

Možnosti identifikace rizikových lokalit v krajině z hlediska ochrany infrastruktury před poškozením povodňovými událostmi

Possibilities of the Identification of Localities Endangered by Surface Runoff and Sediment Transport for Purposes of Landscape Planning

Ing. Dr. Tomáš Dostál

(Ing. Barbora Jáchymová, Ph.D.; Ing. Miroslav Bauer, Ph.D.;
doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.)

Abstract:

Surface runoff and water erosion are natural phenomena, and historically they acted as important drivers in forming the morphology of our landscape. Negative connotation it obtained during last decades due to rising conflicts with human activities resulting in climate changes and improper land use practices. The evidence itself would not be that problematic as increasing damages which correspond to rising value structures located in improper localities or, on the other hand, rising number of localities endangered by surface runoff due to the miss-land use.

One should always respect that most of natural processes within the landscape are relatively simply predictable (at least in their basic forms) and neglecting them might lead to high damages or high costs with regard to control and compensation measures and structures.

It is especially risky when locating structures in the landscape with waterways where building structures create obstacles to water flow or increase proportion of sealed surfaces without appropriate compensation of rainwater retention.

Ordinary floods, regardless if standard ones or flash floods caused by storms on small water courses are relatively well mapped concerning their occurrence, prediction and also possibilities of control strategies. However, so called pluvial floods (sheet and later concentrated surface runoff out of stream channels) has still not been included into legislation concerning neither its control strategies, nor detection methods. These extreme runoff events are often very risky and dangerous, as they come very fast and there is mostly no chance to install any protective measures or structures. The damage caused is usually mainly due to loads of sediment from agricultural land deposited at the structures.

The analysis of the surface runoff accumulation including its quantification and assessment of massive development of soil erosion processes and related sediment transport and deposition is technically possible and relatively easy. Using advanced GIS techniques and analysis of DEM, detailed land use and land cover maps together with soil conditions maps, the landscape can be analyzed and critical points of conflicts between landscape and urban planning versus surface runoff and sediment transport can be identified. In case of existing infrastructure such information can lead to designation and implementation of control measures or changes in land use. In case of newly planned structures or urbanization the most effective is to avoid risky spots, as installation of any control measures brings unavoidable risk of their failure – with much higher consequent damage. Such localities can preferably be used for non-conflict use; such as recreation, sport grounds or natural zones.

Keywords:

surface runoff; sediment transport; GIS analysis of landscape; landscape planning

DOSTÁL, Tomáš, JÁCHYMOVÁ, Barbora, BAUER, Miroslav, KRÁSA, Josef (2020). Možnosti identifikace rizikových lokalit v krajině z hlediska ochrany infrastruktury před poškozením povodňovými událostmi
In: KUGL, Jiří, ed. *Člověk, stavba a územní plánování 14*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. pp. 68–85. ISBN 978-80-01-06893-9. ISSN 2336-7687.

Článek je licencován pod licencí Creative Commons BY-NC-ND 4.0 (Uvedte autora-Neužívejte komerčně-Nezpracovávejte 4.0 Mezinárodní). Licenční podmínky: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.cs>

1 Úvod

Povrchový odtok i vodní eroze jsou jevy v krajině běžné a historicky se podílely významným způsobem na formování reliéfu. Negativní konotace se oběma uvedeným jevům dostává až dnes, kdy se stále častěji dostávají do kontaktu s lidskými aktivitami v krajině a kdy roste jejich výskyt díky změnám klimatu i díky změnám ve využívání krajiny. Výskyt sám o sobě by nebyl z hlediska člověka až tak problematický. Problémy přinášejí rostoucí škody, které odpovídají tomu, jak roste i počet a hodnota staveb, umístěných v nevhodných místech, nebo z druhé strany, jak roste počet lokalit ohrožených díky nevhodnému využívání území.

Přitom, člověk by si měl být vědom toho, že řadu přirozených procesů lze snadno predikovat a jejich přehlížení, popírání nebo nerespektování může vést buď k rozsáhlým škodám nebo vysokým dodatečným nákladům spojeným s budováním ochranných opatření.

Řeč může být například o nevhodném umístování staveb do terénu do drah soustředěného odtoku, výstavbě objektů, které brání odtoku vody nebo významným zvyšování podílu zpevněných ploch v krajině bez zajištění retence srážkové vody.

Zatímco povodně, ať již běžné (na větších vodních tocích) nebo bleskové (na malých vodních tocích, vyvolané přívalovou srážkou), jsou poměrně dobře zmapované co do mechanismu a částečně i predikce nebo alespoň prevence, tzv. pluvialní odtok (plošný a později soustředěný povrchový odtok většinou ze zemědělských ploch mimo koryta vodotečí) stále není legislativně ošetřen a nejsou standardizovány ani metody jeho predikce. Přitom tyto odtokové události jsou mimořádně nebezpečné, protože probíhají velmi rychle, zasaženým subjektům v podstatě nedávají možnost instalace ochranných opatření a následné škody působí zejména velké množství erozních sedimentů, splavených ze zemědělských pozemků.

Analýza akumulace plošného povrchového odtoku včetně jeho kvantifikace, posouzení nebezpečí masivního rozvoje eroze a transportu erozního sedimentu přitom je technicky možná a není ani nijak extrémně náročná. S využitím pokročilých GIS nástrojů a analýzy dat digitálního modelu terénu, podrobných map využití území, údajích o vegetačním krytu a půdních podmínkách je možno území analyzovat a identifikovat lokality, kde může potenciálně docházet ke konfliktu mezi odtékající vodou a zástavbou. V případě existující zástavby je pak možno zvažovat implementaci ochranných opatření – od změny ve využití zdrojových pozemků až po budování technických opatření k ochraně intravilánu. V případě nově plánované zástavby je ale mnohem efektivnější se takovým rizikovým lokalitám zcela vyhnout, protože instalace jakýchkoliv ochranných opatření vždy hrozí jejich selháním a následně ještě většími škodami. Takto identifikované rizikové území je mnohem lepší využít bezkonfliktně – například pro rekreaci nebo jako přírodní zóny.

Příspěvek prezentuje možné metodické přístupy i WWW aplikaci, která upozorňuje na možná místa střetu mezi povrchovým odtokem s masivním transportem erozního materiálu a existující infrastrukturou.

2 Rešerše

Intenzivní srážkové události a následná eroze půdy jsou globálním problémem, který narušuje a poškozují krajinu. Tyto události způsobují rozsáhlé škody na infrastruktuře obcí a mohou ohrozit životy obyvatel (Toy, Foster and Renard, 2002). V jedné třetině členských států OECD je více než 20% zemědělské půdy ohroženo mírnou až silnou erozí (OECD, 2008). Na území České republiky je 50% zemědělské půdy ohroženo erozí (Boardman and Poesen, 2006) entrainment and transport (and deposition).

Hlavními stávajícími řešeními problémy jsou: ztráta půdy v povodí (Kinnell,

2010), vstup sedimentů do říční sítě (Pandey et al., 2016), transport sedimentu v povodí (de Vente and Poesen, 2005), zatížení vodních nádrží sedimentem (Krása et al., 2005) a problémy s kvalitou sedimentu (Jan et al., 2013). Mnohem menší pozornost je věnována analýzám městských rizik zaměřených na sedimenty zemědělského původu. Existuje řada studií (Plate, 2002; Kronvang et al., 2009; O'Neill et al., 2016; Bystřický et al., 2017; Zelenáková et al., 2020) zabývajících se protipovodňovou ochranou nebo povodňovým rizikem v městských oblastech, ale žádná z nich se nezaměřovala na transportovaný sediment. V oblastech středomoří jsou studovány přívalové povodně (Braud et al., 2016), ale pro region střední Evropy nebyly dosud žádné regionální studie realizovány. Tzv. off-site důsledky erozních událostí jsou přitom velmi závažné (Mullan, 2013; Hanel et al., 2016; Strauss et al., 2019).

