

Niektoré problémy tvorby systémov včasného varovania na zosuvoch

Peter Wagner¹, Peter Ondrejka², Barbora Ondrášiková² & Pavel Liščák²

¹Bakošova 36, 841 03 Bratislava

²Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava; peter.ondrejka@geology.sk

AGEOS Some issues of landslide early warning systems creation

Abstract: Prevention against landslides formation or activation is ensured by permanent monitoring of endangered areas, which is transferred to the landslide early warning systems in the socio-economically important sites. The paper describes general issues of the landslide warning systems creation, with an emphasis on their local level and the issues of the critical levels of landslide generating factors derivation. Since the state of the groundwater table level is usually the most important factor of the landslide activation, several methods of its critical level determination are used. The authors preferentially deal with the description of the model of parameters of groundwater regime, which was derived on the basis of their long-term experience in monitoring of landslides and other slope deformations. The model is based on the derivation of parameters characterizing the depth of the groundwater table level and duration of unfavorable conditions. The resulting parameters of the groundwater regime are compared with the indicators of kinetic activity of landslide masses (obtained by geodetic and inclinometer measurements). Provided there is a sufficiently close correlation between the groundwater regime and sliding activity of a landslide, the model can be applied in the definition of the critical levels of the groundwater table and to the prognosis of the expected motional activity of landslide. Practical application of this method is presented on example of slope stability development evaluation of the monitored landslide near the Okoličné Village.

Key words: landslides, Early Warning Systems, Landslide Warning Systems, groundwater regime, sliding activity, slope stability prognosis

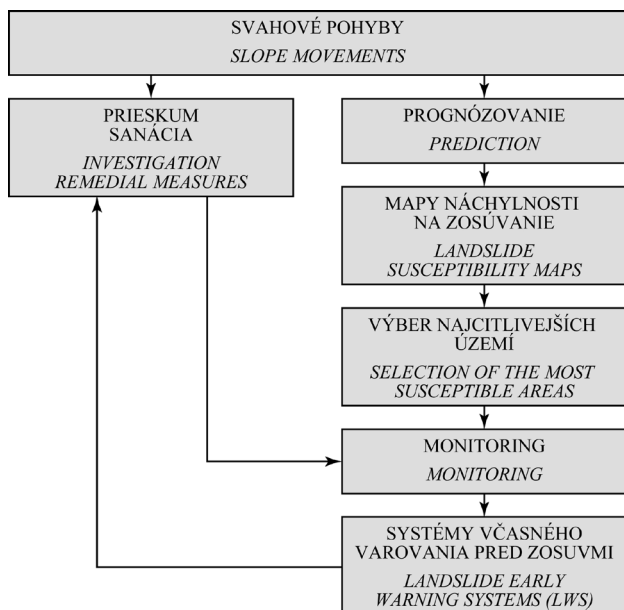
1. ÚVOD

Štúdium svahových pohybov patrí k jednému z kľúčových problémov, riešených v rámci inžinierskej geológie ako samostatného vedného odboru. Uvedená problematika prešla postupne viacerými vývojovými etapami – od riešenia otázok podstaty javu, odvodenia optimálnych spôsobov jeho opisu, vyjasnenia terminológie, vytvorenia klasifikačných systémov, cez registráciu, mapovanie a odvodenie optimálnych metód a metodiky prieskumu zosuvných území i konkrétnych zosuvov, odvodenie a aplikáciu rôznych typov stabilizačných riešení až po vývoj stabilizačných opatrení, vhodných pre rôzne typy svahových pohybov a rôzne geologické prostredia.

V každom vývojovom období sa štúdium svahových pohybov prednostne sústreďovalo na niektorý z čiastkových problémov, ktorý sa v danom časovom úseku javil ako najdôležitejší. Ak, napríklad, listujeme v zborníku prác Inžinierska geológia – výskum a prax (1991), obsahujúcom výsledky riešenia úlohy štátneho plánu základného výskumu (koordinátorom ktorého bol prof. Ing. M. Matula, DrSc.), hlavná pozornosť sa v danom období (koncom osemdesiatych rokov minulého storočia) v rámci regionálneho výskumu svahových deformácií sústreďovala na spôsoby zostavovania rôznych druhov máp stability svahov, vrátane prvých pokusov o zostavenie prognostických máp (Malgot & Baliak, 1991), resp. na analýzu vplyvu antropogénnych faktorov na stabilitu svahov (Malgot, 1991).

S pribúdajúcimi poznatkami a skúsenosťami, ale aj vzhľadom na spresňovanie celospoločenských požiadaviek na výskum svahových deformácií, sa v nasledujúcich rokoch vyprofilovali dva ťažiskové okruhy problémov (Obr. 1). Prvý z nich priamo súvisí s odvodením súboru činností, ktoré je nevyhnutné realizovať hneď po vzniku havarijnej udalosti. Ide o problematiku skvalitňovania metód prieskumu potenciálnej alebo aktivovanej svahovej deformácie, umožňujúcich navrhnúť optimálny spôsob jej sanácie. Práve v technických riešeniach sanačných opatrení, v technologických inováciách a kvalite sanačných prvkov sa dosiahol v ostatnom období významný pokrok smerujúci k zvýšeniu efektívnosti a k dlhodobej spoľahlivosti navrhovaných opatrení.

Moderná spoločnosť sa však nemôže uspokojiť iba so skvalitňovaním opatrení na riešenie vzniknutých havarijných situácií, ale dôraz kladie na prevenciu ich možného vzniku a nepriaznivých dôsledkov. Preto do náplne druhého okruhu problémov patria rôzne spôsoby prognózovania vzniku a aktivizácie svahových pohybov na rôznych mierkových úrovniach. V rámci regionálnej úrovne sa zostavujú rôzne typy máp náchylnosti územia na vznik svahových pohybov (zvyčajne s využitím GIS – Paudítš & Bednarik, 2002 a ďalší), pri spracovaní ktorých sa vychádza predovšetkým z geologickej stavby územia, hydrogeologických pomerov, reliéfu a z výsledkov doterajšej registrácie svahových pohybov v záujmovom území. V ojedinelých prípadoch sa prognózne hodnotenie stability svahov na podrobnejšej úrovni (napr. pre obce, miesta projektovanej výstavby a pod.)



Obr. 1. Aktuálne problémy štúdia svahových pohybov.

Fig. 1. Actual issues in the study of slope movements.

vykonáva rôznymi deterministickými metódami, založenými na geotechnických stabilných výpočtoch, realizovaných pri rôznych okrajových podmienkach (Vlčko, 2002; Jelínek, 2005; Jelínek & Wagner, 2007 a ďalšie).

Regionálne štúdie (mapy náchylnosti územia na zosúvanie), ako aj hodnotenia na podrobnejších úrovniach zvyčajne identifikujú zo stabilného hľadiska najcitlivejšie časti posudzovaného územia – t. j. miesta výskytu svahových pohybov rôzneho stupňa aktivity alebo územia, ktoré sú na vznik svahovej poruchy (už pri nepatrnej zmene vplyvujúcich faktorov) najviac náchylné. Z hľadiska ďalšieho rozvoja príslušného územného celku a dlhodobej bezpečnosti jeho obyvateľov je nevyhnutné sústrediť pozornosť práve na tieto kritické oblasti a trvalo pozorovať a hodnotiť vývoj pohybovej aktivity svahových deformácií a faktorov, ktoré ich stabilný stav najviac ovplyvňujú. Uvedené pozorovania zabezpečujú pravidelné monitorovanie vybraných území. Významným krokom na získanie celoplošnej kontroly nad nestabilnými územiaми na Slovensku, ktoré majú z hospodárskeho i bezpečnostného hľadiska najväčší význam, je riešenie úlohy Čiastkový monitorovací systém – Geologické faktory, podsystem Zosuvy a iné svahové deformácie, zadanej Ministerstvom životného prostredia SR a riešenej ŠGÚDŠ v Bratislave (Klukanová, 2002). V rámci tejto úlohy sa dlhodobo pozoruje viacero reprezentatívnych lokalít svahových deformácií a získavajú sa údaje o ich pohybovej aktivite i o stave najvýznamnejších zosuvotvorných faktorov (Ondrejka & Wagner, 2012). Výsledky dlhodobého monitorovania umožňujú získať predstavu o zákonitostiach vývoja svahových pohybov v daných prírodných podmienkach. Súbor pozorovaných lokalít sa v závislosti od celospoločenských požiadaviek aktualizuje (napríklad, doplnenie súboru po vzniku veľkého množstva nových svahových deformácií v priebehu extrémne vlhkého roku 2010 – Liščák et al., 2010; Petro et al., 2012).

Vybudovaním dostatočne reprezentatívnej siete monitorovaných lokalít svahových deformácií a ich pravidelným pozorovaním vzniká nevyhnutná báza údajov na vytvorenie systémov včasného varovania v jednotlivých pozorovaných lokalitách. Tvorbu systémov včasného varovania možno považovať za vyššie štádium monitoringu – ide vlastne o vyústenie dlhodobých monitorovacích činností do praktického výstupu, nasmerovaného na včasné informovanie o hroziacich zmenách stabilného stavu predmetného územia. V prípade vyslania varovného signálu by sa na príslušnej lokalite mali aplikovať najvhodnejšie metódy prieskumu a navrhnúť optimálny spôsob jej sanácie, čím sa uzatvorí kruh aktuálneho riešenia porušenia stability pozorovaného svahu (Obr. 1).

Bohatá databáza informácií z riešenia úlohy Čiastkový monitorovací systém – Geologické faktory, podsystem Zosuvy a iné svahové deformácie, predstavovala vhodný a dostatočne nasýtený súbor údajov na tvorbu systémov včasného varovania na celospoločensky najdôležitejších lokalitách. Už počas prvých pokusov sa však ukázalo, že tvorba systémov včasného varovania predstavuje veľmi komplikovanú úlohu multidisciplinárneho charakteru, pričom aj vlastná geologická problematika pozostáva z riešenia viacerých samostatných úloh.

