

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

**Posúdenie stability svahu – južného svahu zárezu R48 v krížení
s cestou z Dubu na Vysokú a návrh sanácie**

**Assessment of the Slope Stability – Southern Slope of the R48
Cut at the intersection with the Road from Dub to Vysoká and
Remediation Design**

Študent:

Bc. Ján Banič

Vedúci diplomové práce:

Ing. Martin Stolárik, Ph.D.

Ostrava 2021

VŠB – Technická univerzita
Ostrava Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ján Banič**

Studijní program: N0732A260005 Stavební inženýrství - Geotechnika a podzemní stavitelství

Téma: Posouzení stability svahu – jižní svah zářezu R48 v křížení s cestou z Dubu na Vysokou a návrh sanace

Assessment of the Slope Stability – Southern Slope of the R48 Cut at the Intersection with the Road from Dub to Vysoká and Remediation Design

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1 Geologické a hydrogeologické poměry posuzované lokality
- 2 Analýza stávajícího stavu, včetně matematického modelu
- 3 Návrh variantních sanačních opatření
- 4 Modelová analýza navržených variant sanací
- 5 Porovnání jednotlivých variant sanací
- 6 Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- 7 Hulla, J., Turček, P. *Zakladanie stavieb*. Jaga: Bratislava, 1998. ISBN 80-88905-05-2.
- 8 Vaníček, I., Vaníček, M. *Earth Structures*. Kluwer Academic Publisher Group. ISBN 9781402039638.
- 9 Coduto, D. *Geotechnical Engineering*. Prentice Hall: New Jersey, 1999. ISBN 0-12-576380-0.
- 10 Rozsypal, A. *Kontrolní sledování a rizika v geotechnice*. Jaga: Bratislava, 2001. ISBN 80-88905-44-3.
- 11 Brinkgreve, R.B.J. *Manual Plaxis*. Balkema. ISBN 90-5809-508-8

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Stolárik, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2021

Datum odevzdání: 30.11.2021

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú diplomovú prácu vrátane príloh vypracovala samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave 26. 11. 2021

.....

podpis študenta

Prehlasujem, že

- bol som zoznámený s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, predovšetkým §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej jen VŠB- TUO) má právo nezárobkovo ku svojej internej potrebe diplomovú prácu využiť (§ 35 odst. 3).
- súhlasím s tým, že jeden výtlačok diplomovej práce bude uložený u vedúceho diplomovej práce. Súhlasím s tým, že údaje o diplomové práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo dohodnuté, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením využiť dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bolo dohodnuté, že využiť svoje dielo – diplomovou práci alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžu len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade od mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave 26. 11. 2021

.....

podpis študenta

Pod'akovanie

Týmto som sa rád poďakoval vedúcemu tejto diplomovej práce Ing. Martinovi Stolárikovi, PhD. za pomoc, cenné rady a odborné vedenie pri riešení tejto práce. Tiež by som sa touto cestou rád poďakoval Ing. Miroslavovi Pinkovi za pomoc pri terénnom meraní a spracovaní výstupov merania. V neposlednom rade ďakujem aj Ing. Lukášovi Ďurišovi, PhD. za rady pri tvorení matematického modelu.

Anotácia

Predmetom tejto diplomovej práce je posúdenie stability svahu zárezu rýchlostnej cesty R48 v mieste kríženia s cestou z Dubu na Vysokú a návrh vhodného sanačného opatrenia. Prvá časť práce sa zaoberá opisom príčin svahových pohybov, charakteristiky svahových pohybov podľa viacerých kritérií a rôznym spôsobom ich sanácie. Ďalšia časť opisuje záujmovú oblasť z hľadiska geomorfológie, geológie a hydrogeológie. Súčasťou je tiež opis územia a súčasného stavu svahu na základe terénnej pochôdzky. Na túto časť nadväzuje matematická analýza stability svahu riešená metódou konečných prvkov v programe Plaxis 2D. Ďalej boli navrhnuté variantné sanačné opatrenia, ktoré boli podľa modelových analýz navzájom porovnané a vyhodnotené.

Kľúčové slová:

Stabilita svahu, svahové pohyby, cesta I/48, sanačné opatrenia, matematický model, Plaxis 2D

Annotation

The subject of this diploma thesis is the assessment of the slope stability of the R48 road cut at the point of intersection with the road from Dub to Vysoká and the design of an effective remediation. The first part of the work is devoted to the description of the causes of slope movements, the characteristics of slope movements according to several criteria and different methods of their remediation. The next part describes the area of interest in terms of geomorphology, geology and hydrogeology. It also includes a description of the area and the current state of the slope based on a terrain walk. This part is followed by a mathematical analysis of slope stability solved by the finite element method in the Plaxis 2D program. This part also contains design of remediations, which were compared and evaluated according to model analyzes.

Key words:

Slope stability, slope movements, road I/48, remediation measures, mathematical model, Plaxis 2D

Obsah

1	Úvod	10
2	Svahové pohyby.....	11
2.1	Faktory ovplyvňujúce svahovú stabilitu	11
2.2	Charakteristika typov svahových pohybov	12
2.2.1	Charakteristika podľa rýchlosti a mechanizmu pohybu.....	12
2.2.2	Charakteristika podľa ďalších kritérií	14
2.3	Sanácia svahových deformácií	15
2.3.1	Úprava tvaru svahu	16
2.3.2	Odvodnenie svahov	17
2.3.3	Ochrana svahu pred zvetraním a eróziou	18
2.3.4	Spevňovanie hornín.....	18
2.3.5	Technické stabilizačné opatrenia	18
2.3.6	Osobitné opatrenia	21
3	Charakteristika posudzovanej lokality	22
3.1	Poloha.....	22
3.2	Geomorfologické pomery	23
3.3	Klimatické pomery	24
3.4	Geologické a inžinierskogeologické pomery	24
3.5	Hydrogeologické pomery	25
3.6	Svahové pohyby v okolí lokality.....	26
4	Analýza terajšieho stavu.....	28
4.1	Rekognoskácia terénu	28
4.2	Vrtná preskúmanosť	32
5	Modelová analýza súčasného svahu	34
5.1	Tvorba geologického rezu.....	34
5.2	Tvorba matematického modelu.....	35

5.3	Výsledky modelovej analýzy súčasného stavu svahu	38
6	Návrh variantných sanačných opatrení.....	42
6.1	Návrh prvého sanačného opatrenia pomocou mikropilót	42
6.2	Návrh druhého sanačného opatrenia pomocou klincovania svahu	43
6.3	Návrh tretieho sanačného opatrenia pomocou klincovania a kotiev	44
6.4	Návrh štvrtého sanačného opatrenia pomocou mikropilót a odvodnenia svahu	45
7	Modelová analýza sanačných opatrení	46
7.1	Modelová analýza prvého sanačného opatrenia.....	46
7.2	Modelová analýza druhého sanačného opatrenia.....	48
7.3	Modelová analýza tretieho sanačného opatrenia.....	51
7.4	Modelová analýza štvrtého sanačného opatrenia	54
8	Porovnanie jednotlivých variant sanácií.....	56
9	Záver	58
10	Zoznam použitej literatúry	60
11	Zoznam obrázkov.....	63
12	Zoznam tabuliek.....	65
13	Zoznam vzorcov	66
14	Zoznam príloh	67

Zoznam použitých označení

a, b	navrhovaná osová vzdialenosť klincov v smere x a y
c	súdržnosť horniny
c'	výpočtová súdržnosť horniny
c _{celk}	celková súdržnosť klincovanej oblasti
c _{nail}	súdržnosť zemných klincov
c _r	redukovaná súdržnosť horniny na medzi porušenia
cm	centimeter
E	Youngov modul pružnosti pri zaťažovaní
E _{def}	Youngov modul pružnosti pri deformácii
F	únosnosť zemného klinca
F6 CI	íl so strednou plasticitou
G5 GC	štrk ílovitý
GT(X)	geotechnické typy hornín
k _x , k _y	koefficient filtrácie v smere x a y
L _{spacing}	osová vzdialenosť kotiev
m	meter
mm	milimeter
∑M _{sf}	stupeň stability
R5, R6	triedy hornín
u	celkový posun
w	súčín objemovej tiaže a plochy prvku na meter
γ	objemová hmotnosť horniny
γ _{sat}	objemová hmotnosť saturovanej horniny
v	poissonovo číslo
φ	uhol vnútorného trenia horniny
φ _{ef}	efektívny uhol vnútorného trenia horniny
φ _r	redukovaný uhol vnútorného trenia horniny na medzi porušenia
ψ	uhol dilatancie

1 Úvod

Posúdenie stability svahov je jedným zo základných prvkov pri trasovaní a projektovaní dopravných stavieb. Tejto problematike musí byť, najmä pri výstavbe zárezových a násypových telies, venovaná špeciálna pozornosť. Zanedbanie stabilitných výpočtov, nesprávna interpretácia pri tvorbe výstupov geologického prieskumu, geologického rezu, hydrogeologického režimu a následne geotechnického modelu môže viesť k nesprávnym výsledkom vedúcim ku svahovým deformáciám. Takéto udalosti si často vyžadujú nemalé finančné prostriedky, či už z hľadiska spôsobených škôd na existujúcich konštrukciách, alebo z hľadiska realizácie sanačných opatrení.

V prípade vzniku neočakávaných svahových deformácií v blízkosti už existujúcich stavieb je dôležitá ich analýza, a celkové posúdenie stability svahu geotechnikom s následným návrhom vhodných sanačných opatrení.

Táto práca je zameraná na stabilitnú analýzu a návrh sanačného riešenia južného svahu zárezu cesty I/48 v mieste kríženia s cestou III/43911. V prvej časti práce sú opísané faktory, ktoré môžu ovplyvňovať svahovú stabilitu. Popísané sú typy svahových pohybov podľa rôznych kritérií a škála sanačných opatrení využívaných k stabilizácii svahu.

Praktická časť práce začína opisom geomorfologických, geologických a hydrogeologických podmienok riešeného svahu na základe štúdia a analýzy archívnych prieskumných materiálov. Ďalej je opísaný jeho súčasný stav zistený terénnou pochôdzkou po lokalite. Súčasťou je tiež opis a analýza zmapovania terénu pomocou technológie 3D skenovania.

Po štúdiu archívnych materiálov a zmapovaní povrchu terénu bol skonštruovaný geologický rez svahu. V programe Plaxis 2D bola na základe rezu, vykonaná matematická analýza stability svahu pomocou metódy konečných prvkov. Následne boli navrhnuté sanačné riešenia, vychádzajúce z výstupov stabilitej matematickej analýzy súčasného stavu svahu. Pre každé sanačné riešenie bol opäť vytvorený matematický model. Výsledky matematických analýz jednotlivých sanačných opatrení sú ďalej vyhodnotené z hľadiska dosiahnutého stupňa stability, náročnosti výstavby a sú navzájom porovnané. V závere sú zhrnuté výsledky tejto práce.

2 Svahové pohyby

Stabilita svahov je dôležitý prvok pri plánovaní a výstavbe všetkých druhov stavieb. Na svah pôsobia sily aktívne, ktoré zvyšujú riziko pohybu svahu a pasívne (trezie), prispievajúce ku stabilite svahu. Hlavnou zložkou aktívnej sily je gravitácia. Pasívne sily tvoria mechanické vlastnosti hornín v masíve a trecia sila na šmykovej ploche. Pokiaľ sú tieto sily v rovnováhe, svah je stabilný. Pri porušení stability svahu z rôznych príčin, technických alebo prírodných, dochádza vplyvom gravitačných síl ku svahovým pohybom, ktoré môžu mať za následok majetkové škody, a v niektorých prípadoch aj ujmy na zdraví či dokonca na životoch. Týmito pohybmi príroda reaguje na porušenie rovnováhy síl vo svahu tak, aby znova nastal rovnovážny stav. Z laického pohľadu sa zvyčajne hovorí o zosuvoch, avšak z geologického hľadiska nie je žiadny svah trvalo stabilný – bez pohybu. Údolné svahy podliehajú erózií a ďalším procesom, ktoré dlhodobo formujú ich tvar. V niektorých oblastiach Českej republiky a na pomerne rozsiahlom území Slovenskej republiky sú svahové pohyby častým úkazom. [1] [2]

2.1 Faktory ovplyvňujúce svahovú stabilitu

Na vzniku svahového pohybu sa môže podieľať niekoľko faktorov. Zistenie faktorov spôsobujúcich svahovú nestabilitu je dôležité pri hľadaní geotechnického riešenia sanácie svahu.

- **Zmena sklonu svahu.** Pri zvyšovaní uhlu sklonu svahu dochádza k nárastu šmykového napätia čím sa narúša rovnováha svahu.
- **Priťaženie koruny svahu.** Priťaženie spôsobuje vzrast v geologickom prostredí, vzrast šmykových napätí a zvýšenie pórových tlakov, ktoré znižujú šmykovú pevnosť
- **Zmena vegetácie na svahu.** Stromy svojimi koreňmi mechanicky prispievajú ku stabilite svahu. Ich koreňová sústava tiež vplyvom transpirácie podzemnej vody znižuje nasýtenosť zeminy vodou.
- **Zvýšenie obsahu vody.** Pri infiltrácii zrážkových vôd sa voda dostáva do puklín v horninovom masíve a spôsobuje hydrostatický tlak. V zeminovom prostredí sa zvyšujú pórové tlaky, čím klesá hodnota šmykovej pevnosti.
- **Prúdiaca podzemná voda.** Prúdiaca voda pôsobí tlakom na častice zeminy, pričom môže dochádzať k sufózií – vyplavovaniu častíc zemín, a to najmä pri jemnozrnných pieskoch.

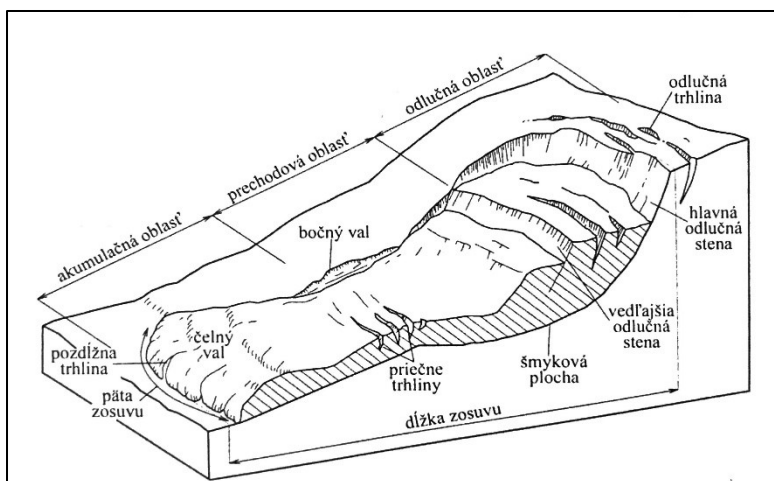
- **Vplyv nepriepustného podložia.** Podzemná voda pôsobí na rozhraní priepustnej a nepriepustnej vrstvy vztlakom na nadložnú vrstvu, čím sa znižujú trecie sily.
- **Činnosť mrazu.** Pri zamrznutí vody v puklinách horninového masívu dochádza k rozširovaniu a tvorbe nových trhlín. Rozpukané horniny tak vykazujú menšiu súdržnosť.
- **Zvetrávanie hornín.** Chemické a mechanické zvetrávanie znižuje súdržnosť hornín a ich mechanické vlastnosti.
- **Seizmické otrasy.** Otrasy spôsobené zemetrasením, alebo ľudskou činnosťou (výbuchy, stroje) spôsobujú v horninách zmeny napätia ktoré môžu narúšať rovnováhu svahu. Pri jemnozrnných piesčitých zeminách hrozí ich stekutenie. [1]

2.2 Charakteristika typov svahových pohybov

Svahové pohyby sú veľmi rôznorodé. Na ich charakteristiku vzniklo niekoľko delení, pričom najpoužívanejším v oblasti Českej a Slovenskej republiky je klasifikácia podľa Nemčoka, Pašeka a Rybára (1974). Táto klasifikácia je založená na rýchlosti pohybu horninovej masy a mechanizme pohybu.

2.2.1 Charakteristika podľa rýchlosti a mechanizmu pohybu

- **Plazenie.** Pomalý nezrýchľujúci sa pohyb horninových hmôt. Šmyková plocha býva často nezreteľná. Každý svahový pohyb sa začína plazením, pričom ak sa pohyb zrýchli prechádza do zosúvania, tečenia alebo rútenia. Rýchlosť pohybu sa pri plazení pohybuje rádovo v mm až cm za rok. Výsledné formy sú nevýrazné, možno pozorovať gravitačne rozvoľnené a poprehýbané hrebene a svahy.
- **Zosúvanie.** Rýchly krátkodobý pohyb horninových hmôt po svahu pozdĺž jednej, alebo viacerých šmykových plôch. Pri zosúvaní sa môžu v hlbších častiach prejavovať aj deformácie pomalého, plazivého charakteru. Zosuvy rozlišujeme podľa rotačnej, planárnej a zloženej šmykovej plochy. Schéma zosuvu a jeho sprievodných javov je znázornená na Obrázku 1.

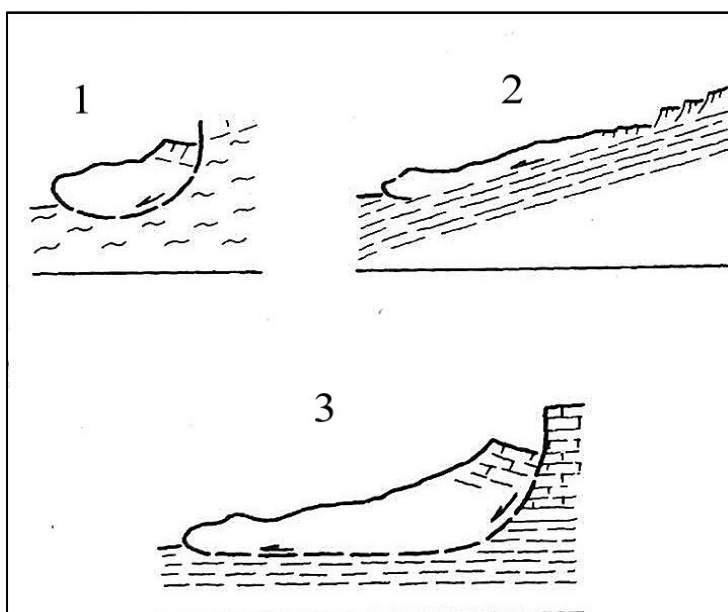


Obrázok 1: Hlavné časti zosuvu a sprievodné javy [3]

1. Zosúvanie po rotačnej šmykovej ploche. Vzniká obvykle v homogénnych, alebo slabo spevnených ílovitých horninách. Vznikajú aj na svahoch umelých násypov a zárezov (Obrázok 2 – 1).

2. Zosúvanie pozdĺž rovinatej (planárnej) šmykovej plochy. Šmyková plocha sa viaže na tektonické poruchy, rozhranie pokryvných útvarov s podložím, alebo na iné litologické rozhrania. Takéto zosuvy sa vyskytujú hlavne v regiónoch flyšových súvrství, alebo v slabšie spevnených ílovitých horninách (Obrázok 2 – 2).

3. Zosúvanie pozdĺž zloženej šmykovej plochy sa vyskytujú najmä na brehoch riek a nádrží v oblastiach so subhorizontálne uloženými ílovitými, slienitými a prachovitými sedimentami (Obrázok 2 – 3).



Obrázok 2: Typy šmykových plôch [3 – upravené]

- **Tečenie** je krátkodobý a rýchly pohyb hornín vo viskóznom stave. Dochádza ku premiestneniu veľkej časti horninových hmôt zo zdrojovej oblasti často na veľké vzdialenosti. Pri intenzívnych zrážkach a nasýtení horninového masívu v strmom reliéfe vodou môže dôjsť k tzv. prívalovým prúdom. V transportnej zóne takýchto prúdov dochádza k výraznej erózií. V zóne akumulácie vznikajú náplavové kužele z nevytriedených sedimentov (Obrázok 3).



Obrázok 3: Akumulačná zóna prívalového prúdu vo Vrátnej doline [11]

- **Rútenie.** Náhly krátkodobý pohyb horninových hmôt na strmých svahoch. Vzniká rozvoľnením hornín, ktoré krátkodobo strácajú kontakt s podloží. Rozvoľnené bloky a úlomky sa presúvajú voľným pádom, ale aj inými formami pohybu ako váľanie alebo šmýkanie po svahu. [3] [4]

2.2.2 Charakteristika podľa ďalších kritérií

Na bližší opis svahových deformácií existuje niekoľko ďalších delení.

