

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta**

**Přirozená retence vody v krajině
versus výstavba retenčních nádrží**

Bakalářská práce

Jan Sedláček

Školitel: RNDr. Martin Hais Ph.D.

České Budějovice 2017

Sedláček, J., 2017: Přirozená retence vody v krajině versus výstavba retenčních nádrží. [Natural water retention in landscape vs. building of water dams. Bc. Thesis, in Czech.] – 34 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Tato práce se zabývá přirozenou retencí vody v krajině. Jsou zde popsány základní principy chování vody v půdě, srovnání zadržení vody v jednotlivých jednotkách krajinného krytu a vlivy člověka na retenci vody včetně cílených protipovodňových opatření a změn land-use. V praktické části je představen experiment, který má za cíl srovnat retenční potenciál změn využití krajiny v povodí vodního díla Orlík s retenční kapacitou samotné nádrže. Součástí práce je i GIS analýza, která měla za cíl zjistit rozlohu jednotlivých jednotek land-use v povodí Orlíku.

Abstract

This work is focused on natural water retention in landscape. There are described basic principles of water behaviour in soil, comparing of water retention in different types of land-use and anthropogenic influences including flood-protection and land-use changes. In the practice part, there is described an experiment which focuses on comparing of retention potential of land-use changes in catchment of water dam Orlík with retention capacity of the dam. This work includes GIS analysis which focuses on areas of each type of land-use in the Orlík catchment.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému školiteli RNDr. Martinu Haisovi Ph.D. za čas, který věnoval konzultacím, a za cenné připomínky při tvorbě této bakalářské práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě, elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Rokycanech dne 18. 4. 2017

.....

Jan Sedláček

Obsah

Úvod - zdůvodnění projektu	1
Literární rešerše	2
1. Definice a význam retence vody v krajině	2
2. Retence vody v půdě.....	2
2.1 Obecné principy chování vody v půdě	2
2.2 Retenční kapacita půd.....	4
2.2.1 Hodnoty retenční kapacity u půd v našich podmínkách.....	5
2.3 Infiltrace a typy odtoku.....	6
3. Retence v jednotlivých typech krajinného krytu	8
3.1 Lesy.....	8
3.1.1 Srovnání různých typů lesů.....	9
3.2 Zemědělsky využívané plochy	11
3.3 Urbanizovaná území	13
3.4 Místa s akumulovanou vodou	14
3.4.1 Vodní plochy	15
3.4.2 Mokřady, rašeliniště.....	15
3.4.3 Údolní nivy	16
4. Vliv člověka na retenci vody v krajině.....	17
4.1 Lidské vlivy v historii	17
4.2 Protipovodňová opatření.....	18
4.2.1 Konvenční velkoobjemové vodní nádrže.....	19
4.2.2 Technická řešení s využitím přirozené retence	19
4.2.3 Krajinné úpravy	20
4.2.3.1 Změna hospodaření v současných jednotkách krajiny.....	20
4.2.3.2 Komplexní změny land-use.....	22
Praktická část	25
1. Cíl projektu.....	25
2. Hypotéza.....	25
3. Experiment	25
3.1 Provedená část	25
3.2 Navržená část.....	27
3.3 Harmonogram a náklady	29
3.4 Zpracování výsledků.....	29
3.5 Další možnosti rozšíření	30
Závěr	31
Použitá literatura	32

Úvod – zdůvodnění projektu

V současné době se stále více hovoří o problémech, jako jsou extrémní sucha či povodně. Jako zažité řešení těchto problémů jsou uváděny konvenční velkoobjemové vodní nádrže, jejichž tvorba je však velmi nákladná a často působí devastaci cenných ekosystémů. Navíc je technicky problematické, aby přehrady plnily obě vodohospodářské funkce, tedy zásobování vodou v době sucha a zároveň ochranu před povodněmi – neboť čím větší je v nich zásoba vody, tím méně další vody pojmu do retenčního prostoru při povodních. To je také jeden z důvodů, proč jsou tyto nádrže při silnějších povodních málo účinné, jak bylo možno vidět u Vltavské kaskády v roce 2002.

Jako alternativa k těmto nádržím existuje využití přirozené retence vody v krajině. Různé jednotky krajinného krytu mají různé vodozádržné vlastnosti (jak bude popsáno v literární rešerši), což vytváří potenciál pro zvýšení množství vody, které krajina dokáže zadržet. Na rozdíl od přehrad je zde navíc řešeno více problémů najednou, protože krajina s vyšší retencí tlumí jak povodňové odtoky, tak i extrémny typu sucha.

Zatímco retenční kapacita přehrad je poměrně přesně definována, u krajiny jako takové je kvantifikace obtížnější, takže chybí srovnání účinnosti. Problémem je i skutečnost, že neexistuje sjednocená metodika pro přesné srovnání vodozádržné účinnosti jednotlivých typů land-use. Cílem projektu je proto porovnat retenční kapacitu jednotlivých typů land-use a následně srovnat retenční potenciál, který by vznikl hypotetickou změnou využití krajiny v povodí vodního díla Orlické nádrže, s využitelnou retenční kapacitou samotné Orlické nádrže.

Literární rešerše

1. Definice a význam retence vody v krajině

Jednou z klíčových funkcí krajiny je její schopnost zadržet v sobě určité množství vody. Tato vlastnost se označuje jako retenční schopnost krajiny. Přesněji by se dala definovat jako zadržení vody na vegetaci, v objektech v povodí, půdě, mikrodepresích, poldrech a vodních nádržích (Petříček & Cudlín, 2003).

Význam retence vody spočívá především v tom, že se voda v krajině (ať už pro potřeby člověka, nebo např. pro transpiraci rostlin) udrží i do mimosrážkových období. Právě v České republice je tento význam klíčový – až na několik drobných výjimek sem totiž nepřitéká žádný vodní tok, takže jsou zde prakticky jediným zdrojem vody srážky. Proto je pro nás důležité, aby se v krajině zadrželo co nejvíce vody – při snížené retenci je v krajině zadrženo vody málo, což v mimosrážkových obdobích vede k jejímu nedostatku. Zadržení vody v krajině ale pomůže nejen před suchem, nýbrž i před povodněmi, protože když voda odtéká z krajiny pomaleji, sníží se maxima povodňových průtoků a tím i rozsah zaplavených oblastí.

Kromě zmenšení následků sucha a povodní má vyšší retence vody v krajině i řadu dalších pozitivních důsledků. Zlepšuje například místní mikroklima a pomáhá snižovat teplotní extrémy (díky vysoké měrné tepelné kapacitě vody). Krajina s vyšší retencí vody také bývá pestřejší, což má příznivý vliv na biodiverzitu. Mnohé druhy (mokřadní rostliny, vodní ptáci, aj.) jsou dokonce přímo vázané na vodní toky a plochy v krajině (Štěrbá et al., 2008). Z těchto všech důvodů je přínosné usilovat o to, aby se množství vody navázané v krajině co nejvíce zvýšilo.

V této rešerši je rozebírána role různých složek krajiny na retenci vody a vliv antropogenních zásahů na množství takto zadržené vody. Na základě těchto poznatků bude následně zjištěno, zda může být přirozená retence účinnější ve snižování důsledků povodní než klasické velkoobjemové retenční nádrže.

2. Retence vody v půdě

2.1 Obecné principy chování vody v půdě

Půda hraje v retenční schopnosti krajiny klíčovou roli. Přichází totiž do styku s většinou srážkové vody (pokud nepočítáme vodu zadrženu intercepční vegetací a následně odpařenou, apod.) – ať už voda projde přímo půdním profilem, nebo steče po jejím povrchu. Tím pádem je zřejmé, že jakákoliv změna vlastností půdy (včetně vlastností vegetace, která je zde také důležitá – viz např. ochrana před erozí) může výrazně ovlivnit množství vody zadržené v krajině.

Obecně je půda složena z drobných anorganických (písek, jíl) i organických (odumřelé organismy, humus) částic, které tvoří pevnou složku, a půdního vzduchu a vody, které tvoří kapalnou a plynnou složku půdy. (Kromě toho se zde nacházejí i živé organismy, především kořeny rostlin, hyfy hub a různé mikroorganismy, které se podílejí na dekompozici a dalších procesech v půdě.) Strukturou, která v sobě zachycuje kapalnou a plynnou fázi, jsou **půdní póry**. Ty lze definovat jako tu část objemu půdy, která není vyplněna pevným materiálem. Póry mohou být různých velikostí, tvarů a původů – od nepatrných mezer mezi půdními částicemi až po makroskopické trhliny, prostory po vyhnilých kořenech či chodbičky půdních živočichů.

Podíl těchto pórů na celkovém objemu půdy se nazývá jako **porozita půdy**. Ta bývá vyjádřena v procentech, u většiny půd se pohybuje mezi 30 a 70 %, u rašelinných půd se dokonce může blížit i 90 % (Nimmo, 2004). Kromě porozity je u půdy zkoumána i další veličina, a to **saturace** – což je podíl objemu pórů, který je zaplněn vodou (lze jej vyjádřit i jako podíl procentuálního objemového zastoupení vody v půdě a celkového prostoru tvořeného póry). Obě tyto veličiny jsou klíčové pro retenci vody – čím poréznější je půda, tím více vody je v sobě schopná zadržet; saturace nám pak ukazuje, z jaké části je tento retenční prostor využit. To hraje roli například při utužení půd zemědělskou technikou, které vede ke snížení porozity půdy a tím i ke zmenšení celkové retenční schopnosti.

Při popisu vody v půdních pórech si již nevystačíme s klasickou makrofyzičnou – půdní struktura je totiž natolik jemná, že v ní voda netvoří souvislou hladinu, ale je zde držena přitažlivými silami, jako je **kapilarita** (pohyb vody proti gravitační síle v tenkých pórech) a **adsorpce** (přilnavost vody k povrchu a tvorba tenkých filmů okolo půdních částic a agregátů). Platí přitom, že kapilarita hraje větší roli v písčitéch půdách, zatímco v těch jílovitých, které mají díky jemnějším částicím mnohem větší plochu povrchu na daný objem půdy, se mnohem více uplatňuje adsorpce – která je navíc ovlivněna elektrickou dvojrůstvou kolem jílových částic a výměnou kationtů (Tuller & Or, 2004). Záleží zde také na tvaru pórů – zatímco u pórů polygonového průřezu má voda tendenci zůstat v rozích, z pórů s kruhovým průřezem může za stejných podmínek voda zcela odtéct (Tuller & Or, 2004).

Výsledkem adsorpce a kapilarity je veličina, která se označuje jako **matriční potenciál**. Ten do určité míry udává, jak se voda zadržaná v půdě bude chovat. Pokud je potenciál nižší (více záporný), než je určitá úroveň, značí to suchou půdu, ze které rostliny zpravidla nedokáží získat vodu; při optimálním matričním potenciálu je voda v půdě stále zadržena, ale je již dostupná pro rostliny; zatímco při ještě vyšším potenciálu již voda není v půdě zadržována a dojde k jejímu pohybu a promývání půdy (Batjes, 1996).

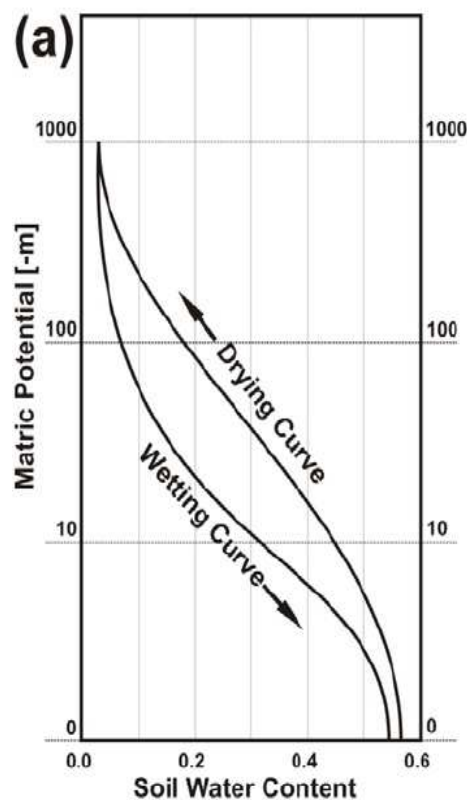
Matriční potenciál do jisté míry odpovídá obsahu vody v půdě, nicméně se zde nejedná o lineární závislost. Důležité ovšem je, že vodní retenční křivka (udávající závislost matričního potenciálu a obsahu vody v půdě) má při přibývání vody v půdě jiný tvar než při jejím vysoušení – křivka vysušování půdy je v grafu (se zápornou stupnicí matričního potenciálu – viz Obr. 1) položena výše, což znamená, že je zde při stejném obsahu vody nižší (zápornější) potenciál než při naplňování vodou (Tuller & Or, 2004). To v praxi znamená především to, že půdní voda je pro rostliny dostupnější (za jejího stejného procentuálního obsahu) při zamokřování než při vysoušení.

2.2 Retenční kapacita půd

Jak již bylo naznačeno, vodní režim půd se skládá ze dvou střídajících se fází. Při **akumulační fázi** (která existuje při nižším matričním potenciálu) je voda zadržována v půdních pórech a téměř neodtéká do podloží. Množství vody zde kolísá podle toho, zda převažuje syčení půdy srážkovou vodou nebo odběr vody na evapotranspiraci. Pokud převažují srážky nad odparem, zvyšuje se množství vody až do okamžiku, kdy dojde k překročení určité hodnoty matričního potenciálu a nastane **perkolační fáze**. Během této fáze není přitékající voda v půdě téměř zadržována a prochází dále do podloží, a to až do doby, kdy hodnota matričního potenciálu klesne pod určitou úroveň (Tesař et al., 2001).

Z toho je zřejmé, že množství vody, které daná plocha půdy aktuálně dokáže zadržet, závisí na tom, ve které fázi vodního režimu se půda nachází. Půda v akumulační fázi dokáže zastavit či výrazně zeslabit odtok srážkové vody; množství takto zadržené vody závisí na tom, o kolik je matriční potenciál nižší než mezní hodnota mezi akumulační a perkolační fází. Naopak pokud se půda již na začátku srážkové vlny nachází v perkolační fázi či těsně před ní, voda zde není zadržována téměř vůbec a odtéká do podloží; v extrémních případech dokonce může půda odtok zesílit, protože z ní odteče i ta voda, která v ní byla předtím akumulována. To se ale děje jen v malých povodích (do cca 10 km²), která jsou poměrně homogenní, takže půda může být ve stejné fázi na velké části povodí; ve větších povodích, která jsou různorodější, je něco podobného nepravděpodobné (Tesař et al., 2001).