Llasat (2010) zdůrazňuje, že přívalové povodně jsou významnými událostmi, které mají dopad na životy významné části obyvatelstva. Narušují každodenní život a téměř každý rok způsobují škody (Llasat et al., 2010; Zhang et al., 2017). Poškození postižených oblastí nezpůsobuje pouze tekoucí voda, ale také sediment splavený ze zemědělských ploch.

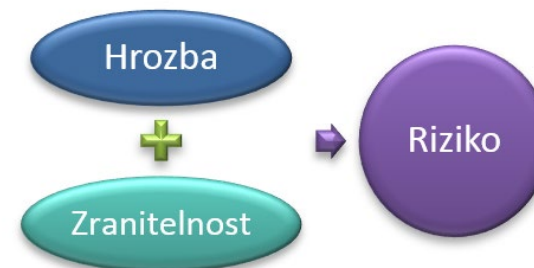
Vzhledem k husté populaci ve střední Evropě zde dochází k častým interakcím mezi sedimentem a lidskou infrastrukturou nebo vodními zdroji a dochází k velkým škodám. V České republice a v EU existují dokumenty zabývající se ochranou obyvatelstva před povodněmi (EU, 2007). Doposud však vlastník nebo uživatel pozemku nenese přímou odpovědnost za škody způsobené povrchovým odtokem z jeho pozemku.

Fluviální povodně se vyskytují na relativně malých plochách a jsou většinou způsobeny přívalovými srážkami. Tyto události nelze spolehlivě předvídat. Aby bylo možné efektivně navrhovat rozvoj urbanismu a realizaci ochranných opatření, je nutné znát potenciálně rizikové lokality, kde lze očekávat střet sedimentů s obydlenými oblastmi, infrastrukturou nebo vodními útvary.

Pro Českou republiku vytvořil databázi potenciálního rizika přívalových povodní Drbal (Drbal et al., 2009). Výstup byl označován jako „kritické body“. Tato databáze však zahrnuje pouze 35 000 bodů na celém území České republiky, z nichž méně než 10 000 je považováno za kritické. Tato rizika jsou definována velikostí povodí a průměrnou strmostí povodí, využíváním půdy a tzv. „Celkovými kritickými podmínkami“. Přestože je databáze zakotvena v legislativě, řeší pouze koncentrovaný povrchový odtok, zejména v otevřených vodních tocích a nezabývá přispívajícími oblastmi menšími než 30 ha.

Ministerstvo vnitra proto podpořilo výzkumný a aplikační projekt zaměřený na vytvoření databáze lokalit potenciálně ovlivněných pluvialním tokem spojeným s masivním transportem sedimentů ze zemědělské a lesní půdy. Tento projekt byl připraven v měřítku celého státu a je jedinečný tím, že databáze rizikových bodů zahrnuje celkem 150 000 lokalit. Kromě toho existoval požadavek na vytvoření geoportálu, aby byly výsledky tohoto projektu přístupné a použitelné pro širokou veřejnost (Rosendorf et al., 2015).

Cílem bylo pro celou oblast České republiky (78 866 km²) najít místa střetů pluvialního odtoku transportujícího sediment s intravilánem a významnou infrastrukturou v krajině (6 258 obcí) a vybranými vodními útvary (96 vodních cest a 182 vodních nádrží). Princip výpočtu (obr. 1) spočíval v kombinaci hrozeb (intenzita přítoku a transportu erozního sedimentu do intravilánu resp. vodního útvaru v 5 kategoriích) a zranitelnosti (potenciální výše škod v případě zasažení konkrétní infrastruktury v 5 kategoriích), což definuje výsledné riziko pro každý identifikovaný kritický bod (v 5 kategoriích).



obr. 1 – Princip kombinace hrozby, rizika a výsledného ohrožení

3 Metodika

3.1 Vyhledání potenciálně ohrožených lokalit

„Rizikovým bodem“ je místo v krajině, kde interakci mezi obytnými oblastmi (infrastruktura nebo vodní útvary) a trajektoriemi povrchového odtoku doprovází potenciální tok sedimentů. Bylo nutné jasně definovat potenciální body interakce. Povodňové studie často pracují se zdrojovými plochami více než 30 hektarů, které přispívají k povrchovému odtoku (Drbal et al., 2009). Od samého počátku bylo jasné, že taková definice není pro formování pluvialní povodně (soustředěného povrchového odtoku) dostatečná. Bylo nutné najít optimální velikost zdrojové plochy, odpovídající podrobnosti výpočetního modelu. Analýza povrchového odtoku byla zpracována na podrobném DEM v rozlišení 10 x 10 m. Byla zohledněna morfologie terénu, vlastnosti půd a využití půdy. Plocha 30 ha jako zdroj odtoku je z tohoto pohledu příliš velká.

K odvození rizikových bodů na základě GIS analýzy morfologie povrchu v kombinaci s jeho využitím byl použit algoritmus „Steepest Descent“ (Desmet and Govers, 1996) realizovaný v prostředí ARCGIS pomocí rutiny Flow Accumulation. Série testů porovnávala velikost přispívajících oblastí a počet koncentrovaných kontaktních míst se zranitelnými oblastmi. Testovací plochy byly 0,5 ha; 1 ha; 2 ha a 5 ha. Z této analýzy, založené na aplikaci metody SCS-CN (USDA, 1986) a zkušenostech řešitelského týmu s podobnými analýzami byla velikost přispívající oblasti vybrána jako povodí jednoho hektaru. Toto měřítko je mnohem podrobnější, než měřítko použité v dřívějších studiích a přitom je jednoduchým výpočtem možno konstatovat, že již plocha 1,0 ha může při intenzivní srážce, rizikové morfologii a nevhodnému aktuálnímu stavu povrchu generovat nebezpečný plošný a následně soustředěný povrchový odtok. V podmínkách České republiky je možné konvergentní zemědělské plochy nebo plochy lesního porostu větší než 1 ha považovat za nebezpečné z hlediska produkce povrchového odtoku spojeného s potenciálním masivním transportem sedimentů. Každý bod na odtokové trajektorii se zdrojovou oblastí větší než jeden hektar je proto považován za rizikový. Tato definice vedla k identifikaci 155 482 rizikových bodů na celém území České republiky.

Protože se nejedná o řešení povodní, ale pouze o pluvialní odtok, bylo nutné eliminovat případy, kdy je voda koncentrována ve vodních tocích. Studie předpokládá, že pluvialní tok může stále zahrnovat odtok v nejmenších vodních tocích a v otevřených odtokových kanálech. Tento princip byl rovněž zahrnut do výpočtu. Trajektorie povrchového odtoku byla vždy ukončena v místě interakce mezi trajektorií odtoku a trvalým vodním tokem.

3.2 Modelování transportu sedimentu

Pro studii byl využit model WaTEM/SEDEM. Jedná se o prostorově distribuovaný empirický model, který byl vyvinut na výzkumném pracovišti zabývajícím se problematikou erozních a transportních procesů - K. U. Leuven v Belgii (Van Oost, Govers and Desmet, 2000; Van Rompaey et al., 2001; Verstraeten et al., 2002). Model stanovuje průměrnou ztrátu půdy v modelovaném území pomocí Univerzální rovnice ztráty půdy USLE (Wischmeier and Smith, 1978; Renard et al., 1997) a následně erodovaný materiál posouvá v ploše povodí úměrně transportní kapacitě jednotlivých povrchů. Po zahrnutí vodních toků do výpočtu toků lze model využít i k bilanci sedimentu v tocích, nádržích a v uzávěrových profilech povodí.