- **Vek:**
 - **Recentné.** Svahový pohyb prebieha v súčasnosti pri aktuálnych klimatických a geomorfologických pomeroch.
 - **Fosílnne.** Pohyb nastal v minulosti, za iných klimatických a geomorfologických pomeroch ako v súčasnosti.

- **Stupeň aktivity:**
 - **Aktívne.** Sú v súčasnosti v pohybe. Povrch je značne rozčlenený a nesie stopy čerstvých pohybov.
 - **Potenciálne.** Povrch je nerovný, bez stôp čerstvých pohybov. V súčasnosti je pohyb upokojený, príčiny pohybu však pretrvávajú a pohyb sa môže znova obnoviť.
- **Genéza:**
 - **Prírodné.** Pohyb vznikol bez zásahu človeka na prírodnom svahu.
 - **Umelo vyvolané.** Pohyb vznikol na umelo vytvorených svahoch, alebo na prírodných svahoch v dôsledku zásahu človeka.
- **Vývojové štádium:**
 - **Iniciálne.**
 - **Rozvinuté.**
 - **Finálne.**
- **Opakovateľnosť:**
 - **Jednorázové.** Pohyb na určitom mieste nastal iba raz.
 - **Periodické.** Pohyb sa opakuje vplyvom periodicity hlavného faktora.
- **Tvar pôdorysu:**
 - **Prúdový.** Dĺžka deformácie prevažuje šírku.
 - **Plošný.** Dĺžka sa približne rovná šírke.
 - **Frontálny.** Šírka deformácie prevažuje dĺžku. [3] [4]

2.3 Sanácia svahových deformácií

Sanačné opatrenia sú na deformovaných svahoch vykonávané za účelom zvýšenia stupňa stability. Každý typ svahového pohybu v blízkosti inžinierskych diel si vyžaduje pozornosť a spoluprácu geológa a projektanta. Projektovaniu a realizácii sanačných opatrení by mal predchádzať inžinierskogeologický prieskum, ktorý určí pravdepodobnú príčinu svahovej deformácie, ako aj geotechnické vlastnosti a profil horninového masívu. Nasleduje vytvorenie geotechnického modelu postihnutej oblasti a výber vhodného sanačného opatrenia, podľa tvaru šmykovej plochy, príčiny a typu svahového pohybu. Konečným krokom pred realizáciou opatrení je statický výpočet.

Podľa spôsobu pôsobenia a princípu realizácie môžeme sanačné opatrenia rozdeliť do nasledujúcich skupín:

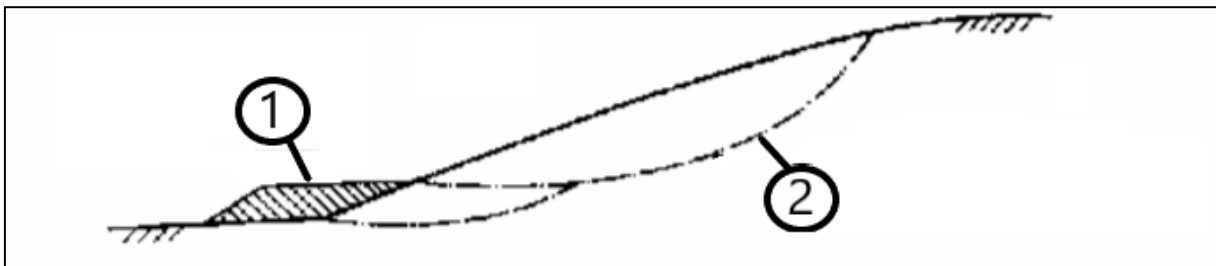
- Úprava tvaru svahu,
- Odvodnenie svahu,
- Ochrana svahu pred zvetrávaním a eróziou,
- Spevňovanie hornín,
- Technické stabilizačné opatrenia,
- Zvláštne opatrenia, [4]

2.3.1 Úprava tvaru svahu

Týmto sanačným opatrením sa mení rozloženie hmoty na svahu, čím dochádza ku zvýšeniu stability svahu v dôsledku zvyšovania pasívnych síl v akumuláčnych oblastiach zosuvu alebo znižovania aktívnych síl v odlučných častiach. Medzi tieto sanačné metódy patria:

- Príťažovacie násypy pri päte svahu,
- Odľahčovacie odrezy v korune svahu,
- Zmiernenie sklonu svahu,
- Premiestnenie materiálu z koruny svahu k jeho päte
- Odťaženie zosunutého materiálu

Najjednoduchším a najviac používaným opatrením sú najmä príťažovacie násypy pri päte svahu (Obrázok 4). Pri návrhu týchto prvkov je potrebné dbať na vhodnosť materiálu použitého v násype, jeho zhutnenie a drenážnu vrstvu násypu. [4, 18]



Obrázok 4: Princíp príťažovacieho násypu pri päte svahu [26 – upravené]
1 – príťažovací násyp, 2 – šmyková plocha

2.3.2 Odvodnenie svahov

Odvodnenie je dôležitým prvkom sanácie svahových deformácií. Zmenšujú sa ním pórové tlaky v horninách, čím sa znižuje vztlak vody na šmykovej ploche a tým aj aktívne sily. Úlohou je teda zamedzenie infiltrácie zrážkových hmôt do telesa zosuvu povrchovým odvodnením a znižovanie hladiny podzemnej vody v telese hĺbkovým odvodnením. [4]

Povrchové odvodnenie – úlohou povrchového odvodnenia je odvedenie zrážkových a povrchových vôd pritekajúcich z vyšších častí svahov tak, aby nedošlo k jej infiltrácii do horninového masívu. Povrchové odvodnenie síce samo o sebe zvyčajne k úplnej stabilizácii svahu nestačí, prispieva k vysušeniu a ukludneniu zosuvu. Pri povrchovom odvodnení sa vykonávajú opatrenia ako obvodové priekopy nad odlučnou zónou zosuvu, povrchové priekopy v telese zosuvu, utesňovanie trhlín, prekrytie svahu fóliami a iné. Dôležité je udržiavať povrchové a obvodové priekopy, keďže aj malé pohyby pôdy môžu porušiť ich funkciu. [4, 6]

Hĺbkové odvodnenie – úlohou hĺbkového odvodnenia je zníženie vztlaku vody na šmykovej ploche, a urýchlenie rozptýlenia pórových tlakov v horninovom masíve. Ako okamžité opatrenie je možné použiť čerpanie vody zo zvislých odvodňovacích prvkov – studní. Z dlhodobého hľadiska sa však používajú opatrenia ako odvodňovacie štôlne, drenážne studne a odvodňovacie štrkové steny a horizontálne odvodňovacie vrty. [4, 18]

Najpoužívanejším opatrením sú však horizontálne odvodňovacie vrty. Pri tejto technológii sa vo svahu vŕta maloprofilový vrt v úklone približne 2 – 4°. Vrt je zaistený perforovanou výpažnicou. Vyústenie vrtu musí byť zabezpečené proti zamrznutiu, napríklad vyústením do šachtice (obrázok 5), alebo prekrytím vyústenia 1,5 m mocným štrkovým zásypom. Zamrznutie vody vo vyústení by mohlo viesť k hromadeniu vody v lícnej časti svahu a nepriaznivo tým pôsobiť na stabilitu svahu. [6, 18]



Obrázok 5: Vyústenie horizontálnych odvodňovacích vrtov do šachticy [28]

2.3.3 Ochrana svahu pred zvetraním a eróziou

Cieľom tejto skupiny sanačných opatrení je zabrániť zhoršovaniu mechanických vlastností hornín v dôsledku zvetrávania. Pri brehoch vodných tokov, alebo nádrží je cieľom zabrániť prúdovej erózií a abrázií. Medzi tieto opatrenia patrí použitie geotextílií alebo geomreží spolu s vegetačným pokryvom, torkrétových omietok a v pobrežných oblastiach použitie vlnolamov. Tieto opatrenia sú však účinné len pri povrchovej ochrane svahu, alebo v prípade vysádzania vegetačného pokryvu s hlbším koreňovým systémom, pri zosuvoch s plytkou šmykovou plochou. [4, 6]

2.3.4 Spevňovanie hornín

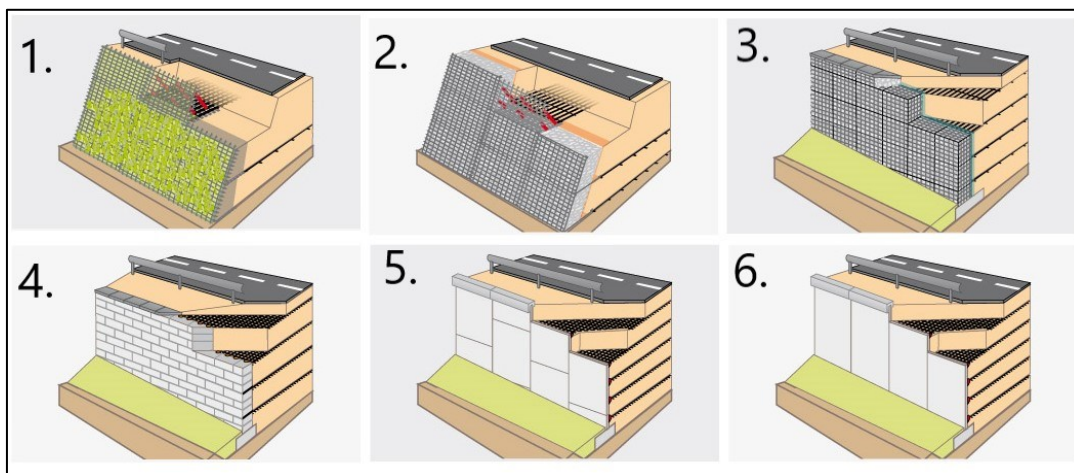
Metódami spevňovania hornín dochádza ku zvýšeniu šmykovej pevnosti, čo má za následok nárast pasívnych síl vo svahu. Medzi tieto metódy patrí tepelné spevňovanie zemín, elektrochemické spevňovanie zemín a zmrazovanie. Najznámejšou metódou spevňovania zemín je injektáž. Pri tejto metóde je vháňaná cementačná zmes do pórov a puklín v hornine. Zvyčajnou zmesou je cementové mlieko v pomere cement:voda = 2:1. V súčasnosti sú metódy spevňovania hornín v podmienkach Českej republiky používané zriedka. Injektáž sa používa v kombinácií s inými stabilizačnými prvkami, napríklad pri injektovaní koreňov mikropilót a kotiev. [4, 18]

2.3.5 Technické stabilizačné opatrenia

Do tejto skupiny sanačných metód patrí pomerne široká škála stabilizačných opatrení, na princípe silových nosných a spevňujúcich prvkov. Ich realizácia je pracná a finančne nákladná, ale vo väčšine prípadov pre konečnú stabilizáciu deformácií nevyhnutná. Prvky stabilizačných opatrení spomenuté v nasledujúcich riadkoch sa v praxi často kombinujú. Medzi najčastejšie využívané opatrenia tejto skupiny patria:

- **Zárubné a oporné múry** – úlohou týchto oporných konštrukcií je podopierať násypové telesá a zárezy, ako aj zabezpečovať stabilitu v zosuvnom území. Zachytávajú zemné a horninové tlaky, v istých prípadoch doplnené o povrchové priťaženie. Oporné múry tieto tlaky zachytávajú a prenášajú cez základovú škáru do podlažia. Pri navrhovaní oporných konštrukcií sa najprv zvolia predbežné rozmery, potom sa posudzuje či konštrukcia vyhovuje podmienkam spoľahlivosti. Dôležité je dbať na úplné odvodnenie prostredia za opornou konštrukciou, aby nedochádzalo k pôsobeniu nežiadúceho hydrostatického tlaku na konštrukciu.[7]

V súčasnosti sa stále viac rozširujú, najmä v dopravnom stavitelstve, modernejšie oporné konštrukcie zložené z vystuženej zeminou v kombinácii s lícovými prvkami. Na vystuženie zeminou sa používajú rôzne typy geomreží. Lícové prvky tvoria gabiónové koše, betónové tvarovky, oceľové panely s kamenivom, alebo betónové panely (Obrázok 6). Takéto konštrukcie pôsobia vizuálne estetickjšie ako klasické oporné konštrukcie. [23]



Obrázok 6: Princíp oporných koštrúkcí v spolupôsobení s vystuženou zeminou

1. Oceľové panely a protierózna ochrana
2. Oceľové panely s kamenivom
3. Gabiónové koše
4. Betónové tvarovky
5. Segmentové betónové panely
6. Veľkoplošné betónové panely [23 – upravené]

- **Pilótové a mikropilótové steny** – Stabilizačné pilótové steny sa využívajú k sanácií rozsiahlych zosuvov, alebo ako ochrana významných komunikácií a objektov. Obvykle sa jedná o vrty s priemerom väčším ako 600 mm, ktoré sú armované a vyplnené betónovou zmesou. Pilótová stena je dimenzovaná vo svahu tak, aby bola ukotvená v dostatočnej hĺbke pod šmykovou plochou, a tým svah stabilizovala. Pilóty môžu pôsobiť ako osamelé, pri veľkých osových vzdialenostiach. Pri prevítavaných pilótových stenách je dôležité dbať na odvodnenie, nakoľko stena môže zamedzovať prirodzenému prúdeniu podzemnej vody. Výhodou pilótových stien je ich značná pevnosť proti ohybu, vďaka čomu je možné nimi sanovať aj zosuvy so šmykovou plochou v hĺbke viac ako 10 m. Nevýhodou je finančná náročnosť a nutnosť použitia veľkej a ťažkej súpravy.

Príklad použitia pilótových stien na stabilizáciu zárezu je znázornený na Obrázku 7.[1, 18]

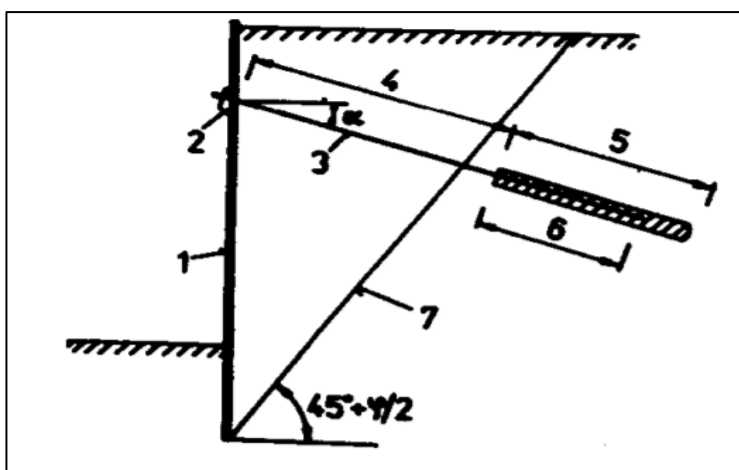
Mikropilótové steny je možné využiť pri zosuvoch s plytšou šmykovou plochou. Jedná sa o maloprofilové vrty, v priemere do 300 mm, do ktorých sa vkladá oceľová trubka. Vrt je následne vyplnený cementovou zaliievkou, v prípade potreby je koreň mikropilóty injektovaný. Vzhľadom na menšiu veľkosť potrebnej vrtnej súpravy je výhodou tejto metódy možnosť realizácie aj v stiesnených podmienkach a v lokalitách s ťažším prístupom. Nevýhodou je malá tuhosť takýchto prvkov. Pri veľkom namáhaní stien je nutné použiť kotvenie. [18]



Obrázok 7: Zaistenie zárezu rýchlostnej R1 pilótovými stenami [24]

- **Kotvenie** – Kotvy sú stavebné prvky schopné prenášať značné ťahové zaťaženia a tým minimalizovať horizontálne deformácie konštrukcií. Kotva sa skladá z kotevnej hlavy, tiahla a koreňa kotvy (Obrázok 8). Kotvy delíme na lanové, alebo tyčové. Lanové kotvy pozostávajú z niekoľkých pramencov (zvyčajne 2 – 15), pri tyčových kotvách sa používajú oceľové tyče s priemerom 18 – 63 mm. Tieto prvky sa vkladajú do maloprofilového vrtu vyplneného cementovou zaliievkou, ukloneného približne 40 – 90° od zvislice. Po predpísanej dobe sa realizuje injektáž koreňovej časti kotvy. Následne, po zatvrdnutí injektážnej zmesi, je kotva aktivovaná predopnutím kotvy na navrhovanú silu hydraulickým lisom.

Pri stabilizácii svahových pohybov sa zvyčajne používajú na kotvenie oporných, pilótových alebo mikropilótových stien (Obrázok 8). V prípade použitia kotiev ako samostatných stabilizačných prvkov sa používajú na roznesenie predpínacích síl rôzne betónové prahy, platne pozostávajúce z prefabrikátov, alebo vyrobené na mieste. Kotva musí byť naprojektovaná tak, aby siahala za šmykovú plochu. [1] [25]



Obrázok 8: Schéma kotvenia pilótovej steny [26]

- 1 – Pilóta
- 2 – Hlava kotvy
- 3 – Tiahlo
- 4 – Volná časť
- 5 – Koreň
- 6 – Kotevná dĺžka ocele
- 7 – šmyková plocha

2.3.6 Osobitné opatrenia

V niektorých špecifických prípadoch, ak by sanácia svahu bola veľmi náročná a príliš nákladná, pristupuje sa k ekonomickejšiemu riešeniu zmenou lokality alebo trasy, premostením svahovej poruchy, alebo vedením trasy tunelom pod zosuvom. [4]

3 Charakteristika posudzovanej lokality

3.1 Poloha

Posudzovaný svah sa nachádza približne kilometer na sever od obce Vysoká vo východnej, hraničnej časti okresu Přerov s okresom Nový Jičín. Okres leží v juhovýchodnej časti Olomouckého kraja. Svah leží v katastrálnom území obce Vysoká u Hustopečí nad Bečvou na parcele č. 229/1. Z hľadiska ochrany prírody patrí lokalita pod pôsobnosť Rámcového dohovoru o ochrane a trvalo udržateľnom rozvoji Karpát (Karpatský dohovor). [19]

Svah sa nachádza v krížení cesty III. triedy 43911 s rýchlostnou cestou R48. Ide o južný svah zárezu rýchlostnej cesty. Prevýšenie posudzovaného svahu je približne 15 m, pričom sa nachádza v nadmorskej výške približne 315 – 330 m. n. m. Poloha svahu je graficky znázornená na Obrázku 9.

