

Analýza vzťahu medzi vypočítaným stupňom stability a pohybovou aktivitou na príklade zosuvu pri Okoličnom

PETER ONDREJKA

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

Analysis of the relation between calculated degree of slope stability and kinetic activity of the landslide Okoličné (Liptovský Mikuláš district, Slovakia)

Input parameters of the slope stability calculation are slope morphology, shear strength characteristics and the state of groundwater level. Because the first and second parameters are practically invariable in specified time period, actual slope stability state is the most influenced by the groundwater level changes. In accordance with this concept the regime observations of groundwater level changes are performed on important landslide areas with assumption that expressive increase of ground water level may redound to activation of the slope movement. Unfortunately, to prove such assumption is rather complicated because of lack of quality and quantity data about the development of kinetic activity of the landslide masses. Two methodical procedures of the derivation of the relation between the degree of stability (determined from the results of regime observations) and kinetic activity of landslide (determined by the geodetic and inclinometric measurements) are presented in the paper. Input data has been obtained on the model landslide Okoličné near Liptovský Mikuláš town during its long-term monitoring. The great difficulty of studied relation and its affection by the number of factors have been proved. Nevertheless, in the case of strong dependency between analysed phenomena the critical levels of ground water may be informatively derived.

Key words: stability of slope, regime observations, geodetic and inclinometric measurement, monitoring

Úvod

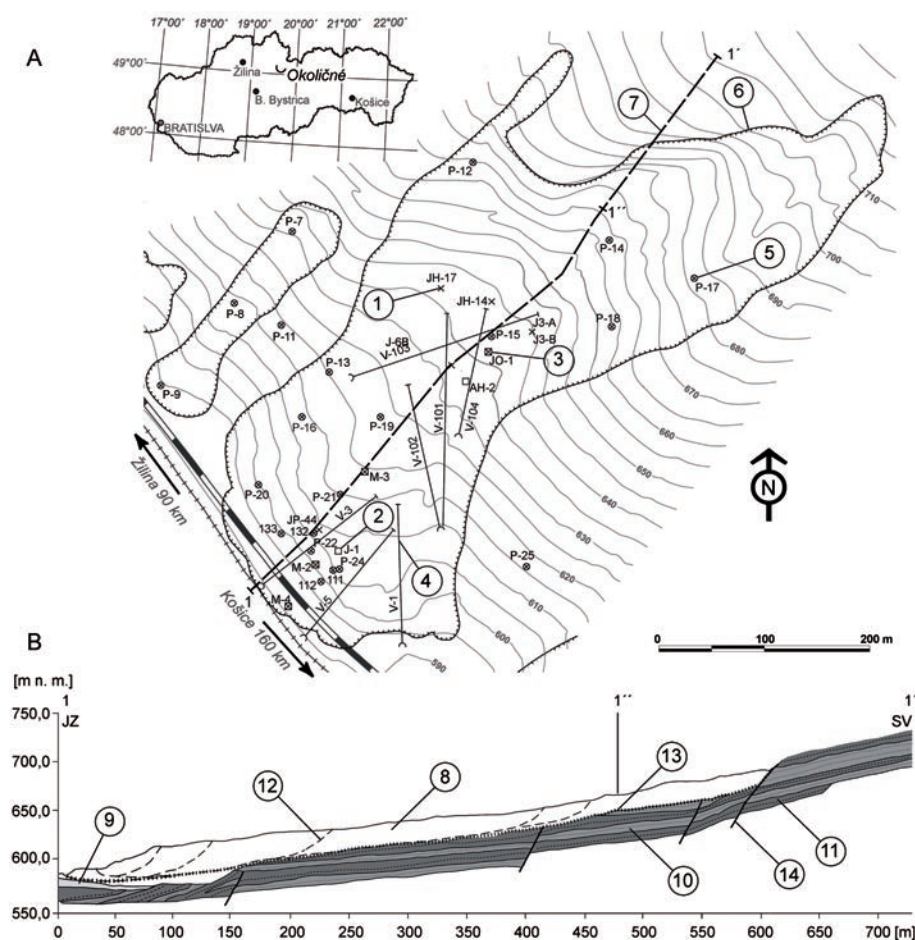
Vznik alebo aktiváciu zosuvných pohybov v podmienkach Západných Karpát najviac ovplyvňujú zmeny úrovne hladiny podzemnej vody. Preto pri posudzovaní stabilitného stavu zosuvných území je najdôležitejšie odvodenie vzťahu medzi kolísaním podzemnej vody a zosuvnou aktivitou. Štúdium vplyvu vody na pohybovú aktivitu zosuvných mas môže odhaliť závislosti, ktoré v budúcnosti umožnia s dostatočným predstihom indikovať blížiaci sa stabilitne nepriaznivý stav.

Cielom tohto príspevku je prispieť k poznaniu uvedenej závislosti na základe hlbšej analýzy vypočítaných hodnôt stability (určených pri rôznych úrovniach hladiny podzemnej vody) a nameraných parametrov pohybu zosuvných hmôt na modelovej lokalite zosuvu pri Okoličnom. Táto lokalita je známa dlhodobou pretrvávajúcim zosuvným ohrozením dôležitej železničnej tepny, ktorá spája východ a západ Slovenska. Kvôli tejto skutočnosti sa lokalita dostala do povedomia širokej odbornej verejnosti a okrem detailného zhodnotenia v záverečnej správe z prieskumu (Fussgänger et al., 1976) boli výsledky riešenia čiastkových problémov publikované vo viacerých odborných príspevkoch (Fussgänger a Jadroň, 1977; Scherer a Wagner, 1997; Wagner et al., 1997, 2000; Slivovský et al., 1998 a ďalší). Prehľadná informácia o lokalite sa nachádza aj v známom

monografickom diele Nemčoka (1982). Vzhľadom na celospoločenskú dôležitosť bola lokalita zaradená aj do súboru zosuvov monitorovaných v rámci riešenia úlohy *Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia*, ktorej objednávatelom je Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky a zhotovovateľom Štátny geologický ústav Dionýza Štúra (Klukanová, 1998). Vďaka riešeniu tejto úlohy sa na opisovanej lokalite v priebehu posledných 15 rokov zozbieralo množstvo údajov, ktoré charakterizujú vývoj režimu podzemnej vody a pohybovej aktivity zosuvných hmôt.

Charakteristika zosuvnej lokality

Zosuv sa nachádza v severovýchodnej časti intravilánu mesta Liptovský Mikuláš na južnom svahu s kótou Háj (746 m n. m.). Zosuvný pohyb sa aktivizoval v roku 1949 počas zdvojkolajňovania železničnej trate, keď pri terénnych úpravách bol podrezaný svah budovaný vrstvami paleogénnych ílovcov a pieskovcov. Išlo o reaktiváciu staršej svahovej poruchy, ktorá v minulosti vznikla v dôsledku laterálneho podrezávania svahu riekou Váh. V snahe stabilizovať zosuvný svah sa na lokalite v rokoch 1953 až 1976 uskutočnilo niekoľko etáp prieskumných a sanačných prác. Počas nich sa vybudovali viaceré sanačné a monitorovacie objekty. Kvôli možnosti



Obr. 1. Zosuvné územie Okoličné pri Liptovskom Mikuláši. **A** – situácia zosuvného územia so sieťou monitorovacích bodov; **B** – schematický geologický profil 1 – 1' (spracovaný podľa Fussgängera et al., 1976). 1 – hydrogeologické vrty; 2 – hydrogeologické vrty so zabudovaným hladinomerom; 3 – inklinometrické vrty; 4 – horizontálne odvodňovacie vrty; 5 – body geodetickej siete; 6 – ohraničenie zosuvu; 7 – línia schematického (1 – 1') a výpočtového (1 – 1'') profilu; 8 – zosuvné delúvium a podložné zvetrané ílovce; 9 – sedimenty riečnej terasy Váhu; 10 – paleogénne pieskovce; 11 – paleogénne ílovce; 12 – parciálne šmykové plochy; 13 – bazálna šmyková plocha; 14 – neogénne zlomy.

Fig. 1. Landslide area Okoličné near town Liptovský Mikuláš. **A** – the landslide area with location of the net of monitoring objects; **B** – schematic geological profile 1 – 1' (according to Fussgänger et al., 1976). 1 – hydrogeological boreholes; 2 – hydrogeological boreholes with automatic water-level indicator; 3 – inclinometric boreholes; 4 – horizontal drainage boreholes; 5 – the points of the geodetic net; 6 – border of the landslide; 7 – line of schematic (1 – 1') and computed (1 – 1'') profile; 8 – landslide deluvial deposits and weathered bedrock claystones; 9 – Váh river terrace fluvial deposits; 10 – Paleogene sandstones; 11 – Paleogene claystones; 12 – partial slip surfaces; 13 – basal slip surface; 14 – Neogene faults.

dokonalejšej kontroly aktuálneho stabilitného stavu svahu k nim neskôr pribúdali ďalšie objekty vrátane automatických hladinomerov.

V hodnotenom zosuvnom území sa vyvinulo viacero svahových porúch. Rozmermi aj aktivitou najvýraznejší zosuv má prúdový charakter s orientáciou hlavného pohybu zo SV na JZ (obr. 1A). Dĺžka zosuvu je 750 m, jeho celkové prevýšenie predstavuje 130 m (590 – 720 m n. m.). Akumulačná oblasť, ktorá má výrazne vyvinutý bočníkovitý tvar, je široká 290 m s relatívnym prevýšením oproti aluviálnej nive 20 m. Prechodová oblasť je široká približne 170 m a dosahuje relatívne prevýšenie 40 m. Najširšia časť zosuvu je odlučná oblasť, ktorá sa rozvetvuje na dve časti. Celková plocha postihnutého územia je 0,16 km². Západne od hlavného zosuvu vznikli v dôsledku nefunkčnosti starších odvodňovacích zariadení dva menšie zosuvy (obr. 1A).