Vstupy do modelu jsou:

- Digitální model terénu
- Mapa využití území
- Úseky vodních toků (případně parametry nádrží, pokud jsou zahrnuty)
- Faktor ochranného účinku vegetace (C faktor)
- Faktor erodovatelnosti půdy (K faktor)
- Erozní účinnost deště a povrchového odtoku (R faktor)

3.2.1 Datové vstupy

Byla použita následující data:

- Hodnoty distribuovaného faktoru R v rozlišení 1 km pro modelovanou oblast, které odvodil Hanel (Hanel et al., 2016; Krása et al., 2016).
- Pro využití území byla využita data ZABAGED (Základní báze geografických dat od ČÚZK), která byla překryta daty LPIS (aktuální databáze zemědělských pozemků od min. zemědělství; měřítko 1:10 000).
- Území bylo rozděleno na základní kategorie využití území (orná půda, travní porosty a lesy) a následně byla jednotlivým kategoriím přiřazena hodnota faktoru C, který odpovídá charakteru krajinného pokryvu podle hodnot používaných v České republice (Krása, 2010). Společné hodnoty faktoru C pro tyto kategorie v České republice definuje Janeček (Janeček et al., 2012). Faktor C pro ornou půdu byl stanoven jako průměrná hodnota podle zaznamenaného střídání plodin (Dostál, Krása and Vrána, 2006) v každém územním celku (76 okresů).
- Pro výpočet faktoru LS (měřítko 1:10 000) byl použit digitální model terénu (DEM) s prostorovým rozlišením 10 m.
- Hodnoty faktoru K byly stanoveny podle národní metodiky (Vopravil, Janeček and Tippl, 2007; Janeček et al., 2012). Vstupními údaji byla mapová databáze bonitovaných půdně ekologických jednotek (BPEJ, měřítko 1 : 5 000).

3.2.2 Úpravy modelu terénu

Využitý DEM má v rozlišení 10x10m velkou přesnost. I přesto je směřování povrchového odtoku ovlivněno řadou detailů. Nejdůležitější vliv mají lineární struktury, jako jsou silnice nebo železnice. Vodní toky s umělými kanály často nerespektují přirozenou hranici údolí. Správné ošetření DEM je klíčovým faktorem při analýzách odtokových drah definování rizikových bodů. Na základě předchozích zkušeností s podobnými výpočty na menších prostorových měřítcích (Kavka et al., 2013) byly učiněny následující kroky:

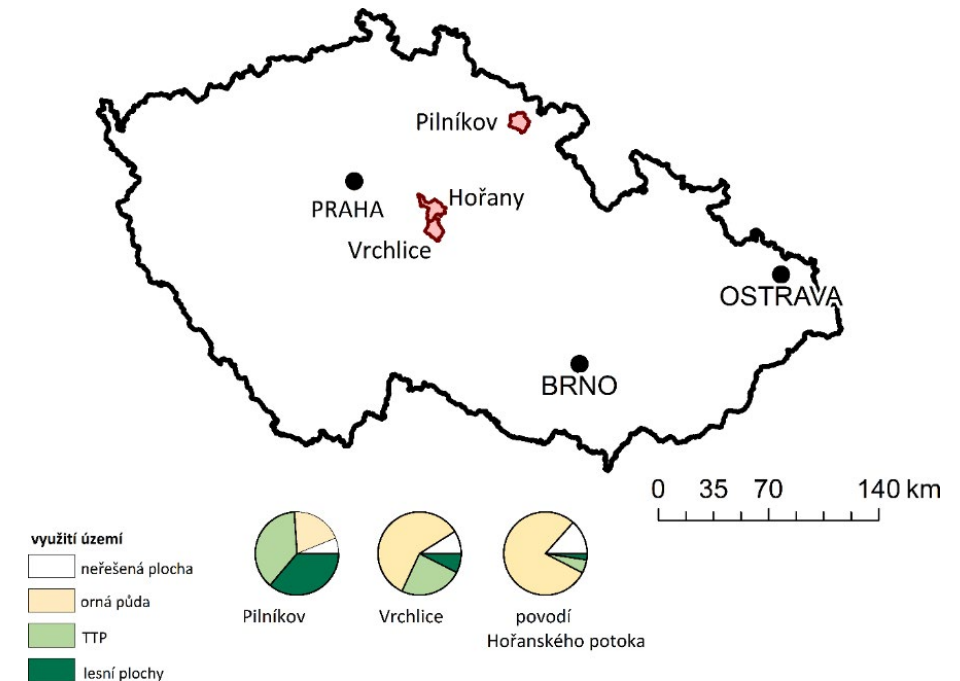
- Vyplnění bezodtokých míst v otevřené krajině
- Silnice s příkopy, železnice a vodní toky byly přetvořeny na kanály povinně modifikující směr odtoku.

3.3 Definice hrozby

3.3.1 Výběr parametru pro definici hrozby

Pro správné nastavení pěti kategorií hrozby byly vybrány tři pilotní povodí s rozlohou cca 100 km² (obr. 2). Tyto lokality představují nejběžnější typy zemědělské krajiny v České republice: i) intenzivně využívané nížiny s velkými pozemky, dlouhými rovnými svahy a obilovinami i širokořádkovými plodinami (povodí Hořany), ii) morfologicky rozmanité povodí poměrně sklonité s intenzivní zemědělskou činností (povodí VN Vrchlice) a iii) podhorské lokality se strmými konvergentními svahy, vysokým podílem obilovin, pícnin a travních porostů (povodí Pilníkovského potoka). Na těchto lokalitách byly v rámci terénního průzkumu stanoveny kategorie reálných hrozeb (1-5) pro kritické body. Výsledky terénního průzkumu byly porovnány s modelovanými charakteristikami povodí za účelem výběru vhodného modelovaného parametru pro definici kategorií ohrožení.

Modelování WaTEM/SEDEM poskytlo výstupní vrstvy GIS pro ztrátu půdy, pro transport / ukládání sedimentu v každém pixelu (Net Erosion) a pro celkový vstup sedimentu v každém pixelu (Inflow). Pro správný popis reálné hrozby v kritických povodích bylo nutné zvolit vhodné kritérium (parametr výstupního modelu). Důležitým vstupem zde byl průzkum v kalibračních oblastech.



obr. 2 – Pilotní povodí vybraná pro kalibraci metody

Testované parametry modelu byly:

- A_{specific} (t ha⁻¹ rok⁻¹) - specifická ztráta půdy v kritickém povodí
- A_{total} (t pixel⁻¹ rok⁻¹) - celková ztráta půdy v kritickém povodí
- Inflow (t rok⁻¹) - transport sedimentu, celkový vstup sedimentu v blízkosti 100 m zóny kritického bodu

Hodnoty testovaných parametrů byly vypočteny pro všechny kritické body v kalibračních oblastech. Poté byl vyhodnocen vztah mezi hodnotami parametrů a kategorií ohrožení. Parametr Inflow byl vyhodnocen jako nejhodnějším parametrem pro definici míry hrozby transportu erodovaného půdního materiálu pluvialním odtokem (tab. 1).

	$A_{specific}$	A_{total}	Inflow
povodí Hořany	0.27	0.46	0.57
povodí Pilníkův	0.16	0.63	0.76
povodí Vrchlice	0.34	0.56	0.91
celkem	0.23	0.46	0.70

tab. 1 – Hodnoty korelačních koeficientů mezi testovanými parametry a kategorií rizika určenou v terénu

V úplné databázi povodí ohrožení pro Českou republiku se parametrem Inflow pohybuje od 0 do 966 t rok⁻¹. Hodnoty přítoku pro prahové hodnoty byly stanoveny (tab. 2) na základě logaritmického rozdělení hodnot přítoku a požadovaného logaritmického znázornění povodí v kategoriích ohrožení. Konečný počet povodí v kategoriích ohrožení odpovídá logaritmické funkci.

	kategorie 1	kategorie 2	kategorie 3	kategorie 4	kategorie 5	celkem
Rozsah hodnot Inflow	0-2	2-7	7-20	20-55	>55	
Počet povodí v kategorii	53 835	32 596	24 389	12 780	3 884	127 484

tab. 2 – Průměrné hodnoty parametru Inflow v pěti kategoriích rizika

3.4 Definice zranitelnosti

Pro účely tohoto projektu se zranitelností rozumí přítomnost ploch a objektů, které mohou být poškozeny v případě výskytu významného toku sedimentů a zaplavení. Uvažovány jsou pouze plochy a objekty umístěné v zájmových oblastech a přímo v trajektorii vypočteného povrchového odtoku. Zranitelnost je rozdělena do pěti kategorií, kde kategorie 1 je nejnižší a kategorie 5 je nejvyšší stupeň zranitelnosti.