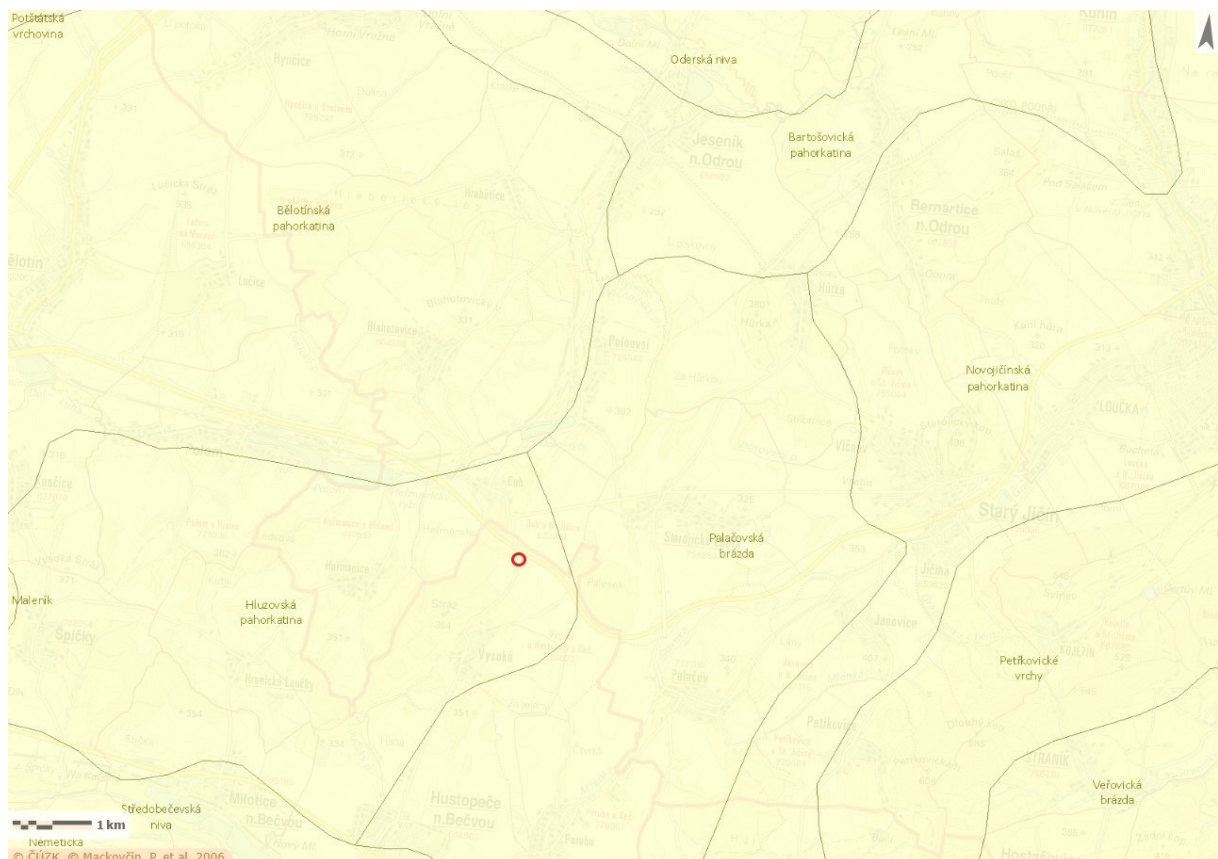


Obrázok 9: Lokalizácia riešeného svahu (vyznačené krúžkom) [12 – upravené]

3.2 Geomorfologické pomery

Z hľadiska geomorfológie patrí záujmová lokalita do sústavy Vonkajšie Západné Karpaty, podsústava Západobeskytské podhúří, celok Podbeskytská pahorkatina. Bližšie delenie zaraďuje oblasť do podcelku Příborská pahorkatina a v okrsku Hluzovská pahorkatina (Obrázok 10). [13]

Hluzovská pahorkatina leží v južnej až juhozápadnej časti Příborskej pahorkatiny. Má nepravidelný a prerušovaný hrebeň erózne – denudačného charakteru so zbytkami terciérne zarovnaného povrchu. Je to geologicky rôznorodá a reliéfom členitá oblasť, tvorená flyšovými horninami frýdeckého súvrstvia s vložkami pieskocov a zlepcov. Povrch je prekrytý pleistocénnymi deluviálnymi a eluviálnymi sedimentami, alebo sprašovými hlinami. [14]



Obrázok 10: Geomorfologické zaradenie oblasti podľa okrsku (vyznačená krúžkom) [13 – upravené]

3.3 Klimatické pomery

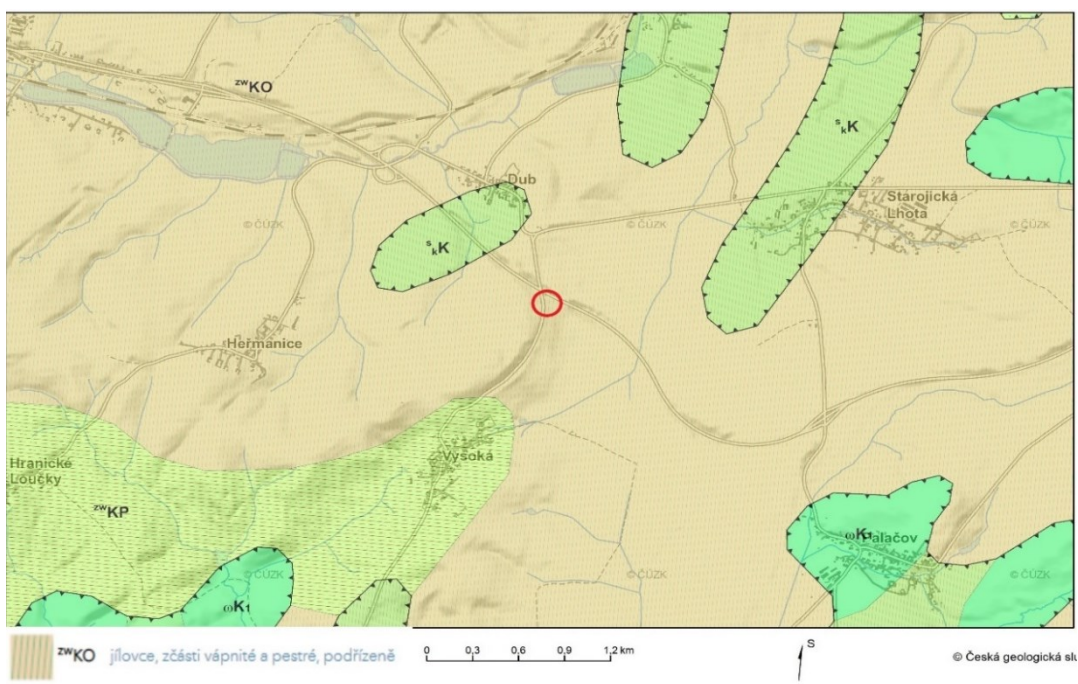
Riešená lokalita sa nachádza v rámci klimatického delenia krajiny v mierne teplej oblasti, konkrétne MT 10. Takéto oblasti sú charakteristické dlhými, teplými a suchými letami, a mierne teplou, veľmi suchou a krátkou zimou. Ročný úhrn zrážok je približne 550 – 650 mm. [15]

3.4 Geologické a inžinierskogeologické pomery

Riešená lokalita patrí z geologického hľadiska do podslezskej jednotky vonkajšieho flyša Moravskoslezských Beskýd. Flyšové pásmo vonkajších Západných Karpát tvorí mohutný akrečný klin s príkrovovou stavbou, tvorený súvrstviami najvyššej jury, kriedy a najmä paleogénu, prevažne vo flyšovom vývoji. Pre flyšový vývoj je typické opakovanie sledu vrstiev pieskocov, ílovcov alebo slieňocov. Flyšové pásmo rozlišujeme na dve základné jednotky. Vonkajšiu krosenskú jednotku a vnútornú magurskú jednotku.

Krosenská jednotka sa tektonicky delí na menšie jednotky – pozdranskú, ždánickú a podslezskú jednotku. Magurská jednotka buduje väčšinu flyšového pásma. Patria do nej dielčie príkrovové jednotky – račanská, bystrická, krynická a bielokarpatská.

Predkvartérne podložie záujmového svahu tvoria horniny podslezskej jednotky, konkrétne frýdlantského súvrstvia, třineckých vrstiev. Tieto vrstvy sú charakteristické výskytom mezozoických škvritných ílovcov, ktoré prevažujú nad jemnozrnnými pieskocami a zlepcami (Obrázok 11). [14, 20]



Obrázok 11: Predkvartérna geologická stavba lokality [20 – upravené]

Kvartér

Kvartérne nadložie tvoria eluviálne a deluviálne sedimenty. Sú to prevažne kamenito-piesčito-ílovité elúviá hornín badenu, karpátu a flyšu. Najväčšie zastúpenie majú eluviálne a deluviálne íly triedy F6 a R6 s premenlivým množstvom, približne 10 – 20%, úlomkov vápencov a pieskovcov o veľkosti 2 – 3 cm. Mocnosť sedimentov je v priemere 5,9 m. Ležia v priamom nadloží predkvartérnych ílovcov a prachovcov ako ich zvetralinový plášť. Eluviálne sedimenty sú zvetrané horniny materského podkladu, ležiace na mieste svojho vzniku. Deluviálne sedimenty vznikajú gravitačnými pohybmi po svahu. V porovnaní s eluviálnymi sedimentami sú úlomky mierne opracovanejšie a majú chaotickejšie usporiadanie. V širšej oblasti sa okrem tohto typu sedimentov vyskytujú v menšom zastúpení aj pleistocénne sprašové hliny, ktoré pod navážkami tvoria povrchovú vrstvu prírodného terénu.[5, 10]

Paleogén - Neogén

Vo svahu nachádzajú ílovce a prachovce triedy R5 – R6, silne zvetrané až rozložené na ílovitú hlinu s premenlivým množstvom navetraných úlomkov vápencov a pieskovcov, ktoré miestami vytvárajú aj súvislejšie polohy mocnosti 10 – 60 cm. Rozhranie ílovcov a kvartérneho nadložia leží v hĺbke 6,0– 8,8 m pod povrchom.[5, 10]

3.5 Hydrogeologické pomery

Záujmová lokalita patrí z hľadiska hydrogeologickej rajonizácie ČR do rajónu Flyš v mezipovodí Odry (č.3213) v skupine rajónov flyšové sedimenty. V rámci hydrologického členenia spadá lokalita do úmoria Baltského mora a povodia Odry. [17]

Vo flyšovom pásme je hlavným prostredím prúdenia podzemných vôd zóna priepovrchových zvetralín a roztvorených puklín. Hladina podzemných vôd sa nachádza vo väčšine prípadov do niekoľkých metrov od povrchu. Hladiny v menšej hĺbke sa nachádzajú obvykle v dnách údolných oblastí, s terénnymi eleváciami hladina môže klesať až do hĺbky 20 m pod povrchom. Prúdenie podzemnej vody má vo flyšových zónach prevažne zostupný charakter v smere ku lokálnym zónam drenáže.[8]

Vzhľadom na geologickú stavbu riešeného svahu prevažujú vody prielinového charakteru v relatívne málo priepustnom prostredí ílovcového predkvartérneho podložia a jeho ílového zvetralinového plášťa. Hladina podzemnej vody sa podľa prieskumných prác (február 2018) nachádza v hĺbke približne 9 m. Ide o vztlakové vody s rozdielom medzi narazenou a ustálenou hladinou približne 3 – 7 m. Z hydrogeochemického hľadiska voda nevykazuje zvýšené obsahy látok s agresívnymi účinkami na nechránené základové betónové konštrukcie. [5, 10]

3.6 Svahové pohyby v okolí lokality

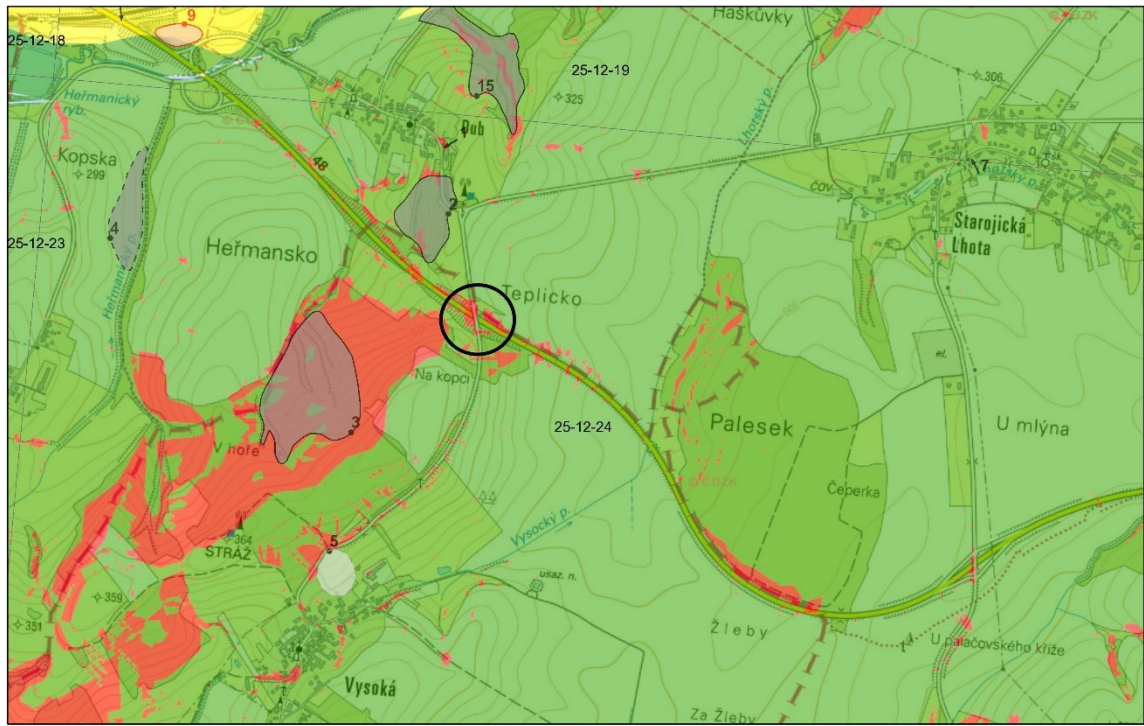
Flyšové pásmo Vonkajších Západných Karpát je vo všeobecnosti známe častým výskytom svahových deformácií. V neďalekom okolí záujmového svahu sa podľa mapového portálu Českej geologickej služby nachádza niekoľko zosuvných území.

Približne 430 m severozápadne od posudzovaného svahu sa nachádza dočasne ukľudnený fosilný zosuv. Ide o západne orientovaný svah nachádzajúci sa v blízkosti obce Dub. Zosuv je zapísaný v databáze Registra svahových nestabilití Českej republiky. Zosuv je dlhý 210 m a široký 330m (Obrázok 12 – 1). Neďaleko severne od tohto zosuvu sa nachádza bodový zosuv, s označením geofondu 6812. Zosuv bol sanovaný stabilizačnou konštrukciou a v súčasnosti je bez známok pohybu (Obrázok 12 – 2). Približne 550 m juhozápadným smerom od záujmového svahu sa nachádza ďalší, pomerne rozsiahly dočasne ukľudnený zosuv. Zosuv má plošný charakter s rozmermi 480 x 400 m. Nachádza sa na severozápadne orientovanom svahu so sklonom približne 23°. V tele zosuvu sú vyvinuté dve výrazné erózne rokliny (Obrázok 12 – 3). Na okraji obce Vysoká sa nachádza ďalší fosilný zosuv plošného charakteru s rozmermi 180x150 m. Zosuv je z hľadiska stupňa aktivity posúdený ako stabilizovaný / zastavený. (Obrázok 12 – 5). Ďalší plošný zosuv sa nachádza západne od záujmového územia. Ide o dočasne ukľudnený zosuv s rozmermi 470 x 130 m. (Obrázok 12 – 4)



Obrázok 12: Svahové nestability v okolí lokality [21]

V okolitom území, ako aj priamo v záujmovom južnom svahu zárezu cesty R48, sa podľa Mapy náchylnosti k zosúvaniu Česká geologická služba vyskytujú zóny 3. triedy náchylnosti k zosúvaniu. Jedná sa o zóny, kde sú zohľadnené podmienky najviac vhodné pre vznik svahových deformácií (Obrázok 13). [21]



7. října 2021

0 0,15 0,3 0,45 0,6 km



© Česká geologická služba



1 Třída nízké náchylnosti - jsou oblasti s nejméně

vhodnými podmínkami pro vznik svahových deformací v dané oblasti



2 Třída střední náchylnosti - v těchto územích nelze vznik

svahových nestabilit vzhledem k podmínkám prostředí vyloučit



3 Třída vysoké náchylnosti - definuje části oblastí, kde

zohledněné podmínky jsou nejvíce vhodné pro vznik svahových nestabilit

Obrázok 13: Mapa náchylnosti svahov k zosúvaniu [21]

4 Analýza terajšieho stavu

4.1 Rekognoskácia terénu

V rámci posúdenia terajšieho stavu záujmového svahu a príľahlých konštrukcií bol vykonaný terénny prieskum formou pochôdzky po lokalite. Jedná sa o južný svah zárezu cesty R48. Jeho časť vykazujúca svahové deformácie sa nachádza v mieste premostenia cesty III. triedy č. 43911. Sklon svahu je približne 30°.

Koruna zárezu je v smere cesty č. 43911 zaistená mostnou oporou s mostnými krídlami. Svah pod mostovkou spevňuje obklad betónovými tvárniciami (Obrázok 14 – vľavo). Po celej dĺžke päty zárezu stojí kotvený, približne meter vysoký oporný múr (Obrázok 14 – vpravo).



Obrázok 14: Stabilizačné opatrenia na lokalite; vľavo: mostná opora, vpravo: oporný múr

Svah je prerastený vegetáciou. Vegetačný pokryv tvoria ihličnaté a listnaté stromy, a trávnatý porast. Pri terénnej pochôdzke boli zistené výskyty tzv. opitých stromov (Obrázok 15). Týmto pojmom sa nazývajú stromy s prehnutým kmeňom. Vznikajú pri plazivých svahových pohyboch, kedy sa kmeň stromu snaží udržať vo vertikálnej polohe pričom jeho koreňová časť sa postupne v dôsledku plazivých svahových deformácií posúva po spádnicí svahu. Markantným ukazovateľom súčasnej aktivity svahu je deformované zábradlie a zvodidlo za mostom, na východnom okraji cesty III/43911 (Obrázok 16). Tieto ukazovatele dokazujú súčasnú aktivitu svahu zárezu, najmä v jeho korunnej časti.



Obrázok 15: Opaté stromy



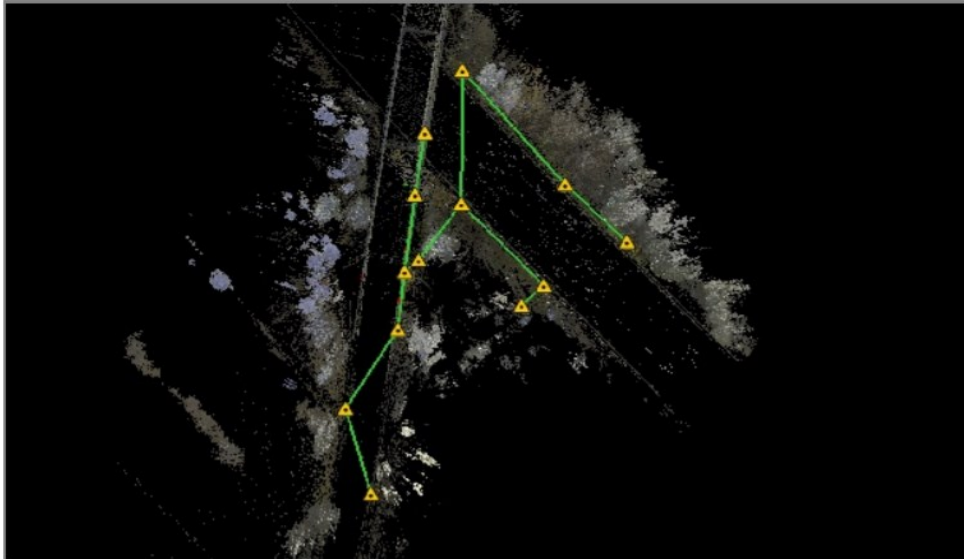
Obrázok 16: Deformované zábradlie a zvodidlo

Súčasne s rekognoskáciou terénu bolo vykonané zameranie geometrie svahu pomocou laserového 3D skeneru. Použitý bol skener Leica RTC360 na trojnohom statíve (Obrázok 17 – vľavo). Skener dokáže zaznamenať až 2 milióny bodov za sekundu a vďaka vlastnej kamere 360 stupňový snímok v kvalite HDR. Pri skenovaní boli použité čiernobiele terče, ktoré dodávali skenovaným bodom orientáciu v teréne a boli použité ako vlícovacie body, ktoré následne slúžili ako spojovacie body viacerých mračien bodov z viacerých stanovišť (Obrázok 17 – vpravo). Skenovanie bolo uskutočnené z 13 stanovišť.

