

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Posouzení pravostranného svahu řeky Bečvy ve Vsetíně v řkm 19,800
– 20,000 a vypracování návrhu nezbytných stabilizačních opatření

Assessment of the River Bečva Right Bank in Vsetín – the River
Kilometer 19,800 to 20,000 and Design of Stabilization Measures

Student:

Bc. Nikola Horňáčková

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Stolárik, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Nikola Hornáčková**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T035 Geotechnika

Téma: **Posouzení pravostranného svahu řeky Bečvy ve Vsetíně, v řkm 19,800 - 20,000 a vypracování návrhu nezbytných stabilizačních opatření**
Assessment of the River Bečva Right Bank in Vsetín – the River Kilometer 19.800 to 20.000 and Design of Stabilization Measures

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:

1. Hulla, J., Turcek, P. *Zakladanie stavieb*. Jaga: Bratislava, 1998. ISBN 80-88905-05-2.
2. Vaníček, I., Vaníček, M. *Earth Structures*. Kluwer Academic Publisher Group. ISBN 9781402039638.
3. Coduto, D. *Geotechnical Engineering*. Prentice Hall: New Jersey, 1999. ISBN 0-12-576380-0.
4. Rozsypal, A. *Kontrolní sledování a rizika v geotechnice*. Jaga: Bratislava, 2001. ISBN 80-88905-44-3.
5. 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: 28.02.2017

Datum odevzdání: 30.11.2017



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



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 30.11.2017

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 30.11.2017

.....

podpis studenta

Anotace

Předmětem diplomové práce je posouzení pravostranného břehu řeky Bečvy a vypracování návrhu nezbytných stabilizačních opatření. Práce obsahuje charakteristiku svahových deformací, geologickou, geomorfologickou a hydrogeologickou charakteristiku zájmového území, studii stávajícího stavu sesuvného území, navržená stabilizační opatření, jejich analýzu, porovnání a vyhodnocení a navržení monitoringu svahu. Vyhodnocení se řídí dle stupně stability svahu.

Klíčová slova

stabilita svahu, řeka Bečva, metoda konečných prvků, stabilizace, mikropiloty, odvodnění

Annotation

The subject of the diploma thesis is the assessment of the right bank of the Bečva river and the elaboration of the necessary stabilization measures. The work includes the characterization of slope deformations, geological, geomorphological and hydrogeological characteristics of the area of interest, study of the current state of the landslide area, proposed stabilization measures, their analysis, comparison and evaluation and proposal of slope monitoring. The evaluation is governed by the factor of slope stability.

Key words

slope stability, river Bečva, finite element method, stabilization, micropiles, drainage

Obsah diplomové práce

Seznam použitého značení	7
1. Úvod	8
2. Charakteristika svahových deformací	9
2.1 Faktory porušující stabilitu svahu	9
2.2 Rozdělení svahových pohybů	10
3. Geologická, geomorfologická a hydrogeologická charakteristika zájmového území.....	12
3.1 Lokalizace.....	12
3.2 Geologické a geomorfologické poměry	13
3.3 Hydrogeologické poměry	16
4. Studie stávajícího stavu sesuvného území	18
4.1 Podklady pro matematické modelování	23
4.2 Základní výpočetní model	24
4.2.1 Metoda konečných prvků	24
4.2.2 Sestavení výpočetního modelu	25
5. Stabilizační opatření a jejich analýza	30
5.1 Varianta č.1 – stabilizace mikropilotami	31
5.2 Varianta č.2 – stabilizace mikropilotami a hřebíkováním.....	35
5.3 Varianta č.3 – stabilizace mikropilotami a odvodněním	38
5.4 Varianta č.4 – stabilizace mikropilotami, hřebíkováním a odvodněním.....	39
5.5 Analýza navržených opatření	40
6. Monitoring svahu	42
6.1 Monitoring šíření trhlin na objektech, kolmých a příčných posunů horninového masívu	42
6.2 Monitoring výšky hladiny podzemní vody a pórových tlaků	45
7. Závěr.....	47
8. Seznam použitých zdrojů a literatury	48
8.1 Knižní literatura	48
8.2 Normy	48
8.3 Zdroje z internetu.....	48
9. Seznam tabulek	51
10. Seznam obrázků	52
11. Seznam vzorců	54

Seznam použitého značení

ČSN – České státní normy

c_{ef} – soudržnost

c' – vypočtená soudržnost

E_{def} – modul pružnosti

EA – normálová tuhost

EI – ohybová tuhost

h. p. v. – hladina podzemní vody

k_x – koeficient filtrace ve směru osy x

k_y – koeficient filtrace ve směru osy y

$L_{spacing}$ – rozteč kotev

p. v. – podzemní voda

řkm – říční kilometr

$\sum M_{sf}$ – stupeň stability

γ – objemová hmotnost zeminy

γ_{sat} – objemová hmotnost saturované zeminy

ν – Poissonovo číslo

φ – úhel vnitřního tření

1. Úvod

Mnoho míst České republiky se potýká s půdními sesuvy. Způsobují škody na pozemcích, pozemních komunikacích, zemědělských a lesních půdách a domech. Na spoustě míst lze takovýmto škodám předejít, ale mnohdy se jim nevěnuje tolik pozornosti, kolik by mělo. V mnoha případech se začne s hledáním řešení, když už deformace podloží proběhla. Těmto případům lze však předejít včasným a řádným zmapováním sesuvných území a ohlášením příslušným orgánům s navrženým stabilizačním opatřením.

Cílem diplomové práce je posouzení pravostranného břehu řeky Bečvy ve Vsetíně v řkm 19,800 – 20,000 a vypracování nezbytných stabilizačních opatření. Zájmové území se nachází v zastavěné oblasti, kterou lemují silnice č. III/05736. Daný svah se deformuje plouživými pohyby, jenž vytváří trhliny na přilehlé pozemní komunikaci a domech. Pata svahu je stabilizována nábrežní zdí kotvenou ocelovými trny v cementové zálivce.

Úvodem se diplomová práce zabývá svahovými deformacemi, jejich rozdělením dle faktorů způsobující svahovou nestabilitu a rozdělení samotných svahových pohybů. Dále se zabývá charakteristikou zájmového území z pohledu zeměpisné polohy, geologických a hydrogeologických poměrů.

V další části je popsána studie stávajícího stavu sesuvného území, která obsahuje podklady a postupové kroky v matematickém modelování za pomoci metody konečných prvků v programu Plaxis2D. Dále jsou zde navrženy sanační opatření v podobě mikropilot, odvodnění a hřebíkování svahu.

Na závěr se diplomová práce zabývá zanalyzováním jednotlivých sanačních opatření a vyhodnocením všech navržených variant dle stupně stability.

2. Charakteristika svahových deformací

Svahové pohyby jsou jedny z nejrozšířenějších environmentálních jevů. Jedná se o přemísťování hornin z vyšších poloh svahů do poloh nižších způsobené endogenními a exogenními procesy. Závisejí především na uklonění terénu, což pro oblast České republiky představuje velké riziko. Svahové deformace jsou nejrůznější povahy, podle druhu a počtu faktorů, jež je způsobují, a podle jejich vzájemného působení. Z geologického hlediska se dá říci, že žádný svah není trvale stabilní. [4][5]

2.1 Faktory porušující stabilitu svahu

Nejdůležitější částí při posuzování svahů je, aby inženýr rozpoznal podmínky, které způsobují náchylnost území k sesouvání a činitele, jež pohyby bezprostředně vyvolaly. [4]

Faktory způsobující svahovou nestabilitu se dělí na:

- změnu sklonu svahu – vzroste-li sklon svahu, v horninách se změní napětí, poruší se rovnováha a vzroste napětí ve smyku.
- přetížení násypy – způsobuje vzrůst smykových napětí a napětí vody v pórech v jílovitých zeminách, a tím se zmenší jejich smyková pevnost. Čím rychlejší je přetížení, tím je to nebezpečnější.
- otřesy a vibrace – v každé hornině vznikají dočasné změny napětí, vlivem působících kmitů různých frekvencí, které mohou porušit rovnováhu svahu např. zemětřesením, výbuchy nebo otřesy strojů. U málo zpevněných písků může dojít otřesy k porušení intergranulární vazby, čímž se zmenší jejich soudržnost.
- změny obsahu vody – tající sníh a dešťová voda se dostávají do puklin, v nichž vzniká hydrostatický tlak. Jelikož v zeminách vzrůstává tlak v pórech, klesá jejich smyková pevnost.
- působení podzemní vody - proudící p. v. působí tlakem na částice zeminy, v jemném písku a siltu je vyplavuje, čímž se zhoršuje stabilita svahu. Naopak napjatá h. p. v. působí na nepropustné vrstvy v nadloží jako vztlak.
- činnost mrazu – zmrznutím vody se zvětšuje objem v pórech, který rozšiřuje staré trhliny a vytváří nové. V rozpukaných horninách je pak menší soudržnost.
- zvětrávání hornin – postupné mechanické i chemické zvětrávání porušuje soudržnost hornin.

- změny ve vegetačním porostu – nejenže kořeny stromů část podzemní vody spotřebují, a tím přispívají k vysušení svahu, ale také mechanickým způsobem udržují stabilitu svahu. Dojde – li k odlesnění, změní se vodní režim v podpovrchových vrstvách a naruší se stabilita svahu. [4][5]

2.2 Rozdělení svahových pohybů

Svahy svou rozmanitostí sesuvných jevů poskytují mnoho kritérií pro jejich klasifikaci. Z inženýrskogeologického hlediska navrhl K. Terzaghi účelné rozdělení svahových pohybů dle fyzikálních vlastností postižených hornin. Naopak u nás se svahovými pohyby zabývali A. Nemčok, J. Pašek a J. Rybář navrhli na naše regionálně-geologické podmínky dělení dle mechanismu a rychlosti pohybu na 4 hlavní skupiny (Obr.1):

- ploužení – má charakter velmi pomalého až pomalého tečení tuhé látky s rychlostí pohybu milimetry až centimetry za rok. Z geologického hlediska se jedná o dlouhodobý a zpravidla se nezrychlující pohyb horninových hmot. Dělí se na hlubinné, které má za následek rozvolnění a roztrhání horských masívů, ohýbání vrstev a blokové poruchy, a povrchové, na které působí vlivy sezónních teplot a vlhkostí, díky čemuž dochází k pomalému nerovnoměrnému pohybu horninových hmot. Každý svahový pohyb začíná ploužením.
- sesouvání – rychlý krátkodobý klouzavý pohyb horninových hmot po svahu dle jedné nebo více smykových ploch rychlostí řádově metry za den. Část hmot se nasune na původní terén v předpolí, což je pro tento pohyb charakteristické. Výslednou formou sesuvného pohybu je sesuv, který se dělí dle:
 - *tvaru smykové plochy*: rotační, planární, rotačně planární a translační
 - *plošného tvaru*: plošné, proudové a frontální
 - *aktivity*: aktivní, uklidněné a stabilizované
- stékání – katastroficky rychlý krátkodobý klouzavý pohyb horninových hmot ve viskózním stavu, které jsou od podloží ostře odděleny. Velká část hmot vyteče z odlučné deprese (jámy) a přemístí se na poměrně velkou vzdálenost rychlostí metrů až kilometrů za hodinu. Výslednou formou stékání je proud. Běžně se uplatňuje voda, ale může se však jednat i o pohyb úlomkovitých hornin bez vody.
- řícení – náhlý katastroficky rychlý krátkodobý pohyb horninových hmot na strmých svazích, kdy alespoň část pohybu probíhá volným pádem. Řícení se dělí na odvalové,

kdy materiál nejprve padá volným pádem, hromadí se u paty svahu, odkud se dále pohybuje do údolí v podobě skalního proudu, a planární, které začíná usmýknutím části skalní stěny po planární ploše na okraj strmého svahu, kde následuje volný pád materiálu. [4][5]



Obrázek 1: Svahové pohyby – ploužení, tečení, sesouvání a řícení [6]

3. Geologická, geomorfologická a hydrogeologická charakteristika zájmového území

3.1 Lokalizace

Řešený svah se nachází ve městě Vsetín, okres Vsetín, ve Zlínském kraji na východě České republiky (Obr.3). Rozprostírá se mezi Hostýnsko – vsetínskou hornatinou, Vrchovickou hornatinou, Javorníky a spadá do provincie Vnějších Západních Karpat (Obr.2). Svah leží na pravé straně toku Vsetínské Bečvy, který pramení v pohoří Vsetínských vrchů a u Valašského Meziříčí se spojuje s tokem Rožnovské Bečvy, kde dále pokračuje jako řeka Bečva.

Město Vsetín je 27 km severovýchodně od Zlína a 60 km jihovýchodně od Olomouce. Svou rozlohou 57,61 km² a počtem obyvatel 26 190 se řadí mezi menší města České republiky. Leží ve výšce 348 m nad mořem. [7]



Obrázek 2: Lokalizace města Vsetín [8]



Obrázek 3: Letecký snímek zájmové lokality v obci Vsetín [8]

3.2 Geologické a geomorfologické poměry

Na geologické stavbě okresu Vsetín se podílí především flyšové pásmo, kterým se označuje soubor usazených hornin, jenž charakterizuje rytmické střídání pískovců, prachovců, jílovců, slínovců, vzácně i vápenců a slepenců. Geologicky jsou Západní Karpaty součástí rozsáhlé soustavy mladých pásemných pohoří, jež vznikaly ve třetihorách působením několika fází alpinského vrásnění. Jelikož od vrásnění uplynula krátká doba, jeví se pohoří jako soustava mohutných hřbetů, oddělených hlubokými údolími nebo kotlinami.