Body byly zařazeny do kategorie zranitelnosti na základě GIS analýzy využití území zahrnující významnost jednotlivých kategorií v kombinaci s datovým podkladem odtokových trajektorií. Výsledkem je mapa zranitelnosti lokalit, která dále vstupuje do procesu pro definici rizika jednotlivých ohrožených bodů/lokalit.

3.5 Určení míry rizika

Riziko škod v důsledku toku vody a sedimentu souvisejícího s kritickými body bylo odvozeno kombinací třídy hrozby a třídy zranitelnosti v trajektorii odtoku v zastavěné oblasti. Třída rizika byla stanovena pomocí matice rizik (obr. 3) pro každou kombinaci hrozeb a zranitelnosti. Matice rizik je symetrická: hrozba a zranitelnost mají pro výslednou třídu rizik stejnou váhu.

		hrozba				
		1	2	3	4	5
zranitelnost	1	1	1	1	2	3
	2	1	2	2	3	4
	3	1	2	3	4	5
	4	2	3	4	4	5
	5	3	4	5	5	5

obr. 3 – Matice rizika

3.6 Návrh ochranných opáření

Dalším cílem projektu bylo orientačně posoudit vliv ochranných opáření v povodí rizikových bodů na úrovni jednotlivých pozemků.

Scénáře byly simulovány pro veškerou zemědělskou půdu umístěnou ve 150 000 zdrojových oblastech. Celkem se jedná o více než 260 000 jednotlivých pozemků. Pro hodnocení byla vytvořena škála 4 možných typů ochranných opáření, která pak byla početně simulována ve zdrojových oblastech. Aplikace vybraného typu preventivního opáření byla vyhodnocena jako změna úrovně hrozby v daném bodě a následně změna úrovně rizika. Definice rizikového bodu a klasifikace zranitelnosti obytných oblastí se při aplikaci opáření nemění. Uvažována byla následující schematická opáření:

3.6.1 Změna osevního postupu

Opáření zahrnuje úpravu osevního postupu, snížením podílu širokořádkových plodin a naopak zvýšením podílu pícnin, za účelem větší ochrany zemědělské půdy před erozí. Změna se provádí snížením hodnoty ochranného účinku vegetace (faktor C) na parcelách orné půdy na hodnotu C = 0,15.

3.6.2 Změna osevního postupu v kombinaci s vhodným managementem na orné půdě

Tato opáření jsou kombinací změny osevního postupu (podobně jako u typu 1) a aplikace vhodného managementu na orné půdě, směrem k půdoochranným a bezorebným technologiím. Pokud jsou opáření tohoto druhu prováděna v zemědělství na orné půdě, dochází k výraznému omezení intenzity eroze. Změny se interpretují snížením hodnoty ochranného účinku vegetace (faktor C) na parcelách orné půdy na hodnotu C = 0,1.

3.6.3 Zatravnění

U výrazně ohrožených lokalit je nutné změnit využití nejméně ohrožených polí. Toto opáření je modelováno zatravněním vybraných pozemků. Změna využití se provádí snížením hodnoty ochranného účinku vegetace (faktor C) na vybraných parcelách orné půdy na hodnotu C = 0,005.

3.6.4 Realizace technických opáření na vybraných pozemcích

Tento typ opáření modeluje použití příkopů nebo jiných lineárních retenčních a odváděcích prvků, jejichž funkcí je především zabránit povrchovému odtoku nebo jej přesměrovat na vhodné místo. Transport sedimentů z konkrétního pozemku je snížen na 15% původní hodnoty. Toto snížení hodnoty vychází z předchozích zkušeností v typických oblastech České republiky.

4 Výsledky

4.1 Webová aplikace

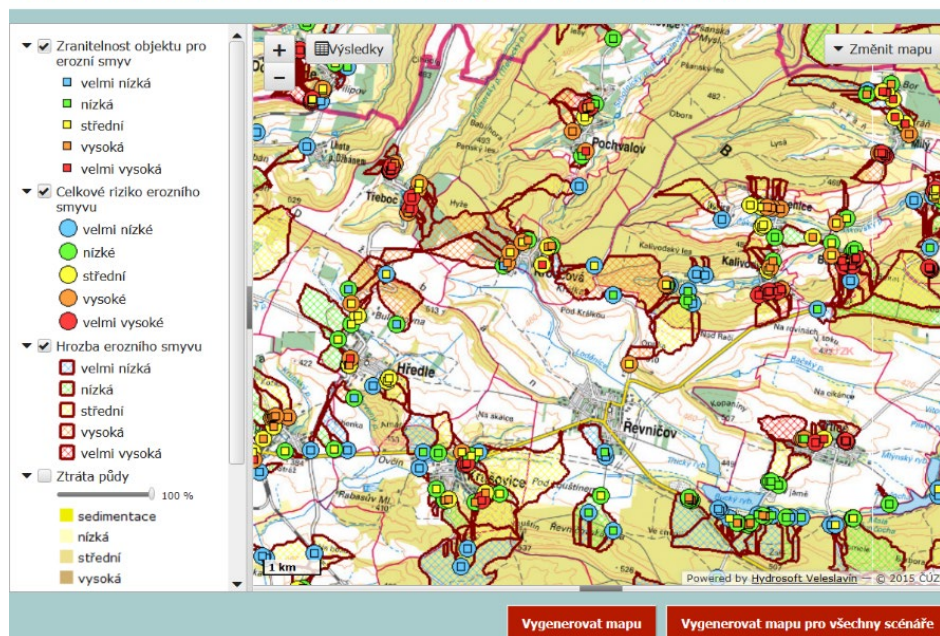
V rámci zpřístupnění údajů široké veřejnosti a územní samosprávě byly údaje prezentovány ve volně dostupné GIS aplikaci (Rosendorf et al., 2015):

<https://heis.vuv.cz/data/webmap/datovesady/projekty/eroznismyv/>

V této aplikaci je možné vybrat libovolné zájmové území v České republice, lokalizovat v tomto území rizikové body a modelovat realizaci ochranných opatření.

Na obr. 4 je uživatelské rozhraní aplikace. Rizikové body lze vybrat v mapovém okně. Vizuálně se liší podle kategorie rizika a podle odtokové oblasti. V aplikaci je možné současně zobrazit přehled zranitelnosti (barevné čtverce), celkového rizika (barevná kola) a ohrožení, představovaného barvou polygonu odtokové oblasti. Aplikace rovněž obsahuje mapu intenzity eroze včetně zobrazení míst s depozicí sedimentu.

Riziko erozního smyvu v současných klimatických podmínkách bez aplikace opatření



obr. 4 – Uživatelské prostředí webové aplikace

Pro vybraný rizikový bod lze zobrazit detailní informace o této lokalitě/bodu. Pro vybraný bod je zobrazena kategorie hrozby, hodnota zranitelnosti i rizika. Kromě toho jsou zde informace o možných způsobech ochrany rizikového bodu, včetně efektivitě ochranných opatření míru hrozby a kategorii rizika. Jsou zde také informace o charakteristikách přispívající oblasti a charakteristika zemědělských pozemků, ze kterých pochází hlavní podíl sedimentu.

Uživatel rovněž může zvolit zobrazení projekce rizika i v podmínkách změny klimatu. Tento scénář bylo modelováno na základě obecně akceptovaných předpovědí změny klimatu a zahrnuje tak rizika i potenciální vliv ochranných opatření ve výhledu desetiletí.

