

Stanovenie rizika kontaminácie krajiny ťažkými kovmi v oblasti haldových polí Podlipa a Reiner na opustenom Cu-ložisku Ľubietová

JOZEF KRŇÁČ¹, PETER ANDRÁŠ¹ a PETER BLIŠŤAN²

¹Fakulta prírodných vied, Univerzita Mateja Bela, Tajovského 40, 974 01 Banská Bystrica;
krnac.jozo@gmail.com; andras@savbb.sk

²Ústav geodézie, kartografie a geografických informačných systémov, Fakulta BERG
Technickej univerzity v Košiciach, Park Komenského 19, 040 01 Košice;
peter.blistan@tuke.sk

Risk estimation of heavy metal contamination in the surrounding of Podlipa and Reiner dump-fields at abandoned Cu-deposit Ľubietová (Slovakia)

A digital model of the landscape has a great importance for the risk estimation of heavy metal contamination in the mining country. The terrain inclination and bending, the surface water runoff, potential and actual erosion, etc., have a principal influence on the water percolation through the dump-field technogenous sediments and heavy metal contamination spreading. Modelling of these indicators enable to state the risk of the country contamination as well as to find the best solutions for the country remediation. The results obtained at the Ľubietová deposit (area of Podlipa and Reiner dump-fields) show that the terrain beneath the dumps is endangered by erosion and the heavy metal pollution contamination; much more at Podlipa area and only in a limited extent in the surrounding of the Reiner dump-field area.

Key words: country contamination, heavy metals, erosion, water flow, risk GIS-visualization

Úvod

Oblasť Ľubietovej historicky patrí k najvýznamnejším a najrozsiahlejším medenorudným revírom Slovenskej republiky (obr. 1). Podľa archeologických nálezov sa tu meď získavala už v dobe bronzovej (Koděra et al., 1990). Hydrotermálna medená mineralizácia v oblasti Ľubietovej je vyvinutá na troch ložiskách: Podlipa a Reiner (obr. 2) na východnom okraji obce, Svätodušná a Kolba v závere doliny Peklo (obr. 2), asi 5 km východne od obce, kde má okrem medi a železa výraznejšie zastúpenie aj Co, Ni a Ag.

Ložisko medených rúd v Ľubietovej je žilnikovo-impregnačného typu permského veku. Vrchná zóna ložiska bola postihnutá oxidačnými procesmi, vďaka ktorým vznikla zaujímavá sukcesia sekundárnych minerálov tvoriacich povlaky a kôry prevažne zelenej farby. Ich farebná nápadnosť bola pravdepodobne dôvodom ich objavenia a následnej ťažby rúd už v dobe bronzovej.

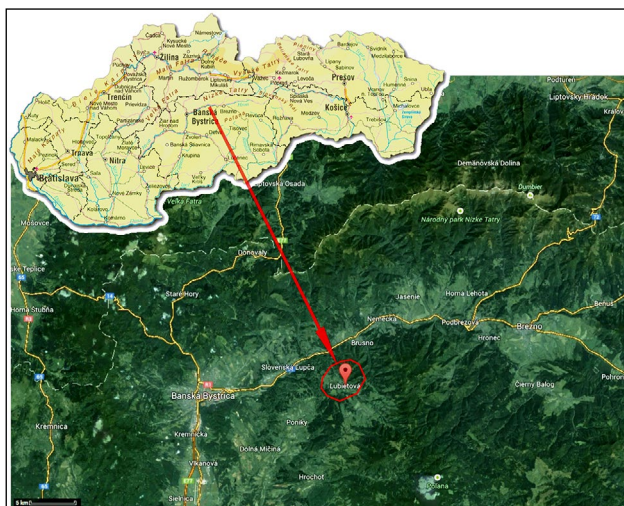
Intenzívna ťažba rúd a následné haldovanie hlušiny v blízkosti banských diel spôsobili kontamináciu pôdy a horninového prostredia toxickými (ťažkými) kovmi Cu, As a Sb. Cieľom toho príspevku je prezentovať výsledky výskumu zameraného na stanovenie rizika kontaminácie krajiny ťažkými kovmi v oblasti haldových polí Podlipa (obr. 3) a Reiner (obr. 4). Pri riešení výskumnej úlohy boli v maximálnej miere využívané nástroje GIS. Cieľom bolo prezentovať možnosti GIS pri riešení takýchto typov úloh, a to počnúc spracovaním priestorových údajov, ich následnou analýzou nástrojmi GIS, analýzou ich

priestorových vzťahov až po vizualizáciu výsledkov v podobe syntetických máp a 3 D modelov.

Popis záujmovej lokality

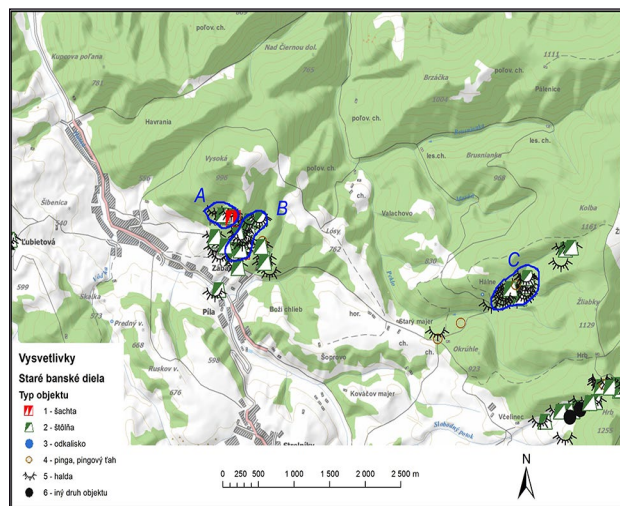
Najvýznamnejšie ložisko Podlipa leží asi 1 km východne od stredu obce Ľubietová, na južnom svahu kóty Vysoká (995,5 m) v Zelenej doline (obr. 2). Je situované v prostredí hornín terigénneho permu Ľubietovského kryštalinika, ktorý pozostáva z drobových a arkózových bridlíc a zlepcov v blízkosti styku s granitoidnými horninami spodného permu. Horniny sú intenzívne dynamicky metamorfované (Bergfest, 1951; Koděra et al., 1990). Rudná mineralizácia je zastúpená prevažne chalkopyritom, pyritom, hematitom, Ag-tetraedritom a arzenopyritom (Zahradníková, 2007), nerudné minerály reprezentujú kremeň a karbonáty. Ložisko bolo rozfárané 18 štôľňami. Obsah Cu sa pohyboval od 4 do 10 %, výnimočne až do 22 %, a obsah Ag bol 70 g · t⁻¹. Bergfest (1951) uvádza aj výskyt zlata. Rudné telesá boli ťažené najmä v 15. a 16. storočí, ale aj neskôr v 17. a 18. storočí. Ťažba sa ukončila v polovici 19. storočia (Ilavský et al., 1994). Na ložisku sa vyťažilo v priebehu 500 rokov približne 25 tisíc ton medi. Súčasné zásoby sa odhadujú na ďalších 25 tisíc ton (Bergfest, 1951).

Z hľadiska environmentálneho rizika sú v študovanej lokalite podľa Andráša et al. (2010) najdôležitejšími toxickými kovmi Cu, As a Sb, ktoré predstavujú vážne nebezpečenstvo v dôsledku vysokotoxikkej povahy svojich zlúčenín. Väčšina Cu v oblasti Ľubietovej pochádza



Obr. 1. Lokalizácia záujmového územia Ľubietová.

Fig. 1. Location of the studied area of Ľubietová.



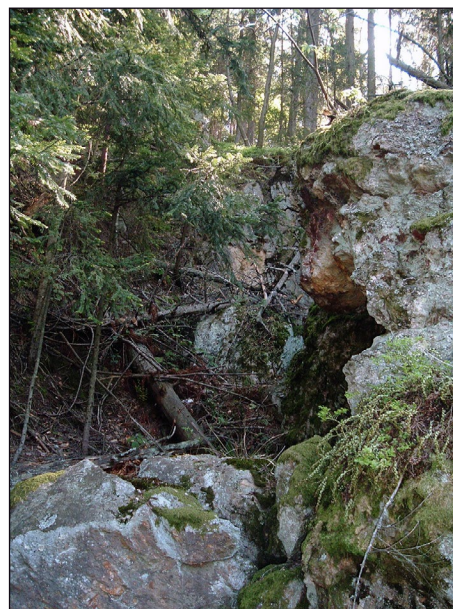
Obr. 2. Lokalizácia ložísk. A – Podlipa; B – Reiner; C – Svätodušná.

Fig. 2. Location of mineral deposits. A – Podlipa; B – Reiner; C – Svätodušná.



