

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 448

ISSN 1213-418X

Miroslav Dumbrovský

**NEPŘÍZNIVÉ DŮSLEDKY
POVRCHOVÉHO ODTOKU
A JEJICH ELIMINACE
V PROCESU POZEMKOVÝCH ÚPRAV**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav vodního hospodářství krajiny

Doc. Ing. Miroslav Dumbrovský, CSc.

**NEPŘÍZNIVÉ DŮSLEDKY POVRCHOVÉHO ODTOKU
A JEJICH ELIMINACE V PROCESU POZEMKOVÝCH ÚPRAV**

ADVERSE CONSEQUENCES OF SURFACE RUNOFF AND ITS
CONSERVATION IN THE LAND CONSOLIDATION PROCESS

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ A VODNÍ STAVBY



Brno 2013

KLÍČOVÁ SLOVA

Eroze půdy, povrchový odtok, ochrana povodí, retenční schopnost krajiny, ochranná opatření, protipovodňová opatření, optimalizační model, pozemkové úpravy

KEY WORDS

Soil erosion, surface runoff, watershed protection, retention capacity of the landscape, conservation measures, flood control, optimisation model, land consolidation

© Miroslav Dumbrovský , 2013

ISBN 978-80-214-4699-1

ISSN 1213-418X

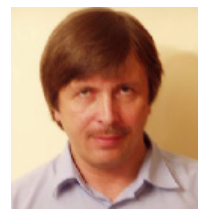
Obsah

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1 ÚVOD	6
2 PROCES VODNÍ EROZE	6
2.1 Vznik povrchového odtoku	7
2.2 Proces uvolnění, transportu a depozice půdních částic	8
3 NEPŘÍZNIVÉ DŮSLEDKY POVRCHOVÉHO ODTOKU V POVODÍ NA PLOŠE ZDROJOVÉHO POZEMKU.....	10
3.1 Vliv minulé eroze na hydrologické charakteristiky	11
3.2 Kvantifikace projevů eroze na zdrojových pozemcích v povodí	13
3.3 Erozní procesy v drahách soustředěného povrchového odtoku a jejich kvantifikace	15
4 NEPŘÍZNIVÉ DŮSLEDKY POVRCHOVÉHO ODTOKU MIMO ZDROJOVÉ POZEMKY V POVODÍ.....	19
4.1 Kritické body a jejich stanovení.....	20
5 INTEGROVANÁ OCHRANA POVODÍ PROTI NEPŘÍZNIVÝM ÚČINKŮM POVRCHOVÉHO ODTOKU V POZEMKOVÝCH ÚPRAVÁCH.....	21
5.1 Návrh opatření integrované ochrany povodí.....	22
5.2 Optimalizace návrhu opatření pro eliminaci nepříznivých důsledků povrchového odtoku	23
5.3 Hodnocení účinnosti ochranných opatření v ploše povodí.....	26
6 ZÁVĚR	30
7 PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU A PRO PRAXI.....	31
8 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI.....	31
9 LITERATURA.....	32
SUMMARY	34

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

doc. Ing. Miroslav Dumbrovský, CSc.

Narozen: 6.3.1958 v Opavě, okres Opava



Vzdělání

- 1977–1982 – MENDELOVA UNIVIVERSITA (VŠZ) Brno,
- 1989–1992 – CSc. obor 41-10-9 Meliorace, školitel: doc. Ing. Vlastimil Pasák, DrSc.
- 2005 – habilitace v oboru vodní hospodářství a vodní stavby.

Zaměření

Ochrana a organizace povodí, Protierozní ochrana, Hydropedologie, Pozemkové úpravy.

Zaměstnání a praxe

- 1982–1986 - Agroprojekt Brno (samostatný projektant).
- 1986–2003 - Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy (výzkumný pracovník).
- 1991–2002 - Vedoucí oddělení a vedoucí pracoviště VÚMOP Brno.
- 1998–dosud - VUT v Brně, FAST, Ústav vodního hospodářství krajiny.
- 2003–dosud - Zástupce vedoucího ústavu VHK , FAST VUT v Brně.

Odborné stáže a účast na zahraničních projektech

- 1992 – 3 měsíční stáž v Natural Resource Conservation Service (Úřad pro ochranu přírodních zdrojů) ve Washingtonu a v Midwest National Technical Centre v Lincolnu (výzkumné technické centrum).
- 1993 – 1 měsíční stáž na Cambridge University v Anglii (Cambridge Summer School in Land Policy – Letní škola Cambridge University v oblasti krajinného plánování a pozemkových úprav).
- 1997 – Yandling, Čína, práce v mezinárodním týmu při hodnocení realizovaných protierozních opatření.
- 2001 – Nyeri, Keňa, práce v mezinárodním týmu při hodnocení realizovaných protierozních opatření.
- 2003–2006 – práce v mezinárodním týmu v rámci projektu Interreg IIIB-CADSES.
- 2008 – Humbolt-University – implementace protierozních opatření ve směrnicích EU.
- 2013 – Česko-Rakouská spolupráce – harmonizace predikčních metod pro výpočet erozního smyvu.

Spolupráce s externí sférou

- Od roku 1995 – odborně technická pomoc pro MZe ČR, Odbor environmentálních podpor, Ústřední pozemkový úřad, jednotlivé pozemkové úřady a projektanty v oblasti metodologie projektování pozemkových úprav a v oblasti vodního hospodářství krajiny.
- Od roku 1995 – pravidelné přednášky v rámci školení a seminářů pro pracovníky pozemkových úřadů organizované MZe ÚPÚ (metodologie projektování pozemkových úprav a v oblasti vodohospodářských opatření a protierozní ochrany).
- V letech 2003–dosud – člen autorizační zkušební komise na MZe ČR pro odbornou způsobilost projektování pozemkových úprav.
- Od roku 2000–2006 – člen Vědecké rady Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy Praha, od roku 2006 člen její odborné skupiny.
- Od roku 2005–dosud člen hodnotící komise grantové agentury NAZV Mze ČR.
- Od roku 2010 člen redakční rady odborného časopisu Pozemkové úpravy.
- Od roku 2012 člen redakční rady recenzovaného časopisu Literra Scripta.

Řešené projekty – odpovědný řešitel či spoluřešitel

V rámci výzkumné činnosti jsem řešil jako hlavní řešitel či spoluřešitel 11 výzkumných projektů v problematice pozemkových úprav a vodního hospodářství krajiny. V rámci výzkumné činnosti jsem od roku 2005 na VUT v Brně jako zodpovědný řešitel či spoluřešitel řešil následující výzkumné úkoly:

- 2012–2017 Název projektu: NAZV č. QJ1230066 „Degradace půdy a její vliv na komplex půdních vlastností včetně návrhu nápravných opatření k obnově ekologických funkcí půdy“.
- 2009–2011 Název projektu: NAZV č. QH92298 „Systém přírodě blízkých protierozních a protipovodňových opatření a jeho optimalizace v procesu pozemkových úprav“.
- 2009–2013 Název projektu: NAZV QI91C200 „Hodnocení účinnosti realizace komplexních pozemkových úprav“.
- 2008–2010 Název projektu: NAZV 72203 „Návrh podpory vhodných technologií a stanovení identifikátorů pro posouzení ekologických a retenčních funkcí krajiny“.
- 2008–2010 Název projektu: VaV MŽP SP/2e7/73/08 „Identifikace antropogenních tlaků na kvalitativní stav vod a vodních ekosystémů v oblastech povodí Moravy a Dyje“.
- 2007–2009 Název projektu: VaV MŽP SP2e3 „Hodnocení negativního vlivu degradačních faktorů na půdu a návrh možností jeho omezení – ochranu půdy EU“.
- 2005–2007 Název projektu: MZE 1R55007 „Zemní terasy a možnosti jejich revitalizace, rekonstrukce a rekultivace v procesu pozemkových úprav (projekt NAZV)“.

Pedagogická činnost

Od svého příchodu na Fakultu stavební VUT v roce 1998 jsem aktivně zapojen do výukového procesu.

- Bakalářské a magisterské studium

Vyučuji na studijním oboru bakalářského a magisterského studia - Vodní hospodářství a vodní stavby (V). Základní profilující předměty, které přednáším, jsou Vodní hospodářství krajiny II, Úprava odtokových poměrů povodí a Pozemkové úpravy. Přehled předmětů, u kterých jsem garantem pro Magisterské a Bakalářské studium: 0S5-Ochrana povodí a odvodnění, 1S0-Pozemkové úpravy, 5S4-Pozemkové úpravy – volitelný projekt II 5S5-Ochrana a organizace povodí – volitelný projekt II, BS52-Pozemkové úpravy, CS02-Geografické informační systémy, CS03-Úpravy odtokových poměrů povodí, BS07-Vodní hospodářství krajiny – volitelný projekt II. Od roku 2000 dosud jsem úspěšně vedl celkem 38 diplomových prací a 9 bakalářských, z nichž řada získala ocenění.

- Doktorské studium

Garantuji předměty: Hydropedologie, Ochrana a organizace povodí, Využití GIS ve vodním hospodářství. V průběhu svého působení na VUT, Fakultě stavební a na Výzkumném ústavu meliorací a ochrany půdy jsem jako školitel či školitel specialista přivedl k úspěšné obhajobě tři doktorandy. Od roku 2010 jsem členem stálé komise pro obhajoby doktorských disertačních prací. Od roku 2010 jsem členem oborové rady doktorandského studijního programu (V).

Publikace

- monografie: 2x
- kapitola v mezinárodní knize 1x
- citace jiným autorem podle Science Citation Index (SCI) 5x
- původní vědecká práce v recenzovaných časopisech 32x
- příspěvek ve sborníku světového nebo evropského kongresu, vědecké konference: 11x
- příspěvek ve sborníku národního nebo mezinárodního kongresu, sympózia, vědecké konference: 15x
- publikace v odborném časopisu: 20x
- příspěvek ve sborníku odborné konference: 64x
- skripta: 2x
- studijní opory 3x
- metodické návody 11x
- česká státní norma 1x

1 ÚVOD

Extrémní hydrologické jevy v posledních letech zvyrazňují skutečnost, že na velké části území České republiky je třeba věnovat značnou pozornost problematice protipovodňové a protierozní ochrany. Nepříznivé důsledky povrchového odtoku se projevují v ploše zdrojového pozemku formou erozních procesů a degradací povrchových půdních horizontů. Vodní eroze je v podmínkách České republiky významným degradačním procesem ohrožujícím v současné době více než polovinu výměry půdního fondu prostřednictvím nepříznivých změn celého komplexu půdních vlastností.

Mimo plochu zdrojových pozemků soustředěný povrchový odtok transportující splaveniny způsobuje škody na zastavěném území obce, kde při přívalových srážkách vniká do intravilánu a způsobuje škody na majetku a dále se transportované splaveniny dostávají do hydrografické sítě a sedimentují ve vodních nádržích, kde se cenná půda smíšená s komunálním znečištěním mění v toxický sediment, který není možno zpět použít k rekultivaci ale je nutno jej skládkovat jako toxický odpad.

Závěrečná zpráva o stavu vodního hospodářství z roku 2009 uvádí, že důsledky erozních procesů se v poměrně členitém území ČR promítají v zanášení prvků hydrografické sítě, zejména rybníků a nádrží. V ČR je 42 tis. ha rybníků s výměrou větší než 1 ha, ve kterých je uloženo 196 mil. m³ sedimentů, 9 tis. ha rybníků s výměrou menší jak 1 ha, ve kterých je uloženo 30 mil. m³ sedimentů, 60 765 km drobných vodních toků a závlahových kanálů, ve kterých je uloženo 5 mil. m³ usazenin a 8 287 km odvodňovacích kanálů, ve kterých je uloženo 0,6 mil. m³ usazenin. U mnoha nádrží je ročně zanášeno až 5 % objemu. Je odhadováno, že ve vodních nádržích v ČR je naakumulováno cca 250 mil. m³ sedimentu. Průměrné náklady na odtěžení 1 m³ zeminy činí 200–800 Kč, transportní náklady se mění dle toxicity sedimentu, netoxický sediment je možné rozprostřít zpět na pozemek, kdežto toxický sediment není možné rozprostřít zpět na erodovaný pozemek, ale je nutno ho lokalizovat na skládce, jako toxický odpad.

Autorem řešená problematika procesů vodní eroze, transportu splavenin a přímého odtoku včetně integrované ochrany území před nepříznivými účinky povrchového odtoku v procesu pozemkových úprav, je významnou oblastí vodního hospodářství krajiny s přímým dopadem na navrhování stavebně-technických prvků systému opatření protierozní a protipovodňové ochrany.

2 PROCES VODNÍ EROZE

Projevy eroze vznikající na zdrojových pozemcích v povodí vlivem povrchového odtoku rozdělujeme na plošnou (mezirýhovou) erozi, rýhovou erozi a erozi způsobující efemérní strže v drahách soustředěného povrchového odtoku. Mezirýhová eroze je způsobovaná kinetickou energií dešťových kapek a plošným odtokem, kdy deštěm uvolněné částice jsou dále transportovány do prostoru erozních rýh [31]. V návaznosti na uvolňování a posun částic příčinným deštěm, při dalším jeho pokračování, se na uvolňování částic a jejich transportu v rámci mezirýhového prostoru uplatňuje především vznikající povrchový plošný odtok o malé výšce. Se zvětšující se výškou plošného odtoku se snižuje podíl působení dešťových kapek na půdu, a s tím související transport půdních částic a splavenin [25]. V průběhu mezirýhové eroze, jsou nejprve selektivně uvolňovány částice nejjemnější zrnitostní frakce a následně dále v čase hrubší frakce [31], což platí pro, tzv. nekohezní půdy. U kohezních půd jsou uvolňovány a transportovány celé agregáty. V rámci mezirýhové eroze hraje důležitou roli odolnost a stabilita půdních agregátů proti destrukci vlivem kinetické energie dešťové kapky a následným plošným odtokem. Odolnost a stabilita závisí na pedologických charakteristikách povrchového horizontu půdního profilu. Rýhová eroze je charakteristická vznikem erozních rýh, které jako drobné kanálky vedou povrchový odtok a způsobují také změnu tvaru erozních rýh v čase. K rýhové erozi přispívá plošný povrchový odtok a jím transportované částice z mezirýhového prostoru a následně soustředěný povrchový odtok o malé hloubce ve vlastních erozních rýhách. Jestliže objem odnosu splavenin z mezirýhového prostoru je větší než transportní kapacita odtoku v erozních rýhách, začíná se i v erozních rýhách projevovat depozice sedimentu [31].

2.1 VZNIK POVRCHOVÉHO ODTOKU

Vznik a průběh erozních procesů závisí na rychlosti a tangenciálním napětí povrchově stékající vody. Při řešení plošného povrchového odtoku se předpokládá, že se hloubka vody stékající po svahu o konstantním sklonu zvětšuje se vzdáleností od rozvodí. Proces vodní eroze vzniká a probíhá v souvislosti s odtokem vody po povrchu území, ovlivněným řadou faktorů. Negativní důsledky povrchového odtoku jsou spojené s procesy vodní eroze a transportu splavenin, kde platí zákonitosti pro transportní procesy v rámci plošného a soustředěného povrchového odtoku způsobené tekoucí vodou [15].

Povrchový odtok na svahu probíhá v první fázi jako plošný, postupně však vlivem heterogenity reliéfu dochází k akumulaci odtékající vody a odtok plošný se mění v odtok soustředěný [15]. Povrchový odtok je definován jako část srážkové vody, jež po odečtení ztrát výparem, vsakem do půdy a povrchovou akumulací odtéká po povrchu území. Při vyšetřování povrchového odtoku pro zkoumání intenzity jím vyvolaných erozních procesů se vychází z předpokladu, že povrchový odtok probíhá na svahu plošně v souvislé vrstvě.

Fyzikálně podložené modely – využívají k popisu povrchového odtoku fyzikální zákonitosti, a to především zákon zachování hmoty a zákon zachování hybnosti. Vyplyvá z nich rovnice kontinuity a rovnice pohybová [15],[16].