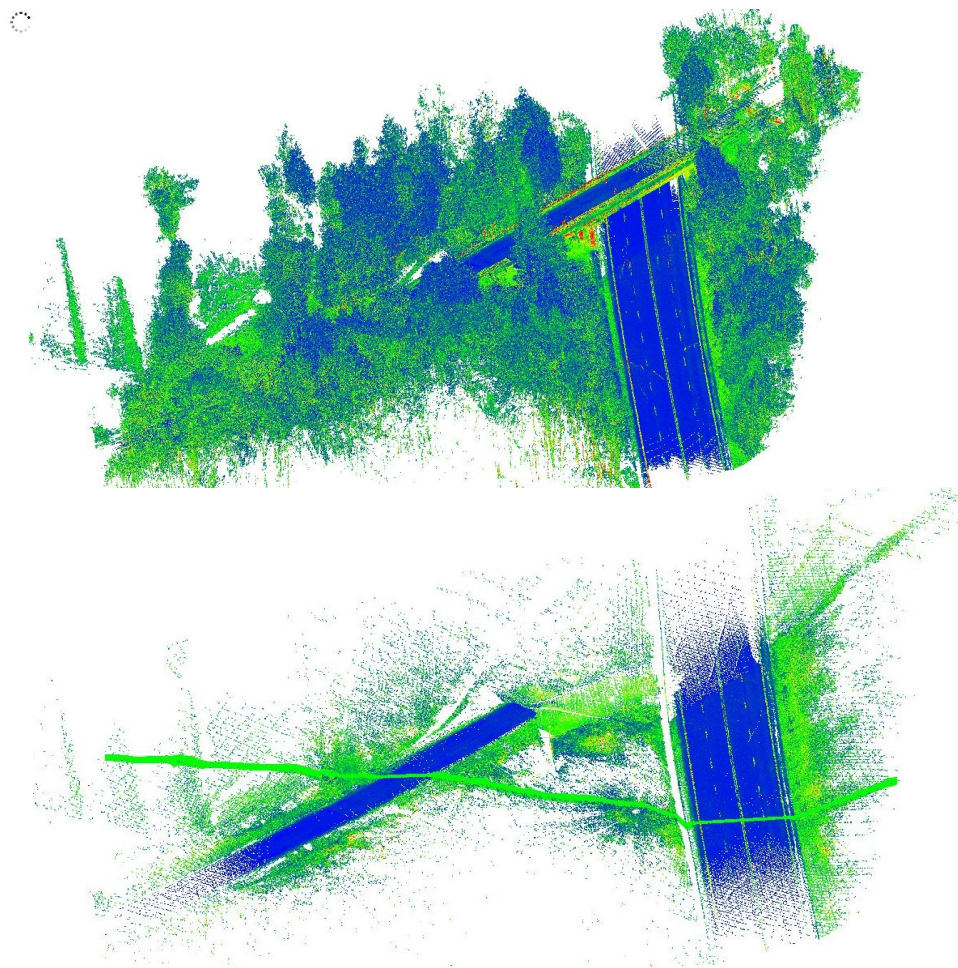


Obrázok 17: 3D laserové skenovanie na lokalite

Výsledné mračná bodov boli spracované v softvéri Leica REGISTER Cyclone 360. Mračná bodov z jednotlivých stanovišť boli spojené do jedného modelu (Obrázok 18). Pre odstránenie vegetačného porastu bol použitý program CloudCompare, ktorý tiež umožňuje vytvorenie rezu terénu (Obrázok 20). Rez bol exportovaný vo formáte .dxf do programu AutoCAD 2018 kde bol následne upravený.



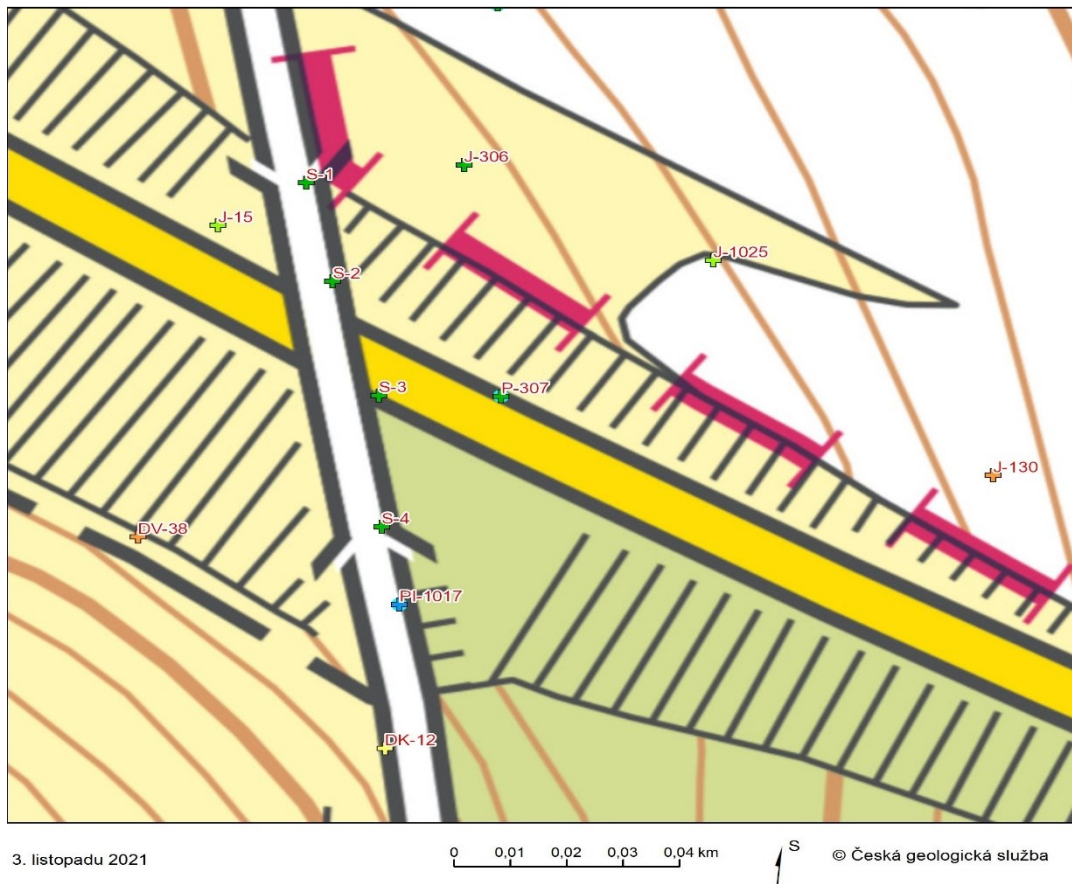
Obrázok 18: Sken terénu s vyznačením skenovacích stanovišť



Obrázok 19: Spracovanie skenu v programe CloudCompare;
hore – model terénu so stromovým porastom
dole – model terénu s odstránenou vegetáciou a vytvoreným rezom

4.2 Vrtná preskúmanosť

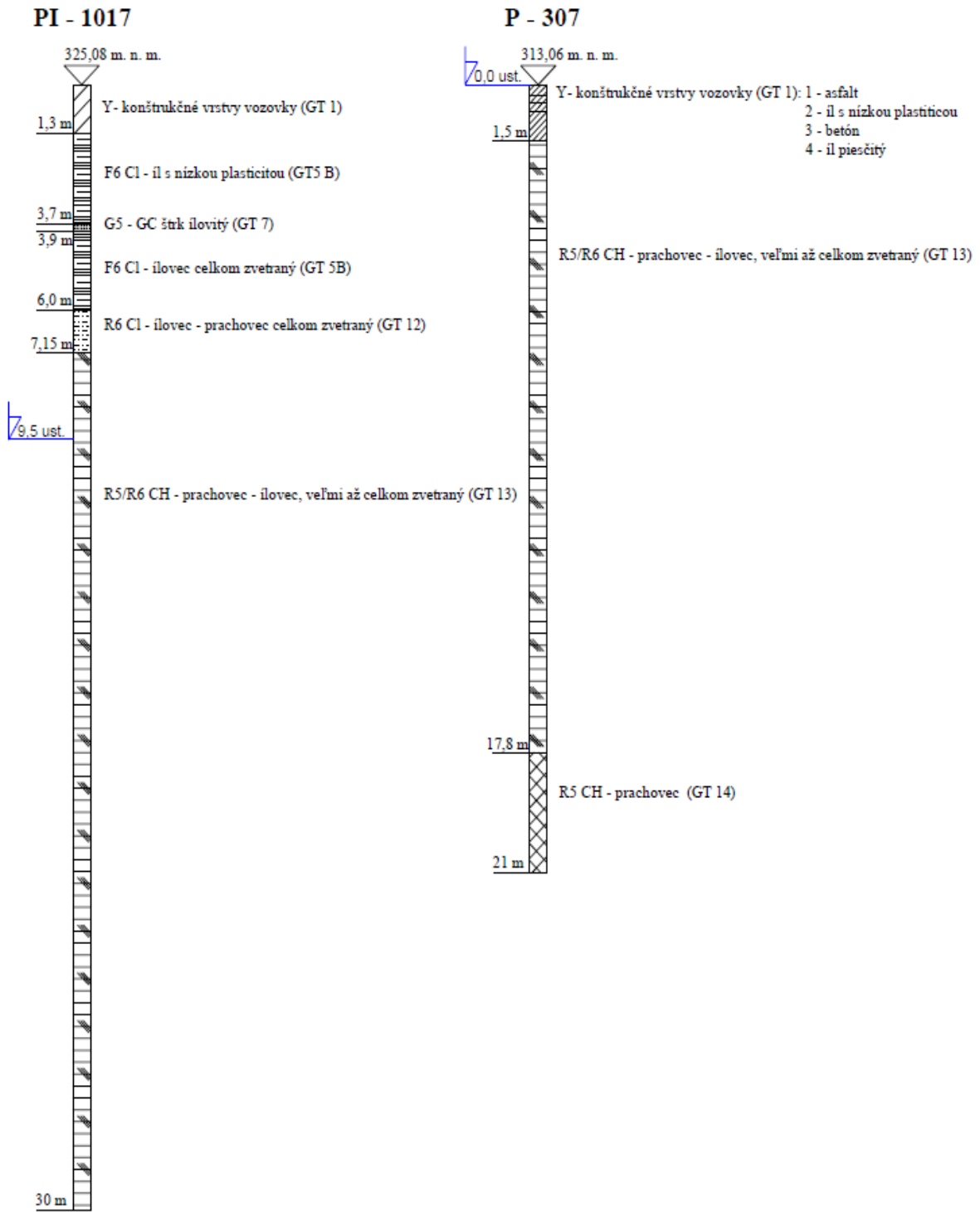
Priamo vo svahu zárezu boli v minulosti realizované vrty s označením S – 4 a S – 3 firmou UNIGEO Ostrava v roku 1984 (Obrázok 20). Vrty boli realizované v rámci akcie *Dub – Starý Jičín, Doplňujúci inžinierskogeologický prieskum základových pôd*. Spolu s vrtmi S – 1 a S – 2 bol prieskum zameraný na overenie základových pomerov v mieste preložky cesty III/43911 v km 0,0 – 0,2 tj. v mieste premostenia cesty R48. Jedná sa o inžinierskogeologické vrty hĺbky 17 – 20 m. Vrt najmladšieho dáta je PI1017, realizovaný firmou INSET v roku 2018 v rámci doplnkového prieskumu (Silnice) I/35, Lešná - Palačov, zpracování doplňkového GTP.



Obrázok 20: Vrtná preskúmanosť územia [22]

Približne 40 m západne od cesty 43911 sa nachádza 8,8 metrový vrt inžinierskogeologický vrt DV – 38, realizovaný v rámci prieskumu pre trasu preložky cesty I/35 v úseku Dub – závod Deza. V trase cesty R48 bol realizovaný 21 m inžinierskogeologický vrt P – 307. [22]

Dáta z objektov PI – 1017, P – 307 a kompletná záverečná správa prieskumu *Dub – Starý Jičín, Doplňujúci inžinierskogeologický prieskum základových pôd* vrátane vrtných profilov boli vyžiadané z Geofondu Českej geologickej služby za účelom vytvorenia geologického rezu a matematického modelu. Okrem toho bol vyžiadaný geotechnický pasport mostného objektu, zo záverečnej správy I/35 Lešná - Palačov, podrobný GTP MÚK Palačov, napojení na R48.



Obrázok 21: Profily vrtov PI - 1017 a P - 307 [9, 10 – upravené]

5 Modelová analýza súčasného svahu

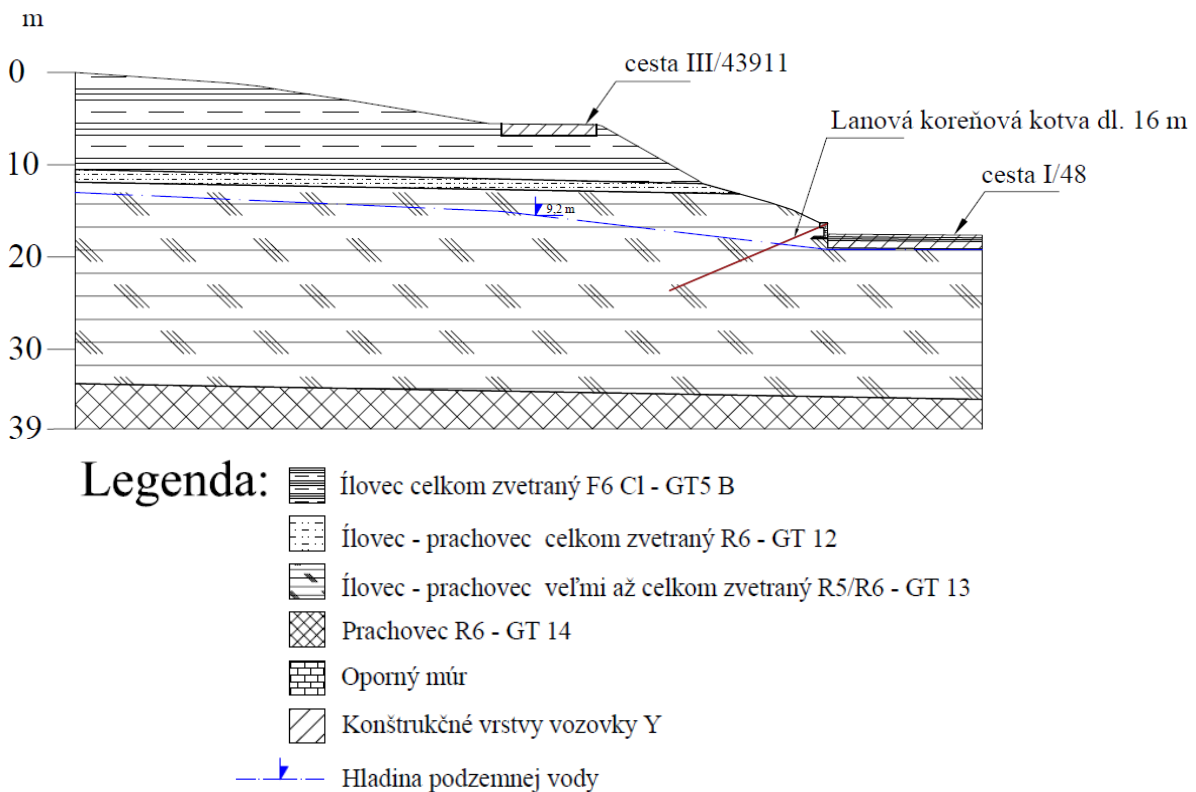
5.1 Tvorba geologického rezu

Po rekognoskácií a zameraní povrchu terénu, a štúdiu archívnych materiálov vrtných prieskumných prác (kapitola 4) bol v programe AutoCAD vytvorený geologický rez svahu. Základnými podkladmi geologickej stavby územia boli profily vrtov PI – 1017 a P – 307 (Obrázok 21), keďže sa oba nachádzajú približne v línii rezu a sú najrelevantnejšie z hľadiska dátumu ich realizácie (2015 a 2018). Vrty boli súčasťou podrobného a doplnkového prieskumu v rámci napojenia cesty I/35 na R48. Podložie overené vrtmi bolo pre geotechnický pasport mostného objektu na ceste III/43911 rozdelené na nasledovné geotechnické typy:

- GT1 – navážky – konštrukčné vrstvy vozovky
- GT5B – íl nízko až vysoko plastický, tuhý/pevný
- GT7 – štrk ílovitý
- GT12 – ílovec a prachovec, rozložený
- GT13 – ílovec a prachovec, celkom zvetraný
- GT14 – ílovec a prachovec, veľmi zvetraný [9]

Na základe jednotlivých litologických rozhraní bol v programe AutoCAD vytvorený geologický rez svahu, znázornený na obrázku 22. Vrstva štrku ílovitého nebola na základe malej mocnosti vrstvy (cca 20 cm) zahrnutá do geologického rezu keďže by pri výpočtoch mohla nepriaznivo ovplyvňovať presnosť výsledkov.

Ustálená hladina podzemnej vody sa síce pri vrte P – 307 nachádzala v úrovni terénu, avšak pre čo najväčšiu zhodu modelu s reálnou situáciou je hladina podzemnej vody v úrovni cesty R48 vedená v reze tesne pod konštrukčnými vrstvami vozovky.



Obrázok 22: Geologický rez svahu

5.2 Tvorba matematického modelu

Pre vytvorenie matematického modelu svahu bol použitý geotechnický softvér Plaxis 2D. Tento softvér má široké využitie pri stabilitných a deformačných výpočtoch v geotechnike pomocou metódy konečných prvkov. Metóda konečných prvkov je založená na rozdelení kontinua na určitý počet podoblastí, ktoré sú navzájom spojené uzlovými bodmi. Trojuholníkové podoblasti spojené uzlovými bodmi tvoria sieť. Posuny a deformácie sú vyjadrené pomocou posunov v jednotlivých uzlových bodoch. Medzi vstupné parametre patria vlastnosti materiálov (zemín, kotiev, pilót...), určenie geometrie a okrajových podmienok.

Prvým krokom tvorby bol teda import geometrie svahu. Geologický rez s vytvorenými geologickými rozhraniami bol vo formáte DXF z programu AutoCAD importovaný do výpočtového softvéru Plaxis. Okrajové podmienky boli nastavené ako tzv. tuhá vaňa. Pri takto nastavených okrajových podmienkach je zamedzené posunom v horizontálnom smere na vertikálnych hraniciach modelu, na spodnej hranici sú zamedzené posuny v oboch smeroch. Typ konečných prvkov bol zvolený ako 15 uzlový. Tento typ vykazuje vyššiu presnosť pri stabilitných výpočtoch.

Ďalším krokom bola voľba konštitutívneho modelu a následne zadefinovanie potrebných parametrov jednotlivých materiálov. Pre všetky zeminy bol zvolený Mohr – Columbov materiálový model. Mohr – Columbov model je charakterizovaný piatimi vstupnými parametrami:

- súdržnosť c_{ef}
- uhol vnútorného trenia φ_{ef}
- deformačný modul E_{def}
- poissonovo číslo ν
- uhol dilatancie ψ

Pre jednotlivé vrstvy boli zadané parametre. Vlastnosti vrstiev GT5B až GT14 boli zadávané na základe geotechnického pasportu, vlastnosti konštrukčných vrstiev vozovky boli prebraté zo smerných normových charakteristík podľa normy ČSN 73 1001. Vstupné parametre zemín sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Vstupné parametre horninového prostredia

Zemina	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c [kPa]	φ [°]	E [kPa]	ν [-]	$k_x = k_y$ [m/s]
GT5 B	18	21	8,5	21,2	3300	0,4	8,67E ⁻¹¹
GT12	19,6	22	4,6	18	3800	0,39	8,61E ⁻¹¹
GT13	18	22	19	25	25000	0,36	1.59E ⁻¹⁰
GT14	18,65	21	24,1	29,5	49000	0,3	3,78E ⁻⁹
Y – F4	18,5	20	19	25	20000	0,4	2.0E ⁻⁸
Y – F6	21	22	18	25	8000	0,4	2,0E ⁻¹⁰
Y - G	20	21	15	30	200000	0,2	4E ⁻⁴

Pre vrstvy asfaltu a betónu v telese cesty R48 a pre materiál opornej steny v päte svahu bol zvolený model Linear – Elastic. Tento model je charakterizovaný Hookovým zákonom. Všetky deformácie sú vratné (elastické). Využíva sa pri modelovaní betónových alebo oceľových častí modelu. Lineárne elastický model je charakterizovaný len dvoma vstupnými parametrami:

- modul pružnosti E
- poissonovo číslo ν [29]

Vlastnosti navážky Y – asfalt, Y – betón a materiálu opornej steny sú uvedené v Tabuľke 2.

Tabuľka 2: Vlastnosti lineárne elastických materiálov

Materiál	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E [kPa]	ν [-]
Y – asfalt	20	21	2100000	0,4
Y – betón	24	24	27270000	0
Oporná stena	25	25	25000000	0,2

Ďalej bolo potrebné zadefinovať typ odvodnenia materiálu. Vrstvy Y – F4, Y – F6, GT5 B až GT14 boli zadávané ako materiály typu undrained, vrstva Y – G a Y – asfalt ako drained a zvyšné materiály ako non – porous.

Posledným potrebným prvkom v tvorbe modelu súčasného stavu svahu bolo zadefinovanie parametrov kotvenia opornej steny. Kotvy boli namodelované v záložke Structures ako prvky node – to – node anchor (Tabuľka 3).