Na geologickej stavbe zosuvného územia sa podieľajú horniny vnútrokarpatského paleogénu a kvartérne sedimenty (obr. 1B). Hranicu medzi paleogénnymi horninami a kvartérnym pokryvom tvorí eluviálny zvetraninový plášť. Paleogénne sedimenty majú flyšový charakter s prevládajúcou ílovcovou zložkou. Orientácia ich vrstvitosti je 290 až 310° / 5 až 35°.

Eluviálne a deluviálne uloženiny sú svojím charakterom a geotechnickými vlastnosťami veľmi príbuzné. Eluviálne sedimenty – navetrané až zvetrané ílovce a pieskovce – možno vyčleniť len v najvyšších polohách svahu. Smerom po svahu postupne prechádzajú do deluviálnych sedimentov a v prostredí nad bazálnou šmykovou plochou sú vyčlenené ako zosuvné delúvium. Tvoria ich prevažne svahové ílovité hliny, ktoré pri zvýšenom výskyte pevnejších úlomkov pieskovcov a ílovcov nadobúdajú charakter hlinitých a hlinito-kamenitých sutín. Čelo zosuvu je v dĺžke viac ako 50 m presunuté cez aluviálne štrkovité náplavy Váhu (Fussgänger et al., 1976 – obr. 1B).

Z hydrogeologického hľadiska možno v zosuvnom území vyčleniť viacero zvodnených horizontov. V najvyššie položených častiach územia nad odlučnou oblasťou prevláda hlbší obeh podzemných vôd nad obehom v pokryvných útvaroch. Podzemná voda v tejto oblasti sa viaže na tektonicky porušené až rozlúpané lavice pieskovcov. Smerom dolu po svahu (približne vo výške 650 m n. m.) sa tento pomer vyrovnáva a možno konštatovať, že oba obehly splyvajú. V týchto miestach sa podzemná voda dostáva pod málo priepustné až nepriepustné bariéry. Tým jej hladina získava napätý charakter s piezometrickou výškou značne presahujúcou úroveň terénu.

Lokálne napäté hladiny sa vyskytujú aj v telese zosuvného delúvia. Svahovým pohybom sa porušil pôvodný hydrogeologický režim. Výsledkom toho je vznik lokálnych zvodnených polôh. Tieto skutočnosti veľmi nepriaznivo ovplyvňujú stabilné pomery svahovej deformácie. Na úpätí svahu sa drenážnymi vlastnosťami prejavujú štrkovité a piesčité fluviálne náplavy rieky Váh, ktoré sú čiastočne postihnuté zosuvným pohybom (obr. 1B a 2).

Metodický postup riešenia

Postup riešenia úlohy pozostával z niekoľkých, vzájomne na seba nadväzujúcich etáp. Prvá etapa bola zameraná na zostavenie reprezentatívneho inžinierskogeologického modelu zosuvného svahu, jeho kvantifikáciu (t. j. výber reprezentatívnych fyzikálnych a mechanických vlastností hornín), výber výpočtových úrovní hladiny podzemnej vody a na výpočet stupňa stability na jednotlivých šmykových plochách pri rôznej úrovni hladiny podzemnej vody. V nasledujúcej etape sa vykonala analýza pohybovej aktivity zosuvných hmôt na základe výsledkov rôznych typov monitorovacích meraní počas vybraného obdobia monitorovania zosuvu. V poslednej etape riešenia sa získané výsledky stabilných riešení a zaznamenaných pohybových aktivít zosuvu zosúladi v čase, vzájomne sa porovnali a z takejto analýzy sa odvodili poznatky a závery.

Vplyv režimu podzemnej vody na stupeň stability svahu

Stupeň stability sa určoval na generalizovanom inžinierskogeologickom modeli zosuvného svahu pri rôznych úrovniach hladiny podzemnej vody (otázka výberu hladiny podzemnej vody je venovaná samostatná časť). Výpočtový profil bol zostavený na základe reálnych súradníc terénu a hĺbky šmykových plôch zistených pri

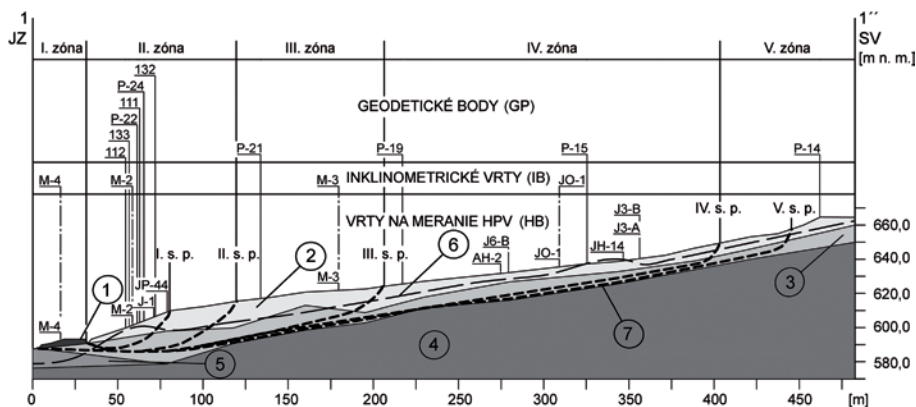
inžinierskogeologickom prieskume lokality (Fussgänger et al., 1976), ako aj z prác, v ktorých sa riešili stabilné pomery opisovaného územia (Mika in Klukanová et al., 1998).

Inžinierskogeologický profil (1 – 1'', obr. 2) prechádza centrálnou časťou najväčšieho prúdového zosuvu (obr. 1A). V profile s dĺžkou 481 m a s celkovým prevýšením 77,6 m je zachytených päť aktívnych šmykových plôch. Od čela zosuvu smerom k odľučnej oblasti profil prechádza cez terasové sedimenty rieky Váh, ktoré sú čiastočne prekryté sedimentmi zosuvného delúvia a umelým násypom železničnej trate, a pokračuje samotným zosuvným telesom. Podložie zosuvných deluviálnych sedimentov tvorí zvetraný horizont ílovcov, postupne prechádzajúci do neporušených ílovcov a pieskovcov vnútrokarpatského flyšu (obr. 2). Bazálna šmyková plocha, ktorá ohraničuje zosuv, vznikla počas staršej vývojovej fázy a z hľadiska súčasného vývoja zosuvného pohybu má prevažne stabilný charakter. Preto sa aj monitorovanie režimových ukazovateľov v oblasti nad aktívnymi šmykovými plochami výrazne zredukovalo. Vzhľadom na nedostatok informácií o režime podzemných vôd sa vo výpočtovom profile nehodnotí stabilita v celej dĺžke bazálnej šmykovej plochy.

Pri kvantifikácii výpočtového modelu sa z požadovaných vlastností hornín použil vždy spodný interval v rámci prevládajúceho rozsahu hodnôt objemovej tiaže suchej zeminy (γ) a efektívnych parametrov šmykovej pevnosti – uhla vnútorného trenia (φ) a súdržnosti (c), určených na vzorkách, ktoré sa odobrali z jednotlivých vrtov počas prieskumu. Na výpočet stupňa stability sa použila Woldtova metóda, ktorá umožňuje výpočet stupňa stability na ľubovoľnej polygonálnej šmykovej ploche. Softvér použitý pri stabilných výpočtoch umožňuje zohľadniť aj pozitívny vztlakový horizont podzemnej vody. Pri zostavovaní výpočtového modelu sa postupovalo v zmysle užívateľskej príručky (Kovářík, 2008). Vstupné údaje charakterizujúce vlastnosti jednotlivých litologických vrstiev sú uvedené v tab. 1.

Obr. 2. Profil 1 – 1'' so znázornením šmykových plôch pre stabilné výpočty. 1 – násyp železničnej trate; 2 – zosuvné delúvium; 3 – zvetrané paleogénne ílovce; 4 – neporušené paleogénne podložie flyšového charakteru; 5 – riečna terasa Váhu; 6 – modelová úroveň hladiny podzemnej vody; 7 – parciálne šmykové plochy (I. – V. s. p.), I. – V. zóna – vyčlenené úseky s monitorovacími objektmi.

Fig. 2. Profile 1 – 1'' with slip surfaces for stability calculation. 1 – railway embankment; 2 – landslide deluvial deposits; 3 – weathered Paleogene claystones; 4 – intact Paleogene bedrocks of Flysch character; 5 – Váh river terrace fluvial deposits; 6 – model ground water level; 7 – partial slip planes (I. – V. s. p.), I. – V. zone – determined parts of slope with monitoring objects; GP – geodetic points; IB – inclinometric boreholes; HB – hydrogeological boreholes.



