

Spätná analýza a návrh sanácie zosuvného bloku na diaľnici D1 Hubová - Ivachnová

Back analysis and design of remedial measures of block failure on D1 Hubová - Ivachnová

Lumír Kliš¹, Jaroslav Lacina¹, Jakub Panuška²

¹ Amberg Engineering Brno, a.s., Ptašinského 10, 602 00 Brno, Česká republika, e-mail: lkli@amberg.cz, jlacina@amberg.cz

² PanGEO s.r.o., Pražská 1451/15, 960 01 Zvolen, Slovenská republika, e-mail: panuska.geotech@gmail.com

Abstrakt: Predkladaný príspevok sa zaoberá analýzou vzniku blokovej deformácie a jej budúcej stabilizácie. Blokova deformácia vznikla počas hĺbenia zárezu na diaľnici D1 Hubová – Ivachnová, kde boli zistené odlišné inžinierskogeologické pomery oproti predpokladom návrhu zabezpečenia zárezu. Výskyt pevnejších dolomitov nasunutých na plastickejšie slieňovce podmienil vznik blokovej deformácie s hlbokou šmykovou plochou. Spätnou analýzou, za pomoci meraní geotechnického monitoringu a spätných analytických a numerických výpočtov bola stanovený priebeh šmykovej plochy a parametre reziduálnej šmykovej pevnosti. Na základe zistení zo spätnej analýzy bol vykonaný návrh sanačných opatrení a stanovenie varovných stavov, ktoré budú použité pri realizácii sanácie predmetného zosuvného bloku.

Abstract: This article presents analysis of initiation of block failure and design of its future remediation. Block failure occurred during the excavation of the cut on highway D1 Hubová – Ivachnová. Different geological conditions were found out during the excavation, than those expected during the design of the cut stabilisation. Rigid dolomites placed over plastic marls occurred. This geological feature predetermined initiation of block failure with deep slip surface during the excavation. Back analysis was carried on with aid of analysis of monitoring data, analytical and numerical calculations. Slip surface and residual shear strength parameters were determined based on back analysis. Design of remedial measures and warning system, which is going to be used during the execution of remedial works, were established based on performed analysis.

Kľúčové slová: blokova deformácia, spätná analýza, sanácia, varovné stavy

Keywords: block failure, back analysis, remedial actions, warning system

1 Situácia v predmetnej lokalite

1.1 Inžinierskogeologické a hydrogeologické pomery

V mieste zistenej blokovej deformácie boli pred realizáciou zárubného múru zhotovené len kopané šachtice ŠA – 28 až ŠA – 30 (GEOFOS s.r.o., 2007). V šachticiach bolo kvartérne podložie charakterizované ako ílovito kamenitá suť charakteru G5 – GC (s úlomkami vápencov) s výplňou pevnej konzistencie. Miestami mala suť charakter dobre zrnených štrkov

G1 – GW. V šachticiach bol zaznamenaný aj výskyt brekciovitých vápencov a balvanov. Mocnosť kvartérneho pokryvu bola zistená 1,0 – 3,0 m (v ŠA – 30 nebolo mezozoikum zistené). Mezozoické podložie bolo v šachticiach charakterizované vápencami zvetranými až navetranými s pevnosťou R3. Tieto polohy mali laminovanú až doskovitú odlučnosť s puklinami zatečenými ílom. Druhou zastihnutou vrstvou mezozoika boli slieňovce zvetrané, až rozložené na íl strednej plasticity s vrstevnatou odlučnosťou. Hladina podzemnej vody nebola zistená.

V doplnkových vrtoch, situovaných v blokovej deformácii, INK – 237 – 1 až INK – 237 – 4 boli vrstvy deluviálnych kamenito – piesčitých sutí identifikované s mocnosťou 1,7 – 6,1 m. Mezozoické podložie bolo následne od povrchu tvorené dolomitmi pevnosti R3 – R4, miestami silne brekciovité, charakteru silne uľahnutého štrku s jemnozrnnou prímесou. Dolomity sú súčasťou chočského príkrovu, ktorý bol tektonicky nasunutý na križňanský príkrov tvorený prevažne slieňovcami. Slieňovce a slienité vápence sú charakteristické polohami silne tektonicky porušených polôh a slabšie porušených polôh (resp. zdravých polôh). Silne porušené polohy majú charakter ílovitého štrku F2 – CG pevnej konzistencie s veľkou hustotou diskontinuit, horniny majú pevnosť R5 – R6. Zdravšie polohy majú pevnosť R3 – R4 a sú prestúpené diskontinuitami s veľkou hustotou.

V rámci hydrogeologických pomerov sú pomery rozdelené pre kvartérne a mezozoické komplexy (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022). Priepustnosť kvartérneho pokryvu, deluviálnych kamenitých sutí, je charakterizovaná ako medzi zrnová a viaže sa prevažne na vyššie položené štrkovité zeminy. Tieto sú na základe priepustnosti hodnotené ako mierne až slabo priepustné. Dotácia obehú podzemnej vody, v kvartérnom pokryve, je primárne zo zrážkovej činnosti. Priepustnosť mezozoického komplexu má dve úrovne. Dolomitické horniny, ktoré sú tektonicky porušené, majú puklinovú priepustnosť. Stredne až silno tektonicky porušené slieňovce majú veľmi nízku puklinovú priepustnosť. Na základe (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022) nebola počas prieskumných prác podzemná voda v telese zosuvného bloku zistená, avšak podľa záverečnej správy sa jej prítomnosť nedá vylúčiť. Priesaky podzemnej vody boli dokumentované v rámci dokumentácie výkopu pre zárez (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022). Tieto priesaky mali sumárny prítok približne 0,19 l/s a nachádzali sa približne na rozhraní podloží slieňovcov a dolomitov, najmä vo východnej časti zárezu, kde dolomity upadajú smerom ku dnu zárezu.

Situácia zárezu, s vykresleným zosuvným blokom, situovaním prieskumných diel a inžinierskogeologických profilov je uvedená na *Obr. 1 / Fig. 1*.