Obr. 3. Podlipa – haldy štôlny Mária Empfängnis.

Fig. 3. The Podlipa – dump-field of Mária Empfängnis adit.



Obr. 4. Haldové pole Reiner – zavalené ústie štôlny.

Fig. 4. The Reiner dump-field – collapsed adit collar.

z chalkopyritu (CuFeS_2) a prevažná časť As a Sb z tetradritu $[(\text{Cu,Fe,Ag,Zn})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}]$. Intenzívna banská činnosť spôsobila odkrytie geologických štruktúr (ložiskových telies), čo prispelo k urýchleniu procesu zvetrávania a tým k rýchlejšiemu uvoľňovaniu ťažkých kovov do okolitého horninového prostredia, pôdy a podzemnej vody.

Procesy zvetrávania vysokoreaktívnych minerálov v prevažne kyslom horninovom prostredí mobilizujú ťažké kovy a početné ďalšie prvky, čím kontaminujú zložky prírodného prostredia. Pokles pH v technogénnych sedimentoch haldových polí Cu ložiska Ľubietová spôsobuje uvoľnenie ťažkých kovov z tuhej fázy, kde sa nachádzajú vo forme ťažšie rozpustných minerálov alebo v sorpčnom komplexe, do podzemnej a povrchovej vody (Andráš et al., 2010). Následne dochádza v supergénnych podmienkach k vzniku pestrej škály sekundárnych minerálov medi. Tieto minerálne fázy vznikali predovšetkým v procese precipitácie z roztokov cirkulujúcich v technogénnych sedimentoch a pôdach, ale aj v dôsledku oxidácie primárnych minerálov.

Ich vznik kontroluje a spomaľuje migráciu ťažkých kovov, čo je dôsledkom ich stability v povrchových podmienkach (Ashley et al., 2003).

Metodika

Na účely komplexného posúdenia súčasného stavu kontaminácie krajiny, ako aj na účely analýzy predpokladaného šírenia kontaminácie v rámci študovaného územia boli v procese spracovania dát aplikované nástroje GIS. Výskum v tejto lokalite bol zameraný na oblasť hydrologie a erózneho modelovania s možnosťou využitia nástrojov GIS pre hydrologické

výpočty. Na účely výskumu boli v priestore haldových depónií (obr. 5) realizované terénne merania a vykonaný zber dokumentačného materiálu. Haldové depónie boli na účely výskumu rozsegmentované na rovnocenné – homogénne plochy. Vzorky z jednotlivých hald boli odobraté v štvorcovej sieti 10 x 10 m tak, aby každá vzorka (s hmotnosťou cca 1 000 g) reprezentovala v bode odberu profil do hĺbky 30 cm. Pri samotnom vzorkovaní bola odobratá len tá časť sedimentov (pôdneho profilu), ktorej veľkosť úlomkov nepresahovala 1,5 cm, pretože táto jemnozrnná časť sedimentov predstavuje ich najreaktívnejšiu časť (väčšie úlomky hornín a balvany majú relatívne malý reakčný povrch a z hľadiska uvoľňovania ťažkých kovov do okolitého prostredia tak nepredstavujú výraznejšie riziko).

Na základe laboratórnych výsledkov boli z bodovej siete **vygenerované mapy predpokladanej kontaminácie** vody a pôdy ťažkými prvkami. Tieto mapy boli pre potreby ďalšieho spracovania rasterizované (Blišťan a Rapant, 2013), pričom veľkosť bunky rastra bola zvolená na 0,5 x 0,5 m. Pri interpolácii dát (Blišťan, 2012; Blišťan a Rapant, 2013) bola použitá metóda regularizovaných splinov s tenziou – RST.

Pri tvorbe **digitálneho modelu terénu** boli využité vrstevnice zdigitalizované z topografických máp a doplnené o podrobné výškové body, ako aj terénne hrany zdokumentované v teréne počas zberu dát. Digitálny model terénu bol vytvorený za pomoci nástrojov GIS využitím interpolačnej metódy RST s vopred definovanou štruktúrou váh (v zmysle práce Netelera a Mitasovej, 2002).

Modelovanie povrchového odtoku vody nástrojmi GIS bolo realizované na základe princípov opísaných v práci Gertisa et al. (1990). V procese modelovania povrchového odtoku sa vychádza z údajov o odtoku vody po povrchu georeliéfu, až kým otekajúca vodná masa nedosiahne vodný tok (koryto). Povrchový odtok vody spôsobuje rôzne typy vodnej erózie (napr. plošnú, výmlovú) pôdy a tým aj šírenie kontaminantov vo vode a pôde. Povrchový odtok vody nastáva pri exfiltrácii – ak intenzita zrážok prekročí intenzitu infiltrácie (Moore a Foster, 1990). Samotné povrchové tečenie je priestorovo a časovo variabilné a závisí od vlastností pôdy, vegetácie a reliéfu (vrátane bariér). Pri našom výskume bolo povrchové tečenie modelované v prostredí GIS GRASS za pomoci modulu „r.flow“ (Lepeška, 2008).

Model potenciálnej erózie bol taktiež generovaný nástrojmi GIS GRASS (WATEM/SEDEM), a to využitím empirických modelov založených na báze identifikácie štatisticky významných vzťahov medzi premennými (Van Oost et al., 2000; Van Rompaey et al., 2002; Wischmeier a Smith, 1965).

Pri **modelovaní šírenia kontaminácie** boli využité poznatky o morfoloických ukazovateľoch reliéfu a o odtokových a erózných procesoch. Modelovanie bolo realizované v zmysle nasledujúcich prác – Bear (1988), Zachar (1960), Brown (2003), Bedrna (2002), Fojt a Krečmer (1975), Miklós (1993), Moore a Foster (1990), Mitášová a Mitáš (2000), Kulla (2006), Heymann et al. (2001), Feranec a Ōfahel (2001, 2008), Wischmeier a Smith (1978), Van Oost et al. (2000), Van Rompaey et al. (2002).

Spracovanie údajov a výsledky výskumu

Spracovanie údajov z terénneho výskumu

Hodnotenie kontaminácie sedimentov stopovými prvkami v záujmovej lokalite bolo popisované aj v starších prácach autorov tohto príspevku, konkrétne v rámci práce *The heavy metal sorption on clay minerals and risk of the AMD formation at the Reiner and Podlipa dump-fields at Lubietová deposit (Slovakia)* – Andráš et al. (2009). Týmto výskumom sa potvrdilo, že kontaminácia je značne nerovnomerná a na odhalenie zákonitostí jej priestorového vývoja je potrebný ďalší terénny výskum. Bolo preukázané, že distribúcia jednotlivých stopových prvkov je odrazom ich primárnej koncentrácie v jednotlivých častiach haldového poľa, ako aj ich geochemickej charakteristiky, kde na prvom mieste vystupuje schopnosť migrácie. Priestorová distribúcia jednotlivých prvkov – Cu, Fe, Pb, As v oblasti haldových polí na lokalite Lubietová-Podlipa je prezentovaná na obr. 5.