Tab. 1

Inžinierskogeologické vlastnosti hornín vstupujúce do výpočtového modelu (Fussgänger et al., 1976)
Engineering geological properties of rocks and soils inputted into computing model (Fussgänger et al., 1976)

Litologický opis	Objemová tiaž γ [kN · m ⁻³]	Uhol vnútorného trenia φ [°]	Súdržnosť c [kPa]
Navážka, železničný násyp	20,00	15,00	10,00
Alúvium – štrk	20,00	30,00	0,00
Zosuvné delúvium – íl	19,17	19,80	0,00
Zvetraná ílovitá bridlica	20,10	21,10	0,00
Ílovitá bridlica	20,79	27,00	0,03

V súlade s manuálom (Kovářík, 2008) uvedené hodnoty predstavujú objemovú tiaž suchej zeminy a efektívne hodnoty šmykových parametrov na úrovni šmykovej plochy.

In accordance with the manual (Kovářík, 2008), the stated values represent the unit weight of dry soil and the effective values of the shearing parameters on the slip surface.

Dynamickou zložkou vo výpočtovom modeli, priamo ovplyvňujúcou určený stupeň stability, je premenlivá úroveň hladiny podzemnej vody. Informácia o jej režime pochádza z výsledkov dlhodobého monitorovania na 11 pozorovacích objektoch (vrty M-4, M-2, J-1, JP-44, M-3, AH-2, J6-B, JO-1, JH-14, J3-A, J3-B – obr. 1A, obr. 2). Merania na spomenutých objektoch sa vykonávajú v pravidelných týždňových intervaloch. Výnimku tvoria objekty, v ktorých sú umiestnené automatické hladinomeromery (J-1, AH-2). V nich sa hĺbka hladiny podzemnej vody zaznamenáva každú hodinu. Kolmá vzdialenosť pozorovacích objektov od línie profilu je do 45 m.

Monitorované objekty pochádzajú z rôznych etáp prieskumu, resp. sanácie zosuvného územia, pričom aj účel ich realizácie bol rozdielny. Z hľadiska využiteľnosti na režimové pozorovania sú najvhodnejšie vrty JH-14, J-1 (od roku 1996 s umiestneným automatickým hladinomerom), J6-B, J3-A a J3-B (pôvodne zabudované pre dva zvodnené horizonty). Tieto vrty sa realizovali počas prieskumu v rokoch 1972 až 1976 a boli vystrojené na režimové pozorovania. V októbri roku 2005 k nim pribudol vrt AH-2, vybudovaný kvôli umiestneniu zariadenia na automatický záznam úrovne hladiny podzemnej vody v režime on-line. Špeciálne postavenie v spomenutej skupine vrtov má vrt JH-14. Jeho situovanie v zóne so silným vztlakovým horizontom podzemnej vody spôsobuje stály preliv podzemnej vody cez ústie pažnice. Tento stav vyvolal isté problémy s interpretáciou úrovne hladiny, keďže na danom objekte sa sleduje výdatnosť v l · min⁻¹. Na základe výsledkov čerpacej skúšky vykonanej v roku 1975 (Fussgänger et al., 1976) RNDr. P. Malík, CSc., zo Štátneho geologického ústavu D. Štúra v Bratislave pomocou zaužívaných postupov uvedených v práci Muchu a Šestakova (1987) stanovil závislosť medzi vytekajúcim množstvom vody z vrtu a piezometrickou výškou hladiny podzemnej vody. To umožnilo transformovať merania výdatnosti na údaj použiteľný v stabilnom výpočte.

Zásadným metodickým problémom je výber takej hĺbky hladiny podzemnej vody, ktorá vyvoláva nepriaznivý vplyv na stabilný stav svahu. Preto sa hlavná pozornosť venovala vysokým stavom hladiny podzemnej vody, ktoré spôsobujú nárast šmykových napätí, ako aj zníženie šmykového odporu. Výsledkom toho môže byť následná

reaktivácia svahového pohybu. Výber nepriaznivej hladiny sa uskutočňuje v súlade s monitorovacími cyklami v časovo obmedzenom intervale, ktorým je jeden kalendárny rok. Na odvodenie takejto, zo stabilného hľadiska najmenej priaznivej hladiny sa zvolil postup, ktorý je znázornený na obr. 3. V rámci vymedzeného obdobia (jeden kalendárny rok) sa vybralo meranie, v ktorom hladina podzemnej vody bola súčasne vo všetkých pozorovaných objektoch najbližšie k povrchu terénu. Toto meranie charakterizuje moment, v ktorom sa priemerná hĺbka určená zo všetkých meraných hladín na lokalite nachádzala najvyššie, t. j. najbližšie k úrovni terénu. Matematicky možno tento stav vyjadriť vzťahom

$$N_{hpv} = \min \left(\frac{\sum h_{ii}}{\sum V_i} \right),$$

kde N_{hpv} je hľadaná hodnota, ktorá charakterizuje meranie s najnepriaznivejšou hladinou podzemnej vody, h_{ii} predstavuje hĺbku hladiny podzemnej vody zaznamenanú v každom pozorovanom objekte počas jedného merania a V_i predstavuje počet meraných objektov. Hladiny zaznamenané počas tohto merania sa dosadzovali do výpočtového modelu na určenie stability svahu.

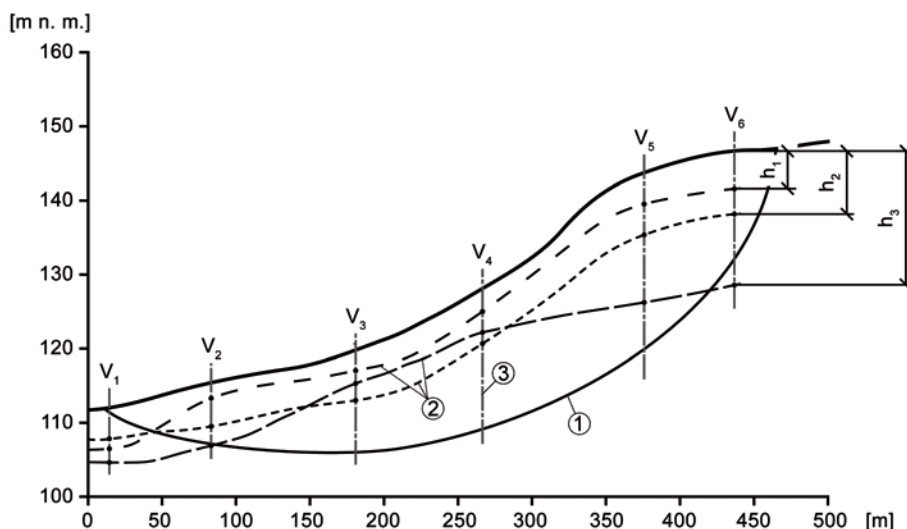
Stanovenie deformácie zosuvného územia a analýza výsledkov

Na modelovej lokalite sa prejavy pohybovej aktivity pravidelne pozorujú na povrchu svahovej deformácie pomocou geodetických meraní a pod povrchom – na úrovni šmykových plôch – metódou presnej inklinometrie. Merania geodetickej siete sa vykonávajú od roku 1971 dodnes. Spočiatku sa realizovali dvakrát do roka, od roku 1999 sa ich frekvencia znížila na jedno meranie ročne. Inklinometrické merania sa začali vykonávať v roku 1993 a realizujú sa dodnes jedenkrát ročne. Etapy meraní obidvomi metódami boli časovo nejednotné, a preto od roku 2001 je snaha ich synchronizovať (merania vykonávať raz ročne na sklonku jarného obdobia).

Geodetické a inklinometrické objekty sa rozdelili na päť zón tak, aby zaznamenaná deformácia dostatočne

Obr. 3. Modelový príklad stanovenia najnepriaznivejšej hladiny podzemnej vody na fiktívnom zosuvnom svahu. 1 – šmyková plocha; 2 – hladina podzemnej vody zaznamenaná v rôznom čase; 3 – objekt na pozorovanie režimu podzemnej vody.

Fig. 3. Model example of the most unfavourable ground water level determined on the fictitious landslide slope. 1 – slip surface; 2 – ground water levels recorded in various time periods; 3 – ground water regime observation object.



odrážala pohyby na jednotlivých hodnotených šmykových plochách (obr. 2). V prvej zóne je zachytená deformácia na piatej šmykovej ploche v predpolí čela zosuvu v oblasti železničného násypu vo vrte M-4 v hĺbke 2 m pod terénom. Deformácia druhej zóny je monitorovaná na povrchu geodetickými bodmi 112, 133, 132, 111, P-22 a P-24 a pod povrchom vo vrte M-2 v hĺbke 10,0 m pod terénom. V tretej zóne je povrchová deformácia monitorovaná geodetickým bodom P-21 a na úrovni šmykovej plochy vo vrte M-3 v hĺbke 17,5 m pod terénom. Deformáciu povrchového horizontu štvrtej zóny charakterizujú merania na geodetických bodoch P-19 a P-15 a pod povrchom terénu na úrovni šmykovej plochy vo vrte JO-1 v hĺbke 10,5 m pod povrchom terénu. Deformácia v piatej, najvyššie položennej zóne je pozorovaná zmenami polohy geodetického bodu P-14.

Pri analýze pohybovej aktivity sa v geodetických meraniach uvažuje s priestorovým vektorom pohybu v smere osí XYZ. V inklinometrických meraniach sa analyzuje hodnota smerového vektora v rovine osí XY.

Geodeticky a inklinometricky namerané deformácie sa v záverečnej etape riešenia porovnávali s hodnotami

vypočítaného stupňa stability v každom posudzovanom kalendárnom roku a analyzoval sa vzájomný vzťah vypočítaných a nameraných hodnôt.

Výsledky riešenia problematiky

V súlade s opísanou metodikou sú v tejto časti prezentované výsledky získané v jednotlivých etapách riešenia.