Rovnice kontinuity má pak tvar:

$$\frac{\partial h}{\partial t}(x,t) + \frac{\partial \bar{u}h}{\partial x}(x,t) = r(t) - i(t) \quad (2.1)$$

kde: h je výška povrchového odtoku (m), která je funkcí polohy a času $h(x,t)$, $r(t)$ je intenzita srážek vztahených k jednotkové ploše svahu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), $i(t)$ je intenzita vsaku ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Rovnice hybnosti má pak tvar [15],[16]:

$$h(x,t) * \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}(x,t) + h(x,t) * \bar{u}(x,t) * \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}(x,t) = F_1 - F_2 - F_3 - F_4 + F_5 \quad (2.2)$$

kde: \bar{u} je průměrná rychlost povrchového odtoku ve směru osy x ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), α je sklon svahu ($^\circ$), g je tíhové zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), τ je tangenciální napětí ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$), v je rychlost dopadajících kapek deště ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). h' je náhradní výška, určující přírůstek tlaku vlivem dopadajících kapek (m), ρ je hustota vody ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

F_1 je tíha vody v elementárním úseku,

$$F_1 = g * \sin \alpha * h(x,t) \quad (2.3)$$

F_2 - tlaková síla působící na vodu v elementárním úseku ve vzdálenosti $x+dx$,

$$F_2 = g * \cos \alpha * h'(t) * \frac{\partial h}{\partial x}(x,t) \quad (2.4)$$

F_3 - tlaková síla působící na vodu v elementárním úseku ve vzdálenosti x ,

$$F_3 = g * \cos \alpha * \frac{\partial h}{\partial x}(x,t) \quad (2.5)$$

F_4 - třecí síla,

$$F_4 = \frac{\tau(h,\bar{u})}{\rho} \quad (2.6)$$

F_5 - síla vyvolaná dopadem dešťových kapek,

$$F_5 = r(t) * v(t) * \sin \alpha \quad (2.7)$$

Pro řešení rovnic (2.1) a (2.2) je nutno stanovit počáteční a okrajové podmínky [15],[16]. Počátek zkoumaného procesu je v čase $t = 0$, při kterém začínají srážky a formuluje se povrchový odtok. Pro neznámé veličiny výšky odtoku a průměrnou rychlost povrchového odtoku platí pro všechna x :

$$h(x,0) = 0 \quad (2.8)$$

$$\bar{u}(x,0) = 0 \quad (2.9)$$

Stanovení okrajových podmínek závisí na vzdálenosti vyšetřovaného úseku od rozvodí. Pro libovolnou vzdálenost $x_0 > 0$ je nutno stanovit:

$$h(x_0, t) = 0 \quad (2.10)$$

$$\bar{u}(x_0, t) = 0 \quad (2.11)$$

Obě rovnice (2.1) a (2.2) byly odvozeny na základě obecných fyzikálních zákonů. Rovnice kontinuity vyjadřuje kinematické zákonitosti odtoku a pohybová rovnice vyjadřuje dynamické zákonitosti odtoku. Spolu uvedenými počátečními a okrajovými podmínkami dávají jednoznačné řešení [16].

2.2 PROCES UVOLNĚNÍ, TRANSPORTU A DEPOZICE PŮDNÍCH ČÁSTIC

Vznik vodní eroze je obecně zahájen rozrušením povrchu vlivem dopadu dešťových kapek předávajících svoji kinetickou energii půdním agregátům, které v závislosti na jejich stabilitě rozrušují. Proces pokračuje povrchovým odtokem, kdy dochází k zahájení uvolnění půdních částic a transportu částic půdy po svahu. V průběhu tohoto procesu působí na částice půdy při zahájení jejich transportu tři základní síly: tíhová (vertikální) síla, vztlaková síla a třecí síla, kterou působí proudící voda na částice. Podíl výše vyjmenovaných sil závisí na úhlu sklonu svahu. Na vodorovné ploše převládá tíhová síla, na svazích dominuje výtlačná a třecí síla [24]. Dle vztahu tíhové a třecí síly je možné na počátku celého erozního procesu definovat kritické podmínky, za kterých se částice začnou pohybovat dopředu či se otáčet okolo svého bodu kontaktu s jinými částicemi směrem dolů po svahu.

Podmínka je definována jako bod, ve kterém jsou si výše uvedené síly rovny – tíhová síla = třecí síla:

$$g(\rho_s - \rho) \frac{\pi}{6} d^3 \tan \phi \frac{d}{2} \sin \phi = \tau_c \frac{d}{2} \sin \phi \quad (2.12)$$

kde: g je gravitační síla, ρ_s je hustota sedimentu, ρ je hustota proudící vody, d je průměr zrna půdní částice, ϕ je úhel sklonu povrchu v době, kdy jsou částice půdy v klidu, τ_c je kritická hodnota tažné síly potřebná pro pohyb částic půdy.

Vztlaková síla vychází z rozdílů rychlostí proudění mezi vrchním a spodním povrchem částic (což vede k vytvoření tlakového gradientu, který způsobuje vytlačování částic) a turbulentních vírů vzniklých v rámci odtoku těsně pod povrchem a působící směrem vzhůru. Částice se začnou pohybovat dopředu či se otáčet okolo svého bodu kontaktu s jinými částicemi směrem dolů po svahu ve chvíli, kdy velikost třecí síly překročí velikost síly tíhové.

Třecí síla τ způsobená prouděním vody je dle Morgana [24]:

$$\tau = \gamma R s, \quad (2.13)$$

kde: γ je hustota vody ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); R hydraulický poloměr (m); s sklon svahu ($^\circ$).

Morgan uvádí, že k transportu částic dochází až do chvíle, kdy rychlost proudění klesne pod rychlost sedimentace v_s daných částic půdy. Sedimentační rychlost vychází ze Stokesova zákona a má tvar:

$$v_s = \frac{2gr(\rho_s - \rho)}{9\mu}, \quad (2.14)$$

kde: g je tíhové zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), r je poloměr částic půdy (m); ρ_s je hustota půdy ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); ρ je hustota vody ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); μ je dynamická viskozita vody ($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$).

Uvolněním půdních částic z topsoilu vznikají splaveniny. Následuje fáze transportu splavenin a jejich sedimentace – depozice v místech, kde vlivem morfologie terénu poklesne unášecí schopnost odtoku. Podmínky pro uvolnění půdních částic a vznik splavenin jsou limitovány odolností povrchových půdních horizontů a stabilitou půdních agregátů proti jejich destrukci vlivem kinetické energie dešťových kapek a následně vlivem tečného napětí povrchového odtoku. Množství sedimentu transportované povrchovým odtokem je limitováno transportní kapacitou odtoku, a množstvím sedimentu vhodným k transportu [11]. Maximální erozivita D_c pro daný průtok rýhou nastává v případě malého množství neseného sedimentu z výše položené části rýhy nebo povodí. D_c je možno spočítat:

$$D_c = K_c(\tau) - \tau_c \quad (2.15)$$

kde: K_c je faktor erodovatelnosti půdy vlivem proudění; τ je smykové napětí vyvolané proudící vodou; τ_c je kritické smykové napětí potřebné k oddělení částic půdy.

Transportní kapacita T_c určuje maximální možnou koncentraci splavenin za daného odtoku. Transportní kapacita je funkcí smykového napětí vyvolaného odtokem [33]:

$$T_c = K_t \Gamma^{\frac{3}{2}} \quad (2.16)$$

kde: K_t je koeficient transportu sedimentu ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), Γ je smykové napětí ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$). Koeficient K_t závisí na zrnitosti a hustotě erodovaného materiálu.

Na druhou stranu transportní kapacita je rovněž limitována v případě, kdy množství splavenin je větší, než je transportní kapacita odtoku – v tomto případě dochází k depozici splavenin často přímo v podsvahovém deluviu přímo na zdrojovém pozemku.

Dalším faktorem ovlivňujícím parametry erozních rýh je nerovnoměrné tečné (tangenciální) napětí povrchového odtoku kolem hranice vzniklé erozní rýhy. Tečné napětí a erozivita je největší ve středu erozní rýhy. Generování a následná změna tvaru prohlubování a rozšiřování erozní rýhy je způsobeno mechanickým rozrušováním stran profilu erozní rýhy, kdy se zvětšuje jejich sklon, nastává kolaps jejich přirozené stability a zborcení stěn do prostoru erozní rýhy, odkud je tento materiál transportován dále soustředěným povrchovým odtokem o malé hloubce, až k oblasti depozice [31].

Míra uvolňování půdy v rýhách může být ovlivněna řadou dalších proměnných zahrnujících rozrušování povrchu obděláváním půdy, živou kořenovou biomasu, zapravování residuálních zbytků, utužení půdy a také zamrzání a rozmrazání půdy. Erozní rýhy se vytvoří v případě, když tečné napětí povrchového odtoku je větší než tzv. kritické tečné napětí pro dané půdy a také, je-li překročena tzv. kritická rychlost.

Jako první popsal význam smykového napětí pro vznik rýh Horton [17]. Uvádí vztah pro výpočet smykového napětí:

$$\Gamma_b = \rho \cdot g \cdot d \cdot s \quad (2.17)$$

kde: Γ_b je smykové napětí od povrchové odtékající vody ($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), ρ je objemová hmotnost vody ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); g je tíhové zrychlení ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); d je výška odtékající vody (m); s je sinus úhlu svírající povrch svahu a vodorovná rovina (-).

Hodnota smykového napětí závisí na vlastnostech dané půdy (její zrnitosti, obsahu jílu, obsahu vody a chemismu půdy). Vandaele [32] uvádí vztah pro stanovení kritického smykového napětí, při kterém dochází k iniciaci rýh:

$$\Gamma_{cr} = (c\gamma) A^{rf} s \quad (2.18)$$

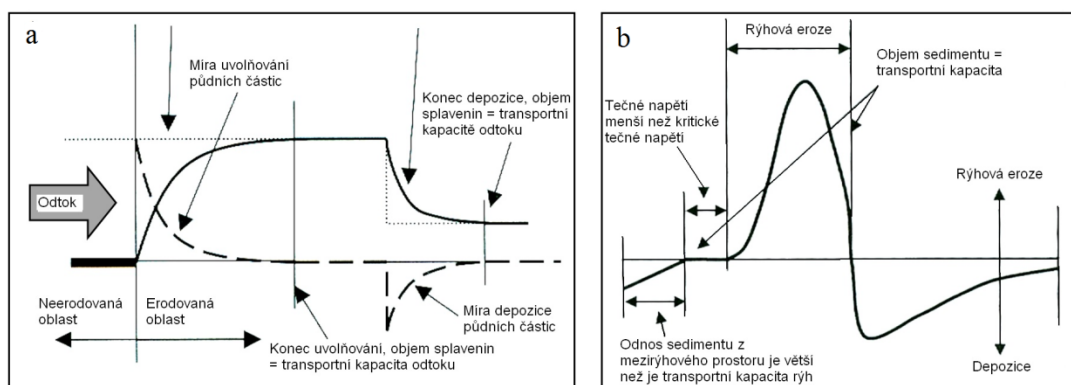
kde: Γ_{cr} je kritické smykové napětí (Pa), A je přispívající plocha svahu (ha), s je sklon svahu ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$), rf je součinitel (pohybuje v rozmezí hodnot 0,4 až 0,2), c je konstanta, γ je objemová hmotnost vody ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Proudící voda vyvolává třením v rámci omočeného obvodu erozních rýh napětí na půdních částicích, a pokud je překročeno smykové napětí půdy, částice se uvolní a jsou transportovány dolů po svahu. [13] Smykové napětí se vlivem soustředěného povrchového odtoku rozděluje na dvě části. Smykové napětí (příčinné ve vztahu k oddělování půdních částic a jejich transportu) působící na půdu a napětí působící na ostatní prvky (vegetační pokryv, posklizňové zbytky, aj.) v závislosti na drsnosti půdního povrchu. Druhá část zmenšuje celkové povrchové napětí a snižuje riziko porušení půdní konsolidace. Například travní porost významně redukuje smykové napětí vody působící na půdní částice [28].

Jakmile se erozní rýha prohloubí až na „neerodovatelnou“ vrstvu, začíná se erozní rýha rozšiřovat v závislosti zejména na charakteristikách přímého odtoku [28]. Erozní rýha se přestane rozšiřovat a tvarově měnit v případě, kdy charakteristiky následujících odtoků nedosahují parametrů odtoku generujícího erozní rýhy, jedná se potom o tzv. finální šířku a tvar erozní rýhy.

Ve chvíli, když už je erozní rýha formována, dalším příčinným faktorem se stává také rozvoj nerovností ve dně rýhy. Vznikají nerovnosti (vyvýšeniny a sníženiny) viditelné v podélném řezu rozvíjející se rýhy, které jsou po překročení odolnosti dané zeminy zborceny a materiál je oderodován. Toto je bráno jako další zdroj erodovaného materiálu vedle eroze bočních stěn erozní rýhy, která je rozhodující z hlediska celkového objemu erozních produktů [24].

Dalším základním principem erozního procesu je situace (Obr. 1a), kdy celková erozivita povrchového odtoku je rozdělena mezi proces uvolňování částic a jejich transport. Jestliže množství uvolněných splavenin zcela naplní transportní kapacitu odtoku, další uvolňování částic se velmi snižuje, neboť erozivita odtoku je „spotřebována na transport splavenin“. Uvolňování částic se zpomaluje tak, jak se množství splavenin blíží transportní kapacitě odtoku. Obrázek 1b zobrazuje situaci, kdy míra uvolňování půdních částic se rovná její celkové kapacitě v případě, kdy množství splavenin je nulové až k bodu, kdy ustálený odtok začne generovat a transportovat další splaveniny. Uvolňování půdních částic je funkcí erozivitu odtoku a odolností půdy proti uvolňování částic. Kapacita uvolňování půdních částic klesá, když generované splaveniny začínají být akumulovány, transportovány a naplňují transportní kapacitu deště a povrchového odtoku.



Obr. 1 Interakce mezi objemem splavenin, transportní kapacitou odtoku, uvolňováním půdních částic a depozicí [31] (a), proces rýhové eroze v profilu svahu [31] (b)

Transportní kapacita odtoku je funkcí erozivitu odtoku a jeho schopností transportovat splaveniny v závislosti na velikosti a hustotě půdních částic. Jakmile transportní kapacita náhle poklesne, jak je ilustrováno na obrázku 1a, nebo když objem splavenin je větší než transportní kapacita povrchového odtoku začíná depozice splavenin. Depozice splavenin je závislá na transportní kapacitě odtoku, objemu transportovaných splavenin, rychlosti a výšce odtoku a rychlosti dekantace půdních částic. Depozice půdních částic začíná ukládáním hrubozrnného materiálu a pokračuje dále v závislosti na zrnitostním složení splavenin. To se stává v případě poklesu sklonu v dolní části konkávního svahu či v případě přítomnosti překážek povrchového odtoku, např. zasakovacích a sedimentačních zatravněných pásů.

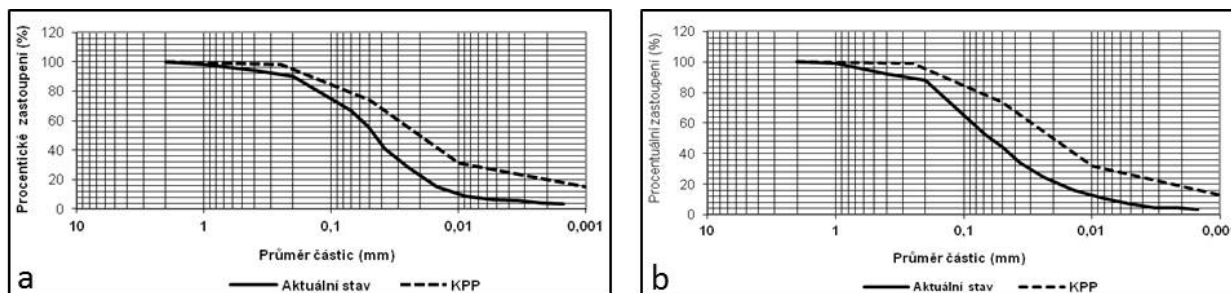
3 NEPŘÍZNIVÉ DŮSLEDKY POVRCHOVÉHO ODTOKU V POVODÍ NA PLOŠE ZDROJOVÉHO POZEMKU

Nepříznivé důsledky degradace půdního profilu vlivem vodní eroze se projevují negativně zejména ve vztahu ke komplexu půdních vlastností. Existují tři základní typy degradace půdního profilu vlivem vodní eroze: fyzikální, chemická a biologická [23]. Z hlediska odtokových a erozních poměrů je významná především degradace fyzikální.

Fyzikální degradace zahrnuje zhoršování fyzikálních vlastností půdy, jako jsou struktura, textura, objemová hmotnost, vodní kapacita, pórovitost, infiltrační schopnost, aj. Vlivem eroze dochází u fyzikálních vlastností jak ke kvantitativním změnám, tak i ke změnám vzájemných vztahů mezi jednotlivými půdními vlastnostmi [7]. Dochází ke snížení infiltrační schopnosti a k vzrůstání povrchového odtoku. Tím, že dochází neustále ke snižování mocnosti původního přirozeného povrchového horizontu, dostává se přioráváním stále více jílovitého materiálu subsoilu do povrchové vrstvy, kde se zvyšujícím se podílem zeminy subsoilu je tendence k rozplavování půdní struktury. Tím dochází vlivem zamazávání k snižování propustnosti pórů, snížení provzdušněnosti (s tím souvisí omezení půdního edafonu), snižování infiltrace a zvyšování objemové hmotnosti.

3.1 VLIV MINULÉ EROZE NA HYDROPEDOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY

V rámci výzkumného projektu [4] byla na experimentálním území v povodí Šardického potoka provedena retrospektivní analýza změn zrnitosti půdy za časové období cca 40 let. Prostorová lokalizace 10 sond Komplexního průzkumu půd provedeného v 70. letech minulého století (KPP) byla zjištěna z archivních mapových podkladů provedeného průzkumu. Identifikace a vytýčení sond současného aktuálního stavu (AS) byla zajištěna s využitím GPS. Následně byly odebrány z povrchových horizontů půdní vzorky a byl proveden rozbor zrnitosti dekantační pipetovací metodou.