4.2 Rozdělení ohrožených lokalit v rámci ČR

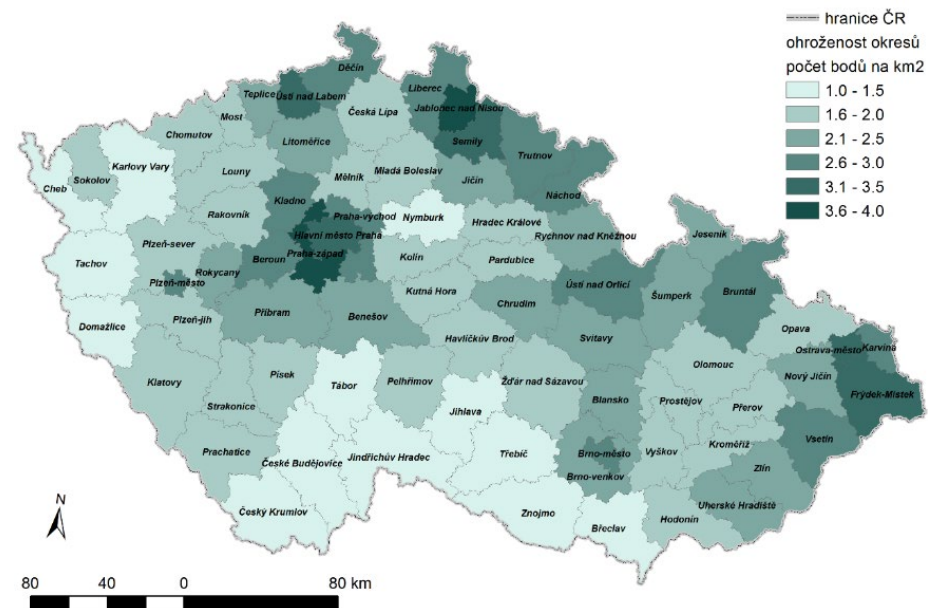
Souhrnné výsledky projektu (tab. 3) ukazují, že 19 procent sledovaných lokalit bylo zařazeno do kategorie s vysokou mírou rizika nebo do kategorie s velmi vysokou mírou rizika (kategorie 4 a 5). V těchto kategoriích je celkem více než 23 000 bodů.

	kategorie 1	kategorie 2	kategorie 3	kategorie 4	kategorie 5	celkem
celkem bodů v kategorii	54706	27914	21456	14908	8500	127484
%	43%	22%	17%	12%	7%	

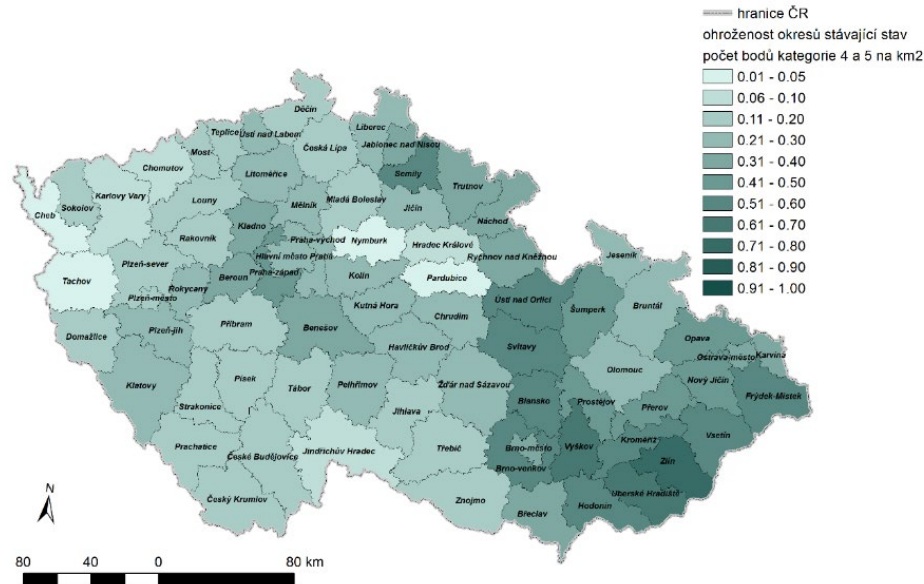
tab. 3 – Rozložení rizikových bodů do pěti kategorií pro celé území ČR

Rozložení bodů bylo dále vyhodnoceno pro jednotlivé okresy. Na území České republiky je 77 okresů o průměrné ploše 1024 km² (min. 230 km², max. 1950 km²). Na obr. 5 je zobrazen průměrný počet rizikových bodů v jednotlivých okresech přepočtený na km².

Pro posouzení skutečného rizika daného okresu jsou podstatně především rizikové body v kategoriích 4 a 5 (vysoká a velmi vysoká míra rizika). Z tohoto důvodu byl vyhodnocen počet rizikových bodů v kategoriích 4 a 5 na km² (viz obr. 6) představuje počet bodů v kategorii vysoké riziko a velmi vysoké riziko (kategorie 4 a 5) přepočtený na km² a ukazuje tak okresy s vysokou mírou rizika. Z obrázku je patrné, že nejohroženější okresy mají téměř jeden vysoce rizikový bod nebo velmi vysoce rizikový bod na km². Tyto okresy zaujímají téměř jednu třetinu území státu. Téměř polovina území České republiky obsahuje vysoce rizikové body s hustotou více než 0,5 na km².



obr. 5 – Počet rizikových bodů na 1 km² stanovený pro okresy ČR



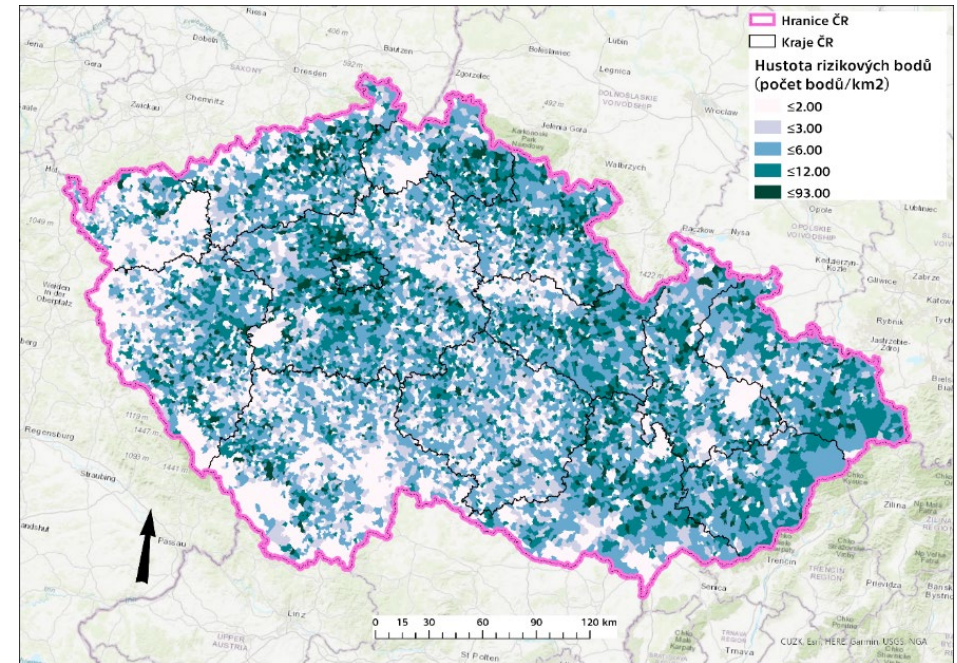
obr. 6 – Průměrný počet bodů s rizikem 4 a 5 na 1 km².

Prostorové rozdělení lze prezentovat bylo sledováno také pro katastrální území ČR. V České republice je více než 13 000 katastrálních území. Průměrná velikost katastru je 6 km². Základní statistiky této analýzy jsou uvedeny v tab. 4. Tabulka ukazuje, že 34% katastrálních území v ČR (tj. 4 416 katastrálních území s celkovou plochou 24 707 km²) je kategorizována jako oblast s vysokou úrovní rizika nebo velmi vysokou úrovní rizika (průměrné riziko > 2,5). 42 % z celkové plochy orné půdy na území České republiky je ohroženo intenzivní erozí a transportem sedimentů do obytných oblastí. V katastrálních územích s vysokou nebo velmi vysokou mírou rizika žije přibližně 30 % obyvatel České republiky.