2. SYSTÉMY VČASNÉHO VAROVANIA PRED SVAHOVÝMI POHYBAMI

2.1. Hierarchické úrovne systémov včasného varovania

Tvorba systémov včasného varovania pred nepriaznivým vplyvom svahových pohybov patrí k veľmi aktuálnym problémom, ktoré sú v centre pozornosti odborníkov, ale i širokej verejnosti na celom svete, zvlášť v súvislosti s výskytom havarijných situácií, spôsobených vznikom alebo aktivizáciou svahových pohybov. Systémy včasného varovania sa v literatúre vo všeobecnosti označujú skratkou EWS (Early Warning Systems) a pre systémy včasného varovania pred nepriaznivými vplyvmi svahových pohybov sa zaužívala skratka LWS (Landslide Warning Systems), ktorú budeme používať i v predkladanom príspevku.

Na základe poznatkov a skúseností z celého sveta možno systémy včasného varovania pred svahovými pohybmi (LWS) rozdeliť podľa dosahu ich pôsobnosti na:

- globálne** – ktoré vychádzajú z metód diaľkového prieskumu Zeme a poskytujú informácie o pravdepodobnosti vzniku, či aktivizácie svahových pohybov v rámci rozsiahlych územných celkov (až kontinentov). Informácie sú mediálne šírené (napríklad ako súčasť predpovedí počasia) a môžu včas informovať, v ktorých územiach možno očakávať nepriaznivé dôsledky extrémnych zrážkových alebo seizmických udalostí na vznik alebo aktivizáciu svahových pohybov (Hong & Adler, 2007);
- regionálne** – ktoré sa budujú v územiach, citlivých na vznik a aktivizáciu svahových pohybov, v ktorých došlo v minulosti ku katastrofálnym svahovým pohybom rôzneho rozsahu. Na rozdiel od globálnych systémov sa pri tvorbe regionálnych LWS zohľadňuje okrem zrážkových a seizmických udalostí zvyčajne viacero faktorov s vyjadrením ich dôležitosti na vznik alebo aktivizáciu svahových pohybov. Fungujúce regionálne

systemy včasného varovania boli opísané z časti územia Britskej Kolumbie (Jakob et al., 2006), z Hong Kongu (Chan & Pun, 2004), Kolumbie (Huggel et al., 2008) a ďalších území;

c) **lokálne** – ktoré sú zvyčajne zamerané na ochranu určitého objektu alebo sústavy objektov pred konkrétnym svahovým pohybom (alebo svahovými pohybmi v rámci širšieho nestabilného územia). Tvorba lokálneho LWS predstavuje samostatnú, z geologického i technického hľadiska zložitú praktickú úlohu s vysokým stupňom náročnosti riešenia problému i zodpovednosti za operatívnu a dostatočne spoľahlivú funkčnosť systému. Jednotlivé úrovne LWS možno vytvárať vo vzájomnej nadväznosti; častejší je však prípad priamej tvorby systému na požadovanej úrovni (Obr. 2). Vzhľadom na prístupnosť výsledkov monitorovania reprezentatívnych svahových pohybov na Slovensku a narastajúce celospoločenské požiadavky ochrany prostredia pred nepriaznivými vplyvmi svahových pohybov, je príspevok venovaný iba LWS na lokálnej úrovni.

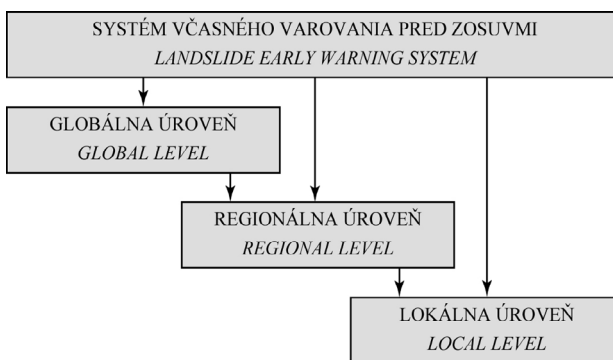
2.2. Všeobecné problémy tvorby lokálnych systémov včasného varovania

Ako už bolo uvedené, tvorba lokálnych LWS predstavuje komplikovaný problém multidisciplinárneho charakteru, v riešení ktorého významnú úlohu zohrávajú otázky, patriace do pôsobnosti geologických vied. Napriek špecifičnosti tvorby LWS na každej konkrétnej lokalite, možno definovať i niekoľko všeobecne platných problémov, charakteristických pre tvorbu tejto úrovne LWS. Ide o nasledujúce okruhy otázok (Obr. 3):

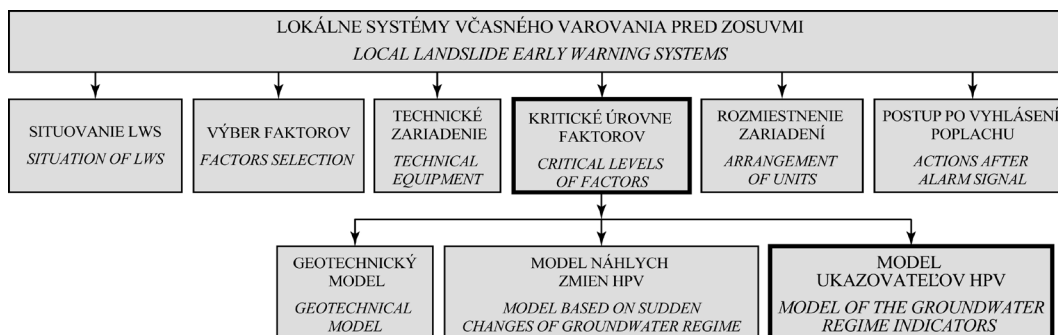
- a) **Situovanie LWS.** Výber najpotrebnejšieho miesta umiestnenia LWS je prednostne problémom celospoločenským. Oblasť situovania LWS sa totiž vyberá tak, aby pokrývala najviac ohrozené časti územia, v ktorých môžu mať svahové pohyby najnepriaznivejšie spoločensko-hospodárske dôsledky. Dôležitou informáciou v procese výberu miesta situovania LWS sú aj poznatky o geologickej stavbe predmetného územia a o existencii a výsledkoch jeho prieskumu; vo vzácnejších prípadoch i o výsledkoch dlhodobého monitorovania. Ak ide o nové, dosiaľ nepreskúmané územie, je nevyhnutné čo najskôr v ňom vybudovať sieť monitorovacích objektov a začať s pravidelným pozorovaním najdôležitejších faktorov, spôsobujúcich aktivizáciu svahových pohybov;
- b) **Výber rozhodujúcich faktorov.** Ide o definovanie tých faktorov, ktoré sú na danej lokalite rozhodujúce pre vznik svahových pohybov, a ktoré treba pozorovať. V prípade výberu rozhodujúcich faktorov ide o výsostne geologickú problematiku – tvorcovia LWS sa musia kvalifikovane rozhodnúť, ktoré faktory sú zo súboru pôsobiacich činiteľov najdôležitejšie a ich pozorovanie zabezpečí dostatočnú citlivosť a spoľahlivosť LWS. V našich podmienkach sa v prípade svahových pohybov charakteru zosúvania najväčšia pozornosť obvykle sústreďuje na stav hladiny podzemnej vody vo svahu;
- c) **Výber technického zariadenia na zber a diaľkový prenos údajov.** Táto problematika patrí do okruhu technických riešení úlohy a možno sa ňou zaoberať až po vyriešení predchádzajúcich dvoch otázok – teda, kde sa má LWS inštalovať a aký faktor alebo jav sa má dlhodobo merať. Treba poznamenať, že kvalita snímačej i prenosovej techniky sa zdokonaľuje a úlohou

riešiteľa geologickej problematiky je spolupracovať pri výbere najvhodnejšieho, na trhu prístupného zariadenia s ohľadom na geologické špecifiká daného prostredia a pozorovaného typu svahového pohybu;

- d) **Rozmiestnenie zariadení LWS v rámci pozorovanej lokality.** I keď ide o otázku veľmi špecifickú pre každú lokalitu a riešenú zvyčajne súbežne s problematikou výberu rozhodujúcich faktorov a odvodenia ich kritických úrovní, treba jej venovať od počiatku tvorby LWS dostatočnú pozornosť. Z monitorovacích, a neskôr i zo zariadení LWS sa totiž získavajú zvyčajne iba bodové informácie, ktorých výstižnosť a možnosti extrapolácie na celú plochu monitorovanej svahovej deformácie možno posúdiť iba na základe poznania geologickej stavby územia a vývojového štádia svahovej deformácie;
 - e) **Odvodenie kritických úrovní rozhodujúceho faktora (faktorov).** Riešenie tejto problematiky umožňuje z inštalovaného systému zberu údajov o hlavnom zosuvotvornom faktore (faktoroch) vytvoriť systém včasného varovania, ktorý vyšle varovné signály práve po prekročení zadefinovanej kritickej úrovne pozorovaného faktora. Tak, ako výber rozhodujúcich faktorov, spadá aj odvodenie ich kritických (limitných) úrovní do okruhu geologickej problematiky. Práve uvedené otázky sú ťažiskovým obsahom predkladaného príspevku;
 - f) **Postup činností po vyhlásení poplachu a dlhodobá príprava obyvateľstva.** Informácia o prekročení kritického stavu rozhodujúceho faktora by mala vyvolať súbor činností, smerujúcich k ochrane potenciálne ohrozeného územia, vrátane obyvateľstva, jeho majetku a celospoločensky prospešných objektov. Riešenie uvedeného, veľmi širokého okruhu problémov patrí do kompetencie iných odborov, predovšetkým civilnej ochrany, avšak spolutorca LWS geologického zamerania spolupracuje i v tejto etape procesu tvorby a overovania funkčnosti LWS predovšetkým v súvislosti s verifikáciou pravosti signalizovaného varovného stavu (čo predstavuje veľmi zodpovednú úlohu). Poznatkami o zákonitostiach geologickej stavby územia a z nej vyplývajúcich prejavov nestability prispieva odborník geologického zamerania aj k dlhodobej príprave obyvateľstva a jeho edukácii z hľadiska poznania zásad správneho „spolunažívania“ s potenciálnym svahovým pohybom (Ondrejka, 2012).
- V procese tvorby LWS má z okruhu geologickej problematiky azda najvšeobecnejšiu platnosť spôsob odvodenia kritických



Obr. 2. Úrovně systémov včasného varovania na zosuvoch.
Fig. 2. Levels of the Landslide Early Warning Systems



Obr. 3. Problémy tvorby lokálnych LWS so zameraním na problematiku odvodenia kritických úrovní hladiny podzemnej vody (HPV).