1.2 Realizované zabezpečenie zárezu

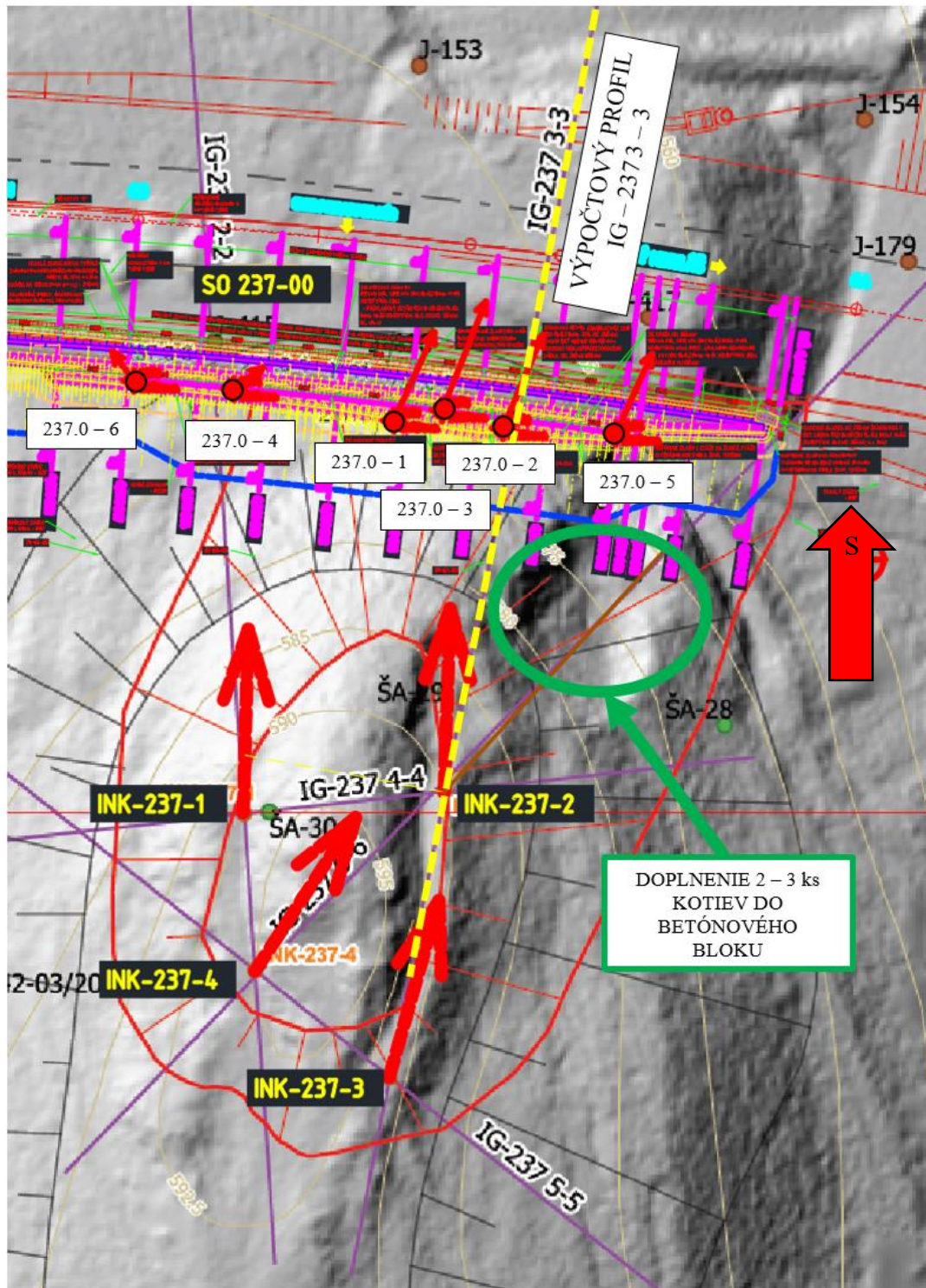
Horná úroveň zárezu je zabezpečená za pomoci striekaného betónu hrúbky 250 mm, zhotoveného z betónu triedy C25/30, vystuženého sieťovinami pri oboch povrchoch 6/100/100, z ocele B500A. V tejto úrovni sú realizované dve úrovne zemných klincov dĺžky 5,0 m s osovou vzdialenosťou 1,2 m, jedna úroveň zemných klincov dĺžky 6,0 m s osovou vzdialenosťou 1,2 m a jedna úroveň trvalých tyčových kotiev dĺžky 12,0 m (koreňová časť 6,0 m) s osovou vzdialenosťou 4,0 m.

Spodná úroveň zárezu je zabezpečená za pomoci striekaného betónu hrúbky 150 mm, zhotoveného z betónu triedy C25/30, vystuženého sieťovinami pri oboch povrchoch 6/100/100, z ocele B500A. V tejto úrovni sú realizované dve úrovne zemných klincov dĺžky 6,0 m s osovou vzdialenosťou 1,2 m, a jedna úroveň trvalých tyčových kotiev dĺžky 12,0 m (koreňová časť 6,0 m) s osovou vzdialenosťou 4,0 m. Úroveň tyčových kotiev nebola v skutočnosti realizovaná, nakoľko došlo k havarijnej situácii a aktivácii blokovej deformácie.

Zemné klince sú realizované z tyčí $\Phi 25$ a ocele 500/550 MPa. Tyčové kotvy sú realizované ako CKT tyče $\Phi 26,5$ z ocele Y 950/1050 MPa. Uvedené pevnostné triedy

materiálov sú prevzaté z (Amberg Engineering Brno, a.s., 10/2017) a z (Minova Bohemia s.r.o., 11/2020).

Zemné klince sú uvažované s gravitačnou injektážou (typ A - (FHWA, 2005) (Elias & Juran, 1991)). Koreň tyčových kotiev je v dĺžke 6,0 m uvažovaný ako injektovaný tlakovou injektážou cez hadičky (typ C - (FHWA, 2005)). Minimálne priemery vrto v pre realizované zemné klince a kotvy sú uvažované ako 130 mm.



Obr. 1: Situácia v mieste zárezu, upravené podľa (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022).
Fig. 1: Situation in the locality of highway cut, modified after (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022).