Průměrná hodnota rizika	< 1.5	(1.5 - 2.0)	(2.0 - 2.5)	(2.5 - 3.5)	(>3.5)	celkem
počet katastrálních území	3004	3047	2624	3478	938	13091
	23%	23%	20%	27%	7%	
rozloha katastrálních území [km²]	16281	19970	17908	20586	4121	78866
	21%	25%	23%	26%	5%	
rozloha orné půdy [km²]	4197	6305	6619	9684	2555	29360
	14%	21%	23%	33%	9%	
Počet obyvatel [tisíce]	2032	2788	2548	2679	508	10555
		26%	24%	25%	5%	

tab. 4 – Základní statistické vyhodnocení pro katastrální území dle kategorií rizika 1 - 5

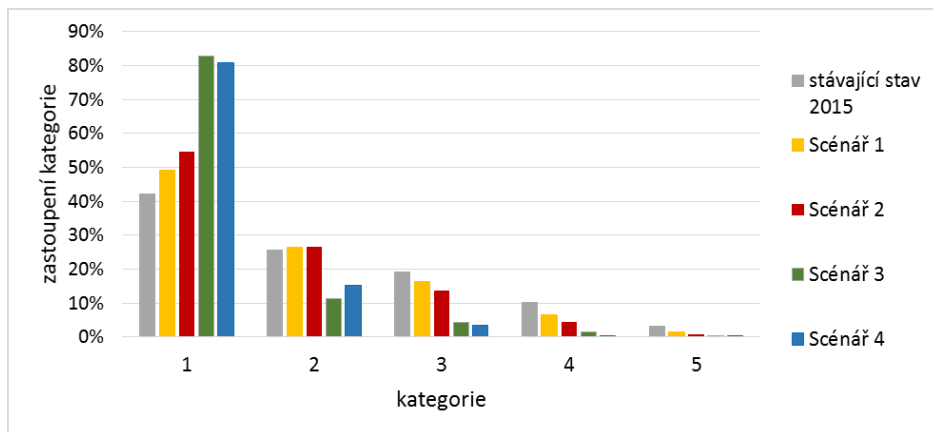
Na obr. 7 je znázorněn počet bodů s úrovní rizika větší než nula přepočtený na km² stanovený pro jednotlivá katastrální území. Katastrální území, která jsou nejvíce ohrožena, obsahují až 93 rizikových bodů na km². Je třeba poznamenat, že přibližně čtvrtina území České republiky není vystavena žádnému riziku nebo jen minimálnímu riziku (bílá-šedá barva na mapě). Tato skutečnost může vycházet mimo jiné z využití území v těchto lokalitách (např. hojně zastoupení lesa, které v prezentovaném modelu negeneruje významný pluvialní odtok).



obr. 7 – Počet rizikových bodů na km² stanovený pro jednotlivá katastrální území

4.3 Efektivita navrhovaných ochranných opatření

Výsledky modelování scénářů ochranných opatření jsou shrnuty na obr. 8. Výsledky analýzy ukazují, že všechny navrhované scénáře mají významný dopad na celkové snížení kategorie rizik u kritických bodů v příslušných oblastech. Počet bodů v kategorii 1 vzroste z původního podílu 42% na 61% (pokud budou zavedena intenzivnější opatření). Výsledky porovnání ukazují, že pro kritické body s vysokou úrovní rizika (kategorie 4 a 5) jsou scénáře 3 a 4 výrazně efektivnější. Tyto scénáře zahrnují přechod na travní porosty nebo technická opatření.



obr. 8 – Efektivita navržených scénářů modelujících protierozní opatření

5 Diskuse

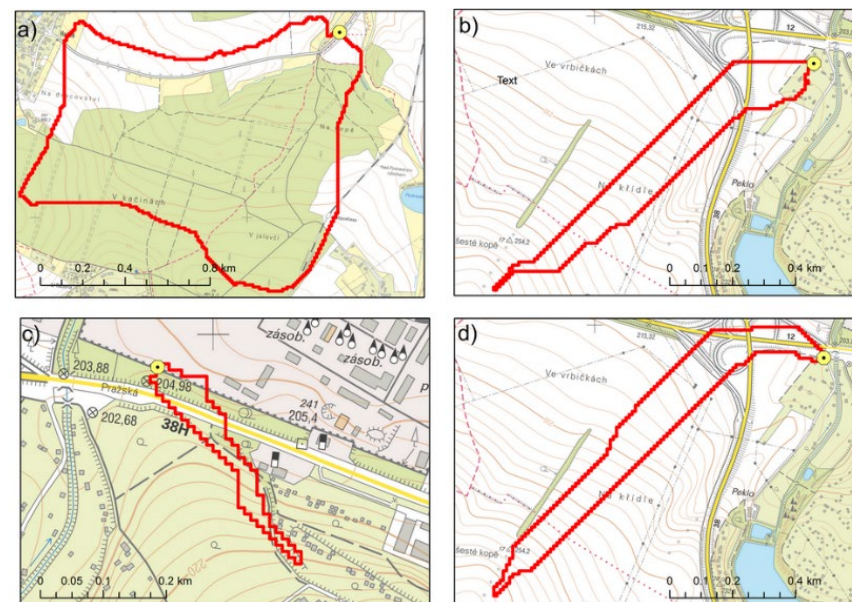
Prezentovaná analýza byla realizována v rámci výzkumně-aplikačního projektu, který byl zaměřený na dvě základní oblasti.

Cílem v první oblasti projektu bylo vytvořit vhodný nástroj pro územní správu, který bude sloužit jako základ pro plánování v oblasti ochrany životního prostředí, obyvatelstva a infrastruktury před účinky intenzivních srážko-odtokových událostí spojených s intenzivní erozí.

Zde prezentovaná aplikace GIS umožňuje snadné vyhledání lokalit, které jsou potenciálně citlivé na vznik pluvialního odtoku a masivního transportu erozních splavenin.

Přesnost a kvalita informací v aplikaci je zcela úměrná rozsahu, ploše a způsobu řešení celého projektu. Ačkoli je podrobnost řešení projektu velká a vstupní data použitá pro výpočty byla velmi dobré kvality, byla v průběhu projektu zjištěna řada limitů (zejména během kalibrace na pilotních povodích), které je nutné brát v úvahu při interpretaci výsledků.

Některé příklady jsou uvedeny na obr. 9. Prvním omezením zde prezentovaného přístupu je definice obytných oblastí, vyplývající z využití klasifikovaných mapových podkladů ZABAGED. Příklad na obr. 9 a) ukazuje špatně definovaný rizikový bod. V rámci terénního průzkumu bylo zjištěno, že místo se nachází mimo území obce a jde o budovu zanedbatelného významu bez trvalého využití. Na základě existujících databází nebylo možné správně posoudit význam budovy. Hlavní slabinou stávajících databází je nedostatečná podrobnost a neaktuálnost datových podkladů. Na obr. 9 b), c) a d) jsou tři různá místa, ve kterých byl rizikový bod klasifikován jako potenciálně vysoce nebezpečný. Během terénních šetření však byly zjištěny nedostatky ve vstupních datech. Silnice (na obrázku nakreslená žlutě) nebyla ve vstupních datech vůbec zanesena. Přispívající oblast rizikových bodů (červené ohraničení), jak je určena modelem, je proto na místě výrazně odlišná. Důvodem těchto rozdílů je vysoká intenzita urbanizace a výstavby. Dokonce ani nejaktuálnější oficiálně dostupné zdroje dat (ZABAGED) nemohou fungovat jako data v reálném čase. V době, kdy jsou distribuována, již nejsou aktuální, zejména v místním měřítku, na konkrétních místech.



obr. 9 – Příklady chybně zařazených lokalit z hlediska rizika intenzivní eroze z důvodu neaktuálních datových vstupů

Skutečná úroveň rizika pro obyvatele lokality závisí na mnoha faktorech (Cerdan et al., 2002). Na vznik a průběh srážkových a odtokových událostí má vliv například intenzita srážek (Liu et al., 2014; Chandrashekar et al., 2015; Mahmoodabadi and Sajjadi, 2016), půdní charakteristiky ve zdrojové oblasti přítomnost a stav vegetace (Davidová et al., 2015), morfologie a morfometrie zdrojové oblasti (Milevski, 2008; Conforti et al., 2011; Chaplot, 2013; Chandrashekar et al., 2015; Rahaman et al., 2015; Zhang et al., 2017) Italy. Riziko se také časem mění v závislosti na funkci dotčených budov a počtu postižených osob. Všechny tyto faktory společně definují aktuální riziko v lokalitě. Všechny tyto faktory se však mohou v průběhu času měnit ve větší či menší míře.