Tabuľka 3: Vstupné parametre kotvy

Prvok	EA [kN/m/]	L_{spacing} [m]
Anchor	200000	2,5

V záložke structures bolo namodelované tiež zaťaženie vyvolané dopravou v úrovni cesty III/43911. Zaťaženie bolo zadané, podľa ČSN 73 6133: Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací, s hodnotou 10 kN/m². Zaťaženie od dopravy v úrovni cesty I/48 nebolo do modelu zadávané, keďže by v modeli mohlo zvyšovať stabilitu, vzhľadom na polohu v päte svahu, čo neodpovedá reálnej situácii. Po zadefinovaní všetkých potrebných prvkov a materiálov modelu bola v záložke Mesh vytvorená sieť konečných prvkov. Ďalej bola z programu AutoCAD importovaná hladina podzemnej vody.

Následne bol vlastný výpočet rozdelený na tri fázy. Prvá (iniciačná) fáza predstavuje výpočet pôvodného napätodeformačného stavu svahu. Typ výpočtu v tejto fáze bol zvolený ako Gravity loading.

Druhá fáza predstavuje deformačnú analýzu súčasného stavu svahu. V tejto fáze bol zvolený typ výpočtu Plastic. Taktiež bola aktivizovaná hladina podzemnej vody a zaťaženie od dopravy a sanačné opatrenia v spodnej časti svahu.

Tretia fáza výpočtu predstavuje situáciu s extrémnym úhrom zrážok, kedy hladina

podzemnej vody nastúpa na úroveň terénu. V tejto fáze bola oproti druhej zmenená len úroveň hladiny podzemnej vody.

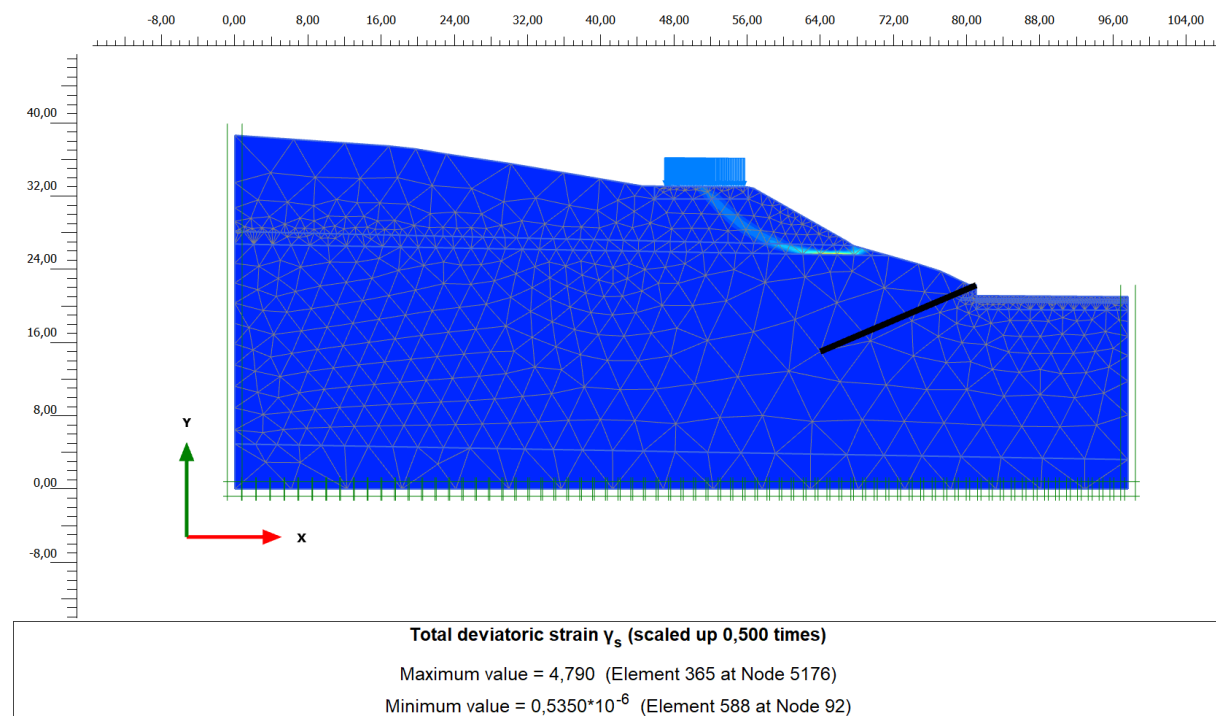
Pre všetky fázy bolo potrebné spočítať stupeň stability ΣMsf . Táto hodnota je v programe plaxis počítaná pomocou výpočtu typu Safety. Pri tomto type výpočtu je zobrazená hodnota stupňa stability ku kritickej šmykovej ploche záujmovej oblasti. Stupeň stability je v programe počítaný ako pomer pôvodných šmykových parametrov, zadávaných pri definovaní materiálu (c, φ) ku hodnote redukovaných šmykových parametrov na medzi porušenia (c_r, φ_r). Stupeň stability je teda definovaný vzorcom:

$$\Sigma Msf = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} \quad (1)$$

Stupeň stability by podľa ČSN EN 1997 – 1: Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla mal byť, v prípade trvalo stabilizovaných svahov, väčší ako 1,5. V prípade dočasne stabilizovaných svahov by hodnota nemala byť menšia ako 1,3.

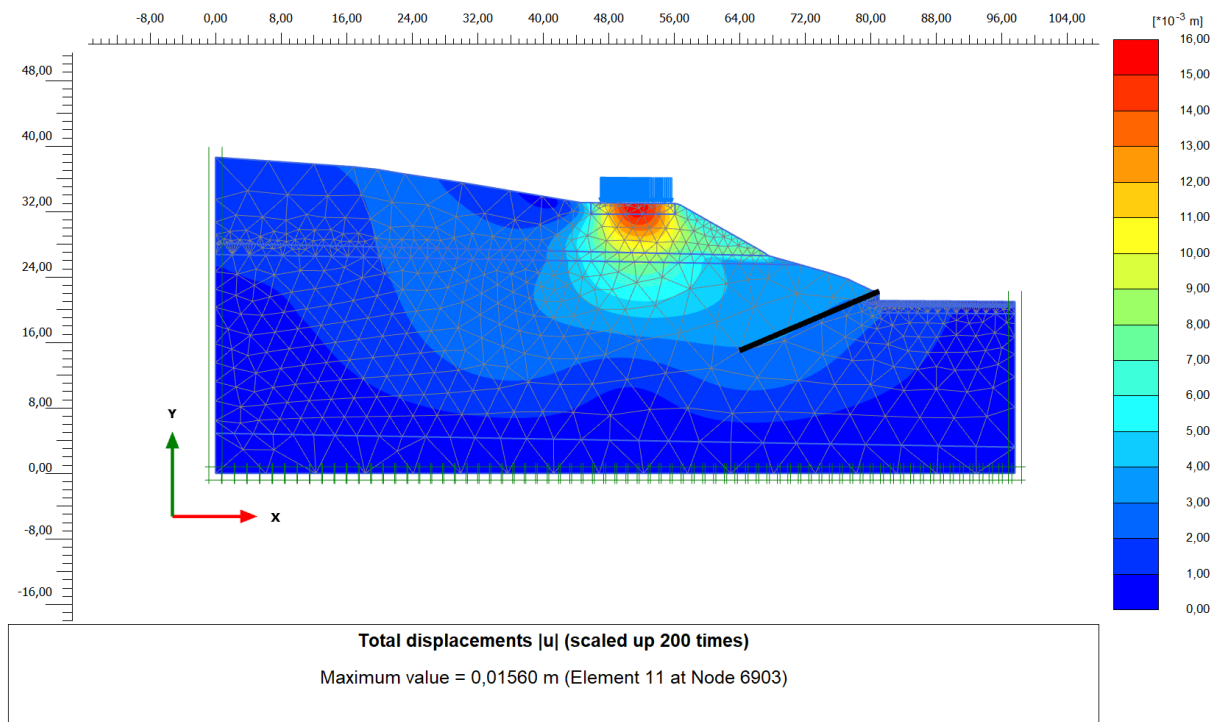
5.3 Výsledky modelovej analýzy súčasného stavu svahu

Po zadefinovaní všetkých potrebných parametrov modelu došlo k výpočtu jednotlivých fáz. Na základe výstupov z programu je jasné že šmyková plocha a deformácie sa viažu hlavne na vrstvy ílov a ílovcov s veľmi nízkymi deformačnými a šmykovými parametrami (Obrázok



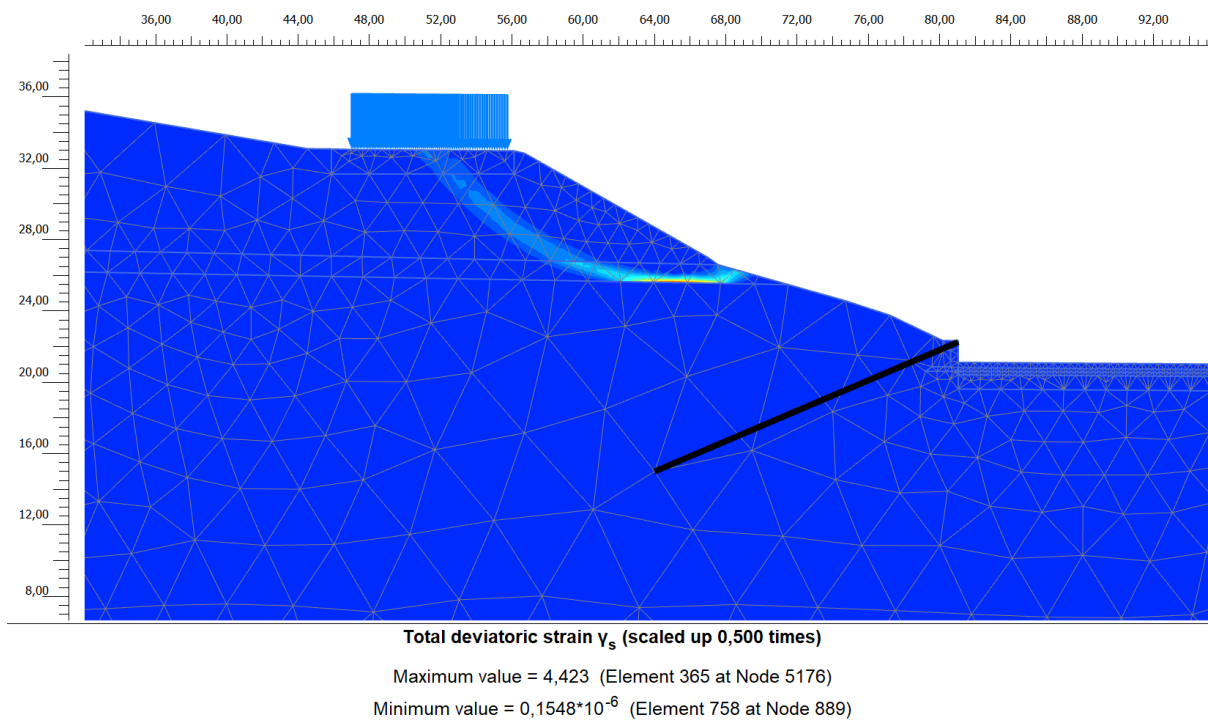
Obrázok 23: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy

23). Výsledný stupeň stability dosiahol hodnotu 1,236. Táto hodnota nepresahuje normou požadovaný stupeň stability pre trvalo stabilizované svahy, ktorý by mal byť väčší ako 1,5.

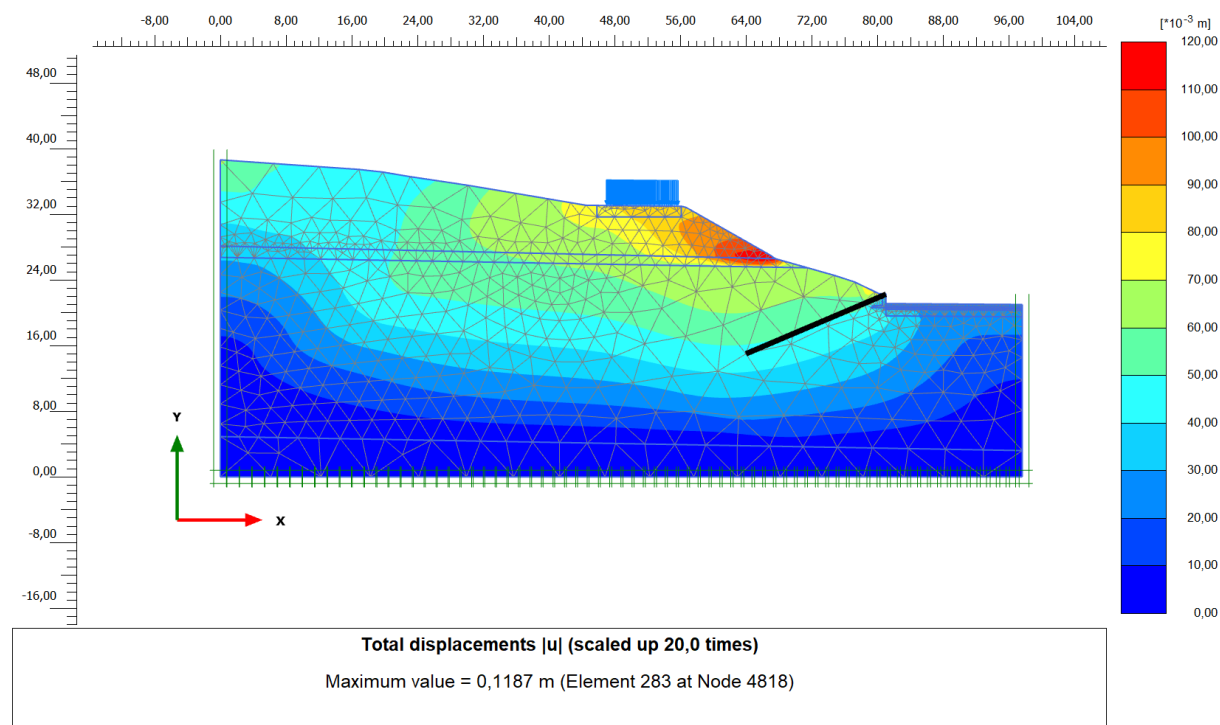


Obrázok 24: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny

V tretej fáze bola namodelovaný kritický stav svahu s hladinou podzemnej vody v úrovni terénu v dôsledku extrémnej zrážkovej situácie. Na základe výstupu je jasné že šmyková plocha sa nachádza na identickom mieste ako v prechádzajúcej fáze (Obrázok 25). Maximálna hodnota absolútnych posunov o veľkosti 0,12 m sa však nachádza pri spodnej časti šmykovej plochy (Obrázok 26). Pri pôvodnej hladine podzemnej vody boli tieto hodnoty o niečo menšie – 0,016 m a sú lokalizované primárne pod cestou III/43911 (Obrázok 24). Stupeň stability sa v tomto prípade znížil na hodnotu 1,067.



Obrázok 25: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy, kritický stav



Obrázok 26: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny, kritický stav

Výsledky z matematickej analýzy súčasného stavu svahu a hodnoty stupňa stability (Tabuľka 4) naznačujú, že môže dochádzať k deformáciám svahu v jeho hornej časti.

Tabuľka 4: Stupne stability pre jednotlivé fázy

Fáza	Stupeň stability ΣM_{sf}
Bežný stav svahu	1,236
Kritický stav svahu	1,067

Pri situáciách s nastúpanou hladinou podzemnej vody sa dokonca stupeň stability blíži hodnote 1, čo je podmienkou rovnováhy svahu. Predpoklady matematickej analýzy potvrdzujú tiež skutočné povrchové prejavy deformácie svahu pri hrane cesty III/43911 (viď. kapitola 4.1). Výsledky indikujú že je potrebné navrhnuť vhodné sanačné opatrenia, ktoré by zvýšili stupeň stability svahu nad hodnotu 1,5 a zamedzili ďalším deformáciám komunikácie.

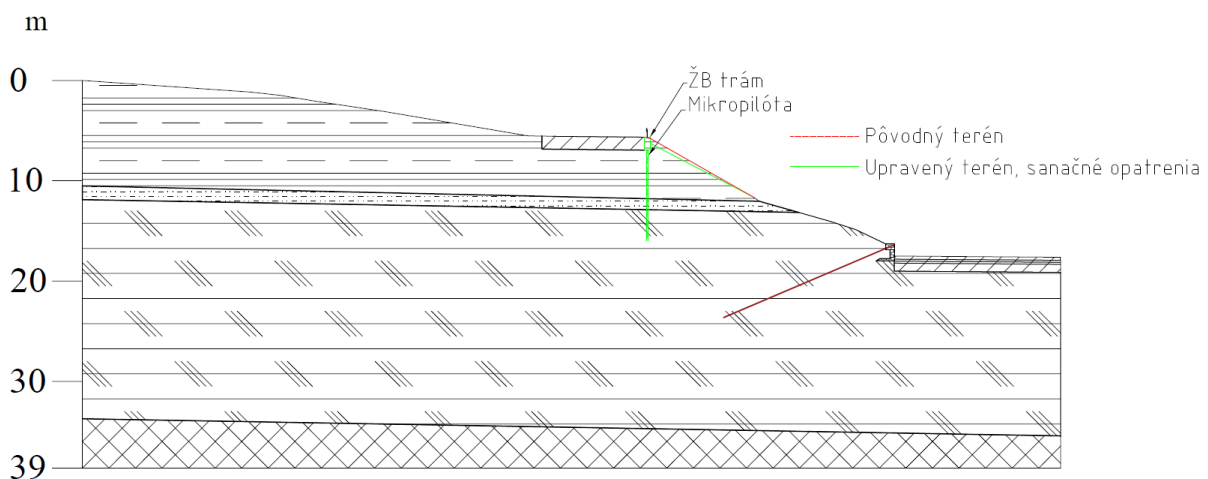
6 Návrh variantných sanačných opatrení

Na základe terénnej pochôdzky a matematickej analýzy modelu bolo potrebné navrhnuť účinné sanačné opatrenia. Jednotlivé varianty boli navrhnuté tak, aby prerušovali priebeh šmykovej plochy v programe AutoCAD. Pre jednotlivé sanačné varianty boli vytvorené matematické modely. Všetky výpočty vychádzali z kritickej modelovej situácie s hladinou podzemnej vody v úrovni terénu. Jednotlivé opatrenia sú popísané v nasledujúcich podkapitolách.

6.1 Návrh prvého sanačného opatrenia pomocou mikropilót

Prvým opatrením je sanácia svahu pomocou mikropilótovej steny. Mikropilóty sú realizované priamo z hrany cesty III/43911 v osovej vzdialenosti 1,5 m. Mikropilóty sú navrhnuté ako vŕtané mikropilóty s oceľovým nosným jadrom ANP SAS 500 vyplnené cementovou zaliievkou, o celkovom priemere 160 mm a dĺžke 9 m. Všetky mikropilóty budú následne upevnené do hlavového železobetónového trámu s rozmermi 0,6 x 1,3m.

Súčasťou sanácie je tiež mierna úprava terénu a vegetačného pokryvu v okolí mikropilótovej steny a výmena deformovaného zvodidla (Obrázok 15) za nové, zapustené do železobetónového trámu. Na obrázku 27 je schematicky znázornené riešenie prvého sanačného opatrenia. Detailnejšie je riešenie vyobrazené v Prílohe 1 – výkres č. 1.