Pro karpatský flyš je také charakteristická příkrovová stavba, což znamená, že se sedimenty usadily v jiných oblastech, než se dnes nacházejí. Povrchová část sedimentární výplně byla odlepena od podkladu, vyvrásněna do příkrovových těles deskovitého a klínovitého tvaru a dalece přesunuta přes magmatické a metamorfované horniny a platformní pokryv Českého masívu.

Ve flyšovém pásmu rozlišujeme vnější krosněnskou a vnitřní magurskou jednotku. Krosněnská jednotka se tektonicky člení na dílčí příkrovové jednotky: poddanskou,

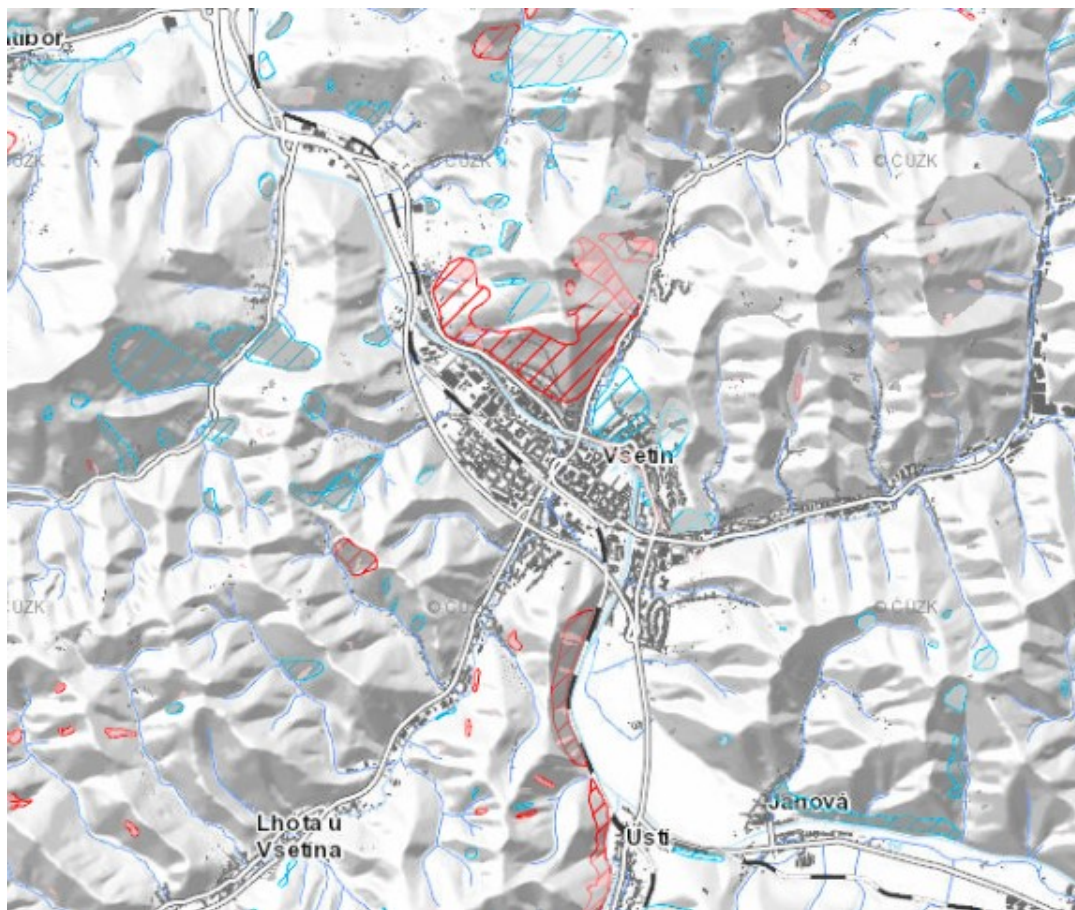
ždánickou, podslezskou, slezskou, dukelskou a predmagurskou jednotku. Magurská jednotka buduje podstatnou část flyšového pásma a je nasunuta na vnější krosněnskou jednotku. Zahrnuje dílčí příkrovové jednotky: Račanskou, bystrickou, krynickou a bielokarpatskou. Je tvořena hlavně flyšovými sedimenty paleogenního stáří.

Geologické poměry Vsetínské Bečvy zahrnují nivní sediment a mezi horniny zde patří štěrk, hlína a písek. Geneze je fluviální. Soustavou spadá do Českého masivu, oblast kvartér.

Řeka Bečva je silně splaveninonosný tok s velkým objemem zejména štěrkopísčitého a písčitého sedimentu způsobeného průlinovou propustností údolních niv. Jelikož je tok Vsetínské Bečvy velmi štěrkonosný, velmi často se zanáší koryto řeky. [9][10][11]

Dle geomorfologických poměrů se v zájmovém území jedná o strukturně a erozně – denudační reliéf se stopami tří stupňů mladotřetihorního zarovnání povrchu. Reliéfová rozmanitost a prostorová diferencovanost byla zapříčiněná dlouhodobým vývojem území a působením celého souboru vnějších procesů. Pro oblast jsou charakteristické ploché rozvodné hřbety a svahové spočinky. Dále se zde nacházejí suky, místa svahových spočinků a balvanových proudů a různé formy zvětrávání. [12]

Hlubinným ploužením dochází v hlubokých údolích mezi hřbety k četným sesuvům, rozpadům vysokých hřbetů a ke vzniku povrchových a podzemních pseudokrasových tvarů (Obr. 4, 5).



Obrázek 4: Aktivní a pasivní sesuvy v okolí obce Vsetín. [13]



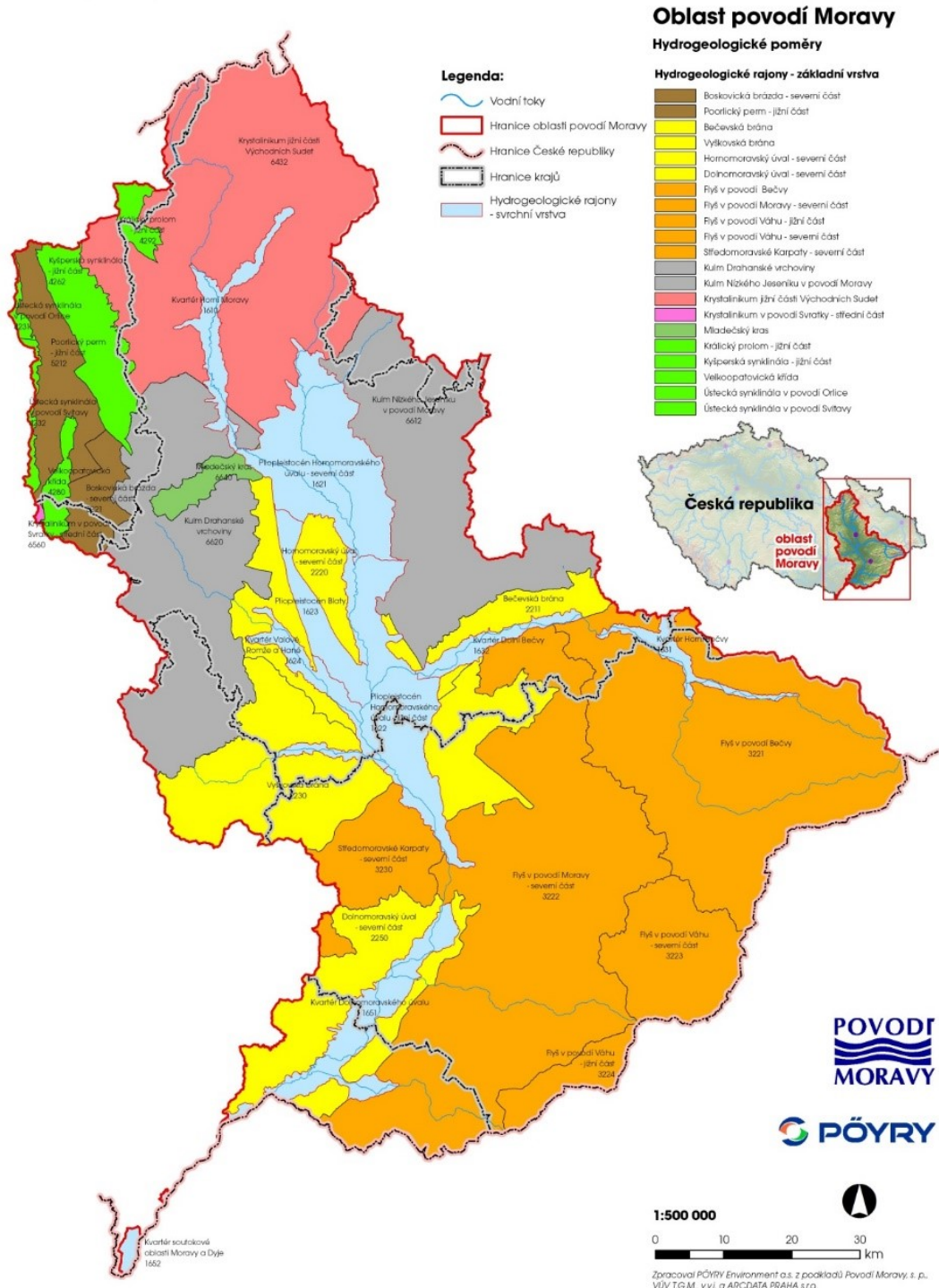
Obrázek 5: Aktivní a pasivní sesuvy v zájmové oblasti. [13]

3.3 Hydrogeologické poměry

Vsetínsko se z hydrogeologického pohledu nachází v povodí řeky Moravy a úmoří Černého moře. Největší měrou povrchových vod přispívá řeka Bečva, která je hlavní tepnou této oblasti. Jedná se o největší levostranný přítok řeky Moravy. Říční systém povodí řeky Bečvy má charakter horských toků. Samotná Bečva vzniká soutokem Bečvy Vsetínské, o délce 58,8 km, a Rožnovské, o délce 37,6 km, u Valašského meziříčí. Délka spojené Bečvy činí 61,2 km a ústí do Moravy u Tovačova, kde dále pokračuje do Dunaje a končí v Černém moři. V oblasti města Vsetín jsou levostrannými přítoky řeky Bečvy říčka Rokytenka, Semetínský potok, potok Potůčky a pravostrannými přítoky potok Vesník, říčky Jasenka a Jasenice. Plocha celého povodí je 1 626 km² (Obr.6).

Režim podzemních vod v této oblasti není zrovna příznivý, což naznačuje geologická stavba podloží, ale jsou zde místa, kde se vyvírající voda dostává na povrch. Tyto místa se zpravidla upravují do studánek, kterých je v této oblasti docela hojný počet. Dále se zde vyskytují i vody minerální. Celkem zde můžeme najít 12 míst se 14 zřídly sirovodíkových minerálních vod, která se ovšem nevyužívají v důsledku malé vydatnosti zřidel.

Výskyt vodních ploch není v tomto okrese příliš velký. Zabírají plochu jen asi 180 ha. Největší vodní plochou je vodní nádrž Karolínka. Byla postavena za účelem zadržování vody pro zásobování pitnou vodou obyvatele Vsetínska a Vlársko, pro trvalé zajištění minimálního průtoku a pro snížení průtoků při povodňových situacích na říčce Stanovnice. Druhou vodní nádrží je nádrž Bystřička, postavená pro zajištění vody na zásobování průplavu Dunaj – Odra – Labe. Nyní slouží jako ochrana před povodněmi, ale také pro rekreační účely. V neposlední řadě stojí za zmínku soustava chotyňských rybníků, vodní nádrž Horní Bečva a další soustava malých rybníčků u Lačnova. [11] [14][15]



Obrázek 6: Hydrogeologické poměry v oblasti povodí Moravy [16]

4. Studie stávajícího stavu sesuvného území

Pravostranný svah řeky Vsetínské Bečvy, jenž je lemován pozemní komunikací č. III/05736 a nacházející se v zastavěné oblasti, je deformován dlouhodobými plouživými pohyby horninových hmot. Povrch svahu je pokrytý stromy, které zajišťují částečné povrchové i hloubkové zpevnění (Obr.7, 11). Pata svahu byla již dříve stabilizována nábrežní zdi. Příčin zde probíhajících svahových deformací je několik např. velký sklon svahu, výskyt podzemní vody, nevhodné složení podloží, protékající řeka u paty svahu anebo neuvážená výstavba budov v koruně nedostatečně stabilizovaném svahu. Deformace mají za následek nerovnoměrné sedání staveb, tvoření trhlin na domech, pozemní komunikaci a na parkovišti podepřené opěrnou zdi (Obr. 8, 9, 10, 12). Cílem studie je zanalyzovat stávající svah, vytvořit matematický model pomocí programu Plaxis2D, vyhodnotit stabilitu svahu a navrhnout dostatečná opatření, aby se zamezilo dalším deformacím.