Množství vody, které se nachází v půdě ve chvíli, kdy začíná perkolační fáze, můžeme nazvat jako **retenční kapacitu půdy**. Tato kapacita se liší podle druhu a struktury půdy; významnou roli zde hraje i mocnost půdy v dané lokalitě – např. u spraší je kapacita



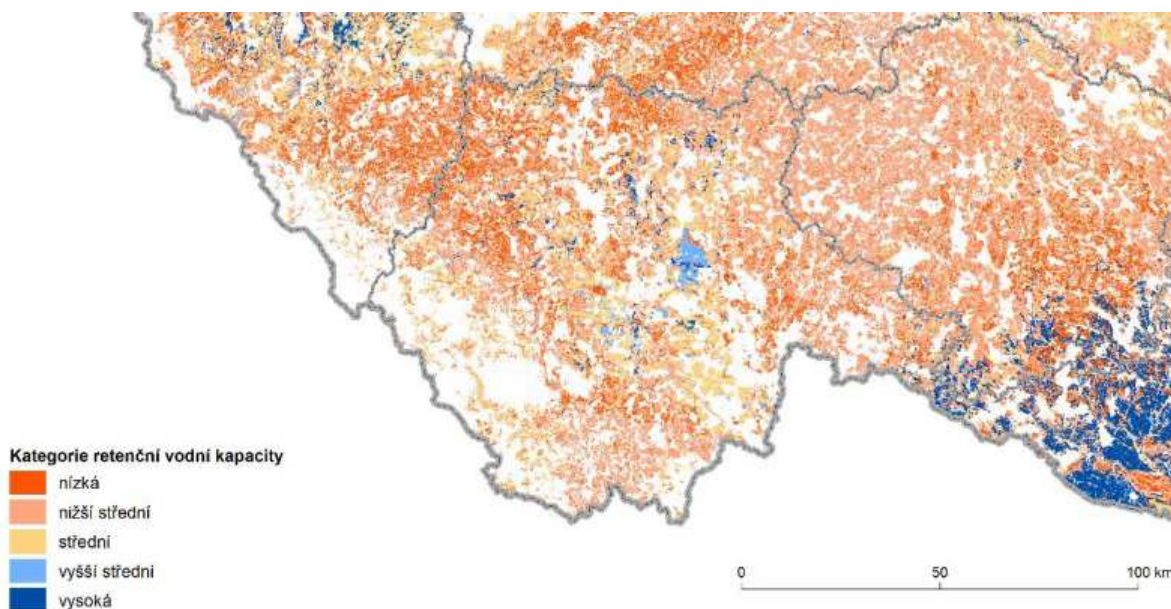
Obr. 1: Vodní retenční křivky
(Tuller & Or, 2004)

obecně vyšší než u podzolů. Neplatí to ale absolutně, často hraje roli i intenzita srážek v porovnání s infiltrační kapacitou půdy (tedy zda se voda vůbec vsákne a retenční kapacita půdy bude využita).

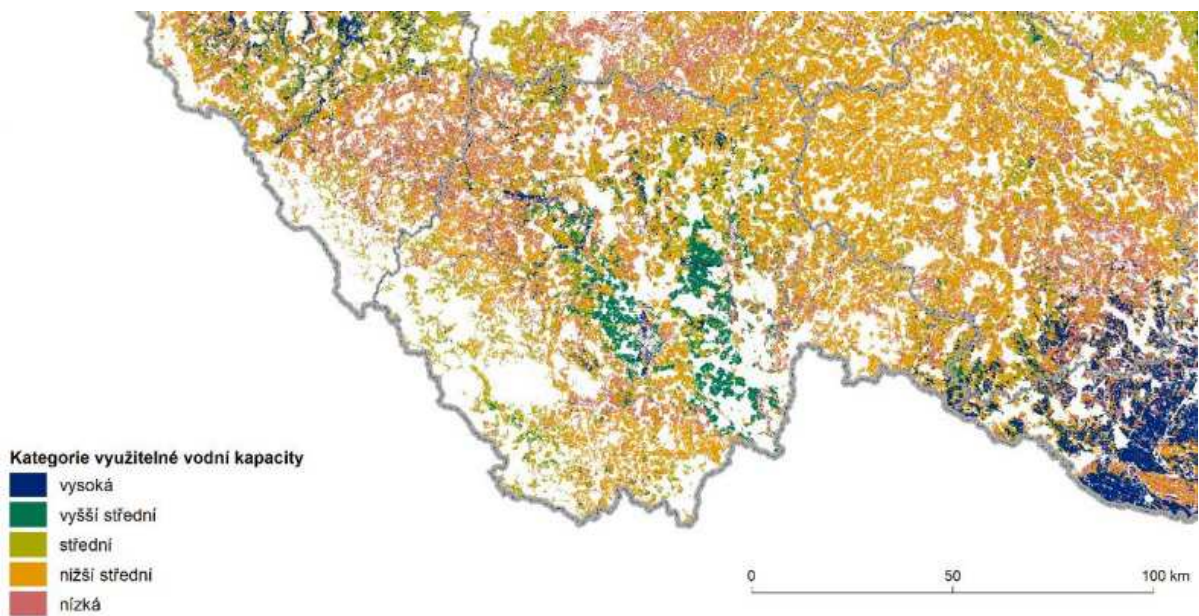
Obecně je také důležité množství organické hmoty obsažené v půdě. Například v histosolech (půdy velmi bohaté na organické látky) je ve světě uváděna kapacita až 480 mm (Batjes, 1996). To je dáno především tím, že rozkládající se organická hmota v sobě dokáže vázat velké množství vody – uvádí se například, že 1 kg humusu na sebe může navázat až 3 litry vody, zatímco u čistě minerální půdy je to jen 0,5 litru; tento rozdíl je dán především velkým specifickým povrchem humusu (Úlehla, 1947).

2.2.1 Hodnoty retenční kapacity u půd v našich podmínkách

Pro měření retenční kapacity existuje celá řada různých metodik, proto tyto výsledky nejsou vždy mezi jednotlivými autory zcela srovnatelné a dávají spíše rámcovou představu. Zřejmě nejkompaktnější data existují pro zemědělské půdy, a to v mapových podkladech Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy – na základě komplexního průzkumu půd, který proběhl v letech 1961-1970. Z map je patrné, že např. potenciální retenční kapacita zemědělských půd v povodí Orlicku (což je zájmové území pro tuto práci) by se nejčastěji měla pohybovat okolo 100-160 mm, jako využitelná kapacita je uváděno 80-150 mm (viz Obr. 2 a 3). Nicméně jsou to údaje staré okolo 50 let a bez návazností na to, jakých hodnot by podle stejných metodik dosahovala retenční kapacita např. lesních půd.



Obr. 2: Potenciální ret. kapac. půd. Kategorie jsou následující: Nízká = pod 100 mm, nižší střední = 100-160 mm, střední = 160-220 mm, vyšší střední = 220-320 mm, vysoká = nad 320 mm. (Map. podklady VÚMOP)



Obr. 3: Využitelná ret. kapacita půd. Kategorie jsou následující: Nízká = pod 80 mm, nižší střední = 80-110 mm, střední = 110-150 mm, vyšší střední = 150-200 mm, vysoká = nad 200 mm. (Mapové podklady VÚMOP)

Mnozí autoři rozlišují, zejména v lesích, kapacitu potenciální (vyjádřená celkovou porozitou) od té skutečné (po odečtení pórů, které jsou pro vodu nedostupné nebo již zaplněné). Například Kantor & Šach (2002) uvádějí celkovou kapacitu 270 mm, z toho 40-60 mm jako využitelný prázdný prostor; podobně Švihla (2014) zjistil, že ve zkoumané půdě lze využít okolo 43 mm z celkových 123,3 mm potenciální retence. Jiní autoři měří pouze reálnou kapacitu; Lichner et al. (2004) naměřili na horské louce na Šumavě využitelnou kapacitu 60-75 mm; toto měření se podle nich přibližně shoduje s výsledky dalších prací v různých horských oblastech ČR. Dále byla zkoumána kapacita svrchních vrstev lesních půd; Podrázský & Remeš (2005) naměřili v org. horizontu a ve svrchních 10 cm toho minerálního cca 50 mm, Švihla et al. (2006) uvádějí ve svrchní propustné vrstvě 38-43 mm.

2.3 Infiltrace a typy odtoku

Nezáleží ale jen na tom, kolik vody je půda celkově schopná pojmout, nýbrž i na rychlosti, kterou může být voda vstřebávána do půdy. Pokud je dešť natolik intenzivní, že se voda nestačí infiltrovat do půdy, dochází k tzv. **hortonovskému odtoku**. Při něm voda stéká po povrchu půdy a hromadí se v případných povrchových depresích; po jejich naplnění vyteče a stéká dál. Tento jev vidíme hlavně ve vlhkých oblastech (údolní nivy, aj.), kde je půda nasycena vodou vlivem vysoké hladiny podzemní vody, takže se další voda nemůže vsakovat. Hortonovský odtok se ale může vyskytovat i mimo vlhké oblasti, například při přívalových deštích na narušených půdách (často v oblastech s intenzivním zemědělstvím), kde intenzita deště překračuje infiltrační kapacitu půdy. Na nenarušených půdách není tak

častý, protože infiltrační kapacita zde může přesahovat i 200 mm/hodinu, což je intenzita, které většina konvektivních dešťů nedosahuje (Langhammer, 2007).

Druhým typem odtoku je odtok ze saturace neboli **nehortonovský odtok**. Ten probíhá pod povrchem půdy; dochází k němu při dosažení výše zmíněné perkolační fáze, kdy je dosaženo nasycení půdy a voda se již v půdě nezdržuje. Obvykle k němu stačí menší intenzita srážek, než jaká je potřeba k tomu hortonovskému – a oproti němu pokračuje i po skončení srážek a jeho hodnota klesá pozvolněji. Někdy se ještě dělí na **hypodermální odtok**, který probíhá v mělkých vrstvách, kde jsou ještě přítomny vzduchové póry, a **odtok bazální**, který se tvoří v místech, kde jsou podzemní vrstvy zcela satureovány (Langhammer, 2007).

V případě, že podpovrchová odtékající voda narazí na půdu, která je již nasycena vodou, může docházet k tzv. zpětnému toku, kdy se voda dostane na povrch a teče dále po něm (zejména tehdy, pokud odtok probíhá blízko povrchu ve svažitém terénu). V průběhu déletrvajících srážek se zóna nasycení často rozšiřuje nahoru do svahu, což způsobí, že linie přechodu podpovrchového odtoku v povrchový se posouvá stále výše (Langhammer, 2007).

Retenční schopnosti půdy ale závisí i na mnoha dalších podmínkách a vlastnostech půdního pokryvu, zejména na půdním typu. Například písčité půdy jsou obecně lehké, porózní a propustné, což u nich způsobuje velkou infiltrační schopnost, ale také relativně malou retenční kapacitu, protože voda proteče bez většího zdržení do podloží. Utužené jílovité půdy mohou mít naproti tomu větší kapacitu, nicméně mívají sníženou schopnost infiltrace vody (zejména pokud je utužena povrchová vrstva), což brání tuto kapacitu více použít (Daňhelka, 2007). Retenční kapacitu též snižuje skeletovitost půdy, neboť kameny zmenšují objem jemné půdy a tím i celkovou porozitu. Pro rychlost infiltrace zase může být problematická kůra, která se tvoří na povrchu degradované půdy, zejména po větších deštích a následném sušším období (Mu et al., 2015). V těchto směrech se zdají být ideální půdy obsahující málo kamenů a hodně organické hmoty, která, jak již bylo zmíněno, váže velké množství vody a zároveň dobře vsakuje vodu a nemá tendenci tvořit povrchové kůry.

V neposlední řadě závisí množství zadržené vody v půdě také na sklonu. Je logické, že s rostoucím sklonem svahu klesá podíl infiltrované vody a roste odtok, především však klesá časový interval mezi začátkem srážek a začátkem formování odtoku. Podíl vsáknuté vody se výrazně snižuje s rostoucím svahem především u propustnějších půd, u těch méně propustných není rozdíl tak výrazný (Mu et al., 2015).

Kromě těchto obecných vlastností půdy, které zde byly popsány, se mohou půdy a jejich vodozadržné schopnosti lišit i podle toho, ve kterém typu krajinného pokryvu se nacházejí – zde hrají roli zejména různé typy vegetace a různé způsoby využívání této krajiny člověkem. Základní typy krajiny v našich podmínkách budou popsány v následujících kapitolách.

3. Retence v jednotlivých typech krajinného krytu

3.1 Lesy

Lesy jsou velmi důležitým činitelem při retenci vody v české krajině; ačkoliv pokrývají jen zhruba třetinu území republiky, spadne zde většina srážek – což je dané tím, že se větší procento lesů nachází v horských oblastech, kde jsou vyšší srážkové úhrny (Kantor & Šach, 2002). Oproti jiným typům krajinného pokryvu jsou obecně pro retenci vody příznivější, je například uváděno, že dokážou zachytit celkem 5-9x víc vody než bezlesá krajina (Kantor & Krečmer, 2003).

Příčin, proč tomu tak je, existuje hned několik. Jednou z nich je větší intercepce, kdy stromy zachytí na svém povrchu řádově více srážkové vody než bylinný pokryv – což je navíc umocněno i častějším výskytem mechů a lišejníků, o nichž je obecně známo, že v sobě dokáží vodu těž poutat. Uvádí se, že se v lesích takto zachytí 8-18 % z celkového množství spadlých srážek (Kantor & Krečmer, 2003); jiné zdroje uvádějí až kolem 30 %, ale především u slabších srážek (Krämer & Hölscher, 2009). U těch silnějších má intercepce větší význam jen v počátečních fázích, později již není její vliv tak výrazný (a třeba u povodňových srážek nehraje větší roli).