Výber kritickej hladiny podzemnej vody

Zo súboru meraní rozčlenených na intervaly kalendárneho roku sa vybrala najvyššia úroveň, zaznamenaná súčasne vo všetkých pozorovacích objektoch.

V prvom hodnotenom roku 1999 sa najnepriaznivejšia hladina vo svahu vytvorila začiatkom mája ako dôsledok pretrvávajúceho vysokého stavu hladiny podzemnej vody vo vrte M-2 a následného stúpnutia hladín vo vrtoch JO-1 a JP-44. Situácia s podobným priebehom sa opakovala aj v roku 2000. Oveľa výraznejšie stúpala podzemná voda počas marca a apríla roku 2001. Vtedy hladina podzemnej

Tab. 2

Hĺbka hladiny podzemnej vody v jednotlivých meraných objektoch v termíne jej najnepriaznivejšieho stavu na celej lokalite
The depth of groundwater level in measured objects during its most unfavorable state on the whole locality

Hodnotený rok	Dátum merania s najnepriaznivejšou h. p. v.	Hĺbka h. p. v. pod terénom v monitorovaných objektoch [m]										
		M-4	M-2	J-1	JP-44	M-3	AH-2	J6-B	JO-1	JH-14	J3-A	J3-B
1999	4. 5. 1999	12,76	1,62	5,52	11,05	12,22		2,39	4,42	-10,45	8,84	4,49
2000	10. 5. 2000	12,05	2,75	4,91	6,44	10,79		2,36	4,22	-11,00	8,55	4,15
2001	30. 4. 2001	12,41	1,75	4,70	6,53	10,52		2,02	3,13	-9,53	7,37	2,60
2002	14. 3. 2002	12,51	1,77	5,53	18,91	9,84		1,93	3,68	-8,07	8,00	3,17
2003	15. 5. 2003	12,53	2,96	5,36	19,40	9,81		2,01	4,70	-7,15	8,37	4,55
2004	6. 8. 2004	12,96	16,79	7,43	18,75	11,10		2,60	5,04	-4,58	9,41	4,41
2005	11. 5. 2005	12,25	7,95	4,62	15,88	10,20		1,87	3,54	-11,37	7,82	2,72
2006	26. 4. 2006	12,30	7,29	4,23	6,00	9,66	2,54	1,93	4,22	-11,92	8,54	4,00
2007	24. 3. 2007	12,45	15,61	5,60	19,48	9,40	2,74	1,90	4,40	-14,67	8,78	4,27

vody dvakrát po sebe prudko stúpila a koncom apríla dosiahla ročné maximum súčasne v štyroch vrtoch (JP-44, M-3, JO-1 a J3-A). Tým vytvorila najnepriaznivejšiu úroveň hladiny v hodnotenom roku. Trend jarného vzostupu hladiny podzemnej vody sa opakoval aj v nasledujúcich rokoch 2002 a 2003.

Pozitívny stav podzemnej vody z hľadiska stability sa zaznamenal v roku 2004, keď sa hladina podzemnej vody nachádzala z dlhodobého hľadiska najhlbšie. Táto celkovo nízka úroveň hladiny začala stúpať od prvého marcového merania v roku 2005 a najnepriaznivejší stav dosiahla na prelome mesiacov apríl a máj (11. 5. 2005). Analogická situácia sa zaznamenala aj v rokoch 2006 a 2007. Dátumy s najnepriaznivejšou hladinou podzemnej vody odvodenou pre celú lokalitu sú spoločne s úrovňou hladiny v jednotlivých meraných objektoch zhrnuté v tab. 2.

Výpočet stability

Odvozená najmenej priaznivá hladina podzemnej vody bola aplikovaná pri výpočte stupňa stability svahu v jednotlivých hodnotených rokoch.

Podľa výsledkov výpočtov je najnestabilnejšia prvá a druhá šmyková plocha (obr. 4). Najnižší stupeň stability bol na prvej šmykovej ploche určený počas pôsobenia hladiny podzemnej vody z konca apríla roku 2001. Výpočtovo priaznivé hodnoty stability boli určené pre stav hladiny podzemnej vody v roku 2004 (obr. 4-I. a 4-II.). Počas tohto roku stupeň stability ani v jednom prípade nepoklesol pod hodnotu medznej rovnováhy.

Na úrovni tretej šmykovej plochy možno za najnestabilnejšie obdobie považovať koniec apríla v roku 2006. Stupeň stability síce nedosiahol hodnotu medznej rovnováhy, no nachádzal sa tesne nad $F_s = 1,2$ (obr. 4-III.).

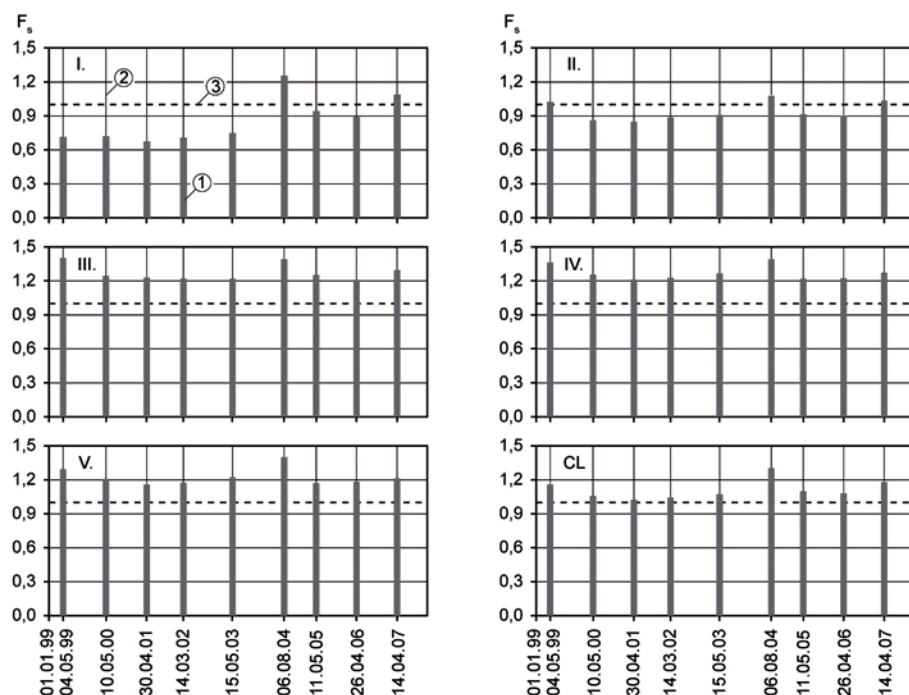
Na štvrtej a piatej šmykovej ploche sa najnižšia stabilita zaznamenala koncom apríla v roku 2001. Aj v týchto úsekoch sa pozitívne prejavila hlboko poklesnutá hladina z roku 2004. Pre toto obdobie sa na oboch šmykových plochách vypočítali najpriaznivejšie hodnoty stupňa stability (obr. 4).

Zhodnotenie zosuvnej aktivity

Deformácie zaznamenávané v I. zóne vo vrte M-4 charakterizujú pohyb čela piatej šmykovej plochy. Najväčšie hodnoty pohybu sa tu dosiahli v rokoch 2007 a 2002 (obr. 5).

V akumulačnej oblasti (II. zóna) sa geodetickými meraniami najvýraznejšia aktivita zaznamenala počas rokov 2006 a 2007 (obr. 5B). V oboch rokoch sa na hodnote priestorového vektora najvýraznejšie prejavila jeho vertikálna zložka. V roku 2006 sa napríklad v bode 133 zaznamenal zdvih s hodnotou 116,00 mm a v nasledujúcom roku sa smer pohybu zmenil na pokles s hodnotou 127,0 mm (obr. 5A). Analogický priebeh deformácie sa počas týchto dvoch rokov namerl vo väčšine pozorovacích bodov tejto zóny. Pod povrchom, na úrovni šmykovej plochy vo vrte M-2, sa zaznamenal najväčší pohyb v roku 2004, a to v polovici apríla (obr. 6A). Pre túto šmykovú plochu sú významné aj pohyby zaznamenané v rokoch 2005 a 2007. Z hľadiska zosuvnej aktivity II. zóny je mimoriadne dôležitý rok 2007, keď extrémne veľká deformácia bola pozorovaná súčasne v povrchovej aj podpovrchovej časti svahu. Naopak, najmenšie deformácie sa zaznamenali v roku 1999, keď väčšina nameraných zmien geodetickej siete nepresiahla hodnotu chyby použitej metódy.

V tretej zóne sa počas hodnoteného obdobia nevyskytli také výrazné prejavy deformácie ako v druhej zóne.



Obr. 4. Vyhodnotenie stupňa stability na parciálnych šmykových plochách. I. – V. – stupeň stability na 1. až 5. šmykovej ploche; CL – priemerná hodnota stupňa stability stanovená pre celú lokalitu; 1 – vypočítaná hodnota stupňa stability; 2 – termín merania hladiny podzemnej vody, ktoré bolo v hodnotenom roku označené ako najnepriaznivejšie; 3 – úroveň medznej rovnováhy $F_s = 1,00$.

Fig. 4. Evaluation of the degree of stability on the partial slip surfaces. I. – V. – degree of stability on the I. – V. slip surface; CL – average degree of stability for the whole locality; 1 – computed value of degree of stability; 2 – date of the ground water level measurement, selected as the most unfavourable state in the evaluated year; 3 – level of limit stability $F_s = 1,00$.