Obrázek 7: Zájmové území.



Obrázek 8: Trhlina na objektu nacházející se v koruně svahu.



Obrázek 9: Trhliny na objektu.



Obrázek 10: Trhliny na pozemní komunikaci.



Obrázek 11: Pohled ze svahu dolů.



Obrázek 12: Opěrná zeď pod parkovištěm.

4.1 Podklady pro matematické modelování

Prvním krokem k vytvoření matematického modelu bylo zaměření stávajícího stavu svahu. Poněvadž je svah velmi hustě pokrytý stromy, nebylo možné jej zaměřit geodeticky. Muselo se využít digitálního zaměření pomocí mapového portálu České geologické služby na vykreslení podélného profilu svahu v programu AutoCAD2017, z čehož se vzaly body pro vykreslení modelu v programu Plaxis2D (Obr. 13, 14).

Dále byly získány geologické údaje vrtné prozkoumanosti z archívu Geofondu. Z geologického vrtu S-1 byly získány informace o přítomnosti podzemní vody a jílovců v podloží, tudíž byl primární model takto namodelován. Jelikož se ale v těchto místech jedná o variantní geologii, což znamená, že se v blízkém okolí nachází také polohy pískovců, byl vytvořen také druhý alternativní model s pískovcovým podložím.



Obrázek 13: Mapa vrtné prozkoumanosti ve sledované lokalitě. [13]

Česká geologická služba		gd3v	
databáze geologicky dokumentovaných objektů			
STRATIGRAFICKÝ VYMEZENÝ VÝPIS GEOLOGICKÉ DOKUMENTACE ARCHIVNÍHO VRTU S-1 [Vsetín]			
Klíč báze GDO	: 494751	Číslo posudku	: P053330
Souřadnice - X	: 1154588.70	Y	: 496057.70 [zaměřeno]
Nadmořská výška	: 361.30 [Balt po vyrovnání]	Mapy 1:25.000	25-322 M-33-96-D-d
Hloubka / délka	: 8.00 [vrt svislý]	Rok ukončení	: 1986
Účel objektu	: inženýrsko-geologický	Datum výpisu	: 25.4.2017
Realizace	: GPO, závod Hrabová		
Komentář	:		
<hr/>			
hloubkový interval [m]	stratigrafie	základní popis polohy	
		rozšíření popisu polohy	
		komentář k poloze	
<hr/>			
	Kvartér		
0.00 - 0.20	: ornice humózní, tmavě hnědá		
0.20 - 0.80	: navážka hlinitá, písčitá, tmavě hnědá; geneze antropogenní		
0.80 - 1.90	: hlína pevná, max.velikost částic 1 až 5 cm, hnědá; geneze deluviální; příměs: štěrky		
1.90 - 4.80	: hlína pevná, písčitá, max.velikost částic 2 až 5 cm, hnědá		
4.80 - 8.00	: jílovec zvětralý, rozložený, rozpukaný, šedohnědý; geneze sedimentární		
<hr/>			
Hladina podzemní vody - hloubka [m]	: 6.90	druh hladiny	: naražená

Obrázek 14: Výpis geologické dokumentace archivního vrtu S-1 (zdroj: ČGS)

4.2 Základní výpočetní model

4.2.1 Metoda konečných prvků

Pro vytvoření výpočtového modelu byl použit výpočetní systém Plaxis2D pracující na principu metody konečných prvků, která je považována za nejefektivnější numerickou metodu pro modelování problémů matematické fyziky – tj. úloh popsanych v závislosti na typu řešené úlohy diferenciálními nebo integrálními rovnicemi. Slouží k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin, proudění tepla a dalších na vytvořeném fyzikálním modelu. Princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Nejčastější využití této metody je v kontrole již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického (nejnamáhavějšího) místa konstrukce. [17] [18]

4.2.2 Sestavení výpočetního modelu

Prvním krokem sestavení výpočetního modelu bylo vykreslení podélného profilu svahu v programu AutoCAD2017. Na základě podélného profilu byl vytvořen charakteristický řez svahu včetně nábrežní zdi s kotvami, opěrné zdi s parkovací plochou a základem domu v koruně svahu. Dále byla zakreslena jednotlivá rozhraní geologických vrstev a takto vytvořený svah byl připraven k naimportování do programu Plaxis2D.

V programu Plaxis2D se v první fázi navolilo základní nastavení – rozsahy, jednotky a typ elementu. Po zvolení základních parametrů se přešlo do hlavní části programu, kde se pomocí příkazu Import geometry naimportoval charakteristický řez svahu. Poté se v záložce Soil vytvořily a přiřadily do řezu jednotlivé vrstvy zemin, hornin a konstrukčních prvků (Tab. 1, 2, 3). Profesoři Hulla J., Šimek J. a docent Turček P. ve své publikaci „Mechanika zemin a zakládanie staveb“ uvádějí směrné charakteristiky zemin a hornin, dle kterých se postupovalo při návrhu a pro konstrukční prvky byly použity normy ČSN 73 1201 a ČSN 73 1401.

Zemina	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{def} [kN/m ²]	ν [-]	c_{ef} [kN/m ²]	ϕ [°]	k_x a k_y [m/s]
Ornice	20	23	5 000	0,40	16	23	$1 \cdot 10^{-8}$
Hlína písčítá	18	21	8 000	0,35	16	29	$1 \cdot 10^{-7}$
Hlína šterkovitá	19	22	19 000	0,35	11	35	$1 \cdot 10^{-7}$
Jílovec silně porušený	18,5	21,5	8 000	0,35	30	24	$1 \cdot 10^{-10}$
Jílovec porušený	19,5	22,5	55 000	0,30	50	26	$1 \cdot 10^{-10}$
Jílovec mírně porušený	19,5	22,5	70 000	0,25	100	22	$1 \cdot 10^{-10}$

Tabulka 1: Parametry zemin v zájmovém území pro podloží s vrstvami jílovce. [1]

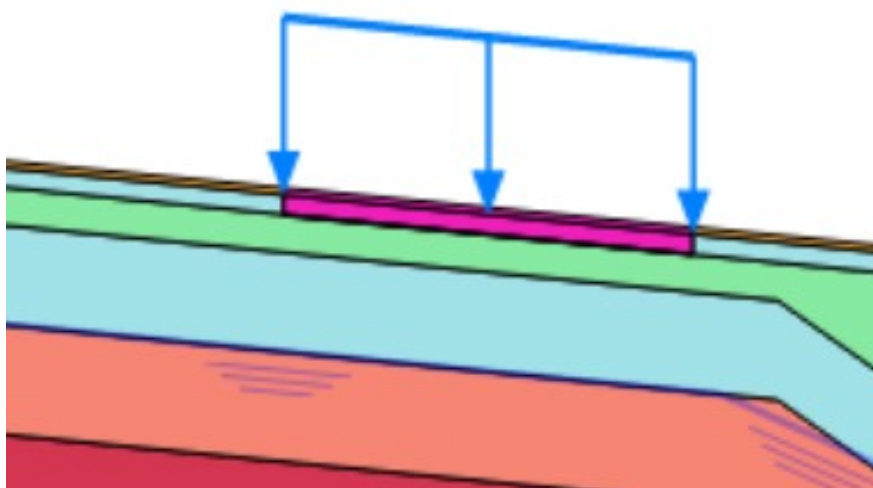
Zemina	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{def} [kN/m ²]	ν [-]	c_{ef} [kN/m ²]	ϕ [°]	k_x a k_y [m/s]
Ornice	20	23	5 000	0,40	16	23	$1 \cdot 10^{-8}$
Hlína písčitá	18	21	8 000	0,35	16	29	$1 \cdot 10^{-7}$
Hlína šterkovitá	19	22	19 000	0,35	11	35	$1 \cdot 10^{-7}$
Pískovec silně porušený	18,5	21,5	12 000	0,35	30	25	$1 \cdot 10^{-8}$
Pískovec porušený	19	22	60 000	0,30	50	26	$1 \cdot 10^{-8}$
Pískovec mírně porušený	19,5	22,5	80 000	0,25	100	24	$1 \cdot 10^{-8}$

Tabulka 2: Parametry zemin v zájmovém území pro podloží s vrstvami pískovce. [1]

Konstrukční prvek	γ [kN/m ³]	E_{def} [kN/m ²]	ν [-]
Betonový základ domu	25	25 000 000	0,2
Základ plochy parkoviště	24	20 000 000	0,2
Tížná zeď u parkoviště	27	450 000	0,3
Tížná zeď u řeky C12/15	25	26 000 000	0,2

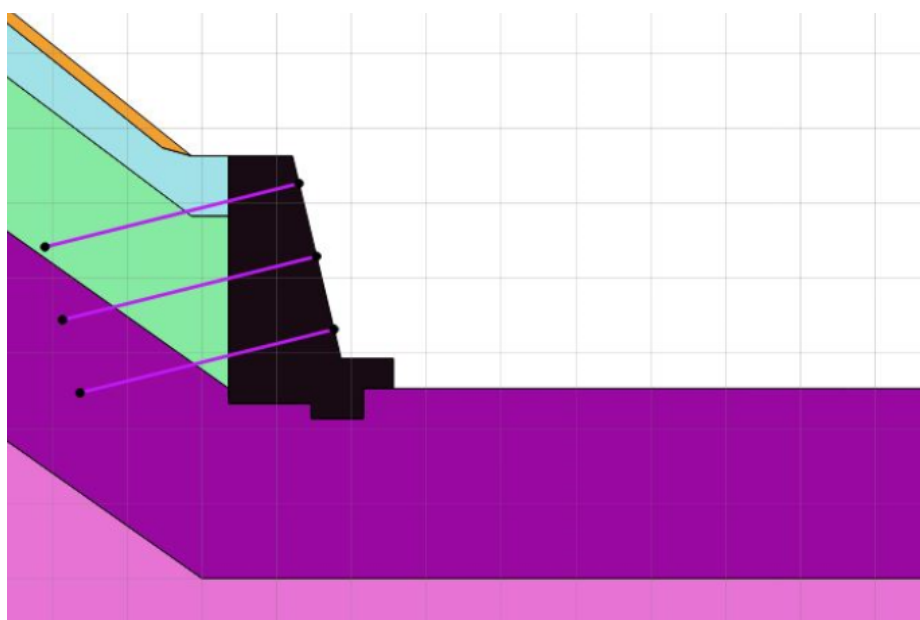
Tabulka 3: Parametry konstrukčních prvků v zájmovém území. [2]

Dalším krokem se v Structures zvolil daný typ a hodnota přitížení od objektu. Jelikož nebyly dohledány informace o velikosti zatížení domu na daný svah, bylo toto dopočítáno. Výpočet byl proveden pro nepodsklepenou budovu o výšce 9 m, hloubce betonového základu 1,5 m a rozměrech 12 x 14 m. Hodnota přitížení od budovy na 1 m činila 60 kN/m²/m (Obr.15).



Obrázek 15: Aplikace plošného zatížení od objektu.

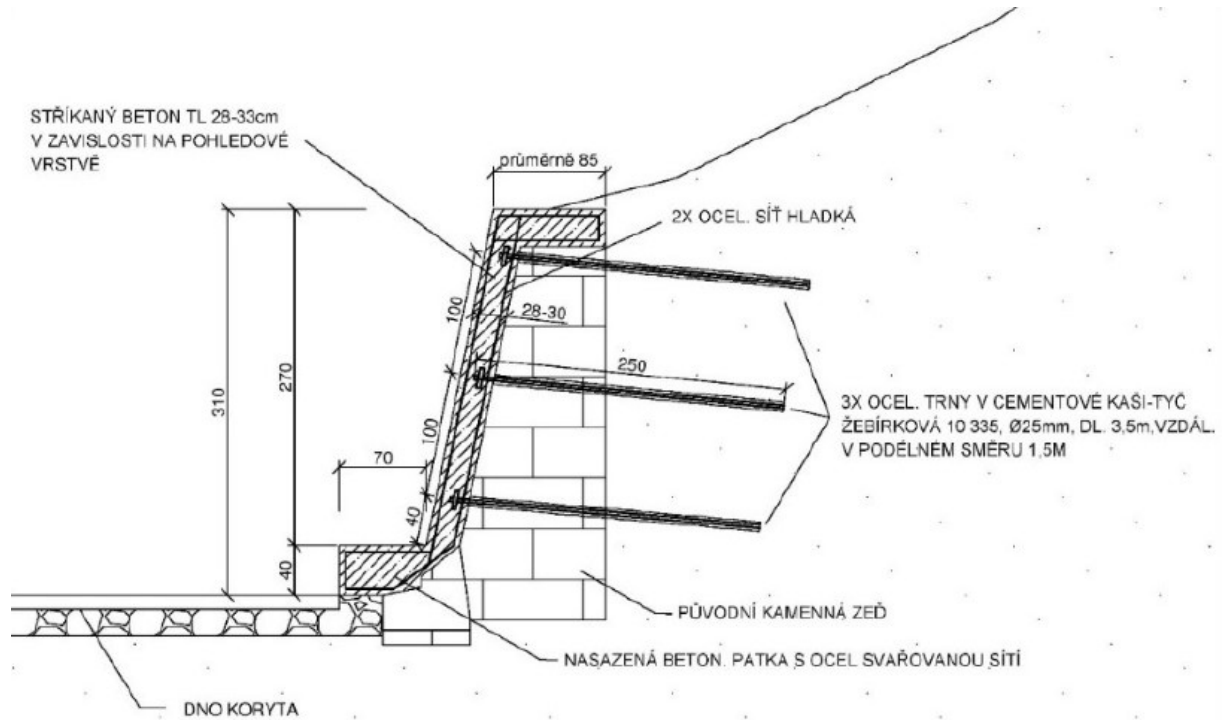
Jakmile bylo zatížení aplikováno do modelu, přešlo se k navržení kotev u nábrežní zdi. Zde se nejprve kotvy vytvořily v programu AutoCAD2017 a až poté se naimportovaly do programu Plaxis2D, kde se vymodelovaly za pomoci příkazu anchors node – to – node (Tab. 4). Jak je zřejmé z obrázku č.16, byly navrženy tři ocelové trny v cementové zálivce průměru 25 mm, délce 3,5 m, umístěny ve vzdálenosti 1 m nad sebou a 1,5 m vedle sebe (Obr. 17).



