

VYUŽITIE REŽIMOVÝCH MERANÍ PRI HODNOTENÍ VPLYVOV BANSKEJ ČINNOSTI NA KVALITU VÔD V PODMIENKACH DYNAMICKÉHO HORSKÉHO PROSTREDIA

APPLICATION OF TIME-SERIES MONITORING FOR ASSESSING THE IMPACT OF MINING ACTIVITIES ON WATER QUALITY IN A DYNAMIC MOUNTAIN ENVIRONMENT

Slavomír Mikita

HYGEKO, s.r.o., Švarca 10095/6A, 97613 Slovenská Ľupča, Slovensko, e-mail: mikita@hygeko.sk

Abstrakt: Režimové merania predstavujú významný nástroj na identifikáciu a interpretáciu časovo premenlivých zmien kvality vôd v územiach ovplyvnených banskou činnosťou. Predovšetkým v podmienkach dynamického horského prostredia umožňujú zachytiť krátkodobé kontaminačné impulzy viazané na zrážkovo-odtokové udalosti a zmeny režimu prúdenia podzemnej vody, ktoré pri konvenčnom diskontinuálnom monitoringu často zostávajú nezaznamenané. Príspevok prezentuje možnosti využitia analýzy časových radov hladiny podzemnej vody, prietokov a mernej elektrickej vodivosti pri hodnotení vzťahov medzi hydrologickými udalosťami a odozvou kvality vôd. Prístup je demonštrovaný na lokalite po bývalej banskej činnosti Rákoš, kde priesakové vody z haldového telesa predstavujú hlavný zdroj kontaminácie povrchového toku a potenciálne ovplyvňujú aj podzemné vody jeho inundačného územia. Výsledky režimového monitorovania preukázali výraznú časovú variabilitu sledovaných parametrov závislú od klimatických podmienok a epizodických zrážkových udalostí. Identifikácia týchto procesov umožňuje objektívnejšie hodnotenie vplyvov banskej činnosti na vodnú zložku životného prostredia a poskytuje spoľahlivejší podklad na posúdenie environmentálnych rizík.

Abstract: Time-series monitoring represents an important tool for identifying and interpreting temporal variations in water quality in areas affected by mining activities. Particularly in dynamic mountain environments, it enables the detection of short-term contamination pulses associated with rainfall-runoff events and changes in groundwater flow conditions that often remain undetected by conventional discontinuous monitoring. This paper presents the application of time-series analyses of groundwater levels, stream discharge and specific electrical conductivity to evaluate the relationships between hydrological events and water quality responses. The approach is demonstrated at the former mining site of Rákoš, where seepage from a waste rock dump represents the principal source of contamination to the receiving stream and may also affect groundwater within its floodplain. The results of the monitoring revealed pronounced temporal variability of the monitored parameters controlled by climatic conditions and episodic rainfall events. Identification of these processes provides a more objective basis for assessing the impacts of mining activities on the aquatic environment and supports a more reliable evaluation of environmental risks.

Kľúčové slová: režimové merania, kvalita vôd, banská činnosť, horské prostredie, podzemná voda

Key words: time-series monitoring, water quality, mining activities, mountain environment, groundwater

1. Úvod

Environmentálne záťaž z hydrogeologického hľadiska veľmi heterogénnu skupinu lokalít, ktorých správanie je podmienené kombináciou geologických, hydrogeologických, hydrogeochemických a klimatických faktorov. Zatiaľ čo niektoré hydrogeologické systémy vykazujú dlhodobu stabilný režim podzemných vôd, v prostredí s plytkým obehom podzemnej vody, výraznou morfológiou reliéfu a úzkym hydraulickým prepojením podzemných a povrchových vôd dochádza k rýchlym zmenám hydraulických aj hydrochemických pomerov. Takéto podmienky sú typické najmä pre horské oblasti ovplyvnené historickou banskou činnosťou, kde intenzívne zrážky, povodňové epizódy alebo rýchle topenie snehu významne ovplyvňujú mobilizáciu a transport kontaminantov.