Obr. 2 Zrnitostní křivky sond V1 (a) a V2 (b) v povodí Šardického potoka

Srovnání zrnitostních křivek vzorků aktuálního stavu půdy (AS) se stavem zjištěným v 70. letech během KPP (demonstrováno na sondách V1 a V2) ukázalo úbytek jílové frakce průměrně o 17 % a prachové frakce průměrně o 12 %. Naopak došlo k nárůstu frakce písku průměrně o 14 % [4], [30]. Toto poukazuje na selektivní působení vodní eroze na odplavení jemné frakce prachovitých a koloidních látek, které jsou významné pro stabilitu půdní struktury. Tento výsledek se shoduje s výsledky autorů [14]. Povrchový odtok, jakož i uvedený vertikální pohyb vody půdním profilem odstraňuje selektivně z orniční vrstvy nejen agregující jílovité částice, ale snižuje také obsah organických látek. Jak ukazují výsledky rozborů na obsah organické hmoty, byl zaznamenán pokles průměrně o 1,2 %. Vlivem změny půdní struktury z drobtovité na zrnitou a polyedrickou, které jsou náchylné k tvorbě půdní krusty a „zamazávání“ pórů (sealingu) dochází ke snížení infiltrační schopnosti půdních horizontů a celkově ke snížení retenční schopnosti povodí. Uvedené výsledky výzkumu potvrzují také práce [26]. Tím se vytvářejí podmínky pro vznik povrchového odtoku a vodní eroze.

Na stanovených profilech (odtokových liniích – svahových transektech) v působnosti výběrových sond, bylo po zadání dvou stavů zrnitostního složení a obsahu organické hmoty (KPP a aktuální stav) provedeno modelování ztráty půdy a zejména změn vybraných hydropedologických charakteristik ovlivňujících retenční schopnost povodí s využitím modelu WEPP (Water Erosion Prediction Project) používaným pro řešení povrchového odtoku a vodní eroze, na jednotlivém svahu. Tento deterministický simulační model generuje simulační výstupy na základě fyzikálního popisu procesu, jako dynamický proces proměny v prostoru a čase na základě rovnic kontinuity pohybu vody a splavenin. Model je založen na principech hydrologie, hydrauliky a erodologie a je určen pro simulace předpovědi povrchového odtoku, ztráty půdy a ukládání sedimentů v malých povodích na svazích, v údolnicích pozemků a v korytech drobných vodních toků. Model používá měřené deště nebo syntetické návrhové deště, včetně dešťů vytvořených stochastickým generátorem, který současně poskytuje informace i o ostatních denních meteorologických údajích. Model WEPP poskytuje informace o polohovém a časovém rozložení ztrát půdy a její depozici včetně přesné lokalizace s vyznačením místa a doby výskytu na povodí (Obr. 3). V současné verzi modelu byla rovnice RUSLE (Revised Universal soil loss equation) nahrazena deterministickými rovnicemi, které jsou založené na infiltrační teorii (Green-Ampt), fyzikálních vlastnostech půdy a erozních mechanismech.

Model WEPP pro popis pohybu sedimentu v rýhách používá rovnici kontinuity sedimentu vyjádřenou jako [12]:

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (3.1)$$

kde: x je vzdálenost na svahu (m), G je množství sedimentu ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$), D_i je dotace mezirýhového sedimentu do rýhy ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$), D_f je míra rýhové eroze ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$).

Přísun mezirýhového sedimentu D_i je uvažován jako nezávislý od x a je vždy pozitivní. Rýhová eroze D_f je pozitivní pro uvolňování sedimentu a negativní pro usazování sedimentu. Pro účely výpočtu v daném modelu obě hodnoty D_f a D_i jsou počítány na jednotku plochy rýhy a tím je G počítáno na jednotku šířky rýhy. Na základě kompletního výpočtu je ztráta půdy vyjádřena jako ztráta půdy na jednotku plochy povodí. Rovnici kontinuity sedimentu model aplikuje jako základ pro popis pohybu sedimentu v rýze. Na rozdíl od ostatních modelů, WEPP rozděluje odtok na rýhovou a mezirýhovou část a počítá smykové napětí založené na rýhovém odtoku [26]. Erozní parametry jsou založeny na rozsáhlých terénních studiích [22], které byly speciálně navrženy a interpretovány pro erozní model WEPP. Eroze půdy v rýhách je počítána pro případy, kdy hodnota hydraulického povrchového napětí převyšuje kritické smykové napětí půdy a kdy množství sedimentu je menší než je transportní kapacita rýh. Pro případ odnosu půdy v rýhách platí vzorec:

$$D_f = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (3.2)$$

kde: D_c je erozní kapacita odtoku v rýhách, T_c je transportní kapacita sedimentu v rýhách.

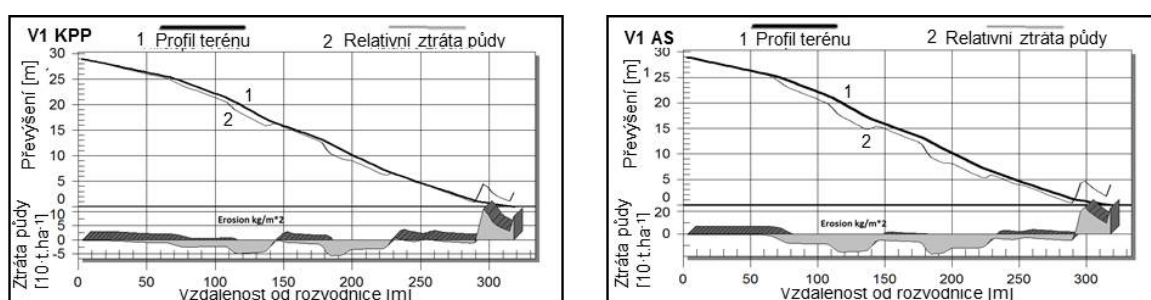
Když hydraulické tečné napětí odtoku v rýhách převyšuje kritické tečné napětí půd, tak kapacita uvolňování D_c je vyjádřena:

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_c) \quad (3.3)$$

kde: K_r je parametr erodovaných rýh, τ_f je tečné napětí odtoku působící na půdní vlastnosti v rýze, τ_c je parametr kritického tečného napětí půdy (Pa).

Uvolňování půdy v rýhách je bráno jako 0 v případě, kdy tečné napětí odtoku je menší než kritické tečné napětí půdy. Rýhová erodibilita a kritické tečné napětí jsou v modelu aplikovány jako funkce mnoha časově proměnných faktorů.

V rámci profilů odtokových linií a jejich definovaných morfologických parametrů a po zadání sledu agrooperací (v kontextu uvedených texturálních změn) byla zjištěna úroveň modelové ztráty půdy pro oba stavy (uveden průběh variantních změn erozních odnosů v působnosti sondy V1).



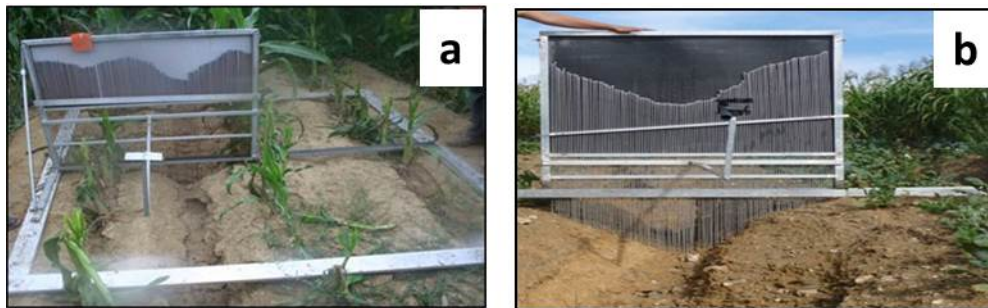
Obr. 3 Erozní smyv v profilu svahu u sondy V1 v období KPP (vlevo) a erozní smyv v profilu svahu u sondy V1 současného stav (vpravo)

Porovnáme-li modelované hodnoty ztráty půdy v závislosti na charakteristikách půdních vlastností u jednotlivých hodnocených variant (v modelu byly změněny pouze parametry půdních vlastností) došlo u tří sond u aktuálního stavu k poklesu ztráty půdy [4],[30]. Tento neočekávaný stav je také důsledkem intenzivních erozních procesů a změny půdních vlastností, kdy v povrchovém horizontu poklesl obsah jílovitých a prachových částic a zvýšil se obsah písku. Současně došlo ke zvýšení hydraulické vodivosti. Zvýšený obsah písku je důsledkem intenzivních zrychlených erozních procesů během předchozích let, kdy byla natolik snížena mocnost vrstvy spraši, že se do povrchové orniční vrstvy postupným naoráváním

dostává starotřetihorní neogenní písek. U ostatních variant došlo k nárůstu ztráty půdy vlivem změn obsahu jednotlivých zrnitostních frakcí, destrukcí půdní struktury (ze struktury drobtovité na prašnou) snížením hodnoty tečného napětí a snížení obsahu organické hmoty v povrchové vrstvě. U obou variant (KPP a AS) je v rámci temporálního vývoje patrný výrazný pokles objemové hmotnosti vlivem zpracování půdy a je zde výrazný trend zvyšování objemové hmotnosti půdy se zvyšujícím se časovým odstupem od zpracování půdy s maximem těsně před podzimním zpracováním půdy po sklizni erozně nebezpečné plodiny, kdy došlo u obou variant opět k výraznému poklesu objemové hmotnosti. Pokles od stavu maximální konsolidace k minimálním hodnotám je výraznější u varianty aktuálního stavu. Ke snížení celkové pórovitosti v aktuálním stavu došlo v důsledku erozních procesů vlivem obnažení podorničí s vyšším obsahem písčité částice [4],[30]. Došlo tak i přes nárůst gravitačních pórů vlivem absence jílovitých frakcí ke snižování obsahu kapilárních pórů, a tím i celkového obsahu pórů. U hodnocených transekt byla dosažena hodnota hydraulické vodivosti u variant KPP nižší než u variant vyjadřujících AS půdy. Toto zjištění je ve vztahu ke změnám zrnitostních charakteristik, kdy vlivem eroze byly selektivně vyplaveny jílovité a prachovité částice a u aktuální varianty došlo ke snížení obsahu prachu a jílu a naopak ke zvýšení obsahu písku, který se do orníční vrstvy dostal naoráváním starotřetihorních písčitéch neogenních sedimentů. Zvýšený obsah písku má vliv na zvýšení obsahu gravitačních pórů, a tím i hydraulické vodivosti. Při hodnocení průběhu hydraulické vodivosti v rámci časového období při zpracování půdy došlo k výraznému zvýšení hydraulické vodivosti, která však vlivem postupující konsolidace začala klesat až do doby podzimního zpracování půdy [4],[30].

3.2 KVANTIFIKACE PROJEVŮ EROZE NA ZDROJOVÝCH POZEMCÍCH V POVODÍ

V souladu s cíli výzkumných projektů řešených autorem [4] byla vyvinuta speciální metoda, která umožňuje získání dat potřebných pro stanovení ztráty půdy přímo v terénu. Na VUT v Brně, FAST, ÚVHK bylo navrženo a realizováno zařízení „erodoměr“ (erozní most), které umožňuje zaměření příčného profilu povrchu půdy. Navrženým zařízením je možno provádět zaměření profilů erozních rýh a jejich objemovou kvantifikaci přímo v terénu (Obr. 4a), [7], [30].



Obr. 4 Skutečné zobrazení erodoměru pro kvantifikaci rýhové eroze (a) a skutečné zobrazení erodoměru pro kvantifikaci erozních projevů u efemérních strží (b) (Zdroj: vlastní)

Pro možnost zaměření profilu efemérních rýh (větší šířka a hloubka), byla provedena modifikace zařízení erodoměru, kdy byly prodlouženy měrné jehlice a ve vybraném zaměřovaném příčném profilu je erodoměr posunován v délkově regulovatelném nosném profilu (Obr. 4b).

Erodoměr pro kvantifikaci erozních odnosů v efemérních rýhách se skládá z hliníkového rámu a souboru sta jehlic, které jsou v rámu umístěny v konstantních vzdálenostech. Po spuštění horní lišty, která je pro přenos mostu aretovaná u profilu v horní části rámu, jehly okopírují profil erozní rýhy. V dolní části rámu je umístěn profil pro ukotvení speciálně upraveného stativu s fixní délkou. Na tento stativ je po ustavení erodoměru připevněn fotoaparát. Stativ zajišťuje, že jsou snímky pořizovány ze stále stejné vzdálenosti a polohy vůči erodoměru. Nosný profil je délkově regulovatelný. Jeho maximální délka je 4 m. V případě profilu šířky větší než 1 m je vytvořeno více kladů erodoměru tak, že je tento posunován po hliníkové liště.

V rámci každého kladu mostu je pořízená fotografie jehel. Po fotografickém zdokumentování jednotlivých kladů erodoměru dojde k vyhodnocení příčných profilů [7], [30].

Erodoměr umožňuje rychle změřit měřený profil včetně malých rýh, díky hustotě měřících jehlic a jejich současnému spouštění a zvedání. Výhody zařízení k provádění volumetrické kvantifikace lze spatřovat v tom, že velmi přesně zaměří povrch terénu měřeného profilu, a tím umožní přesně kvantifikovat množství oderodované zeminy, čili ztrátu půdy z konkrétního pozemku.

Byly zkoušeny i různé možnosti skenování povrchu terénu či měření profilu terénu pomocí laseru. Tyto technologie se však neukázaly použitelné vlivem přítomného vegetačního pokryvu, který velmi zkresloval použití těchto technologií, proto byla zvolena varianta jehlic.

Z důvodu časové náročnosti ručního vyhodnocování byl v rámci výzkumných prací [4], [30] vyvinut software, který je schopen v každé fotografii identifikovat jednotlivé jehly a spočítat plochu příčného profilu dané rýhy. Software pracuje na principu rozpoznání obrazu. Podkladem bylo inovovat erodoměr a to tak, aby jehlice byly k plastové desce, která se nachází za jehlicemi, kontrastní. Úloha rozpoznání pozicí konců jehlic erodoměru a následné operace (formátový převod souřadnic, výpočet plochy atd.) lze zařadit do kategorie zpracování obrazů. Po pořízení fotografie, za přesně definovaných podmínek, program provede sadu operací nad obrazem. Tyto operace vedou k získání přesné pozice bílého zakončení každé ze 100 jehlic. Následně se provede uložení pozicí zakončení do zvoleného formátu (xls, txt, dxf), případně numerická integrace plochy, jež je ohraničena zakončeními.

Vzhledem k zachování robustnosti programu je nutné dodržovat předem definované podmínky pořízení fotografie. Z podmínek lze například zmínit konstantní vzdálenost pořízení fotografie k čemuž slouží fixní podpěra fotoaparátu spojená s erodoměrem. Dále je nutné, aby na fotografii byly zachyceny všechny čtyři kalibrační tečky červené barvy. Důležité je také udržování černého pozadí a bílých konců jehlic. Návrh i konečná podoba programu je naprogramována v prostředí Matlab. Funkce pro zpracování obrazu jsou součástí Image Processing Toolbox. Obraz je po celou dobu zpracováván v barevném modelu RGB. Program se řídí několika předpoklady, které jsou například dány definovanými podmínkami. Celková funkce programu se dá rozčlenit do několika na sobě závislých částí kódu. Po několika úpravách obrazu (rozlišení, ořezání, atd.) dochází k hledání jehlic a stanovení souřadnic jejich zakončení. Takto získané souřadnice jsou přepočítány k určené vztažné ose (horní rám erodoměru). Výsledkem přepočtu je sada 100 bodů, které tvoří měřenou křivku. Nad touto křivkou jsou provedeny operace sloužící k vyhodnocení či zobrazení ve vybraném programovém prostředí (Excel, AutoCAD, atd.).

Výpočet objemu rýhy

Pro finální výpočet objemu rýhy z ploch jednotlivých příčných profilů je použit následující vztah:

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{A_{i-1} + A_i}{2} s \quad (3.4)$$

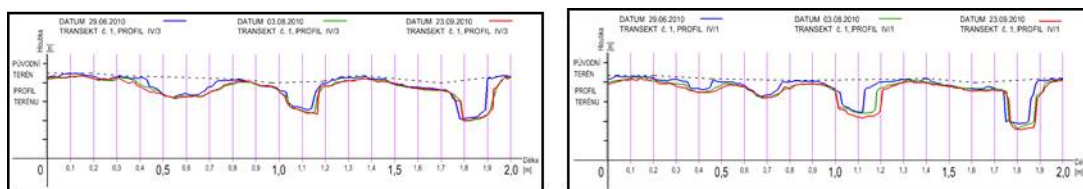
kde: V je celkový objem erozní rýhy, A_i je plocha příčného profilu rýhy, A_{i-1} je plocha předcházejícího příčného profilu rýhy; s je vzdálenost mezi jednotlivými příčnými profily.

Dynamika změn erozních rýh

Provedená terénní měření v průběhu tří let na stovkách profilů na nejvíce erozně ohrožených sprašových půdách v povodí Šardického potoka, umožnily vyhodnotit temporální dynamiku vývoje erozních rýh v průběhu výskytu přívalových srážek.