Obrázek 16: Aplikace kotev v nábrežní zdi.

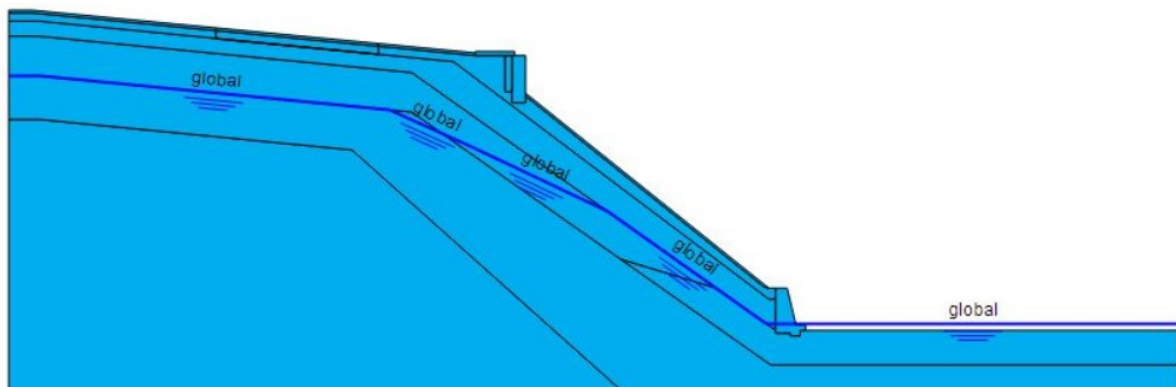
Konstrukční prvek	Ø vývrtu [mm]	Ø výztuže [mm]	L _{spacing} [m]	E _{def} [kN/m ²]	EA [kN/m]
Ocelové trny v cementové zálivce	80	25	1,5	25 000 000	216 481

Tabulka 4: Parametry ocelových trnů v cementové zálivce v nábrežní zdi. [3]



Obrázek 17: Řez nábrežní zdi s kotevním systémem a jeho popisem. [12]

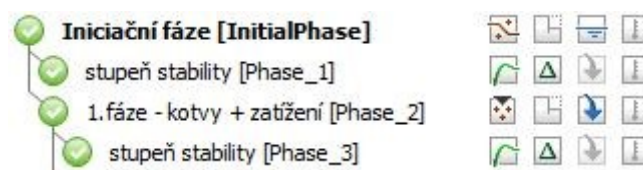
Na základě vrtné prozkoumaností byla také zjištěna hladina podzemní vody, jež se v záložce Water levels zaimplementovala spolu s hladinou řeky (Obr.18). Poté se nechala vygenerovat síť modelu.



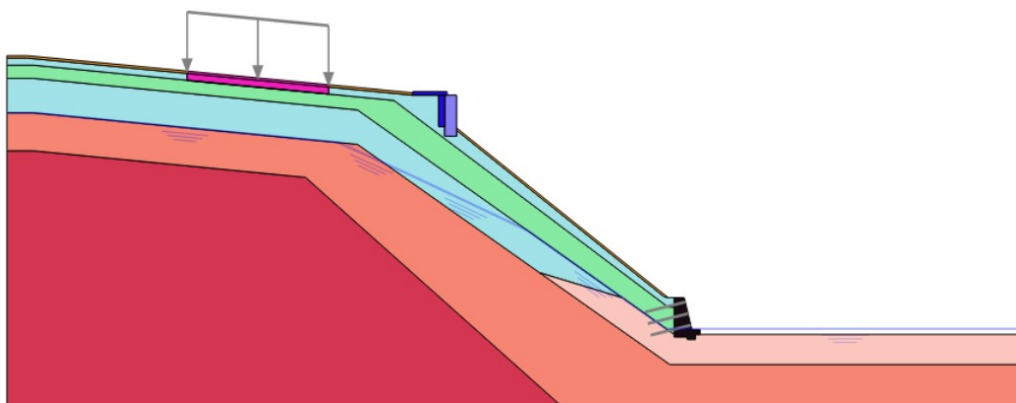
Obrázek 18: Průběh hladiny podzemní vody ve svahu.

Na závěr se v Staged construction nastavil výpočet pro posouzení Iniciační fáze a jejího stupně stability, která proběhla jen pro samotný svah s konstrukčními prvky, ale bez spolupůsobení kotev nábrežní zdi se svahem a zatížení od budovy (Obr. 20). Jelikož výpočet původního stavu svahu a stupně stability proběhl v pořádku, mohlo se postoupit k 1. výpočetní fázi a jejího stupně stability, kde se zohlednilo zatížení od budovy a působení kotev v nábrežní zdi (Obr. 21). Tato fáze i se stupněm stability opět proběhla v pořádku, tudíž nic nebránilo tomu, aby se za účelem větší stability svahu navrhly sanační opatření (Obr. 19).

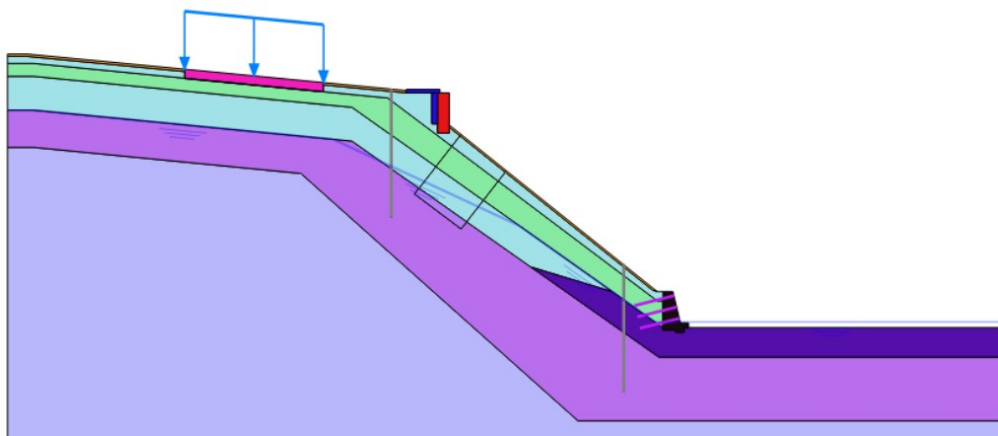
Celý tento postup byl použit jak pro model s vrstvami jílovce, tak pro model s vrstvami pískovce.



Obrázek 19: Výpočetní kroky modelu.



Obrázek 20: Iniciační fáze – svah bez aktivování zatížení od budovy a kotev nábrežní zdi.



Obrázek 21: 1. fáze – aktivování zatížení a kotev nábrežní zdi.

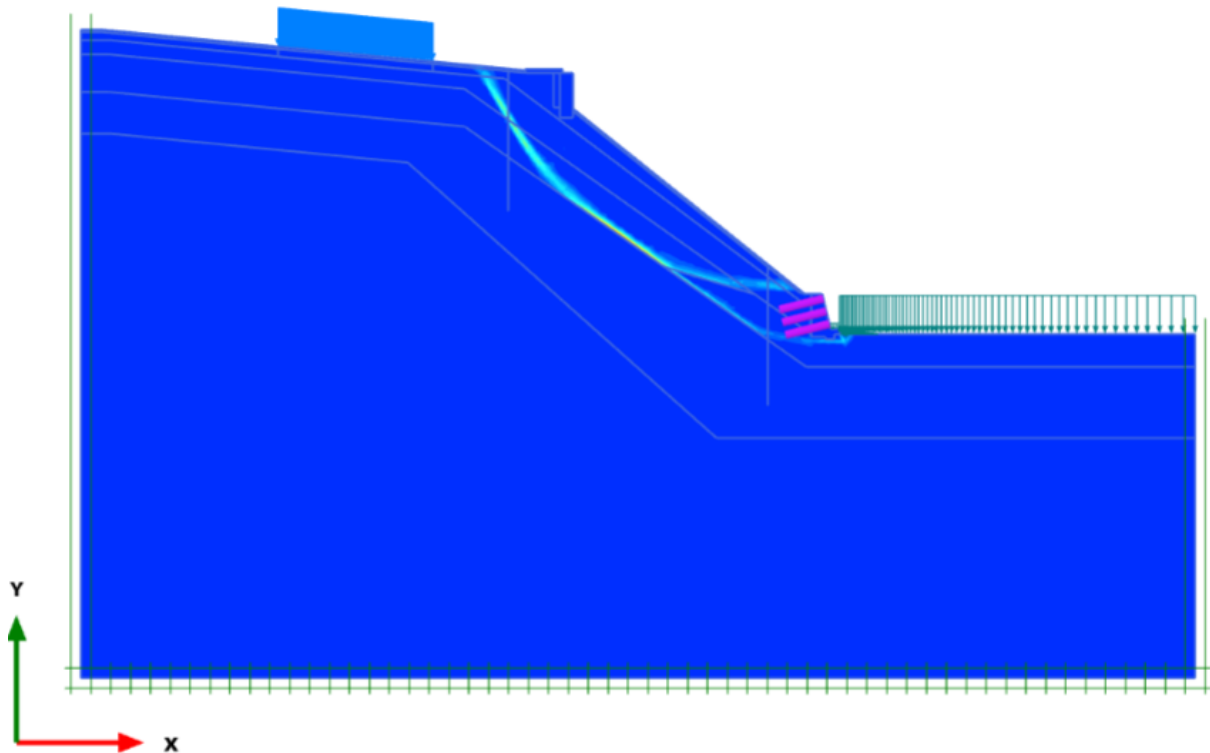
5. Stabilizační opatření a jejich analýza

Při deformaci svahu dochází k usmyknutí po smykové ploše, na kterou působí smyková pevnost jako složka bránící sesuvu. K zabránění sesuvu svahu se docílí přerušением smykové plochy stabilizačními prvky. [19]

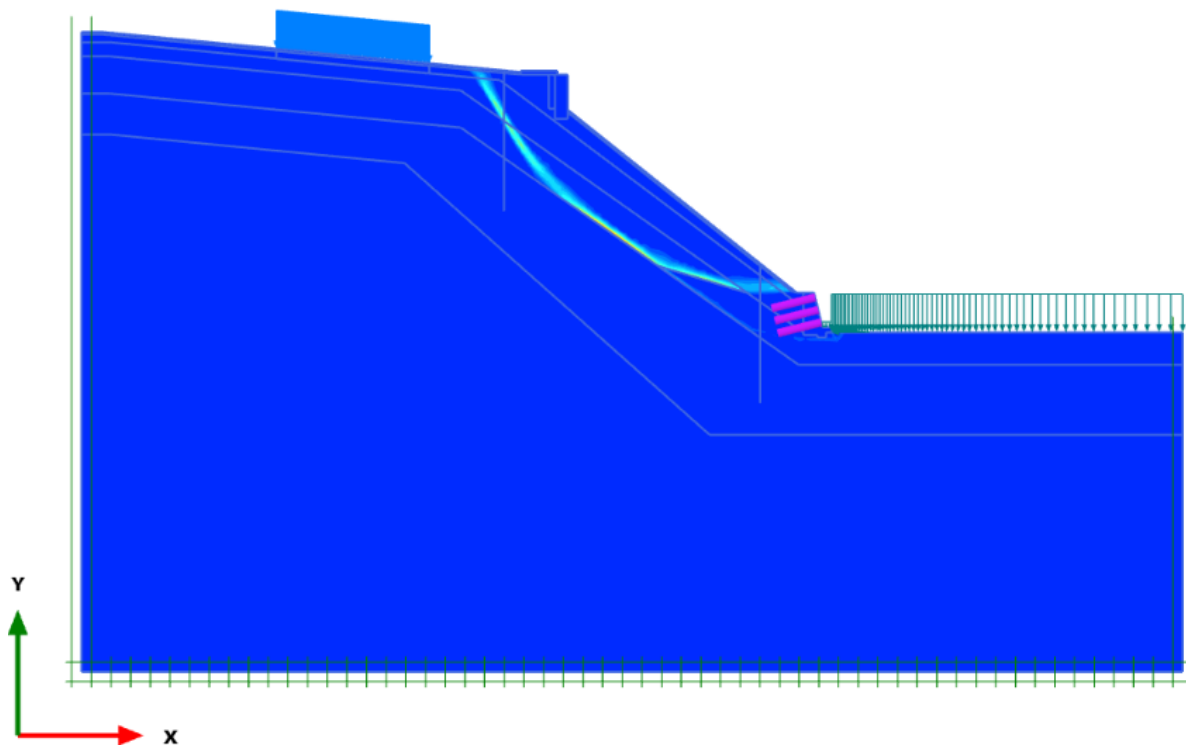
Smyková plocha v návrhu modelu u podloží s jílovcem začíná mezi parkovištěm a budovou, pokračuje na hranici jílovce a hlíny písčité, kde se poté rozdělí a prochází nad a pod nábrežní zdí. U podloží s pískovcem smyková plocha prochází pouze nad nábrežní zdí (Obr. 22, 23).