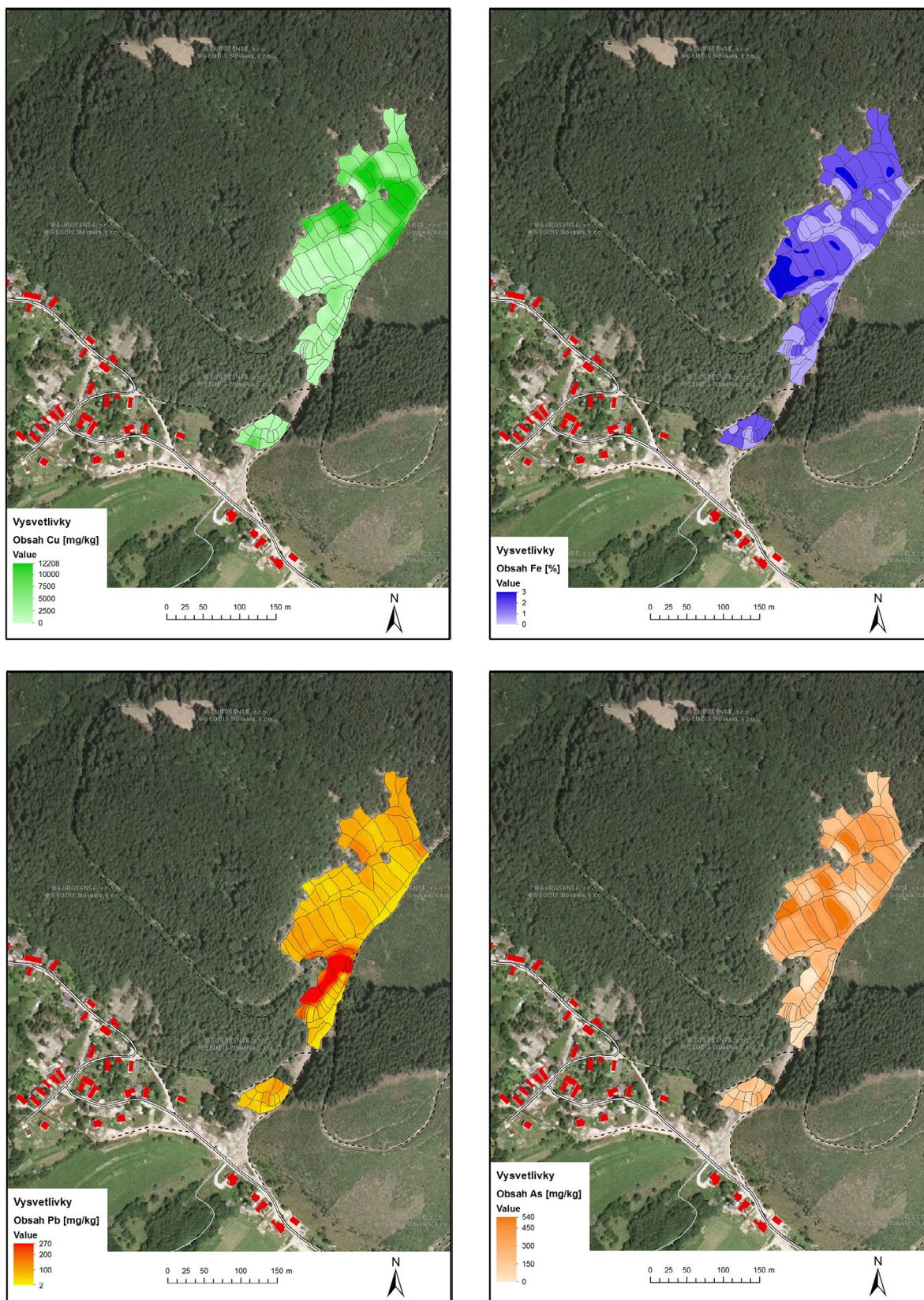
Okrem uvedených prvkov je tu pozorovaný aj zvýšený obsah U a Th. Pôvod zvýšeného obsahu U (jednotky $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) a Th (jednotky až desiatky $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) v referenčnej ploche možno vidieť v permských horninách, ktoré sú typické zvýšeným obsahom rádioaktívnych prvkov. Vo vodnom výluhu stanovené pH sedimentov kolíše v rozmedzí 4,21 a 7,93. Rozmedzie hodnôt pH sedimentov stanovené vo výluhu roztoku KCl kolíše od 4,00 po 7,3.

Zmena pH a Eh v technogénnych sedimentoch spôsobuje uvoľnenie ťažkých kovov z tuhej fázy, kde sa nachádzajú vo forme ťažšie rozpustných primárnych i sekundárnych minerálov, alebo v sorpčnom komplexe. Ťažké kovy sú takto postupne uvoľňované do podzemnej a povrchovej vody, ale aj do horninového prostredia. Ich mobilitu v roztokoch a komplexných zlúčeninách dokazuje aj vznik početných sekundárnych minerálov: karbonátov, fosforečnanov, síranov a oxidov (obr. 6 – 8).

Hydroológia skúmaného územia je významne ovplyvňovaná Hutným potokom, pretekajúcim obcou Lubietová, a bezmenným horským potôčikom, drénujúcim dno údolia Zelenej doliny. Tento potok preteká popod haldové pole Podlipa, odkiaľ odvádza povrchový odtok vznikajúci pri intenzívnej zrážkovej činnosti. Obidva vodné toky sú kontaminované ťažkými kovmi, ktoré sa uvoľňujú z technogénnych sedimentov hald.

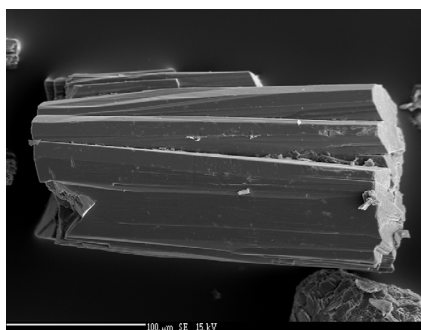
pH povrchovej vody (vrátane drenážnej vody) v lokalite Podlipa kolíše vo všeobecnosti okolo neutrálnej hodnoty (pH 6,1 – 7,5), kým voda z oblasti Kolby a Svätodušnej sa vyznačuje neutrálnym, resp. mierne alkalickým charakterom s pH hodnotami v rozsahu od 7,0 (len v jednom prípade 6,4) do 7,7. pH vody nebolo ani v jednej zo skúmaných lokalít ovplyvnené sezónnymi zmenami (obdobie častých zrážok vs. obdobie sucha – obr. 9).

Porovnanie hodnôt koncentrácie prvkov v povrchovej vode zo študovaných lokalít s odporúčanými hodnotami v zmysle nariadenia vlády SR č. 296/2005 Z. z. potvrdilo prekročenie limitných hodnôt Cu (odporúčaná hodnota $20 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) a As (odporúčaná hodnota je $30 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$). Hodnota pre Sb v zbierke zákonov nie je uvedená.



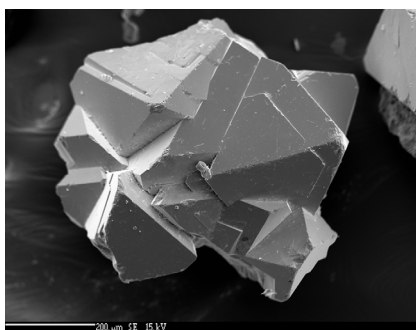
Obr. 5. Priestorová distribúcia Cu, Fe, Pb, As v lokalite Ľubietová-Podlipa.

Fig. 5. Cu, Fe, Pb and As distribution in the Ľubietová-Podlipa locality.



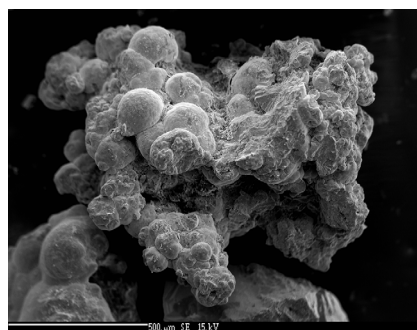
Obr. 6. Neidentifikovaný Cu-oxidický minerál z haldového poľa Podlipa.

Fig. 6. Not identified Cu-oxidic mineral from the Podlipa dump-field.



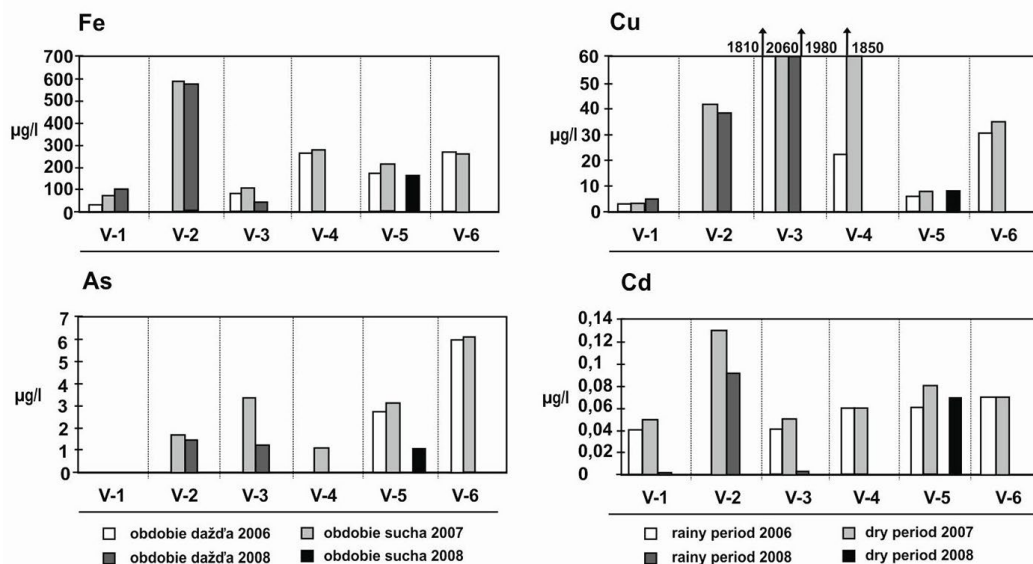
Obr. 7. Euchroite z haldového poľa Reiner.

Fig. 7. Euchroite from the Reiner dump-field.



Obr. 8. Malachit z haldového poľa Podlipa.

Fig. 8. Malachite from the Podlipa dump-field.