Důležitá je také skutečnost, že voda zachycená intercepcí může stékat po kmeni (zejména u stromů s hladkou kůrou – např. buk) přímo ke kořenům, kde se podél kořenů může dostat do hlubších vrstev snáze, než kdyby srážky spadly na půdu. Množství takto steklé vody kolísá, podle výzkumu prováděného v listnatých lesích v Německu se pohybuje od 0,5 % do 6 % celkových srážek (Krämer & Hölscher, 2009).

Vyšší vlhkost, nižší teplota, slabší vítr a zastínění půdy korunami stromů také chrání půdu před nadměrnou evaporací a následnou degradací horní vrstvy půdy (Kantor & Krečmer, 2003). Přitom je však v půdě vytvářena i rezerva pro příští srážky, neboť stromy pomocí transpirace postupně snižují matriční potenciál půdy, čímž citlivě navyšují její vodní retenční kapacitu (Wahren et al., 2007). Důležitá je zde zejména skutečnost, že díky vlhčímu mikroklimatu (oproti okolní krajině) se část páry uvolněné transpirací vrátí v podobě srážek, čímž dojde k posílení malého vodního cyklu a voda se vrátí do krajiny, aniž by prošla vodním tokem (což se děje i v nelesní krajině, ale ne v takové míře). Ne zcela zanedbatelnou roli také hraje pomalejší tání sněhu oproti nelesní krajině, a to vlivem zástínu lesních dřevin (Maděra, 2014).

Především ale posiluje retenci vody v lesích (a to i u déletrvajících srážek) jiná struktura půdy. Oproti orné půdě či travním porostům zde díky výraznějšímu opadu bývá silnější vrstva organické hmoty, která, jak již bylo zmíněno, má vyšší jak infiltrační, tak i celkovou retenční kapacitu (neplatí to sice absolutně – kupříkladu u smrčín na podzolech je

organické hmoty v půdě relativně málo – nicméně u většiny lesů na půdách, jako jsou kambizemě, je organická hmota významným faktorem). Uvádí se například, že každý centimetr opadu zadrží 2-3 mm vody (Kantor & Krečmer, 2003). Důležité jsou zde i mechorosty, které díky svému nasáknutí mohou zadržet okolo 10 mm vody (Krešl, 1999). Podobnou roli zde hraje i rozkládající se dřevo, které jednak váže vodu přímo ve své struktuře, ale navíc odtud může voda přejít i do hyf xylofágních hub. Tímto způsobem může rozkládající se dřevo zadržet až 2,5x více vody, než kolik je jeho hmotnost v suchém stavu (Amaranthus et al., 1989). V lesích se také nachází na danou jednotku plochy více kořenů, které navíc oproti nelesní vegetaci dosahují zpravidla do větších hloubek – u dubů, buků i řady dalších dřevin kořeny běžně sahají pod 1 m hloubky (Válek, 1977). Tím pádem může voda protékat do hlubších vrstev průlinami kolem živých kořenů i dutinami po těch odumřelých. To je také jedna z příčin, proč se v lesích převádí větší část odtoku pod povrch, čímž dochází ke zpoždění kulminace odtokové vlny (Kantor & Krečmer, 2003).

Množství zadržené vody ale dost závisí i na klimatických podmínkách, geologickém podloží a především na podobě lesního porostu.

3.1.1 Srovnání různých typů lesů

V našich podmínkách si můžeme srovnat retenci ve dvou základních typech lesů, které zde lze vidět – a to jsou **listnaté či smíšené lesy** s přírodě blízkou druhovou skladbou, které zde (až na nejvyšší polohy) dříve převládaly, a intenzivní **smrkové monokultury**, které jsou dominantní v současné době.

Mezi lesníky a environmentalisty (ale i laickou veřejností) panuje debata, zda mohou smrkové monokultury zadržet vodu stejně účinně jako přírodě blízké lesy, nebo nikoliv. Zde je nutno vzít v potaz obecné rozdíly mezi těmito typy lesů. Oproti listnáčům mají smrky obecně mělké kořeny; zatímco u většiny listnáčů sahají do hloubky několika metrů (u dubu až 10 m, ale i u buku – kde je srovnání se smrkem vhodnější, protože dříve dominoval tam, kde dnes dominuje smrk – dosahují kořeny pod 1 m hloubky), hloubka výrazného prokořenění smrku se pohybuje řádově spíše v desítkách centimetrů (Válek, 1977). Důležitým faktorem u jehličnatých monokultur je také kyselý opad, který snižuje diverzitu půdního edafonu.

V některých ohledech mohou být smrky pro retenci vody příznivější. Nadzemní části smrků dokážou v rámci intercepce zachytit více vody než srovnatelný listnatý porost (Krešl, 1999), což se ještě umocňuje mimo vegetační sezónu. Právě tehdy se projevuje i další výhoda smrků (a obecně jehličnanů, kromě modřínu) – schopnost do určité míry asimilovat i mimo vegetační sezónu, čímž odebírají z půdy vodu a zvětšují tím její retenční kapacitu. Při jarním tání je navíc sníh ve smrčinách méně osluněn než v holých porostech listnáčů, kde je tání o zhruba 30 % intenzivnější (Kantor & Šach, 2002).

Výzkumy také naznačují, že ve smrčinách může být více rozkládající se organické hmoty než v listnatých lesích rostoucích ve srovnatelných podmínkách (Podrázský & Remeš, 2005). To je zřejmě dáno tím, že nižší pH půdy (způsobené kyselým opadem) ochuzuje půdní edafon, čímž zpomaluje rozkladné procesy, proto se zde hmota hromadí. Je ale pravdou, že s ochuzením edafonu může klesat kvalita této organické hmoty, což může na retenci vody mít negativní vliv. Množství organické hmoty navíc záleží i na tom, kolik mrtvého dřeva je zde ponecháváno při lesnickém hospodaření.

Tato potenciální výhoda smrků se navíc týká pouze nejsvrchnější vrstvy půdy, což dokládají i lesnické výzkumy. Ačkoliv u povrchové, organické vrstvy půdy byla zjištěna retenční kapacita u obou typů porostů podobná (místo dokonce o něco vyšší u smrku), již v nejsvrchnějších 10 centimetrech minerální půdy se projevil pozitivní vliv listnáčů oproti smrkové monokultuře (Podrázský & Remeš, 2005). Tento vliv s hloubkou půdy dále narůstá, je to dáno již zmíněnými hlubšími kořeny většiny listnáčů oproti smrkům; tyto kořeny umožňují vodě vtok i do hlubších vrstev, což je u smrkových monokultur ztíženo (Válek, 1977).

Dalším významným vlivem hovořícím v neprospěch smrčin je pomalejší vsak vody do půdy oproti listnatým lesům (Válek, 1977). Tento jev sice není takovým problémem v rovinných lesích a u déletrvajících slabších srážek (v takových případech má voda dostatek času na vsáknutí), nicméně to nabývá významu ve svažitém terénu a především u přívalových srážek, kdy voda ve smrčinách odtéká po povrchu pryč (viz hortonovský odtok), aniž by byla výrazněji využita retenční kapacita půdy – což je jeden z příkladů toho, že není důležitá jen samotná kapacita, ale i infiltrační schopnost půdy (Wahren et al., 2007). V listnatých lesích se navíc může retenční kapacita půdy při déletrvajících srážkách navyšovat – a to díky činnosti žízá a dalšího edafonu průběžně vytvářejícího nové póry, které jsou navíc (oproti pórům vzniklým anorganickou cestou) stabilnější díky vylučovaným organickým látkám, které zpevňují jejich stěny (Coleman et al., 2004).

Z těchto informací lze usuzovat, že zejména ve svažitém terénu jsou pro retenci vody vhodnější lesy se zastoupením buku a dalších listnatých dřevin. Nemusí se ale jednat jen o čistě listnaté porosty – v mnoha případech stačí ve smrčině již příměs cca 1/5 buku k tomu, aby se zlepšily vodozadržné vlastnosti lesní půdy (Válek, 1977). Tím je les přiblížen přirozenému stavu, kdy díky větší infiltrační schopnosti půdy a hlubšímu prokořenění vzniká výrazně slabší povrchový odtok než například na polích či loukách (Wahren et al., 2007).

Dalším problémem smrkových monokultur je i větší náchylnost k větrným či hmyzím kalamitám. Ty mohou v daném okamžiku výrazně snížit retenční schopnost lesa, to samé se ale týká i umělých holosečí bez ohledu na typ lesa. Pokud dojde k odstranění stromového patra na větší ploše (ať už při holoseči, nebo kalamitou), tak se tím jednak

zmenší objem vody zadržené intercepcí, ale především vzroste evaporace, což přispívá ke zhoršení fyzikálních vlastností půdy (Podrázský & Remeš, 2005) a sníží se množství vody, které půda pojme – což je zapříčiněno více faktory. Jedním z nich je urychlení rozkladu organické hmoty a její mineralizace. Dále zde dochází k rozpadu mechového patra, ke vzniku erozních rýh a v neposlední řadě i ke zhutnění půdy (ať už při seči, nebo odklizení škod po kalamitě), což zmenšuje půdní póry a propustnost půdních vrstev. Na retenci také mohou mít nepříznivý vliv lesní cesty používané ke svážení dřeva – to zejména tehdy, pokud jsou zahlobené v terénu. V takovém případě se často stává, že voda, která se vsákla v lese nad cestou, vytéká ze zářezu a odtéká bez většího zadržetí.

Významný vliv na retenci vody má také podoba vodních toků v lesích. Na přirozených lesních vodotečích se nachází řada překážek typu padlých kmenů, které zmenšují kinetickou energii toku a vytvářejí četné drobné rozlivy, kde se voda drží i v obdobích sucha; naproti tomu v intenzivně obhospodařovaných lesích obvykle mrtvé dřevo téměř chybí, což urychluje tok vody v těchto vodotečích a zvyšuje erozi a odnos materiálu.

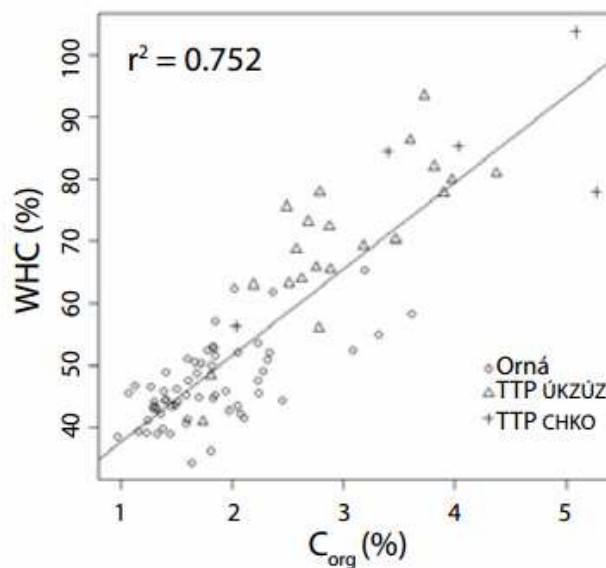
3.2 Zemědělsky využívané plochy

Také zemědělské hospodaření má na retenci vody v krajině významný vliv, zejména proto, že se dotýká více než poloviny našeho území. Obecně lze říci, že zemědělské plochy mají v porovnání s těmi lesními menší intercepci a zpravidla je zde v půdách méně organického uhlíku; naopak oproti zastavěným územím se tyto plochy díky absenci zpevněných povrchů vyznačují větší infiltrační schopností půdy (pokud není půda příliš utužena zemědělskou technikou, pak ten rozdíl není tak značný).

V našich podmínkách existují dva základní typy těchto ploch. Jedním z nich jsou **orné půdy** s konvenčním hospodařením, kde je po část roku odkrytý půdní povrch a vlivem orby zde chybí horizontální zvrstvení půdních profilů (alespoň v povrchové části, kam dosáhne orba). Další vlastnosti těchto ploch se liší hlavně podle pěstovaných kultur. Druhým základním typem jsou **trvalé travní porosty**, kde je povrch neustále pokryt vegetací, která je určitým způsobem (sečením či pastvou) udržována, přičemž zpravidla nejsou narušovány půdní profily. Kromě těchto dvou základních typů můžeme v menší míře vidět i další, jako jsou zahrady, sady, vinice, plantáže, apod. – zde retence vody závisí na obecných faktorech typu porozity půdy a obsahu organické hmoty; podle způsobu obhospodařování se pak mohou blížit buď spíše orné půdě, nebo travním porostům.

Orba, zejména ta hluboká, se může na první pohled zdát z pohledu retence vody pozitivním jevem, neboť navyšuje porozitu půdy a tím i její celkovou retenční kapacitu. V tomto ohledu ovšem nejsou zahrnuty některé důležité skutečnosti. Je například známo, že orba přispívá k vyšší mineralizaci humusu (Carvajal et al., 2006), což vede k tomu, že se

v orných půdách nachází zhruba o 50 % méně organického uhlíku než např. v lesích (Šantrůčková et al., 2014). Právě organický uhlík je přitom, jak již bylo zmíněno, klíčovým faktorem pro infiltraci a retenci vody v půdě. Dobře je to vidět v grafu na Obr. 4, který znázorňuje závislost množství zadržené vody na obsahu organického uhlíku. Z grafu je dobře patrný jak nárůst retence vody s přibývajícím podílem uhlíku, tak i skutečnost, že orné půdy tohoto uhlíku obsahují průměrně méně než travní porosty. Uvádí se, že jediným typem plodin, které vyrovnávají bilanci uhlíku v půdě, jsou jeteloviny a luštěniny; ostatní plodiny mají tendenci obsah uhlíku snižovat (Šarapatka et al., 2002).



Obr. 4: Závislost množství vody zadržené v půdě na obsahu uhlíku
(Šantrůčková et al., 2014)

Kromě snižování obsahu uhlíku v půdě má orba vliv i na strukturu půdy. Je uváděno, že bezorebné způsoby hospodaření a s nimi spojené ponechávání organické hmoty na povrchu snižují erozi způsobenou kinetickou energií dopadajících kapek a zlepšují strukturu půdy a infiltraci vody (Carvajal et al., 2006). To potvrzují i Šantrůčková et al. (2014), kteří zmiňují špatnou strukturu a náchylnost k erozi a rozplavování těch půd, které pravidelně procházejí orbou. Dalším výrazným problémem spojeným s orbou je utužení půdy i podorničních vrstev, které je spojeno především s použitím těžké mechanizace a které způsobuje snížení porozity půdy a horší infiltraci i vsak do hlubších vrstev (Šarapatka et al., 2002).