Výsledky ukazují, že k nejvyšší ztrátě půdy došlo vždy v nejzranitelnějším období tj. v navazujícím časovém úseku od zahájení agrotechnických operací po dobu dvou měsíců kdy nebyl ještě dostatečně vytvořen vegetační pokryv a tím nebyla zmírněna degradační schopnost kinetické energie dopadajících kapek a následujícího povrchového odtoku. V horní aluviální části měřeného transektu svahu byla ztráta půdy průměrně 71,28 %, v prostřední transportní části byla 74,10 % a ve spodní části svahu byla ztráta půdy 68,56 %. Následně se v průběhu vegetačního období po druhém měření zvýšila ztráta půdy průměrně jen o dalších 20,00 % v horní části, o 16,60 % ve střední části a o 19,57 % ve spodní části podsvahového

deluvia [4],[30]. V průběhu třetího měření byly zjištěny již jen velmi malé změny objemu rýh. Tento přírůstek ztráty půdy je téměř 3,5 krát nižší než ztráta půdy zjištěná v rámci prvního měření v období navazujícím v krátkém časovém úseku na zpracování půdy. Příčinou tohoto stavu je distribuované proudění vody již vytvořenou sítí erozních rýh po následujících příčných srážkách a dynamika nárůstu nadzemní a podzemní biomasy v souvislosti s konsolidací půdy a zvyšující se hodnotou kritického tečného napětí. To následně vytváří mnohem nižší objem oderodovaného materiálu v porovnání s účinky soustředěného odtoku na nekonsolidované půdě v blízkém časovém úseku od provedených agrotechnických operací.



Obr. 5 Příklad vývoje erozních rýh v průběhu výskytu erozně nebezpečných dešťů[14] [30]

Reziduální zbytky na povrchu půdy a vyvíjející se kořenový systém také redukuje tečné napětí povrchového odtoku na půdní částice. Uvedené výsledky korespondují s časem se měnícími hodnotami smykového napětí, kdy je třeba vzít v úvahu také vlivy kořenů rostlin, zhutnění, mrazových pochodů, povrchových a podzemních reziduí, způsobu agrotechniky. Vlivem postupující konsolidace se smykové napětí půdního povrchu zvyšuje a půda se stává odolnější. To koresponduje se zjištěními [13],[28],[32], který popisuje snižování kritického smykového napětí půdy po zpracování půdy sprašových hlín, kdy tato čerstvě agrotechnicky zpracovaná půda je mnohem více náchylná k rýhové erozi než rok neoraná půda.

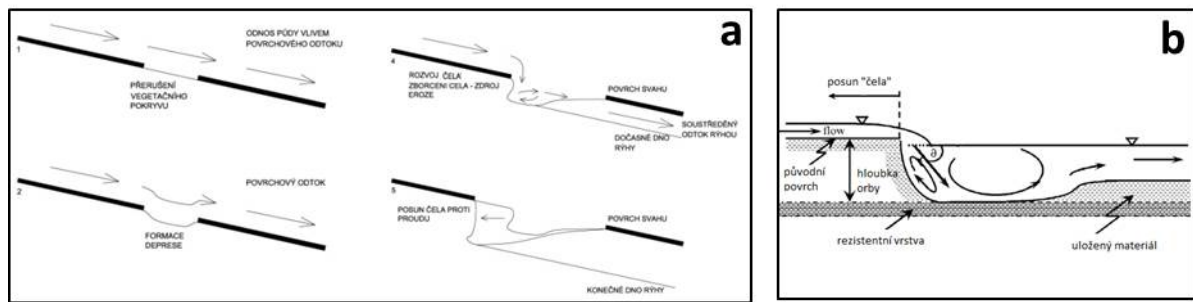
Výsledky hodnocení naměřených profilů ukazují, že erozní rýhy se hloubkově profilují až k tzv.subsoilu, kdy pod povrchovou kultivovanou vrstvou je kompaktnější vrstva s vyšším kritickým smykovým napětím. Dosažením této vrstvy se hloubková eroze mění na laterální či podélnou a zářez se rozšiřuje. Zjištěné skutečnosti korespondují s dalšími zjištěními [13], který uvádí snižování kritického smykového napětí půdy po agrotechnické úpravě povrchu pozdě na jaře (typické pro modelové lokality v Šardicích). Také výsledky provedené v Belgii [28],[32] ukázaly, že přijde-li první dešť krátce po úpravě půdy, je zanášení pórů (sealing) velice rychlé.

3.3 EROZNÍ PROCESY V DRAHÁCH SOUSTŘEDĚNÉHO POVRCHOVÉHO ODTOKU A JEJICH KVANTIFIKACE

V průběhu řešení výzkumného projektu [4] a také při vyhodnocování povodní v povodí Luhy a Jičinky [11] byly vedle klasických erozních rýh v ploše svahu identifikovány také hluboké rýhy v drahách soustředěného odtoku v literatuře označované termínem „*ephemeral gullies*“, které se liší od klasických erozních rýh velikostí průřezové plochy, která je větší než 1 čtvereční stopa ($0,093 \text{ m}^2$) [32]. Objevují se v místech, kde v povodí dochází k soustředění povrchově odtékající vody. Může se jednat buď o přirozené údolnice, tzv. dráhy soustředěného povrchového odtoku nebo o místa podél jiných lineárních krajinných prvků, jako jsou hranice pozemků, rýhy vytvořené zemědělskou praxí či podél polních cest. Termín *efemérní* (pomíjící) vyjadřuje dočasnost těchto prvků, které jsou každoročně sanovány agrotechnikou na konci vegetačního období a dochází k jejich znovuobjevení na stejném místě v rámci dalšího vegetačního období [21].

V průběhu sledování vzniku a dynamiky vývoje efemérních rýh v k.ú Šardice došlo vlivem soustředěného povrchového odtoku a proudění vody v místech heterogenity sklonu k vytvoření zprvu malých depresí. V těchto depresích dochází ke koncentraci odtoku a k jejich zvětšování. Toto zvětšování probíhá až do chvíle, kdy dojde ke spojení několika depresí a tím i k formování rýhy. Eroze se začíná tvořit na začátku deprese, kde vznikají téměř svislé stěny a projevuje se zde bystřinné proudění. V malé míře dochází k odnosu materiálu z plochy stěny erozní rýhy. Významnějším zdrojem splavenin je však dno deprese. Odnosem materiálu ze dna deprese dochází k prohlubování rýhy a „podemletí“ svislé

stěny na začátku deprese, čímž dochází k oslabení její stability a finálně zborcení do prostoru deprese. Tím je svislé čelo propagováno dál proti proudu [24]. Graficky je proces znázorněn na obrázku 6a, 6b.

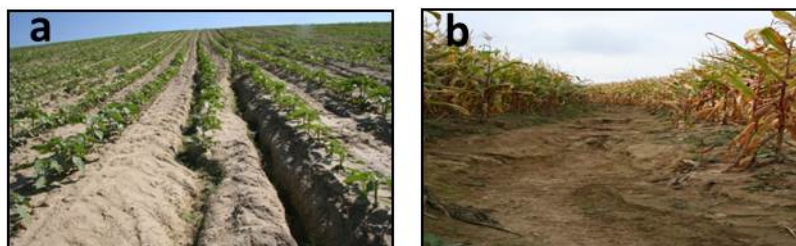


Obr. 6 Stádia iniciace rýhy (a), schéma vytváření a „aktivní migrace“ svislých stěn v podélném profilu strže [24] (b)

Velice cenným zdrojem dat byla (pro MZe ČR v roce 2010) provedená identifikace nestabilizovaných drah soustředěného odtoku z půdních bloků na území celé České republiky (autor byl spoluřešitelem, definoval základní algoritmus postupu identifikace) [11]. Identifikace a zákres nestabilizovaných drah soustředěného odtoku byly provedeny na základě modelování akumulace odtoku vody ze sběrných (přispívajících) ploch potenciálních drah soustředěného odtoku, interpretace charakteru terénu a vizuální interpretace ortofotomapy na dotčených půdních blocích. Součástí výstupu je databáze se stanovenou strukturou položek, které charakterizují lokalizaci a charakter jednotlivých identifikovaných a zakreslených drah soustředěného odtoku vody. Vymezení přispívajících ploch proběhlo na základě odtokové analýzy nad digitálním modelem terénu, automatizovaným vymezením přispívajících ploch a manuální korekcí s využitím rastrových topografických map, leteckých ortofotomap a směrů akumulace odtoku [11]. Bylo identifikováno přes 33 000 drah soustředěného povrchového odtoku z pozemku o celkové délce téměř 12 000 km.

Volumetrická kvantifikace

V rámci výzkumu [4] došlo v letech 2009–2012 k přímému měření objemu efemérních rýh, a u vybraných rýh k hodnocení dynamiky jejich vývoje v průběhu výskytu přívalových srážek. Na začátku výzkumu došlo nejdříve ke zhodnocení a výběru nejvhodnější metody pro přímé měření efemérních erozních rýh. Podobně jako u volumetrické kvantifikace erozních rýh v ploše svahu byly zvažovány i jiné metody pro zaměření rýhy, které by umožňovaly spojitě zaměřit celé rýhy. Jako jedno z možných zařízení se nabízelo použití Lidaru pro pozemní nebo letecké snímkování. Obě metody však byly na základě předchozích terénních průzkumů vyhodnoceny jako nevhodné, a to především vzhledem ke stavu rýh na konci vegetačního období. V době měření je erodovaný povrch pokryt vegetací tak, že je z letadla prakticky nezaměřitelný.

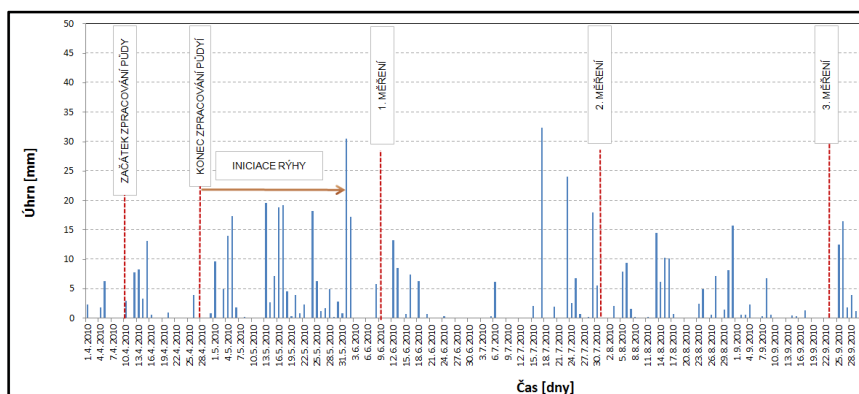


Obr. 7 Rýhová eroze v ploše svahu (a) a efemérní rýha v dráze soustředěného odtoku (b)

Na základě uvedených úvah a analýz bylo rozhodnuto o vývoji mechanického zařízení pro zaměřování příčných profilů rýh podobného principu, jak je popsáno v kapitole 3.2.

Před zaměřením rýh bylo proto vždy uskutečněno terénní šetření, při kterém došlo k vyhodnocení charakteru rýhy a předběžnému zaměření její délky včetně určení přibližně homogenních úseků, které

budou jednotlivé příčné profily charakterizovat. V průběhu výzkumného projektu [4], byly u efemérních erozních rýh zaměřeny příčné profily a kvantifikován objem oderodované zeminy bezprostředně po jejich vzniku a potom dále až do ukončení výskytu přívalových srážek. Jednalo se o efemérní rýhy v katastru obcí Šardice a Šlapanice. Podobně jako u rýhové eroze v ploše svahu (Kapitola 3.2), také u efemérních rýh v drahách soustředěného odtoku je vidět podobný průběh v rámci temporální dynamiky jejich vývoje, kde již v období po prvním měření docházelo k vyčerpání zdroje erodovatelného materiálu a další (i když intenzivní) srážky již rýhu nedokázaly podstatně zvětšit. Po druhém měření přišlo ještě několik srážek srovnatelných s těmi, které rýhu započaly na začátku sezóny, přesto již nedošlo ke zvětšení objemu efemérních rýh. Po prvním měření byl erozní odnos průměrně 74,6 %, následně se v průběhu vegetačního období po druhém měření zvýšila ztráta půdy průměrně jen o dalších 18,5 %, v průběhu třetího měření činil objem produktů eroze zbývajících 6,9%.



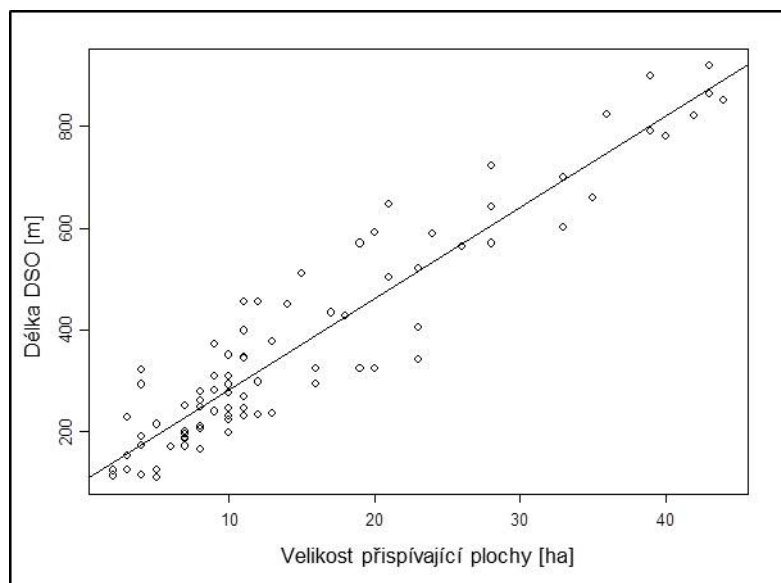
Obr. 8 Průběh srážkových událostí ve vegetačním období roku

V průběhu terénního šetření byla měřena délka rýhy a pořizovány příčné profily erodovaného reliéfu. Délkou rýhy je skutečně zaměřená délka určená dle místního šetření. Jako začátek rýhy byl brán bod, kde v terénu docházelo k přeměně plošného odtoku (často za jasně identifikovatelné přítomnosti plošné a rýžkové eroze) na odtok soustředěný. Jako konec rýhy bylo identifikováno místo, kde docházelo k zániku profilu rýhy a k významné sedimentaci materiálu.

V současné době neexistuje v ČR metoda pro identifikaci výskytu a predikci erozních odnosů z erozních rýh v drahách soustředěného povrchového odtoku (DSO). Přitom jejich kvantifikovaný podíl na celkovém objemu produktů eroze-splavenin činí 20 až 40 %, jak bylo zjištěno v podmínkách sprašových pokryvů jižní Moravy a Zlínska. V současné době je do bilance erozního smyvu započítáván pouze erozní smyv ze svahových ploch. Jeho hodnota je potom srovnávána s hodnotou tzv. přípustného smyvu, který pro podmínky ČR má stanovenou hodnotu $4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Na tuto hodnotu jsou potom navrhovány systémy ochranných opatření pro eliminaci produkce splavenin, které řeší pouze protierozní ochranu erodovaných svahů. Započítáme-li však do bilance hodnotu erozních odnosů z drah soustředěného odtoku, bude nutno na to reagovat návrhem opatření stabilizujícím dráhy soustředěného odtoku. Tato opatření u nás doposud nejsou navrhována ani realizována na rozdíl od řady států, kde jejich stabilizace představuje základní prvek systému ochranných opatření. Proto je snahou autora v rámci výzkumné práce přispět k poznání této problematiky, definovat a verifikovat základní příčinné faktory a navrhnout metodický postup pro identifikaci a predikci objemu erozního smyvu.

Na základě souboru DSO viditelných na ortofotomapách, byla u každé DSO stanovena její délka a na základě digitálního modelu reliéfu (DMR) byla určena velikost její sběrné (přispívající) plochy. Na základě DMR, byl dále vypočítán sklon DSO společně se sklonitostními poměry její sběrné plochy. S využitím pedologické databáze VÚMOP byly také stanoveny hydrické charakteristiky a faktor erodovatelnosti jejich sběrných ploch. Údaje o srážkách byly poskytnuty Českým hydrometeorologickým ústavem. Jednalo se o záznamy srážkoměrných stanic dodatečně korigovaných radarovými údaji. Tento datový soubor byl statisticky vyhodnocován. Významná je závislost délky efemérní erozní rýhy na velikosti její přispívající plochy a také závislost objemu rýhy na její délce.

K odhadu regresních parametrů u závislosti délky efemerní erozní rýhy na velikosti přispívající plochy byly pro analýzy použity jak klasický, tak i robustní regresní model, získané regresní odhady oběma metodami nevykazovaly rozdílnost, proto byly pro interpretaci použity výsledky klasické lineární regrese LS. U výpočtu lineárního regresního modelu metodou nejmenších čtverců (*LS*) byly pro analýzu použity klasické nástroje výběru vhodného regresního modelu: hodnota indexu determinace (*EC*) a testy významnosti – klasické dílčí *t*-testy parametrů regresního modelu a celkový *F*-test.