Obr. 9. Porovnanie koncentrácie Fe, Cu, As a Cd v povrchovej a drenážnej vode v lokalite Ľubietová-Podlipa v suchom a daždivom období rokov 2006 – 2008.

Fig. 9. Comparison of Fe, Cu, As and Cd concentrations in the surface and drainage water in the Ľubietová-Podlipa locality in dry and rainy period during 2006–2008.

Koncentrácia jednotlivých sledovaných prvkov je v období sucha vo všeobecnosti asi o tretinu vyššia ako v období dažďov (obr. 9). Významnejšia kontaminácia podzemnej vody ťažkými kovmi sa nepotvrdila.

Tvorba digitálneho modelu reliéfu
a jeho morfometrické analýzy

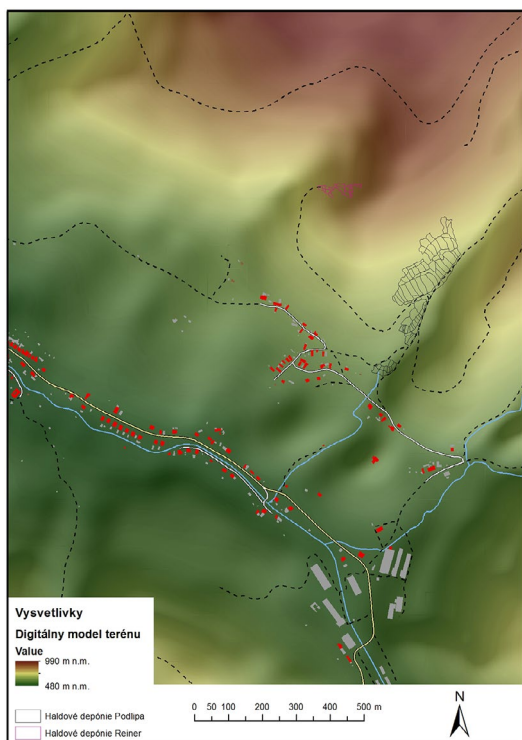
Digitálny model reliéfu (obr. 10) predstavuje množinu priestorovo lokalizovaných údajov charakterizujúcich geometrické vlastnosti reliéfu krajiny (t. j. nadmorskú výšku a ďalšie morfometrické ukazovatele – sklon, orientáciu, krivosť reliéfu a pod.). Bol vytvorený priestorovou interpoláciou zo vstupných geopriestorových údajov (vrstevnice, výškové body, terénne hrany, údolnice, spádnice). Je základným podkladom pre vizualizáciu

všetkých ďalších výsledkov výskumu prezentovaných v tomto príspevku.

Sklonitosť terénu (obr. 11) je najdôležitejší ukazovateľ pre hodnotenie rýchlosti povrchového odtoku a tým aj množstva vody otekajúcej z územia, ako aj množstva materiálu, ktorý táto vodná masa transportuje po povrchu reliéfu.

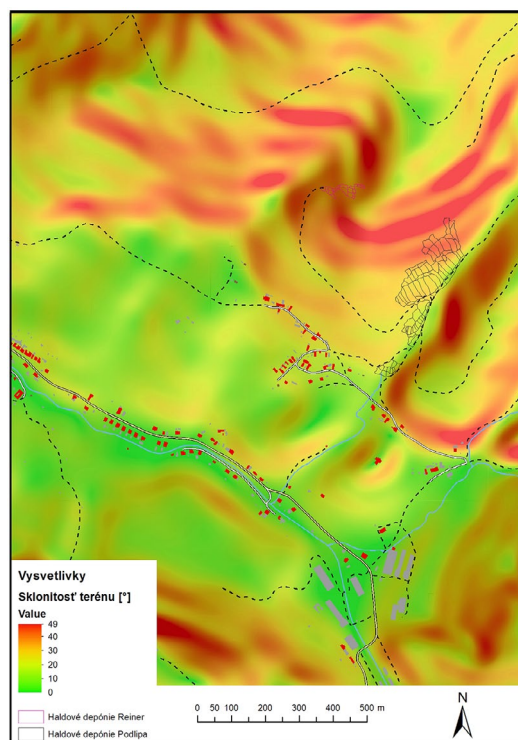
Horizontálna krivosť je charakterizovaná zakrivením vrstevníc. Prvým krokom pri tvorbe tejto analýzy je určenie polohy chrbtov a dolín, vrcholov a depresí, oproti ktorým sa potom podľa priebehu a zakrivenia vrstevníc priradia konvexné svahy (chrby, rázsochy), konkávne svahy (doliny, úvaliny, brázdy), prípadne nezakrivené svahy.

Normálová krivosť terénu je rozhodujúcim ukazovateľom pre určenie tendencie pohybu vody a materiálu po svahu (zrýchľovanie, spomaľovanie). Model prezentovaný



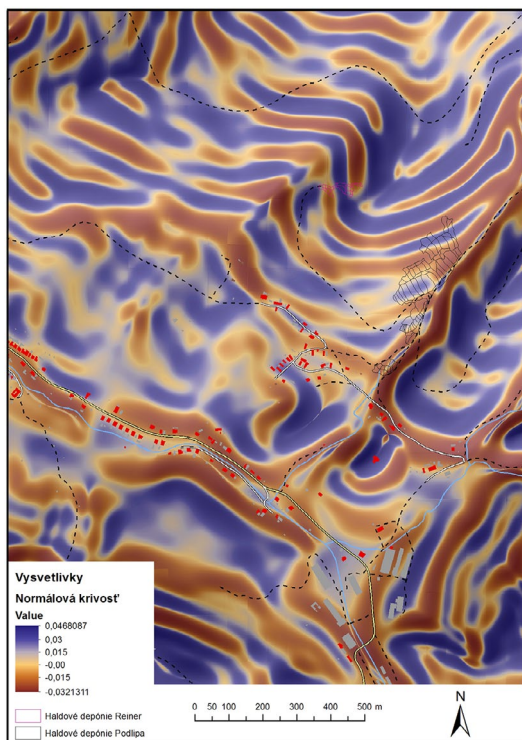
Obr. 10. Digitálny model reliéfu v oblasti haldových polí Podlipa a Reiner.

Fig. 10. Digital model of the Podlipa and Reiner dump-fields.



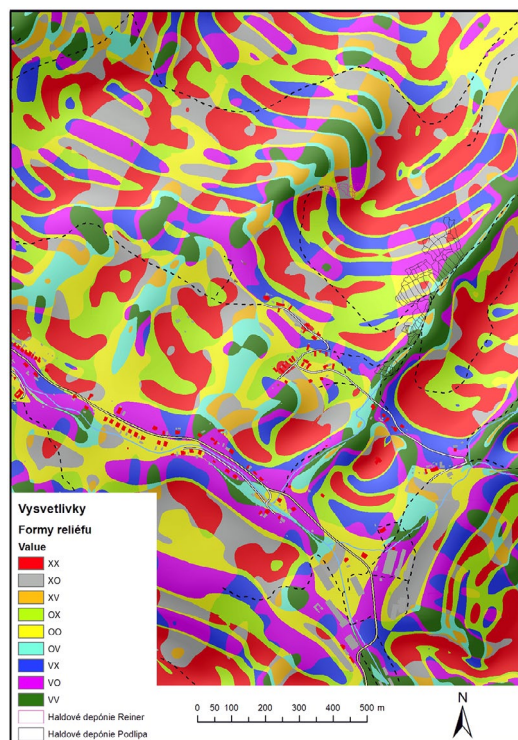
Obr. 11. Sklonitosť územia v oblasti haldových polí Podlipa a Reiner.

Fig. 11. Inclination of Podlipa and Reiner model territories.



Obr. 12. Normálová krivosť reliéfu modelového územia Podlipa a Reiner.

Fig. 12. Reference relief flexion of Podlipa and Reiner model territories.



Obr. 13. Formy reliéfu modelového územia Podlipa a Reiner.

Fig. 13. Relief forms of the Podlipa and Reiner model territories.

na obr. 12 predstavuje zakrivenie spádových kriviek. Odráža tendenciu zmien vzdialeností medzi vrstevnicami $\Delta 1$ na spádových krivkách, pričom postupne sa zväčšujúce vzdialenosti znamenajú konkávne svahy, zmenšujúce sa $\Delta 1$ konvexné svahy a rovnaké $\Delta 1$ vyrovnané svahy. Hranice medzi zakriveniami na každej spádnici predstavujú inflexné body v miestach zmeny tendencie zmien $\Delta 1$. Inflexné body sa spájajú v miestach zmeny a tým vyčleňujú areály s rôznym zakrivením.