Dalším faktorem mohou být větší teplotní extrémů; teplota povrchu holé půdy (zejména pokud je písčité) může v letních dnech dosáhnout až 50 °C, zatímco u travních porostů dosahuje maximum jen zhruba 40 °C (Rožnovský, 2014). To u polí zvyšuje evaporaci, což může strukturu půdy dále poškozovat.

Jak již bylo zmíněno, závisí retence vody u orných půd také na kultuře, která je zde v danou chvíli pěstována. Obecně lze říci, že vhodnější jsou plodiny s hlubšími kořeny (podobný princip jako u lesů) a s vyšší pokryvností (po co nejdelší dobu), která má vliv jednak na intercepci, jednak na zvyšování retenční kapacity pomocí transpirace. V tomto ohledu byl proveden výzkum na kukuřici, kde byla právě u jejího středního růstového stadia (s největší pokryvností a transpirací) zjištěna nejdelší prodleva mezi začátkem srážek a začátkem formování povrchového odtoku. Nicméně při vyšší intenzitě deště se růstová

stadia s různou pokryvností lišila méně (ve veličinách, jako je množství odtoku a doba, než se začne utvářet), což naznačuje omezenou retenční kapacitu polních kultur (Mu et al., 2015).

Zejména ve svažitém terénu zde hraje velkou roli **eroze**, především ta vodní. S rostoucím svahem sice nestoupá celkový odtok, ale jeho iniciace začíná mnohem dříve, takže je půda ohrožena erozí i při mnohem slabších srážkách (Mu et al., 2015). Týká se to hlavně širokořádkových plodin s pozdním nástupem vyšší pokryvnosti – především tedy kukuřice, o níž je obecně známo, že její pěstování umožňuje významnou erozi a často způsobuje i škody na majetku pod polem. Z polí jsou odnášeny hlavně jemné částice a organická hmota – tedy právě ty části půdy, která zadrží nejvíce vody. Tyto částice se z výše položených oblastí splavují do nížin – přitom právě ve vyšších nadmořských výškách jsou často vyšší srážkové úhrny, takže je tam vysoká retenční schopnost o to víc potřeba (Šantrůčková et al., 2014). Spolu s větrnou erozí (která je typická pro rozlehlá pole, kde může vítr nabrat vysokou kinetickou energii) to způsobuje degradaci půdy, která svojí rychlostí daleko převyšuje přirozenou tvorbu půdy (1 cm půdy se utváří stovky let – Šarapatka et al., 2002). Často se tím obnažují nižší půdní horizonty, které ve srovnání s tím humusovým zadrží méně vody, což zvyšuje povrchový odtok a tím zhoršuje extrémny typu sucha a povodní (Holý, 1978).

Existují však i alternativní způsoby pěstování polních plodin, kdy je půda chráněna před erozí a dalšími negativními jevy. Jedním z nich je již zmíněné bezorebné hospodaření. To jednak snižuje utužení půdy, ale především bývá spojeno s akumulací organické hmoty na povrchu, což vede (zejména na svazích) k lepší infiltraci vody (Šantrůčková et al., 2014). Avšak i v rámci orebného hospodaření jsou známy možnosti, jak erozi předcházet. Pozitivní zkušenosti například přineslo pěstování meziplodin jako je např. pohanka, jílek, lnička či svazenka, které zlepšují strukturu ornice (mimo jiné i omezením evaporace z povrchu půdy), zmenšují uhlíkový deficit a chrání půdu před erozí (Vach et al., 2009). Obecná doporučení pro zvýšení retence vody v rámci zemědělského hospodaření budou podrobněji popsána v poslední kapitole.

3.3 Urbanizovaná území

Hlavní vlastností, kterou se zastavěná území z hydrologického hlediska liší od okolní krajiny, je mnohem větší podíl zpevněných ploch, do kterých se srážková voda nemůže vsáknout a stéká po nich. Kvůli tomu zde narůstá povrchový odtok – uvádí se, že už 10-20 % zpevněných ploch v území zvýší odtok na dvojnásobek (oproti nezpevněné zalesněné ploše), 35-50 % na trojnásobek a v extrémních případech, kdy je území zastavěno více než ze tří čtvrtin, může být nárůst i více než pětinašobný (Paul & Meyer, 2011).

Tento nárůst odtoku je též doprovázen zkrácením periody mezi vrcholem srážek a vrcholem odtoku, což způsobuje „zhuštění“ povodňové vlny – ve smyslu zkrácení a zvýšení jejího vrcholu. To v praxi znamená, že povodeň vyvolaná srážkami v zastavěné oblasti sice trvá kratší dobu, ale hladina dosáhne mnohem výš, což obvykle způsobí větší škody. To se týká zejména povodní způsobených přívalovými srážkami – zde mají zpevněné plochy a systémy určené k rychlému odvodnění mnohem větší potenciál ke zhoršení důsledků povodní než u dlouhodobých slabších srážek (Carpenter et al., 2016). Tento jev byl podrobněji popsán v USA, kde bouřkové srážky v zastavěném povodí vytvořily o 250 % větší povodňovou vlnu než srovnatelné srážky v zalesněném povodí (Paul & Meyer, 2011).

Jevem, který souvisí s vyšším odtokem vody ze zpevněných ploch, je snížení vsaku. Zatímco na běžném zalesněném území se vsákne zhruba polovina srážkové vody (zbytek případně na povrchový odtok a evapotranspiraci), v územích s převahou zpevněných ploch může podíl vsaku klesnout i k 15 % (Paul & Meyer, 2011). To má pochopitelně za důsledek zmenšení zásob spodní vody a pokles vydatnosti studen a pramenů v zastavěných zónách. Kromě toho klesá i množství vody upotřebitelné k evapotranspiraci (uvádí se pokles o ¼ – Paul & Meyer, 2011), což může mít nepříznivý vliv na mikroklima.

V neposlední řadě hrozí v zastavěných územích mnohem větší riziko kontaminace jak povrchové, tak i podzemní vody (Köhler et al., 2001), což je mnohdy umocněno jednotnou kanalizací pro splaškovou i dešťovou vodu, kdy se v případě intenzivních srážek dostává část splašků přes ochranné přepady do řek (Carpenter et al., 2016). V ekosystémech v povrchové vodě navíc dochází kvůli antropogenním vlivům ke změně společenstev (Paul & Meyer, 2011).

Jako možné řešení ke zmírnění odtoku i k minimalizaci dalších negativních důsledků zástavby jsou uváděny **zelené střechy** – tzn. střechy pokryté substrátem s vegetací. Hlavním přínosem těchto zelených střech je zachytávání vody, která by jinak otekla – uvádí se např., že už 10 cm substrátu může zachytit až 90 % letních srážek a převést je evapotranspirací ve vodní páru (Köhler et al., 2001). V některých případech, kdy je použit speciální materiál a vhodné druhové složení rostlin, je uváděno dokonce i zachycení 97 % srážkové vody (Carpenter et al., 2016). Kromě vyrovnání extrémů odtoku mají tyto střechy ještě další pozitivní funkce, jako je např. zachytávání prachu či zlepšení mikroklimatu (především vyrovnávání teplotních extrémů). Nicméně z pohledu odtokových poměrů je to jen opatření k zachycení vody ze střech; není zde řešen odtok z dalších zpevněných ploch, jako jsou silnice či parkoviště.

3.4 Místa s akumulovanou vodou

Specifickou součástí české krajiny jsou místa, kde je nahromaděno větší množství vody, ať už je tato voda zadržena na povrchu (vodní plochy), nebo těsně pod ním, což tvoří specifické

ekosystémy (mokřady, rašeliniště). Taková místa hrají pochopitelně významnou roli i při retenci vody v krajině.

3.4.1 Vodní plochy

Už na první pohled je vidět retenční funkce vodních ploch, ať už se jedná o plochy přírodní (jezera) či uměle vytvořené (rybníky, nádrže). Zde se retenční kapacita jednoduše odvíjí od rozdílu mezi aktuální hladinou vody a nejvyšší možnou hladinou, při které dojde k přetečení rezervoáru (zpravidla dána bezpečnostním přelivem). Pokud se hypoteticky jedná o nádrže napájené pouze přímými srážkami, odpovídá zvýšení hladiny srážkovému úhrnu, takže se voda zadrží, dokud výška srážek nepřesáhne rozdíl přepadu a původní výšky hladiny. Nicméně v našich podmínkách jsou vodní plochy zpravidla napájeny přítoky, takže hladina závisí převážně na množství přitékající vody a tím i na tom, kolik vody dokáže zadržet krajina v povodí těchto přítoků.

Přesto není retenční význam těchto ploch zanedbatelný, jak bylo zaznamenáno například při povodních roku 2002 na Třeboňsku. Tamní rybníky tehdy zadržely přibližně 110-140 milionů m³ vody (spolu s okolní krajinou dokonce přes 200 milionů), což zpomalilo kulminaci povodně na Lužnici o více než 60 hodin (Lhotský, 2006); tím, že byl vrchol odtoku z Lužnice takto zpožděn oproti ostatním přítokům, se zploštila povodňová vlna na Vltavě, což zřejmě zabránilo ještě větším škodám.

Retenční kapacita ale i zde závisí na mnoha faktorech. Klesá například u rybníků a nádrží zanesených sedimenty (Lhotský, 2006). Proto je v tomto ohledu lepší u rybníků provádět odbahnění – je ale pravdou, že sedimenty jsou především důsledkem eroze v povodí, která často bývá způsobena nevhodným zemědělským a lesním hospodařením. Z pohledu retence vody je též ideální, aby byla retenční kapacita co největší – tedy stálá hladina co nejnižší pod hladinou maximálního napuštění. To však bývá často v rozporu s některými dalšími funkcemi rybníků a nádrží, jako je chov ryb či rekreace.

3.4.2 Mokřady, rašeliniště

Dalším retenčně důležitým (byť z pohledu širší veřejnosti oproti nádržím poněkud opomíjeným) stanovištěm jsou mokřady. Ty lze definovat jako trvale mělce zatopené či podmáčené plochy se specifickou vegetací, které tvoří přechod mezi suchozemskými a vodními ekosystémy (Pokorný & Lhotský, 2006). Díky převládajícímu anoxickému prostředí zde dochází k výrazné akumulaci organické hmoty, čímž potenciálně vzniká větší retenční kapacita než u minerální půdy. Je sice pravda, že tento potenciální prostor je obvykle zaplněn mokřadní vodou, nicméně v době, kdy je hladina přechodně nižší, půda vystoupí na povrch a přestane být saturována vodou, čímž zde vzniká velká retenční kapacita pro srážky (např. pro přívalové srážky po delším suchu). Navíc zde díky

mokřadním rostlinám a snadno dostupné vodě bývá poměrně vysoká transpirace, což vede k posílení malého vodního cyklu podobně jako u lesů (Pokorný & Lhotský, 2006) a ke snižování hladiny, což zvyšuje retenční kapacitu pro další srážky. Mokřady se také často nacházejí v terénních sníženinách (např. v údolních nivách), takže jsou při povodni často zaplavovány vodou, jejíž zvýšená hladina vytváří další retenční kapacitu na podobném principu jako u nádrží.

Zvláštním typem mokřadů jsou **rašeliniště**. Zde je voda vázána v neustále přirůstajících porostech rašeliníku. Oproti ostatním mokřadům zde existuje názor, podle kterého je vhodné rašeliniště odvodňovat, protože se tím navýší retenční kapacita prostředí. Argumentem je zjištěný rychlý vzestup odtoku po intenzivních srážkách a naopak nízký odtok v období sucha, kdy by bylo vhodné nadlepšovat průtoky (Janský, 2006). Nicméně je otázkou, zda má toto zjištění obecnou platnost; rychlý odtok je typický pro přechod z akumulární do perkolační fáze – a aby k němu došlo, musí být rašelinná půda na začátku srážek těsně před koncem akumulární fáze, což nemusí být pravidlem.

Je také obecně známo, že po vysušení podmáčených území dochází k mineralizaci půdy a k úbytku organické hmoty. Navíc má terén v důsledku odvodnění tendenci klesat, čímž se sníží objem půdy a především pórů, ve kterých může být obsažena voda (Pokorný & Lhotský, 2006). Oba tyto faktory jsou pro zadržení vody v půdě nepříznivé, lze proto očekávat, že v dlouhodobé perspektivě se retenční kapacita odvodněného rašeliniště opět sníží. Je tedy otázkou, zda má cenu kvůli krátkodobému navýšení retenční kapacity rašeliniště odvodňovat a dlouhodobě tím omezit jejich ekologické funkce.

3.4.3 Údolní nivy

Při studiu míst, kde se v krajině akumuluje voda, nelze opomenout nivy. Údolní nivu lze definovat jako část údolního dna ohraničenou spodními hranami svahů a zaplavovanou při povodních (Pithart et al., 2012). V přirozené podobě se jedná o komplexní systém tvořený jednak meandrujícím tokem, ale i dalšími vodními útvary, jako jsou mokřady, slepá ramena či jezera vzniklá odškrcením bývalých meandrů. Tento systém je propojen i se spodní vodou a za příznivých podmínek zvyšuje její zásoby, naopak za sušších období může podzemní voda v nivě nadlepšovat průtok vody v toku (Petříček & Cudlín, 2003), u menších toků může být ve velmi suchých obdobích dokonce hlavním zdrojem vody (Štěrbá et al., 2008).

Ještě znatelnější přínos niv se však ukáže v průběhu povodní, kdy přirozená údolní niva funguje jako rozsáhlá mělká retenční nádrž. Ta může mít, zejména pokud je plošně rozsáhlá, i poměrně značnou kapacitu – například při metrové výšce hladiny se na každém hektaru údolní nivy zadrží 10 000 m³ vody. Navíc se tím výrazně zploští průběh povodňové vlny, neboť při vyběžení dochází k „odříznutí“ vrcholu vlny tím, jak se voda rozlije

z koryta do nivy. Tento jev je ještě silnější tehdy, pokud je niva zdrsněna pásy lužních lesů, což snižuje kinetickou energii toku (Čermák et al., 2002).