Fig. 3. Issues of the local LWS creation with accent to problem of critical levels of groundwater level derivation.

úrovní vybraného rozhodujúceho faktora. Práve riešenie tejto otázky patrí k najzodpovednejším úlohám a je súčasne najvlastnejším inžinierskogeologickým problémom v procese tvorby LWS.

2.3. Spôsoby odvodenia kritických úrovní rozhodujúcich faktorov

Vzhľadom na dôležitosť vplyvu, dostupnosť meraní a zaužívané postupy i tradície riešenia sú hlavným faktorom, ktorý sa vo väčšine prípadov monitoruje, zmeny úrovně hladiny podzemnej vody v posudzovanom svahu. Podzemná voda svojím vztlakovým pôsobením, ako aj znižovaním hodnôt parametrov šmykovej pevnosti hornín, je v prevažnej väčšine prípadov určujúcim faktorom, podmieňujúcim stabilný stav svahu. Z hľadiska výpočtového určenia stability svahu je najdôležitejšou hodnotou maximálna úroveň hladiny podzemnej vody (teda, minimálna hĺbka hladiny od povrchu terénu) v rámci určitého časového úseku pozorovania.

Z ďalších faktorov sa v niektorých prípadoch zaznamenávajú poznatky o fyzikálnych a mechanických vlastnostiach hornín, prípadne o ich zmenách. Nevyhnutnou súčasťou vstupných údajov pri tvorbe LWS sú informácie o klimatických faktoroch (predovšetkým o zrážkach – Kopecký, 2006) v záujmovom území.

V závislosti od charakteru a objemu vstupných údajov bolo odvodených viacero metodických postupov na určenie kritických hodnôt pozorovaných parametrov. V prípade, ak sa za základnú považuje informácia o kolísaní hladiny podzemnej vody, možno vyčleniť a charakterizovať nasledujúce základné postupy riešenia, resp. riešiace modelové schémy (Ondrejka, 2012) – Obr. 3:

a) **Geotechnický model.** Ide o postup, ktorý má dlhodobú tradíciu a je v geotechnickej a inžinierskogeologickej praxi najpoužívanejší. Postup vychádza z výpočtového posúdenia stability svahu v reprezentatívnom profile a z výsledkov dlhodobého monitorovania kolísania hladiny podzemnej vody vo vrtoch, umiestnených v tomto profile. Z výpočtového riešenia stability možno odvodiť kritickú hodnotu hĺbky hladiny podzemnej vody, pri ktorej je stupeň stability rovný alebo menší ako 1. Výsledky výpočtového riešenia je však potrebné konfrontovať s ďalšími pozorovaniami a meraniami na svahu, predovšetkým s meraniami deformácií. Odvodenie

kritických úrovní hladiny podzemnej vody v jednotlivých vrtoch je súčasťou väčšiny realizovaných podrobných prieskumov zosuvných území (napr. Jadroň et al., 1996; Ondrejka et al., 2005) a vstupnou informáciou pre dlhodobé monitorovanie kolísania hladiny podzemnej vody vo svahu.

Odvodenie kritických úrovní hladiny podzemnej vody pomocou geotechnického modelu má i viacero slabších stránok. Problematickou je reprezentatívnosť vybraného profilu a výstižnosť samotného stabilného výpočtu (týka sa to hlavne vierohodnosti fyzikálnych a mechanických vlastností hornín zosuvného svahu, predovšetkým na úrovni šmykovej plochy). Vzhľadom na to, že riešenie je sústredené na vybraný profil (alebo profily), otázna je i aproximácia výsledkov na celé teleso zosuvu.

b) **Model založený na náhlych zmenách hladiny podzemnej vody.** Ide o najpresnejší, avšak z hľadiska požiadaviek na vstupné údaje najnáročnejší postup. Model vychádza zo zhodnotenia kontinuálnych informácií o zmenách hladiny podzemnej vody a deformáciách na povrchu územia alebo na úrovni šmykovej plochy. Zaznamenané zmeny hĺbky hladiny podzemnej vody sa konfrontujú s kontinuálne nameranou deformáciou zosuvných hmôt. Odvodený vzťah medzi stavom hladiny podzemnej vody (jej hĺbkou a rýchlosťou stúpnutia) a pohybovou aktivitou zosuvných hmôt umožňuje predpovedať očakávanú deformáciu na základe známej hĺbky a rýchlosti stúpnutia hladiny podzemnej vody, a odvodnene definovať kritický stav podzemnej vody (Ondrejka et al., 2011).

Hlavnou komplikáciou pri aplikovaní uvedeného modelu sú vysoké nároky na kvalitu a objem vstupných údajov, vyžadujúce inštaláciu náročných technických zariadení (automatických hladinomerov, stacionárnych inklinometrov a pod.) a podrobné spracovanie záznamov z ich dlhodober prevádzky. Z týchto dôvodov sa uvedený model aplikuje iba na celospoločensky najzávažnejších lokalitách, vybavených zodpovedajúcou sieťou kvalitných monitorovacích objektov.

c) **Model ukazovateľov režimu podzemných vôd.** I v tomto modeli sa vychádza z hodnotenia režimu podzemnej vody vo vzťahu k pohybovej aktivite. Analyzujú sa však údaje, ktoré sú dostupné na základe bežného monitorovania lokality, t. j. zvyčajne na základe meraní vykonávaných pozorovateľmi, zriedkavejšie zo záznamov automatických hladinomerov. Pri

analýze sa pozornosť sústreďuje na maximálne úrovne hladiny podzemnej vody a dobu ich trvania. Odvođené skutočnosti sa overujú na základe spracovania záznamov o pohybovej aktivite zosuvu (spravidla z výsledkov geodetických a inklinometrických meraní, ktoré sú však zvyčajne realizované s nedostatočnou frekvenciou).

Napriek viacerým nedostatkom tohto postupu (predovšetkým nepresnostiam podmieneným nedostatočnou frekvenciou meraní posunov a deformácií zosuvných hmôt, ale často aj zmien hladiny podzemnej vody), je hlavnou prednosťou navrhovaného modelu účelové zužitkovanie súboru režimových meraní, ktoré sa v súčasnosti realizujú na viacerých lokalitách. V praxi sa totiž merania zmien hladiny podzemnej vody zvyčajne vyhodnocujú iba kvalitatívne alebo sa aplikujú v rámci geotechnického modelu vo vybranom profile. Pritom pri dlhodobom monitoringu sa zhromažďí rozsiahla databáza primárnych údajov, ktoré možno v rámci modelu ukazovateľov režimu podzemných vôd cielavedome spracovať, odvodiť prognózu podmienok pohybovej aktivity v celom priestore hodnoteného územia a určiť kritické úrovne pre LWS.

Vzhľadom na prístupnosť a početnosť meraní tohto charakteru je hlavnou náplňou predkladaného príspevku práve opis a praktické overenie tohto spôsobu odvodenia kritických parametrov režimu podzemnej vody a s tým súvisiacich hodnôt deformácie zosuvných hmôt.

3. MODEL UKAZOVATEĽOV REŽIMU PODZEMNÝCH VÔD

3.1. Podstata riešenia

V uvedenom modeli sa v rámci analýzy zmien hĺbky hladiny podzemnej vody pozornosť sústreďuje na konkrétne termíny výskytu jej najvyšších stavov a dobu ich trvania. Zohľadnenie parametra času (teda doby trvania nepriaznivého stavu podzemnej vody vo svahu) je azda najšpecifickejšou črtou tohto postupu riešenia.

Sústredenie pozornosti práve na dobu trvania nepriaznivých stavov podzemnej vody vychádzalo zo skúseností, získaných dlhodobými pozorovaniami na viacerých zosuvných lokalitách. Súčasne treba upozorniť aj na to, že hydrogeologické podmienky zosuvných území sú zvyčajne veľmi komplikované a premenlivé v rôznych častiach územia. Všetky uvedené dôvody viedli k odvodu takého stavu podzemnej vody, ktorý je zo stabilného hladiska najmenej priaznivý, trvá najdlhšiu dobu a prejavuje sa na čo najväčšej ploche posudzovaného územia. Postup odvodenia parametrov, charakterizujúcich takýto stav podzemnej vody, je obsiahnutý práve v modeli ukazovateľov režimu podzemných vôd. Výpočet jednotlivých parametrov vychádza zo štatistického zhodnotenia údajov z dlhodobého merania zmien hĺbky hladiny podzemnej vody v súbore monitorovaných objektov a niektoré jeho postupy sú pomerne komplikované. Preto sa v ďalšom obmedzujeme iba na zjednodušený opis podstaty riešenia a na praktické overenie jeho použitia na konkrétnej zosuvnej lokalite; podrobnosti matematického odvodenia jednotlivých parametrov, účelovo charakterizujúcich režim podzemných vôd, sa nachádzajú v samostatných prácach (Ondrejka, 2010, 2012).