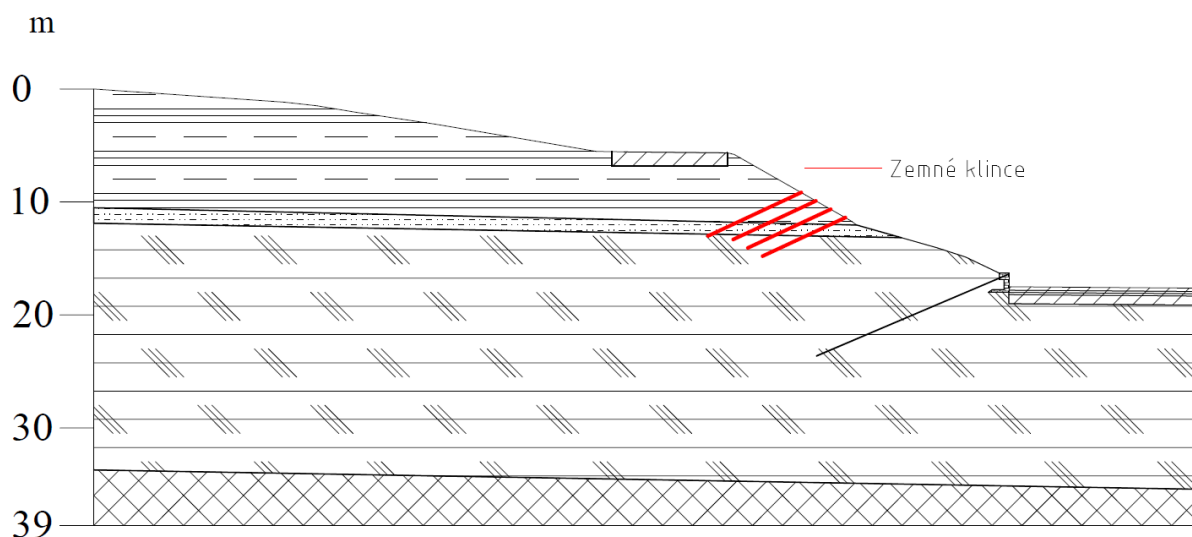


Obrázok 27: Schéma riešenia prvého sanačného opatrenia

6.2 Návrh druhého sanačného opatrenia pomocou klincovania svahu

Návrh druhého sanačného riešenia spočíva v klincovaní svahu v oblasti najväčších deformácií, tzn. v spodnej časti potenciálnej šmykovej plochy (Obrázok 25). Zemné klince sú navrhnuté tak, aby pretínali šmykovú plochu a siahali do pevnejších polôh zvetraných ílovcov (GT13). Navrhnuté bolo klincovanie pomocou injekčných zavrtávacích kotevných tyčí R25/14 s úklonom od horizontály 25° a osovou vzdialenosťou 1 v horizontálnom smere a 1,5 m v smere spádnice svahu. Klince budú inštalované v 4 radoch. Vrchná rada klincov má dĺžku 9 m, ostatné 8 m.

Povrch klincovanej oblasti je zabezpečený pomocou striekaného betónu a kari siete. Hlavy zemných klincov budú spojené s ochranou svahu pomocou oceľovej podložky a matice. Na obrázku 28 je schematicky znázornené riešenie prvého sanačného opatrenia. Detailnejšie je riešenie vyobrazené v Prílohe 1 – výkres č. 2.

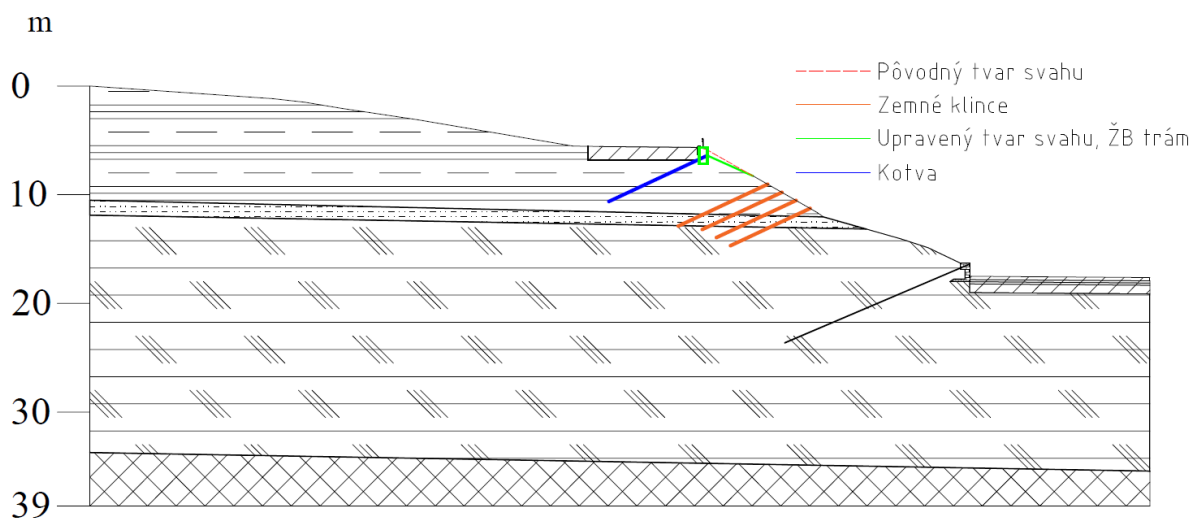


Obrázok 28: Schéma riešenia druhého sanačného opatrenia

6.3 Návrh tretieho sanačného opatrenia pomocou klincovania a kotiev

Tretie sanačné riešenie vychádza z druhého riešenia (vid'. vyššie), ale je doplnené o spevnenie vrchnej časti svahu pomocou kotveného železobetónového trámu. Pri okraji vozovky bol navrhnutý kotvený trám s rozmermi 0,75 x 1,5 m. Kotvený bude pomocou injekčných zavrtávacích tyčí typu R51 N s úklonom od horizontály 25°, osovou vzdialenosťou 2 m a dĺžkou 9 m. Hlavy kotiev budú upnuté do železobetónového trámu pomocou oceľových dosiek a matiek.

Po vybudovaní kotevného trámu bude do neho, tak isto ako v prípade prvého sanačného opatrenia (kapitola 6.1), zapustené nové zvodidlo. Súčasťou sanácie je takisto mierna úprava tvaru svahu a vegetácie v okolí železobetónového trámu. Riešenie je schematicky vyobrazené na obrázku 29, detailnejší pohľad je k dispozícii v Prílohe 1 – výkres č. 3.

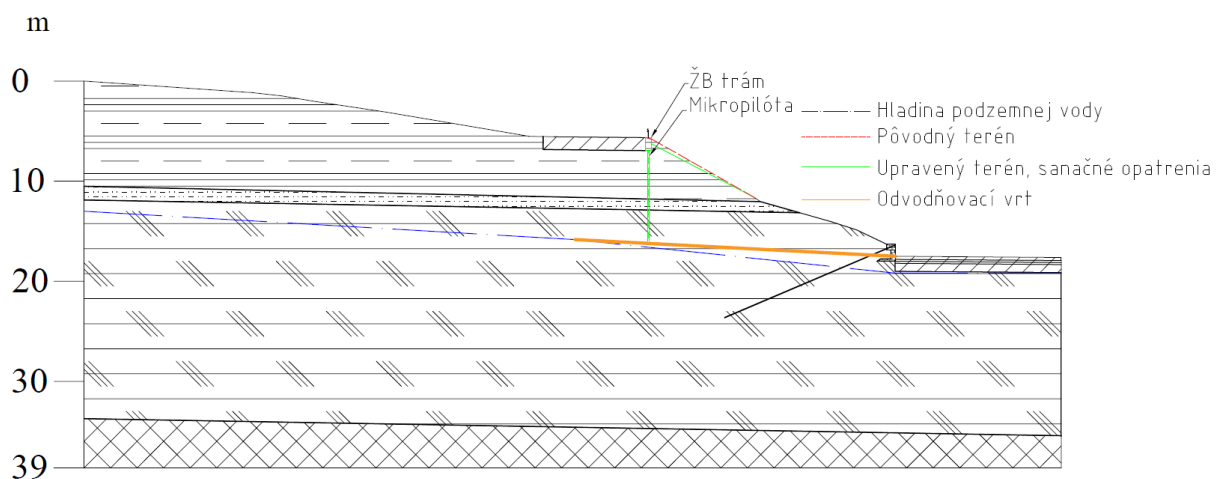


Obrázok 29: Schéma riešenia tretieho sanačného opatrenia

6.4 Návrh štvrtého sanačného opatrenia pomocou mikropilót a odvodnenia svahu

Nakoľko pri vypracovaní modelov k tejto práci neboli k dispozícii presné informácie o odvodnení svahu, predpokladalo sa, že drénovaná je len časť svahu za kotvenou opornou stenou. Potenciálne nastúpanie hladiny podzemnej vody pri extrémnych zrážkach významne znižuje stupeň stability svahu (viď. Kapitola 5.3). Šmyková plocha je podľa výpočtov síce viazaná na vrstvy s nízkymi deformačnými a šmykovými vlastnosťami, no eliminácia nadmerného zvyšovania hladiny podzemnej vody môže výrazne zvýšiť účinnosť ďalších sanačných opatrení. Vzhľadom na tieto skutočnosti bolo štvrté variantné opatrenie navrhnuté pomocou kombinácie silových prvkov – mikropilót upevnených do železobetónového trámu, a hĺbkového odvodnenia svahu pomocou subhorizontálnych odvodňovacích vrtov.

Návrh mikropilótovej steny je totožný s návrhom opísaným v kapitole 6.1. Odvodnenie je v tomto návrhu zabezpečené pomocou subhorizontálnych odvodňovacích vrtov, dĺžky 32 m s úklonom od horizontály -3° , vystrojených perforovanou pažnicou. Vrty budú budované z úrovne cesty I/48 a budú vyvedené do drenážneho žľabu na okraji cesty. Schéma riešenia je zobrazená na obrázku 29, s presnejším pohľadom v Prílohe 1 – výkres č. 4.



Obrázok 30: Schéma riešenia štvrtého sanačného opatrenia

7 Modelová analýza sanačných opatrení

Geometria jednotlivých opatrení bola vykreslená v programe AutoCAD. Následne bol pre každý návrh vytvorený nový model v programe Plaxis 2D, s totožnými vstupnými parametrami a výpočtovými fázami. Jednotlivé modely boli potom doplnené o štvrtú fázu, v ktorej boli aktivizované navrhnuté sanačné opatrenia. Táto fáza bola počítaná v prípade prvých troch variant sanácií s kriticky nastúpanou hladinou podzemnej vody. Pre fázu s aktivizovanými sanačnými opatreniami bol, takisto ako v analýze pôvodného stavu svahu, zvolený typ výpočtu Plastic, doplnený o stabilitnú analýzu pomocou výpočtu typu Safety. Vstupné parametre pre prvky jednotlivých sanačných opatrení sú uvedené v následných podkapitolách.

7.1 Modelová analýza prvého sanačného opatrenia

V prípade analýzy prvého sanačného opatrenia bolo potrebné zdefinovať vstupné parametre mikropilót a železobetónového trámu. Mikropilóty boli do modelu zadané v záložke structures ako prvok Plate (Tabuľka 5). Železobetónový trám bol zadaný ako ohraničená oblasť vyplnená materiálom typu non - porous, s vlastnosťami zadávanými v záložke Soil (Tabuľka 6).

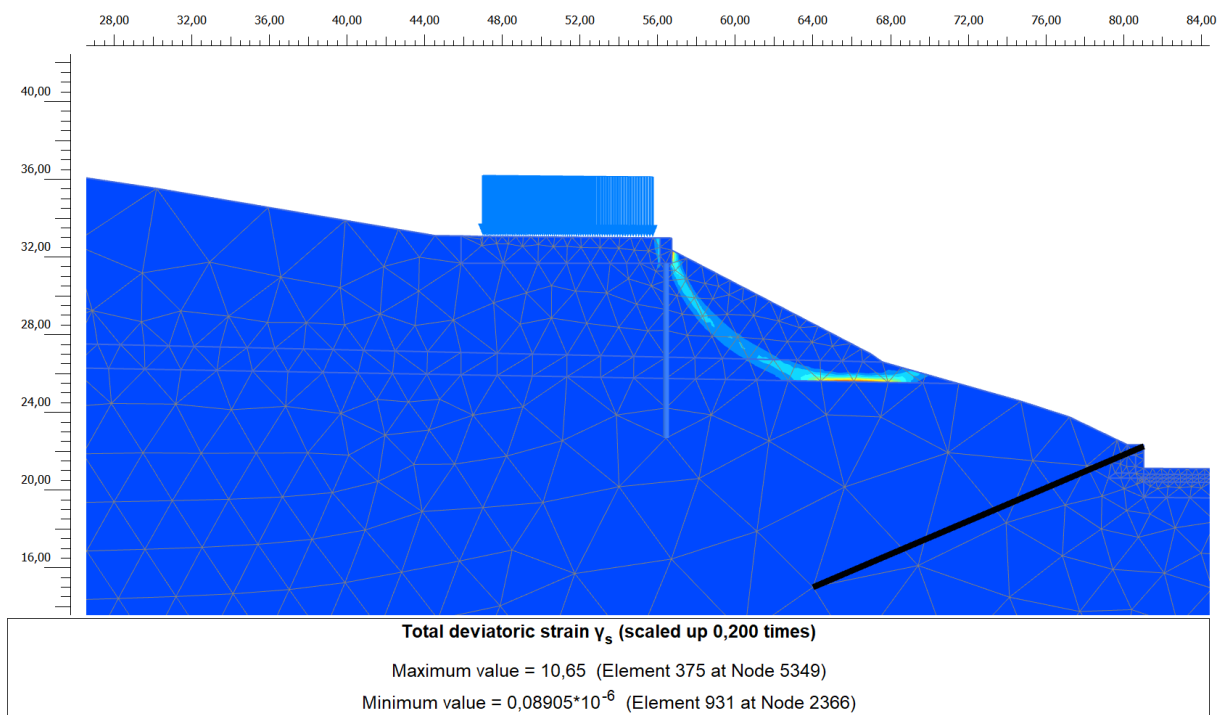
Tabuľka 5: Vstupné parametre pre mikropilótu

Prvok	EA [kN/m]	EI [kN/m]	w [kN/m/m]
Mikropilóta	4 800 000	10 240	3,840

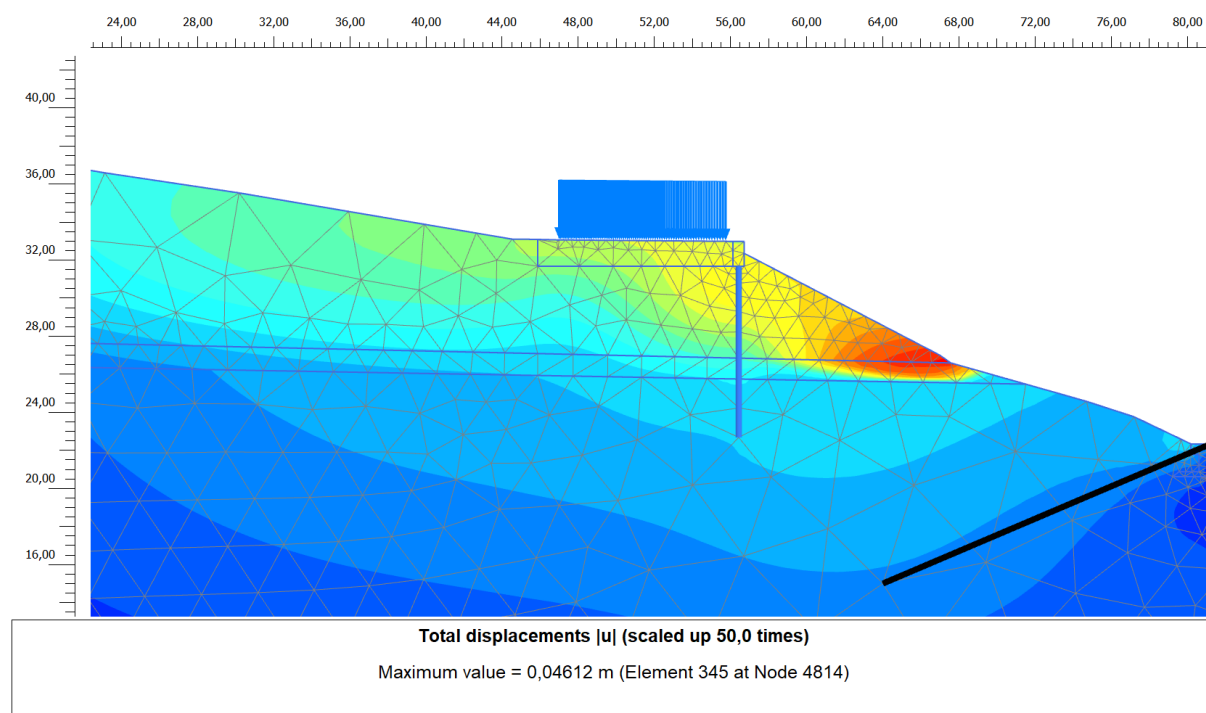
Tabuľka 6: Vstupné parametre pre železobetónový trám

Prvok	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E [kPa]	ν [-]
ŽB trám	25	25	25000000	0,2

Z výstupov výpočtov vyplýva, že mikropilótová stena prerušila pôvodnú šmykovú plochu a zastabilizovala časť svahu pod cestou. Avšak po aplikácii opatrení vznikla nová, sekundárna šmyková plocha za konštrukciou (Obrázok 31). Sanáciou sa tiež znížila maximálna hodnota absolútnych posunov na 0,05 m. Navrhnuté riešenie zvýšilo stupeň stability na hodnotu 1,435 (Tabuľka 7). To dokazuje účinnosť opatrenia, avšak stupeň stability nedosahuje požadovanú hodnotu 1,5, pre trvalo stabilizované svahy.



Obrázok 31: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy po prvom sanačnom opatrení



Obrázok 32: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny po prvom sanačnom opatrení

Tabuľka 7: Stupeň stability po aplikácii prvého sanačného opatrenia

Fáza	Stupeň stability ΣMsf
Kritický stav svahu + 1. sanačné opatrenie	1,435

7.2 Modelová analýza druhého sanačného opatrenia

Pri druhom sanačnom opatrení bolo potrebné namodelovať klincovanú oblasť svahu. Kvôli presnejším výsledkom neboli klince pridávané do modelu ako jednotlivé silové prvky, ale ako oblasť so zvýšenou súdržnosťou, vypočítaná na základe mechanických vlastností zemných klincov a ich geometrického rozloženia vo svahu. Únosnosť jedného klinca bola počítaná na základe údajov od výrobcu s hodnotou 200 kN. Vypočítané vstupné parametre klincovanej oblasti sú uvedené v tabuľke 8. Výpočet prebehol na základe nasledujúceho vzťahu:

$$c_{nail} = \frac{1 + \sin \varphi}{2 \cdot \cos \varphi} + \frac{F}{a \cdot b} \quad (2)$$