Je tedy patrné, že i ta voda, která se v krajině nezadrží a odteče do vodních toků, může být alespoň zde zpomalena. To bylo popsáno u již zmíněných povodní r. 2002, kdy například niva horní Lužnice pouze v úseku u Dvorů nad Lužnicí zadržela 5,5 milionu m³ vody (Pithart et al., 2012). U niv porostlých lužními lesy v Litovelském Pomoraví se dokonce odhaduje zadržení 30-50 milionů m³ při povodních (Štěrba et al., 2008).

Nicméně tyto příznivé jevy se projevují převážně jen u těch údolních niv, které nebyly výrazně pozmeněny člověkem. Pokud byla niva odvodněna, meandry narovnané a toky více zahloubeny (ať už z důvodu přímého osídlení, nebo např. zemědělského hospodaření na úrodných nivních půdách), ztrácí niva své retenční schopnosti (Pithart et al., 2012). Právě osídlování a přeměna údolních niv byly, jak bude uvedeno v dalších kapitolách, jedním z nejvýraznějších lidských zásahů do krajiny z hlediska vzniku a zesilování povodní.

4. Vliv člověka na retenci vody v krajině

Jak již bylo řečeno, různé jednotky krajinného krytu mohou mít na retenci vody různý vliv. Z toho je zřejmé, že člověk jako aktivní tvůrce krajiny významně ovlivňuje, ať už vědomě či nevědomě, množství vody, které krajina zadrží.

4.1 Lidské vlivy v historii

Již od pravěku probíhalo na našem území **odlesňování** spojené s postupným **nárůstem orby**. Tento proces se velmi urychlil ve středověku, kdy došlo k rozvoji lidských sídel i ve vyšších polohách. Tím se pochopitelně začala projevovat eroze; dodnes můžeme vidět v nivách větších řek několikametrové nánosy povodňových hlín, které jsou dokladem tehdejší eroze půdy ve vyšších oblastech (Maděra, 2014).

Odlesnění a nárůst plochy orné půdy pak přicházely v dalších vlnách, např. při rozvoji sklárství nebo vlivem zavádění nových plodin. Často byly odvodňovány pramenné oblasti toků, což vedlo ke zhoršení extrémů, jako jsou sucha a povodně (Válek, 1977). Posléze si lidé začali uvědomovat souvislost povodňových stavů s krajinou. Už v roce 1877 byla jako příčina tehdejších povodní uváděna devastace lesů v horských a podhorských oblastech moravských hor a eroze půdy; navrhováno bylo zalesnění holých strání a tvorba drobných retenčních nádrží (Čermák et al., 2002).

Kromě odlesnění jako takového se výrazně změnilo i **druhové složení lesů**. Zatímco zastoupení jehličnanů v přirozené skladbě dosahovalo pouze 34 % (z toho smrk jen 11 %), dnes jejich podíl obnáší 77 % (z toho smrk 54 %), což znamená více než dvojnásobný nárůst jehličnatých porostů (Kantor & Šach, 2002). Smrkové monokultury byly vysazovány i do

míst, kde smrky dříve prakticky nerostly, což vedlo ke změně struktury půdy a – jak již bylo naznačeno – ke snížení její infiltrační kapacity.

Výrazný vliv měl člověk také na **údolní nivy toků**. Právě tam se často soustředila lidská sídla, takže zde vznikala zástavba a přilehlé zemědělské plochy. S tím bylo spojeno kácení lužních lesů, zavážení slepých ramen, stavba hrází a především zahloubení a zkrácení meandrujících vodotečí. Takto na našem území ubylo zhruba 4600 km vodních toků (Pithart et al., 2012). Uvádí se, že např. řeka Morava byla zkrácena o zhruba 40 % (Čermák et al., 2002).

Paradoxní je, že ačkoliv účelem těchto opatření byla často ochrana objektů v nivě před povodněmi, přispělo to především ke zhoršení povodní dále po proudu, a to vlivem zrychlení toku v korytě. Je např. uváděno, že na Rýně se povodňová vlna dostane z Basileje do Maxau za cca 30 hodin, zatímco ve 40. letech minulého století to obnášelo 60 hodin a před prvotními úpravami ještě více (Pithart et al., 2012). Toto zrychlení samozřejmě zvyšuje i intenzitu původní a škody, které způsobují.

Upravené nivy z větší části přestaly plnit svoji funkci zpomalení a snížení povodňových vln. V kombinaci se sníženou retencí vody v povodí to přineslo synergický efekt – krajina v povodí nedokáže zadržet větší množství přívalových srážek a tuto vodu v podobě povodňových vln posílá do vodních toků, kde tyto vlny navíc nemohou být účinně zeslabeny a zploštěny rozlivem v nivě, jak se to dělo dříve.

Změny v krajině **za posledních 100 let** jsou obecně známé. Na jednu stranu se zvýšil podíl zalesněných ploch (byť se často jedná o smrkové monokultury), na druhou stranu jsme byli svědky např. kolektivizace, která znamenala především sjednocení menších políček do velkých lánů více ohrožených erozí, ale i další negativní jevy, jako bylo zarovnání či dokonce zatrubnění vodotečí v zemědělské krajině či další degradace niv spojená s jejich větším zorněním (Štěrbá et al., 2008). Zejména v posledních letech vidíme i rozrůstání průmyslových areálů, které ubírají půdu a zvyšují podíl zpevněných ploch. Především se ale objevila cílená opatření na prevenci povodňových škod, a to jak opatření technického typu, tak i taková, která mají tendenci využívat přirozenou retenci vody v krajině.

4.2 Protipovodňová opatření

Zde je nutno uvést, že tento hojně používaný termín je trochu zavádějící – opatření, která zde budou popsána, nejsou zaměřena přímo proti povodním jako takovým. Povodně jsou přirozeným jevem naší krajiny, mnohé ekosystémy (např. lužní les) jsou na jejich existenci přímo závislé (Petříček & Cudlín, 2003). Popsaná opatření jsou spíše určená jednak ke snížení četnosti a intenzity povodní (což jsou veličiny, jejichž hodnoty narostly vlivem lidských změn v krajině) a jednak k ochraně lidských sídel a dalších důležitých objektů před rozlivem.

4.2.1 Konvenční velkoobjemové vodní nádrže

Zde platí základní princip popsany v kapitole o vodních plochách v krajině (retenční kapacita je rozdílem mezi aktuální a nejvyšší možnou hladinou). Oproti rybníkům, které jsou zpravidla technicky jednodušší a jejichž primárním účelem je chov ryb, jsou velké přehrady často budovány právě jako prostředek protipovodňové ochrany (spolu s dalšími funkcemi, jako je energetika, zásobování vodou, rekreace, aj.) – díky čemuž zde bývají dokonalejší mechanismy regulace odtoku a hladiny. Obvykle je zde definována hladina minimálního napuštění – z čehož vyplývá, že potenciální retenční kapacita je dána prostorem mezi touto minimální a maximální hladinou. Čím méně vody je v přehradě, tím větší část potenciálního retenčního prostoru může být využita pro zachycení povodňové vlny. V praxi ovšem bývá část potenciálního retenčního prostoru trvale zaplněna vodou, protože ostatní funkce nádrží (zmíněné výše) vyžadují vyšší hladinu vody.

To je také jeden z důvodů, proč tyto nádrže v protipovodňové ochraně často selhávají. Jakmile množství vody přiteklo do přehrady přesáhne její aktuální retenční kapacitu, protéká voda přes přehradu bez většího zdržení dál po proudu – jak jsme to mohli vidět u Vltavské kaskády při povodních v srpnu 2002. Nevýhodou těchto nádrží je také skutečnost, že při jejich tvorbě mizí celá říční krajina, často i nad rámec údolní nivy (Štěrba et al., 2008). Často zanikají i velmi cenná území, jako byly např. Svatojánské proudy, které byly zatopeny při stavbě Vltavské kaskády (Pithart et al., 2012). V neposlední řadě je zde hypotetické riziko značných škod při protržení hráze.

4.2.2 Technická řešení s využitím přirozené retence

Vedle velkokapacitních retenčních nádrží existuje řada dalších řešení, jejichž realizace je sice také technického charakteru, nicméně při své funkci využívají principy přirozené retence vody.

Jedním z nejznámějších jsou **poldry**, což jsou suché či částečně zvodnělé nádrže budované v údolní nivě, do kterých se v případě zvýšení hladiny převádí vrchol povodňové vlny. Někdy jsou budované těsně nad obcemi jako jejich individuální povodňová ochrana. Doba napuštění je zde obvykle plánována řádově na desítky hodin, pak již povodeň obvykle odeznívá a obsah poldru lze vypustit do toku (Petříček & Cudlín, 2003). Oproti nádržím mají tu výhodu, že v době mezi povodněmi mohou být využity pro zemědělské či jiné účely a nepřinášejí trvalé zatopení často cenné říční krajiny.

Naproti tomu častou nevýhodou poldrů je velká náročnost na výstavbu a údržbu hrází, což při frekvenci použití (např. pokud je poldr využit jen za stoleté vody) může vyvolat pocit neefektivity (Štěrba et al., 2008). Poldr je navíc možné vytvořit jen za vhodných geomorfologických podmínek (Soukup et al., 2008) – a když tyto podmínky

nastanou, zároveň bývají příznivé okolnosti i pro přirozený rozliv v údolní nivě bez nákladné stavby poldru.

Do této skupiny opatření lze zařadit i různé **příkopy, rýhy, průlehy** a další terénní útvary, často tvořené v zemědělské krajině za účelem rozdělení zorněného svahu na menší části. Tyto deprese mohou být bezodtoké (čistě vsakovací), nebo i s odtokem, který ovšem ideálně neústí do trvalé vodoteče, ale např. do mokřadu (Soukup et al., 2008).

Vedle konvenčních přehrad zde můžeme vidět **menší nádrže** (s rozlohou do jednotek hektarů), které nemívají tak negativní dopad na krajinu, jaký vidíme u těch větších. Často jich bývá víc za sebou, což přináší kumulativní retenční funkci, která může nahradit konvenční velkou nádrž. Ideální jsou nádrže s nízkou obvyklou hladinou (a tedy vyšší kapacitou), s možností vsaku a regulovaným odtokem; takové najdou uplatnění jak v zemědělské krajině, tak i na odtoku z měst (Soukup et al., 2008).

Pro městské prostředí obecně existuje celá řada možností, jak zachytit srážkovou vodu a zpomalit její odtok. Podle povrchové či podpovrchové infiltrace vody se tyto mechanismy dělí na vsakovací průlehy, jímky či šachty, dále pak filtrační jímky (které zároveň i čistí vodu od splavenin), ale patří sem i využití propustného typu betonu či zatravnovacích tvárnic místo konvenčních zpevněných ploch (Hlavínek, 2007).

4.2.3 Krajinné úpravy

Kromě výše zmíněných opatření mají protipovodňovou funkci i mnohé cílené zásahy přímo do krajiny (často se jedná o vrácení některé části krajiny do podoby, kterou měla před tím, než ji člověk změnil). Tyto zásahy si můžeme rozdělit na takové, které zvyšují retenci v současných jednotkách land-use – a na ty, které hranice těchto jednotek posouvají.

4.2.3.1 Změna hospodaření v současných jednotkách krajiny

Pro hospodaření v **lesích** existuje několik základních doporučení vyplývajících z kapitoly o zadržení vody v lesních porostech. Jedná se především o omezení holosečného způsobu hospodaření, citlivější podoba lesních cest (spíše po vrstevnici a na úrovni terénu – pokud jsou zařízle do terénu a svažité, způsobují výrazný odtok) a postupná změna druhové skladby, jejímž hlavním účelem by mělo být omezení smrkových monokultur, a to zejména na svažitých plochách, kde je důležitá infiltrační schopnost půdy. Obecně je doporučováno zvýšit druhovou, prostorovou a věkovou diferenciaci lesních porostů (Švihla, 2001). Hovoří se též o vyšším zastoupení dřevin, které přivádějí více srážkové vody do půdy (tím, že koření hlouběji než smrky a zlepšují půdní strukturu), jako jsou buk, habr, jeřáb, klen či lípa (Válek, 1977). Vhodná je i příměs jedle, která kombinuje pozitivní vlastnosti smrku (asimilace i mimo vegetační sezónu, aj.) s hlubším prokořeněním typickým pro většinu

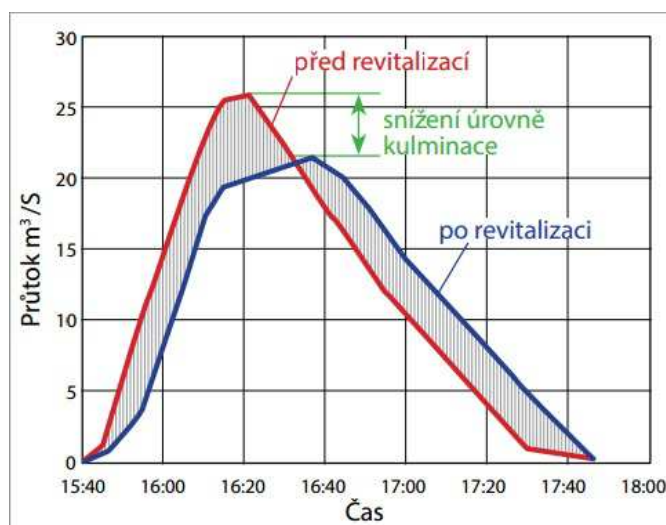
listnáčů; u starých jedlí navíc hrají roli epifytické lišejníky schopné pojmout velké množství vody.

U **orné půdy** je hlavně potřeba chránit půdní pokryv před erozí. To v současné době znamená především vyloučení širokořádkových plodin (zejména kukuřice) na svazích s větším sklonem. Dále je v rámci protierozní ochrany doporučováno zmenšení sklonu polí (a to i tvorbou teras), vrstevnicová orba, zařazování vojtěšky do osevních postupů či tvorba vsakovacích pásů a průlehů s dřevinami (Holý, 1978).