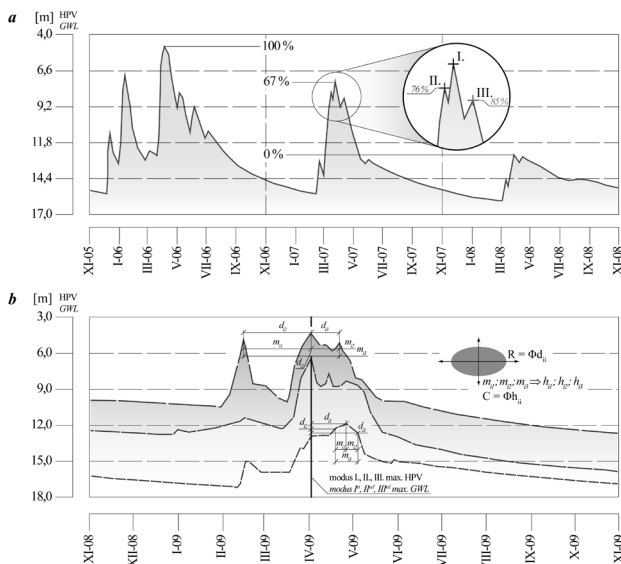
Veľmi zjednodušene možno teda konštatovať, že vplyv podzemnej vody na stabilný stav svahu sa posudzuje na základe odvodenia určitých parametrov režimu podzemných vôd, charakterizujúcich hĺbku hladiny podzemnej vody a dobu trvania nepriaznivých stavov. Z hľadiska stabilného stavu celého zosuvného územia treba za najmenej priaznivý stav považovať dosiahnutie významne vysokej hladiny podzemnej vody súčasne vo väčšine pozorovacích objektov v celom zosuvnom území. Na preukázanie tejto skutočnosti je preto nevyhnutné vykonávať režimové pozorovania vo všetkých monitorovacích objektoch v rovnakom termíne.

Vplyv hĺbky hladiny podzemnej vody sa charakterizuje parametrom priemerného významu maximálnych úrovní hladiny podzemnej vody (P). Na jeho odvodenie sa používa nasledujúci postup:

- ▶ z výsledkov monitorovania (merania hĺbky hladiny podzemnej vody v jednotlivých pozorovacích objektoch) sa vyberú maximálne stavy hladiny, zaznamenané v priebehu zvolenej časovej jednotky (najčastejšie kalendárneho alebo hydrologického roka). V súlade s odvođenou metodikou riešenia (Ondrejka, 2012) sa pri určení tohto parametra vychádza z hodnoty a termínu dosiahnutia troch najvyšších hladín počas zvolenej časovej jednotky v každom pozorovanom objekte;
- ▶ význam takto určenej hĺbky hladiny podzemnej vody v určitom časovom úseku je zrozumiteľnejší po vyjadrení vzťahu úrovne hladiny v hodnotenom roku k celkovej maximálnej úrovni za dlhšie monitorované obdobie (napr. za 10 rokov). Percentuálne vyjadrenie tohto vzťahu sa priradí ku každej z troch maximálnych dosiahnutých hladín v hodnotenom časovom úseku. Po spriemerovaní údajov zo všetkých pozorovaných objektov sa získa reprezentatívna hodnota hĺbky hladiny podzemnej vody pre hodnotený časový úsek v celom priestore lokality;
- ▶ uvedený údaj obsahuje prvú dôležitú informáciu o závažnosti hĺbky hladiny podzemnej vody v hodnotenom časovom úseku. Čím viac sa percentuálne vyjadrenie vzťahu úrovne hladiny podzemnej vody v hodnotenom časovom úseku blíži k hodnote maximálnej úrovne hladiny za referenčné obdobie, tým je význam parametra hĺbky hladiny podzemnej vody (P) dôležitejší (Obr. 4a).

Vplyv času, teda doba trvania nepriaznivých stavov hladiny podzemnej vody vo svahu, sa posudzuje prostredníctvom dvoch parametrov. Vychádza sa z jednoduchého predpokladu, že čím dlhšie trvá pôsobenie vysokého stavu podzemnej vody, tým viac je ohrozená stabilita svahu. V navrhnutom modeli sa vplyv trvania nepriaznivých stavov hladiny podzemnej vody vyjadruje graficky pomocou elíps nasledujúcim spôsobom:

- ▶ rozptyl termínov najvyšších hladín podzemnej vody v rámci zvolenej časovej jednotky (napr. hydrologického roka) sa vyjadri na časovej osi dĺžkou horizontálnej osi elipsy. Ide o výpočet a znázornenie priemernej hodnoty rozptylu dátumov výskytu najvyšších hladín (parameter R) v rámci hodnotenej časovej jednotky, spriemerovaním pre všetky merané objekty;
- ▶ pri analýze rozptylu výskytov najvyšších hladín podzemnej vody sa vychádza z predpokladu, že najnepriaznivejší účinnok vysokej hladiny podzemnej vody na stabilitu svahu by sa prejavil vtedy, ak by sa tri namerané maximá vyskytovali v krátkom časovom úseku. Z podstaty grafického vyjadrenia



Obr. 4. Postup odvodzovania základných ukazovateľov režimu podzemných vôd. *a* – stanovenie významnosti dosiahnutých maximálnych stavov (parameter *P*), *b* – hodnotenie časového aspektu nepriaznivých stavov hladiny podzemnej vody, *R* – ukazovateľ rozptylu termínov výskytu najvyšších HPV v priestore celého zosuvu, počas hodnotenej časovej jednotky, *C* – ukazovateľ kontinuity výskytu troch najvyšších úrovní HPV v jednotlivých vrtoch, d_{ii} – počet dní medzi zaznamenaným modusom termínov max. HPV a ostatnými termínmi s max. HPV, m_{ii} – počet dní medzi termínmi výskytu troch najvyšších HPV.

Fig. 4. Method of the basic indicators of the groundwater regime derivation. *a* – estimation of the importance of achieving maximum levels (indicator *P*), *b* – evaluation of the time aspect of the unfavourable states of groundwater level, *R* – an indicator of the dispersion of the terms of the highest groundwater levels in the area of the landslide (within the evaluated time unit), *C* – an indicator of continuity of occurrence of the three highest levels of groundwater in individual boreholes, d_{ii} – the number of days between modus of dates of maximal groundwater levels and the other dates with maximal groundwater level, m_{ii} – the number of days between the dates of the three highest groundwater levels.

preto vyplýva, že stabilné podmienky svahu sa zhoršujú úmerne so skracujúcou sa horizontálnou osou elipsy (Obr. 4b);

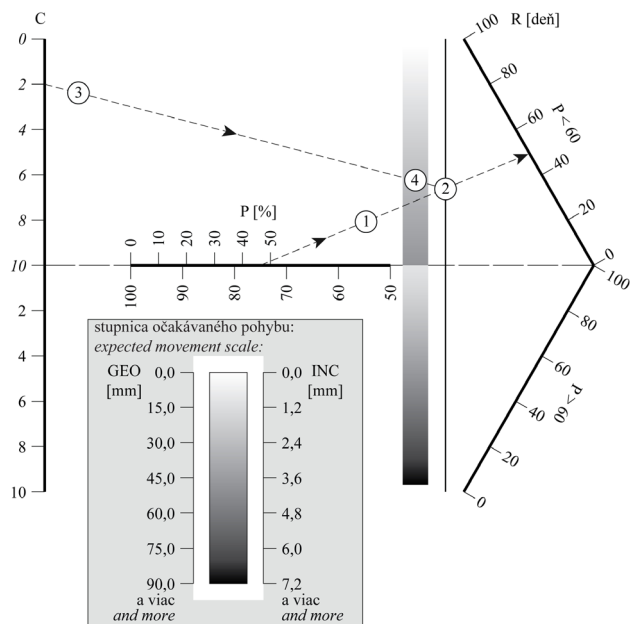
- ▶ na overenie skutočnosti, či maximálny stav hladiny podzemnej vody v jednotlivých pozorovaných objektoch pôsobil kontinuálne dlhšiu dobu, sa vypočítava parameter *C*. Ide o parameter, ktorým sa hodnotí časový interval výskytu maximálnej hladiny podzemnej vody. Vychádza sa z hodnotenia pozície termínu druhej a tretej najvyššej hladiny podzemnej vody vo vzťahu k zaznamenanému maximu. V prípade, ak sú tri najvyššie hladiny kontinuálne spojené, možno predpokladať, že stav, súvisiaci s maximálnou hladinou podzemnej vody trval dlhšie obdobie, čo zo stabilného hľadiska možno považovať za negatívne. Po spriemerovaní hodnôt zo všetkých pozorovaných objektov sa tento parameter graficky vyjadří na vertikálnej osi elipsy. Z podstaty grafického vyjadrenia parametra *C* vyplýva, že s predĺžovaním vertikálnej osi elipsy sa stabilné podmienky svahu zhoršujú (Obr. 4b).

Z hľadiska užívateľa výslednej informácie možno teda zjednodušené zhrnúť, že zo stabilného hľadiska najmenej vhodnú situáciu v určitom časovom úseku (napr. kalendárnom roku) vyjadrujú elipsy, nachádzajúce sa čo najvyššie na percentuálnej osi parametra *P*, s minimálnou veľkosťou horizontálnej osi (parameter *R*) a maximálnou veľkosťou vertikálnej osi (parameter *C*).

Výpočet parametrov *P*, *R* a *C* vytvára predpoklady na charakterizovanie stabilného stavu monitorovaného zosuvného územia na základe hodnotenia režimu podzemnej vody vo vybraných časových úsekoch. Súčasne však predstavuje aj podklad na odvodenie kritických hodnôt najdôležitejších faktorov pre LWS.