Formy reliéfu (obr. 13) odrážajú potenciálnu energiu georeliéfu – vlastnosť urýchľovať, vyrovnávať alebo spomaľovať tok látok po svahu. Formy georeliéfu možno potom opísať ako dvojice, kde ich vzájomná hodnota vyjadruje:

XX – koncentrovanie materiálu a zrýchľovanie jeho pohybu,

XV – koncentrovanie materiálu a spomaľovanie jeho pohybu,

X0 – koncentrovanie materiálu pri jeho žiadnom pohybe,

VX – rozptyľovanie materiálu a zrýchľovanie jeho pohybu po svahu,

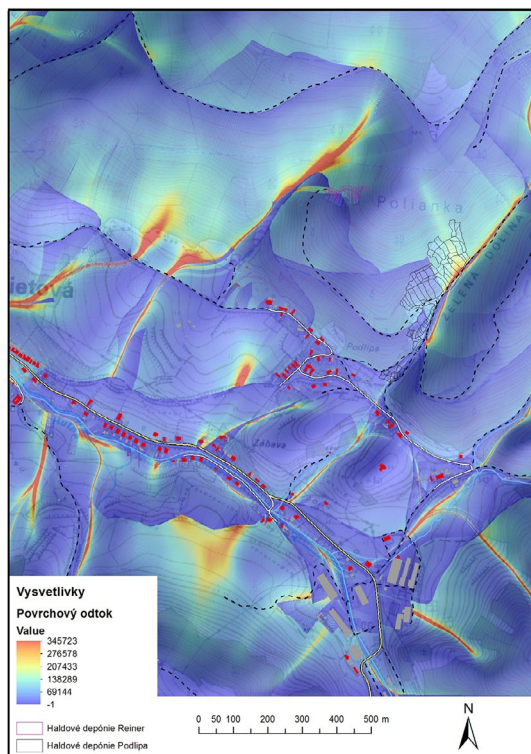
V0 – rozptyľovanie materiálu a spomaľovanie jeho pohybu,

VV – rozptyľovanie materiálu pri jeho žiadnom pohybe,

OX – zrýchľovanie pohybu materiálu po svahu,

OV – spomaľovanie pohybu materiálu po svahu,

00 – stav, keď nedochádza ani k pohybu, ani ku koncentrácii alebo rozptyľovaniu materiálu.



Obr. 14. Modelovanie potenciálneho odtoku.

Fig. 14. Modelling of potential discharge.

Základnou jednotkou pre odtok vody v koryte vodného toku je prietok – Q , čiže množstvo vody, ktoré pretečie za jednotku času priečnym profilom toku. **Povrchový tok vody** možno charakterizovať v zmysle práce Gertisa et al. (1990) ako tečenie vody po povrchu reliéfu, až kým nedosiahne korytový vodný tok. Počas zrážkovej udalosti je povrchový tok príkladom postupne sa meniaceho nestabilného voľného povrchového tečenia, pre ktoré platia zákony zachovania hmoty a hybnosti (obr. 14).

Modelovanie povrchového odtoku je možné realizovať dvoma spôsobmi. Ako prvá možnosť sa ponúka modelovanie priebehu povrchového odtoku v zmysle hľadania trás akumulácie stekajúcej vody, pričom presnosť takéhoto modelu závisí vždy od presnosti vstupných údajov, ktoré tvoria základ takéhoto modelovania. Asi najpresnejšie výsledky by prinieslo nájdenie a zameranie vypočítaných stružiek v teréne, čo však bolo z hľadiska ich početnosti nereálne. Prijateľné výsledky však dávajú aj modely vytvorené v prostredí GIS, a to využitím špeciálnych modelovacích nástrojov implementovaných do pracovného prostredia. Základom pre tvorbu takýchto modelov je analýza reliéfu, ktorú ponúka aj open software GRASS. S morфометrickým rozborom reliéfu súvisí najdôležitejší faktor, ktorý vstupuje do nepresností modelu priebehu odtoku, a to je kvalita digitálneho modelu reliéfu.

Presnosť digitálneho modelu (obr. 10) reliéfu závisí vo veľkej miere od výberu vstupných údajov, presnosti spracovania a použitej interpolačnej metódy. Pri našom výskume bol použitý model vytvorený z údajov získaných z mapového diela ZM SR 1 : 10 000. Model vznikol interpoláciou vrstevníc, výškových bodov a terénnych hrán zameraných pri realizácii terénnych prác v záujmových lokalitách. Model následne umožnil spočítať priebeh prirodzeného odtoku a potenciálnej a reálnej erózie spolu s možnosťou vytvorenia hydrického modelu v závislosti od ďalších faktorov.

Na záujmovom území je percentuálny podiel zvýšeného (silného) povrchového odtoku na úrovni 83,46 %. Zvyšných 16,54 % tvorí stredný a mierny odtok. Ten sa nachádza v časti reliéfu, ktorú označujeme za temennú, sedlovú a plošinovú časť haldovej oblasti spolu s úzkym mierne nakloneným údolným tvarom reliéfu, ktorým je zabezpečený kompletný odtok zo skúmanej oblasti v lokalite Lubietová-Podlipa (obr. 14).

Hodnotenie rizika kontaminácie krajiny ťažkými kovmi

Šírenie kontaminantov v prírodnom prostredí je úzko spojené s odtokovými pomermi územia a eróziou pokryvných útvarov (pôd). Erodovateľnosť (erodibilita) je náchylnosť, resp. odolnosť pôdy voči erózii – vodnej, veternej a inej. Erodovateľnosť môžeme chápať ako dokonanú eróziu, ale aj ako potenciálnu eróziu. Táto dôležitá vlastnosť pôdy veľmi úzko súvisí s niektorými jej fyzikálno-mechanickými vlastnosťami a v skutočnosti znamená eróziu hrozbu – ohrozenie pôdy eróziou alebo jej potenciálnu (možnú) eróziu vyjadrenú obyčajne v možných stratách pôdy z plošnej jednotky za určitý čas (čo je súčasne intenzita potenciálnej erózie pôdy)

$t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Všeobecný vzťah na výpočet erózie zohľadňuje viacero faktorov:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad [t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}],$$

kde:

R je faktor dažďa a vyjadruje intenzitu, úhrn a početnosť zrážok, výskyt a kinetickú energiu príválových dažďov.

K je faktor náchylnosti pôdy k erózii a vyjadruje vplyv kvality pôdy na jej odolnosť voči dopadajúcim dažďovým kvapkám a prúdiacej vode a vplyv veľkosti infiltrácie na množstvo povrchového odtoku. Faktor K je ovplyvnený základnými pôdnymi parametrami, ako sú zrnitosť, štruktúra pôdy, obsah organickej hmoty a priepustnosť (permeabilita).

LS faktor odráža odtokové pomery oblasti, kde **L** – faktor dĺžky svahu – predstavuje pomer straty pôdy na jednotku plochy záujmového celku k strate pôdy na štandardnej porovnávacej ploche dlhej $d = 22,13$ m. **S** je faktor sklonu svahu a predstavuje pomer straty pôdy na jednotku plochy záujmového celku k strate pôdy na štandardnej porovnávacej ploche so sklonom $s = 9$ %. Stanovenie hodnoty faktora sklonu svahu **S** sa vykonáva v závislosti od tvaru priečneho profilu svahu.

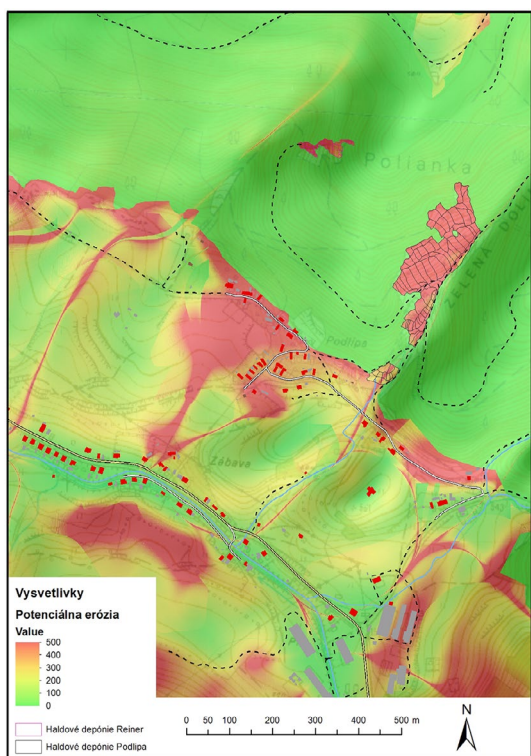
C faktor vyjadruje vplyv vegetačného krytu a agrotechniky na veľkosť erózneho zmyvu. Vegetačný kryt chráni pôdu pred priamymi účinkami dopadajúcich dažďových kvapiek, zachytáva časť zrážok (intercepcia), znižuje rýchlosť povrchového odtoku a ovplyvňuje pôdne vlastnosti (pórovitosť, priepustnosť, mechanické spevnenie

pôdy koreňovým systémom). Ochranný vplyv vegetácie je priamo úmerný pokryvnosti porastu v dobe výskytu erózných zrážok – t. j. v našich podmienkach od apríla do októbra, najčastejšie v júni, júli a v septembri.