Geodeticky najväčší pohyb sa zaznamenal v roku 2002. Na šmykovej ploche sa najväčšia deformácia zaznamenala počas júňového merania v roku 2007 a o niečo menšie deformácie v rokoch 2003 a 2004 (obr. 6A).

Na povrchu v štvrtej zóne sa počas hodnoteného obdobia namerali vektory pohybu, ktoré nepresiahli hodnotu chyby merania a skôr poukazujú na neaktívny stav tejto oblasti (obr. 5D). Odlišný charakter má horizont na úrovni šmykovej plochy, meraný vo vrte JO-1. Zosuvný pohyb tu bolo možné indikovať predovšetkým v rokoch 2000, 2005 a 2007 (obr. 6). Najväčšia hodnota pohybu sa namerala počas júňového merania v roku 2007.

Najväčšia deformácia povrchového horizontu v V. zóne sa zaznamenala v roku 2000 (obr. 5E).

Porovnanie vypočítaného stupňa stability a nameraných deformácií

Nájdienie zákonitostí medzi vypočítaným stupňom stability a nameranou deformáciou prostredia je základom definovania vzťahu: stav hladiny podzemnej vody – vypočítaná stabilita – zaznamenaná deformácia. Zhodnotením pohybovej aktivity na základe vykonaných monitorovacích meraní a jej porovnaním s odvodeným stupňom stability možno teda buď preukázať korelačný potenciál daného vzťahu, alebo poukázať na nevyhnutnosť modifikácie metodického postupu riešenia a potrebnosť zohľadnenia ďalších faktorov, ktoré sú súčasťou veľmi zložitého študovaného systému.

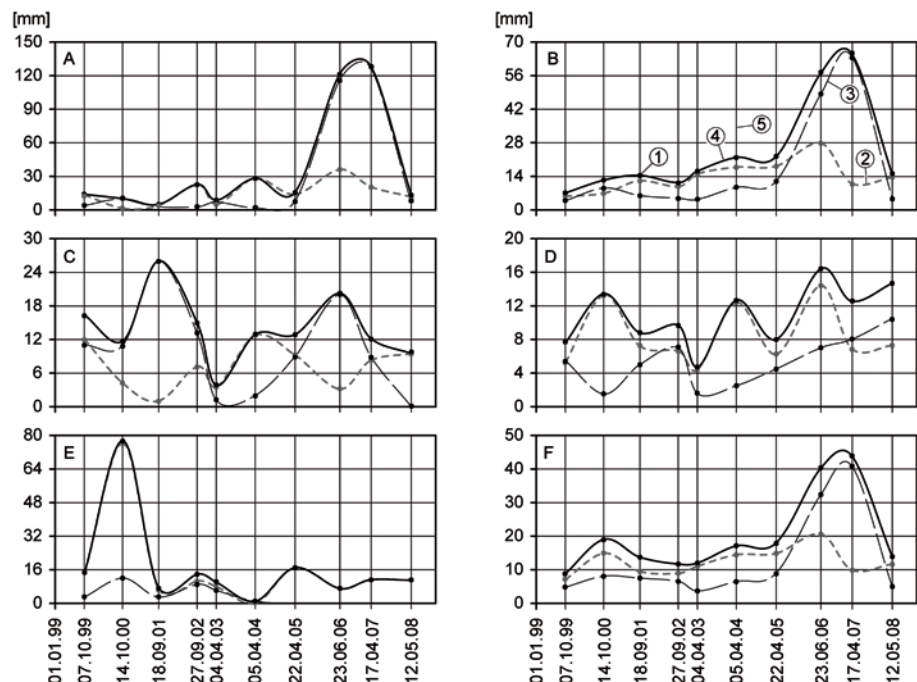
Na základe vykonaných výpočtov stupňa stability na piatich šmykových plochách ako významné obdobia možno označiť roky 2001 a 2004. V roku 2001 bol stupeň stability na I., II., IV. a V. šmykovej ploche najnižší za celé hodnotené obdobie (obr. 4). Naopak, v roku 2004 nastal veľmi pozitívny vývoj stability. Ani počas najnepriaznivejšieho obdobia stupeň stability neklesol pod hodnotu medznej rovnováhy ani na jednej hodnotenej šmykovej ploche.

Pri hodnotení pohybovej aktivity v roku 2001 na vysokú úroveň hladiny podzemnej vody, a teda aj na nepriaznivý stav stupňa stability zareagovala zvýšenou pohybovou aktivitou oblasť bodov M-3 (tretia šmyková plocha) a P-21. Práve na monitorovacom objekte P-21 nastali počas tejto etapy najväčšie zmeny za celé monitorované obdobie (posuv 26,019 mm).

Porovnanie výpočtového stupňa stability a nameraných deformácií v hodnotenom roku 2001 preukazuje však aj paradoxnú situáciu, keď zaznamenaná zosuvná aktivita vykazovala v značnej časti hodnoteného profilu opačné výsledky, ako by bolo možné očakávať. Ak porovnáme merania pohybovej aktivity z roku 2001 s meraniami vykonanými v predchádzajúcej etape, môžeme konštatovať, že aktivita zosuvného pohybu sa čiastočne stlmila (obr. 5F a 6). Upokojenie pohybovej aktivity vyplýva najmä z meraní v bodoch P-14 a P-15. Ďalší výrazný pokles aktivity nastal aj na štvrtej šmykovej ploche (zaznamenaný v inklinometrickom vrte JO-1). V nesúlade s očakávaným vývojom je aj vzťah stupňa stability stanoveného pre prvú a druhú šmykovú plochu a nameranej deformácie v tejto oblasti.

Obr. 5. Veľkosť zaznamenaných deformácií na vybraných bodoch geodetickej siete. **A** – namerané pohyby na bode 133; **B** – priemerné pohyby zaznamenané na bodoch I. zóny; **C** – namerané pohyby na bode P-21; **D** – priemerné pohyby zaznamenané na bodoch IV. zóny; **E** – namerané pohyby na bode P-14; **F** – priemerný pohyb zaznamenaný na všetkých hodnotených geodetických bodoch; **1** – veľkosť deformácie; **2** – spojnice zaznamenaných polohových vektorov; **3** – spojnice zaznamenaných vertikálnych vektorov; **4** – spojnice zaznamenaných priestorových vektorov; **5** – etapa merania.

Fig. 5. Values of registered deformations on selected points of the geodetic net. **A** – measured displacements on the point 133; **B** – average displacements on the points of the I. zone; **C** – measured displacements on the point P-21; **D** – average displacements on the points of the IV. zone; **E** – measured displacements on the point P-14; **F** – average displacements on the whole evaluated geodetic points; **1** – values of deformation; **2** – join line of measured position vectors; **3** – join line of measured vertical vectors; **4** – join line of measured spatial vectors; **5** – the stage of measurement.



Stupeň stability v týchto zónach poklesol na najnižšiu úroveň v hodnotenom období, ale priemerná deformácia pre túto oblasť neprekročila chybu použitej metódy.

Najpriaznivejšie hodnoty stupňa stability zaznamenané počas roku 2004 indikujú upokojenie pohybovej aktivity zosuvu. Tento predpoklad sa potvrdil najmä v odľučnej oblasti na piatej šmykovej ploche (V. zóna), ale aj na veľkej časti geodetických bodov, ktorých posuvy nepresiahli chybu použitej meracej metódy. V porovnaní s predchádzajúcim obdobím pokles pohybovej aktivity sa zaznamenal aj na šmykových plochách monitorovaných vo vrtoch M-3 a M-4. Výnimkou sú namerané deformácie na prvej šmykovej ploche v oblasti vrtu M-2, kde práve počas tejto etapy sa zaznamenal najvýraznejší pohyb za celé monitorované obdobie. Možno predpokladať, že zaznamenané prejavy pohybovej aktivity sú výsledkom postupného dotvárania geometrie svahu v dôsledku pôsobenia zvýšenej hladiny podzemnej vody z predchádzajúcich rokov.

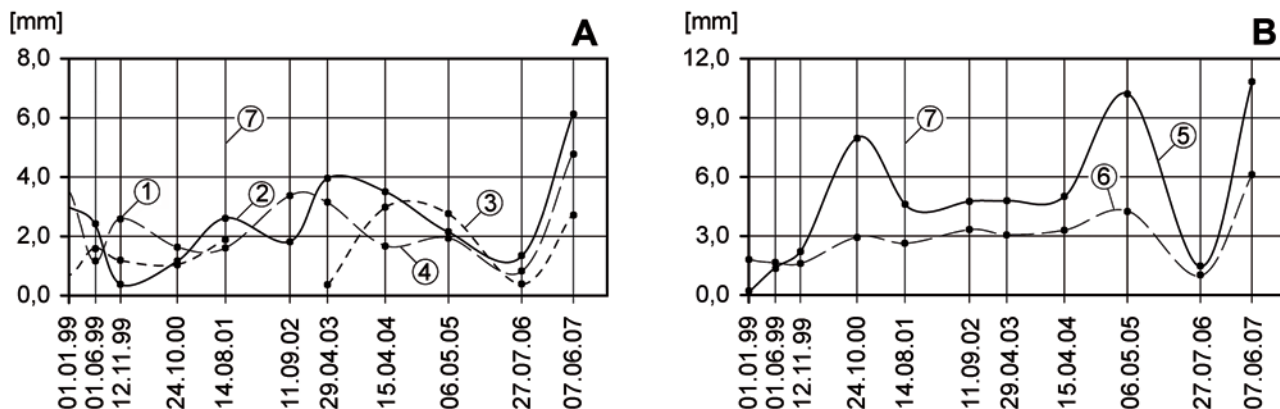
Na základe nameraných a spracovaných skutočností nie je možné jednoznačne preukázať a potvrdiť závislosť medzi úrovňou hladiny podzemnej vody (a z nej odvodeným stupňom stability) a pohybovou aktivitou zosuvných hmôt. Pri analýze vzťahu stupňa stability a pohybovej aktivity z opačnej strany, z hľadiska pohybu zosuvnej masy, sú pohybovo aktívne obdobia v jednotlivých zónach definovaných v predchádzajúcej kapitole časovo nejednotné. V niektorých prípadoch pozorované javy v jednotlivých zónach môžu mať protichodný charakter (zaznamenaný aktívny stav v jednej zóne sa počas tej istej etapy merania môže v inej zóne prejavovať ako obdobie zosuvného upokojenia). Tento stav je charakteristický najmä pre povrchový horizont, v ktorom sa deformácia zaznamenáva meraniami na geodetickej sieti. Čiastočne odlišné sú výsledky meraní realizovaných metódou presnej inklinometrie. Ide napríklad o meranie z roku 2007, keď vo všetkých monitorovacích objektoch sa zaznamenala výrazná akcelerácia pohybu. Toto meranie má z hľadiska hodnotenia deformácií na šmykových plochách veľký