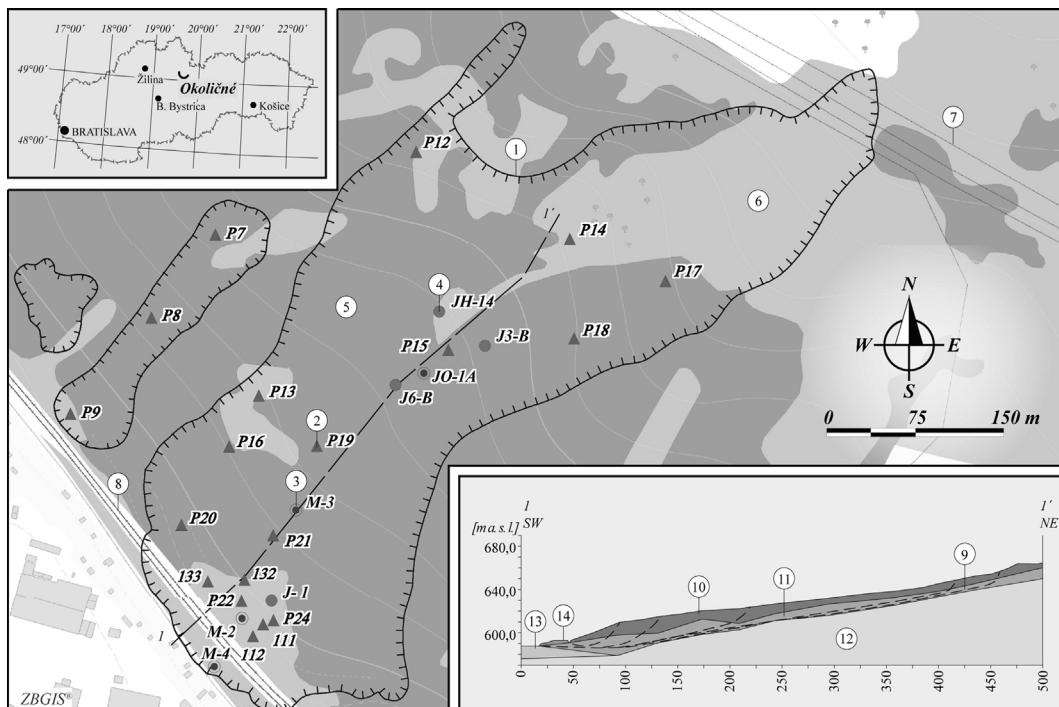
Na to, aby mohli byť parametre *P*, *R* a *C* použité na odvodenie **kritických hodnôt pre LWS**, je nevyhnutné:

- ▶ porovnať hodnotenie režimu podzemnej vody na základe parametrov *P*, *R* a *C* s geodeticky zameranými hodnotami posunov bodov na povrchu zosuvného územia a s hodnotami deformácií inklinometrických vrtov. V prípade preukázaných závislostí medzi režimom podzemnej vody a pohybovou aktivitou zosuvných mas možno vytvorený model považovať za funkčný a použiteľný pre LWS;
- ▶ na určenie predpokladanej pohybovej aktivity zosuvu sa vypracuje diagram (Obr. 5), do ktorého vstupujú parametre *P*, *R* a *C* z vybraného časového úseku a z ich hodnôt je odvodená očakávaná aktivita svahového pohybu (charakterizovaná konkrétnymi hodnotami posunov geodetických bodov



Obr. 5. Diagram prognózovania veľkosti pohybovej aktivity svahového pohybu. 1 – 4 – postup vynášania hodnôt do grafu (2 – priesečník na pomocnej osi, 4 – hľadaný bod, ktorý charakterizuje očakávanú pohybovú aktivitu), *P*, *R*, *C* – hodnotené ukazovatele režimu HPV podľa obr. 4, GEO – geodetické body, INC – inklinometrické vrty.

Fig. 5. Diagram of prediction of the size of sliding activity of landslide. 1 – 4 – process of plotting the values to the graph (2 – intercept point on the minor axis, 4 – search point, which characterizes the expected sliding activity), *P*, *R*, *C* – evaluated indicators of groundwater regime (according to Fig. 4), GEO – geodetic points, INC – inclinometer boreholes



Obr. 6. Situácia a schematický geologický profil zosuvného územia Okoličné v severovýchodnej časti intravilánu mesta Liptovský Mikuláš (spracované podľa Fussgänger & Jadroň, 1976). 1 – ohraničenie zosuvov, 2 – body geodetickej siete, 3 – inklinometrické vrty, 4 – hydrogeologické vrty, 5 – oblasť s lesným porastom, 6 – oblasť s trávnatým porastom, 7 – vedenie vysokého napätia, 8 – železničná trať Žilina – Košice, 9 – šmykové plochy, 10 – zosuvné delúvium, 11 – eluviálne sedimenty (zvetrané paleogénne horniny), 12 – neporušené paleogénne podložie flyšového charakteru, 13 – sedimenty riečnej terasy Váhu, 14 – železničný násyp.

Fig. 6. Situation and schematic geological profile of Okoličné landslide area in the northeastern part of the Liptovský Mikuláš city area (prepared according to Fussgänger & Jadroň, 1976). 1 – boundaries of landslides, 2 – points of geodetic network, 3 – inclinometer boreholes, 4 – hydrogeological boreholes, 5 – an area of forests, 6 – an area of grassland, 7 – high-voltage lines, 8 – railway Žilina – Košice, 9 – slide planes, 10 – landslide deluvial deposits, 11 – eluvial deposits (weathered rocks of Paleogene), 12 – intact Paleogene bedrocks of the flysch character, 13 – deposits of the Váh river terraces, 14 – the railway embankment.

a deformáciami pažníc inklinometrických vrtov na úrovni šmykovej plochy).

Z definovaných charakteristík režimu podzemnej vody, transformovaných do určitého stupňa pohybovej aktivity (Obr. 5) vyplývajú hodnoty kritických úrovní vstupných parametrov pre LWS.

Súčasne, po vytvorení funkčného systému LWS na základe spracovania dlhodobých monitorovacích meraní hladiny podzemnej vody, geodetických meraní posunov pozorovacích bodov a inklinometrických meraní deformácií pažníc vrtov, možno vytvoriť „online“ prognostický systém, ktorý by okamžite po doručení výsledkov merania hladiny podzemnej vody pozorovateľom vypočítal hodnoty parametrov P, R a C a na základe vzťahov, vyjadrených v obr. 5, by posúdil prípadné zvyšovanie (znižovanie) pohybovej aktivity oproti predchádzajúcemu meraniu.

3.2. Príklad hodnotenia na konkrétnej lokalite

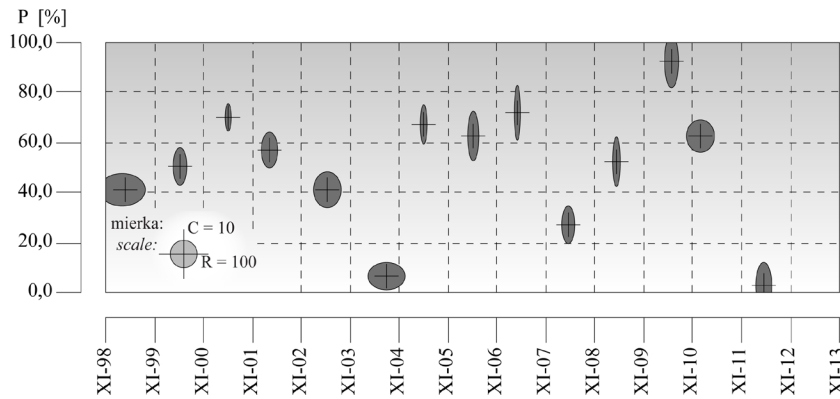
Cieľom hodnotenia je preukázať na konkrétnej lokalite monitorovaného zosuvu pri Okoličnom funkčnosť odvodeného modelu

ukazovateľov režimu podzemných vôd v období rokov 1998 až 2012. Na overenie správnosti modelu je nevyhnutné zhodnotiť vývoj ukazovateľov režimu podzemných vôd (teda určiť zmeny parametrov P, R, C v čase) a súčasne zhodnotiť výsledky meraní pohybovej aktivity (geodetické a inklinometrické), uskutočnené v rovnakom časovom úseku. Po preukázaní určitej korelácie medzi parametrami režimu podzemných vôd a preukázanými hodnotami pohybovej aktivity zosuvných hmôt možno na základe informácií o stave hladiny podzemnej vody usudzovať o stabilnom stave prostredia.

3.2.1. Zosuv Okoličné

Predstavuje staršiu svahovú poruchu, ktorá sa nachádza na južných svahoch severovýchodnej časti intravilánu mesta Liptovský Mikuláš. Zosuvný pohyb sa reaktivizoval v roku 1949 počas terénnych úprav čela svahu. V opisovanom území sa v minulosti vyvinulo viacero svahových porúch, z ktorých rozmerovo najvýraznejšia, prúdového charakteru, zaberá plochu 0,16 km² (Obr. 6).

Z geologického hľadiska sa na stavbe svahu podieľajú horniny vnútrokarpatského paleogénu a kvartérne uloženiny. Paleogénne horniny majú flyšový charakter s prevládajúcou ílovcovou



Obr. 7. Vyjadrenie výsledku analýzy ukazovateľov režimu podzemných vôd za obdobie XI. 1998 – XI. 2013

Fig. 7. Expression of the result of analysis of the groundwater regime indicators for the period XI. 1998 – XI. 2013.

zložkou. Deluviálne a eluviálne sedimenty, ktoré možno označiť ako zosuvné delúvium, tvoria prevažne ílovité hliny až hlinito-kamenité suty. Čelo zosuvu je presunuté (na vzdialenosť viac ako 50 m) cez aluviálne štrkovité náplavy rieky Váh (Fussgänger & Jadroň, 1976).

Na stabilitu zosuvu majú nepriaznivý vplyv pomerne komplikované hydrogeologické pomery územia. V dôsledku tektonicky porušených až rozlámaných lavíc pieskocov sa podzemná voda dostáva pod málo priepustné až nepriepustné bariéry, čím jej hladina získava napätý charakter s piezometrickou výškou značne presahujúcou úroveň terénu. V zosuvnom území sa vyskytuje viacero zvodnených horizontov.

Zosuv je v bezprostrednom kontakte so železničnou traťou, spájajúcou Košice zo Žilinou. Z tohto dôvodu sa v priestore zosuvného územia sústredili viaceré prieskumné, sanačné a neskôr i monitorovacie aktivity. Systematicky sa lokalita monitoruje od roku 1993 v rámci riešenia úlohy Čiastkový monitorovací systém – Geologické faktory. Monitoring je zameraný na pozorovanie zmien hĺbky hladiny podzemnej vody v piezometrických vrtoch, výdatnosti odvodňovacích zariadení a sledovanie pohybovej aktivity na sieti geodetických bodov a v inklinometrických vrtoch. Frekvencia režimových meraní je približne jedenkrát za týždeň a merania pohybovej aktivity sa realizujú spravidla jedenkrát za rok.

3.2.2. Odvodenie ukazovateľov režimu podzemných vôd a hodnôt pohybovej aktivity zosuvu

Vzhľadom na to, že analogické účelové hodnotenie režimu podzemných vôd v rokoch 1998 až 2008 na lokalite Okoličné bolo už uskutočnené (Ondrejka, 2012), v predkladanom príspevku sa pozornosť sústreďuje na obdobie rokov 2009 až 2012 a na overenie (ale aj spresnenie) prezentovanej metodiky hodnotenia.