P faktor vyjadruje protierózne opatrenia. Keďže na študovanom území neboli v minulosti realizované žiadne protierózne opatrenia, tak protierózny faktor sa pri výpočte nepoužil.

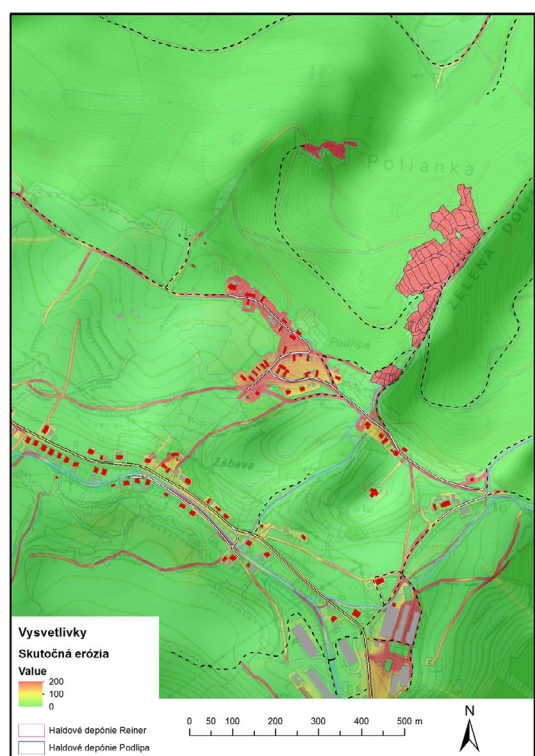
Pre tvorbu rôznych scenárov a simulácií erózie sa vyžaduje poznanie viacerých vlastností krajiny, ktoré ovplyvňujú časopriestorové zmeny povrchového toku. Pri modelovaní potenciálnej erózie v záujmovej lokalite boli ako vstupné dáta použité modely zostrojené nástrojmi GIS. Výsledkom simulácie je model potenciálnej erózie (obr. 15) predstavujúci maximálne možné ohrozenie územia vodnou eróziou za predpokladu, že sa neuvažuje o ochrannom účinku vegetácie (nezahrňa do výpočtu modelu existujúcu vegetáciu na danom území a nepredpokladá žiadne antropogénne protierózne zábrany, resp. opatrenia). Aktuálna alebo reálna erózia (obr. 16) na rozdiel od potenciálnej erózie zahrňa do výpočtu aj existujúcu vegetáciu na danom území a realizáciu protieróznych opatrení. Pri výpočtoch sa zohľadnili morfometrické parametre reliéfu, vlastnosti krajiny pokrývky (využitie krajiny, vlastnosti vegetácie), fyzikálne vlastnosti pôdy, ako aj priebeh zrážkovej udalosti.

Podľa všeobecného vzťahu na výpočet erózie je rozdiel medzi potenciálnou eróziou a reálnou eróziou



Obr. 15. Potenciálna erózia študovaného terénu v oblasti Podlipa a Reiner.

Fig. 15. Potential erosion of the studied terrain in the Podlipa and Reiner surroundings.



Obr. 16. Aktuálna – skutočná erózia študovaného terénu v oblasti Podlipa a Reiner.

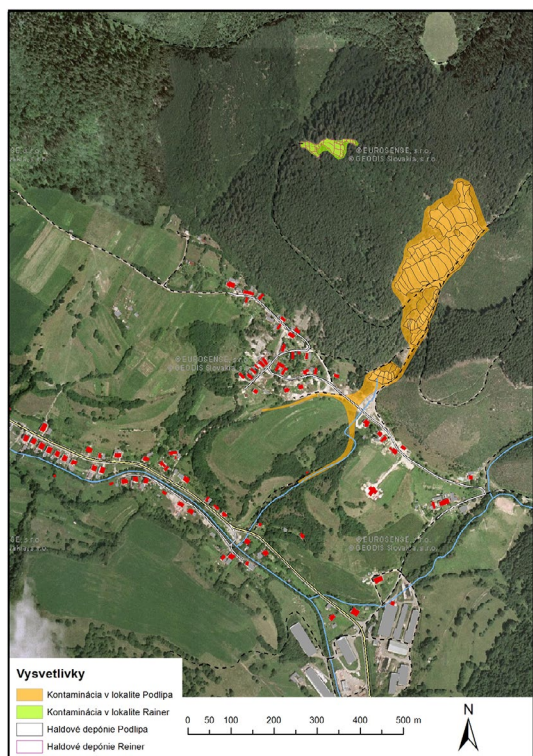
Fig. 16. Actual erosion of studied terrain in the surrounding of the Podlipa and Reiner model territories.

v zohľadnení faktora C, čiže činiteľa popisujúceho skutočné využitie krajiny. Výsledné modely (v rastrovom formáte), prezentované na obr. 15 a 16, indikujú zvýšenú erodovateľnosť, ktorá hlavne v oblasti haldových skládok mnohonásobne prekračuje limitnú hodnotu $200 \text{ t/ha} \cdot \text{rok}^{-1}$, čo je spôsobené predovšetkým nevhodnou úpravou terénu, resp. nesprávnou sanáciou územia. Situácia je kritická aj v dôsledku extrémnych hodnôt morfometrických ukazovateľov reliéfu a vo veľkej miere závisí od prakticky neexistujúcej humóznej časti pôdy, čo spôsobuje ťažšie



Obr. 17. Retenčná nádrž pod haldovým poľom Podlipa.

Fig. 17. Retentive reservoir beneath the Podlipa dump-field.



Obr. 18. Vizualizácia potenciálnej kontaminácie územia v lokalite Lubietová.

Fig. 18. Visualization of potential contamination in the surrounding of Lubietová.

uchytávanie rastlinných spoločenstiev, ktoré by svojím koreňovým systémom spevnili narušený pôdny profil a znížili povrchovú eróziu. Postupným vyvinutím úplného pôdneho profilu a zarastením územia vegetáciou by v konečnom dôsledku došlo k zníženiu rizika šírenia kontaminantov mechanickým povrchovým tokom. Vzhľadom na to, že riziko šírenia sa kontaminantov z haldových polí do sídelných štruktúr oblasti obce Lubietová je pomerne vysoké, je potrebné do budúcnosti uvažovať o riadenej rekultivácii tohto územia. Išlo by predovšetkým o rekultiváciu haldových polí s cieľom obnoviť prirodzený krajinný pokryv, zvýšiť infiltráciu a znížiť povrchový odtok.

Na základe zistených skutočností bola vytvorená mapa potenciálneho šírenia kontaminantov v priestore skúmaných lokalít (obr. 18). Mapa zohľadňuje údaje o morfometrickej charakteristike územia, sklonitosti územia, horizontálnej krivosti, príspevkových plochách odtoku vody, reálnej erózii a v neposlednom rade aj o charaktere mikropovodia, do ktorého skúmaná oblasť patrí. V rámci procesu modelovania boli zohľadnené priestorové bariéry – cesty, vodné toky, vodné plochy a zastavaná plocha, ktoré významne ovplyvňujú šírenie kontaminantov. Z výsledkov modelovania vieme povedať, že:

- v lokalite Lubietová-Podlipa má predpokladaná plocha, ktorá by mohla byť zasiahnutá kontamináciou, rozlohu 5,256 ha, pričom z tejto plochy pripadá na banské haldy 3,129 ha. Predpokladaná kontaminácia zasahuje krajinnú štruktúru (les, lúka, pasienok, kroviny a nevyužívané plochy – obr. 18), v ktorej neohrozuje priamo zdravie obyvateľstva, ale len jednu obytnú budovu s plochou $19,61 \text{ m}^2$. Prevažná väčšina splaveného kontaminovaného materiálu je zachytávaná v retenčnej nádrži (obr. 17) a vodným tokom horského potoka drénujúceho údolie pod haldami (ústiaceho do Hutného potoka).

- v lokalite Reiner obmedzuje šírenie kontaminantov do priestoru zastavanej plochy obce lesný porast, ktorý spolu s podrastom výrazne limituje eróziu (obr. 18). Kontaminanty, ktoré majú vyššiu migračnú schopnosť, sa ukladajú na úpätí svahu, na ktorom je banský odpad deponovaný. Šíreniu kontaminácie v tejto lokalite zamedzuje aj usporiadanie lesných ciest.