S rastúcim dôrazom na hodnotenie environmentálnych rizík sa pozornosť výskumu presúva od samotného zisťovania koncentrácií znečisťujúcich látok k pochopeniu procesov, ktoré riadia ich mobilizáciu, transport, transformáciu a výslednú expozíciu receptorov. Súčasné poznatky poukazujú na význam krátkodobých hydrologických udalostí (hot moments), počas ktorých môže dochádzať k intenzívnej mobilizácii kontaminantov, pričom tieto procesy bývajú pri klasickom periodickom monitorovaní zachytené len obmedzene (McClain et al., 2003). Rozvoj kontinuálneho monitorovania podzemných vôd zároveň ukazuje, že vysokofrekvenčné merania umožňujú identifikovať krátkodobé zmeny hydrochemických parametrov a časové väzby medzi hydraulickou odozvou kolektora a kvalitou podzemnej vody, ktoré pri diskontinuálnom vzorkovaní často zostávajú neidentifikované (Saraceno et al., 2018; Mathany et al., 2019). Tieto poznatky podporujú rozvoj monitorovacích

prístupov orientovaných na pochopenie procesov využívajúcich režimové merania na lepšie pochopenie dynamiky hydrogeologických systémov.

Hoci sa jednotlivé lokality environmentálnych záťaží líšia geologickou stavbou, charakterom kontaminácie aj hydrogeologickými pomermi, lokality s obdobnými hydrogeologickými charakteristikami vykazujú spoločné procesy riadiace transport kontaminantov. Ich spoľahlivé hodnotenie si preto vyžaduje monitorovací prístup zohľadňujúci časovú dynamiku hydrogeologického systému, ktorý umožňuje pochopiť väzby medzi hydrologickými udalosťami, transportom kontaminantov a odozvou kvality vôd.

Cieľom príspevku je na prípadovej štúdii lokality Rákoš prezentovať možnosti využitia režimového monitorovania hladiny podzemnej vody, mernej elektrickej vodivosti a prietokov pri identifikácii procesov ovplyvňujúcich transport kontaminantov v hydrogeologickom systéme narušenom historickou banskou činnosťou. Príspevok zároveň poukazuje na význam procesne orientovanej interpretácie monitorovacích údajov pri spresňovaní koncepčného modelu lokality a objektívnejšom hodnotení environmentálnych rizík.

2. Metodika

Príspevok vychádza z výsledkov režimového monitorovania lokality environmentálnej záťaže **RA (2104) – Rákoš, štôlna a haldy**. Lokalita predstavuje typický príklad dynamického hydrogeologického systému s plytkým obehom podzemnej vody, výrazným hydraulickým prepojením podzemných a povrchových vôd a historickou banskou činnosťou, pri ktorej priesakové vody z haldového telesa predstavujú významný zdroj kontaminácie recipientu.

Metodika hodnotenia vychádzala z predpokladu, že zmeny kvality vôd sú výsledkom dynamických procesov prebiehajúcich v hydrogeologickom systéme, ktorých identifikácia si vyžaduje spoločnú interpretáciu hydrologických, hydrogeologických a hydrochemických údajov. Na tento účel boli využité časové rady režimových meraní hladiny podzemnej vody a mernej elektrickej vodivosti, doplnené o údaje o zrážkových úhrnoch, prietokoch povrchového toku a výsledky pravidelného monitorovania chemického zloženia podzemných, povrchových a priesakových vôd.

Interpretácia bola založená na vzájomnom porovnaní časových radov jednotlivých monitorovaných parametrov s cieľom identifikovať väzby medzi hydrologickými udalosťami, hydraulickou odozvou systému a zmenami kvality vôd. Osobitná pozornosť bola venovaná mechanizmom mobilizácie a transportu kontaminantov, časovej odozve jednotlivých zložiek hydrogeologického systému a spresneniu koncepčného modelu lokality ako podkladu na hodnotenie environmentálnych rizík.