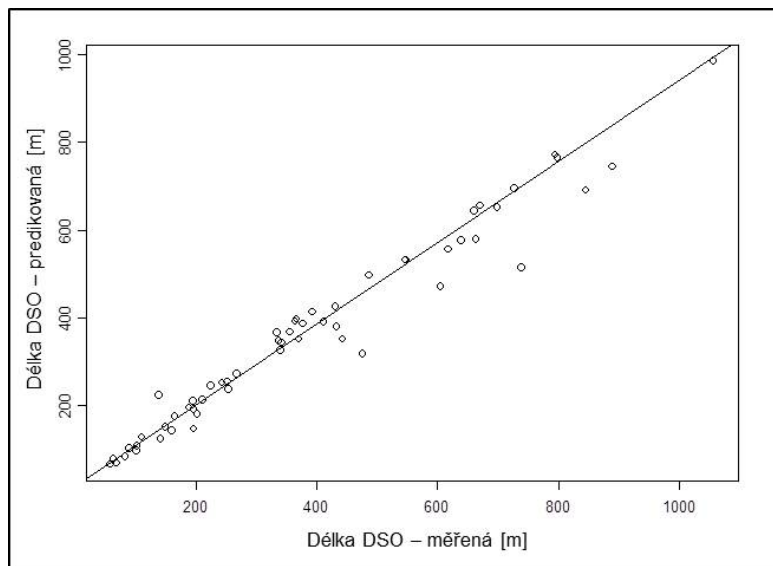
Obr. 9 Závislost délky DSO na velikosti přispívající plochy ($EC=0,88$)

Postup predikce s využitím GIS - flowaccumulation

Hydrologicky korektní DMR se používá jako vstupní vrstva při provádění hydrologických analýz. Výpočet kvalitativních (směru) a kvantitativních (množství) charakteristik odtoku patří k základním hydrologickým charakteristikám zjišťovaným z DMR. Algoritmy, které jsou pro tento účel k dispozici, mohou mít dvě základní varianty. Buď předpokládají 4 (stranovou souvislost pixelů) nebo 8 (stranovou a diagonální souvislost pixelů) možností odtoku. Akumulace odtoku je založena na postupném načítání všech buněk přítékajících do právě počítané buňky, která se do součtu nezahrnuje. Buňky s vysokou hodnotou akumulace představují plochy koncentrace odtoku. Buňky s nízkou hodnotou akumulace ozn. 0 představují hřbety terénu. V tomto výpočtu se všechny spadlé srážky přemění na povrchový odtok, neuvažují se žádné ztráty, jako je vsakování do půdy, evapotranspirace a další. Protože v hydrologicky korektním modelu je každá buňka zároveň „výtokovým profilem“, můžeme určit akumulaci (tj, kolik výše ležících buněk protéká danou buňkou) ke každému „výtokovému profilu“.

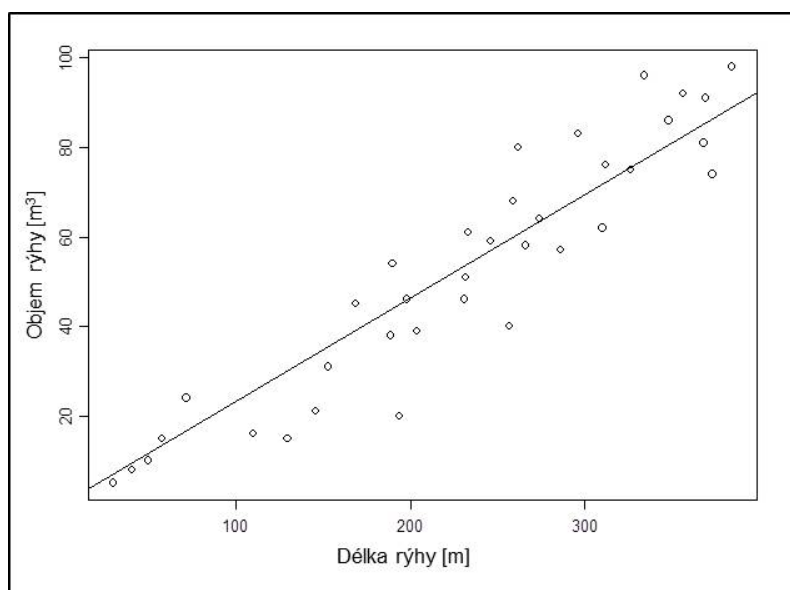
V rámci výzkumné činnosti, při terénních měřeních na desítkách DSO či při identifikaci DSO z ortofotomap, byla stanovena minimální sběrná plocha pro vznik efemerní rýhy o výměře 0,03 km². Na základě tohoto zjištění byla na bázi DMR generovaná akumulace odtoku klasifikována na tuto hodnotu. Takto generované DSO byly porovnávány s DSO měřeními v terénu či z ortofotomap (obr. 10).

Závislost délky efemerní rýhy na velikosti její přispívající plochy a také závislost objemu erozního odnosu na její délce, se po doplnění dalších měření a ověřování mohou stát základem pro nalezení (v ČR chybějícího) predikčního vztahu erozních odnosů v DSO.



Obr. 10 Závislost délky efemérní rýhy predikované a měřené ($EC=0,93$)

K odhadu regresních parametrů u závislosti objemu erodované zeminy na délce efemérní erozní rýhy (obr.11) byly vedle klasické lineární regrese (LS) aplikovány tři modely robustního odhadu parametru metodou LTS (Least Trimmed Squares Robust Regression, tj. odhady metodou nejmenších useknutých čtverců). Nejlepších výsledků dosahovaly modely přímek, které procházejí počátkem, tj. bez absolutního členu.



Obr. 11 Závislost objemu erozní rýhy na její délce ($EC=0,98$)

4 NEPŘÍZNVÉ DŮSLEDKY POVRCHOVÉHO ODTOKU MIMO ZDROJOVÉ POZEMKY V POVODÍ

Nepříznivé důsledky povrchového odtoku a s ním spojené projevy vodní eroze se projevují nejen ohrožením půdy, ale i v ohrožení dalšího důležitého základního přírodního zdroje – vody, a to znečišťováním uvolněnými a transportovanými látkami. Půdní částice a na nich navázané chemické látky uvolněné povrchově stékající vodou jsou ukládány po poklesu jejího tangenciálního napětí a rychlosti částečně na úpatí svahů, ale zejména jsou produkty eroze – nejjemnější půdní částice transportovány vodou do hydrografické sítě, v níž tvoří převážnou část splavenin s negativními důsledky na kvalitu vody. Jeho

hlavní příčinou je difúzní znečišťování nádrží, vodních toků a staveb na nich. Zmenšuje se potřebná kapacita toků a kanálů, zvyšuje se niveleta dna a může docházet k nežádoucí inundaci. Zanášením nádrží se snižuje jejich využitelný objem, potřebný nejen k transformaci povodňových vln.

Dalším negativním efektem je nárůst koncentrace CO₂ (kromě fosilních paliv) vlivem změn ve využívání krajiny a zvyšující se erozní činnosti. Vlivem erozního procesu, nastává porušení nebo rozbití agregátů a dochází tak k uvolnění uhlíku, který byl ukryt a chráněn uvnitř agregátů a odolával mineralizaci, klimatickým vlivům a mikrobiálnímu rozkladu.

Vedle ohrožení půdy a vodní komponenty se negativní účinky soustředěného povrchového odtoku projevují ohrožením a škodami na zastavěném území obcí.

4.1 KRITICKÉ BODY A JEJICH STANOVENÍ

Povodně v povodí Luhy a Jičínky v roce 2009 a následně v dalších letech ukázaly, že k povodňovému ohrožení zastavěného území obcí došlo i v místech, kde není lokalizován žádný vodní tok. V rámci studie MŽP [10] bylo identifikováno a následně podrobným terénním průzkumem ověřeno přes sto míst, kde povrchový odtok vnikal do intravilánu dotčených obcí. Jako problematické byly stanoveny závěrové profily sběrných ploch s výměrou už od 5 ha, kdy zejména transportované splaveniny způsobovaly dílčí škody na majetku. K výrazným škodám na majetku (výrazné poškození nemovitosti) však docházelo až v úsecích pod závěrovými profily s přispívající plochou vyšší než 0,3 km². U stanovených závěrových profilů v povodí Luhy a Jičínky, jakož i na řadě dalších profilů v minulosti dotčených povodněmi z přívalových srážek, byly vyhodnoceny všechny příčinné faktory rozhodující z hlediska tvorby soustředěného povrchového odtoku a transportu splavenin, a na základě kritériální analýzy byly stanoveny parametry tzv. kritických bodů. Autor byl spoluřešitelem předmětné studie, v rámci které vznikl postup pro identifikaci kritických bodů, který byl dále rozpracován a verifikován pracovníky Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka.

V místech, kde linie drah soustředěného odtoku vnikají do zastavěné části obcí, se stanoví tzv. kritické body (KB). Kritický bod je určen průsečíkem dané hranice zastavěného území obce (intravilánu) s linií dráhy soustředěného odtoku s velikostí přispívající plochy $\geq 0,3 \text{ km}^2$. Z hlediska plošného rozsahu příčinného jevu přívalových srážek a primárně lokálních důsledků následných povodní se dále uvažují ty kritické body, jejichž přispívající plocha nepřesáhne velikost rozlohy 10 km².

Stanovení rozvodnic a sběrných ploch kritických bodů

K identifikovaným KB byly v prostředí GIS na základě DMR s využitím hydrologických nástrojů GIS (nadstavba ArcHydro) generovány orografické rozvodnice a polygony sběrných ploch.

Stanovení fyzicko-geografických charakteristik sběrných ploch kritických bodů

Charakteristikami KB jsou jejich klíčové atributy. Zvoleny byly základní fyzicko-geografické charakteristiky sběrných ploch KB: velikost sběrné (přispívající) plochy, její průměrný sklon, druhy pozemků a procentické zastoupení orné půdy [2].

Faktorem s významným vlivem na možné dopady povodní z přívalových srážek je způsob využití území. K jeho určení lze s dostatečnou přesností použít databázi LPIS a databázi krajinného pokryvu *CORINE land cover* na základě které se pomocí zonální statistiky určí pro každou přispívající (sběrnou) plochu procentické zastoupení orné půdy.

Finální výběr kritických bodů

Z podrobných analýz vyplývá, že rozhodující pro identifikaci ve vztahu k přívalovým srážkám problematických lokalit jsou následující charakteristiky. K výběru kritických lokalit (kritické body) jsou doporučena kombinovaná kritéria [2]:

K 1.	velikost přispívající plochy	0,3–10,0 km ² ,
K 2.	průměrný sklon přispívající plochy	$\geq 3,5 \%$,
K 3.	podíl plochy orné půdy v povodí	$\geq 40 \%$.

Kombinace fyzicko-geografických podmínek, způsobů využití území, regionálních rozdílů krajinného pokryvu a potenciálního výskytu srážek extrémních hodnot (ve vazbě na synoptické podmínky) pro konkrétní přispívající plochy vyjadřuje stanovený ukazatel kritických podmínek vzniku negativních projevů povodní z přívalových srážek F [2]:

$$F = P_{p,r} \cdot H_{m,r} \cdot (a_1 \cdot I_p + a_2 \cdot ORP + a_3 \cdot CNII) \quad (4.1)$$

Kde: F je ukazatel kritických podmínek [-], a je vektor vah [1,48876; 3,09204; 0,467171], $P_{p,r}$ je relativní hodnota velikosti přispívající plochy (vzhledem k max. 10 km²) [-], I_p je hodnota průměrného sklonu přispívající plochy [%], ORP je podíl plochy orné půdy [%], $CNII$ jsou hodnoty čísel odtokových křivek CNII pro území ČR, $H_{m,r}$ je relativní hodnota úhrnu jednodenních srážek s dobou opakování 100 let pro území ČR [-].

Poskytovatelem dat pro stanovení CNII a $H_{m,r}$ ve formátu ESRI GRID pro území ČR je Český hydrometeorologický ústav.

Mezní hodnota ukazatele F tvoří čtvrtou podmínku kritéria[2]:

K 4. ukazatel kritických podmínek $\geq 1,85$.

Na základě šetření na modelových povodích, kde byly zjištěny škody i z ploch povodí se zastoupením orné půdy nižším než 40%, případně ploch zcela zalesněných, byl výběr provedený podle podmínek kritérií K1 až K4 rozšířen o kritické body s velikostí přispívající plochy od 1 km² výše a současně s průměrným sklonem od 5% výše [2]:

K1A.	velikost přispívající plochy	1,0–10,0 km ² ,
K2A.	průměrný sklon přispívající plochy	≥ 5 %.

S využitím popsané metody bylo pracovištěm VÚV T. G. Masaryka, v.v.i. v Brně v celé ČR identifikováno 9 261 kritických bodů. Dotčené obce tak mají informace, v kterých místech mohou očekávat vniknutí soustředěného povrchového odtoku do intravilánu obce a které nemovitosti mohou být ohroženy v případě výskytu přívalových srážek.

5 INTEGROVANÁ OCHRANA POVODÍ PROTI NEPŘÍZIVÝM ÚČINKŮM POVRCHOVÉHO ODTOKU V POZEMKOVÝCH ÚPRAVÁCH

Systém integrované ochrany povodí byl autorem navržen a aplikován jako technologický proces integrující poměry využití území, GIS aplikace na základě DMR a matematické modely výpočtu odtoku. Jedná se o návaznost aplikace a ověření metod a modelů pro výpočet erozního smyvu, navrhování základních hydrologických parametrů až po konkrétní hydrotechnické výpočty, dokladující navržené plošné parametry jednotlivých prvků protierozní ochrany. Na analýzu numerických a grafických výsledků rozboru erozních a odtokových poměrů v řešeném povodí, navazuje digitální zpracování návrhu s využitím vhodných dostupných grafických software, umožňujících jak zpracování systému prvků dokladujících funkčnost navržených opatření, tak i optimální situační řešení včetně zobrazení celého komplexního řešení ochrany povodí v rámci digitálního modelu terénu. Digitální automatizovaný systém metod a postupů pro rozbor erozních a odtokových poměrů vyúsťující v optimalizaci odtokových poměrů v rámci komplexní ochrany a organizace povodí je propojen s celým systémem metod a postupů pro řešení pozemkových úprav, zejména komplexních pozemkových úprav. Ty jsou optimálním nástrojem jak pro aplikaci komplexních opatření umožňující vyřešení vlastní ochrany povodí a ostatních společných zařízení, tak pro vyřešení vlastnických vztahů k pozemkům v souvislostech s navrhovanými opatřeními a novým prostorovým a funkčním uspořádáním pozemků. Vyřešení vlastnických vztahů, optimální prostorové a funkční uspořádání pozemků v systému společných zařízení a následné vymezení potřebných ploch je základní podmínkou pro jejich realizaci. Bez důsledného vyřešení vlastnických práv je tato realizace v podstatě vyloučena.

Metody eliminace nepříznivých účinků povrchového odtoku v povodí (zejména v oblasti GIS pro automatizaci rozboru erozních a odtokových poměrů a navazující navrhování komplexní ochrany a organizace povodí) se autor snaží propracovat do uživatelsky přístupné formy, umožňující variantní řešení zpracovatelům návrhu komplexních pozemkových úprav (KPÚ) a důslednou kontrolu referátům životního prostředí (ochrana zemědělského půdního fondu, vodohospodářský orgán), pozemkových úřadů či jiných zadavatelských subjektů. Proto v rámci autorem koordinovaného projektu ev. č. QC1292 „Optimalizace systému komplexních opatření pro minimalizaci nepříznivých účinků povrchového odtoku v povodí a jeho aplikace v procesu pozemkových úprav“ [6], řešícího komplexně optimalizaci odtokových poměrů v zemědělském a lesním povodí, bylo cílem vypracovat systém umožňující automatizaci rozboru erozních a odtokových poměrů, návrh a realizaci ochrany povodí, zejména v systému pozemkových úprav s využitím víceúčelových opatření snižujících povrchový odtok, smyv a transport splavenin do vodních toků a zvyšujících retenční schopnost povodí a hospodárné využití srážek.

5.1 NÁVRH OPATŘENÍ INTEGROVANÉ OCHRANY POVODÍ

Návrh opatření integrované ochrany povodí je zde demonstrován na povodí Čižiny, které bylo v letech 1996 a 1997 zasaženo povodněmi, které přinesly rozsáhlé škody na majetku občanů dotčených obcí. Autor v následujícím období vypracoval integrovaný návrh protipovodňové a protierozní ochrany v procesu komplexních pozemkových úprav. Návrhy protipovodňové ochrany v povodí Čižiny se staly významným dokumentem, zahrnutým do návrhu protipovodňové ochrany v povodí Horní Opavy. Vypracovaná studie v povodí Horní Opavy (autor byl zodpovědný řešitel) byla jedním ze základních dokumentací, na základě kterých bylo rozhodováno o realizaci jednotlivých variant řešení protipovodňové nádrže Nové Heřminovy. V této problematice byly také využity metody a postupy z návrhu protierozních a protipovodňových opatření na cca 15 % území ČR, která autor jako hlavní řešitel s kolektivem navrhoval (vedle povodí Horní Opavy se jednalo o povodí Horní Moravy, Svratky, Dyje, Bečvy, Nežárky, Ploučnice a Dědiny).