význam, pretože svedčí o aktivácii pohybu pozdĺž celého profilu a namerané hodnoty deformácie sú vo väčšine prípadov najvyššie za celé hodnotené obdobie. Príčina tohto významného pohybu nevyplýva jednoznačne z vypočítaného stupňa stability pre najmenej priaznivý stav hladiny podzemnej vody v danom roku. Pravdepodobnejšia je úvaha o retardácii vplyvu podzemnej vody na stabilný stav svahu. V roku 2006 sa vypočítal najnižší stupeň stability na tretej šmykovej ploche. To pravdepodobne vytvorilo podmienky na aktiváciu zosuvného pohybu.

Roky 2006 a 2007 sú významné aj z hľadiska zosuvnej aktivity v povrchovom horizonte. Zaznamenaná aktivita v tomto horizonte nie je taká jednotná, ako na úrovni šmykových plôch. Výsledná hodnota priemerného pohybu geodetickej siete je však najvýraznejšia práve v spomenutých rokoch. Je to spôsobené predovšetkým intenzívnymi pohybmi bodov v čele svahovej deformácie vo vertikálnom smere.

V uvedenom príklade z rokov 2006 a 2007 sú isté náznaky vzťahu medzi stupňom stability a nameraným pohybom. Nie je však zodpovedaná otázka, prečo takýto výrazný pohyb nenastal na prvej a druhej šmykovej ploche v čase, keď stupeň stability bol pod hodnotou medznej rovnováhy (napr. v rokoch 2000 až 2003). Určitým vysvetlením je to, že v uvedených rokoch sa zaznamenala veľmi vysoká hladina podzemnej vody prevažne v oblasti čela zosuvu. Táto skutočnosť spôsobila zníženie stupňa stability na všetkých šmykových plochách, no najmä na prvej a druhej šmykovej ploche.

Okrem konkrétnych praktických výstupov (preukázanie najnepriaznivejšieho stabilného stavu svahu v rokoch 2001, 2006 a 2007, odvodenie nepriaznivých úrovní hladiny podzemnej vody v jednotlivých pozorovaných objektoch, zaznamenanie nameraných deformácií zodpovedajúcich kritickému stabilnému stavu) vykonaná analýza názorne preukázala skutočnosť, že vzťah medzi stavom hladiny podzemnej vody a zaznamenanou pohybovou aktivitou svahu nie je vôbec taký jednoduchý, ako sa tradične



Obr. 6. Zaznamenané hodnoty deformácie na úrovni šmykových plôch. 1 – veľkosť deformácie, spojnica zaznamenaných pohybov; 2 – na III. šmykovej ploche v bode M-3; 3 – na I. šmykovej ploche v bode M-2; 4 – na V. šmykovej ploche v bode M-4; 5 – na IV. šmykovej ploche v bode JO-1; 6 – spojnica priemerných hodnôt pohybu na všetkých šmykových plochách; 7 – etapa merania.

Fig. 6. Recorded values of deformation on the slip surfaces level. 1 – values of deformation, join line of the movements; 2 – on the III. slip surface in the borehole M-3; 3 – on the I. slip surface in the borehole M-2; 4 – on the V. slip surface in the borehole M-4; 5 – on the IV. slip surface in the borehole JO-1; 6 – join line of average value of movement on the whole slip surfaces; 7 – the stage of measurement.

prezentuje v teoretických úvahách i praktických riešeniach. Túto skutočnosť nesporne ovplyvňuje kvalita vstupných údajov (či už z meraní hĺbky hladiny podzemnej vody alebo meraní deformácií prostredia), ale aj mnohé ďalšie faktory, ktoré nie sú v analýze zahrnuté, no uvedený vzťah môžu významne ovplyvňovať.

V snahe výstižnejšie preukázať analyzovaný vzťah a odvodiť hodnoty, ktoré možno považovať za kritické, bol vytvorený modifikovaný postup riešenia problematiky.

Modifikovaný metodický prístup

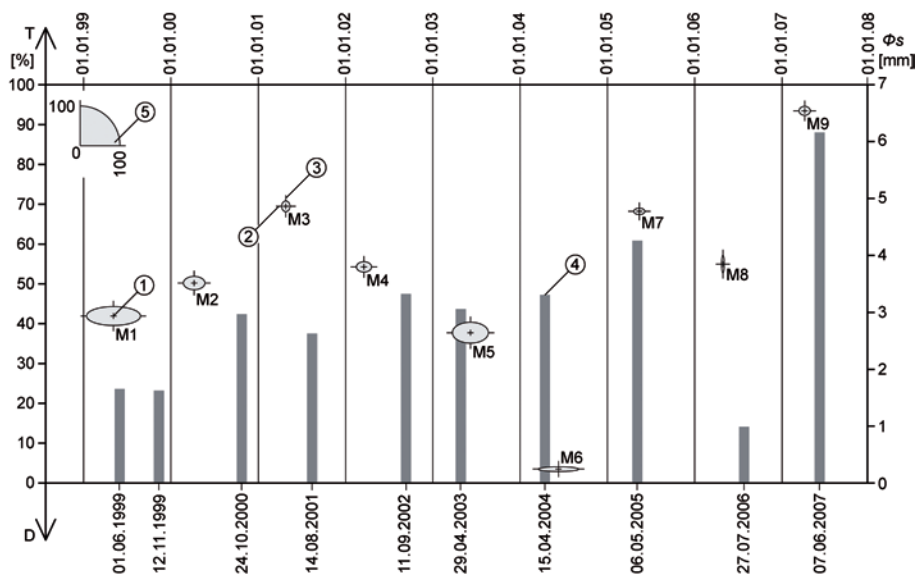
Podobne ako v predchádzajúcej časti príspevku, aj pri modifikovanom metodickom postupe hlavnú úlohu zohrávajú informácie o režime podzemnej vody. Celá analýza je orientovaná najmä na dosiahnutý maximálny stav hladiny podzemnej vody v pozorovacích objektoch počas hodnotených rokov. Hodnotenie je zamerané na význam dosiahnutého maxima z dlhodobého hľadiska, ale aj vplyv jeho výskytu počas hodnoteného roku. Základnou myšlienkou tohto postupu je predpoklad, že dosiahnutie významného (extrémneho) maximálneho stavu hladiny podzemnej vody v krátkom časovom úseku zaznamenané v celom zosuvnom telese spôsobí aktiváciu pohybu zosuvných hmôt.

Informácie o hladine podzemnej vody pochádzajú zo zúženého súboru pozorovacích objektov. Boli z neho vyradené objekty, ktoré pre svoje vystrojenie vnášajú do zaznamenávanej informácie o priebehu hladiny podzemnej vody určitú neistotu (ide o vrty M-2 a JH-44). Vyradený bol

aj vrt AH-2 s nekompletným časovým radom údajov, ktorý by mohol skresliť výsledky analýzy, a nakoniec aj vrt M-4, zaznamenávajúci hladinu mimo hodnoteného zosuvného delúvia. Výsledný súbor monitorovacích objektov teda pozostáva zo siedmich vrtov (J-1, M-3, J6-B, JO-1, JH-14, J3-A, J3-B).