Vhodné je uplatňovat již zmíněné bezorebné hospodaření, které snižuje utužení půdy a zvyšuje podíl organické hmoty zejména v povrchové vrstvě půdy, což zvyšuje infiltraci. Tam, kde je krátká doba vysoké pokryvnosti pěstované plodiny, je vhodné zařadit meziplodinu typu svazenky; obecně největší protierozní účinek mají plodiny a meziplodiny s rychlým růstem, vysokou produkcí a dlouhou dobou existence rostlin na poli (Vach et al., 2009). Důležitá je také prevence utužení – v tomto směru se doporučuje jednak omezit pojezdy zemědělskou technikou, jednak v půdě zajistit dostatek uhlíkaté hmoty (ať už organickým hnojením, pěstování luštěnin či bezorebným hospodářstvím) a pokud možno i vyšší pH, protože okyselení půdy usnadňuje její utužení (Šarapatka et al., 2002).

Klasickou orbu je možné ponechat v rovinatých oblastech a na menších políčkách, kde nehrozí tak velké riziko vodní ani větrné eroze. I zde je ale vhodné dodržovat některá základní pravidla, jako je respektování vhodných osevních postupů (vč. střídání plodin a zařazování rostlin schopných fixovat vzdušný dusík) a dodávání více organického materiálu do půdy – a to hlavně v případě lehčích půd, kde obsah organické hmoty ovlivňuje retenční kapacitu více než u těch těžkých (Šantrůčková et al., 2014).

Pro zvýšení retence vody v krajině je taktéž vhodné revitalizovat **údolní nivy** – v rámci možností jim vrátit přírodě blízkou podobu, znovu vytvořit meandry (nebo alespoň nebránit jejich přirozené tvorbě) a zajistit v nivách možnost rozlivu. Účinek těchto úprav byl v praxi ověřen u potoka Borová u Křemže. V letech 1998-2000 zde bylo na místě původního, konvenčně upraveného koryta vytvořeno koryto zcela nové – s meandry a sníženou průtočnou kapacitou umožňující rozliv při zvýšené hladině vody. Po lokální povodni v roce 2001 (odpovídající zhruba stoleté vodě) byla zjištěna skutečnost, kterou můžeme



Obr. 5: Změna povodňového průtoku na potoce Borová po provedení úprav (Matoušek, 2002)

vidět na Obr. 5 – díky těmto úpravám se vrchol průtoku snížil o zhruba 20 % oproti podobné srážkové situaci za narovnaného zahloubeného koryta (Matoušek, 2002).

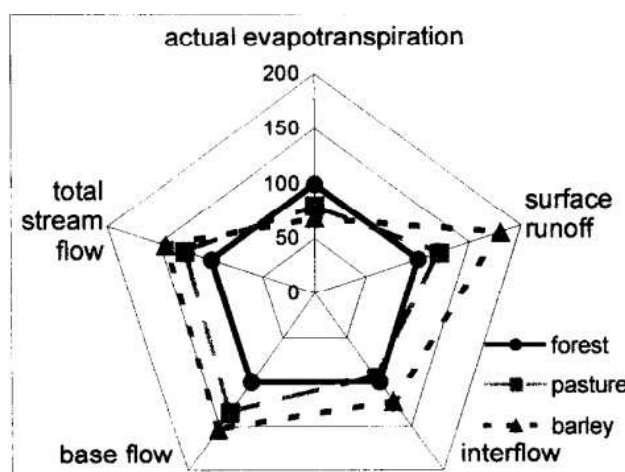
U velkých řek je v první řadě doporučováno zrušit či oddálit od toku ochranné hráze v místech, kde nechrání žádné stavby. Tím dojde k rozšíření údolní nivy, která snižuje povodňovou vlnu – například už zdvojnásobení šířky nivy vede k redukci kulminace zhruba o 25 % (Pithart et al., 2012). Pokud by byla využita plná kapacita údolních niv, tak může řeka Morava zachytit až 387 milionů m³ a Bečva 68 milionů m³ vody (Štěrba et al., 2008). Proto je vhodné uvolnit nivy pro povodňové rozlivy a ponechat hráze pouze pro individuální ochranu jednotlivých sídel v nivě (Čermák et al., 2002).

4.2.3.2 Komplexní změny land-use

Kromě úprav uvnitř jednotlivých jednotek krajinného krytu mohou být v rámci zvýšení retence vody v krajině provedeny i takové úpravy, které změň podíl plochy jednotlivých typů land-use. Ideální je zvyšovat podíl takových ploch, které mají díky vysoké retenční kapacitě schopnost tlumit extrémny typu sucha i povodní – což v praxi splňují především lesy.

Je známo, že odtok z lesů je při dostatku vody (nebo dokonce při povodňových stavech) nižší než ze zemědělských kultur, nicméně za suchého období je vyšší – v nejsušším měsíci sledovaného období odtékalo z lesů 1,31x více vody než z polí a 1,38x více vody než z travních porostů, což naznačuje, že během sucha jsou malé vodní toky zásobeny převážně vodou z lesů (Švihla, 2001). To potvrzuje i Válek (1977), který uvádí, že pro menší toky v bezlesí je typické, že při dlouhodobějším suchu zanikají a stávají se de facto jen periodickými toky, jaké můžeme vidět v aridních oblastech.

Tento princip ale neplatí pouze v našich podmínkách, ale obecně – například v Indii bylo zjištěno, že degradace lesů a jejich částečná přeměna na zemědělskou půdu vedla ke zvýšení vrcholů odtoku o zhruba 15 %; zároveň se snížil průtok v suchých obdobích, což indikuje snížení zásob podzemní vody (Sajikumar et al., 2015). Rozdíl ve srážkoodtokové bilanci mezi lesní a nelesní půdou je dobře vidět na Obr. 6. Je zde patrné, že oproti lesům u



Obr. 6: Srovnání lesa, pastviny a pole s ječmenem z pohledu odtoku a výparu (Fohrer et al., 2001)

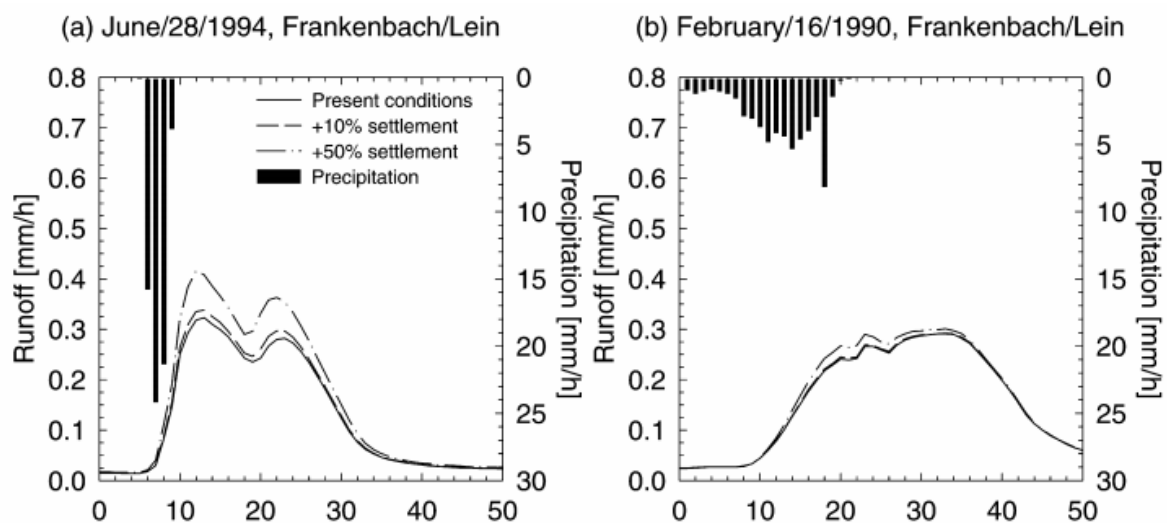
orné půdy klesá evapotranspirace a prudce narůstá zejména povrchový odtok; pastvina ukazuje podobné tendence, ale méně výrazné (Fohrer et al., 2001).

Na první pohled odlišné výsledky přinesli Královec et al. (2016), kteří prováděli výzkum v Pošumaví na dvou povodích s různou mírou zalesnění. V méně zalesněném povodí byla zjištěna průměrná potenciální retence 302 mm (oproti tomu zalesněnějšímu, kde činila 281 mm); reálné hodnoty retence se pohybovaly podle meteorologických podmínek mezi 80 a 190 mm, ale vždy s o něco vyšší kapacitou v nezalesněném povodí. To však nebylo dáno nižší vodozadržnou schopností lesa, ale především větší plochou hlubších půd v nezalesněném povodí. Je zjevné, že při lidské kolonizaci byly zemědělské plochy tvořeny právě v místech s hlubšími půdami (které mají větší retenční kapacitu), naproti tomu na mělkých půdách, kde se zemědělské hospodaření nevyplatilo, byl zachován les. Pokud by obě povodí byla pedologicky shodná, pravděpodobně by byla zjištěna větší retence u lesních ploch.

Zalesnění povodí jako prostředek ke zvýšení podílu zadržené vody a snížení odtoku zmiňují i další autoři. Pomocí modelu AKWA-M bylo zjištěno, že kdyby se do extravilánu v experimentálním německém povodí vrátila potenciální přirozená vegetace (což by znamenalo zvýšení lesnatosti ze 41 na 97 %), přineslo by to pokles vrcholu odtoku u relativně běžné přívalové srážky (59 mm) o 24 %; u extrémních srážek (229 mm) by byl pokles nižší, a to o 3 % (Wahren et al., 2007). Jiné zdroje uvádějí, že úplným zalesněním bezlesí se sníží kulminace velkých vod (zde není rozlišena srážková intenzita) přibližně o třetinu (Švihla, 2001).

Plošné zalesnění celé krajiny dnes pochopitelně není možné, nicméně ke znatelnému zvýšení retence vody mnohdy stačí zalesnit některá kritická místa – především prudké svahy s řídkou vegetací a malou infiltrační kapacitou půdy (Pamukcu et al., 2016).

Nárůst plochy lesů a tím i zvýšení drsnosti krajiny doporučují i další autoři (Štěrba et al., 2008), kteří navíc navrhují zatravnňovat ornou půdu v rámci prevence eroze. Nicméně



Obr. 7: Vliv nárůstu zástavby na odtok po různých typech srážek (Niehoff et al., 2002)

toto zatravňování orné půdy nemusí být plošné – mnohdy stačí zatravnit údolnice, jednotlivé plošky mělčích půd na svahu či relativně úzké pásy (doporučuje se 12-16 m) podél vrstevnic (Soukup et al., 2008). Už takováto opatření, která nebudou znamenat výrazný úbytek orné půdy, mohou napomoci vsaku a zpomalit erozi. Pro tento účel jsou též vhodné ochranné travnaté či křovité pásy kolem polí (Pamukcu et al., 2016).

Reakcí odtoku na změny land-use se též zabýval výzkum zacílený na jedno povodí v jihozápadním Německu. Pomocí hydrologického modelu WaSiM-ETH byla simulována odpověď křivky odtoku po srážkách z konvektivní a z vrstevnaté oblačnosti na hypotetické zvýšení podílu zástavby o 10, respektive 50 %. Jak je vidět na Obr. 7, zvýšení vrcholu odtoku vlivem nárůstu zástavby bylo daleko výraznější u konvektivních srážek než u těch advektivních. Podobné výsledky vykazalo srovnání současného stavu s hypotetickým případem ponechání části orné půdy ladem – tehdy neobhospodařovaná půda vykazovala snížení odtoku, které bylo daleko průkaznější u srážek s vyšší intenzitou (Niehoff et al., 2002). To je zřejmě způsobeno tím, že tyto změny land-use mají vliv především na infiltraci vody do půdy, která hraje daleko větší roli u přívalových srážek. V každém případě je patrné, že nárůst zastavěných ploch zvyšuje odtok, zatímco převedení půdy do bezorebné fáze jej spíše snižuje.

Kromě toho tento výzkum také ukázal, že čím vlhčí je půda před deštěm, tím méně záleží na krajinném pokryvu – půda se totiž dříve dostane do perkolační fáze, kdy v ní není zadržována prakticky žádná další voda. Obecně lze říci, že pro množství zadržené vody je důležitá míra saturace u jednotlivých ploch – z praxe je známo, že se jedná o dynamický systém, ve kterém se neustále mění hranice mezi saturevanými a nesaturevanými zónami (Karvonen et al., 1999). Opět se proto zdají ideálním krajinným pokryvem lesy, u kterých trvá relativně nejdéle, než se zcela saturují vodou.

Praktická část

1. Cíl projektu

Jak vyplývá z rešerše, krajinný pokryv má významný vliv na retenci vody. Na rozdíl od přehradních nádrží, kde lze potenciální retenční kapacitu určit poměrně snadno, je u krajiny jako takové kvantifikace zadržené vody obtížnější. To je jeden z důvodů, proč chybí přesnější informace o srovnání retenční účinnosti krajiny a nádrží.

Proto v rámci projektu navrhuji systematicky porovnat vodozádržnou účinnost jednotlivých jednotek land-use – a to v konkrétní oblasti (v povodí vodního díla Orlík), přičemž z takto získaných údajů bude možno kvantifikovat změny retence vody po úpravách land-use a tyto hodnoty porovnat s retenční kapacitou samotné nádrže.

2. Hypotéza

Změny ve využití území představují větší potenciál pro zvýšení retence vody v krajině než výstavba velkoobjemových nádrží – jak bude demonstrováno na příkladu vodního díla Orlík a jeho povodí.