1.3 Vzniknutá situácia

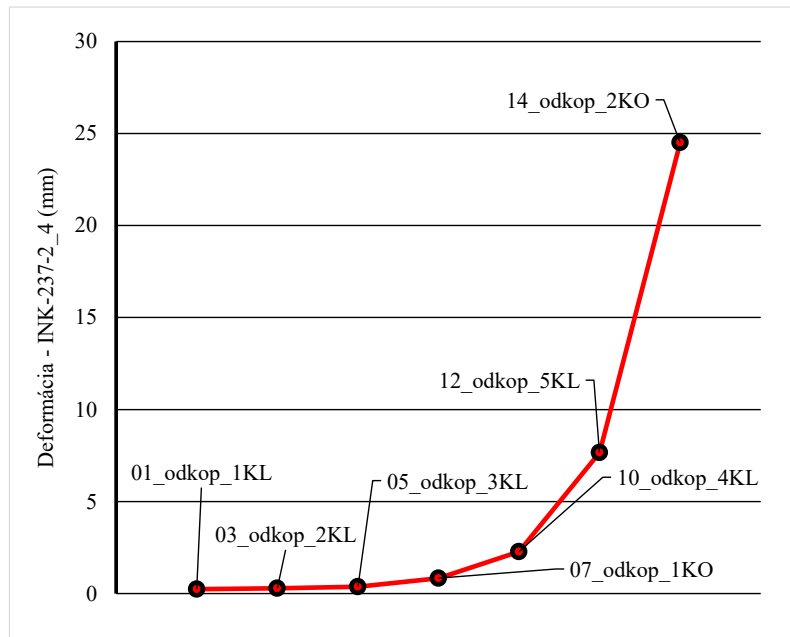
Na základe dostupných údajov bolo zistené, že v mieste zárezu došlo k aktivizácii svahového pohybu vo forme blokovej deformácie masívu smerom do zárezu. Prejavom tohto pohybu bol pohyb oceľových stožiarov vedenia vysokého napätia smerom na sever, resp. severovýchod, a vznik viditeľných trhlín na povrchu terénu. K zisteniu, že dochádza k pohybu bloku hornín, sa prišlo vo fáze odkopu na poslednú kotevnú úroveň. Pohyb potvrdili aj geodetické merania bodov na povrchu zárubného múru (body 237.0 – 1 a 237.0 – 2), (SK GEODETI, s.r.o., 12/22). Podľa tu realizovaných výpočtov došlo k akcelerácii zosuvného bloku približne v čase výkopov pod prvú kotevnú úroveň na kóte približne 565,5 m n.m., *Obr. 2 / Fig. 2*.

Z dôvodu vzniknutej situácie bola v päte zárezu zrealizovaná priťažovacia lavica navrhnutá v plnej šírke výkopu (približne 15,0 m), zhotovená až po prvú kotevnú úroveň na kóte približne 565,5 m n.m., (Amberg Engineering Brno, a.s., 06/2021). Následne boli v danom mieste navrhnuté a zrealizované doplnkové prieskumné a inklinometrické monitorovacie vrty, za účelom overenia hĺbky pohybu blokovej deformácie a geologických pomerov v podloží. Po aktivizácii pohybu bola lokalita v teréne obhliadnutá a za pomoci digitálneho modelu reliéfu bol vyčlenený rozsah možnej aktívnej blokovej deformácie (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022).

Merania v inklinometrických vrtoch (AEGEO, s.r.o., 12/2022) preukázali prítomnosť hlbokých šmykových plôch, resp. oslabených zón (hĺbky 20,0 – 20,5 m p.t. v INK – 237 – 1 a INK – 237 – 2; 6,0 – 7,0 m p.t. v INK – 237 – 3 a INK – 237 – 4, v INK-237-4 bola zistená deformácia aj v hĺbke 12,5m p.t.). V čase spomenutého merania bola v päte už zrealizovaná priťažovacia lavica a blok sa považoval za stabilný. Nárast deformácie sa pripisuje dotláčaniu bloku na priťažovací prísyp. Tento stabilizuje zosuvnú masu nie len ako priťaženie päty bloku, ale aj cez mobilizáciu pasívneho odporu, na ktorú je potrebná určitá deformácia. Vektor pohybu v inklinometrických vrtoch a na geodetických bodoch je smerom na sever / severovýchod. Situácia lokality s vykreslenou blokovou deformáciou, zárubným múrom, výpočtovým profilom a vektormi pohybu je na *Obr. 1 / Fig. 1*.

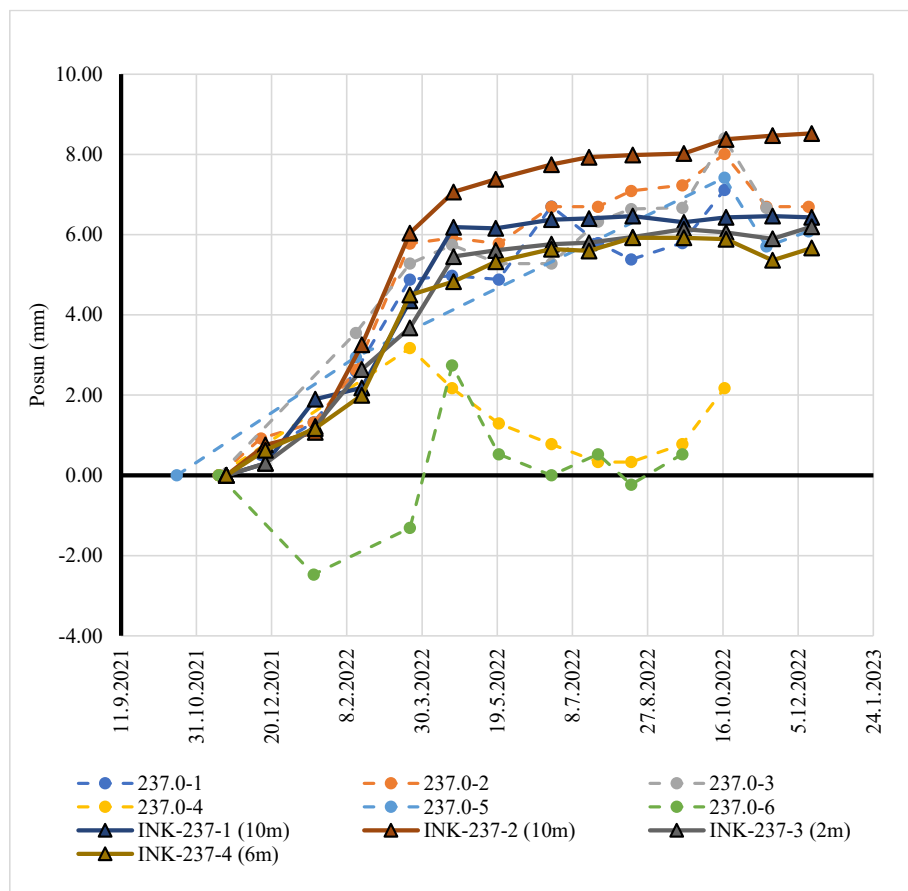
Na základe (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022) ma zosúvajúci sa blok celkovú dĺžku približne 109,0 m, šírku 75,0 m a hrúbka zosúvajúceho sa bloku je na základe informácií z inklinometrických meraní v najhlbšom mieste približne 26,0 m. Blok plošne zaberá 7010,3 m². Výškový rozdiel medzi odlučnou hranou (591,4 m n.m.) a čelom zosuvu (560,8 m n.m.) je 30,6 m. Šmyková plocha má predpokladaný rotačne planárny charakter. V odlučnej hrane boli evidované trhliny so šírkou približne 5,0 cm, v telese bloku neboli evidované dielčie trhliny a teda sa predpokladalo, že blok sa posúva ako celok. Tento predpoklad je podložený aj tu vykonanou analýzou meraní geotechnického monitoringu, *Obr. 3 / Fig. 3*, kde je možné vidieť, že podpovrchové deformácie v inklinometrických vrtoch sú približne rovnaké ako deformácie na čele bloku (geodetické body v záreze). Z *Obr. 1 / Fig. 1* a *Obr. 3 / Fig. 3* je možné vidieť, že geodetické body 237.0 – 4 a 237.0 – 6 nevykazujú trend deformácií totožný s generálnym trendom a zároveň sú ich vektory pohybov (najmä 237.06 – 6) mierne odlišné od generálneho smeru pohybu. Z dôvodu vyššie uvedeného sa predpokladá aktívna časť bloku v záreze od km 6,318 314 (časť medzi bodmi 237.0 – 6 a 237.0 – 4, kde vznikla aj trhlina v striekanom betóne a na kontakte kotevných nosníkov) po koniec zárezu na východnej strane.