Ukazovatele režimu podzemnej vody. Odvodenie týchto ukazovateľov vychádza z analýzy súboru režimových informácií, ktoré charakterizujú zmeny hĺbky hladiny podzemnej vody na sieti 8 vrtoch (M-4, J-1, M-3, J6-B, JO-1, JH-14, J3-A, J3-B; dosahujúcich hĺbky od 8 m do 30,5 m – Obr. 6) približne v týždennom intervale merania. Vo vrtoch sa sledovali zmeny hladiny podzemnej vody vo viacerých zvodnených horizontoch. Pre jednotlivé (hydrologické) roky boli odvodené tri základné parametre režimových ukazovateľov (P, R a C).

Výsledok rozboru režimových informácií jednoznačne preukázal, že z hydrogeologického hľadiska boli najmenej priaznivé (za celé monitorované obdobie) ukazovatele zaznamenané v roku

2010 (Obr. 7). Znamená to, že v tomto roku boli dosiahnuté historicky najvyššie stavy hladiny podzemnej vody. Prejavilo sa to mimoriadne vysokou hodnotou parametra P (92,59 %). Súčasne za nepriaznivé možno považovať aj parametre súvisiace s časovým aspektom. Parameter charakterizujúci rozptýlenie maximálnych stavov počas ročného cyklu poukazuje na pomerne úzky vzťah medzi jednotlivými termínmi výskytu maximálnej hladiny podzemnej vody v jednotlivých monitorovacích objektoch (R = 25,96 dní). Parameter C, ktorým sa hodnotí kontinuita doby trvania maximálneho stavu, poukazuje na to, že dosiahnuté maximálne hladiny vo väčšine hodnotených vrtoch pretrvali minimálne tri týždne (9,69). Vzhľadom na výnimočnosť režimových ukazovateľov odvodených v roku 2010, analyzuje sa ich stav v predchádzajúcom i nasledujúcom období.

V predchádzajúcom roku 2009 do popredia vystupovali najmä parametre R a C. Veľká časť (troch) najvyšších stavov hladiny podzemnej vody bola na monitorovacej sieti zaznamenaná v krátkom časovom období (väčšinou počas merania 12. apríla; R = 14,29 dní), čo by sa zjednodušene dalo opísať ako stav, keď súčasne na celom zosuvnom území pôsobili nepriaznivé hydrogeologické pomery. Koncentrovanosť maximálnych stavov v krátkom časovom intervale sa prejavila na dĺžke trvania vysokého stavu hladiny podzemnej vody v jednotlivých vrtoch (C = 9,06).

Rok 2011 bol z hľadiska vývoja stability zosuvného územia kľúčový. V prvých mesiacoch bola hladina podzemnej vody významne ovplyvňovaná na zrážky bohatým rokom 2010, avšak počas zvyšnej časti roka vplývali na stav hladiny podzemnej vody opačné klimatické pomery – mimoriadne nízke zrážkové úhrny. Uvedené skutočnosti sa významným spôsobom prejavili pri formovaní priebehu hĺbky hladiny podzemnej vody. Percentuálny význam P (62,74 %) síce poukazuje na zhoršené hydrogeologické pomery, no parametre R a C naznačujú relatívne priaznivú situáciu. Pomerne suché obdobie, sprevádzané poklesom hladiny podzemnej vody, pretrvalo i do nasledujúceho roku 2012. Výsledkom sú najpriaznivejšie režimové ukazovatele od roku 2004 (Obr. 7).

Ukazovatele pohybovej aktivity. Hodnotenie pohybovej aktivity vychádzalo z nameraných vektorov posunov (geodetické merania) a deformácií (inklinometrické merania). Pri hodnotení vektorov pohybu boli uplatnené určité kritériá, ktoré zvyšujú pravdepodobnosť, že namerané zmeny súvisia so zosuvným pohybom. Základným kritériom bola veľkosť vektora. Pri posunoch sa vychádzalo zo strednej polohovej chyby merania. Minimálna

hodnota polohového vektora geodetických bodov, pri ktorej možno s 95 % pravdepodobnosťou uvažovať, že ide o svahový pohyb, bola 15 mm (Bitterer, 2009). Toto kritérium bolo aplikované pri výbere polohových aj vertikálnych posunov pozorovaných bodov. Podobný postup bol použitý i pri výbere nameraných deformácií. Na základe dlhodobých skúseností spodná hranica veľkosti vektorov, vyjadrujúcich svahový pohyb, predstavovala v prípade inklinometricky nameraných deformácií hodnotu 2 mm.

Druhé kritérium vychádzalo z orientácie výsledného azimutu nameraných vektorov posunu a deformácie. Pre analýzu vzťahu medzi režimovými pomermi a pohybovou aktivitou zosuvného telesa sa pozornosť sústredila na tie vektory, ktorých smer súvisí so spádnicou svahu. Vylúčené boli vektory, ktorých orientácia sa výrazne odlišovala od pôsobenia gravitačných síl a s vysokým stupňom pravdepodobnosti boli výsledkom pôsobenia iných procesov, než je hodnotený gravitačný – zosuvný pohyb (Ondrejka & Wagner, 2011).

Zhodou nepriaznivých okolností však práve v apríli 2010 došlo k zmene technológie geodetických meraní (z výlučne terestrického spôsobu merania na jeho kombináciu s meraniami GNSS – Global Navigation Satellite System). V dôsledku toho možno považovať meranie z apríla 2010 za nultú etapu, s výsledkami ktorej sa budú porovnávať všetky nasledujúce etapy geodetických meraní. Posuny, zaznamenané počas merania v máji 2011, však ilustrujú pohybovo veľmi aktívne obdobie (Obr. 8a), i keď v dôsledku nízkej hustoty meraní nemožno presnejšie určiť obdobie, kedy najvýraznejší posun bodov nastal (medzi aprílom 2010 a májom 2011). Pri hodnotení ostatných rokov možno konštatovať, že zvýšené prejavy pohybovej aktivity boli zaznamenané i počas roku 2009.

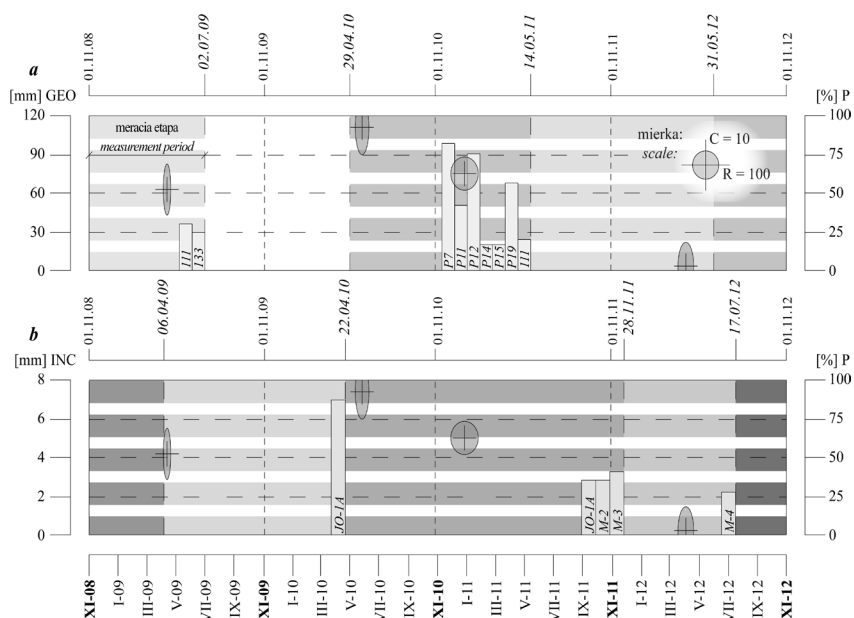
Z hodnotenia pohybovej aktivity na šmykových plochách metódou presnej inklinometrie vyplýva, že jej zvýšené prejavy boli zaznamenané počas aprílového merania v roku 2010 a tiež počas novembrového merania v roku 2011 (Obr. 8b). Minimálne deformácie, ktoré sa ešte zohľadnili pri hodnotení, boli zaznamenané vo vrte M-4 v júli 2012.

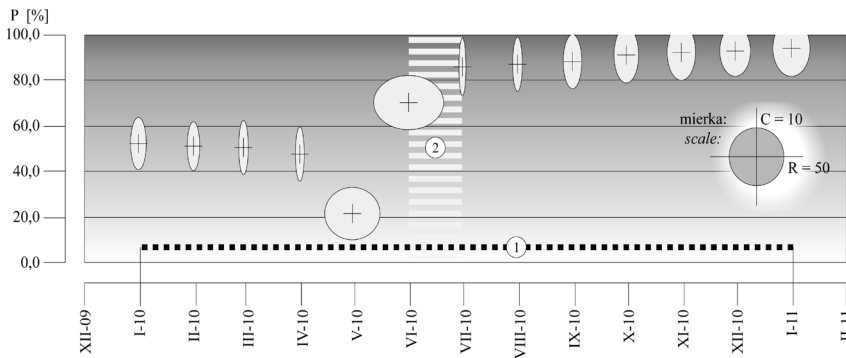
Po spracovaní a odvodení charakteristických ukazovateľov režimu podzemných vôd a pohybovej aktivity zosuvných hmôt sa možno pokúsiť o odvodenie vzťahov medzi aktuálnymi hydrogeologickými pomermi zosuvného svahu a im zodpovedajúcou pohybovou aktivitou zosuvu.