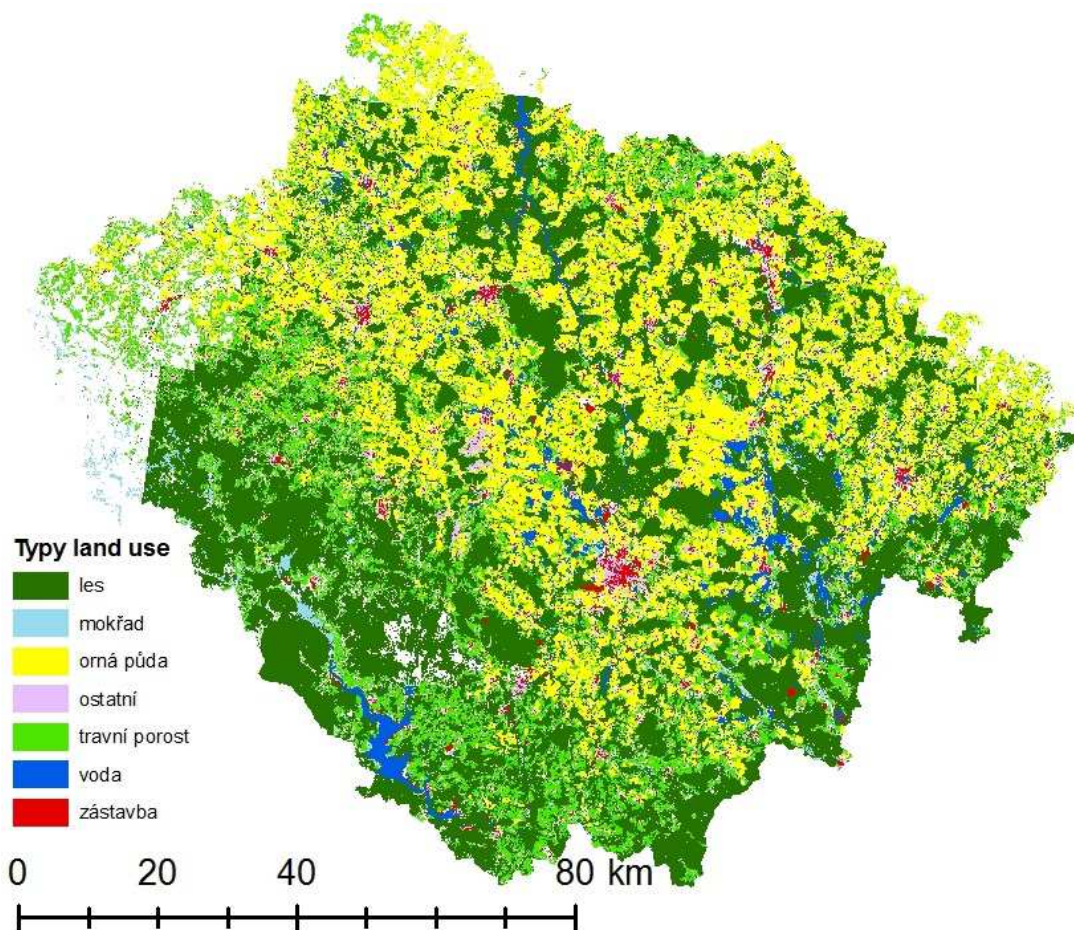
3. Experiment

3.1. Provedená část – Analýza GIS

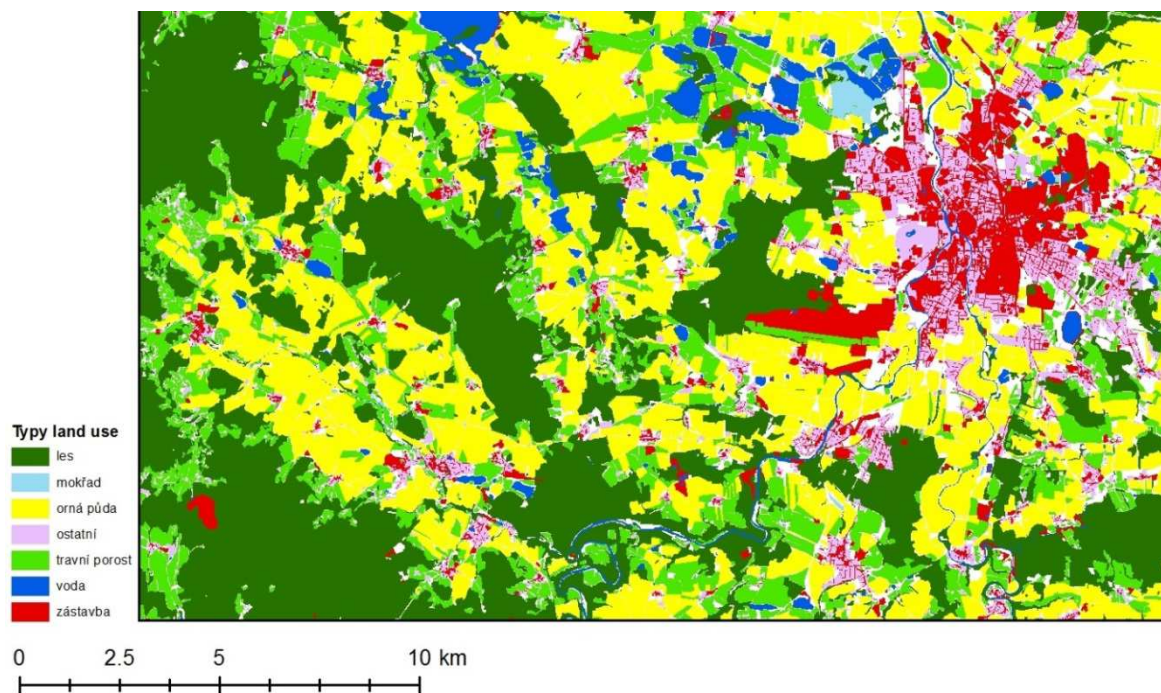
V rámci této bakalářské práce byla provedena analýza v programu ArcGIS zaměřená na zjištění celkové rozlohy jednotlivých typů land-use v povodí Orlíku. Data byla převzata z mapových podkladů LPIS a ZABAGED, které byly spojeny do jednotné vrstvy. Z technických důvodů v této analýze chybí některé okrajové části povodí, především mimo území ČR, nicméně převážná část povodí je zde zahrnuta. Výsledná vrstva je zobrazena na Obr. 8 a 9.

Jak je patrné i z obrázků, výsledná vrstva byla rozčleněna na sedm základních kategorií podle typů land use:

- les
- mokřad (včetně rašelinišť)
- orná půda
- ostatní plochy (nezařaditelné jinam – např. zahrady)
- travní porost (louky i pastviny)
- voda
- zástavba (sem byly pro zjednodušení zařazeny i jiné antropogenní plochy: letiště, lomy, aj.)



Obr. 8: Celkový pohled na povodí Orlicku v provedené analýze



Obr. 9: Bližší pohled na okolí Českých Budějovic a Křemže

Následně byly pomocí atributové tabulky zjištěny sumy ploch jednotlivých kategorií. Tím byly získány údaje shrnuté v Tab. 1.

Tab. I: Výsledné plochy jednotlivých typů land-use v povodí Orlíku

typ land use	plocha (km²)
les	3973
mokřad	96
orná půda	2706
ostatní	234
travní porost	1863
voda	321
zástavba	238

V navržené části experimentu se bude pracovat především s těmi typy land use, které jsou plošně nejrozsáhlejší – a to jsou lesy, orné půdy a trvalé travní porosty.

3.2 Navržená část – terénní měření

V rámci této části projektu navrhuji změřit v terénu vodní retenční kapacitu půdy u tří základních jednotek land-use (les, TTP, orná půda). Po celém povodí Orlíku bude za tímto účelem vytvořeno několik desítek výzkumných lokalit. Důležité je, aby tyto lokality byly rozmístěny na různých místech v povodí, a to jak prostorově, tak i v různých mikropovodích a na místech s různou nadmořskou výškou a geologickým podkladem – tak, aby tento výběr byl reprezentativní pro celé povodí Orlíku.

Na každé z těchto lokalit budou vybrána tři stanoviště (blízko sobě – max. do 1 km), která by měla mít ideálně stejné parametry (mocnost půdy, skeletovitost, typ podloží, aj.) a měla by se lišit pouze typem lidského hospodaření a těmi faktory, které jsou na lidském hospodaření přímo závislé (obsah uhlíku v půdě, aj). Stanoviště budou následující:

- **les** – druhovým složením a strukturou ideálně co nejbližší přirozenému lesu pro danou lokalitu, to znamená v nižších polohách převážně listnatý s dominancí buku a s rostoucí nadmořskou výškou postupně se navyšující podíl smrku a dalších jehličnanů.
- **travní porost** – s běžným hospodařením, tedy pravidelně sečený či pasený
- **pole** – konvenčně obhospodařované; výběr plodin by měl odpovídat běžnému zastoupení plodin v oblasti – tedy převážně obiloviny, kukuřice či řepka, okrajově i brambory, aj.

Mělo by se vždy jednat o alespoň mírně svažité plochy – neboť vlivem nižší infiltrační kapacity a většího rizika vodní eroze má právě zde cenu změnit land-use (i v relativně rovinných oblastech, jako je českobudějovická pánev, budou vybírány plochy,

kteře mají sklon alespoň v jednotkách stupňů). Na kařždém stanovišti pote proběhnou měření vodní retenční kapacity půdy.

Existuje několik metodik pro toto měření, většina z nich ovšem počítá se stoprocentní infiltrací a zanedbává skutečnost, že voda může stékat po povrchu půdy, aniž by byla retenční kapacita využita (Podrázský & Remeš, 2005; Lichner et al., 2004, aj.). V našich podmínkách zahrnul infiltraci do terénních výzkumů retence Válek (1977). Ten pro srovnání retenční a infiltrační kapacity půd (na svazích se sklony okolo 25 % ve smřčinách a bučinách) použil terénní zářez do hloubky zhruba 2 metrů, nad kterým simuloval srážku o intenzitě 100 mm/hodinu (u buku posléze i 250 mm/h) a měřil množství vody, které steče, aniž by se vsáklo, a dále vody, která vytekla ze zářezu hypodermálním odtokem. Tím Válek například zjistil, že u zkoumaného bukového lesa se vsáklo 100 % vody, z čehož pak zhruba 16 % vyteklo ze zářezu (zbylých 84 % připadá na akumulaci v půdě a na bazální odtok), zatímco u smřkového lesa činila infiltrace pouze 5 % vody a zbytek odtekl po povrchu.

Podobnou metodiku navrhuji použít i v tomto experimentu. Na kařždém stanovišti bude vykopán terénní zářez do hloubky, do jaké dosahuje půda (až na hranici podloží). V zářezu budou instalovány 2 okapy – jeden těsně pod horní hranou zářezu (pro zachycení povrchového odtoku), druhý ve spodní části nad podložím (pro zachycení toho podpovrchového).

Následně bude na půdní povrch na ploše 1 m² nad zářezem simulována srážka o intenzitě 100 mm/hodinu po dobu 1 hodiny, celkem tedy bude na povrch půdy nakropeno 100 litrů vody. Pote bude po tuto dobu i po dobu další 1 hodiny po skončení srážky sledován jednak povrchový odtok (stékající do horního okapu), jednak odtok podpovrchový z nasycení půdy (stékající do toho spodního). Odtok bazální zde zanedbáváme, protože díky pomalejšímu průběhu nehraje při povodních (zejména po přivalových srážkách) tak výraznou roli – zde hraje roli především odtok povrchový a v menší míře i hypodermální (pokud se na svahu dostane do saturované zóny a přejde na povrch) – tedy právě ty typy odtoku, které jsou v tomto pokusu zkoumány.

Voda z obou okapů bude pote kvantitativně převedena do jedné odměrné nádoby a změřen její celkový objem. Tento objem bude odečten od množství nakropené vody při simulované srážce (100 litrů), čímž bude zjištěno, kolik vody dokázala půda zadržet či převést přímo do hlubších vrstev.

Tento experiment bude na kařždém stanovišti opakován dvakrát, a to za různých hydrologických a vegetačních podmínek. Poprvé proběhne před začátkem vegetace (březeduben), kdy půda již není pokrytá sněhem, ale ještě nezačala významnější evaporace ani transpirace u většiny dřevin. Ideálně by měl proběhnout ve vlhčím období, kdy je půda více nasycena srážkami. Druhé opakování bude uskutečněno ve druhé polovině léta (cca srpen), kdy vlivem vyšších teplot a odparu dochází na jednu stranu ke sniřžování obsahu vody

v půdě, na druhou stranu k tvorbě povrchových krust zejména u orných půd – a to především tam, kde jsou plodiny již sklizené (obiloviny, řepka, aj.). Proto by v této části pokusu mělo být (pokud možno) vybráno spíše sušší období, kdy je tendence ke tvorbě krust výraznější. Právě u těchto období (jaro a konec léta) je navíc obecně známý častější výskyt povodní než v jiných částech roku.

Na každé lokalitě poté bude vypočítán rozdíl zadržené vody mezi jednotlivými stanovišti (les-pole a TTP-pole – a popř. i les-TTP, což je ale možné vypočítat ze zbývajících hodnot). Z těchto čísel poté bude vytvořen průměr, který bude (pokud bude výběr lokalit dostatečně reprezentativní) odpovídat celému povodí, jak bude zmíněno dále.

3.3 Harmonogram a rozpočet

Tab. II: Harmonogram projektu

IX 2017	Vytipování lokalit
X 2017 - II 2018	Průzkum stanovišť, příprava materiálu
III-IV 2018	První část experimentu - jarní měření (viz text)
VIII 2018	Druhá část experimentu - letní měření
IX-X 2018	Vyhodnocení výsledků, závěrečné výstupy

Tab. III: Rozpočet projektu

Věcné náklady	požadováno (tis. Kč)		
materiál	10		
cestovní náklady	15		
Mzdové náklady	roční plat (tis. Kč)	úvazek	požadováno (tis. Kč)
pracovník - výkopy	240	25%	60
pracovník - měření	240	25%	60
zákonné odvody			42
Celkem požadováno	187 tis. Kč		

Položka materiál v sobě zahrnuje nádoby na vodu, okapy a konstrukci na jejich stabilizaci, odměrné nádoby, nářadí na výkopy a kancelářské potřeby pro zapisování a zpracování výsledků. Cestovní náklady zahrnují pohonné hmoty spotřebované při cestách na jednotlivé lokality. Mzdové náklady zahrnují dva pracovníky – jednoho technického, který bude provádět výkop, a jednoho odborného, který bude mít za úkol simulaci srážek a měření následného odtoku.

3.4 Zpracování výsledků

Poté, co budou známy výsledky experimentu v jednotlivých lokalitách (především bilance v retenci les-pole a TTP-pole), budou z těchto hodnot vypočteny průměry platné pro celé

povodí Orlíku (čím bude reprezentativnější výběr lokalit, tím více budou tyto průměry odpovídat skutečnosti). Tím budou získána dvě základní čísla:

- o kolik milimetrů vody zadrží trvalé travní porosty více než orná půda
- o kolik milimetrů vody zadrží lesy více než orná půda (sem by možná bylo rozumné přičíst intercepci lesních stromů, která podle Krešla (1999) činí zhruba 5 mm).