Príčinou vzniku zosuvu bolo zastihnutie rozhrania medzi plastickejšími podložnými slieňovcami (krížňanská jednotka) na ktorých sú uložené pevnejšie dolomity (chočská jednotka). Prieskumom a inklinometrickými meraniami bolo zistené, že pevnejšie dolomitické horniny priťažujúce plastickejšie slieňovce vyvolali pohyby hlboko v tektonicky porušených slieňovcoch.



Obr. 2: Predpokladaný priebeh akcelerácie pohybu zosuvného bloku nad šmykovou plochou v mieste INK – 237 – 2. Určené na základe výpočtov v tejto správe.

Fig. 2: Assumed acceleration of the block movement over the slip surface, INK – 237 – 2. Calculated by the numerical model developed in this article.



Obr. 3: Deformácie na geodetických bodoch a v inklinometroch uvažované od nultého merania v inklinometrických vrtoch.

Fig. 3: Deformation on geodetic points and in inclinometers. Assumed from zero measurement in inclinometers.

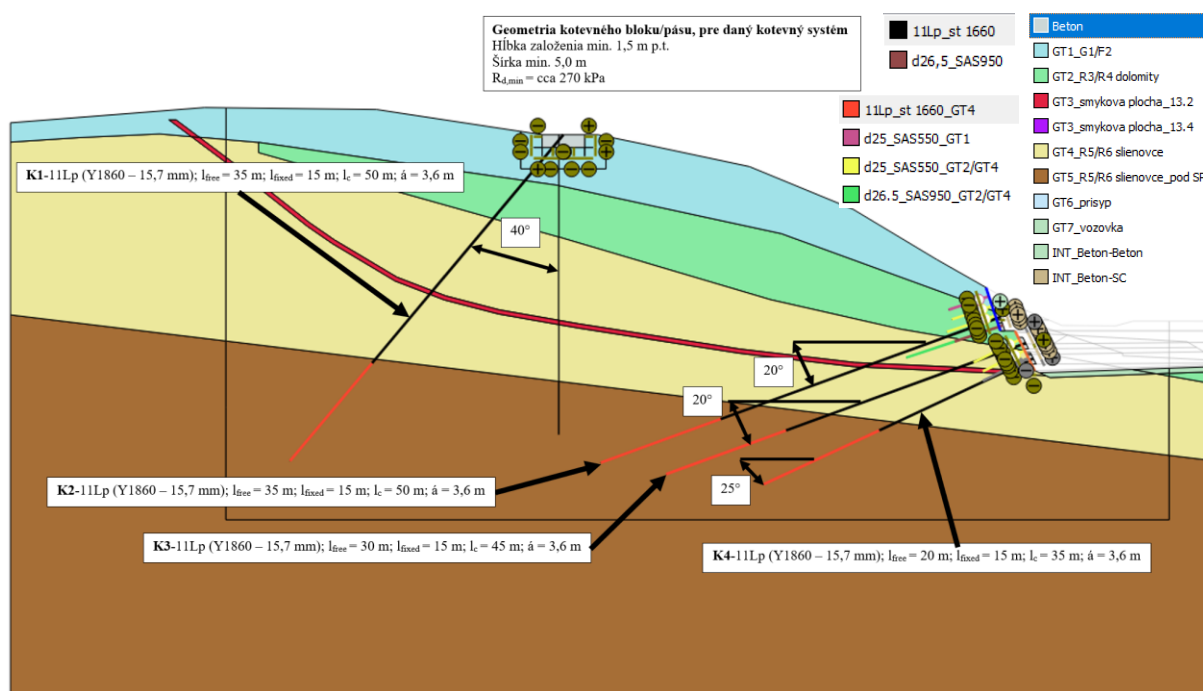
Spätnými výpočtami (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022) boli overené reziduálne parametre šmykovej pevnosti ϕ_{rez} na šmykovej ploche v rozmedzí 13,0 (profil 3 – 3') – 13,9° (profil 2 – 2'). Uvedené parametre sú približne potvrdené aj krabicovými šmykovými skúškami na vzorkách slieňovcoch odobratých vo výkope (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022).

2. Návrh sanačných opatrení

2.1 Geotechnický model

Geotechnický model zvolený pre analýzu stability zárezu a návrh sanačných opatrení bol zvolený v mieste inžinierskogeologického profilu IG – 237 3 – 3 (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022), Obr. 1 / Fig. 1. Geometria rozhraní a šmykovej plochy je v tejto správe prevzatá z tohto profilu a je uvedená na Obr. 4 / Fig. 4.

Parametre zemín a hornín použité vo výpočtoch sú uvedené v Tab. 1. Pre geotechnické typy GT2 / GT4 / GT5 boli parametre šmykovej pevnosti podľa Mohr – Coulomba, zistené spätným výpočtom z Hoek – Brown (Hoek, Kaiser, & W.F., 1995) kritéria porušenia horninového masívu definovaného na základe stavby masívu a podmienok na povrchu diskontinuit. V rámci výpočtov boli uvažované maximálne a minimálne parametre horninového masívu podľa Hoek – Brown kritéria porušenia. Finálna súdržnosť c_{ef} bola redukovaná na 10 % (GT2) a 33% (GT4 / GT5) zo spätne vypočítanej súdržnosti podľa Mohr – Coulomb kritéria porušenia. Redukcia šmykovej pevnosti bola vykonaná z dôvodu relatívne masívnej puklinatosti mezozoického podložia.



Obr. 4: Geotechnický model s navrhnutými sanačnými opatreniami.

Fig. 4: Geotechnical model with designed remedial measures.

Pri určovaní parametrov v Tab. 1 sa zároveň vychádzalo aj z meraní geotechnického monitoringu a vedomosti, že zosúvanie prebieha po šmykovej ploche určenej v rámci (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022) a iné poruchy neboli evidované alebo signalizované.

Tab. 1: Parametre zemín a hornín použité vo výpočtoch.

Tab. 1: Parameters of soils and rock used in calculations.