Zo súboru meraní rozčlenených na jednotlivé kalendárne roky sa pre každý monitorovací objekt vybralo meranie, ktoré zaznamenalo maximálnu úroveň hladiny podzemnej vody. Časová nejednotnosť výskytu nameraných maximálnych stavov a veľká rôznorodosť v zaznamenanej hĺbke maximálnej úrovne hladiny počas hodnoteného obdobia (aj v prípade jedného pozorovacieho objektu) vytvárali určitú bariéru pri analýze vzťahu podzemnej vody s pohybovou aktivitou. Preto sa údaje upravili tak, aby bolo možné lepšie sledovať podmienky, ktoré vplyvajú na pohybovú aktivitu zosuvného územia. Pri úprave maximálnych stavov sa použil nasledujúci postup:

– kvantitatívne vyjadrená hĺbka hladiny podzemnej vody sa transformovala na percentuálnu hodnotu, ktorá vyjadruje význam ročného maxima hladiny podzemnej vody, k nameranému maximu na danom objekte za celé monitorované obdobie (maximálna hladina zaznamenaná za celé hodnotené obdobie v určitom pozorovacom objekte najbližšie k povrchu terénu predstavovala najvyššiu percentuálnu váhu – 100 %; minimálna hladina, ktorá sa nachádzala najhlbšie, predstavovala najnižšiu percentuálnu váhu – 0 %);



Obr. 7. Zhodnotenie vplyvu maximálnych stavov hladiny podzemnej vody. 1 – bod „M“; 2 – os elipsy, ktorá vyjadruje časový faktor výskytu maxím stavov podzemnej vody; 3 – os elipsy, ktorá vyjadruje rozptyl percentuálnej váhy zaznamenaných maxím úrovní podzemnej vody na pozorovaných objektoch počas roka; 4 – priemerná hodnota deformácie zaznamenaná na úrovni šmykových plôch; 5 – mierka rozptylu hodnotených údajov vyjadrených elipsami; T – úroveň terénu; D – dno vrtu; ϕ_s – priemerná deformácia zaznamenaná na úrovni šmykových plôch.

Fig. 7. Evaluation of the influence of maximal states of ground water level. 1 – the point „M“; 2 – center line of ellipse which expresses time factor of occurrence of maximal states of ground water; 3 – center line of ellipse which expresses dispersion of percentage weight of recorded maximal levels of ground water registered on the observed objects during a year; 4 – average value of deformation recorded on the level of slip surface; 5 – scale of dispersion of assessed data expressed by ellipse; T – ground level; D – borehole bottom; ϕ_s – average value of the deformation on the slip surfaces.

– k obdobiu každého kalendárneho roka sa priradila priemerná hodnota percentuálnej váhy stanovenej pre jednotlivé pozorovacie objekty (vyjadrená bodom M s hodnotami na osi y – obr. 7), teda čím je hodnota M bližšia k 100 %, tým je väčší predpoklad vplyvu podzemnej vody na pohybovú aktivitu zosuvu;

– bod M je okrem takto definovanej pozície ovplyvnený rozptylom časového výskytu maximálnej úrovne v jednotlivých pozorovaných objektoch; spolu s rozptylom hodnôt kolísania hladín sú tieto skutočnosti vyjadrené tvarom elipsy so stredom v bode M;

– zhodnotenie parametra rozptylu výskytu maximálnej hladiny podzemnej vody v čase (počas kalendárneho roka) sa vykonalo nasledujúcim postupom:

- v prvom kroku sa stanovil dátum (vyjadruje pozíciu bodu M na osi x – obr. 7), ktorý predstavuje priemernú hodnotu dátumov zachytávajúcich maximálny stav hladiny podzemnej vody na pozorovacích objektoch; tento postup sa zopakoval v každom kalendárnom roku;

- rozptyl medzi hodnotenými meraniami je určený ako priemerná hodnota dĺžky času medzi fiktívnym meraním a samotnými meraniami (počas ktorých sa v hodnotenom roku namerala najvyššia hladina podzemnej vody) a graficky je vyjadrený dĺžkou horizontálnej osi elipsy; čím je hodnota rozptylu nižšia (čím je v horizontálnom smere kratšia elipsa), tým sú hladiny koncentrovanejšie a vytvárajú väčší predpoklad vzájomného spolupôsobenia na pohybovú aktivitu;

– rozptyl zaznamenaných maxím počas kalendárneho roka na jednotlivých pozorovacích objektoch je vyjadrený priemernou hodnotou absolútnych rozdielov medzi hodnotou M a percentuálnymi váhami, ktoré boli priradené k pozorovacím objektom (obr. 7 – vertikálna zložka elipsy).

Výsledky tejto analýzy podávajú informáciu o troch parametroch. Prvým z nich je význam zaznamenananej hladiny podzemnej vody v hodnotenom roku z dlhodobého hľadiska. Zo súboru hodnotených časových intervalov možno za najvýznamnejšie hladiny podzemnej vody označiť tie, ktoré sa namerali počas roku 2007 (bod M9 na obr. 8). Najmenší význam majú hladiny zaznamenané v roku 2004. Druhým údajom je rozptyl maximálnych stavov v čase. Podáva informáciu o rozložení, respektíve spolupôsobení maximálnych hladín v priebehu hodnoteného intervalu, ktorým bol jeden kalendárny rok. Najväčšia koncentrácia maximálnych stavov sa zaznamenala v roku 2006. Naopak, najväčší rozptyl maximálnych hladín sa zaznamenal počas roku 1999. Posledným hodnoteným parametrom je údaj o rozptyle percentuálneho významu maxím hladiny podzemnej vody na hodnotených objektoch počas roka. Táto informácia dopĺňa údaj o význame zaznamenananej hĺbky hladiny podzemnej vody z dlhodobého hľadiska. Minimálnu hodnotu dosiahol tento parameter počas roku 2004. Poukazuje to na skutočnosť, že všetky hodnoty z meracích objektov boli blízke nulovému percentu významnosti a naopak, najvyššiu hodnotu dosiahol počas roku 2003. Poukazuje to na rôznorodosť významu zaznamenaných maximálnych stavov počas roka.

Pohybovú aktivitu zosuvných hmôt ilustruje priebeh priemernej hodnoty deformácie na jednotlivých šmykových

plochách zistený v danom časovom intervale merania (obr. 7). Najväčšia deformácia sa zaznamenala v roku 2007, keď vznikla výrazná deformácia na všetkých šmykových plochách súčasne. Najmenšie deformácie sa zistili v rokoch 1999 a 2006.

Na základe porovnania stavu hladiny podzemnej vody odvodeného opísaným spôsobom a preukázanej pohybovej aktivity zosuvných hmôt môžeme konštatovať, že:

- najväčšie polohové zmeny na šmykových plochách zaznamenané v poslednom hodnotenom roku 2007 spôsobila pravdepodobne extrémne vysoká úroveň hladiny podzemnej vody, ktorá vystúpila v relatívne krátkom období (popri extrémne vysokých hladinách zaznamenaných v tomto roku sa na vrte JH-14 namerala extrémny preliv),

- koncentrácia maximálnych stavov zaznamenaná v roku 2006 pravdepodobne spôsobila extrémne deformácie zaznamenané na povrchu zosuvného svahu (obr. 5A, B) a pravdepodobne ovplyvnila aj pohybovú aktivitu v roku 2007,

- vďaka výraznému časovému rozptylu maximálnych hladín zaznamenaných v jednotlivých objektoch počas roku 1999 boli prejavy zosuvného pohybu v tomto roku len minimálne.

Naopak, výrazný nesúlad medzi výslednými hodnotami odvodeného stavu hladiny podzemnej vody a nameranou deformáciou (rok 2001 a 2004) poukazuje na skutočnosť, že ani modifikovaný metodický postup riešenia úlohy nedokáže pri uvažovaných vplyvujúcich faktoroch a danom objeme primárnych údajov dostatočne vystihnúť všetky zákonitosti analyzovaného procesu.

Napriek tomu možno konštatovať, že stavy hladiny zaznamenané v poslednom hodnotenom roku mohli byť impulzom na zvýšenie pohybovú aktivitu pozorovanú na jednotlivých šmykových plochách. Aj keď spôsob pozorovania režimových a deformačných faktorov neumožňuje stanoviť prahové hodnoty pre jednotlivé pozorovacie objekty (nie je možné stanoviť čas ani faktor, ktorý deformáciu vyvolal), extrémne hladiny z roku 2007, a najmä ich spolupôsobenie v celom zosuvnom území možno považovať za kritické (tab. 3). Zvýšenú pozornosť treba venovať najmä vrtu JH-14, na ktorom sa v poslednom hodnotenom roku zaznamenala najvyššia dosiaľ nameraná výdatnosť, a teda aj najvyššia hodnota vztlaku.

Tab. 3

Kritická hĺbka hladiny podzemnej vody v pozorovaných objektoch
Critical depth of ground water level in observed objects

Objekt	Dátum merania s max. hladinou	Nameraná hĺbka h. p. v. [m]	Percent. významnosť [%]
J-1	19. 5. 2007	4,99	54,07
M-3	8. 4. 2007	8,98	100,00
J6-B	24. 3. 2007	1,54	100,00
JO-1	24. 3. 2007	2,72	100,00
JH-14	8. 4. 2007	-14,67	100,00
J3-A	24. 3. 2007	6,93	100,00
J3-B	24. 3. 2007	2,18	100,00

Záver

Cieľom práce bolo zistiť závislosť medzi režimom podzemnej vody (ktorý priamo ovplyvňuje stupeň stability) a pohybovou aktivitou. Pri odvodzovaní tejto závislosti sa použili dva odlišné metodické postupy, vďaka ktorým sa podarilo zistiť určité závislosti medzi posudzovanými javmi. Okrem analyzovanej závislosti sa preukázali aj viaceré skutočnosti, o ktorých sa dosiaľ neuvažovalo.

V prvom rade sa overil stupeň spoľahlivosti vypočítanej stability v komplikovanom zosuvnom prostredí. Ukázalo sa, že výsledné hodnoty stupňa stability v takomto prostredí (pri súčasnej úrovni jeho poznania) poskytujú iba orientačný obraz o stabilitných pomeroch, a teda nie sú vhodné na korelácie s presnými metódami, ktoré zaznamenávajú veľkosť deformácie rádovo v milimetroch. Zvýšenie presnosti výpočtového modelu by prinieslo spriesnenie informácií o litologickej stavbe, fyzikálnych a mechanických charakteristikách hornín, zvýšenie spoľahlivosti a hustoty informácie o režime všetkých horizontov hladiny podzemnej vody, a najmä o ich vztlakovom pôsobení.