Návrh opatření v povodí Čižiny vycházel z posouzení stávajícího stavu a z konfigurace terénu zjištěné při terénních průzkumech a z mapových podkladů. Jako základní komponenta plánu společných zařízení v KPÚ v k.ú. Lichnov (tvořící rozhodující část povodí Čižiny) je navrženo komplexní řešení protierozní a protipovodňové ochrany s použitím prvků biotechnických, stavebně technických a organizačních vzájemně se doplňujících. Základní kostru ochranných opatření tvoří ochranné retenční nádrže a navazující systém záchytných průlehů, doplněný prvky agrotechnickými (protierozní technologie u erozně nebezpečných plodin) a organizačními (ochranné zatravnění). Zpomalení odtoku (dynamické) vody v povodí se docílilo:

- systémem protierozní ochrany půd, tj. zpomalením a snížením plošného povrchového odtoku, retenčním účinkem v systému hydrografické sítě a mikrosítě a snížením průtokové rychlosti vody v nich,
- návrhem systému ochranných nádrží.

Tab. 1 Navržené ochranné nádrže v PSZ KPÚ v k. ú. Lichnov a jejich parametry

Označení nádrží a jejich parametry	I	II	III	IV
plocha povodí [km ²]	5,21	3,23	1,75	2,64
Q100 [m ³ .s ⁻¹]	17,0	15,00	7,8	10,7
W100 [tis.m ³]	352,00	252,54	126,54	215,80
stálý objem [tis.m ³]	30,0	30,0		19,0
objem normálního ret. prostoru [tis.m ³]	2,0	184,0	0,9	215,8
objem přípustného ret. prostoru [tis.m ³]	62,0	30,0	0,4	56,0
objem rezervního ret. prostoru [tis.m ³]	44,0	26,0	0,9	37,0
objem prostoru nádrže po MAXPH [tis.m ³]	444,0	244,0	1,3	290,8
plocha zátopy při stálé hladině [ha]	1,55	2,20		2,0
plocha zátopy při max. normál. hladině [ha]	7,55	4,00	0,1	6,95
plocha zátopy při max. přípustné hladině [ha]	8,5	4,45	0,1	8,15

5.2 OPTIMALIZACE NÁVRHU OPATŘENÍ PRO ELIMINACI NEPŘÍZNIVÝCH DŮSLEDKŮ POVRCHOVÉHO ODTOKU

Z široké škály opatření, resp. staveb, které v daném konkrétním území lze použít, je možno s využitím optimalizačního modelu vybrat jejich nejvhodnější kombinace, a to jak z hlediska jejich druhu, tak i s ohledem na jejich umístění, účinnost, rozsah a kapacitu. Výběr takové kombinace, tj. nalezení optimálního řešení, probíhá podle určitého kritéria (nebo i více současně působících kritérií) optimality. Tato kritéria jsou ekologická, hydrologická, sociální ale mohou být použita i kritéria technicko-ekonomické povahy aj.

Optimalizační postup navrhování integrované ochrany území před škodlivými účinky vod byl zpracován v České republice v letech 2001–2002 v rámci řešení projektu výzkumu a vývoje NAZV č. QC1292 „*Optimalizace systému komplexních opatření pro minimalizaci nepříznivých účinků povrchového odtoku v povodí a jeho aplikace v procesu pozemkových úprav*“ [6]. Autor byl koordinátorem tohoto projektu. Optimalizační postup integrované ochrany území před škodlivými účinky vod představuje univerzální nástroj, použitelný pro jakékoliv území nebo povodí. Nastíněný postup umožňuje nalézt optimální kombinaci z možných zpracovaných alternativ protierozních a vodohospodářských opatření každé konkrétní lokality v daných podmínkách. Výhoda postupu spočívá také v tom, že se nemusí jednat o lokality využívané pouze zemědělsky. Do řešení lze pojmout i lokality na lesních anebo urbanizovaných územích, popř. soubory lokalit na různých územích [6]

V další části je popsán obecný postup řešení, který byl také použit v rámci projektu č. QC1292.

Obecný postup řešení

Úloha optimalizace návrhu systému integrované ochrany území (IAP - Integrated Area Protection) na území řešeného povodí vyžaduje zpracovat variantní návrhy dílčích organizačních, agrotechnických, biotechnických a technických opatření na jednotlivých lokalitách zájmového území. Ke všem těmto variantám se stanoví hydrogramy přímého odtoku vody z návrhové srážky, erozní smyvy, hmotné škody a ekonomické újmy, které vzniknou realizací ochranných opatření a jejich náklady. Zpracují se alternativy vodohospodářských opatření na všech úsecích hydrografické sítě a variantní návrhy retenčních ochranných nádrží. Přičemž jako prvky hydrografické sítě jsou myšleny i jednotlivá biotechnická opatření jako svodné kanály, průlehy a dráhy soustředěného odtoku v údolnicích [6].

Po zpracování variantních návrhů všech opatření následuje výběr jejich nejvhodnější kombinace. Vzhledem k tomu, že pro některé prvky systému je nutno nalézt optimální dimenze, je možno definovat vysoký počet (a při spojitím řešení až nekonečný počet) možných kombinací. Optimalizační model integrované ochrany území - OMIAP - Optimizing Model od Integrated Area Protection, byl sestaven na bázi smíšeně diskrétního programování [6],[20], a jeho základem jsou dva obecně formulované dílčí modely:

- A dílčí model ochranných opatření na jednotlivých lokalitách zájmového území,
- B dílčí model nádrže.

Pro každou optimalizační úlohu se předem definuje jedno nebo i více kritérií optimality společně s jejich váhami. Tato kritéria mohou být ekonomická, ekologická, vodohospodářská, sociální aj a musí být jednoznačně kvantifikovatelná.

V modelu OMIAP byl jako první z vhodných kritérií optimality formulován požadavek maximální ochrany osídlených a ostatních území v povodí s vynaložením minimálních prostředků. Je to kritérium složené ze tří současně působících dílčích ekonomických kritérií:

- minimalizace průměrných ročních ztrát, které vznikají plošnými a soustředěnými odtoky srážkových/povodňových vod. Uvažují se materiální škody; omezující podmínkou úlohy je nepřipustnost ztrát na lidských životech.
- minimalizace průměrné roční ekonomické újmy v zemědělské produkci, která je způsobená realizací navrhovaných ochranných opatření na zemědělských pozemcích,
- minimalizace průměrných ročních nákladů na provoz a údržbu navrhovaných biotechnických a vodohospodářských opatření včetně odpisů.

Další kritérium má charakter vodohospodářský a je definováno jako minimální úhrnný odtok z povodí. V tomto kritériu není zahrnutý pouze požadavek na minimalizaci materiálních škod, ale účelem je i zadržení co možná největšího množství vody v povodí pro období sucha. Třetí kritérium se týká erozního smyvu a požadavkem je minimalizace devastace půdního fondu, degradace krajiny, ale také minimalizace nákladů na těžení splavenin ať již ve vodních tocích, nádržích, tak i v příkopech průlezech a dalších prvcích.

Dílčí model A – ochranná opatření v zájmovém území

Zde se uvažují ochranná opatření organizační, agrotechnická, biotechnická, a lesotechnická, která budou na zájmovém území (kterým je povodí konkrétní vodoteče) navrhována. Tento návrh je obvykle prováděn v rámci pozemkových a lesotechnických úprav za účelem snížení povrchového odtoku srážkové vody resp. snížení projevů vodní eroze na pozemcích a potažmo škod v zájmovém území. Návrhy opatření se zpracují předem jako účelově vytvořené soubory různých, vzájemně se doplňujících zásahů do jednotlivých dílčích částí povodí.

Část vody z povrchového odtoku, která nebude systémem protierozních a protipovodňových opatření zadržena (tj. zbytkový odtok), se soustředí do příslušné vodoteče a vytvoří v ní návrhovou odtokovou, resp. povodňovou vlnu. Doba T průchodu návrhové povodňové vlny vodotečí se rozdělí do r stejně dlouhých časových intervalů (ČI); doba trvání t jednoho ČI tak bude dána vztahem $t = T/r$. Pro jednotlivé ČI se potom vyčíslí dílčí objemy w_i návrhové povodňové vlny, $i = 1, 2, \dots, r$.

Soubor ochranných opatření pro každou dílčí část povodí může být navržen buďto jednoznačně anebo alternativně např. jako:

- současný stav využívání lokality,
- nejlevnější, s nejmenším ochranným účinkem a s nejmenší ekonomickou újmou,
- nákladnější, se zvětšeným ochranným účinkem a malou ekonomickou újmou,
- nákladnější, se zvětšeným ochranným účinkem a velkou ekonomickou újmou, atd.

Ke každé z těchto variant se vyčíslí:

- její očekávaný ochranný účinek ve formě průměrné roční výše škod U_c (tis. Kč) na pozemcích, porostech, sídlištích, komunikacích, objektech atd., ke kterým bude docházet po její realizaci,
- očekávaná průměrná roční ekonomická újma E_u (tis. Kč) v zemědělské a lesnické produkci související s její realizací (změna struktury osevu, zábor zemědělské a lesní půdy pro biotechnická a lesotechnická opatření apod.),
- náklady na její realizaci a její roční průměrné vlastní náklady N_a (tis. Kč),
- hydrogram zbytkového odtoku vody O_{vi} do vodoteče v jednotlivých ČI (tis. m³),
- očekávaný průměrný erozní smyv půdy S_m (t).

Výše uvedené hodnoty představují vstupní data pro dílčí model A. Řešením optimalizační úlohy se z těchto variant pro každou dílčí část povodí vybere optimální alternativa s ohledem na zvolená kritéria a jejich váhy. Nemusí to tedy být vždy alternativa s největším ochranným účinkem. Zbytkové odtoky budou způsobovat postupné narůstání povodňové vlny procházející vodotečí. Ochranu proti škodám, které by tato vlna mohla způsobit, poskytnou ochranná opatření na vodoteči a retenční nádrže [6], [20].

K modelování jednotlivých alternativ souborů ochranných opatření v každé z dílčích částí povodí se využijí binární proměnné. Celkový počet dílčích částí povodí budiž m . Bude-li dále např. n alternativ souboru ochranných opatření d -té dílčí části povodí modelováno binárními proměnnými $x_{B1dp} \in \{0, 1\}$, $d = 1, 2, \dots, m$, $p = 1, 2, \dots, n$, lze účinky těchto souborů opatření pro tuto část povodí zapsat do modelu následujícími rovnicemi:

- rovnice škod (tis. Kč)

$$x_{Uc,d} = \sum_p U_{c,dp} \cdot x_{B1dp} \quad (5.1)$$

- rovnice ekonomické újmy (tis. Kč)

$$x_{Eu,d} = \sum_p E_{u,dp} \cdot x_{B1dp} \quad (5.2)$$

- rovnice vlastních nákladů (tis. Kč)

$$x_{Na,d} = \sum_p N_{a,dp} \cdot x_{B1dp} \quad (5.3)$$

- rovnice zbytkového odtoku (tis. m³), tj. příspěvku d -té dílčí části povodí k objemu povodňové vlny v příslušném úseku vodoteče v i -tém časovém intervalu (i . ČI)

$$x_{Ov,id} = \sum_p O_{vi,dp} \cdot x_{B1dp} \quad (5.4)$$

pro $i = 1, 2, \dots, r$, $d = 1, 2, \dots, m$, $p = 1, 2, \dots, n$, kde $x_{Uc,d}$ je výsledná průměrná roční výše škod v d -té dílčí části povodí, $x_{Eu,d}$ je výsledná průměrná roční ekonomická újma v d -té dílčí části povodí, $x_{Na,d}$ je výsledné průměrné roční vlastní náklady souboru ochranných opatření v d -té dílčí části povodí, $x_{Ov,id}$ je výsledný odtok z d -té dílčí části povodí v i . ČI.

Protože do řešení může vstoupit jen jedna z alternativ souboru ochranných opatření, musí pro součet všech binárních proměnných d -té dílčí části povodí platit podmínka

$$\sum_p x_{B1dp} \leq 1 \quad (5.5)$$

Podmínka (5.5) připouští možnost úplného vyloučení ochranných opatření na d -té dílčí části povodí, bude-li to z hlediska optimálního řešení celého integrovaného systému ochrany území výhodné [6], [20].

Dílčí model B – nádrž

Dílčí model nádrže je formulován jako víceúčelová průtočná vodní nádrž se zatím neznámými objemy prostorů ochranného ovladatelného x_O , ochranného neovladatelného x_N a celkového x_V . Potřebné objemy prostorů stálého nadržení $S \geq 0$ a zásobního $Z \geq 0$ jsou konstantní, protože vyplývají z jiných než ochranných požadavků. Cílem řešení této nádrže je nalezení takové její velikosti, která zahrne požadované konstantní objemy prostorů S a Z a přitom svými ochrannými prostory zabezpečí transformaci kulminačního odtoku z nádrže při průchodu návrhové povodňové vlny na optimální hodnotu [6],[20].

Neznámý objem celkového prostoru nádrže je proměnnou veličinou, která je shora omezena maximální hodnotou V_{max} , která odpovídá největší realizovatelné variantě nádrže v souboru předem navržených opatření; zdola je omezena min., pro praxi ještě přijatelnou, variantou s celkovým objemem V_{min} [6],[20].

Přitom však nelze vyloučit případ, že vybudování nádrže nebude z hlediska uplatněných kritérií optimality výhodné. Proto se do souboru proměnných veličin zavede binární proměnná $x_{B4} \in \{0, 1\}$. Objem celkového prostoru nádrže (tis. m³) potom musí odpovídat podmínkám:

$$x_V = (S + Z) \cdot x_{B4} + x_O + x_N \quad (5.6)$$

$$V_{min} \cdot x_{B4} \leq x_V \leq V_{max} \quad (5.7)$$

Průchod návrhové povodně profilem nádrže modelují povodňové bilanční rovnice, formulované samostatně pro každý ČI. Označí-li konstanta w_i (tis. m³) zjištěný objem přítoku vody do nádrže v i . ČI, proměnná x_{O_i} (tis. m³) neznámý objem vody na konci i . ČI v ovladatelném ochranném prostoru nádrže, proměnná x_{N_i} (tis. m³) obdobně totéž v neovladatelném ochranném prostoru, proměnná x_{E_i} neznámý objem odtoku vody z nádrže spodní výpustí a x_{F_i} neznámý objem odtoku vody přes bezpečnostní přeliv v průběhu i . ČI v případě realizace nádrže, resp. x_{G_i} objem odtoku vody z profilu hráze v průběhu i . ČI v tom případě, když nádrž do řešení nevstoupí, bude mít povodňová bilanční rovnice pro situaci na konci i . ČI tvar:

$$w_i = x_{O_i} - x_{O,i-1} + x_{N_i} - x_{N,i-1} + x_{E_i} + x_{F_i} + x_{G_i} \quad (5.8)$$

pro $i = 1, 2, r$.

Objemy ovladatelného ochranného prostoru x_O a neovladatelného prostoru x_N jsou rovny největším hodnotám v řadě proměnných x_{O_i} , resp. x_{N_i}

$$x_O = \max_i x_{O_i} \quad (5.9)$$

$$x_N = \max_i x_{N_i} \quad (5.10)$$

a těmto hodnotám odpovídá výška hrany bezpečnostního přelivu, resp. maximální výška paprsku přepadající vody. Oba parametry se vyčíslí z objemové funkce nádrže vyjadřující závislost objemu celkového prostoru v nádrži na jeho proměnné hloubce.

Průtok vody x_{qi} odtékající z přehradního profilu spodní výpustí a průtok vody x_{Qi} odtékající přes nehrazený bezpečnostní přeliv na konci i . ČI se vypočtou z hloubky vody v nádrži, resp. z výšky paprsku přepadající vody, dosažené na konci tohoto ČI, a z příslušných konzumčních křivek.

Vypočteným hodnotám x_{qi} , resp. x_{Qi} potom odpovídají průměrné objemy x_{Ei} , resp. x_{Fi} (tis. m³):

$$x_{Ei} = (x_{q,i-1} + x_{qi}) \cdot t / 2 \quad (5.11)$$

$$x_{Fi} = (x_{Q,i-1} + x_{Qi}) \cdot t / 2 \quad (5.12)$$

pokud nádrž nevstoupí do řešení (tzn. $x_{B4} = 0$), pak bude odtok vyčíslen jako:

$$x_{Gi} = w_i - w_i \cdot x_{B4} \quad (5.13)$$

pro $i = 1, 2, \dots, r$.

Kapacitu spodních výpustí lze v modelu nastavit návrhem jejich dimenzí, které jsou tak rovněž proměnnými veličinami. Obdobně je možno počítat s různou kapacitou bezpečnostního přelivu vycházející z proměnné délky přelivné hrany. Transformační účinek nádrže při průchodu návrhové povodňové vlny je charakterizován hodnotou kulminačního průtoku x_{Qmax} pod nádrží, která je rovna maximálnímu součtu dílčích hodnot x_{qi} a x_{Qi} (m³.s⁻¹):

$$x_{Qmax} = \max_i (x_{qi} + x_{Qi}) \quad (5.14)$$

Model dokáže zohlednit také požadavek omezení velikosti kulminačního průtoku pod nádrží určitou limitní hodnotou Q_{max} ; tento požadavek se vyjádří nerovnicí $x_{Qmax} \leq Q_{max}$.

Neznámé roční průměrné vlastní náklady nádrže $x_{Na,n}$ se určí z nákladových funkcí vyjadřujících závislost těchto nákladů na objemu celkového prostoru nádrže x_V .