Materiálový model	Genéza	Skupina	Trieda zeminy	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	ϕ_{ef} (°)	c_{ef} (kPa)	q_s (kPa)	E_{def} (MPa)	ν (-)	β (-)	E_{oed} (MPa)
MC	Kvartér	GT1	G1-GW F2-CG (pevná výplň)	20.5	21.0	34	14	80(A)	50.0	0.3	0.74	67.3
MC	Mezozoikum	GT2	R3/R4 dolomit /slienitý vápenec vrstevnaté / brekciovité	22.0	22.0	45	40	150(A) - 300(C)	500.0	0.23	0.86	579.6
MC	Mezozoikum reziduálne	GT3	Šmyková plocha	22.0	22.0	13.2 - 13.4	0	-	80.0	0.35	0.62	128.4
MC	Mezozoikum nad ŠP	GT4	R5/R6 F2-CG/F4-CS/G5-GC slienitý vápenec - porušený	22.0	22.0	28	25	150(A) - 300(C)	120.0	0.25	0.83	144.0
MC	Mezozoikum pod ŠP	GT5	R5/R6 F2-CG/F4-CS/G5-GC slienitý vápenec	22.0	22.0	35	30	150(A) - 300(C)	250.0	0.25	0.83	300.0
MC	Prísyp	GT6	Príťažovací prísyp	21.0	21.0	38	0		70.0	0.3	0.74	94.2
MC	-	GT7	Vrstvy vozovky	21.0	21.0	35	10	-	100.0	0.25	0.83	120.0

Vysvetlivky k Tab. 1:

γ – prirodzená objemová tiaž, γ_{sat} – objemová tiaž nasýtenej zeminy / horniny, ϕ_{ef} – efektívny uhol šmykovej pevnosti, c_{ef} – efektívna súdržnosť, q_s – trenie na plášti klinec / kotiev (podľa (FHWA, 2005), (Mišove & Klein, 1986), (Elias & Juran, 1991)), E_{def} – deformačný modul zeminy / horniny, ν – Poissonovo číslo, E_{oed} – oedometrický modul

Reziduálne parametre šmykovej pevnosti boli určené spätným výpočtom. Reziduálny uhol šmykovej pevnosti $\phi_{rez} = 13,4^\circ$ bol použitý po fázy výpočtu odkopu na druhú kotevnú úroveň. Táto reziduálna pevnosť, mierne vyššia ako pevnosť určená v (EDGE INVESTMENT, s.r.o., 02/2022) a vypočítaná tu, bola zvolená z dôvodu numerickej stability výpočtov. V rámci výpočtu stability, metódou konečných prvkov (Brinkgreve & Bakker, 1991), (PLAXIS, 2022), pri odkope na druhú kotevnú úroveň bol stupeň stability rovný 1,020 – 1,023, čo značí výsledný reziduálny uhol šmykovej pevnosti $\phi_{rez} = 13,11 - 13,15^\circ$. Vo výpočtoch sanácie zárezu bol použitý reziduálny uhol šmykovej pevnosti $\phi_{rez} = 13,2^\circ$. Tento parameter bol aktivovaný po namodelovaní príťažovacieho prísypu a bol použitý vo všetkých nasledujúcich fázach výpočtov so sanačnými opatreniami. Rozdiel vo výslednom stupni stability medzi parametrami $\phi_{rez} = 13,2^\circ$ a $\phi_{rez} = 13,0^\circ$ je 0,016 bodu, čo sa považuje za zanedbateľný rozdiel.

Hladina podzemnej vody nie je vo výpočtoch zohľadnená. Predpokladá sa, že prípadné puklinové priesaky budú zachytené v rámci drenáže za striekaným betónom a cez prieryzy v striekanom betóne budú vytekať do zberného systému. Nepredpokladá sa teda vznik vztlakových účinkov podzemnej vody v rámci telesa zosuvu ani na jeho šmykovej ploche. Vzhľadom k morfológii terénu sa zároveň predpokladá, že prípadné priesaky a výtoky môžu byť situované do východnej časti bloku, kde môžu z masívu vychádzať voľne na terén.

2.2 Dodatočné zabezpečenia zárezu

Pôvodne navrhované opatrenia v rámci projektu DRS (Amberg Engineering Brno, a.s., 10/2017) budú ďalej uvažované len ako dočasné. Z tohto dôvodu je nutné riešiť sanačné opatrenia na zabezpečenie globálnej stability zárezu, ktoré budú schopné samostatne a bezpečne preniesť všetky požadované zaťaženia.

V rámci sanácie a zabezpečenia globálnej stability zárezu je na základe výpočtu potrebné realizovať štyri úrovne predpätých lanových kotiev s injektovaným koreňom.

V záreze sú navrhnuté tri úrovne predpätých lanových kotiev na približných kótach 567,21 m n.m., 564,15 m n.m., 562,36 m n.m. Realizácia prvej kotevnej úrovne na približnej kóte 567,21 m n.m. je zo súčasnej úrovne stabilizačného prísypu, bez realizácie odkopu, aby nedošlo k aktivizácii zosuvného bloku. Vzhľadom na upadanie hornej etáže zárezu smerom na východ je potrebné umiestniť 2 – 3 ks injektovaných predpätých kotiev aj do priestoru s vypadnutou horninou (*Obr. 1 / Fig. 1*), kde je potrebné na roznos zaťaženia realizovať betónový kotevný blok (plombu) v mieste chýbajúcej horniny.

Okrem týchto kotiev je po dobudovaní zárezu, realizovaní vyššie uvedených troch kotevných úrovní, navrhnutá jedna kotevná úroveň vo vrchole zosuvného bloku. Táto štvrtá kotevná úroveň bude vybudovaná po odťažení vrcholu bloku (približne na kótu 588,62 m n.m.) a navrhuje sa na približnej kóte 588,62 m n.m. Kotevná úroveň vo vrchole bloku zabezpečuje celkovú stabilitu zosuvného bloku pri seizmickom zaťažení.

Predpäté injektované lanové kotvy sú navrhované ako laná z ocele Y1600/1860 MPa ($f_{t0.1k} / f_{pk}$) s počtom pramencov pre jednu kotvu 11, priemerom jedného pramena 15,7 mm a plochou jedného pramena 150 mm² (označenie 11Lp, Y1860 – 15,7 mm). Rozostup všetkých kotiev je 3,6 m. Kotvy sú navrhované do vrtov s minimálnym priemerom 200 mm. Všetky navrhované kotvy sú navrhnuté s trvalou dvojistou protikoróznou ochranou, DCP.