(Případně lze určit i rozdíl v retenci mezi travním porostem a lesem – odečtením výše zmíněných hodnot.)

Kombinací těchto čísel a ploch land-use zjištěných v analýze GIS lze ověřit výše zmíněnou hypotézu, že krajina v povodí Orlíku by po vhodných změnách využití dokázala zadržet víc vody, než činí retenční objem samotné nádrže – tedy rozdíl mezi hladinou minimálního napuštění a výškou bezpečnostního přepadu, což u Orlíku činí 436,6 milionu m³ (podle Wikipedie). Pokud je hypotéza správná, tak zjištěný rozdíl v retenci mezi ornou půdou a lesem vynásobený plochou orné půdy z GIS analýzy a rozdíl retence les-TTP vynásobený plochou TTP celkem dají větší objem vody než zmíněných 436,6 milionu m³.

Pomocí získaných dat lze takto různě modelovat, jaký dopad na retenci by mělo, pokud by se například polovina orných půd převedla v travní porosty nebo v lesy – nebo opačně, jak velká plocha orných půd by se musela změnit na TTP či les, aby se retence vody zvýšila o hodnotu retenční kapacity Orlíku.

Jak již bylo naznačeno, hypoteticky lze z těchto dat určit i to, o kolik by se zvýšila retence, pokud by celé povodí Orlíku bylo zalesněné – zde by ale výsledky byly lehce zkreslené tím, že se v povodí nacházejí i relativně rovinné oblasti, zatímco experiment byl zaměřen spíše na svažité plochy, které jsou náchylnější k povrchovému odtoku a erozi.

3.5 Další možnosti rozšíření

Změny land-use, kterým se věnuje tato práce, představují jeden ze způsobů, jak zvýšit vodní retenční kapacitu krajiny. Jak ale bylo zmíněno v rešerši, existují i způsoby, jak zadržet více vody v současných jednotkách land-use – což může být inspirací pro další podobné práce.

Navržený experiment, který je zaměřen na porovnání různých jednotek krajinného krytu, lze případně použít i na srovnání více možností hospodaření v jednom typu land-use – například pro srovnání smrkových monokultur s listnatými lesy (což zčásti provedl již Válek (1977), ale lze to ještě rozšířit), pro srovnání různých polních plodin, porovnání konvenčních postupů v zemědělství s těmi ekologickými (např. bezorebné hospodaření), aj.

Při dalším výzkumu lze využít i data z provedené analýzy GIS – například celkovou zjištěnou plochu zastavěných území, kterou lze zkombinovat s postupy zachycení vody v zástavbě. Tomu se věnovala Topičová (2016), která ve své bakalářské práci popisovala, jaké retenční objemy by byly potřebné k zachycení odtoku z vybraných městských oblastí. Podobnou metodikou by například bylo možné zjistit, o kolik méně vody by odtékalo, pokud

by se u každého sídelního útvaru nacházela retenční nádrž zadržující veškerou vodu odtékající ze zástavby.

Podobně je možné navrhnout změny využití jednotek krajiny pro jednotlivá mikropovodí v rámci povodí Orlíku a sledovat praktické důsledky těchto změn např. na měrných profilech toků při výtoku z těchto povodí. V neposlední řadě lze současný experiment rozšířit tím, že by došlo ke kvantitativnímu rozlišení povrchového a podpovrchového odtoku, což by pomohlo k detekci míst s nízkou infiltrační kapacitou půdy.

Závěr

Tato práce přináší první ucelený návrh na srovnání retenční účinnosti vodního díla Orlík a retenčního potenciálu změn využívání krajiny v povodí této nádrže. Zahrnuje v sobě jak současný stav teoretického poznání vodozádržné účinnosti jednotlivých jednotek krajinného krytu a antropogenních zásahů do krajiny, tak i praktickou metodiku ke srovnání retenční schopnosti polí, travních porostů a lesů.

Hlavním přínosem projektu popsaného v této práci je kvantifikace změn land-use, které by bylo nutno provést v povodí Orlíku, aby se retence vody v tomto povodí zvýšila přesně o potenciální retenční kapacitu této nádrže. To pomůže změnit současné paradigma, kdy část veřejnosti považuje přehradu za nejúčinnější prostředek protipovodňové ochrany a přirozenou retenci v krajině má tendenci podceňovat.

Ve skutečnosti by navíc byl dopad podobných změn land-use ještě větší – skutečná retenční kapacita Orlíku totiž prakticky nikdy není k dispozici, protože kvůli dalším funkcím nádrže (energetika, rekreace) musí být hladina téměř vždy výrazně výše, než je minimální napuštění. Proto by ve skutečnosti stačila již mnohem menší změna land-use k tomu, aby se nárůst retenční kapacity krajiny vyrovnal skutečné využitelné kapacitě nádrže.

Díky tomuto projektu bude též možno vytipovat místa, kde je nejvýraznější rozdíl mezi retencí orné půdy a TTP/lesů – a kde by tím pádem bylo rozumné danou změnu land-use reálně provést (nebo alespoň uvést do chodu protierozní opatření). Projekt tudíž může pomoci nejen ke změně paradigmatu, ale i k aplikaci protipovodňových opatření v konkrétních lokalitách.

V neposlední řadě je přínosem této práce provedená analýza GIS, kterou lze použít i pro další podobné práce, které se zabývají povodím Orlíku.

Použitá literatura

- Amaranthus, M. P., Parrish, D. S., Perry, D. A. (1989): Decaying Logs as Moisture Reservoirs After Drought and Wildfire, Proceedings of Watershed: A Conference on the stewardship of soil, air and water resources, USDA Forest servis, p. 191–194
- Batjes, N. H. (1996): Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma* 71 (1–2): 31–52.
- Carpenter, C. M. G., Todorov, D., Driscoll, C., Montesdeoca, M. (2016): Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. *Environmental Pollution*, 218, 664-672
- Carvajal, F., Aguilar, M. A., Agüera, F., Aguilar, F. J., Giráldez, J. V. (2006): Maximum depression storage and surface drainage network in uneven agricultural landforms. *Biosystems Engineering – Soil and Water*, 95 (2): 281-293.
- Coleman, D. C., Whitman, W. B. (2004): Linking Species Richness, Biodiversity and Ecosystem Function in Soil Systems, International Symposium on Impacts of Soil Biodiversity on Biochemical Processes in Ecosystems, Taipei, Taiwan
- Čermák, V., Flórová, K., Králová, H., Ungerman, J. (2002): Protipovodňová ochrana Moravy a Bečvy: Koncepce ekologické varianty. Unie pro řeku Moravu, Brno
- Daňhelka J. (2007): Operativní hydrologie: Hydrologické modely a nejistota předpovědí. Vydal Český hydrometeorologický ústav v Praze. Vyd. 1., 104 s. ISBN 978-80-86690-48-3
- Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K., Frede, H. G. (2001): Hydrologic Response to Land Use Changes on the Catchment Scale. *Phys. Chem. Earth (B)*, 26 (7-8): 577-582
- Holý, M. (1978): Protierozní ochrana. Státní nakladatelství technické literatury, Praha
- Hlavínek, P. (2007): Hospodaření s dešťovými vodami v urbanizovaném území. Ardec, Brno, 164s. ISBN 978-80-86020-55-6
- Janský, B. (2006): Retence vody v povodí. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha. Dostupné online z <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2006/Z0120/jansky.pdf> (cit. 3. 1. 2017)
- Kantor, P., & Krečmer, V. (2003): Lesy a povodně: souhrnná studie. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR. ISBN 80-7212-255-X
- Kantor, P. & Šach, F. (2002): Možnosti lesů při tlumení povodní. *Lesnická práce* 11/2002
- Karvonen, T., Koivusalo, H., Jauhiainen, M., Palko, J., Weppling, K. (1999): A hydrological model for predicting runoff from different land use areas. *Journal of Hydrology*, 253–265.
- Katalog map – Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy v. i. i. Dostupné online z www.vumop.cz/sites/default/files/2016_katalogMap.pdf (cit. 6. 4. 2017)
- Královec V., Kliment, Z., Vlček, L. (2016): Hodnocení retence vody v půdě v lesním a nelesním prostředí. *Zprávy lesnického výzkumu*, 61, 2016 (3): 181-189
- Krämer, I. & Hölscher, D. (2009): Rainfall partitioning along a tree diversity gradient in a deciduous old-growth forest in Central Germany. *Ecohydrology* 2: 102–114

Krešl, J. (1999): Vliv lesa na utváření odtoku při přívalových a dlouhotrvajících deštích, *Lesnická práce* 78: 501-502.

Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F. W., Laar, M., Gusmao, F. (2001): Technology Urban water retention by greened roofs in temperate and tropical climate. *Ressource Management & Development – Scientific Contributions for Sustainable Development*, 2001 (2): 151 – 162.

Langhammer, J. (2007): Odtokový proces. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha.

Dostupné online z http://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/hydro/pdf/Hydrologie_1_Langhammer_odtok_proces.pdf (citováno 3.1.2017)

Lichner, L., Šír, M., & Tesař, M. (2004): Testování retenční schopnosti půdy. Sborník příspěvků z konference Aktuality Šumavského výzkumu II. Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, 63-67.

Lhotský, R. (2006): Retenční funkce Třeboňské rybníční soustavy. *Vodní hospodářství* 56 (12): 410-414.

Maděra, P. (2014): Lesy a jejich vliv na vodní režim krajiny. Sborník Povodně a sucho: krajina jako základ řešení. Vydal Botanický ústav AVČR. ISBN 978-80-86188-44-7

Matoušek, V. (2002): Stoletá povodeň na revitalizovaném potoce Borová. *Vodní hospodářství* 52, příloha VTEI: 5–11

Mu, W., Yu, F., Li, Ch., Xie, Y., Tian, J., Liu, J., Zhao, N. (2015): Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and soil moisture content on different growing stages of spring maize. *Water*, 2015 (7): 2990-3008.

Niehoff, D., Fritsch, U., Bronstert, A. (2002): Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *Journal of Hydrology*, 267, 80–93.

Nimmo, J., (2004): Porosity and Pore Size Distribution. In *Encyclopedia of Soils in the Environment* 4. Hillel, D. [ed.] Elsevier, London.

Pamukcu, P., Erdem, N., Serengil, Y., Randhir, T. O. (2016): Ecohydrologic modelling of water resources and land use for watershed conservation. *Ecological Informatics* 36: 31–41.

Paul, M. & Meyer, J. (2001): Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001 (32): 333-365.

Petříček, V. & Cudlín, P. (2003): Máme bojovat proti povodním? *Život. Prostr.*, 37 (4): 177-179

Pithart, D., Dostál, T., Langhammer, J. et al. (2012): Význam retence vody v říčních nivách. 1. vyd. České Budějovice: DAPHNE ČR – In. *apl. ekologie*, 141 s. ISBN 978-80-260-3697-5.

Podrázský, V., & Remeš, J. (2005): Retenční schopnost svrchní vrstvy půd lesních porostů s různým druhovým složením. *Zprávy lesnického výzkumu*, 50 (1): 46-48.

Pokorný, J. & Lhotský, R. (2006): Význam mokřadů pro ovlivnění vodní bilance krajiny. *Vodní hospodářství* 56 (2): 31-34.

Rožnovský, J. (2014): Klimatická změna: dopady na krajinu. Sborník Povodně a sucho: krajina jako základ řešení. Vydal Botanický ústav AVČR. ISBN 978-80-86188-4

Sajikumar, N., Remy, R.S. (2015): Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. *Journal of Environmental Management* 161: 460-468

Soukup, M., et al (2008): Biotechnická opatření v krajině pro zvýšení retence vody na odvodněných pozemcích v pramenných oblastech. Praha, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 82 s.

Šantrůčková, H., Malý, S., Cienciala, E. (2014): Půdní organická hmota a vodní retenční kapacita půd. Sborník Povodně a sucho: krajina jako základ řešení. Vydal Botanický ústav AVČR. ISBN 978-80-86188-44-7

Šarapatka, B., Dlapa, P., Bedrna, Z. (2002): Kvalita a degradace půdy. Olomouc: Univerzita Palackého. ISBN 80-244-0584-9.

Štěrbá O., et al (2008): Říční krajina a její ekosystémy. Olomouc, Univerzita Palackého, 391s. ISBN 978-80-244-2203-9

Švihla, V. (2001): Vliv lesa na odtokové poměry v malém povodí. *Lesnická práce* č. 2/01

Švihla, V., Černošous, V., Kulhavý, Z., Šach, F. (2006): Retence srážkové vody lesní půdou v horském povodí. In Neuhöferová, P. (ed.): *Meliorace v lesním hospodářství a krajinném inženýrství*. Kostelec nad Černými lesy, 26.-27. 1. 2006, FLE ČZU v Praze a VÚMOP Praha.

Švihla, V., Černošous, V. Šach, F. (2014): Velké vody na lesním povodí v Orlických horách. *Zprávy lesnického výzkumu*, 59, 2014 (3): 205-212

Tesař, M., Šír, M., Syrovátka, O., Pražák, J., Lichner, L., Kubík, F. (2001): Soil water regime in head water regions – observation, assessment and modelling. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 49 (6): 355–375.

Topičová, D. (2016): Posouzení nezbytnostizadržných a vsakovacích systémů dešťových vod v zastavěném území. Zemědělská fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 67 s.

Tuller, M., & Or, D. (2004): Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. In *Encyclopedia of Soils in the Environment* 4. Hillel, D. [ed.] Elsevier, London.

Úlehla, V. (1947): *Napojme prameny*. Praha: Život a práce, 126 s.

Vach, M., Haberle, J., Procházka, J. et al. (2009): Pěstování strniskových meziplodin. Výzkumný ústav rostlinné výroby v. i. i., Praha – Ruzyně. ISBN 978-80-87011-26-3.

Válek, Z (1977): *Lesní dřeviny jako vodohospodářský a protierozní činitel*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství

Vodní nádrž Orlík, Wikipedie (citováno 6. 4. 2017) Dostupné online z https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_n%C3%A1dr%C5%BE_Orl%C3%ADk

Wahren, A., Schwärzel, K., Feger, K. H., Münch A., Dittrich I. (2007): Identification and model based assessment of the potential water retention caused by land-use changes. *Advances in geosciences*, 11: 49 - 56.