$$c' = \frac{c_{nail}}{1,5} \quad (3)$$

$$c_{celk} = c + c' \quad (4)$$

φ – uhol vnútorného trenia zeminy

F – únosnosť zemného klinca

a, b – osová vzdialenosť klincov v smere x a y

c_{nail} – súdržnosť zemných klincov

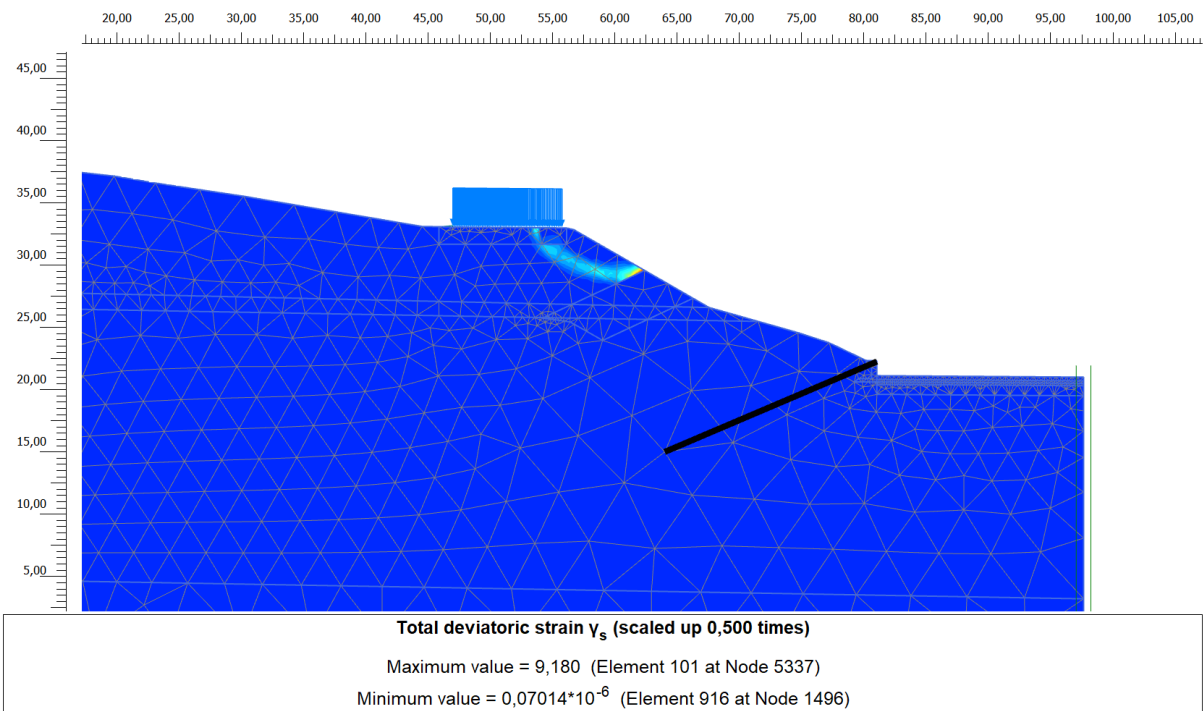
c' – výpočtová súdržnosť

c_{celk} – celková súdržnosť klincovanej oblasti

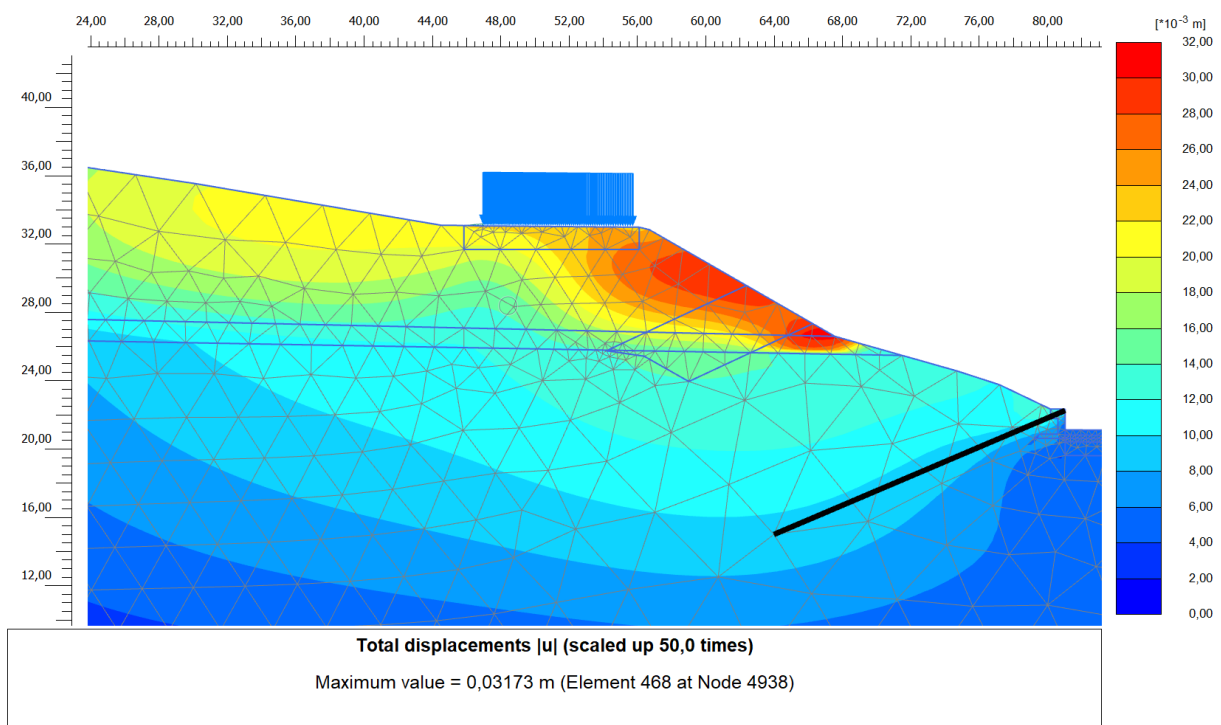
Tabuľka 8: Súdržnosť klincovanej oblasti

Zemina	φ [°]	c [kPa]	c_{nail} [kPa]	c' [kPa]	c_{celk} [kPa]
GT5 B	21,2	8,5	97,36	64,91	73,41
GT12	18	4,6	91,76	61,17	65,77
GT13	25	19	104,65	69,76	88,76

Geometria klincovanej oblasti bola importovaná do výpočtového programu. Na základe jednotlivých rozhraní potom boli priradené zeminy s vypočítanými zlepšenými šmykovými parametrami.



Obrázok 33: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy po druhom sanačnom opatrení



Obrázok 34: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny po druhom sanačnom opatrení

Tabuľka 9: Stupeň stability po aplikácii druhého sanačného opatrenia

Fáza	Stupeň stability ΣMsf
Kritický stav svahu + 2. sanačné opatrenie	1,546

Aplikáciou druhého sanačného opatrenia sa stupeň stability zvýšil na hodnotu 1,546. Hodnota presahuje normovo požadovaný stupeň stability pre dlhodobu stabilizované svahy 1,5. Pôvodná šmyková plocha bola prerušená, avšak vznikla nová potenciálna šmyková plocha nad klincovanou oblasťou (obrázok 33). Hodnota absolútnych posunov klesla na 0,03 m (obrázok 34).

7.3 Modelová analýza tretieho sanačného opatrenia

Návrh tretieho sanačného opatrenia vychádzal z návrhu sanácie klincovaním. Návrh je doplnený o kotvený železobetónový trám v úrovni cesty III/43911. Kotvy boli navrhnuté tak, aby prerušili potenciálnu šmykovú plochu po aplikácii klincovania (obrázok 33), a zabezpečili tak okraj vozovky pred možnými deformáciami.

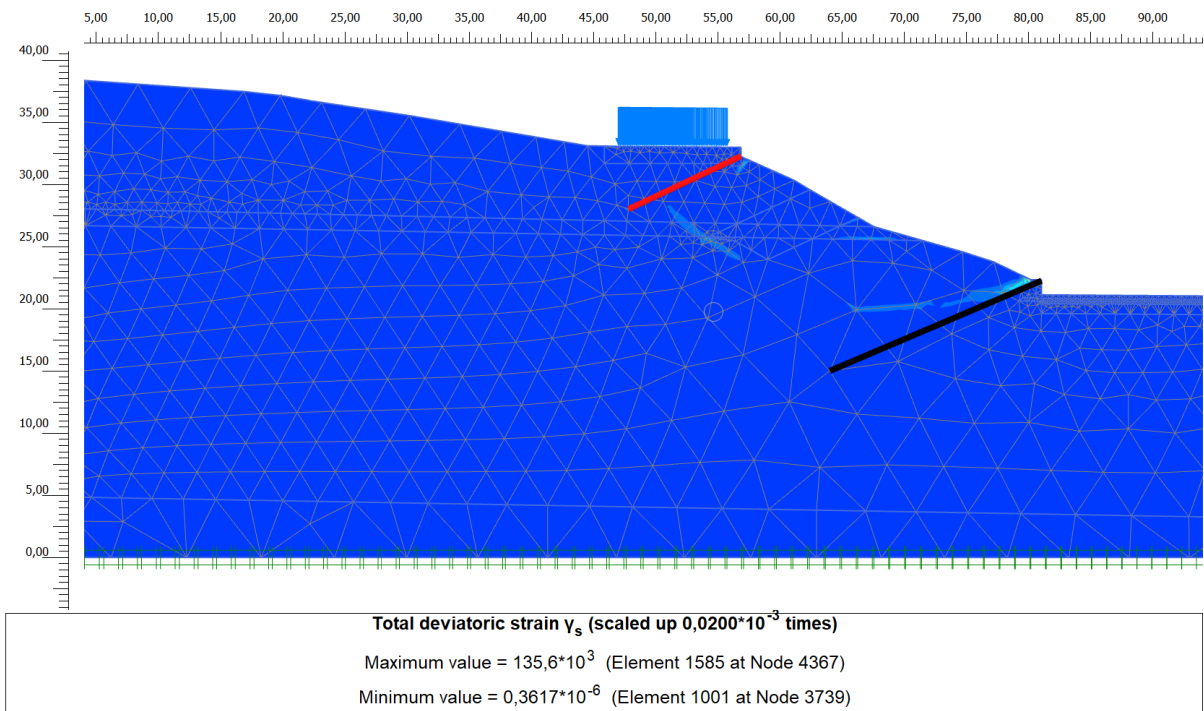
Geometria a vstupné parametre klincovanej oblasti sú totožné s predchádzajúcim návrhom (kapitola 7.2). Geometria upraveného terénu a kotveného trámu bola importovaná z programu AutoCAD. Železobetónový trám bol zadaný ako ohraničená oblasť vyplnená materiálom typu non - porous, s vlastnosťami zadávanými v záložke Soil (Tabuľka 10). Kotvy boli zadávané ako prvky node – to – node anchor. Vstupné parametre pre tento prvok sú uvedené v tabuľke 11.

Tabuľka 10: Vstupné parametre pre železobetónový trám

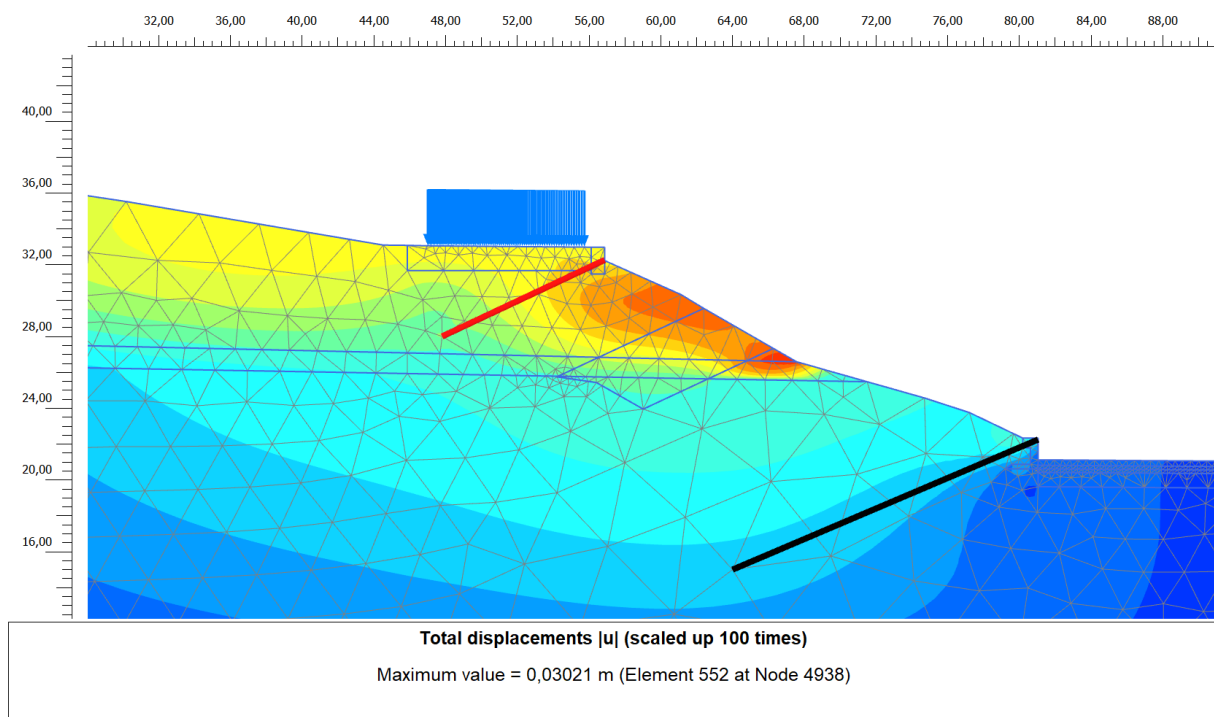
Prvok	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E [kPa]	ν [-]
ŽB trám	25	25	25000000	0,2

Tabuľka 11: Vstupné parametre pre kotvy železobetónového trámu

Prvok	EA [kN/m/]	Lspacing [m]
Anchor	180000	2



Obrázok 35: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy po treťom sanačnom opatrení



Obrázok 36: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny po treťom sanačnom opatrení

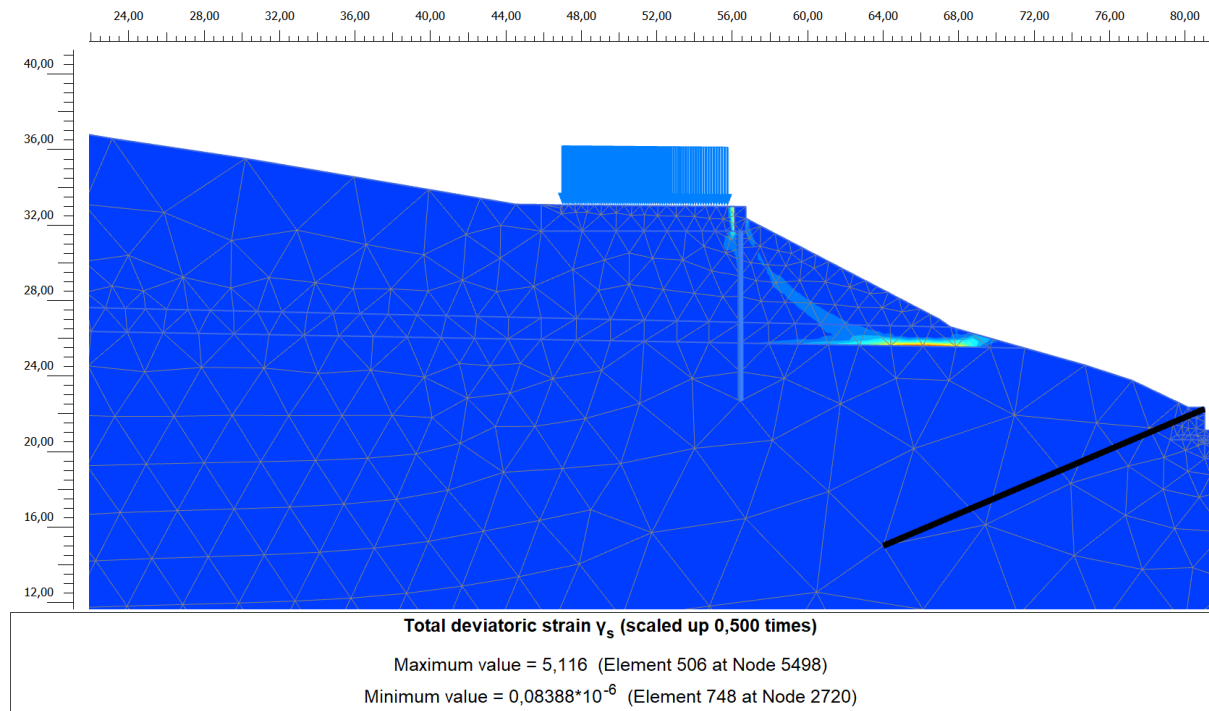
Tabuľka 12: Stupeň stability po aplikácii tretieho sanačného opatrenia

Fáza	Stupeň stability ΣMsf
Kritický stav svahu + 3. sanačné opatrenie	1,729

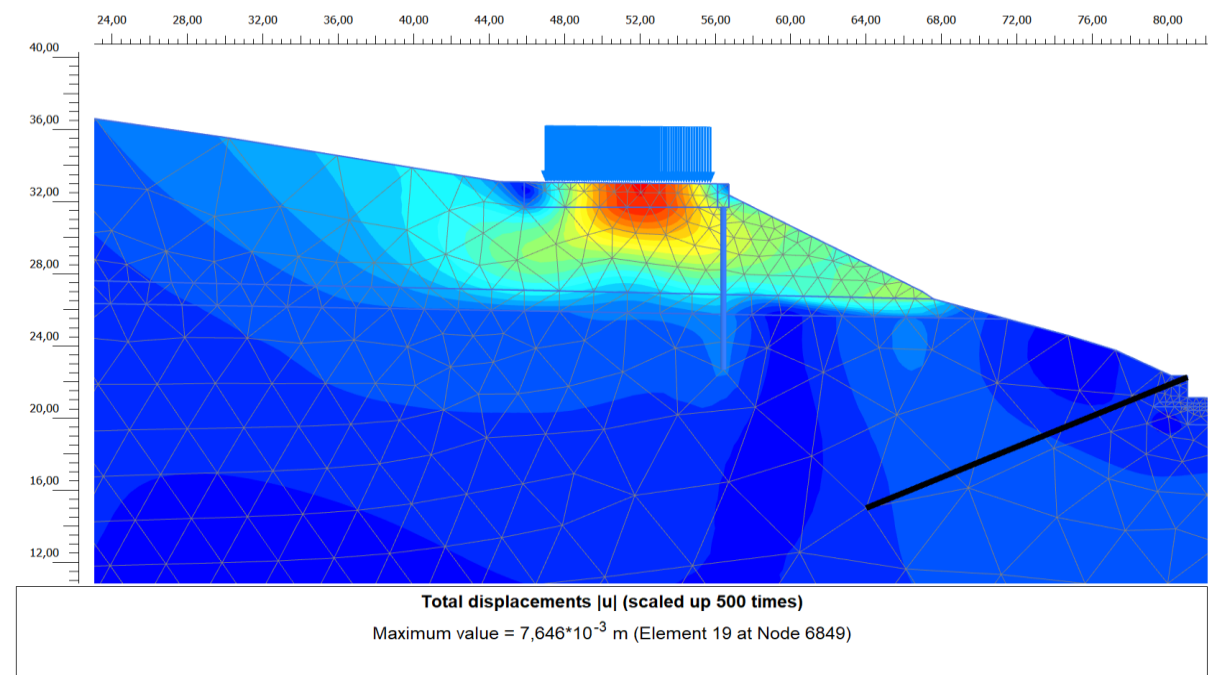
Na základe výstupov z výpočtovej analýzy tretieho sanačného opatrenia je jasné, že došlo k prerušeniu potenciálnej šmykovej plochy vzniknutej po aplikácii klincovania (obrázok 35). Maximálna hodnota absolútnych posunov je síce takisto ako v predchádzajúcom návrhu 0,03 m, no posuny v okolí cesty boli minimalizované (obrázok 36). Stupeň stability dosiahol hodnotu 1,729, čo postačujúco presahuje normovo požadovaný stupeň stability pre dlhodobu stabilizované svahy 1,5.

7.4 Modelová analýza štvrtého sanačného opatrenia

Modelová analýza tohto opatrenia je z hľadiska geometrie, zadávaných prvkov a ich vstupných parametrov zhodná s analýzou prvého sanačného opatrenia (kapitola 7.1). Navrhnuté odvodnenie v modeli bolo riešené importovaním hladiny podzemnej vody z programu AutoCAD, ktorá kopíruje polohu drenážneho vrtu.



Obrázok 37: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy po štvrtom sanačnom opatrení



Obrázok 38: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny po štvrtom sanačnom opatrení

Tabuľka 13: Stupeň stability po aplikácii štvrtého sanačného opatrenia

Fáza	Stupeň stability ΣMsf
Kritický stav svahu + 3. sanačné opatrenie	1,667

Na základe výstupov z výpočtov je možné konštatovať, že došlo k prerušeniu šmykovej plochy mikropilótovou stenou (obrázok 37). Vplyvom odvodnenia svahu tiež nevznikajú deformácie za mikropilótovou stenou. Maximálna hodnota absolútnych posunov je 0,007 m. Stupeň stability dosiahol hodnotu 1,667, čo postačujúco presahuje normovo požadovaný stupeň stability pre dlhodobo stabilizované svahy 1,5.

8 Porovnanie jednotlivých variant sanácií

Štyri navrhnuté sanačné riešenia boli matematickým modelovaním analyzované v programe Plaxis 2D. Jednotlivé riešenia boli pri navrhovaní postupne dopĺňané a kombinované pre dosiahnutie čo najpriaznivejších výsledkov. V prípade prvých troch sanačných opatrení bolo počítané s kritickým stavom simulujúcim extrémnu zrážkovú situáciu a nastúpanie hladiny podzemnej vody k povrchu terénu.

Prvé sanačné opatrenie sa javí ako konštrukčne najjednoduchšie. Mikropilótová stena môže byť realizovaná, pri jednosmernom obmedzení premávky, bežnou vrtnou súpravou (napríklad Klemm KR 801 – 3GS) priamo z okraja cesty.

V prípade druhého sanačného riešenia je potrebné zabezpečiť odstránenie hustého porastu svahu a prístup techniky a materiálu ku navrhovanej klincovanej oblasti.