3.2.3. Korelácia medzi charakteristickými ukazovateľmi a prognóza pohybovej aktivity zosuvu

Analýza režimových ukazovateľov, ale i hodnotenie vývoja pohybovej aktivity naznačujú, že najvýznamnejším (najmenej priaznivým) z hľadiska stability bol rok 2010. Pri hlbšej analýze a postupnom hodnotení režimových informácií (ktoré prichádzali od pozorovateľa) možno konštatovať, že prvý „varovný signál“ pochádzal z merania, uskutočneného 30. mája 2010. Vo viacerých vrtoch práve počas tohto merania bol zaznamenaný zvýšený stav hladiny podzemnej vody ($P = 70,15\%$). Počas nasledujúcich troch meraní bola analýzou vzťahu medzi jednotlivými hladinami odvodená hodnota parametra $C = 9,38$, ktorá poukazuje na značne dlhú dobu pôsobenia týchto vysokých stavov hladiny podzemnej vody. S pribúdajúcimi údajmi od pozorovateľa sa informácia o sledovaných parametroch postupne vyvíjala. V dôsledku retardácie vplyvu klimatických faktorov sa vzostup hladiny podzemnej vody prejavoval i v nasledujúcom období – parameter P dosiahol maximum až začiatkom roka 2011 (Obr. 9). Z hľadiska LWS sú však dôležité najmä termíny, ktoré možno použiť pri včasnej predikcii pred blížiacou sa aktivizáciou svahového pohybu. Na konci júna parametre P , R a C dosahovali hodnoty, kombináciou ktorých možno očakávať (podľa obr. 5) výraznejšie svahové pohyby (posuny do cca 8 cm a deformácie do 6,5 mm). Najbližšie geodetické meranie, ktoré bolo realizované v máji 2011, tento predpoklad potvrdilo. Maximálny posun bol zaznamenaný v bode P7 s hodnotou 81 mm. Inklinometrické meranie bolo však realizované ešte neskôr, a to až koncom novembra 2011. Podobne i toto meranie potvrdilo nepriaznivý stabilitný stav (Obr. 8). Určitým nedostatkom predloženej korelácie je skutočnosť, že realizovanými geodetickými

Obr. 8. Porovnanie pohybovej aktivity s výsledkami analýzy ukazovateľov režimu podzemných vôd (P , R , C). *a* – výsledky geodetických meraní – GEO (termíny realizácie meraní sú vyjadrené kurzívou), *b* – výsledky inklinometrických meraní – INC. Fig. 8. Comparison of sliding activity with the results of the analysis of indicators of the groundwater regime (P , R , C). *a* – the results of geodetic measurements – GEO (the dates of measurements are indicated by italics), *b* – results of inclinometer measurements – INC.





Obr. 9. Výsledky analýzy ukazovateľov režimu podzemných vôd (s mesačným krokom) s aspektom na predikciu svahového pohybu. 1 – časový interval (jeden rok), ktorý bol použitý pri stanovovaní parametrov C, R, P, 2 – obdobie varovania.

Fig. 9. Results of the analysis of indicators of the groundwater regime (with a monthly step) with aspect to prediction of landslide. 1 – interval of time (one year), which was used in defining of the parameters C, R, P, 2 – warning period.

a inklinometrickými meraniami nie je možné odlišiť vplyvy, spôsobené klimatickou situáciou v roku 2010 od tých, ktoré súvisia s rokom 2011.

Ďalšie konkrétne príklady, potvrdzujúce správnosť odvodeného metodického postupu vyplývajú z výsledkov, ktoré boli stanovené pre roky 2009 a 2012. V roku 2009 boli očakávané svahové pohyby výrazne prekračujúce chybu merania, čo sa potvrdilo inklinometrickým meraním vo vrte JO-1A (v ktorom bola počas aprílového merania v roku 2010 na šmykovej ploche v hĺbke 10,5 m pod terénom zaznamenaná deformácia 7,0 mm). Geodetickými meraniami boli namerané posuny od 20 do 30 mm. Naopak, rok 2012 mal byť podľa režimových ukazovateľov jedným z najstabilnejších, čo merania pohybovej aktivity potvrdili (Obr. 8).

Na základe uvedených skutočností možno konštatovať, že odvodená stupnica pre prognózu pohybovej aktivity (Obr. 5) do značnej miery korešponduje s reálne nameranou pohybovou aktivitou zosuvných hmôt. Zároveň, na základe spätnej analýzy získaných výsledkov je nutné kriticky poznamenať, že súčasná sieť pozorovacích vrtov nedostatočne pokrýva pomerne rozsiahle územie svahovej poruchy. Pre reprezentatívnejšie výsledky by bolo potrebné získať informácie i z okrajových častí zosuvného územia.

Overený vzťah medzi ukazovateľmi režimu podzemnej vody a pohybovej aktivity zosuvu umožňuje kvalifikovane predpokladať stabilný stav monitorovaného svahu po každom vykonanom meraní. Hneď po doručení údajov o aktuálnej hĺbke hladiny podzemnej vody od pozorovateľa možno vypočítať parametre P, R a C za určitý časový úsek (napríklad, za predchádzajúci rok). Vďaka overenému vzťahu s ukazovateľmi pohybovej aktivity (vyjadrenému na obr. 5) možno určiť, či daný stav zodpovedá kritickému (hranica najtmavšieho odtieňa na obr. 5) a aké hodnoty posunov a deformácií možno pre daný stav v danom časovom úseku očakávať. Z opakovaného určenia parametrov režimu podzemnej vody (vypočítaným napríklad pre týždenný alebo mesačný interval merania) možno veľmi pohotovo usudzovať, aký je trend vývoja stabilného stavu pozorovaného zosuvu, prípadne včas signalizovať prekročenie odvodených limitných úrovní pre LWS. Ukážka analýzy vývoja stabilného stavu hodnoteného zosuvu pri Okoličnom na základe spracovania meraní hĺbky hladiny podzemných vôd v mesačných intervaloch je na obr. 9.

4. ZÁVER

Vzhľadom na čoraz častejší výskyt klimatických anomálií, ale aj v súvislosti s významnými a často nie dostatočne domyslenými zásahmi človeka do prirodzenej rovnováhy prostredia, je i vznik a aktivizácia svahových pohybov, predovšetkým zosuvov, čoraz častejšia. Prevenciu a včasnú ochranu pred nepriaznivými, často až katastrofálnymi dôsledkami týchto pohybov môžu zabezpečiť systémy včasného varovania, ktoré sa v súčasnosti budujú na celom svete prednostne na celospoločensky najdôležitejších a stabilne najcitlivejších lokalitách s cieľom postupne pokryť signálom včasného varovania čo najširšie územia s výskytom porúch svahov. Ako však vyplýva z prezentovaného príspevku, tvorba systémov včasného varovania predstavuje veľmi náročnú úlohu, ktorá sa rieši na rôznych úrovniach podľa dosahu pôsobnosti týchto systémov kolektívnymi odborníkmi zastupujúcimi rôzne vedné disciplíny, pričom súbor relevantných problémov patrí práve do pôsobnosti špecialistov geologického zamerania.

Autori sa v príspevku venujú iba tvorbe lokálnych systémov včasného varovania a zameriavajú sa na problematiku odvodenia kritických úrovní rozhodujúcich faktorov svahových pohybov, ku ktorým patrí predovšetkým stav podzemnej vody vo svahu. Z viacerých metodických postupov na odvodenie kritických hodnôt stavu podzemnej vody sa v príspevku pozornosť sústreďuje na opis a aplikáciu tzv. modelu ukazovateľov režimu podzemných vôd, ktorý vychádza z údajov o maximálnych úrovniach hladiny podzemnej vody a doby ich trvania. Uvedené modelové riešenie bolo vypracované na základe bohatých skúseností z monitorovania svahových pohybov na lokalitách z celého Slovenska a overované na niekoľkých lokalitách s dostatočným rozsahom potrebných vstupných informácií.

Nespornou výhodou modelu ukazovateľov režimu podzemných vôd je možnosť účelne zužitkovať rozsiahle súbory informácií o meraní hĺbky hladiny podzemnej vody na rôznych zosuvných lokalitách, pozorovaných či už v rámci systematického monitoringu alebo po prieskume a uskutočnených sanáciách. Ďalšou výhodou je skutočnosť, že v prípade overenia správnej funkčnosti odvodeného modelu možno s dostatočným stupňom presnosti prognózovať, na základe aktuálneho stavu podzemnej vody, očakávanú pohybovú aktivitu zosuvných hmôt a prakticky po každom uskutočnenom meraní hladiny podzemnej vody získať dostatočne overenú informáciu o stabilnom stave svahu, jeho vývoji a odstupe (resp. blízkosti) existujúcich pomerov k stanovenému kritickému stavu hladiny podzemnej vody

vo svahu. Takto zostavený model môže na príslušnej lokalite fungovať trvalo ako súčasť systému včasného varovania a zdroj prognózy pohybovej aktivity zosuvu, pričom informácie z modelu pokrývajú celé hodnotené územie, nie iba jeho časť alebo vybraný profil.

Vo výhodách prezentovanej metodiky sú súčasne nepriamo zakomponované i jej nevýhody. Model ukazovateľov režimu podzemných vôd možno vytvoriť len v tom prípade, ak na predmetnej lokalite existuje časovo dostatočne dlhý (trvajúci aspoň niekoľko rokov) úsek pravidelných meraní hĺbky hladiny podzemnej vody vo viacerých objektoch. Ďalšou nevyhnutnou podmienkou vytvorenia uvedeného modelu je realizácia geodetických, resp. inklinometrických meraní, uskutočnených na lokalite taktiež v dostatočne dlhom časovom úseku (pričom hustota týchto meraní môže byť podstatne menšia, než je hustota meraní hĺbky hladiny podzemnej vody). Z predchádzajúcich poznatkov vyplýva, že zásadný výstup modelu ukazovateľov režimu podzemných vôd – závislosť medzi ukazovateľmi režimu a aktivitou svahového pohybu (Obr. 5) – je špecifický pre každú hodnotenú lokalitu, teda, že každú lokalitu charakterizuje iný vzájomný vzťah medzi stavom podzemnej vody a očakávanými posunmi a deformáciami.

Napriek viacerým ohraničeniam aplikácie prezentovanej metódy sa domnievame, že ide o progresívny spôsob odvodenia kritických úrovní hladiny podzemnej vody pre systémy včasného varovania na zosuvoch, ktorý po dostatočnom overení a spresnení funkčnosti možno použiť na viacerých lokalitách monitorovaných svahových pohybov.