Vďaka týmto zisteniam sa pozornosť posunula od teoretických hodnôt stupňa stability k analýze primárne zaznamenananej úrovne hladiny podzemnej vody. Modifikovaný metodický prístup naznačuje cestu, ktorá by mohla prispieť k nájdeniu tejto závislosti. Výsledky analýzy vo viacerých prípadoch poukazujú na vzťah medzi pôsobením hladiny podzemnej vody a zaznamenanou deformáciou, no v rámci hodnoteného súboru je viacero prípadov, ktoré vytvárajú priestor na ďalší rozbor. Spriesnenie výsledkov by sa mohlo dosiahnuť hodnotením dĺžky trvania vysokého stavu hladiny podzemnej vody a rýchlosti jej stúpania a klesania. Bolo by vhodné zohľadniť aj informáciu o zrážkových úhrnoch v kratších časových intervaloch (dni, týždne).

Z praktického hľadiska výsledky oboch analýz potvrdzujú pretrvávajúce nebezpečenstvo zosuvného ohrozenia železničnej trate v hodnotenom úseku. Analýzy poukázali na trend stúpania hladiny podzemnej vody a v určitých oblastiach aj zosilňovanie jej vztlaku. Tento trend sa v posledných rokoch prejavil aj na zvýšenej pohybovej aktivite. Uvedené skutočnosti môžu byť spôsobené zrážkovou činnosťou zaznamenanou v predchádzajúcich rokoch, no rovnako môžu súvisieť aj so starnutím a zanášaním drenážneho systému.

Aj keď niektoré z výsledkov analýzy založenej na modifikovanom prístupe možno označiť za vierohodné, na definovanie kritických hodnôt hladiny podzemnej vody (na základe ktorých by bolo možné predpovedať aktivizáciu svahového pohybu) bude potrebný rozbor širšieho spektra faktorov, ktoré už boli spomenuté (dĺžka trvania, rýchlosť stúpania a klesania hladiny podzemnej vody atď.). Pri hľadaní prahových (kritických) hodnôt úrovne hladiny podzemnej vody môže v budúcnosti

zohrať významnú úlohu možnosť vzájomného porovnania meraní z automatických hladinomerov a inklinometrov s kontinuálnym záznamom. Vytvorenie takéhoto systému môže priniesť nové objektívne poznatky pri analýze posudzovaného veľmi zložitého vzťahu medzi stavom podzemnej vody a pohybovou aktivitou zosuvných hmôt.

Podakovanie. Ďakujeme MŽP SR za možnosť publikovať niektoré výsledky získané pri riešení úlohy *Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia Slovenskej republiky*.

Literatúra

- FUSSGÄNGER, E., JADROŇ, D. & LITVA, J., 1976: Okoličné – prieskum zosuvu. Záver. spr. z inžinierskegeologického prieskumu, IGHP, n. p. Žilina. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 163 s.
- FUSSGÄNGER, E. & JADROŇ, D., 1977: Engineering geological investigation of the Okoličné landslide using measurement of stresses existing in soil mass. In: *Bull. IAEG (Krefeld)*, 16, pp. 203 – 209.
- KLUKANOVÁ, A., 1998: Mapovanie a monitorovanie geologických faktorov životného prostredia. In: *Geológia a životné prostredie. Zbor. ref. z I. konferencie. Bratislava*, s. 123 – 126.
- KLUKANOVÁ, A., WAGNER, P., ONDRÁŠIK, M., JÁNOVÁ, V., LIŠČÁK, P., MATYS, M., VLČKO, J., KOVÁČIKOVÁ, M., HRAŠNA, M., BODIŠ, D., MOCZO, P., IGLÁROVÁ, L., FRANKOVSKÁ, J., RAPANT, S., JELÍNEK, R., PAUDITŠ, P., PETRO, L., POLAŠČINOVÁ, E., KOVÁČIK, M., SCHERER, S., KRISTEKOVÁ, M., LABÁK, P., DANANAJ, I., SPIŠÁK, Z., JADROŇ, D., VYBÍRAL, V., HOLZER, R., MALGOT, J., BALIAK, F., JÁNOŠ, J., GAJDOŠ, V., LETKO, V. & MIKA, R., 1998: Čiastkový monitorovací systém geologických faktorov životného prostredia Slovenskej republiky. Stav k 31. 12. 1997. Čiastk. záver. spr., Diel 1. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*.
- KOVÁŘÍK, K., 2008: Uživatelský manuál k programu Svah, verzia 2.64. Žilina, 51 s.
- MUCHA, I. & ŠESTÁKOV, V. M., 1987: Hydraulika podzemných vôd. *Bratislava, Alfa – Praha, SNTL*.
- NEMČOK, A., 1982: Zosuvy v slovenských Karpatoch. *Bratislava, Veda*, 319 s.
- SCHERER, S. & WAGNER, P., 1997: Analýza dlhodobej funkčnosti odvodňovacích sanačných opatrení. In: *Zbor. z III. geotechnickej konferencie Interakcia stavieb a horninového prostredia. Bratislava, STÚ, Staveb. fakulta*.
- SLIVOVSKÝ, M., JADROŇ, D. & NGUYEN GIANG, 1998: K otázkam režimu podzemných vôd a hĺbkového odvodňovania zosuvu v Okoličnom. In: *Geológia a životné prostredie. Zbor. ref. z I. konferencie. Bratislava*, 1998, s. 89 – 93.
- WAGNER, P., VYBÍRAL, V., ANDOR, L. & SZABO, Š., 1997: Monitoring of landslides in Slovakia. *Proceedings of Int. Symposium on Engineering Geology and the Environment, Athens. Balkema, Rotterdam/Brookfield*, pp. 1 131 – 1 136.
- WAGNER, P., IGLÁROVÁ, L. & PETRO, L., 2000: Methodology and some results of slope movement monitoring in Slovakia. In: *Miner. Slov. (Bratislava)*, Vol. 32, pp. 359 – 367.

*Rukopis doručený 4. 2. 2009
Revidovaná verzia doručená 24. 4. 2009
Rukopis akceptovaný red. radou 30. 6. 2009*

Analysis of the relation between calculated degree of slope stability and kinetic activity of the landslide Okoličné (Liptovský Mikuláš district, Slovakia)

The aim of the paper is to find relation between the changes of ground water regime and kinetic activity of landslide masses. Analysis of these events has been realized on the model locality of landslide near Okoličné village (in Liptovský Mikuláš district). This landslide represents the ancient slope failure, recently activated by extending of the railway line in 1949. Undercutting of the ancient landslide toe in the Paleogene sandstones and claystones environment triggered a new landslide (Fig. 1A). Presence of the several lift horizons of ground water have an unfavorable influence on stability conditions, as well (Fig. 1B).

The analysis of the relation between ground water regime data and kinetic activity of landslide has been based on the comparison of calculated degree of slope stability and the values of deformations observed on the surface and subsurface parts of the landslide. Each measured deformation is assigned to selected section of slip surface (Fig. 2). The slope stability degree has been calculated at the engineering geological model of the landslide slope using a real co-ordinates of all borders and information about the individual lithological strata properties (Tab. 1).

Measurements of ground water level directly influencing the value of slope stability degree were subdivided according to individual calendar years. The basic problem consists in selection of ground water level which would characterize the real most unfavorable stability state. The ground water level corresponding with the measurement of the lowest average value (when ground water level is nearest to the surface) was indicated as the most unfavorable (according to the scheme in Fig. 3).

Information about kinetic activity of landslide comes from geodetic and inclinometric measurements. Location of measured points on the landslide slope is in Fig. 2. A spatial vectors of the results of geodetic measurements and position vectors of inclinometric deformations were taken into consideration in the process of analysis.

An assumption that kinetic active periods occurred after the high level of ground water (which caused a low degree of the stability) was basic in the process of comparison of the results of computed degree of stability and measured values of kinetic activity of landslide.

A measurement which characterized the worst state of ground water level during assessed year was determined in each calendar year (Tab. 2). Substituting of these values of ground water level into the stability calculation, the degree of stability on all slip surfaces was determined for each year (Fig. 4). The lowest degrees of stability were calculated for the first and second slip surfaces. According to time scale the lowest degree of stability was computed for conditions in 2001 and the most stable conditions were determined in 2004.

According to measured surface deformations the most active periods were in the years 2006 and 2007 (Fig. 5). An outstanding vertical changes of geodetic points, situated at the front of landslide, were recorded. The highest kinetic activity on the slip surfaces were registered in 2007, when marked acceleration of creep movement was registered on all slip surfaces at the same time (Fig. 6).

Comparison of the stability analysis results and kinetic activity of the landslide apart from several logic conclusions indicated various unexpected outputs in the assessed relation. Therefore the modified methodic was derived and used. This method is based explicitly on the achieved maximal levels of ground water. Weight of each measured maximal level against a background of the whole assessed period was taken into consideration, as well as effect of time dispersion of maximal levels occurrence in the calendar year (Fig. 7).

The results of analysis led to conclusion, that extremely high level of ground water in 2007 and its overall behavior on the whole landslide area have activated the slope movement. The values of ground water level (Tab. 3) corresponding to this state may indicate near unfavorable stability state in the future.