Z konštrukčného hľadiska je tretie sanačné opatrenie najzložitejšie. Takisto ako v predchádzajúcom prípade je potrebné zabezpečiť odstránenie porastu svahu a prístup ku klincovanej oblasti. Okrem toho je potrebná úprava tvaru svahu pod kotveným trámom a vrtanie kotiev železobetónového trámu v relatívne strmom teréne.

V prípade štvrtého sanačného opatrenia je technologický postup v hornej časti svahu rovnaký, ako pri prvom sanačnom opatrení. Pre vrtanie subhorizontálnych odvodňovacích vrtov je potrebné zabezpečiť obmedzenie premávky v pravom jazdnom pruhu na rýchlostnej ceste.

Účinnosť jednotlivých variantných sanačných opatrení z hľadiska stupňa stability je uvedená tabuľke 14.

Tabuľka 14: Účinnosť sanačných opatrení

Sanačné opatrenie	Stupeň stability ΣM_{sf}
Súčasný stav svahu (kritický stav)	1,067
1. Sanačné opatrenie	1,435
2. Sanačné opatrenie	1,546
3. Sanačné opatrenie	1,729
4. Sanačné opatrenie	1,667

Z výsledkov je jasné, že každá navrhnutá sanácia výrazným spôsobom zvýšila stupeň stability svahu. Pri prvej navrhovanej sanácii však stupeň stability nedosiahol hodnotu 1,5 pre trvalo stabilizované svahy. Pôvodná šmyková plocha bola prerušená, ale vznikla sekundárna šmyková plocha pred mikropilótovou stenou, čo by mohlo viesť k svahovej deformácii.

Druhé sanačné opatrenie klincovaním svahu zvýšilo stupeň stability svahu na hodnotu 1,546. Táto hodnota je dostačujúca, avšak opäť vznikla sekundárna šmyková plocha nad klincovanou oblasťou. Na základe tvaru a polohy šmykovej plochy možno konštatovať, že by mohlo dôjsť k deformáciám okraju vozovky cesty III/43911.

Návrh tretieho sanačného opatrenia vychádzal z výsledkov matematickej analýzy sanácie pomocou klincovania svahu. Navrhnutý bol kotvený železobetónový trám pri okraji cesty, tak aby eliminoval prípadné deformácie. Z výsledkov je jasné že tento návrh účinne a definitívne svah stabilizoval. Potenciálna šmyková plocha, vzniknutá po aplikácii klincovania bola prerušená kotvami a stupeň stability dosiahol hodnotu 1,729.

Štvrté sanačné opatrenie bolo navrhnuté ako kombinácia mikropilótovej steny v korune zárezu a odvodnenia pomocou drenážnych vrtov. Odvodňovacie vrty zabraňujú prípadnému kritickému nastúpaniu hladiny podzemnej vody a zvyšovaniu pórových tlakov, čím výrazne prispievajú ku stabilite svahu. Kombináciou týchto sanačných prvkov sa stupeň stability zvýšil na 1,667. Maximálna hodnota absolútnych posunov klesla na 7 mm.

Z hľadiska stupňa stability sa javí tretie sanačné opatrenie ako najúčinnějšíe. Avšak z konštrukčného hľadiska, ako aj z hľadiska maximálnej hodnoty absolútnych posunov môžeme považovať štvrté sanačné opatrenie ako najúčinnějšíe. Účinná drenáž svahu spolu s mikropilótovou stenou môžu zabezpečiť trvalú stabilizáciu riešeného svahu s minimálnymi deformáciami.

9 Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo posúdenie stability južného svahu zárezu cesty I/48 v mieste kríženia s cestou z Dubu na Vysokú a návrh vhodného sanačného opatrenia k jeho stabilizácii.

V úvodnej časti práce sú opísané rôzne faktory ovplyvňujúce svahovú stabilitu. Ďalej je zhrnutá charakteristika typov svahových pohybov podľa rýchlosti a mechanizmu pohybu a ďalších kritérií. Ďalej sú v tejto časti zhrnuté viaceré najpoužívanejšie spôsoby sanačných opatrení.

Nasledujúca kapitola sa zaoberá opisom riešeného svahu. Je rozdelená na podkapitoly obsahujúce informácie o polohe svahu, a klimatických, geomorfologických, geologických a hydrogeologických podmienkach oblasti. Ďalej je zhrnutý výskyt svahových deformácií v okolí záujmového svahu.

Štvrtá kapitola je venovaná analýze súčasného stavu svahu. V rámci analýzy bola vykonaná rekognoskačná terénna pochôdzka. Pri tejto pochôdzke boli spozorované povrchové prejavy svahového pohybu, ako deformované zábradlie a zvodidlo v smere spádnice svahu. Ďalším prejavom aktívnej svahovej deformácie boli tzv. opité stromy. Súčasťou terénnej pochôdzky bolo zameranie povrchu terénu pomocou technológie 3D skenovania. V rámci tejto kapitoly bola tiež zhrnutá vrtná preskúmanosť tejto oblasti.

Následným krokom bolo zostrojenie geologického rezu svahu. Povrch terénu bol získaný zo skenovania svahu. Priebeh geologických vrstiev a hladiny podzemnej vody bol zostrojený na základe štúdia archívnych materiálov z prieskumných vrtov. Geologický rez bol potom importovaný do výpočtového programu Plaxis 2D. Jednotlivým vrstvám a prvkom modelu boli priradené vstupné parametre. Pomocou metódy konečných prvkov bola vypočítaná stabilita svahu, pre bežný stav a pre kritický stav simulujúci extrémnu zrážkovú situáciu, s hladinou podzemnej vody v úrovni terénu. Z výstupov matematického modelu bolo zistené že svah nie je stabilný. Stupeň stability dosiahol v prípade bežného stavu hodnotu 1,236 a v prípade kritického stavu 1,067. Priebeh šmykovej plochy sa viaže na oblasť pod cestou z Dubu na Vysokú, v prostredí ílovitých vrstiev s veľmi nízkymi deformačnými a šmykovými parametrami.

Pre stabilizáciu svahu boli následne navrhnuté štyri variantné sanačné opatrenia. Prvý návrh spočíval v stabilizácii svahu pomocou mikropilótovej steny. Druhým sanačným riešením bolo stabilizovanie pomocou klincovania v oblasti s najväčšími hodnotami absolútnych posunov. Tretí vychádzal z predchádzajúceho, ale bol doplnený o kotvený železobetónový trám

v úrovni cesty. Posledným navrhnutým riešením je stabilizácia svahu pomocou mikropilótovej steny, doplnená o odvodnenie svahu pomocou subhorizontálnych drenážnych vrto.

Navrhnuté riešenia boli analyzované pomocou stabilitného výpočtu v programe Plaxis 2D. Všetky opatrenia zvýšili zásadným spôsobom stupeň stability. V prvom prípade však hodnota nepresiahla požadovaný stupeň stability pre trvalo stabilizované svahy $\Sigma Msf = 1,5$. Aplikácia zvyšných opatrení túto hodnotu spoľahlivo presiahla. Najvyššia hodnota bola dosiahnutá aplikáciou tretieho sanačného opatrenia. Avšak ako najúčinnšie, a z hľadiska realizácie menej náročné opatrenie sa javí štvrté sanačné opatrenie. Pomocou efektívnej drenáže svahu je vylúčené kritické nastúpanie hladiny podzemnej vody. Mikropilótová stena v korune svahu prerušuje šmykovú plochu a minimalizuje hodnotu absolútnych posunov.

10 Zoznam použitej literatúry

Odborná literatúra a články

- [1] PASEKA, Antonín, Hynek JANKŮ, Alexandra ERBENOVÁ a Helena BRDEČKOVÁ. *Svahové pohyby*. Brno: Litera Brno, 2014. ISBN 978-80-214-4954-1.
- [2] PAŠEK, Jaroslav a Milan MATULA. *Inženýrská geologie*. II. Praha: [s.n.], 1995. Česká matice technická, č. spisu 452, roč. 97 (1993).
- [3] ONDRÁŠIK, Rudolf, Ján VLČKO a Miriam FENDEKOVÁ. *Geologické hazardy a ich prevencia*. 2. dopl. vyd. Bratislava: Univerzita Komenského, 2011. ISBN 978-80-223-2956-9.
- [4] HULLA, Jozef, Peter TURČEK, František BALIAK a František KLEPSATEL. *Predpoklady a skutočnosť v geotechnickom inžinierstve*. Bratislava: Jaga group, 2002. ISBN 8088905427.
- [5] RYŠKA, Jiří. *DUB - STARÝ JIČÍN. DOPLŇUJÍCÍ INŽENÝRSKOGEOLOGICKÝ PRŮZKUM ZÁKLADOVÝCH PŮD*. Ostrava: Unigeo Ostrava, závod Ostrava, 1984.
- [6] ZÁRUBA, Quido a Vojtěch MENCL. *Sesuvy a zabezpečování svahů*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Praha: Academia, 1987.
- [7] TURČEK, Peter a Jozef HULLA. *Zakladanie stavieb*. Druhé rozšírené a doplnené vydanie. Bratislava: Jaga group, 2004. ISBN 80-88905-42-7.
- [8] KRÁSNÝ, Jiří. *Podzemní vody České republiky: regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod*. Praha: Česká geologická služba, 2012. ISBN 978-80-7075-797-0.
- [9] GÉRYK, Jiří, Ivo KŘÍSTEK, Richard MALÁT, Oskar TKADLEČEK a Adolf VAŠÁK. *I/35 Lešná - Palačov, podrobný GTP MŮK Palačov, napojení na R48, závěrečná zpráva*. Praha: INSET, 2015.
- [10] KŘÍSTEK, Ivo, Vlastimil MUŽÍK a Adolf VAŠÁK. *(Silnice) I/35, Lešná - Palačov, zpracování doplňkového GTP. Závěrečná zpráva*. Praha: INSET, 2018.

Inernetové zdroje

- [11] Obrazy zkázy na fotkách! Bouře odřízla od světa slavnou přírodní lokalitu na Slovensku. *Blesk* [online]. [cit. 2021-09-25]. Dostupné z: <https://www.blesk.cz/galerie/zpravy-udalosti/357618/obrazy-zkazy-na-fotkach-boure-odrizla-od-sveta-slavnou-prirodni-lokalitu-na-slovensku?foto=1>
- [12] *Mapy.cz* [online]. Seznam.cz [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: <https://mapy.cz>
- [13] Přírodní poměry. *AOPK ČR* [online]. [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: <https://aopkcr.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=ee190990a1be4ac685d5f7c69c637ae4>

- [14] Příborská pahorkatina. *Moravské-karpaty.cz* [online]. [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: http://moravske-karpaty.cz/prirodni-pomery/geomorfologie/priborska-pahorkatina/#hluzovska_pahorkatina
- [15] Klasifikace klimatu. *Moravské-karpaty.cz* [online]. [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: <http://moravske-karpaty.cz/prirodni-pomery/klima/klasifikace-klimatu/#Mirne-tepla-klimaticka-oblast-MT>
- [16] *Vnější Západní Karpaty* [online]. [cit. 2021-09-29]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/reg_geol_cr/10_kapitola.htm
- [17] *HYDROEKOLOGICKÝ INFORMAČNÍ SYSTÉM VÚV TGM* [online]. Výzkumný ústav vodohodpodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce [cit. 2021-09-29]. Dostupné z: https://heis.vuv.cz/data/webmap/isapi.dll?map=mp_heis_voda&TMPL=HVMAP_MAIN&IFRAME=0&lon=17.8843554&lat=49.5658332&scale=7560
- [18] *OBEČNÉ ZÁSADY POSTUPŮ SMĚŘUJÍCÍCH KE STABILIZACI SESUVŮ* [online]. Praha: SG Geotechnika a.s., Geologická 4, 152 00 Praha 5, 1999 [cit. 2021-09-30]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/obecne_zasady_1/\\$FILE/OOHPP-Stabilizace_sesuvu_Text-20080820.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/obecne_zasady_1/$FILE/OOHPP-Stabilizace_sesuvu_Text-20080820.pdf)
- [19] AOPK ČR. *Portál informačního systému ochrany přírody*. [online]. [cit. 2021 – 9 – 29] Dostupné z: <http://webgis.nature.cz/mapomat/>
- [20] Geovědní mapy 1 : 500 000. *Česká geologická služba* [online]. [cit. 2021-10-04]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr500/>
- [21] Svahové nestability. *Česká geologická služba* [online]. [cit. 2021-10-6]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/svahove_nestability/
- [22] Vrtná prozkoumanost. *Česká geologická služba* [online]. [cit. 2021-10-12]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/
- [23] HUBÍK, Petr. Navrhování a výstavba konstrukčních systémů opěrných zdí a strmých svahů. *Inženýrské stavby* [online]. 20. 10. 2016, **2016**(4) [cit. 2021-10-1]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/geotechnika/navrhovani-a-vystavba-konstrukcniich-systemu-opernych-zdi-a-strmych-svahu>
- [24] Gabionové konstrukcie: Gabionové obklad pilotových stien, R1 Nitra – Selenec, SO220, 221. *ROCKBUILD* [online]. [cit. 2021-10-04]. Dostupné z: <https://www.rockbuild.sk/gabionove-obklad-pilotovych-stien-r1-nitra--selenec-so220-221-a34-209>
- [25] *Kotvy* [online]. Keller - speciální zakládání, spol. [cit. 2021-10-5]. Dostupné z: <https://www.keller-cz.com/odbornost/technologie/kotvy>

[26] LAHUTA, Hynek. *PAŽENÉ A TĚSNENÉ STAVEBNÍ JÁMY* [online]. [cit. 2021-10-5]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/lahuta/ZS/8.pdf>

[27] LAHUTA, Hynek. *STABILITA SVAHŮ A PODLOŽÍ* [online]. [cit. 2021-10-02]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/lahuta/mzszs/13.pdf>

[28] Horizontální odvodňovací vrty. *SYCONS Special Engineering* [online]. [cit. 2021-10-03]. Dostupné z: http://cz.sycons.eu/horizontalni_odvodnovaci_vrty

[29] Plaxis 2D Manual. Bentley Communities. [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/plaxis-soilvisionwiki/46137/manuals---plaxis>

Normy

ČSN 73 6133: Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací

ČSN EN 1997 – 1: Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla

ČSN EN ISO 14688-1: Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídování hornin – Část 1: Pojmenování a popis

ČSN EN ISO 14688-2: Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídování zemin – Část 2: Zásady pro zatřídování

Použité programy

AutoCAD 2018

Plaxis 2D

Leica Cyclone 360 Register

CloudCompare

11 Zoznam obrázkov

<i>Obrázok 1: Hlavné časti zosuvu a sprievodné javy [3]</i>	13
<i>Obrázok 2: Typy šmykových plôch [3 – upravené]</i>	13
<i>Obrázok 3: Akumulačná zóna privalového prúdu vo Vrátnej doline [11]</i>	14
<i>Obrázok 4: Princíp pritažovacieho násypu pri päte svahu [26 – upravené] 1 – pritažovací násyp, 2 – šmyková plocha</i>	16
<i>Obrázok 5: Vyústenie horizontálnych odvodňovacích vrtov do šachty [28]</i>	17
<i>Obrázok 6: Princíp oporných koštrukcií v spolupôsobení s vystuženou zeminou 1. Ocel'ové panely a protierózna ochrana 2. Ocel'ové panely s kamenivom 3. Gabiónové koše 4. Betónové tvarovky 5. Segmentové betónové panely 6. Veľkoplošné betónové panely [23 – upravené]</i> ..	19
<i>Obrázok 7: Zaistenie zárezu rýchlostnej R1 pilótovými stenami [24]</i>	20
<i>Obrázok 8: Schéma kotvenia pilótovej steny [26] 1 – Pilóta 2 – Hlava kotvy 3 – Tiahlo 4 – Volná časť 5 – Koreň 6 – Kotevná dĺžka ocele 7 – šmyková plocha</i>	21
<i>Obrázok 9: Lokalizácia riešeného svahu (vyznačené krúžkom) [12 – upravené]</i>	22
<i>Obrázok 10: Geomorfologické zaradenie oblasti podľa okrsku (vyznačená krúžkom) [13 – upravené]</i>	23
<i>Obrázok 11: Predkvartérna geologická stavba lokality [20 – upravené]</i>	24
<i>Obrázok 12: Svahové nestability v okolí lokality [21]</i>	26
<i>Obrázok 13: Mapa náchylnosti svahov k zosúvaniu [21]</i>	27
<i>Obrázok 14: Stabilizačné opatrenia na lokalite; vľavo: mostná opora, vpravo: oporný múr.</i>	28
<i>Obrázok 15: Opité stromy</i>	29
<i>Obrázok 16: Deformované zábradlie a zvodidlo</i>	29
<i>Obrázok 17: 3D laserové skenovanie na lokalite</i>	30
<i>Obrázok 18: Sken terénu s vyznačením skenovacích stanovišť</i>	31
<i>Obrázok 19: Spracovanie skenu v programe CloudCompare; hore – model terénu so stromovým porastom dole – model terénu s odstránenou vegetáciou a vytvoreným rezom</i>	31
<i>Obrázok 20: Vrtná preskúmanosť územia [22]</i>	32
<i>Obrázok 21: Profily vrtov PI - 1017 a P – 307 [9, 10 – upravené]</i>	33
<i>Obrázok 22: Geologický rez svahu</i>	35
<i>Obrázok 23: Výstup z Plaxis 2D - priebeh šmykovej plochy</i>	38
<i>Obrázok 24: Výstup z Plaxis 2D - absolútne posuny</i>	39
<i>Obrázok 25: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny, kritický stav</i>	40
<i>Obrázok 26: Výstup z Plaxis 2D - priebeh šmykovej plochy, kritický stav</i>	40

<i>Obrázok 27: Schéma riešenia prvého sanačného opatrenia.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázok 28: Schéma riešenia druhého sanačného opatrenia</i>	<i>43</i>
<i>Obrázok 29: Schéma riešenia tretieho sanačného opatrenia</i>	<i>44</i>
<i>Obrázok 30: Schéma riešenia štvrtého sanačného opatrenia</i>	<i>45</i>
<i>Obrázok 31: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy po prvom sanačnom opatrení... </i>	<i>47</i>
<i>Obrázok 32: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny po prvom sanačnom opatrení.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázok 33: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy po druhom sanačnom opatrení. </i>	<i>49</i>
<i>Obrázok 34: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny po druhom sanačnom opatrení</i>	<i>49</i>
<i>Obrázok 35: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy po treťom sanačnom opatrení ..</i>	<i>52</i>
<i>Obrázok 36: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny po treťom sanačnom opatrení</i>	<i>52</i>
<i>Obrázok 37: Výstup z Plaxis 2D – priebeh šmykovej plochy po štvrtom sanačnom opatrení ..</i>	<i>54</i>
<i>Obrázok 38: Výstup z Plaxis 2D – absolútne posuny po štvrtom sanačnom opatrení.....</i>	<i>54</i>

12 Zoznam tabuliek

<i>Tabuľka 1: Vstupné parametre horninového prostredia.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabuľka 2: Vlastnosti lineárne elastických materiálov.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabuľka 3: Vstupné parametre kotvy</i>	<i>37</i>
<i>Tabuľka 4: Stupeň stability pre jednotlivé fázy.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabuľka 5: Vstupné parametre pre mikropilótu.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabuľka 6: Vstupné parametre pre železobetónový trám</i>	<i>46</i>
<i>Tabuľka 7: Stupeň stability po aplikácii prvého sanačného opatrenia.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabuľka 8: Súdržnosť klincovanej oblasti.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabuľka 9: Stupeň stability po aplikácii druhého sanačného opatrenia</i>	<i>50</i>
<i>Tabuľka 10: Vstupné parametre pre železobetónový trám</i>	<i>51</i>
<i>Tabuľka 11: Vstupné parametre pre kotvy železobetónového trámu</i>	<i>51</i>
<i>Tabuľka 12: Stupeň stability po aplikácii tretieho sanačného opatrenia</i>	<i>53</i>
<i>Tabuľka 13: Stupeň stability po aplikácii štvrtého sanačného opatrenia</i>	<i>55</i>
<i>Tabuľka 14: Účinnosť sanačných opatrení</i>	<i>56</i>

13 Zoznam vzorcov

Stupeň stability (1)	38
Súdržnosť klincov (2)	48
Výpočtová súdržnosť (3).....	48
Celková súdržnosť klincovanej oblasti	48

14 Zoznam príloh

Príloha 1 Výkresy navrhnutých sanačných opatrení