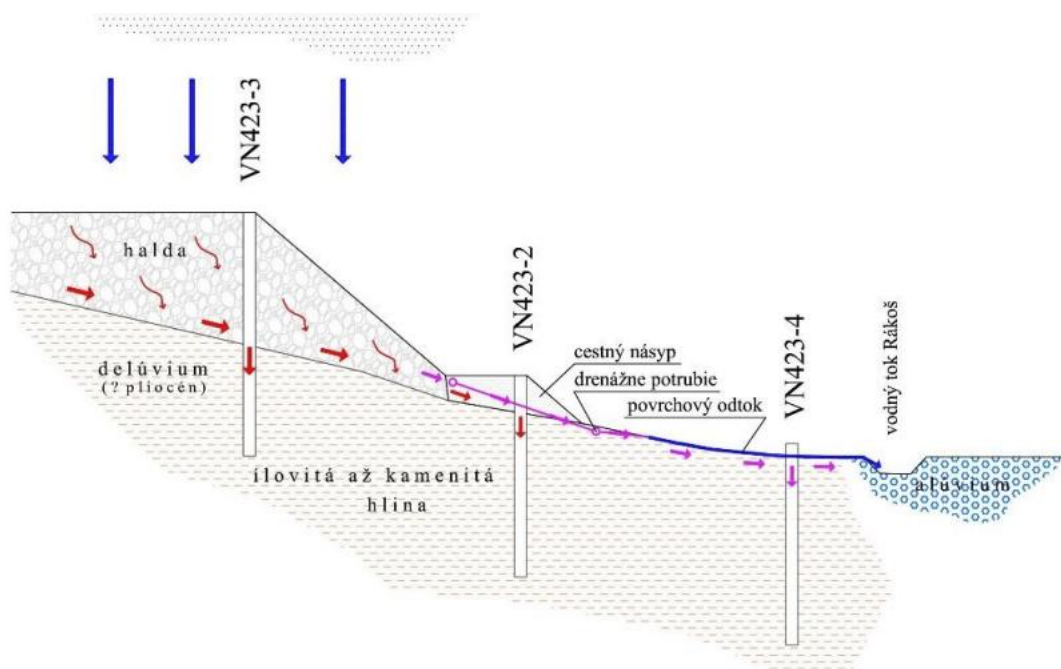
3. Výsledky

Kontinuálne monitorovanie umožnilo podrobne charakterizovať hydraulický režim lokality a časový vývoj hydrochemických pomerov vo vrte VN423-3. V porovnaní s periodickým vzorkovaním poskytli kontinuálne merania informácie o priebehu zmien hladiny podzemnej vody a mernej elektrickej vodivosti počas hydrologických udalostí.