Diskusia

Hlavným cieľom tohto príspevku bolo identifikovať prítomnosť kontaminantov (ťažkých kovov) pochádzajúcich zo starej banskej činnosti v lokalite Lubietová-Podlipa a Lubietová-Reiner a opísať ich priestorovú distribúciu. Výsledky nášho výskumu možno rozdeliť do dvoch skupín:

- výsledky analýzy súčasného stavu kontaminácie záujmovej lokality,
- predikcia šírenia kontaminantov v rámci skúmaného územia.

Hlavnými kontaminantmi krajinných zložiek v študovaných lokalitách sú Fe (až $5,85 \%$), Cu (až $>10 \text{ 000 mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), Pb, As a Sb. Kontaminácia vykazuje geochemické zákonitosti, ktoré určujú distribúciu jednotlivých sledovaných prvkov v pôde, technogénnych sedimentoch a vo vode. Pri porovnaní získaných výsledkov

s inými známymi lokalitami podobného typu – napr. s odkaliskom v Španej Doline – možno vidieť rovnaký charakter priestorovej distribúcie geochemicky podobných prvkov Cu, Fe, Pb a Ni, kým kontaminácia sedimentov Sb, As, U a Th vykazuje odlišné závislosti. Charakter distribúcie jednotlivých prvkov je kontrolovaný aj sorpčnými schopnosťami toho-ktorého prvku na ílové minerály a hydrogoethit („limonit“).

Rozhodujúcu úlohu pri migrácii prvkov zohráva aj pôdna reakcia (pH). Väčšina prvkov je mobilná (a biodostupná) pri nižších hodnotách pH. Stupeň acidifikácie preto určuje riziko kontaminácie krajiny mobilizovanými ťažkými kovmi z haldových sedimentov.

Prvá etapa nášho výskumu bola venovaná spracovaniu modelov priestorovej distribúcie kontaminantov v priestore haldových depónií (obr. 5). Údaje pre túto etapu výskumu boli získané priamo analýzou vzoriek zozbieraných v teréne v priestore haldových depónií. Výsledkom prvej etapy výskumu je identifikácia kontaminantov na študovanom území a model ich priestorovej distribúcie v záujmovej lokalite Ľubietová.

Cielom druhej etapy výskumu bolo modelovanie povrchového odtoku (obr. 14) a erózie (obr. 15). Obidva tieto faktory významne vplývajú na transport kontaminantov v priestore. Množstvo odtoku a odnosu materiálu je v záujmových lokalitách priamoúmerné množstvu zrážok, závisí od druhu pôdy a spôsobu jej využitia (pričom v haldových oblastiach je to zväčša vegetáciou nepokrytý substrát vykazujúci vysoký stupeň erodovateľnosti). To sú parametre, ktoré vstupujú aj do modelov odtoku, reálnej vodnej erózie a hydrického modelu. Pri modelovaní sa používal ako zrážkový parameter „úhrn zrážok“ za určitú dobu, v našom prípade to bol priemerný mesačný úhrn a priemerný ročný úhrn, pričom výstupnou hodnotou je potom pomerná časť zrážok zmenšená o vodu vsiaknutú a vyparenú.



Obr. 19. Masívnou eróziou, spôsobenou prívalovými dažďami v roku 2010, zdevastovaná spodná časť údolia Zelenej doliny nad retenčnou nádržou (voda vyhlbila v sedimentoch miestami až 2 m hlbokú strž).

Fig. 19. The lower part of the Zelená dolina valley above the retentive reservoir, being devastated by flurries in 2010 (the water deepened a 2 m deep gully).

Podstatnú úlohu vo výpočte jednotlivých modelov má aj druh povrchu, na ktorom dochádza k tečeniu vody a materiálu v priestore. Objem odnášaného (migrovaného) materiálu na modelovom území je potrebné chápať ako predpokladaný pri uvažovaní o ideálnych podmienkach. Výsledky ukázali, že množstvo odtoku a odnosu materiálu kontaminovaného ťažkými kovmi je v modelových lokalitách priamoúmerné množstvu zrážok a závislé od charakteru pôdy a spôsobu jej využitia.

Riziko erózie v lokalite Podlipa a s tým súvisiaca možnosť masívneho znosu haldového materiálu do údolia Zelenej doliny a odtiaľ ďalej do retenčnej nádrže, situovanej na terase nad obcou Ľubietová, nabáda k zvýšenej opatrnosti a k realizácii sanačných opatrení. Zanedbanie preventívnych krokov na ochranu krajiny v tomto regióne môže viesť k deštrukcii haldových polí. K podobnej udalosti došlo napr. po prívalových dažďoch v roku 2010, keď bola dolná časť údolia Zelenej doliny erodovaná až po skalný podklad, a strž vyhlbená v technogénnych sedimentoch dosahovala hĺbku až 2 m (obr. 19). Po týchto prívalových dažďoch bola veľká retenčná nádrž pod haldovým polom (obr. 17) úplne zanesená sedimentmi a bolo ju potrebné vyčistiť a odviezť niekoľko desiatok m³ kontaminovaného kalu.

V lokalite Reiner bráni šíreniu kontaminantov do priestoru zastavanej časti obce lesný porast, ktorý chráni svah pod haldou aj proti masívnym prejavom erózie. Šíreniu kontaminácie zabraňuje aj priestorové umiestnenie lesných ciest, ktorých povrch je dobre zhutnený. Cesty sú situované tak, aby odtekajúcu vodu z haldy zastavili a umožnili jej vsakovanie do pôdy v blízkosti banských depónií.

Možnosti retenčných úprav v krajine a potenciál technických opatrení je potrebné porovnávať s údajmi o pravdepodobných úhrnoch zrážok a ich intenzite na danom území. V podmienkach menej priepustných území, kde je hlavným mechanizmom tvorby odtoku povrchový odtok spôsobený prekročením infiltračnej kapacity pôdy, treba dbať na to, aby opatrenia vykonané na zvýšenie infiltračnej kapacity nespôsobili narušenie povrchu pôdneho pokryvu. Nevhodné opatrenia môžu spôsobiť zvýšenú eróziu a tvorbu hustejšej siete malých tokov, čo sa prejaví zrýchleným odtokom. Opatrenia v terénoch, ktoré sú blízke stavu nasýtenia (napríklad v blízkosti tokov), je potrebné realizovať tak, aby nepodporovali ich rýchlejšie nasýtenie a nezvyšovali podiel povrchového odtoku. Na rozdiel od technických opatrení, ktorých účinok vieme s určitou presnosťou odhadnúť, účinok netechnických opatrení môže byť v rôznych podmienkach rôzny, dokonca aj negatívny (napr. zvýšené nebezpečenstvo výskytu zosunov pri zamokrení svahov). Opatrenia v malých povodiach preto vyžadujú individuálny prístup prehodnotený odborníkom v danej oblasti.

Záver

Modelovanie vzniku a šírenia kontaminantov v záujmovej lokalite Ľubietová ukázalo rozdiely vo vlastnostiach krajinných zložiek v lokalitách Podlipa a Reiner. Kým

na haldovom poli Podlipa je riziko šírenia kontaminantov relatívne vysoké, haldové pole Reiner vykazuje len obmedzené riziko erózie a šírenia ťažkých kovov do okolitej krajiny, čo je spôsobené vo veľkej miere priaznivou krajinnou štruktúrou, v ktorej sa predmetné haldové pole nachádza.

Distribúcia ťažkých kovov v horninách a rudninách haldového poľa Lubietová-Podlipa je nerovnomerná a zodpovedá pôvodnej koncentrácii kovov v technogénom sedimente, ako aj ich migračným vlastnostiam. Povrchová voda je kontaminovaná Cu (hodnoty koncentrácie lokálne prevyšujú hodnoty určené nariadením vlády SR č. 296/2005 aj o dva rády) a menej aj As. pH povrchovej (a drenážnej) vody je blízko neutrálnych hodnôt (6,1 až 7,7), preto je vznik kyslej banskej (drenážnej) vody málo pravdepodobný. Surová voda je lokálne kontaminovaná As a pitná voda prekračuje limity nariadenia vlády SR č. 354/2006 Z. z. pre Mn a Cd.

Z výsledkov výskumu je možné vyvodiť záver, že na vytvorenie kvalitného modelu šírenia kontaminácie je dôležité predovšetkým správne zhodnotiť charakter odtoku a odnosu materiálu z modelového územia. Rovnako dôležité je aj posúdenie a zhodnotenie vplyvu krajinných prvkov na vodný režim v súčinnosti s realizáciou sanačných opatrení. Takto získané výsledky modelovania šírenia kontaminantov sú potom dobrým podkladom pre návrh skutočne účinnej sanácie územia.