Predpäté injektované lanové kotvy sú navrhnuté s nasledovnou geometriou:

1. Kotevná úroveň na kóte približne 567,21 m n.m.
 - 11Lp, Y1860 – 15,7 mm, á3,6 m, sklon 20°, $L_{\text{koreň}} = 15,0$ m, $L_{\text{voľná}} = 35,0$ m, $L_{\text{celkové}} = 50,0$ m, $P_0 = 1400$ kN, $P_p = 2189$ kN, $P_d = 1990$ kN
2. Kotevná úroveň na kóte približne 564,15 m n.m.
 - 11Lp, Y1860 – 15,7 mm, á3,6 m, sklon 20°, $L_{\text{koreň}} = 15,0$ m, $L_{\text{voľná}} = 30,0$ m, $L_{\text{celkové}} = 45,0$ m, $P_0 = 1400$ kN, $P_p = 2189$ kN, $P_d = 1990$ kN
3. Kotevná úroveň na kóte približne 562,36 m n.m.
 - 11Lp, Y1860 – 15,7 mm, á3,6 m, sklon 25°, $L_{\text{koreň}} = 15,0$ m, $L_{\text{voľná}} = 20,0$ m, $L_{\text{celkové}} = 35,0$ m, $P_0 = 1400$ kN, $P_p = 2189$ kN, $P_d = 1990$ kN
4. Kotevná úroveň na kóte približne 588,62 m n.m.
 - 11Lp, Y1860 – 15,7 mm, á3,6 m, sklon 50°, $L_{\text{koreň}} = 15,0$ m, $L_{\text{voľná}} = 35,0$ m, $L_{\text{celkové}} = 50,0$ m, $P_0 = 1400$ kN, $P_p = 2189$ kN, $P_d = 1990$ kN

, kde P_0 je predpínacia sila, P_p je skúšobná sila pri kontrolnej skúške, P_d je návrhová kotvená sila použitá v statických výpočtoch.

2.3 Varovné stavy

Varovné stavy sú definované na základe numerických výpočtov vykonaných v rámci tohto príspevku. Účelom stanovenia varovných stavov je vyhodnocovanie monitoringu konštrukcie na základe predpokladaného správania sa predmetného riešeného zárezu.

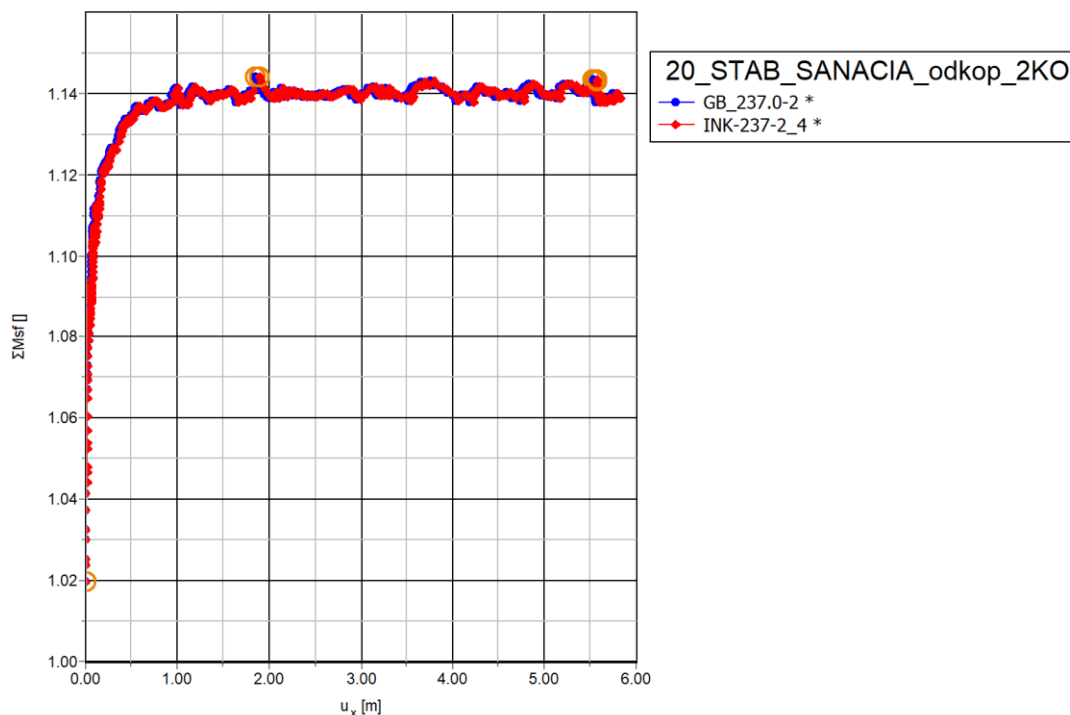
V rámci definovania varovných stavov je určená hodnota deformácie „A“ (TKP35, 2016). V prípade, že budú namerané deformácie ustálené pod touto hodnotou jedná sa o stav prípustných zmien. V prípade, že sa deformácie ustália pod hodnotou $1,25 * „A“$ jedná sa o stav medznej prijateľnosti. V prípade, že deformácie nebudú ustálené pod hodnotou $1,25 * „A“$ jedná sa o kritický stav a bude potrebné prehodnotiť navrhované sanačné opatrenia a obmedziť alebo zastaviť stavebné práce.

V rámci numerických výpočtov boli počas výpočtu a procesu $\varphi - c$ redukcie (Brinkgreve & Bakker, 1991), (PLAXIS, 2022) sledované deformácie na už realizovaných geodetických bodoch a tesne nad úrovňou šmykovej plochy. Následne boli zostrojené grafy horizontálnej deformácie voči aktuálnej redukcii (stupeň stability) parametrov šmykovej pevnosti (φ, c),