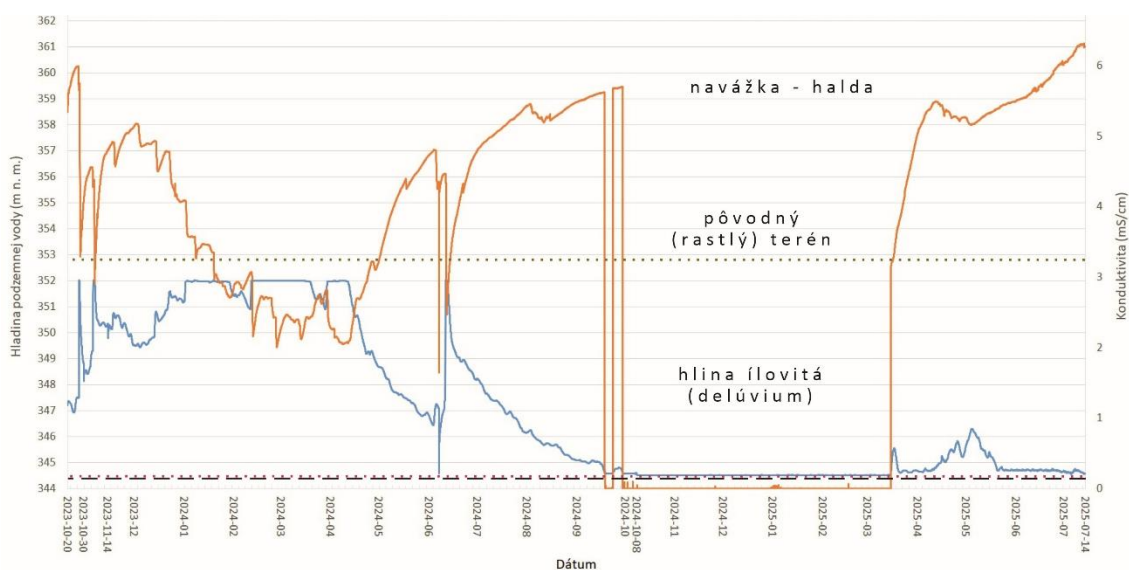
Na základe syntézy geologických podkladov, výsledkov režimového monitorovania a priestorového usporiadania monitorovacích objektov bol spresnený koncepčný hydrogeologický model lokality (Obr. 1), ktorý znázorňuje hlavné cesty infiltrácie zrážkových vôd, tvorby priesakových vôd a ich transportu z haldového telesa do deluviálnych sedimentov a recipientu.

Vo vrte VN423-3 boli počas monitorovania zaznamenané výrazné zmeny hladiny podzemnej vody s rýchlymi vzostupmi po intenzívnejších zrážkových udalostiach a následnou postupnou recesiou (Obr. 2). Súčasne boli pozorované zmeny mernej elektrickej vodivosti, ktorých priebeh vykazoval odlišnú dynamiku ako zmeny hladiny podzemnej vody. Počas väčšiny monitorovaného obdobia sa hladina podzemnej vody nachádzala pod geologickým rozhraním medzi haldovým telesom a deluviálnymi sedimentmi, pričom hodnoty mernej elektrickej vodivosti zostávali zvýšené.

Najvýraznejšie zmeny boli zaznamenané počas významných hydrologických udalostí, keď po prudkom vzostupe hladiny podzemnej vody nasledovala zmena mernej elektrickej vodivosti a počas následnej recesie dochádzalo k jej postupnému návratu na hodnoty charakteristické pre obdobia nízkych hladín podzemnej vody. Kontinuálne merania tak umožnili zachytiť časové väzby medzi hydraulickou a hydrochemickou odozvou hydrogeologického systému, ktoré pri periodickom vzorkovaní nie je možné identifikovať.



Obr. 1. Konceptný model prúdenia podzemnej vody a transportu priesakových vôd na lokalite Rákoš.
Fig. 1. Conceptual model of groundwater flow and seepage water transport at the Rákoš site.



Obr. 2 Časový priebeh hladiny podzemnej vody a mernej elektrickej vodivosti vo vrte VN423-3.
Fig. 2 Time series of groundwater level and electrical conductivity in monitoring well VN423-3.

4. Diskusia

Výsledky monitorovania potvrdili, že hydraulická a hydrochemická odozva sledovaného hydrogeologického systému neprebiehajú súčasne ani rovnakým spôsobom. Zatiaľ čo hladina podzemnej vody reagovala na významné zrážkové udalosti rýchlymi vzostupmi a následnou recesiou, vývoj mernej elektrickej vodivosti vykazoval odlišný časový priebeh. Táto skutočnosť poukazuje na to, že hydrochemické pomery nie sú riadené iba zmenou hladiny podzemnej vody, ale odrážajú aj zmeny hydraulických podmienok a mechanizmov transportu v hydrogeologickom systéme.