Takto formulovaný dílčí optimalizační model navrhované víceúčelové vodní nádrže lze využít také k řešení jednoúčelové vodní nádrže jen s ochrannou funkcí jednoduše tak, že se z příslušných rovnic vypustí objem zásobního prostoru ($Z = 0$). Vypustí-li se také objem stálého nadržení $S_n = Z = 0$, je možno tímto modelem řešit také průchod návrhové povodně suchou ochrannou nádrží (poldrem) [3], [6], [20].

Řešení modelu

Pro dosažení požadovaných výsledků řešení, které budou odpovídat reálně očekávaným dimenzím jednotlivých prvků a kombinacím opatření, je stěžejním předpokladem zadání vstupních hodnot do modelu, které budou výsledkem kvalitně zpracovaných variant jednotlivých opatření. Z těchto hodnot se následně odvodí soubor konkrétních koeficientů a konstant, které se zavedou do obecně formulované soustavy rovnic.

5.3 HODNOCENÍ ÚČINNOSTI OCHRANNÝCH OPATŘENÍ V PLOŠE POVODÍ

Navržená opatření v ploše povodí mají poměrně vysokou účinnost v případě eliminace nepříznivých účinků povrchového odtoku a povodňové ohroženosti z přívalových srážek, kdy velmi účinně snižují škody na majetku občanů v zastavěných územích obce, omezují transport splavenin a difúzní znečištění do vodních toků a nádrží (zejména v ochranných pásmech povrchových vodních zdrojů) a jejich efekt je dále velmi významný v zabránění destrukce komplexního systému půdních vlastností. Realizací ochranných opatření v ploše povodí zejména organizačních, agrotechnických a lesnicko-pěstebních dojde k ovlivnění faktoru vegetačního krytu - C faktoru a k ovlivnění průměrného čísla odtokových křivek - CN v povodí. Toto se po návrhu opatření změní v závislosti na plošné výměře navržených opatření a jejich typu.

Výsledné číslo CN, (které má ve všech modelech, kde je implementováno, poměrně vysokou citlivost vzhledem k ovlivnění hodnot odtoku z povodí) bylo počítáno podle vztahu:

$$\emptyset CN = \frac{\sum_{i=1..n, j=1..m}^{k=1..l} CN_{i,j} \cdot F_k}{\sum_{k=1..l} F_k} \quad (5.15)$$

kde CN označuje hodnotu CN čísla. F_k označuje dílčí plochu povodí. Indexy i, j , a k označují postupně druh povrchu, hydrologickou skupinu půd a plochu, která vznikne průnikem vrstvy CN a vrstvy hydrologických skupin půd.

Z hlediska účinnosti proti povodním z regionálních srážek byl návrh opatření (v rámci studie [9]) v povodí Čížiny testován modelem Hydrog [29], který je distribuovaným modelem, kde vstupy pro řešení tvoří srážkové intenzity ve srážkoměrných stanicích. Srážkové intenzity jsou zadávány s hodinovým krokem. Model pracuje se schematizovaným povodím, které je rozděleno na množinu úseků toků a na ně zavěšených elementů ploch povodí v závislosti na reliéfu povodí. Plošný povrchový a plošný koncentrovaný tok vody schematizovaným povodím je řešen kinematickou vlnovou aproximací (zjednodušení rovnic Saint Venanta) [29]. Plošný podzemní odtok je řešen kombinací s koncepčním regresním modelem, ze kterého je procentuální díl v každém časovém kroku výpočtu postupně rozpočítáván v poměru velikosti zavěšených ploch. Říční síť je tak v úsecích zavěšených ploch zatěžována současně povrchovým a podzemním odtokem.

Pro řešení řídicích rovnic toku vody schematizovaným povodím jsou použity explicitní diferenční metody pracující s časovým krokem 1 minuta. V povodí je možno situovat údolní nádrže i suché nádrže. Řídicí rovnice nádrží jsou řešeny metodou Runge-Kutta 4. řádu, pracující se stejným časovým krokem [29]. S cílem dosáhnout přesnějších výsledků při simulaci srážkoodtokového procesu v povodí Opavy, byl na základě mapových podkladů GIS upřesněn stávající model povodí pomocí rozšíření skupiny charakteristických vlastností ploch z 5 na 19. V těchto 19 charakteristických plochách byly zavedeny nové hydraulické vlastnosti odpovídající kombinaci převládajících povrchů metodou váženého průměru. Zavěšeným plochám ve schematizovaném povodí byly přiřazeny nové charakteristické vlastnosti ploch. Hydraulické vlastnosti zavěšených ploch jsou definovány především pomocí Manningova drsnostního součinitele a koeficientu hydraulické vodivosti.

Krajinná protierozní opatření (PEO), navržena formou zasakovacích pásů, stabilizovaných drah soustředěného odtoku, protierozních průlehů a trvalých travních porostů byla v modelu uplatněna změnou vlastností povrchů odpovídajících zavěšených ploch. Jedná se především o uvažování zatravnění a o částečnou změnu drsnosti. Odpovídající vlastnosti zavěšených ploch, kterých se tato opatření týkala, byly uvažovány metodou vážených průměrů, kde vahou byla plocha příslušného opatření.

Tab. 2 Srovnání kulminačních průtoků v povodí Čížiny [$m^3 \cdot s^{-1}$] [9]

Čížina - Návrh ochranných opatření v ploše povodí			
Označení povodňové situace (PS)	Stávající stav	PEO	Δ [%]
PS Op96H	228.7	207.6	-9.2
PS Op97H	76.7	67.0	-12.6
Návrh ochranných nádrží			
Profil	PEO	PEO + Nádrže	Δ [%]
PS Op96H	207.6	143.5	-30.9
PS Op97H	67.0	23.5	-64.9
Návrh ochranných opatření v ploše povodí včetně ochranných nádrží			
Profil	Stávající stav	PEO + Nádrže	Δ [%]
PS Op96H	228.7	143.5	-38.2
PS Op97H	76.7	23.5	-69.4

Po stanovení stávajícího stavu a stavu po návrhu ochranných opatření v ploše povodí (PEO), byly do modelu umístěny ochranné nádrže, jejichž návrh provedl autor ve spolupráci s Výzkumným ústavem

vodohospodářským Brno T.G. Masaryka, v.v.i. (dále jen "VÚV"). V povodí Čížiny, řízená plocha činí téměř 92 % plochy povodí Čížiny. Transformační účinek nádrží je proto v tomto povodí při stoletých a vyšších povodních v povodí Horní Opavy velmi výrazný. Z provedených analýz vyplývá, že vliv protierozních opatření v krajině i soustavy suchých nádrží je při povodních způsobených regionálními dešti výrazně nižší než v případě eliminace nepříznivých účinků povrchového odtoku z přívalových srážek [9]. Protierozní opatření i suché nádrže, tak jak byly navrženy a nadimenzovány, jsou určeny především pro lokální ochranu povodí před povodněmi způsobenými přívalovými dešti. To znamená před dešti s vysokým úhrnem, velmi krátkou dobou trvání a poměrně malou zasaženou plochou.

Prostřednictvím ochranných opatření v ploše povodí lze zvýšit celkovou přirozenou retenci povodí a její dvě hlavní složky - retenci krátkodobou R_{kt} a dlouhodobou R_{dt} a zlepšit tak schopnost krajiny pozdržet extrémní srážky.

Účinnost navržených opatření v povodí Čížiny byla také vedle výše uvedených metod vyhodnocena bilanční metodou [5],[8] - výstupy projektu NAZV ev. č. EP 9153 „Hodnocení retenční kapacity půd a krajiny při povodni a možnosti jejího zvyšování“. Základní princip bilančního postupu kvantifikace retence povodí spočívá na analogii plnění a prázdnění retenčního prostoru vodní nádrže při transformaci povodňového průtoku nádrží s tím, že celková vodní retence povodí R_c sestává z pěti hlavních složek.

Celková přirozená vodní retence povodí R_c je voda dočasně zdržená na povrchu terénu, v půdě, v korytě toku aj. přirozeným způsobem, tj. bez retence v umělých vodních nádržích a v inundacích a sestává z [5],[8]:

- retence povrchové R_{pv} , obsahující vodu zdrženou na povrchu terénu a v korytě toku,
- retence hypodermické R_{hp} , obsahující vodu podpovrchovou pohybující se v bezprostřední vrstvě pod povrchem aniž by dosáhla hladiny podzemní vody,
- retence v aeračním pásmu půdy R_{ap} , zahrnující vodu zachycenou v kapilárách nenasyčené zóny půdy a vodu infiltrující do podzemní vody,
- retence podzemní R_{pz} , zahrnující infiltrovanou vodu zvětšující zásobu podzemní vody,
- územního výparu E , tj. výparu z povrchu půdy území společně s transpirací (výpar vydaný rostlinami) a intercepce (výpar z části srážky, která ulpí na povrchu rostlin).

Při povodňové události se objemy retence v aeračním pásmu půdy, podzemní retence a územního výparu mění mnohem pomaleji než objemy retence povrchové a hypodermické. Proto součet retence povrchové a hypodermické je nazván retence krátkodobá R_k . Součet retence v aeračním pásmu půdy, retence podzemní a územního výparu je nazván retence dlouhodobá R_d .

Sumární retence vody v povodí R_c (mm) za krátkou časovou jednotku se stanoví ze vztahu:

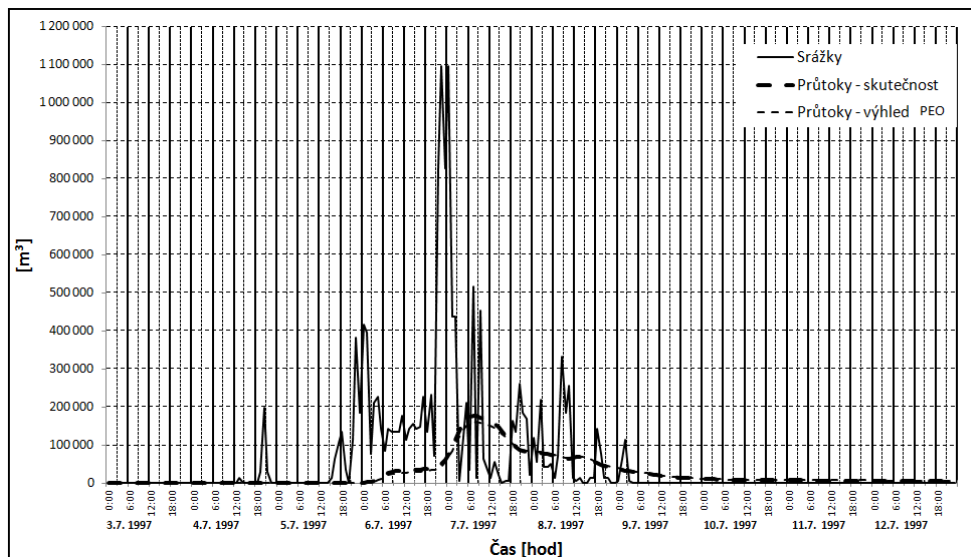
$$R_c = HS_t - Q_t = I_t + E + R_k + \Delta W_{Rk} + \Delta W_{Rd} \quad (5.16)$$

kde HS_t je úhrn ovzdušných srážek, Q_t je celkový odtok, I_t je intercepce, E je územní výpar, R_k je detence, tj. retence krátkodobá na ploše povodí, ΔW_{Rk} je přírůstek dynamické retence krátkodobé ve svrchní aktivní zóně půdy a jejím podloží, ΔW_{Rd} je přírůstek retence dlouhodobé vody na ploše povodí a v jeho podloží.

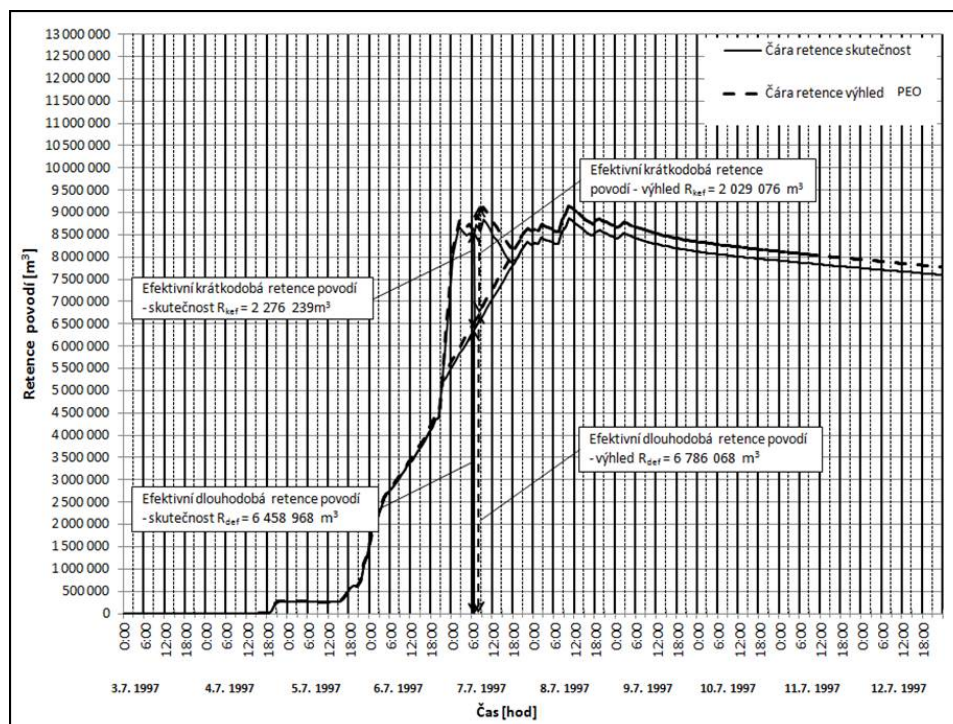
Tab. 3 Charakteristiky retenční schopnosti povodí Čížiny při povodňových situacích v letech 1996 a 1997

Parametry	Skutečný stav PS 96	PEO PS 96	Skutečný stav PS 97	PEO PS 97
Plocha povodí P [km ²]	70,80	70,80	70,80	70,80
Objem povodňové srážky SH _t [mil. m ³]	14,27	14,27	13,54	13,54
SH _t [mm]	201,50	201,50	191,20	191,20
Efektivní retence dlouhodobá R _{def} [mil. m ³]	5,96	8,66	8,47	8,79
R _{def} [mm]	84,20	122,29	119,70	124,11
Efektivní retence krátkodobá R _{kef} [mil. m ³]	5,51	3,17	2,27	2,28
R _{kef} [mm]	77,78	44,77	32,00	32,17
Efektivní retence celková R _{cef} [mil. m ³]	11,47	11,83	10,74	11,06
R _{cef} [mm]	161,97	167,06	151,70	156,28

Parametry	Skutečný stav PS 96	PEO PS 96	Skutečný stav PS 97	PEO PS 97
Součinitel efektivní dlouhodobé retence r_{def}	0,42	0,61	0,63	0,65
Součinitel efektivní krátkodobé retence r_{kef}	0,39	0,22	0,17	0,17
Součinitel efektivní celkové retence r_{cef}	0,80	0,83	0,79	0,82
Maximální průtok Q_{max} [mil. m ³]	0,58	0,52	0,26	0,24
Q_{max} [m ³ .s ⁻¹]	160,77	144,35	72,72	66,18
Maximální srážka H_{max} [mil. m ³]	4,89	4,89	1,42	1,42
H_{max} [mm]	69,00	69,00	20,00	20,00



Obr. 12 Průběh srážek a odtoku v průběhu povodňové situace v r. 1997



Obr. 13 Průběh krátkodobé a dlouhodobé retence v průběhu povodňové situace v r. 1997

Z hlediska posouzení retence povodí v době povodňové epizody je nejdůležitější maximální hodnota okamžité R_{ces} , která snižuje srážkovou povodňovou špičku. Tato hodnota byla nazvána *efektivní celková retence povodí* R_{cef} a její složky analogicky *efektivní krátkodobá retence povodí* R_{kef} a *efektivní dlouhodobá retence povodí* R_{def} . Přitom efektivní celková retence povodí nastává obvykle v době maximálního okamžitého celkového odtoku z povodí (odtok povrchový + hypodermický + podzemní) v závěrném profilu.

Pro možnost porovnatelnosti jednotlivých PS se stanovily součinitelé retence, tj. efektivní hodnoty retence byly vztaženy k objemu povodňové vlny ze srážky (součet velikosti srážky H_i od prvního do jejího posledního, tedy obecně n -tého dne), která ji vyvolala. Např. *součinitel efektivní dlouhodobé retence povodí* r_{def} .

$$r_{def} = \frac{R_{def}}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (5.17)$$

Podobně se stanovil *součinitel efektivní krátkodobé retence povodí* r_{kef} a *součinitel efektivní celkové retence povodí* r_{cef} .

Z výsledků vyplývá, že součinitel efektivní dlouhodobé retence vyhodnocený z hodnocené povodňové vlny v povodí Čižiny u PS 96 dosahoval u skutečného stavu (Sk.St.) hodnoty 0,42 a u stavu po návrhu opatření (PEO) hodnoty 0,61. Což znamená, že půda a vegetační kryt (a jen nepatrně i výpar) zadržela v povodí 42 resp 61 % objemu první vlny v době kulminačního odtoku z povodí. U PS 97 dosahoval u Sk.St. hodnoty 0,63 a u stavu po návrhu PEO, hodnoty 0,65.