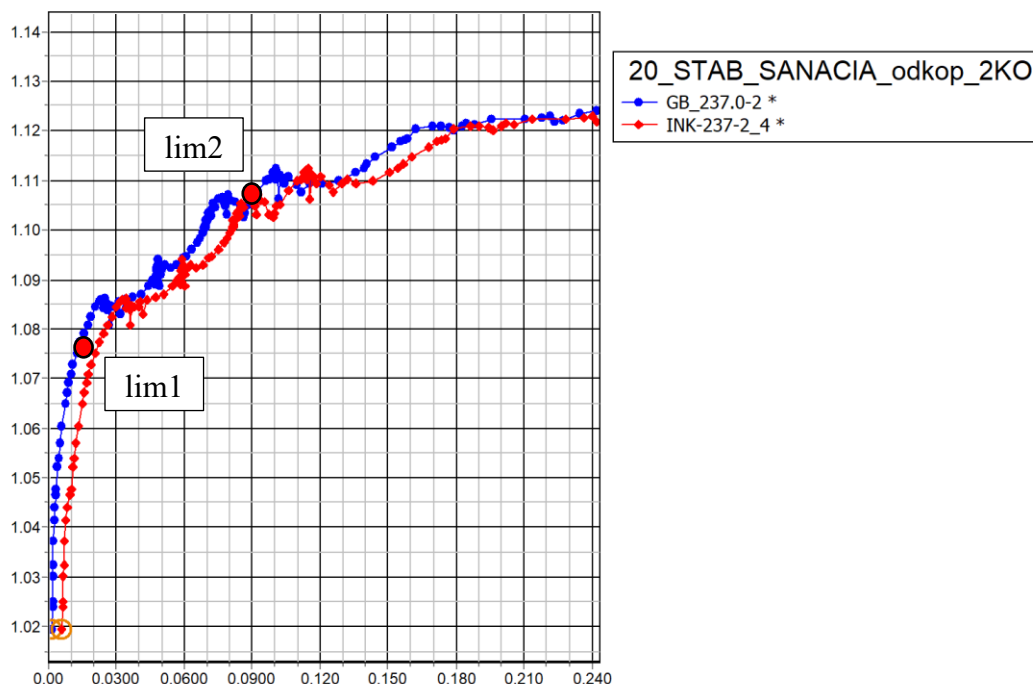
Obr. 5 / Fig. 5, Obr. 6 / Fig. 6. Takéto krivky budú pre potreby tohto textu označené ako stabilitné krivky. Na základe tu vykonaných analýz boli pred dosiahnutím finálneho stupňa stability identifikované dva body lim1 a lim2 (Obr. 6 / Fig. 6).

Bod lim1 predstavuje bod pri ktorom prechádza stabilitná krivka zo svojej primárnej, lineárnej, časti do druhej nelineárnej časti. Po dosiahnutí bodu lim1 sú evidované relatívne malé nárasty deformácií a kotevných síl. Po prechode cez tento bod dochádza k rýchlemu nárastu deformácií a kotevných síl.

Bod lim2 predstavuje bod tesne pred porušením. Po presiahnutí tohto bodu dochádza k enormnému nárastu deformácií a kotevných síl. Po prekonaní tejto hodnoty už z praktického hľadiska nie je možné rýchlo reagovať a aplikovať potrebné sanačné opatrenia. V zásade je možné, konzervatívne, bod lim2 považovať aj za finálny stupeň stability, nakoľko pri dosiahnutí tejto medze sú kotevné sily vybudené takmer na medzu únosnosti. Deformácie, kotevné sily a stupne stability pre jednotlivé fázy realizácie sanácie sú uvedené v Tab. 2.



Obr. 5: Výpočet stupňa stability v procese $\phi - c$ redukcie.
Fig. 5: Calculation of safety factor during $\phi - c$ reduction.

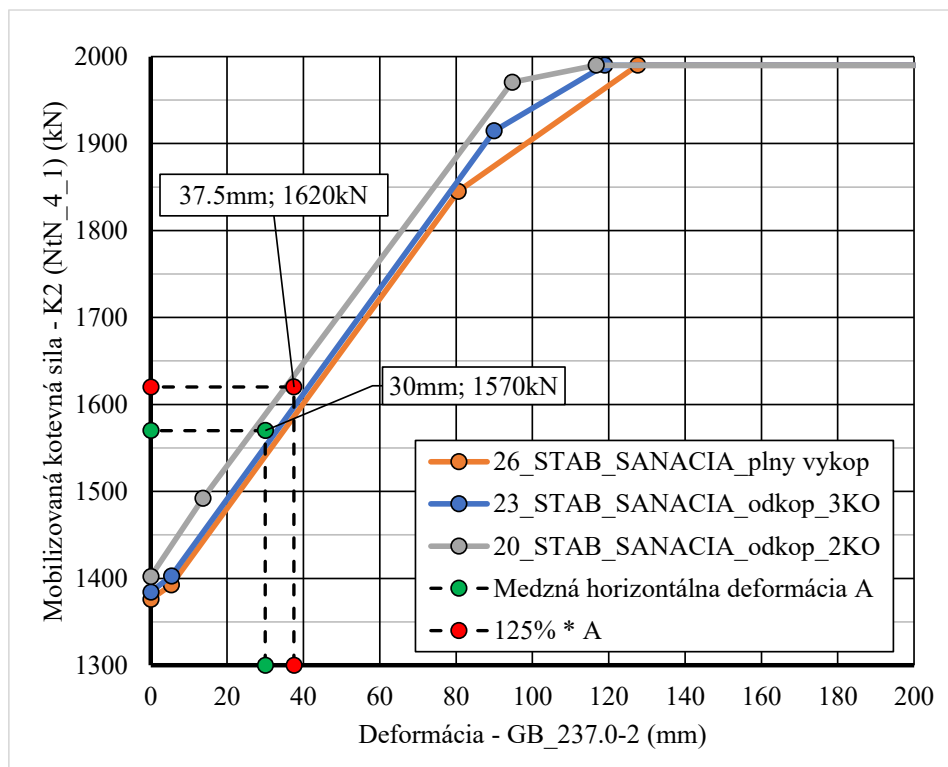


Obr. 6: Výpočet stupňa stability v procese $\phi - c$ redukcie, stanovenie limitných bodov.
Fig. 6: Calculation of safety factor during $\phi - c$ reduction, specification of limit points.

Tab. 2: Kotevné sily a deformácie pri dosiahnutí limitných hodnôt lim1 a lim2.
Tab. 2: Anchor forces and displacement at limit values lim1 and lim2.