Pro stabilizaci pravostranného svahu řeky Bečvy byly navrženy 4 stabilizační opatření:

- stabilizace svahu za pomoci mikropilot
- stabilizace svahu mikropilotami a hřebíkováním
- stabilizace svahu mikropilotami a odvodněním
- stabilizace svahu mikropilotami, hřebíkováním a odvodněním



Obrázek 22: Smyková plocha pro podloží s jílovcem.



Obrázek 23: Smyková plocha pro podloží s pískovcem.

5.1 Varianta č.1 – stabilizace mikropilotami

Mikropiloty jsou prvky o průměru menším než 300 mm používané pro hlubinné zakládání staveb. Jejich znakem je mimořádná štíhlost a úsporné nároky na prostor při provádění. Využívají se jak pro podchycování či zesilování základů stávajících staveb, ale také pro stabilizační opatření, tzn. zajištění svahu proti sesuvu. Úkolem je přenášení tahových i tlakových účinků zatížení od konstrukce nebo od zemního tlaku.

Princip:

Celá mikropilota se rozděluje na několik částí – hlavu, dřík, kořen a patu. Hlavu nalezneme v horní části. Tvoří ji buď ocelová deska s nátrubkem (mikropiloty trubní) nebo rozptýlená betonářská výztuž (mikropiloty armokošové). Takto upravená se stýká s nadzákladovou konstrukcí. Osově zatížení (tlakové, tahové) se přenáší do kořene pomocí dříku, což je část mikropiloty, která je neinjektovaná. Osově síly jsou zachyceny kořenem, který tvoří spodní část celé mikropiloty a v okolní hornině je držen za pomoci injektáže. Na samotném konci neboli v úrovni počvy vrtu se nachází pata mikropiloty.

Technologie výstavby v zájmovém území:

Stabilizace v zájmovém území byla navržena aplikací dvou vrtaných armokošových mikropilot o průměru 150 mm, délky 11 m. První mikropilota se zabuduje mezi budovu a parkoviště u koruny svahu a druhá nad nábrežní zdí u paty svahu.

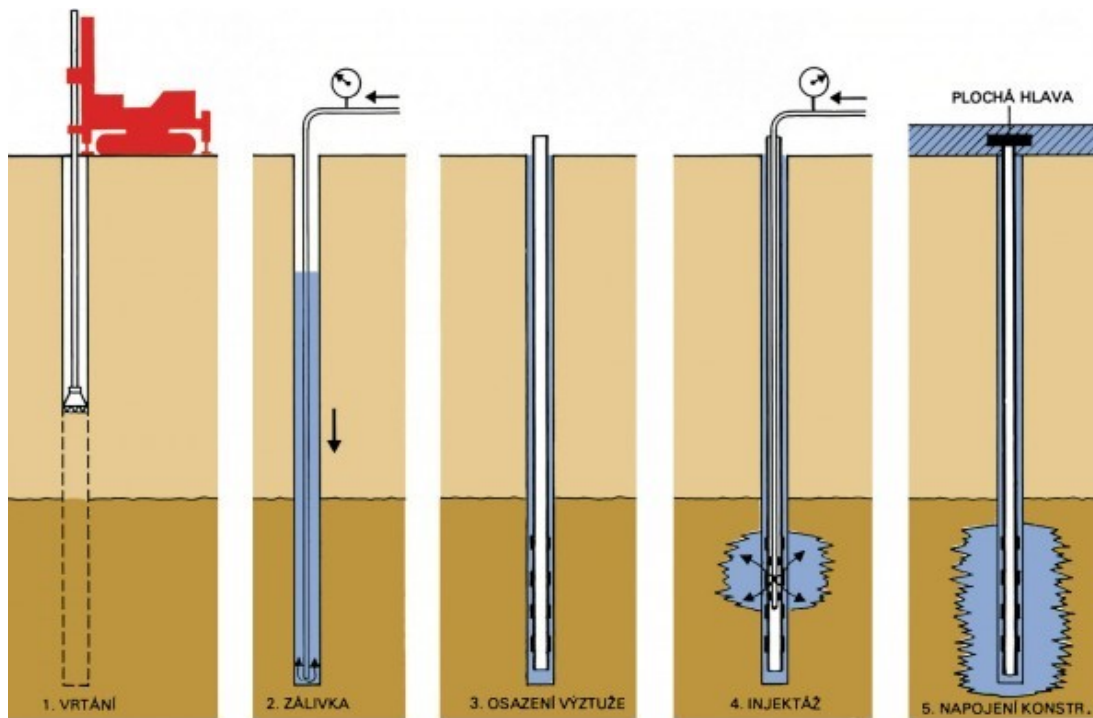
Na začátku se vyvrtá maloprofilový bezjádrový vrt. Dále se zajistí výztuž speciálně upraveného armokoše z betonářské výztuže o profilu 20 mm, ovinutou spirálou průměru 5 mm, který by byl ve spodní části opatřen čtyřmi pruty průměru 6 mm, jež by se překryly gumovou manžetou. Výroba armokoše by probíhala v jednom kuse bez použití montážního styku.

V další fázi se připravená výztuž (po odmaštění a zbavení nečistot) vsune do vrtu, který se vyplní cementovou zálivkou. Cementová zálivka se do vrtu aplikuje hned po jeho dokončení v poměru cement : vodě = 2,5 : 1.

Posledním krokem se zajistí únosnost mikropiloty injektáží kořene injektážní směsí radiálním směrem pomocí dvojitého obturátoru. Injektáž se provede v menších dávkách za pomoci vysokotlakého čerpadla (Obr. 24).

K snadnějšímu přístupu stavebních strojů k patě svahu se využije stavebních pontonů, které se na obou březích ukotví dvěma vrátky. [20] [21]

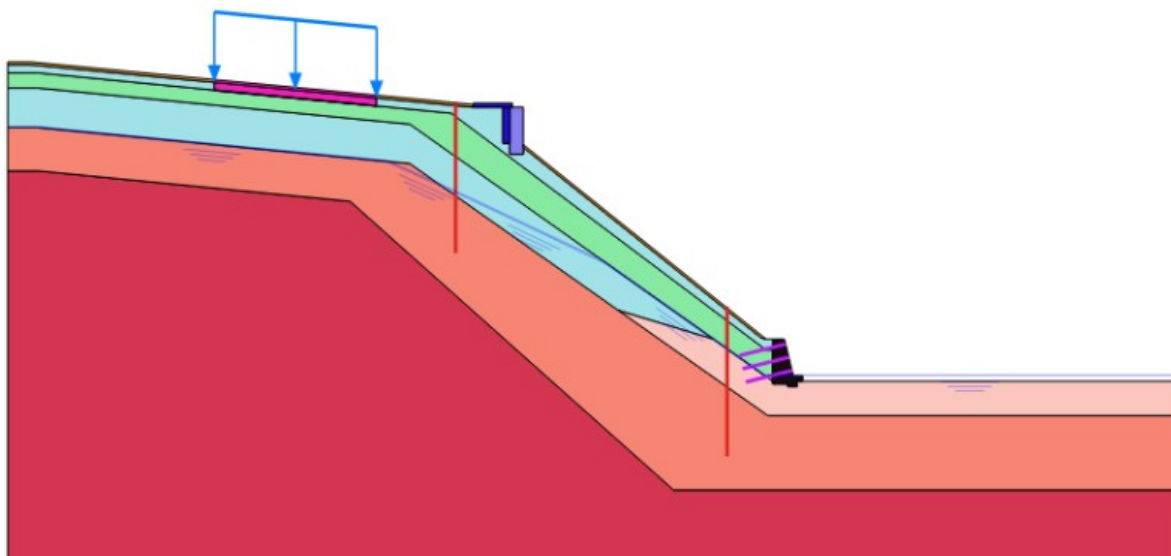
Mikropiloty by se prováděly vrtnou soupravou Casagrande B180 HD firmy Geostav.



Obrázek 24: Postup výstavby mikropiloty vrtáním. [20]

Modelování mikropilot v programu Plaxis2D:

Prvním krokem se vypočítaly charakteristické vlastnosti mikropiloty, které se zadávaly do položky Plates (Tab. 5). Dále se pomocí příkazu Tunnels vytvořila rovná čára délky 11 m, k ní se přiřadilo ostění a umístila se do řezu. Takto se postupovalo u obou navržených mikropilot (Obr. 25).



Obrázek 25: Aplikace mikropilot do řezu svahu.

Dále se v Stage constructions nastavila výpočetní fáze, ve které se aktivovaly mikropiloty, a na tuto fázi se zadal výpočet pro stabilitu svahu (Obr. 26).



Obrázek 26: Návrh výpočetních kroků pro stabilizaci mikropilotami.

Výpočet:

$$1. \quad A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,075^2 = 0,01767 \text{ m}^2 \quad (1)$$

$$2. \quad E = 30\,500\,000 \text{ kPa} \quad (2)$$

$$3. \quad EA = 0,01767 \cdot 30\,500\,000 = 538\,935 \text{ kN/m} \quad (3)$$

$$4. \quad EI = \frac{0,15^2 \cdot 538\,935}{12} = 1\,010,5 \text{ kNm}^2/\text{m} \quad (4)$$

$$5. \quad w = 24 \cdot 0,15 = 3,6 \text{ kN/m/m} \quad (5)$$

Konstrukční prvek	Ø vývrtu [mm]	E _{def} [kN/m ²]	EA [kN/m]	EI [kNm ² /m]	w [kN/m/m]
Mikropilota	150	30 500 000	538 935	1010,5	3,6

Tabulka 5: Parametry mikropilot. [2]

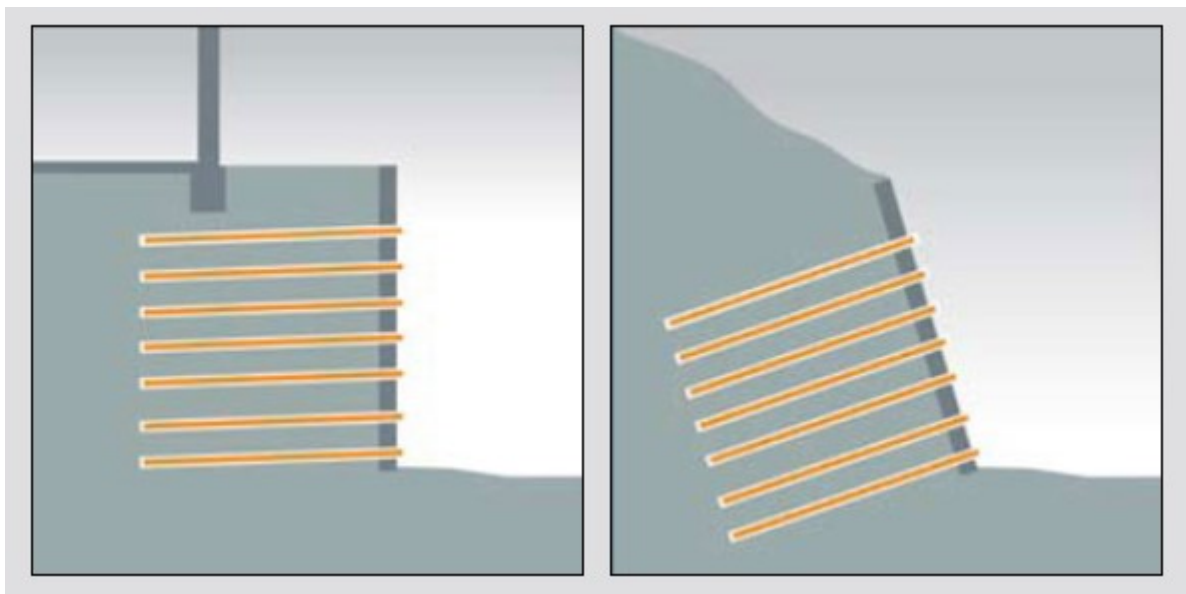
5.2 Varianta č.2 – stabilizace mikropilotami a hřebíkováním

Druhá možnost stabilizace byla navržena mikropilotami s hřebíkováním. Tento návrh by měl být účinnější než varianta č.1.