Zvýšené hodnoty mernej elektrickej vodivosti boli zaznamenané aj počas období, keď sa hladina podzemnej vody nachádzala pod geologickým rozhraním medzi haldovým telesom a deluviálnymi sedimentmi. Tento poznatok podporuje predpoklad hydraulického prepojenia monitorovaného vrtu s priesakovými vodami pochádzajúcimi z haldového telesa. Súčasne naznačuje, že transport kontaminovaných vôd nie je podmienený iba plošným

zvodnením haldy, ale môže prebiehať aj prostredníctvom lokálnych preferenčných prúdových ciest alebo kontaktných zón s vyššou hydraulickou vodivosťou.

Význam kontinuálneho monitorovania spočíva predovšetkým v možnosti sledovať časový vývoj jednotlivých procesov. Kým periodické vzorkovanie poskytuje informáciu o stave systému v konkrétnom okamihu, kontinuálne merania umožňujú identifikovať hydraulické udalosti, ich trvanie, intenzitu a následnú hydrochemickú odozvu. Takto získané informácie predstavujú dôležitý podklad pre spresňovanie koncepčných hydrogeologických modelov a správnu interpretáciu mechanizmov transportu kontaminantov.

Uvedený prístup je významný najmä na lokalitách s dynamickým režimom podzemných vôd, kde krátkodobé hydrologické udalosti môžu podstatne ovplyvňovať mobilizáciu kontaminantov a ich transport do povrchových vôd. V takýchto podmienkach nemusí periodické monitorovanie zachytiť rozhodujúce fázy vývoja systému, čo môže viesť k neúplnej interpretácii výsledkov alebo podhodnoteniu environmentálnych rizík. Kontinuálne monitorovanie preto predstavuje vhodný nástroj na identifikáciu procesov, ktoré riadia správanie hydrogeologického systému počas extrémnych hydrologických situácií.

5. Záver

Kontinuálne monitorovanie na lokalite Rákoš umožnilo zachytiť časové väzby medzi hydraulickou odozvou hydrogeologického systému a zmenami hydrochemických pomerov, ktoré pri periodickom monitorovaní nie je možné spoľahlivo identifikovať. Získané výsledky prispeli k spresneniu koncepčného hydrogeologického modelu lokality a lepšiemu pochopeniu mechanizmov transportu kontaminantov.

Skúsenosti z monitorovania potvrdzujú, že pri dynamických hydrogeologických systémoch predstavuje kontinuálne monitorovanie účinný nástroj na interpretáciu procesov ovplyvňujúcich kvalitu vôd a môže významne prispieť k objektívnejšiemu hodnoteniu environmentálnych rizík a návrhu monitorovacích opatrení.

PodĎakovanie: Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu APVV-21-0212 Vybrané environmentálne záťažové ako stresový faktor ovplyvňujúci biodiverzitu a zdravotné riziká pre exponované skupiny obyvateľstva, podporeného Agentúrou na podporu výskumu a vývoja. Výsledky prezentované v príspevku vychádzajú z kontinuálneho monitorovania realizovaného na lokalite Rákoš v spolupráci so Štátnym geologickým ústavom Dionýza Štúra.

Zoznam literatúry

- Mathany T. M., Saraceno J. F., Kulongoski J. T., 2019: *Guidelines and standard procedures for high-frequency groundwater-quality monitoring stations—Design, operation, and record computation*. – U.S. Geological Survey, Techniques and Methods 1–D7, Reston.
- McClain M. E., Boyer E. W., Dent C. L., Gergel S. E., Grimm N. B., Groffman P. M., Hart S. C., Harvey J. W., Johnston C. A., Mayorga E., McDowell W. H., Pinay G., 2003: *Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems*. – *Ecosystems* 6, str. 301–312.
- Saraceno J. F., Kulongoski J. T., Mathany T. M., 2018: *A novel high-frequency groundwater quality monitoring system*. – *Environmental Monitoring and Assessment* 190, 477.