Zde prezentovaná aplikace je vhodným nástrojem pro identifikaci rizikových lokalit, jejich kategorizaci a pro identifikaci potenciálně zranitelných míst. Vždy je však nutné reflektovat skutečnou situaci v lokalitě a provést aktuální vyhodnocení na konkrétním místě, aby bylo možné předložit podrobný terénní průzkum a případně podrobně modelovat podmínky odtoku srážek a riziko eroze na každém místě zvlášť.

Druhou oblastí zájmu projektu je posouzení stavu celé České republiky z hlediska ohrožení obcí. Souhrn výsledků uvedených v tabulce 5 ukazuje, že téměř polovina (43%) z celkového počtu přibližně 130 000 rizikových bodů je zahrnuta do kategorie 1 (riziko). 19% rizikových bodů je hodnoceno jako velmi zranitelné (kategorie 4 a 5). Pro prostorové srovnání byla stanovena hustota velmi zranitelných bodů (kategorie 4 a 5) pro každý z okresů (obrázek 8). Z obrázku je zřejmé, že jihovýchod republiky je zranitelnou oblastí. Naopak střední a východní Čechy a Slezsko jsou obecně méně ohroženy. Největší počet bodů v kategoriích 4 a 5 najdete v okresech Zlín, Uherské Hradiště a Vyškov na východní a jižní Moravě.

Pro vyhodnocení rizika pro obyvatele byly vypočteny průměrné hodnoty rizik pro katastrální území (obrázek 9). Katastrální území jsou rozdělena do pěti tříd na základě průměrné hodnoty rizika. Tabulka 6 hodnotí zastoupení pěti rizikových tříd.

4 416 katastrálních území vykazuje vysokou nebo velmi vysokou míru rizika (průměrné riziko > 2,5). Rozloha těchto katastrálních území tvoří 30% území České republiky. Potenciálně je ohrožena celková populace 3 200 000 obyvatel. Zajímavé jsou také informace o rozloze orné půdy v ohrožených katastrálních územích. V katastrálních územích s vysokou nebo velmi vysokou mírou rizika je 12 239 km² (42%) orné půdy. Tato hodnota odpovídá hodnotě uvedené v literatuře (Boardman and Poesen, 2006) entrainment and transport (and deposition).

Současně je třeba znovu upozornit že odvozená kategorizace a stupně rizika vychází z mapových podkladů a verifikovány/validovány byly jen výsledky výpočtu ve třech typologicky odlišných oblastech. Výstup proto má charakter spíše indikativní a jednotlivých správním orgánům, státní správě i samosprávě i vlastníkům obcí ukazuje potenciály rizika, nikoliv jeho skutečnou aktuální hodnotu. Věrohodnost a vypovídací schopnost výsledných map bude samozřejmě v čase klesat stejně tak, jak budou stárnout mapové podklady sloužící jako vstupy pro výpočetní analýzu. Přesto však výstupy a aktuální chvíli mohou poskytovat velmi dobré vodítko právě pro místní správy a samosprávy při plánování aktivit v území stejně jako k motivaci pro uživatele krajiny k využívání nejrůznějších motivačních programů a nástrojů (např. dotačních a podpůrných programů pro zemědělce).

Byly modelovány čtyři scénáře pro posouzení aplikace vybraných ochranných opatření. Výsledky této analýzy (obrázek 11) ukazují, že riziko v případě lokalit s vysokým a velmi vysokým rizikem (kategorie 4 a 5) lze neúčinněji snížit zavedením technických opatření nebo přechodem na travní porost. Uplatnění těchto opatření značně snižuje počet bodů v kategoriích 4 a 5 z celkových 23 400 na 3 700 (scénář 3) nebo na 5 000 (scénář 4). Použití těchto scénářů by však významně omezilo stávající hospodaření (omezením využití orné půdy) nebo by vyžadovalo značné investice do technických opatření proti erozi. Ve skutečných studiích eroze a odtokových podmínek v oblasti je proto vždy lepší považovat výsledky projektu za podklad pro další rozhodování. Tento podklad by měl být vždy doplněn podrobnou analýzou řešeného území s přihlédnutím ke skutečnému stavu lokality a ekonomickým hodnocením navrhovaných variant ochrany území. Vhodné řešení musí často kombinovat širokou škálu opatření, aby působilo jako komplexní ochranný systém nejen proti odtoku a eroznímu odtoku, ale také jako ochrana před povodní nebo suchem.

6 Závěr

Pro území České republiky byl vytvořen model k hodnocení rizika zatížení obcí odtokem sedimentu při intenzivních erozních událostech. Bylo identifikováno celkem více než 150 000 rizikových bodů a pro každý z nich byla stanovena míra hrozby, zranitelnost a výsledná kategorie rizika. Byl navržen jednoduchý systém, který usnadňuje rozhodování o ochranných strategiích na úrovni managementu zemědělského hospodaření a technických opatření. Výstupem projektu je webová aplikace (Rosendorf et al., 2015), kde lze zobrazit výsledky analýzy a všechny kritické body na území ČR. Všechny výpočty byly provedeny a jsou k dispozici v absolutních číslech, tj. rastrové mapy a bodové hodnoty jednotlivých sledovaných veličin (ztráta půdy, transport sedimentů, zranitelnost, hrozba a celkové riziko). Vzhledem k tomu, že výsledky jsou veřejně dostupné, byly všechny hodnoty přeneseny do podoby klasifikačního systému v podobě stupnice rizika od nejnižší (1) po nejvyšší (5) míru rizika. Výsledek je zacílen na jednotlivé obce, vlastníky půdy, správce území, správce vodních toků, zemědělce, státní správu a samosprávu. Je důležité mít na paměti, že výsledné hodnoty jsou pouze potenciální. To znamená, že informují místní uživatele, kde může nastat problém, na základě předpokládané souhry určitých negativních podmínek. Tyto negativní podmínky však ve skutečnosti nemusí nastat, nebo se naopak mohou objevit opakovaně během krátké doby bez předchozího varování.

Prezentované výsledky byly získány za podpory projektů BV - VG20122015092, H2020 No. SHui 773903; LTA USA 19019 a COST LTC 18030.