Zpevňování svahu metodou hřebíkování je v této době velmi progresivní metodou sanací svahových deformací. Jedná se o velmi výhodný ekonomický postup, kterým se vyztužují zeminy v jejich přirozeném uložení. Jde o prvky pasivní, bez volné délky a předeputí. Účelem hřebíků je přenášení tahového nebo smykového napětí a případně povrchovým zatížením po celé své délce. [22] [23] [24]

Princip:

Podstata metody hřebíkování spočívá ve vytvoření poměrně husté sítě krátkých tahových prvků v rostlé zemině, tvořených ocelovými hřebíky s cementovou zálivkou a zaústěných do krycí vrstvy prováděné ze stříkaného betonu vyztuženého sítovinou tloušťky zhruba 100–250 mm. Propojení krycí vrstvy s hřebíkem je zajištěno jeho hlavou, po většině tvořenou ohybem táhla hřebíku (Obr. 27). [22]

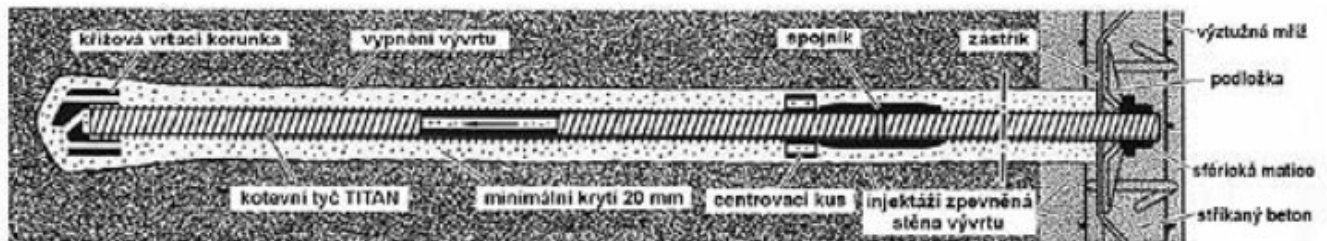


Obrázek 27: Možnosti osazování hřebíků do svahu – vodorovně nebo pod mírným úhlem. [22]

Technologie výstavby v zájmovém území:

Pro stabilizaci svahu zemními hřebíky byly vybrány hřebíky typu TITAN 30/16 délky 7 m, které se rozmístí do sítě 4 x 8 od sebe vzdálených 1 m na výšku a šířku.

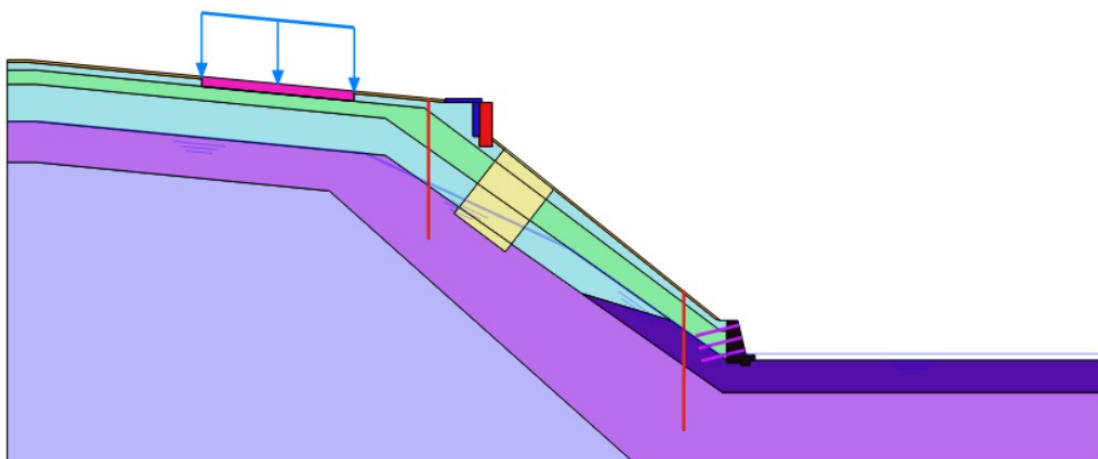
Zavedení hřebíků do podloží proběhne s využitím standardní rotační soupravy na pásovém podvozku KR 909-2 firmy Klemm a soupravou na stříkaný beton Aliva 267 firmy Sika. V první fázi se provede spojení a zavrtání hřebíků do svahu se současnou injektáží s rotačně injekčním adaptérem, který zajistí během vrtání dopravu injekčního média. Dále se zajistí hlavice pomocí systémové matice, která se roznese do zemního tělesa přes opěrnou desku. Nakonec se svah vyztuží kari sítěmi a stříkaným betonem (Obr. 28). [24]



Obrázek 28: Zavedení hřebíku s injektáží do zemního tělesa. [25]

Modelování hřebíků v programu Plaxis2D:

V program AutoCAD2017 se vytvořil obdélník o rozměrech 4 x 7 m, vložil do výpočetního programu a přidaly se vlastnosti hlíny písčité a šterkovité, ornice, jílovce nebo pískovce, ale s rozdílnou soudržností, která se vypočetla dle vzorce č.7 a 6 (Obr. 29, Tab. 6, 7).



Obrázek 29: Aplikace hřebíkování do řezu svahu.

Výpočet:

$$c_{ef} = c_p + c' \quad (6)$$

$$c' = \frac{1 + \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \cdot \frac{P}{F} = \frac{1 + \sin 35^\circ}{2 \cos 35^\circ} \cdot \frac{180}{1} \quad (7)$$

c_{ef} – celková soudržnost nové zeminy

c_p – původní soudržnost zeminy

c' – nová soudržnost zeminy

P – únosnost 1 hřebíku

F – plocha na 1 hřebík

Pro podloží s jílovcem:

Zemina	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{def} [kN/m ²]	ν [-]	c_{ef} [kN/m ²]	φ [°]	k_x a k_y [m/s]
Ornice	20	23	5 000	0,40	152	23	1*10 ⁻⁸
Hlína písčítá	18	21	8 000	0,35	169	29	1*10 ⁻⁷
Hlína šterkovitá	19	22	19 000	0,35	189	35	1*10 ⁻⁷
Jílovec porušený	19,5	22,5	55 000	0,30	194	26	1*10 ⁻¹⁰

Tabulka 6: Návrh parametrů zemín pro hřebikování svahu. [3]

Pro podloží s pískovcem:

Zemina	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E_{def} [kN/m ²]	ν [-]	c_{ef} [kN/m ²]	φ [°]	k_x a k_y [m/s]
Ornice	20	23	5 000	0,40	152	23	1*10 ⁻⁸
Hlína písčítá	18	21	8 000	0,35	169	29	1*10 ⁻⁷
Hlína šterkovitá	19	22	19 000	0,35	189	35	1*10 ⁻⁷
Pískvec porušený	19	22	60 000	0,30	194	26	1*10 ⁻⁸

Tabulka 7: Návrh parametrů zemín pro hřebikování svahu. [3]

5.3 Varianta č.3 – stabilizace mikropilotami a odvodněním

Přítomnost podzemní vody je jedna z příčin deformace svahu. Snížením účinku podzemní vody na svah se docílí odvodněním, které zajistí zmenšení pórového tlaku vody na smykové ploše, a tím snížení aktivních sil.

Nejen h.p.v dokáže ovlivnit stabilitu, ale také během srážek se voda dostává do přirozených kolektorů vsakem nebo se zachytí v přítomných trhlinách, odkud proniká do masivu a může působit jako faktor, snižující stabilitu svahu.

Princip:

Ke správnému hloubkovému odvodnění slouží systémy horizontálních odvodňovacích vrtů, které musí dosahovat do propustné vrstvy procházející smykovou plochou. Jsou vybaveny drenážní trubkou, jež lze propláchnout tlakovou vodou, a zabránit tak jejím zanesením a snížení funkčnosti. Výhodou je také perforace horní části, přes kterou voda prochází a odvádí ji spodní částí bez perforace. [26]

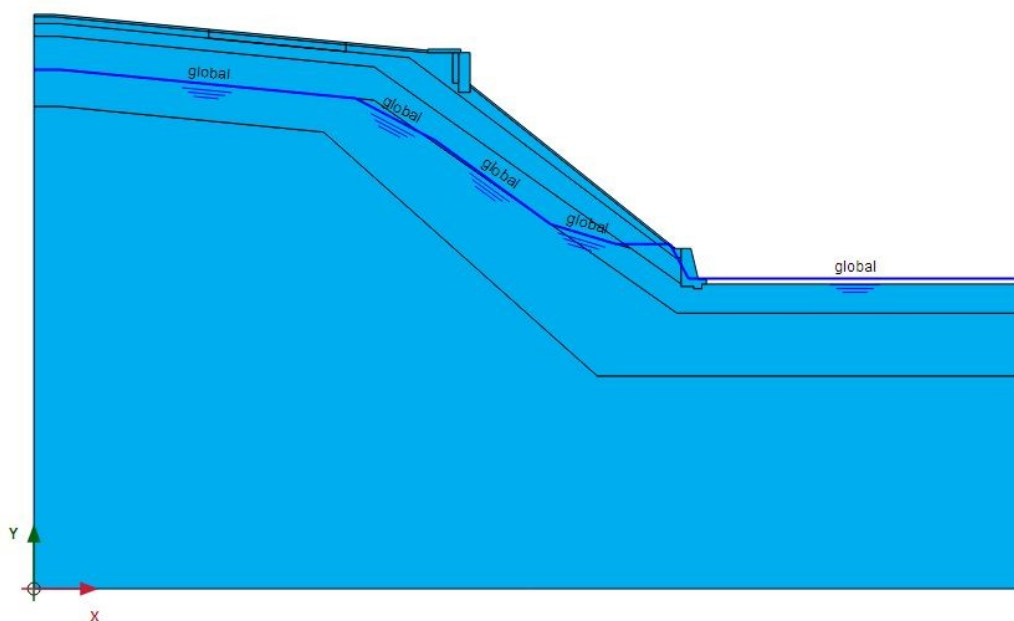
Technologie výstavby v zájmovém území:

Výhodou realizace drenážního potrubí je v tom, že při výstavbě mikropilot se využije vrtací soupravy.

Pro drenážní trubku o průměru 350 mm a délce 6,5 m by se vyvrtal 4,5 m dlouhý horizontální vrt. Do něj se osadí trubka tak, aby voda vytékala mimo nábrežní zeď.

Modelování odvodnění v programu Plaxis2D:

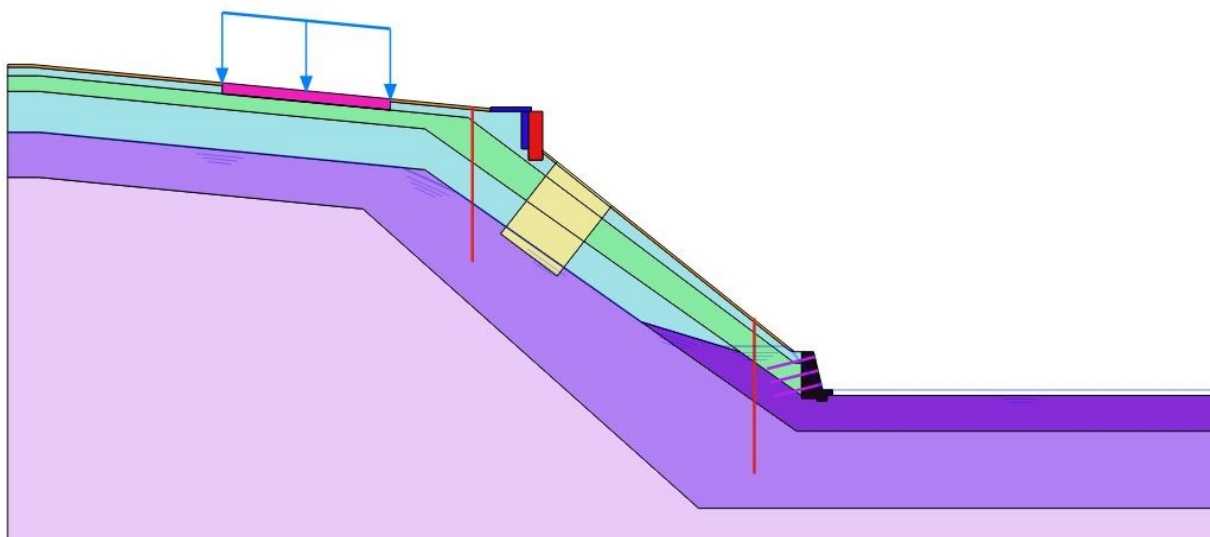
V programu Plaxis2D je odvodnění řešeno snížením hladiny podzemní vody tak, že hladina kopíruje místo, kde prochází drenážní trubka (Obr. 30).



Obrázek 30: Změna hladiny podzemní vody vlivem drenážní úpravy.