Vliv efektivní krátkodobé retence povodí R_{kef} obsahující vodu zdrženou na povrchu terénu, v korytě toku a vodu hypodermickou není pro příznivou transformaci povodně jednoznačný. Při regionálních povodních je obvykle škodlivou složkou celkové retence, neboť může způsobovat škodlivé rozlivy vody. U povodní z přívalových srážek však může působit příznivě na snížení povodňového průtoku.

Výsledky dokazují, že ani příznivé hodnoty přirozené retenční schopnosti krajiny nezabránilo v případě extrémních dlouhotrvajících regionálních dešťů v povodí Čižiny v letech 1996 a 1997 škodám na majetku a dokonce ani na životech obyvatel. Z toho lze učinit závěr, že v budoucnosti při budování protipovodňových opatření bude nutné volit ve zdůvodněných případech také technická opatření s vyšším retenčním účinkem, tedy i poldry a vodní nádrže. Opatření biotechnická přírodě blízká lze v takových případech použít jako doplňková.

6 ZÁVĚR

Pozemkové úpravy se po implementaci problematiky vodního hospodářství krajiny a po zavedení technických standardů pro navrhování protierozních a protipovodňových stavebně-technických opatření staly jedním z nejdůležitějších činitelů integrované ochrany území před nepříznivými účinky povrchového odtoku. Racionálními a koordinovanými přístupy lze při pozemkových úpravách (zejména v oblasti srážkoodtokové fáze koloběhu vody v krajině), docílit zvýšení vodní retenční schopnosti půd a krajiny a zajistit tak snížení transportu splavenin, erozního smyvu a hodnot přímého odtoku.

Optimalizace a cílené využívání povodí v nových podmínkách vlastnických vztahů má význam jak při zajišťování obecné ochrany vod v krajině tak i speciální ochrany vodních zdrojů. Pozemkové úpravy jsou v současné době významným nástrojem nejen při tvorbě a ochraně krajiny, ale i při ochraně vodní komponenty prostřednictvím komplexní ochrany a organizace povodí, navazující na technická liniová a plošná opatření na vodním toku, majících vedle protierozní a protipovodňové ochrany také účinek ve zvýšení její ekologické stability. Integrovaná ochrana území (povodí) před nepříznivými účinky povrchového odtoku a povodněmi není nikdy absolutní. Strukturálními opatřeními však lze výrazně omezit erozní smyv a transport splavenin a částečně omezit povodňové kulminační průtoky, transformovat povodňovou vlnu, a tím příznivěji ovlivnit časový průběh povodní.

Optimalizace návrhu opatření v povodí, proti nepříznivým účinkům povrchového odtoku v pozemkových úpravách navrhovaná a prakticky aplikovaná autorem je v souladu se strategií ochrany před

povodněmi v České republice. Pozemkové úpravy poskytují dostatek nástrojů k návrhu protierozních a protipovodňových opatření, a to zejména v případě ochrany povodí při přívalových deštích a také do určité míry pro ochranu před povodněmi vzniklými v důsledku extrémních úhrnů srážek.

7 PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU A PRO PRAXI

Vědecké a odborné aktivity autora přispěly k prohloubení poznatků vědního oboru zejména v problematice vodní eroze a jejího degradačního vlivu na komplex hydropedologických charakteristik, retenční schopnosti povodí a eliminaci nepříznivých účinků povrchového odtoku. Výsledky výzkumné práce přispěly formou vývoje algoritmů postupu pro zdokonalení systému komplexních pozemkových úprav v oblasti protierozních a protipovodňových opatření v ploše povodí. Autorem vyvinutý systémový přístup umožnil implementaci komplexu opatření vodního hospodářství krajiny, zejména stavebně technických opatření do procesu komplexních pozemkových úprav. Výsledky v oblasti temporální dynamiky hydropedologických charakteristik byly přínosné pro rozvoj poznání v oblasti predikce erozních procesů a základních charakteristik přímého odtoku.

Ve své výzkumné práci reagoval na aktuální problémy a požadavky odborné veřejnosti a veřejné správy a výsledky své práce ve formě významných metodických návodů či technických norem vždy přiváděl do stavu využitelného v praxi.

Stěžejními výstupy aplikovaného výzkumu autora byly metodické návody pro projektování pozemkových úprav. Metodické návody jsou komplexním dokumentem celostátního významu pojednávajícím o systému projektování komplexních pozemkových úprav jako zásadního nástroje pro řešení opatření vodního hospodářství krajiny v oblasti protierozní a protipovodňové ochrany.

Pro zpracovatele návrhu pozemkových úprav v ČR byly závazným dokumentem, na základě kterého se v ČR v období 2000-2010 zpracovala projektová dokumentace na stovkách katastrálních území, v objemu finančních prostředků cca 10 mld. Kč.

Autor je také spoluautorem v praxi široce využívaného metodického návodu pro projektování protierozní ochrany, kde zpracoval část týkající se navrhování stavebně technických opatření.

V roce 2007 byl autor hlavním řešitelem souboru studií Ministerstva Životního prostředí "Návrh komplexní ochrany a organizace povodí v povodí Horní Moravy, Horní Opavy, Bečvy, Svratky, Dyje Nežárky, Ploučnice a Dědiny". Jednalo se o návrh řešení erozních a odtokových poměrů velkého plošného rozsahu cca 15 % území České republiky. Zpracovaná studie, a zejména její část zabývající se řešením komplexní ochrany a organizace povodí v povodí Horní Opavy, se stala významným podkladem pro rozhodování vlády ČR o volbě varianty protipovodňové ochranné nádrže Nové Heřmínovy.

Studie se staly také podkladem pro zpracování plánů oblasti povodí a územně plánovacích dokumentací.

8 KONCEPCE DALŠÍ VĚDECKÉ A PEDAGOGICKÉ ČINNOSTI

Ve vědecké a odborné činnosti bude autor pokračovat v aplikovaném výzkumu zaměřeném na problematiku predikce a kvantifikace projevů vodní eroze, rozvoj systémových přístupů navrhování systémů ochranných opatření pro eliminaci důsledků povrchového odtoku a jejich prosazování do rutinní praxe. V dalším období se chce autor zaměřit na následující oblasti, které souvisí s probíhajícími výzkumnými projekty do roku 2017:

- Dynamika hydropedologických charakteristik jak ve variantních krajinných polohách povodí, tak z hlediska jejich temporální dynamiky v období výskytu přívalových srážek. Pozornost bude věnována zvláště vlivu pedokompakce a tvorby půdní krusty na erozní a odtokové poměry v malých povodích.
- Pokračování ve vývoji metod predikce erozních odnosů a návrh opatření pro jejich eliminaci v ploše povodí zejména v drahách soustředěného povrchového odtoku.
- Další vývoj algoritmů postupu pro zdokonalení systému komplexních pozemkových úprav, zejména v oblasti rozšířené implementace protierozních a protipovodňových opatření v ploše povodí.

Rozvoj výzkumu v uvedených oblastech se předpokládá v souladu s pedagogickou činností autora, kdy poznatky a zkušenosti z vědeckovýzkumné a odborné činnosti realizuje ve výuce v předmětech magisterského a doktorského studia. Do výzkumných projektů řešených autorem se již řadu let zapojují studenti v rámci doktorského studia. Autor v průběhu své pedagogické činnosti přivedl k úspěšné obhajobě a získání titulu Ph.D. 3 studenty. V současné době jako školitel vede 5 doktorandů, z nichž jeden má těsně před odevzdáním disertační práce.

Ve vědeckovýzkumné činnosti se chce autor zaměřit na další rozšiřování mezinárodní spolupráce s Humboldtovou univerzitou v Berlíně, se kterou měl již dvouletou spolupráci v oblasti implementace ochranných protierozních opatření ve směrnicích EU. Další pracovištěm je Leibniz výzkumné centrum ZALF v Munchenbergu, kde v průběhu roku 2013 je dohodnut studijní pobyt dvou doktorandů. V současné době byla zahájena česko-rakouská spolupráce s ústavem pro výzkum erozních jevů v Petzenkirchenu v oblasti harmonizace přístupů predikce intenzity erozních procesů. V oblasti výzkumu erozních procesů z tání sněhu bude pokračovat spolupráce s norským výzkumným ústavem Bioforsk v As u Oslo, s katedrou hrazení bystřin a strží lesnické fakulty Bělehradské univerzity a příbuznými pracovišti na Slovensku.

Autor bude nadále pokračovat v dosavadní spolupráci s národními výzkumnými pracovišti, zejména s Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka, v.v.i., Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy, v.v.i. a s příbuznými výzkumnými týmy na Českém vysokém učení technickém v Praze, Mendelově univerzitě v Brně, Palackého univerzitě v Olomouci a Jihočeské univerzitě v Českých Budějovicích, se kterými spolupracuje v současné době na probíhajících výzkumných projektech.

9 LITERATURA

1. ALBERTS, E.E., NEARING, M.A., WELTZ, M.A., RISSE, L.M., PIERSON, F.B., ZHANG, X.C., LAFLEN, J.M. a SIMANTON, J.R. 1995. Chapter 7: Soil component. In *USDA - Water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation*. vol. NSERL Report No. 10
2. DRBAL, K., DUMBROVSKÝ, M. a kol. 2009. *Metodický návod pro identifikaci KB in Metodika mapování povodňového rizika*, MŽP 2009
3. DUMBROVSKÝ, M., KORSUŇ, S. 2003. *Optimalizace návrhu opatření v povodí v KPU*. Časopis Pozemkové úpravy MZe ČR – ÚPU, č. 56, s. 19 – 21.
4. DUMBROVSKÝ, M. a kol. 2009–2011. *Systém přírodě blízkých protierozních a protipovodňových opatření a jeho optimalizace v procesu pozemkových úprav*. Projekt NAZV ev. č. QH 92298
5. DUMBROVSKÝ, M. a kol. 1998. *Rozbor retenčního potenciálu povodí řeky Opavy s analýzou zastoupení a plošného rozmístění kultur*. Výzkumná zpráva, Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha, s. 25
6. DUMBROVSKÝ, M. a kol. 2003. *Optimalizace systému komplexních opatření pro minimalizaci nepříznivých účinků povrchového odtoku v povodí a jeho aplikace v procesu pozemkových úprav*, Projekt výzkumu a vývoje Národní agentury pro zemědělský výzkum č. QC1292
7. DUMBROVSKÝ, M. a kol. 2012. *Užitný vzor č. 23499. Zařízení k provádění volumetrické kvantifikace projevů vodní eroze*. Úřad průmyslového vlastnictví.
8. DUMBROVSKÝ, M. a kol. 2000. *Hodnocení retenční kapacity půd a krajiny při povodni a možnosti jejího zvyšování*. Projekt NAZV ev. č. EP 9153.
9. DUMBROVSKÝ, M., STARÝ, M., DRBAL, K. 2007. *Návrh strukturálního řešení protierozních a protipovodňových opatření v povodí Horní Opavy*, Studie MŽP ČR, s. 163.
10. DUMBROVSKÝ, M. a kol. 2009. *Vyhodnocení dopadů povodní na krajinu a životní prostředí - projekt MŽP Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky*
11. EKOTOXA, DUMBROVSKÝ, M. 2011. *Vymezení přispívajících ploch nad závěrovými profily erozně ohrožených drah odtoku na orné půdě pro potřeby*. Rámcové směrnice pro vodní politiku 2000/60/ES. 2011.
12. FOSTER, G.R., FLANAGAN, D.C., NEARING, M.A., LANE, L.J., RISSE, L.M. a FINKNER, S.C. 1995. Chapter 11: Hillslope Erosion Component. In *USDA - Water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation*.

13. FOSTER, G.R., LANE, L.J., NOWLIN, J.D., LAFLEN, J.M. a YOUNG R.A. 1981. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. Vol. 24(no. 5), 1253–1262.
14. FULAJTÁR, E. a JANSKÝ, J. 2001. *Vodna erozia pody a protierozna ochrana*. Bratislava: VÚPOP. 310 s. ISBN 80-85361-85-X.
15. HOLÝ, M. 1994. *Eroze a životní prostředí*. Praha: ČVUT.
16. HOLÝ, M., VÁŠKA, J. a VRÁNA, K. 1988. Simulační model povrchového odtoku a erozního procesu. *Vodní hospodářství*. Č. 10.
17. HORTON, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrological approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 56, 275–370.
18. CHARAMZA, P. a kol. 1993. *Modelovací systém GAMS*. MFF UK, Praha.
19. JANEČEK, M. a kol. 2005. *Ochrana zemědělské půdy před erozí: Metodika*. Praha: ISV, 195 s.
20. KORSUŇ, S. DUMBROVSKÝ, M a kol. 2007. *Integrovaná ochrana a řízení vodního režimu v povodí Loučky - Interní závěrečná zpráva. Etapy 05-Optimalizace vodního režimu v krajině a systému prevence před povodněmi*. Interreg IIIB-ILUP 2007.
21. LAFLEN J. M., ET AL. 1985. Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. *Soil Conservation and Productivity*. 3-8 p.
22. LAFLEN, J.M., WATSON, D.A. a FRANTI, T.G. 1987. Ephemeral gully erosion. In *Proceedings of 4th Federal Interagency Sedimentation Conference*. Las Vegas, NV. 3-29–3-37.
23. LAL, R. 2001 Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*. Vol. 12(no. 6), 519–539 p. DOI: 10.1002/ldr.472.
24. MORGAN, R.P.C. 2005. *Soil Erosion and Conservation*. Third Edition. Oxford: Blackwell Publishing. 304 p. ISBN 1-4051-1781-8.
25. MUTCHLER, C.K. a YOUNG, R.A. 1975. Soil Detachment by raindrops. In *Present and Prospective Technology for predicting sediment yields and sources*. USDA-ARS Publication ARS-S-40: 113–17.
26. PAGE, D.I. 1988. *Overland flow partitioning for rill and interrill erosion modeling*. Tucson. M.S. Thesis. University Of Arizona, Tucson, AZ. 112 p.
27. PATERA, A., VÁŠKA, J., ZEZULÁK, J., ELIÁŠ, V., KORSUŇ, S. a kol. 2002. *Povodně: prognózy, vodní toky a krajina*, FSv ČVUT – ČVTVHS, Praha.
28. POESEN, J. 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In: *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Amsterdam: Elsevier, Wicherek, S. (Ed.). 221–239 p.
29. STARÝ, M. 1991–2007. *HYDROG. Software pro simulaci, predikci a operativní řízení odtoku vody z povodí*. Brno.
30. SOBOTKOVÁ, V. 2012. *Volumetrická kvantifikace projevů vodní eroze a jejich vliv na komplex vybraných půdních charakteristik*, Disertační práce.
31. TOY, T.J., FOSTER, G.R. a RENARD, K.G. 2002. *Soil erosion: processes, prediction, measurement and control*. New York: Wiley, 352 p. ISBN 0-471-38369-4.
32. VANDAELE, K., ET AL. 1996. Geomorphic threshold condition for ephemeral gully incision. *Geomorphology*. Sv. 16, stránky 161-173.

SUMMARY

Extreme hydrological phenomena of recent years have highlighted a well-known fact that it is necessary to pay a greater attention to the problems of flood-prevention and soil erosion control on a large part of the Czech Republic territory. Farming grounds are the most endangered territories. Great runoffs of precipitation waters occur on them and the waters transform to flood waves in watercourses. Forest grounds are also affected, especially in case of unsuitable transport, wood cut and growth make-up. Based on the detailed understanding of the functioning of the river-soil-sediment-groundwater system, an integrated risk-based management approach needs to be developed to prevent or reduce the negative impacts caused by human activities on the water/sediment/soil system (erosion, loss of organic matter, contamination, sealing, compaction, loss of biodiversity, vulnerability to floods and landslides, etc.). The management approach should be restricted to the natural boundaries of the hydrological system and should take into account the impact of potential climate changes on hydrology, ecology, soil properties and functions, water quality and quantity. In order to achieve this, a number of targets have to be addressed, such as the identification of the sources of pollution and their actual and future status, the improvement of risk-assessment methodologies. Solving of the problems of territory protection from unfavourable and damaging effect of waters must therefore begin in catchment areas and particularly during any interference with landscape. The greatest interventions with farming countryside are complex land adjustments which, apart from other less important objectives, are designed to eliminate completely or at least partly limit unfavourable effects of overland runoff (especially water erosion) and thus to become one of the most important elements of territory organisation and protection.

Integrated territory protection can be reached by controlling precipitation waters runoff by means of erosion control and water-management measures. A number of mathematical models, mostly simulation ones, to solve water-management problems have been compiled, some of which with the option of exact mathematical optimization. Most likely, an optimization model has not been designed which would enable to attach territory protection and the measures to eliminate the amount and accumulation of water runoffs in catchment areas to solving water-management problems.

The optimization procedure of designing territory protection from harmful effects of waters was elaborated in the Czech Republic within the solving the project of research. Optimization of the system of complex measures for minimizing harmful effects of overland runoff in a catchment area and its application in the process of land adjustments. This procedure is linked to the results of a preceding project aimed at the problems of optimization modelling of watercourses with basins. The created procedure is a universal tool which can be applied for any territory. It enables to find the most suitable combination of all possible alternatives of various erosion control and water-management measures under the given conditions of each particular site. Such sites do not always have to be ground used for farming, they may include also sites in forest or urban areas or site arrays in various territories.