Literatúra

- Bitterer L., 2009: Meranie vývoja zosuvného procesu v km 255,0 – 255,5 trate Košice – Žilina. 55. etapové meranie. Čiastková záverečná správa, Manuskript, archív Oddelenia inžinierskej geológie ŠGÚDŠ (Bratislava), 40 p.
- Fussgänger E. & Jadroň D., 1976: Okolice – prieskum zosuvu. Záverečná správa, Manuskript, archív ŠGÚDŠ (Bratislava), 163 p.
- Hong Y. & Adler R. F., 2007: Towards an Early-Warning System for Global Landslides Triggered by Rainfall and Earthquake. [http://www.refdoc.fr/Detailnotice?cpsid=18953996&traduire-fr\(10-03-11\)](http://www.refdoc.fr/Detailnotice?cpsid=18953996&traduire-fr(10-03-11)).
- Huggel C., Ramirez J. M., Calvache M., Gonzales H., Gutierrez C. & Krebs R., 2008: A Landslide Early Warning System within an Integral Risk Management Strategy for the Combeima-Tolima Region, Colombia. International Disaster and Risk Conference. IDRC, Davos, 273–276.
- Chan R.K. & Pun W.K., 2004: Landslip Warning System in Hong Kong. Geotechnical Instrumentation News – Geotechnical News, 33–35.
- Jadroň D., Fussgänger E., Turovský F. & Hošek S., 1996: Inžinierskogeologický prieskum a sanácia zosuvu na ceste v Dolnej Mičinej. In: Wagner P. (Ed.): Výskum, prieskum a sanácia zosuvných území na Slovensku, SAIG, Bratislava, 174–182.
- Jakob M., Holm K., Lange O. & Schwab J.W., 2006: Hydrometeorological thresholds for landslide initiation and forest operation shutdowns on the North Coast of British Columbia. *Landslides*, 3, 3, 228–238.
- Jelínek R., 2005: Deterministický prístup pri hodnotení hazardu ľubietovského zosuvu. *Mineralia Slovaca*, 37, 1, 65–74.
- Jelínek R. & Wagner P., 2007: Landslide hazard zonation by deterministic analysis. (Veľká Čausa landslide area, Slovakia). *Landslides*, 4, 4, 339–350.
- Klukanová A. 2002: Čiastkový monitorovací systém Geologické faktory ako súčasť monitorovacieho systému životného prostredia Slovenskej republiky. *Geologické práce, Správy*, 106, 9–14.
- Kolektív autorov: Inžinierska geológia – výskum a prax, 1991. Zborník referátov z vedeckej konferencie. SAIG, Katedra inž. geológie PRIF UK, Bratislava, SGS, Bratislava, 204 p.
- Kopecký M., 2006: Influence of extreme climatic conditions upon landslides development in the Slovak Republic. *Slovak Geological Magazine* 12, 1, 63–68.
- Liščák P., Pauditš P., Petro L., Iglárová L., Ondrejka P., Dananaj I., Brček M., Baráth I., Vlačíky M., Németh Z., Záhorová L., Antalík M., Repčiak M. & Drotár D., 2010: Registration and Evaluation of Newly Evolved Slope Failures in 2010 in Prešov and Košice Regions. *Mineralia Slovaca*, 42, 2, 393–406.
- Malgot J., 1991: Analýza vplyvu antropogénnych faktorov na stabilitu svahov. In: Holzer R. (Ed.): Inžinierska geológia – výskum a prax, SAIG, Bratislava, 93–97.
- Malgot J. & Baliak F., 1991: Regionálne hodnotenie stability svahov. In: Holzer R. (Ed.): Inžinierska geológia – výskum a prax, SAIG, Bratislava, 88–92.
- Ondrejka P. 2010: Systémy včasného varovania na zosuvoch. Dizertačná práca. Univerzita Komenského v Bratislave, 180 p.
- Ondrejka P., 2012: Kritické úrovne pri systémoch včasného varovania na zosuvoch. *Geologické práce, Správy*, 119, 67–78.
- Ondrejka P., Maas P. & Wagner P., 2005: Odvodenie kritického stavu hladiny podzemnej vody v zosuvnom území. In: Geotechnika v urbanizovanom prostredí. 7. medzinárodná geotechnická konferencia. SvF STU, Bratislava, 105–110.
- Ondrejka P. & Wagner P., 2011: Analýza výsledkov geodetických meraní v zosuvných územiach. In: Svahové deformácie a pseudokras. Ústav geotechniky VUT FAST, Brno.
- Ondrejka P., Wagner P. & Gróf V., 2011: Využitie stacionárneho inklinometra na tvorbu systémov včasného varovania na zosuvoch. *Geotechnika*, 1–2, 189–221.
- Ondrejka P. & Wagner P., 2012: Monitorovanie zosuvov a iných svahových deformácií v období rokov 2002 až 2009. *Mineralia Slovaca*, 44, 4, 331–350.
- Pauditš P. & Bednarik M., 2002: Using GIS in evaluation of landslide susceptibility in Handlovská Kotlina Basin. In: Rybář J., Stemberk J. & Wagner P. (Eds.): Proceedings of the 1st European Conference on Landslides, Swets & Zeitlinger, Lisse, Praha, 437–441.
- Petro L., Liščák P. & Ondrejka P., 2012: Assessment of selected active landslides in Slovakia in 2011. *Mineralia Slovaca*, 44, 2, 131–140.
- Vlčko J., 2002: Mapa relatívnej náhynosti územia obce Ľubietová k svahovým pohybom. In: Klukanová A. & Hrašna M. (Eds.): Geológia a životné prostredie 3, Vyd. D. Štúra, Bratislava, 107–111.

Summary: Protection of the environment against the unfavorable effects of slope movements, especially landslides, belongs to crucial tasks of the actual engineering geology. Tackling of this problem is recently aimed on two sets of issues – the first one deals with the improvement of the methods of investigation and corrective measures on unstable slopes, and the second one covers various methods of prognosis of generation and activation of slope movements, including the development of Landslide Early Warning Systems (LWS – Fig. 1).

The Early Warning Systems of unfavorable impact of slope movements are currently very topical tasks, which are in the spotlight of specialists, as well as the general public worldwide. Depending on the scope of competence the LWS are classified into several levels – global, which provide information on the probability of the origin and activation of slope movements in large territorial units, then regional, which are installed in

sensitive areas, in which disastrous landslides of different sizes occurred in the past and finally, local, which are usually designed to protect specific objects or clusters of objects against the effects of well-defined slope failure. Various levels of Early Warning Systems can be adjusted either in mutual interconnection or directly at the desired level (Fig. 2). The authors of the paper describe the local level of LWS.

Establishment of a local LWS is very complicated multidisciplinary issue, consisting of several subjects (Fig. 3). The geological issues belong to the most serious ones. From this range of questions the derivation of critical levels of the selected landslide factors is the most relevant.

Generally, the main factor of the generation or activation of landslide movements are changes in groundwater table levels in the sliding slope. The critical values of this factor can be determined by several methodologies; the most wide-spread in practice are the following computing model schemes (Ondrejka, 2012):

- geotechnical model, which is based on the calculation of slope stability assessment in a representative profile and on the results of long-term monitoring of groundwater table levels fluctuation in boreholes, located in the profile. The critical value of the groundwater table level depth complies with the degree of stability equal to or less than 1 according to computational solution of the degree of stability;

- model based on sudden changes in the groundwater table level, which is derived from the evaluation and correlation of the continuous information on changes in the groundwater table levels (recorded by automatic piezometers) and deformations of the surface area or at the sliding plane (recorded usually by geodetic methods or by stationary inclinometers);

- model of indicators of the groundwater regime, based on the evaluation of the groundwater regime derived from the monitoring measurements in relation to measurements of kinematic activity of landslide masses (generally derived from the results of geodetic and inclinometer measurements).

The paper analyzes in detail the model of indicators of the groundwater regime, which was derived based on a long-term experience in monitoring of landslides. This model is currently verified and can be applied at several locations with implemented regime observations of groundwater table level fluctuation.

In the model the attention is focused in the terms of the highest groundwater table level and duration of these adverse conditions. Taking into account the parameter of time is perhaps the most specific feature of this solution procedure. The influence of groundwater on slope stability condition is assessed according to certain parameters of the groundwater regime, which characterize the depth of the groundwater table level, dates of unfavorable conditions and their duration. The method of determination of these parameters on the basis of long-term measurements of the groundwater table level is expressed in Fig. 4. After characterizing the groundwater regime by requested parameters, it is necessary to compare them with the parameters of motional activity of landslide masses, identified by geodetic and inclinometer measurements, realized at the same time period. Based on the correlation between the groundwater regime and the kinematic activity of landslide masses the diagram (Fig. 5) can be compiled. According to this diagram expected activity of slope movements, characterized by particular values of displacements and deformations can be derived from the indicators of the groundwater regime in the selected period of time.

The functionality of the model of indicators of the groundwater regime has been verified on the locality of a long-term monitored landslide

Okoličné (within the area of the Liptovský Mikuláš city). It is well-known landslide site situated in the Inner Carpathian Paleogene flysch subregion; its importance is underlined by a contact of landslide masses with the main railroad route (Fig. 6). Processing of regime observations for the period of 1998 – 2012 has shown that from the hydrogeological point of view the least favorable (for the whole monitored period) were the indicators of the groundwater regime in the year 2010 (Fig. 7). This fact, as well as other dependencies, was confirmed by the analysis of the results of geodetic points displacements and inclinometric measurements of deformations (Fig. 8). Thanks to the verified correlation between the groundwater regime and kinematic activity of landslide masses the development of stability state of the Okoličné landslide can be analyzed based on the processing of the groundwater table depth measurements at monthly intervals (Fig. 9).

Application of the model of indicators of the groundwater regime at concrete locality showed suitability of the proposed method to derive critical levels of the groundwater regime parameters and to predict the expected kinematic activity of landslide masses. Despite several limits of this method application and the necessity of its further practical verification, it can be expected, that it is a progressive and at practice well-used method for derivation of critical levels of groundwater in Early Warning Systems on landslides.