5.4 Varianta č.4 – stabilizace mikropilotami, hřebíkováním a odvodněním

Každá navržená varianta stabilizačního opatření se podílí na zvýšení stupně stability svahu. V posledním návrhu se využilo kombinace již zmíněných sanačních opatření a zakomponovaly se do jednoho modelu (Obr. 31). Cílem tohoto návrhu stabilizace bylo, co nejvíce zvýšit stupeň stability a zároveň maximálně využít stavební techniky na více prací.



Obrázek 31: Aplikace všech stabilizačních opatření do modelu.

5.5 Analýza navržených opatření

Matematickým modelováním metodou konečných prvků pomocí programu Plaxis2D byly navrženy a vypočteny sanační a stabilitní opatření pro podloží s pískovcem a jílovcem, jejichž cílem bylo zvýšení stability svahu.

Z konstrukčního hlediska se navržené varianty postupně doplňují a kombinují. Při návrhu všech opatření se braly v potaz ztížené přístupové, manipulační a výstavbové podmínky. Hlavním stěžejním prvkem jak pro podloží s pískovcem, tak pro podloží s jílovcem, se zde projevilo odvodnění svahu, jak je zřejmé dle tabulek 7. a 8., kdy se u podloží s jílovcem stupeň stability 3. varianty - mikropiloty s odvodněním zvýšil o 0,037 oproti 1. variantě - mikropiloty a také o 0,024 oproti 2. variantě - mikropiloty s hřebíkováním. Kombinací mikropilot, hřebíkování a odvodnění se vytvořila nejvíce stabilitní varianta, i když stupněm stability nelze zařadit do svahů zcela stabilních, a je nutné navrhnout plán monitoringu.

Dle technologického postupu se jednotlivé návrhy od sebe liší. Nejnáročnější variantou je varianta č.4 – stabilizace mikropilotami, hřebíkováním a odvodnění, a to z důvodu špatné přístupnosti k patě svahu, kde se musí využít stavebních pontonů, velké a těžké stavební techniky s dlouhým ramenem, jelikož výška nábrežní zdi je přes 3 m a samotný vrt mikropiloty je dlouhý 11 m. Jedinou výhodou je, že při vrtání mikropiloty se také zrealizuje odvodňovací vrt s osazením drenážní trubky. Dále se tentýž stavební stroj musí přemístit ke koruně svahu, kde se aplikuje druhá mikropilota a zemní hřebíky. U této varianty je velkým rizikem technologický postup, při kterém se může narušit smyková pevnost zemin a dojít k další deformaci svahu. Varianta č.2 a 3 jsou svým postupem podobné, akorát u mikropilot s hřebíkováním se předpokládá delší doba výstavby než u mikropilot s odvodněním, a to z toho důvodu, že při osazování hřebíků v konečné fázi je zapotřebí zajistit hlavu hřebíku kari sítěmi a stříkaným betonem. Nejjednodušší variantou na technologický postup je stabilizace samotnými mikropilotami (Tab. 8, 9).

Podloží	Kroky výpočtu	Měřené parametry	Mikropiloty	Mikropiloty + hřebíkování	Mikropiloty + odvodnění	Mikropiloty + hřebíkování + odvodnění
Jílovec	<i>Iniciační fáze</i>	ΣM_{sf}	1,071	1,071	1,095	1,095
	<i>2. fáze</i>	ΣM_{sf}	1,072	1,072	1,099	1,099
	<i>3. fáze</i>	ΣM_{sf}	1,133	1,146	1,170	1,188

Tabulka 8: Stupně stability dle stabilizačních opatření a fáze výpočtu pro podloží s jílovcem.

Podloží	Kroky výpočtu	Měřené parametry	Mikropiloty	Mikropiloty + hřebíkování	Mikropiloty + odvodnění	Mikropiloty + hřebíkování + odvodnění
Pískovec	<i>Iniciační fáze</i>	ΣM_{sf}	1,070	1,070	1,099	1,099
	<i>2. fáze</i>	ΣM_{sf}	1,068	1,068	1,098	1,098
	<i>3. fáze</i>	ΣM_{sf}	1,138	1,151	1,174	1,192

Tabulka 9: Stupně stability dle stabilizačních opatření a fáze výpočtu pro podloží s pískovcem.

6. Monitoring svahu

Za účelem ověření účinnosti sanačních a stabilizačních opatření se navrhuje plán monitoringu svahu. Slouží k objektivnější představě o probíhajících procesech ve svahovém tělese, procesech indikujících nestabilitu svahů, o jejich časovém vývoji a k lokalizaci smykové plochy. Ke správnému návrhu a realizaci monitorovacích měření svahu se vychází z rozboru všech faktorů způsobující svahovou nestabilitu, mezi které patří geometrie svahu, geologie svahu, vodní režim, fyzikálně-mechanické, strukturní a hydraulické vlastnosti horninového prostředí a rovněž primární stav napjatosti ve svahovém tělese. [27]

Na základě analýzy výpočetních modelů se vyhodnotilo, že zájmový svah se stabilizačním opatřením nedosáhne dostatečného stupně stability 1,5, který představuje poměr mezi maximální ku minimální smykové pevnosti nutné pro udržení rovnováhy. Hodnota stupně stability menší než 1 znamená nestabilní svah, hodnota 1 – 1,5 označuje, že je svah z dlouhodobého hlediska nestabilní a hodnota rovná nebo větší 1,5 znamená svah stabilní. Proto se z bezpečnostního hlediska přistoupilo k návrhu monitoringu svahu, který bude sledovat jak přetváření svahu a vývoj smykových ploch, tak výšku hladiny podzemní vody a pórové tlaky.

6.1 Monitoring šíření trhlin na objektech, kolmých a příčných posunů horninového masivu

K monitoringu přetváření na povrchu u paty svahu se využije geodetického měření, jako je např. klasická nivelace, optická automatická stanice atd., umožňující vyhodnotit absolutní hodnoty posunů, jejich orientaci a časový vývoj. Poněvadž je svah hustě pokrytý stromy, nebylo by možné použití měřicí metody po celé jeho délce. Dále se v koruně svahu nachází objekt, na který by se aplikovala kontrola šíření trhlin za pomoci skleněných destiček přichycených adhézním lepidlem. Sledováním praskání a pohybu destiček se indikuje deformace svahu. Pro zvýšení efektivity měření by se u výraznějších trhlin využil dilatometr, který vyhodnocuje změnu vzdálenosti dvou bodů pevně spojených ve fasádě domu na protilehlých stranách trhliny (Obr. 32).

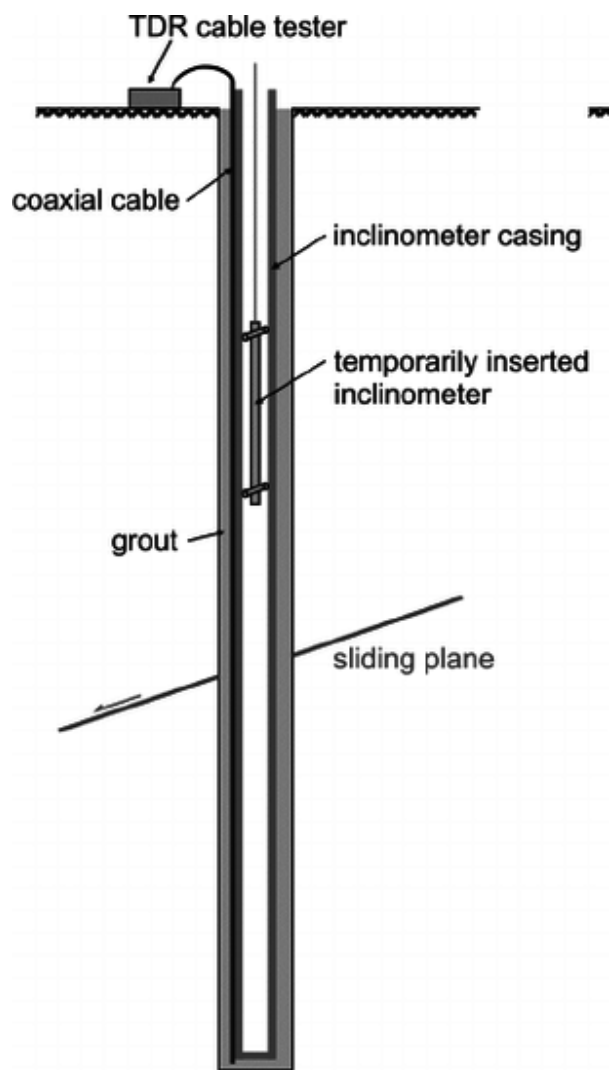


Obrázek 32: Dilatometr. [29]

Ke sledování kolmých a příčných posunů v horninovém masívu se využije optimálního prostorového a hloubkového rozmístění inklinometrů. Měřením pomocí inklinometrů umístěných v koruně a patě svahu protínající původní smykovou plochu, by se lokalizovaly smykové plochy a kvantifikace posunů na smykovou plochu, sledování časového vývoje posunů a stanovení směru pohybů, a to i na několika smykových plochách současně (Obr. 33, 34).



Obrázek 33: Inklinometr. [30]

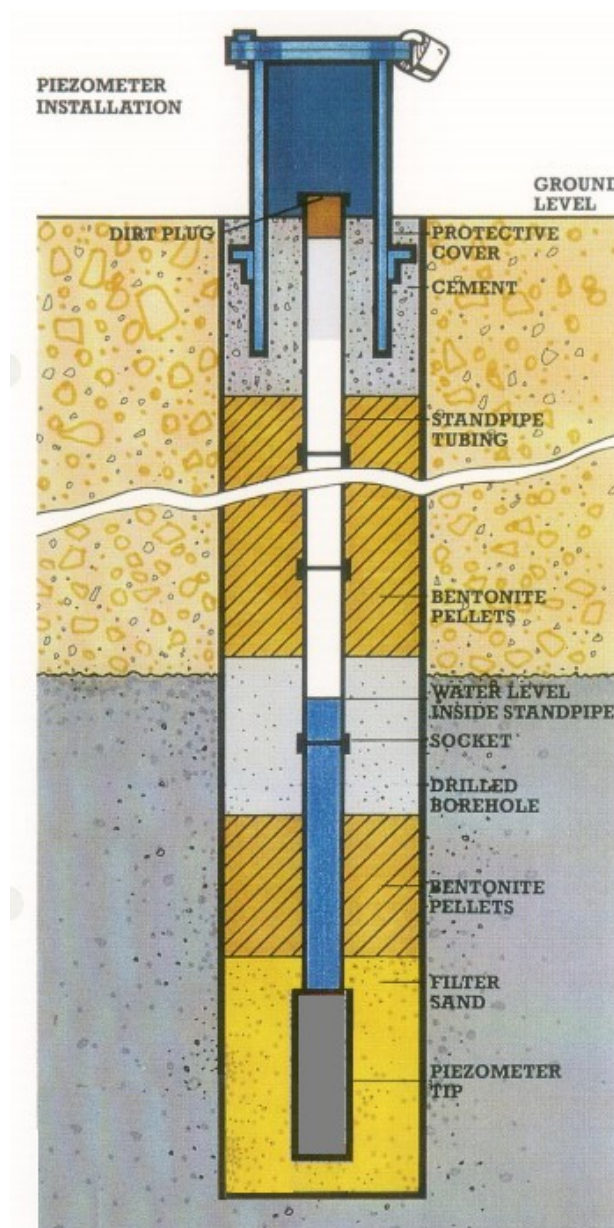


1. installation parallel to
an inclinometer into the
same borehole

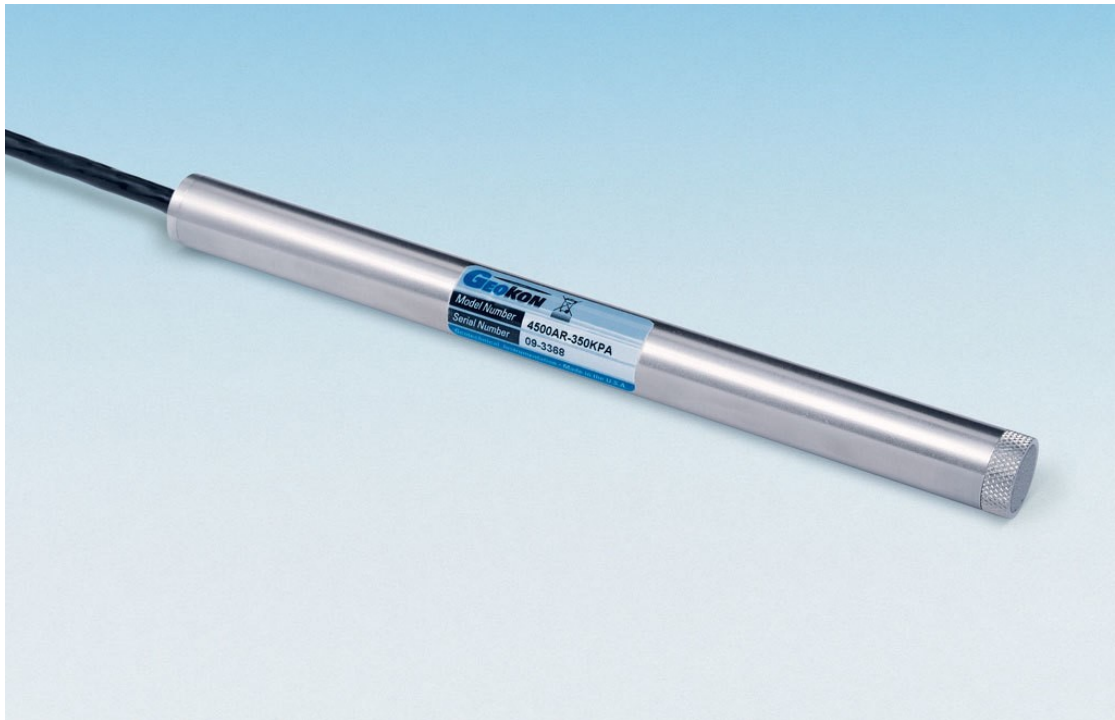
Obrázek 34: Schéma inklinometrického měření ve vrtu. [28]