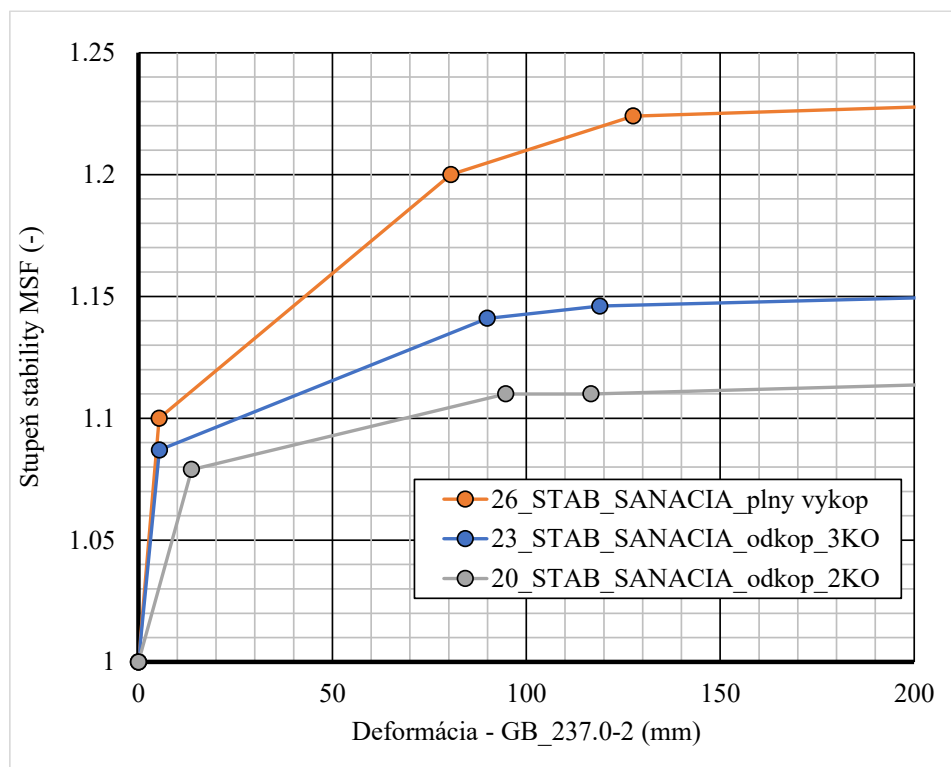
Výpočtová fáza	Kotva	Sila v kotve (kN)			Deformácia GB_237.0-2 (mm)			Stupeň stability MSF (-)		
		odkop	lim.1	lim.2	odkop	lim.1	lim.2	lim.1	lim.2	total
20_STAB_SANACIA_odkop_2KO	K2 (NtN 4 1)	1402.07	1492.17	1970.44						
	K3 (NtN 2 1)	-	-	-	1.31	15.00	96.00	1.079	1.110	1.138
	K4 (NtN 1 1)	-	-	-						
23_STAB_SANACIA_odkop_3KO	K2 (NtN 4 1)	1384.20	1402.68	1914.61						
	K3 (NtN 2 1)	1401.22	1409.17	1943.34	0.03	5.44	90.00	1.087	1.141	1.172
	K4 (NtN 1 1)	-	-	-						
26_STAB_SANACIA_plny vykop	K2 (NtN 4 1)	1375.85	1392.37	1844.99						
	K3 (NtN 2 1)	1376.8	1388.07	1832.78	-0.56	4.80	80.00	1.100	1.200	1.256
	K4 (NtN 1 1)	1402.15	1408.25	1874.63						

Na základe hodnôt z Tab. 2, boli zhotovené grafy na Obr. 7 / Fig. 7 a Obr. 8 / Fig. 8. Na základe týchto údajov bola medzná deformácia „A“ stanovená na hodnotu 30 mm. Pri takejto deformácii sa predpokladá aktivácia kotevných síl o veľkosti približne 1570 kN, Obr. 7 / Fig. 7. Pri tejto deformácii je stupeň stability v jednotlivých kritických fázach sanácie v rozmedzí 1,085 – 1,130, čo predstavuje osciláciu okolo požadovanej hodnoty stupňa stability 1,10 (STN 73 6101, 2008). Stav medznej prijateľnosti potom predstavujú namerané a ustálené deformácie od 30 mm do 37,5 mm, a namerané kotevné sily od 1570 kN do 1620 kN.



Obr. 7: Vývoj kotevných síl v závislosti na deformáciách počas $\phi - c$ redukcie. Definovanie medznej hodnoty deformácie „A“.

Fig. 7: Evolution of anchor forces with displacements during $\phi - c$ reduction. Definition of limit displacement „A“.



Obr. 8: Vývoj stupňa stability v závislosti na deformáciách počas $\phi - c$ redukcie.

Fig. 8: Evolution of safety factor with displacement during $\varphi - c$ reduction.

3. Záver

V predmetnom príspevku bola navrhnutá sanácia blokovej deformácie na základe analýzy meraní geotechnického monitoringu a spätných výpočtových analýz. Spätné výpočty obsahujú aj numerické výpočty metódou konečných prvkov, ktorá umožňuje počítať nie len výsledný dosiahnutý stupeň stability, ale aj deformácie. Použitie metódy konečných prvkov a $\varphi - c$ redukcie (Brinkgreve & Bakker, 1991) umožnilo sledovať vývoj deformácií so znižujúcimi sa parametrami šmykovej pevnosti a vývoj síl v navrhnutých sanačných prvkoch, zemných kotvách. Týmto spôsobom bolo snahou autorov navrhnuť systém varovných stavov, ktorý je založený na predpoklade numerických výpočtov. Na záver treba upozorniť, že predpokladom vykonania a realizácie numerických výpočtov sú buď korektné a presne stanovené vstupy numerických výpočtov (pevnostné a deformačné parametre zemín a hornín) vo fáze projektových prác, alebo precízny geotechnický monitoring počas výstavby.

4. Zoznam literatúry

- AE GEO, s.r.o. (12/2022). *GTM trasy diaľnice D1 v úseku Hubová - Ivachnová*.
- Amberg Engineering Brno, a.s. (06/2021). *Stabilizačná lavica pro SO 237 - 00*.
- Amberg Engineering Brno, a.s. (10/2017). *DRS - 237-00 Zárubný múr v km 6,260-6,400 (vpravo na vetve B1)*.
- Brinkgreve, R., & Bakker, H. (1991). Non-linear finite element analysis of safety factors. *Computer methods and advances in geomechanics.*, 1117-1122.
- EDGE INVESTMENT, s.r.o. (02/2022). *ČIASTKOVÁ SPRÁVA z doplnkových prieskumných prác č. 18/06/2021. Doplnkový prieskum SO 237-00*.
- Elias, V., & Juran, I. (1991). *Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations*. 6300 Georgetown Pike, McLean, Virginia 22101-2296: Office of Engineering and Highway Operations R&D, Federal Highway Administration.
- FHWA. (2005). *Micropile Design and Construction - Reference Manual*. FHWA NHI-05-039.
- GEOFOS s.r.o. (2007). *D1 Hubová - Ivachnová, Dopĺňujúci IG a HG prieskum, Geologická dokumentácia šachtíc*.
- Hoek, E., Kaiser, P., & W.F., B. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: Balkema.
- Minova Bohemia s.r.o. (11/2020). *Správa o vykonaní predpínacích prác, skúšobné protokoly*.
- Mišove, & Klein. (1986). Únosnosť koreňa injektovanej kotvy v hornine. *Inžénýrske stavby*, 5.
- PLAXIS. (2022). *PLAXIS 2D - Reference manual CONNECT Edition V22*.
- SK GEODETI, s.r.o. (12/22). *Zameranie priestorovej polohy bodov osadených na opornom múre objektu SO 237.0*.
- STN 73 6101. (2008). *Projektovanie ciest a diaľnic*.
- TKP35. (2016). *GEOTECHNICKÝ MONITORING PRE OBJEKTY LÍNIOVÝCH ČASTÍ POZEMNÝCH KOMUNIKÁCIÍ*.