Celkový smyv ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)		0,3	0,5	6,3	11,5
Poměr smyvu k holé půdě (%)		2,3	4,1	55,1	100,0
Celkový odtok ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$)		71,4	174,5	383,5	427,7
Poměr odtoku k holé půdě (%)		16,7	40,8	89,7	100,0

Příloha 21 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2010

Datum	Srážky	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Holá půda
28.5.2010	30,8	0,0	1,4	2,4	2,4
3.6.2010	24,8	0,0	0,0	0,0	0,0
12.6.2010	31,0	0,1	0,0	0,1	0,0
18.6.2010	11,5	0,0	0,0	0,2	0,2
17.a 18.7.2010	84,5	0,0	0,7	10,6	4,0
23.7.2010	45,5	0,0	0,4	16,6	2,9
23.8.2010	9,2	0,0	0,0	1,6	5,8
Celkový smyv ($t \cdot ha^{-1}$)		0,1	2,6	31,4	15,3
Poměr smyvu k holé půdě (%)		0,7	16,9	205,2	100,0
Celkový odtok ($m^3 \cdot ha^{-1}$)		65,0	228,6	599,1	548,1
Poměr odtoku k holé půdě (%)		11,9	41,7	109,3	100,0

Příloha 22 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2011

Datum	Srážky	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Holá půda
11.6.2011	24,7	0,0	0,3	0,3	0,8
14.6.2011	11,7	0,0	0,1	0,3	0,7
16.6.2011	5,8	0,0	0,1	0,2	0,6
23.6.2011	10,1	0,0	0,2	0,5	0,5
11.7.2011	63,0	0,0	0,0	1,5	2,8
14.7.2011	13,6	0,0	0,3	0,2	4,5
28.7.2011	15,0	0,0	0,0	0,0	4,7
8.8.2011	18,0	0,0	0,0	0,0	2,1
15.8.2011	16,6	0,0	0,0	0,0	1,3
6.9.2011	60,7	1,2	3,5	3,6	24,9
Celkový smyv ($t \cdot ha^{-1}$)		1,3	4,6	6,6	43,0
Poměr smyvu k holé půdě (%)		2,9	10,6	15,3	100,0
Celkový odtok ($m^3 \cdot ha^{-1}$)		185,2	498,0	405,7	807,7
Poměr odtoku k holé půdě (%)		22,9	61,7	50,2	100,0

Příloha 23 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2012

Datum	Srážky	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Holá půda
4.7.2012	58,5	NA	NA	NA	NA
28.7.2012	16,1	0,0	0,0	0,0	0,3
24.8.2012	25,2	0,2	0,0	0,8	0,9
Celkový smyv ($t \cdot ha^{-1}$)		0,2	0,0	0,8	1,3
Poměr smyvu k holé půdě (%)		15,4	1,1	61,8	100,0
Celkový odtok ($m^3 \cdot ha^{-1}$)		250,3	191,4	246,6	255,7
Poměr odtoku k holé půdě (%)		97,9	74,9	96,5	100,0

Legenda: NA – eroze nebyla změřena.

Příloha 24 Velikost eroze ($t \cdot ha^{-1}$) a povrchového odtoku ($m^3 \cdot ha^{-1}$) při jednotlivých srážkových událostech v roce 2013

Datum	Srážky	Pšenice ozimá	Brambory	Kukuřice	Holá půda
29.5.2013	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0
29.7.2013	30,5	0,0	8,4	0,4	6,0
4.8.2013	32,8	0,0	3,6	0,4	3,4
Průměrný smyv		0,0	4,0	0,3	3,1
Celkový odtok		53,4	406,0	196,9	310,8
Poměr smyvu k holé půdě		0,0	127,1	9,2	100,0
Poměr odtoku k holé půdě		17,2	130,7	63,4	100,0