6.2 Monitoring výšky hladiny podzemní vody a pórových tlaků

Problematika podzemní vody a pórových tlaků spočívá v tom, že mají velkou časovou proměnlivost a mnohdy se vliv změny vodního režimu projeví ve svahu až s určitým zpožděním. Ke sledování těchto změn by byl aplikován uzavřený strunový piezometr do střední a koncové oblasti smykové plochy. Uzavřený strunový piezometr má uvnitř těla membránu, k níž je přichycena kmitající struna. Změna frekvence struny indikuje průhyb membrány, z čehož je vyhodnocena velikost tlaku na membránu. Výhodou piezometru je možnost okamžitého měření (nemusí se čekat na ustálení tlaků) a přesnost, z toho ale vyplývá vyšší cena a větší technická náročnost (Obr. 37, 38). [27]



Obrázek 35: Instalační schéma uzavřeného piezometru. [31]



Obrázek 36: Strunový piezometr firmy Geokon. [32]

7. Závěr

Předmětem diplomové práce bylo posouzení a návrh stabilizačních opatření pravostranného svahu řeky Bečvy v obci Vsetín. Práce obsahuje geologické, geomorfologické a hydrogeologické poměry Vsetínské oblasti, charakteristiku a fotodokumentaci řešené oblasti stávajícího stavu, analýzu matematického modelování pomocí metody konečných prvků ve výpočetním programu Plaxis2D, návrh sanačních opatření, jejich princip a popis technologického postupu, analýzu stabilizačních opatření, vyhodnocení všech variant dle stupně stability a návrh monitoringu svahu. Stávající stav svahu je nevyhovující zejména z hlediska nízké stability.

V rámci analýzy stávajícího stavu svahu byly navrženy 4 varianty sanačních a stabilizačních opatření pro podloží s jílovcem a podloží s pískovcem, jelikož se v zájmové oblasti jedná o variantní geologii.

Sanační opatření pro obě podloží mají své výhody a nevýhody. Výběr návrhu záleží z velké části na stupni stability, ale nesmí se zapomínat na část technologickou, která ovlivňuje rizika a čas výstavby, a část ekonomickou, důležitou pro její zrealizování.

Srovnáním 3. a 4. varianty pro obě podloží je zřejmé, že varianta č. 4 – stabilizace mikropilotami, hřebíkováním a odvodněním vyhovuje nejlépe. Co se týče porovnání mezi podložím s pískovcem a jílovcem, vítězí pískovec, jelikož má lepší charakteristické parametry jako např. modul pružnosti, koeficient vnitřního tření a součinitel propustnosti (Tab. 11).

Podloží	Měřený parametr	Mikropiloty	Mikropiloty + hřebíkování	Mikropiloty + odvodnění	Mikropiloty + hřebíkování + odvodnění
Jílovec	$\sum M_{sf}$	1,133	1,146	1,170	1,188
Pískovec		1,138	1,151	1,174	1,192

Tabulka 10: Nejvyšší dosažené stupně stability jednotlivých stabilizačních opatření dle podloží.

Jelikož stupeň stability nedosahoval hodnoty rovné nebo vyšší než 1,5, byl z bezpečnostního stavu navržen monitoring svahu. V práci byly použity platné normy a legislativ.

8. Seznam použitých zdrojů a literatury

8.1 Knižní literatura

- [1] HULLA, J., ŠIMEK, J. a TURČEK, P. *Mechanika zemín a zakladanie staveb*. Bratislava: ALFA, 1991.

8.2 Normy

- [2] ČSN 73 1201 – *Navrhování betonových konstrukcí pozemních staveb*; Praha: Český normalizační institut, 2010
- [3] ČSN 73 1401 – *Navrhování ocelových konstrukcí*; Praha: Český normalizační institut, 2012

8.3 Zdroje z internetu

- [4] *Klasifikace a charakteristika svahových pohybů* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/svafef/Text/2_klasifikace.htm
- [5] *Svahové pohyby, sesuvy* [online]. VUT [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/mech_hornin/mhig_8.pdf
- [6] *Litosféra -Exogenní - vnější krajínotvorné procesy* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: http://galerie.gymjil.cz/zahradnik/litosfera/exogenni_vnejsi_krajínotvorne_proc esy.htm
- [7] *Vsetín*. *Wikipedie.cz* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vset%C3%ADn>
- [8] *Letecká mapa*. *Mapy.cz* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <https://mapy.cz/letecka?x=17.9962841&y=49.3403277&z=17&source=muni&id=475&q=vset%C3%ADn>
- [9] *Geologie vsetínské oblasti* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/85869>
- [10] *Vnější Západní Karpaty* [online]. VŠB [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/reg_geol_cr/10_kapitola.htm

- [11] *NAVRÁTILOVÁ, M. Život kolem řeky. Bakalářská práce [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/265207/pedf_b/Bakalarska_prace.pdf*
- [12] *ČERNÝ, R. Posouzení ulice Palackého ve Vsetíně a pravobřežního svahu řeky Bečvy. Diplomová práce [online]. VŠB [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/111150>*
- [13] *Inženýrská geologie. Svahové nestability [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/mapy/mapy-online/mapove-aplikace>*
- [14] *Archiv pro Štítek: Hydrologie [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://moravske-karpaty.cz/tag/hydrologie/>*
- [15] *KOLEK, J. Posouzení stability svahu a návrh sanace sesuvu v lokalitě Vsetín – Šibeňák. Diplomová práce [online]. VŠB [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/106492>*
- [16] *Oblast povodí Moravy [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: http://www.pmo.cz/pop/2009/Morava/End/a-popis/mapy/ma_1_4.jpg*
- [17] *Metoda konečných prvků – úvod. Vyučková prezentace [online]. VŠB [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/1-Uvod.pdf>*
- [18] *Metoda konečných prvků. Wikipedie.cz [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF*
- [19] *Stabilita svahů. Vyučkový text [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: [http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20\(semester%201%20-%2010\)%20-%20-4-semester/BF02%20-%20Mechanika%20zemin/Ucebni_texty/10-Stabilita-svahu.pdf](http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20(semester%201%20-%2010)%20-%20-4-semester/BF02%20-%20Mechanika%20zemin/Ucebni_texty/10-Stabilita-svahu.pdf)*
- [20] *NOVÁK, M. Způsoby hlubinného založení. Bakalářská práce [online]. VUT [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55894*
- [21] *Mechanizace [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.geostav.cz/mechanizace/>*
- [22] *Zakládání staveb. Horninové kotvy [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.zakladani.cz/cz/horninove-kotvy>*
- [23] *Alternativní možnosti matematického modelování stability svahů sanovaných hřebíkováním [online]. VŠB [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/science/seminar2007/pics/09.pdf>*

- [24] *Zemní hřebíky* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.aarsleff.cz/nabdka/technologie/kotwy-gruntowed/gwozdzie-gruntowe/>
- [25] *Mikropiloty a kotvení* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.abastako.cz/631/mikropiloty-a-zemni-kotvy-/>
- [26] *Odvodnění svahu. Výukový text* [online]. VŠB [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/svadef/Text/8_sanace.htm
- [27] *Monitoring zeminových svahů. Výukový text* [online]. VŠB [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/hrubesova/mon17.htm#_17.1_Monitoring_p?etvá?ení
- [28] *Development and testing of an integrative 3D early warning system for alpine instable slopes* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/253261772_fig3_Figure-3-Possible-installation-setups-for-a-TDR-coaxial-cable-into-a-borehole-with-and
- [29] *Dilatometr* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.geokon.com/4420>
- [30] *Inklinometr* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.geokon.com/GK-604D>
- [31] *Piezometer installation* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <https://www.stuartwells.co.uk/geotechnical/piezometers.php>
- [32] *Piezometr* [online]. [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.geokon.com/4500AR>

9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry zemin v zájmovém území pro podloží s vrstvami jílovce. [1].....	25
Tabulka 2: Parametry zemin v zájmovém území pro podloží s vrstvami pískovce. [1]	26
Tabulka 3: Parametry konstrukčních prvků v zájmovém území. [2]	26
Tabulka 4: Parametry ocelových trnů v cementové zálivce v nábrežní zdi. [3]	28
Tabulka 5: Parametry mikropilot. [2].....	34
Tabulka 6: Návrh parametrů zemin pro hřebíkování svahu. [3]	37
Tabulka 7: Návrh parametrů zemin pro hřebíkování svahu. [3]	37
Tabulka 8: Stupně stability dle stabilizačních opatření a fáze výpočtu pro podloží s jílovcem.	41
Tabulka 9: Stupně stability dle stabilizačních opatření a fáze výpočtu pro podloží s pískovcem.	41
Tabulka 11: Nejvyšší dosažené stupně stability jednotlivých stabilizačních opatření dle podloží.....	47

10. Seznam obrázků

Obrázek 1: Svahové pohyby – ploužení, tečení, sesouvání a řízení [6].....	11
Obrázek 2: Lokalizace města Vsetín [8]	12
Obrázek 3: Letecký snímek zájmové lokality v obci Vsetín [8]	13
Obrázek 4: Aktivní a pasivní sesuvy v okolí obce Vsetín. [13].....	15
Obrázek 5: Aktivní a pasivní sesuvy v zájmové oblasti. [13].....	15
Obrázek 6: Hydrogeologické poměry v oblasti povodí Moravy [16]	17
Obrázek 7: Zájmové území.	18
Obrázek 8: Trhlina na objektu nacházející se v koruně svahu.	19
Obrázek 9: Trhliny na objektu.	19
Obrázek 10: Trhliny na pozemní komunikaci.....	20
Obrázek 11: Pohled ze svahu dolů.	21
Obrázek 12: Opěrná zeď pod parkovištěm.....	22
Obrázek 13: Mapa vrtné prozkoumanosti ve sledované lokalitě. [13].....	23
Obrázek 14: Výpis geologické dokumentace archivního vrtu S-1 (zdroj: ČGS).....	24
Obrázek 15: Aplikace plošného zatížení od objektu.	27
Obrázek 16: Aplikace kotev v nábrežní zdi.	27
Obrázek 17: Řez nábrežní zdi s kotevním systémem a jeho popisem. [12].....	28
Obrázek 18: Průběh hladiny podzemní vody ve svahu.	28
Obrázek 19: Výpočetní kroky modelu.	29
Obrázek 20: Iniciační fáze – svah bez aktivování zatížení od budovy a kotev nábrežní zdi. ..	29
Obrázek 21: 1. fáze – aktivování zatížení a kotev nábrežní zdi.	29
Obrázek 22: Smyková plocha pro podloží s jílovcem.....	30
Obrázek 23: Smyková plocha pro podloží s pískovcem.	31
Obrázek 24: Postup výstavby mikropiloty vrtáním. [20].....	33
Obrázek 25: Aplikace mikropilot do řezu svahu.....	33
Obrázek 26: Návrh výpočetních kroků pro stabilizaci mikropilotami.	34
Obrázek 27: Možnosti osazování hřebíků do svahu – vodorovně nebo pod mírným úhlem. [22]	35
Obrázek 28: Zavedení hřebíku s injektáží do zemního tělesa. [25]	36
Obrázek 29: Aplikace hřebíkování do řezu svahu.	36
Obrázek 30: Změna hladiny podzemní vody vlivem drenážní úpravy.	39
Obrázek 31: Aplikace všech stabilizačních opatření do modelu.....	39

Obrázek 32: Dilatometr. [29]	43
Obrázek 33: Inklinometr. [30].....	43
Obrázek 34: Schéma inklinometrického měření ve vrtu. [28]	44
Obrázek 35: Instalační schéma uzavřeného piezometru. [31].....	45
Obrázek 36: Strunový piezometr firmy Geokon. [32]	46

11. Seznam vzorců

- Vzorec (1) Obsah mikropiloty
- Vzorec (2) Modul pružnosti mikropiloty
- Vzorec (3) Výpočet normálové tuhosti
- Vzorec (4) Výpočet ohybové tuhosti
- Vzorec (5) Výpočet součinu objemové tíhy a plochy prvku na metr
- Vzorec (6) Celková soudržnost nové zeminy
- Vzorec (7) Nová soudržnost zeminy