Literatura

- Boardman, J. and Poesen, J. (2006) 'Soil Erosion in Europe: Major Processes, Causes and Consequences', in Soil Erosion in Europe. Chichester, UK: John Wiley & Sons, pp. 477–487. doi: 10.1002/0470859202.ch36.
- Braud, I. et al. (2016) 'Flash floods, hydro-geomorphic response and risk management', Journal of Hydrology, 541, pp. 1–5. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.005>.
- Cerdan, O. et al. (2002) 'Modelling interrill erosion in small cultivated catchments', Hydrological Processes. John Wiley & Sons, Ltd., 16(16), pp. 3215–3226. doi: 10.1002/hyp.1098.
- Chandrashekar, H. et al. (2015) 'GIS –Based Morphometric Analysis of Two Reservoir Catchments of Arkavati River, Ramanagaram District, Karnataka', in Aquatic Procedia: International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering 2015, pp. 1345–1353. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.175.
- Chaplot, V. (2013) 'Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion', Geomorphology, 186, pp. 1–11. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.10.031>.
- Conforti, M. et al. (2011) 'Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy)', Natural Hazards, 56(3), pp. 881–898. doi: 10.1007/s11069-010-9598-2.
- Davidová, T. et al. (2015) 'Determining the protective effect of agricultural crops on the soil erosion process using a field rainfall simulator', Plant Soil Environ., 61(3), pp. 109–115. doi: 10.17221/903/2014-PSE.
- Desmet, P. J. J. and Govers, G. (1996) 'A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units', Journal of Soil and Water Conservation, 51(SEPTEMBER 1996), pp. 427–433. Available at: <http://www.jswnonline.org/content/51/5/427.short>.
- Dostál, T., Krása, J. and Vrána, K. (2006) Methods and techniques of prediction of surface runoff, erosion and transport processes in landscape. Prague, Czech Republic.
- Drbal, K. et al. (2009) Methodology for the creation of flood hazard and flood risk. Prague: T. G. Masaryk Water Research Institute. Available at: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/sber_sprava_vystupnich_dat/\\$FILE/OFEU-DALSI_INFORMACE-20100609.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/sber_sprava_vystupnich_dat/$FILE/OFEU-DALSI_INFORMACE-20100609.pdf).
- EU (2007) 'Směrnice evropského parlamentu a rady 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládnání povodňových rizik', pp. 27–34.
- Hanel, M. et al. (2016) 'Rainfall erosivity factor in the Czech Republic and its Uncertainty', Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 20(10), pp. 4307–4322. doi: 10.5194/hess-2016-158.
- Jan, J. et al. (2013) 'What do results of common sequential fractionation and single-step extractions tell us about P binding with Fe and Al compounds in non-calcareous sediments?', Water Research, 47(2), pp. 547–557. doi: 10.1016/j.watres.2012.10.053.
- Janeček, M. et al. (2012) Ochrana zemědělské půdy před erozí. Edited by M. Janeček. Praha: {Č}ZU.
- Kavka, P. et al. (2013) 'Soil erosion modeling in Czech Republic - Computer models in various scales', in International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. doi: 10.5593/SGEM2013/BC3/S13.026.

- Kinnell, P. I. A. (2010) 'Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review', *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 385(1–4), pp. 384–397. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.01.024.
- Krása, J. et al. (2005) 'Reservoirs' siltation measurements and sediment transport assessment in the Czech Republic, the Vrchlice catchment study', *Catena*, 64(2–3), pp. 348–362. doi: 10.1016/j.catena.2005.08.015.
- Krása, J. (2010) Empirical models of water erosion in the Czech Republic.
- Krása, J. et al. (2016) 'Rainfall erosivity research on the territory of the Czech Republic', in Conference proceedings: Mendel and Bioclimatology. Brno, CZ, pp. 182–196.
- Kronvang, B. et al. (2009) 'Ensemble modelling of nutrient loads and nutrient load partitioning in 17 European catchments.', *Journal of environmental monitoring* : JEM, 11(3), pp. 572–583. doi: 10.1039/b900101h.
- Liu, Q. J. et al. (2014) 'Influence of microtopography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure', *Soil and Tillage Research*, 136, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.still.2013.09.006.
- Llasat, M. et al. (2010) 'High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: The FLASH preliminary database', *Advances in Geosciences*, pp. 47–55. doi: 10.5194/adgeo-23-47-2010.
- Mahmoodabadi, M. and Sajjadi, S. A. (2016) 'Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion', *Geomorphology*. Elsevier B.V., 253, pp. 159–167. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.10.010.
- Milevski, I. (2008) 'Estimation of Soil Erosion Risk in the Upper Part of Bregalnica Watershed-Republic of Macedonia, Based on Digital Elevation Model and Satellite Imagery', in 5th International Conference on Geographic Information Systems (IGIS-2008), pp. 351–358.
- Mullan, D. (2013) 'Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems', *CATENA*, 109, pp. 234–246. doi: 10.1016/j.catena.2013.03.007.
- O'Neill, E. et al. (2016) 'The Impact of Perceived Flood Exposure on Flood-Risk Perception: The Role of Distance', *Risk Analysis*, 36(11), pp. 2158–2186. doi: 10.1111/risa.12597.
- OECD (2008) *Environmental Performance of Agriculture at a Glance*, Agriculture. Paris, France: OECD Publications. doi: 10.1787/9789264046788-en.
- Van Oost, K., Govers, G. and Desmet, P. (2000) 'Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage', *Landscape Ecology*, 15(6), pp. 577–589. doi: 10.1023/A:1008198215674.
- Pandey, A. et al. (2016) 'Physically based soil erosion and sediment yield models revisited', *Catena*. Elsevier B.V., 147, pp. 595–620. doi: 10.1016/j.catena.2016.08.002.
- Petřík, Petr; Fanta, Josef; Petrtýl, Martin (2015): It is time to change land use and landscape management in the Czech Republic. In *Ecosystem Health and Sustainability* 1 (9), pp. 1–6. DOI: 10.1890/15-0016.1.
- Plate, E. J. (2002) 'Flood risk and flood management', *Journal of Hydrology*, 267(1–2), pp. 2–11. doi: 10.1016/S0022-1694(02)00135-X.
- Rahaman, S. A. et al. (2015) 'Prioritization of Sub Watershed Based on Morphometric Characteristics Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Geographical Information System – A Study of Kallar Watershed, Tamil Nadu', in *Aquatic Procedia: International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering 2015*, pp. 1322–1330. doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.172.
- Renard, K. et al. (1997) *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Agricultural Handbook No. 703. Washington, DC, USA.: US Department of Agriculture. doi: DC0-16-048938-5 65–100.

- Van Rompaey, A. et al. (2001) 'Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach', *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), pp. 1221–1236. doi: 10.1002/esp.275.
- Rosendorf, P. et al. (2015) *Erosion losses - increased risk to the inhabitants and water quality*. Available at: <http://www.heisvuv.cz/data/webmap/datovesady/projekty/eroznismyv/www/index.php>.
- Toy, T. J., Foster, G. R. and Renard, K. G. (2002) *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control*. New York, USA: John Wiley and Sons. Available at: <https://books.google.co.tz/books?id=7YBaKZ-28jOC>.
- USDA (1986) 'Urban Hydrology for Small', *Soil Conservation*, (Technical Release 55 (TR-55)), p. 164. Available at: <http://scholar.google.lar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Urban+Hydrology+for+Small+watersheds#1>.
- Vandecasteele, Ine; Marí i Rivero, Inés; Baranzelli, Claudia; Becker, William; Dreoni, Ilda; Lavallo, Carlo; Batelaan, Okke (2018): *The Water Retention Index: Using land use planning to manage water resources in Europe*. In *Sustainable Development* 26 (2), pp. 122–131. DOI: 10.1002/sd.1723.
- de Vente, J. and Poesen, J. (2005) 'Predicting Soil Erosion and Sediment Yield at the Basin Scale: Scale Issues and Semi-Quantitative Models', *Earth-Science Reviews*, 71, pp. 95–125. doi: 10.1016/j.earscirev.2005.02.002.
- Verstraeten, G. et al. (2002) 'Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling', *Soil Use and Management*, 18(4), pp. 386–394. doi: 10.1079/SUM2002150.
- Vopravil, J., Janeček, M. and Tippl, M. (2007) 'Revised soil erodibility K-factor for soils in the Czech Republic', *Soil and Water Research*, 2, pp. 1–9.
- Wischmeier, W. and Smith, D. (1978) *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*, U.S. Department of Agriculture Handbook No. 537. Washington, DC, USA: US Department of Agriculture. doi: 10.1029/TR039i002p00285.
- Zeleňáková, Martina; Fialová, Jitka; Negm, Abdelazim M. (2020): *Assessment and protection of water resources in the Czech Republic*. Cham, Switzerland: Springer (Springer Water).
- Zhang, Mingfang; Liu, Ning; Harper, Richard; Li, Qiang; Liu, Kuan; Wei, Xiaohua et al. (2017): *A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime*. In *Journal of Hydrology* 546, pp. 44–59. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.040

Informace o autorech:

Ing. Dr. Tomáš Dostál
(Ing. Barbora Jáchymová, Ph.D.; Ing. Miroslav Bauer, Ph.D.; doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.)
Fakulta stavební ČVUT v Praze, Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství
barbora.jachymova@fsv.cvut.cz