References

- ANDRÁŠ, P., DIRNER, V., LADOMERSKÝ, J. & HORŇÁKOVÁ, A., 2010: Toxicity of arsenic and antimony in the area of Cu-Ag deposit Lubietová. *Miner. Slov.*, 42, 3, 279 – 286.
- ANDRÁŠ, P., LICHÝ, A., KRIZÁNI, I. & RUSKOVÁ, J., 2009: The heavy metal sorption on clay minerals and risk of the AMD formation at the Reiner and Podlipa dump-fields at Lubietová deposit (Slovakia). *Carpath. J. Earth Environ. Sci.*, 4, 2, 133 – 147.
- ASHLEY, P. M., CRAW, D., GRAHAM, B. P. & CHAPPELL, D. A., 2003: Environmental mobility of antimony around mesothermal stibnite deposits. New South Wales, Australia and southern New Zealand. *J. Geochemical Exploration*, 77, 1 – 14.
- BEAR, J. & VERUIJT, A., 1988: Modeling Groundwater Flow and Pollution, D. Reidel Publishing Company, New York, 37 – 57.
- BEDRNA, Z., 2002: Environmentálne pôdoznanectvo. *Veda, Bratislava*, 352 s.
- BERGFEST, A., 1951: Baníctvo v Lubietovej na medenú rudu. *Manuskript. Archív, Ústredný banský archív pre Slovensko, Banská Štiavnica*, 89 s.
- BLIŠŤAN, P., 2012: Interpoláčné metódy pre modelovanie a vizualizáciu priestorových javov v prostredí GIS. *Fyzikálne faktory prostredia*, 2, 99 – 105.
- BLIŠŤAN, P. & RAPANT, P., 2013: Geografické informačné systémy 1. Úvod do problematiky a základné pojmy. 1. vyd. Technická univerzita, Košice, 107 s.
- BROWN, B., 2003: Mint soil fertility research in the pnw. Western nutrient management conference, 5, 54 – 60.
- FERANEC, J. & OŤAHEL, J., 2001: Krajinná pokrývka Slovenska. *Veda, Bratislava*, 121 s.
- FERANEC, J. & OŤAHEL, J., 2008: Land cover changes in Slovakia in the period 1970–2000. *Geogr. Čas.*, 60, 113 – 125.
- FOJT, V. & KREČMER, V., 1975: Tvorba horizontálnych srážek z mlhy a jejich množství ve smrkových porostech středohorské oblasti. *Vodohospod. Čas.*, 23, 6, 581 – 606.
- GERITS, J. J. P. et al., 1990: Overland flow and erosion. In: Anderson, M. G. & Burt, T. P. (eds.): *Process studies in hillslope hydrology*. John Wiley, Chichester, 173 – 214.
- HEYMANN, J. A. W., SARKER, R., HIRAI, T., SHI, D., MILNE, J. L. S., MALONEY, P. C. & SUBRAMANIAM, S., 2001: Projection structure and molecular architecture of OxlT, a bacterial membrane transporter. *EMBO J.*, 20, 4 408 – 4 413.
- ILAVSKÝ, J., VOZÁROVÁ, A. & VOZÁR, J., 1994: Lubietová – štruktúrne-vyhľadávacie vrty LU-1, LU-2 a LU-3. *Geol. Úst. D. Štúra, Bratislava*, 7 s.
- KODÉRA, M. et al., 1990: Topografická mineralógia 2. *Veda, Vyd. Slov. Akad. Vied, Bratislava*, 195 s.
- KULLA, L., 2006: Vzťah aktuálneho odumierania smreka na severozápadnom Slovensku k vybraným ekologickým faktorom. In: Kodrík, M. & Hlaváč, P. (eds.): *Uplatňovanie nových metód v ochrane lesa a ochrane krajiny*. Zvolen, 8 – 9. 9. 2005, 19 – 24.
- LEPEŠKA, T., 2008: Atribúty krajiny vo vzťahu k jej hydrickým funkciám. In: Sviček, M. & Nováková, M. (eds.): *Environmentálne aspekty analýzy a hodnotenia krajiny: Identifikácia a stanovenie indikátorov (a indexov) na báze prieskumov krajiny a údajov DPZ*. In: *Zbor. z vedeckého seminára. Výskumný ústav pôdoznanectva a ochrany pôdy, Bratislava*, 36 – 44.
- MIKLÓS, L., 1993: Integrated Information System of Environment and GIS, 6, 62 – 73.
- MITÁŠ, L. & MITÁŠOVÁ, H., 1999: Spatial Interpolation. In: Longley, P., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. & Rhind, D. W. (eds.): *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Wiley, New York, 481 – 492.
- MITÁŠOVÁ, H. & MITÁŠ, L., 2000: Modelling spatial processes in multiscale framework: exploring duality between particles and fields. First International Conference on Geographic Information Science in Savannah, Georgia, USA, 28 – 31.
- MOORE, I. D. & FOSTER, G. R., 1990: Hydraulics and Overland Flow. In: Anderson, M. G. & Burt, T. P. (eds.): *Process Studies in Hillslope Hydrology*, John Wiley & Sons., p. 215.
- NETELER, M. & MITÁŠOVÁ, H., 2002: Open Source GIS: A GRASS GIS Approach, Kluwer Academic Publishers.
- VAN OOST, K., GOVHRS, G. & DESMET, P., 2000: Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*, 75, 77 – 89.
- VAN ROMPAEY, A. J. J., GOVERS, G. & PUTTEMANS, C., 2002: Modelling land use changes and their impact on soil erosion and sediment supply to rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 481 – 494.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D., 1965: Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. *Agricultural Handbook*, 282, USDA, ARS, 47 p.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D., 1978: Predicting Rainfall Erosion Losses – a Guide to Conservation Planning. *Agriculture Handbook*, Washington (USDA), 537 p.
- ZAHRADNÍKOVÁ, J., 2007: Cu-sulfidická mineralizácia v sedimentárnych horninách a kremeň-sulfidická mineralizácia na sideritových žilách – mineralógia a genéza. *Písomná časť dizertačnej skúšky*, 76 s.
- ZACHAR, D., 1960: Erózia pôdy. *Veda, Vyd. Slov. Akad. Vied, Bratislava*, 248 s.

Rukopis doručený 30. 5. 2013
Revidovaná verzia doručená 28. 3. 2014
Rukopis akceptovaný red. radou 11. 2. 2014

Risk estimation of heavy metal contamination in the surrounding of Podlipa and Reiner dump-fields at abandoned Cu-deposit Ľubietová (Slovakia)

Ľubietová is one of the most important historical Cu-deposits of Slovakia. The ore mineralization is developed in several ore-fields: Podlipa, Reiner (Fig. 2), Svätodušná and Kolba. The ore veins and impregnations are developed in Permian greywackes and arkose schists. An important oxidation and cementation zone with numerous rare secondary minerals was formed on the surface of the terrain (Figs. 6–8).

Our study was focused on the area of Podlipa and Reiner dump-fields.

The geographical information system (GIS) tools were used to get overview about the contamination in this area and to predict the next development of its spreading. The soils and technogenous sediments within studied area were sampled in 10 x 10 m network and analysed for 42 elements in ACME Laboratories in Vancouver (Canada). Also surface water study was realized (analyses were realised in laboratory of the Water Administration Institute in Bratislava).

The first step consisted of construction of a digital model of the area landscape including model of the relief forms (Fig. 13). The distribution of heavy metals is variable (Fig. 5). It depend on the original concentration of metals in rocks and ores at the dump-fields, as well as on the migration, sorption and some other processes (e.g. pH,

Eh, etc.). The surface water is Cu, Fe, As, Sb contaminated (Fig. 9).

The digital model was used for modelling of surface outfall, reference relief flexion (Fig. 12), hydric importance of terrain, inclination of the model territories (Fig. 11), actual erosion of studied terrain (Fig. 16) and contamination spreading. Some of the analytical and syntetic layers used for the calculations of the model country contamination is shown in the Fig. 18.

Very important there is also the model of potential erosion (Fig. 15). Fig. 17 shows the retentive reservoir below the Podlipa dump-field and Fig. 19 the devastation of the lower part of the Zelená dolina valley above the retentive reservoir in 2010 by flurries. The potential contamination of the country is presented at Figs. 18.

Knowledge of the water outfall regularities indicate that the most important influence on outfall has the geological characteristic of the area, the type and quantity of the soil, rainfall, morphometric marker sand the plant cover of the terrain.

GIS modelling showed the differences between the erosion risk, heavy metal containing dump-material drift and consecutive contamination of the country at Podlipa and Reiner dump-fields. The risk of the contamination spreading at Podlipa is in comparison with that at Reiner much more probable.