

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

VYHODNOCENÍ ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠEK TRVALÝCH HORNINOVÝCH KOTEV OSAZENÝCH OPTOVLÁKNOVÝMI SNÍMAČI

EVALUATION OF LOAD TESTS OF PERMANENT GROUND ANCHORS INSTRUMENTED WITH OPTICAL FIBRES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Chylík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav geotechniky
Student: **Zdeněk Chylík**
Vedoucí práce: **Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vyhodnocení zatěžovacích zkoušek trvalých horninových kotev osazených optovláknovými snímači

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem bakalářské práce je vyhodnocení dvou zatěžovacích zkoušek trvalých horninových kotev zhotovených ve skalních horninách. Vyhodnocení je rozčleněno do dvou částí. V první části bude vyhodnocen standardní monitoring síly a posunů v hlavě kotev. Dále zde bude stanovena výpočtová volná délka táhla. Druhá část je zaměřena na vyhodnocení měření poměrných přetvoření z optických vláken. Profil poměrné přetvoření - hloubka bude převeden na profil osová síla - hloubka a následně na profil tření - hloubka. Primárním cílem druhé části práce je stanovení maximální hodnoty a průběhu tření ve volné délce táhla kotev.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je vyhodnocení dvou zatěžovacích zkoušek trvalých horninových kotev instrumentovaných standardním monitoringem posunu a síly v hlavách kotev a dále osazených optovláknovými snímači pro kontinuální měření poměrného přetvoření. Pozornost bude věnována vyhodnocení tření ve volných délkách táhel kotev.

Seznam doporučené literatury a podklady:

- RAČANSKÝ, V.; LIENHART, W.; MONSBERGER, C.M.; WOSCHITZ, H.; CHALMOVSKÝ J. Monitoring chování zemní lanové kotvy pomocí optických vláken. 44. Konference Zakládání staveb Brno, 2016.
- FABRIS, C.; SCHWEIGER, H.F.; WOSCHITZ, H.; RAČANSKÝ, V. Pull-out behaviour of two post-grouted anchors: fibre-optic strain measurements and numerical simulations. Proceedings of the XVII Europ.Conf. on Soil Mechanics and Geotechn.Eng.(ECSMGE-2019), Reykjavik, 2019.

- FABRIS, C.; SCHWEIGER, H.F.; PULKO, B.; WOSCHITZ, H.; RAČANSKÝ, V. Numerical Simulation of a Ground Anchor Pullout Test Monitored with Fiber-Optic Sensors. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 147(2), 2021.

- Výstupy z provádění horninových kotev.

- Výstupy geotechnického monitoringu zatěžovacích zkoušek.

- IGP předmětné lokality.

Další podklady budou předány v průběhu řešení diplomové práce.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 28. 11. 2022

L. S.

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Práce se zaměřuje na vyhodnocení zatěžovacích zkoušek trvalých horninových kotev, které jsou osazeny optovláknovými snímači. Celkem je práce rozdělena na šest částí.

V první části je představeno téma a postup prací. Druhá část obsahuje veškeré informace ohledně zkoumaných kotev, oblasti, postupu zatěžování a metodiky měření. Ve třetí části je vyhodnocení výpočtové volné délky a její porovnání s oběma metodami měření. Čtvrtá část je zaměřena na vyhodnocení plášťového tření ve volné délce táhla. Pátá část popisuje chování oblasti na styku volné délky táhla s kořenovou délkou. V šesté části je uvedeno celkové zhodnocení výsledků a náměty pro možná pokračování v problematice.

KLÍČOVÁ SLOVA

trvalá horninová kotva, volná délka táhla, kořenová délka táhla, injektáž, zatěžovací zkouška, prodloužení, optický snímač, měření, výpočtová volná délka, tření, separace

ABSTRACT

The thesis focuses on evaluation of load tests of permanent ground anchors instrumented with optical fibres. The thesis is divided into six parts.

The first part introduces topic of the thesis and work procedure. The second part contains all the information about the tested ground anchors, the building site, the loading scheme and methods of measuring. In the third part is evaluation of the apparent tendon free length and comparison of measurement methods. Fourth part includes evaluation of sheat friction in the free length. The fifth part describes the behaviour of the part, where free length changes to bond length. The sixth section presents an overall results with suggestions for possible continuation.

KEYWORDS

Permanent ground anchor, free tendon length, bond length, grout, loading test, extension, optic fibre, monitoring, apparent free length, friction, debonding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHYLÍK, Zdeněk. Vyhodnocení zatěžovacích zkoušek trvalých horninových kotev osazených optovláknovými snímači [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/150564>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vyhodnocení zatěžovacích zkoušek trvalých horninových kotev osazených optovláknovými snímači* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2023

Zdeněk Chylík

autor

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing. Juraji Chalmovskému, Ph.D. za zprostředkování zajímavého tématu, za hodnotné rady a připomínky, kterými mě vedl během řešení dané práce. V neposlední řadě také děkuji rodině, partnerce a přátelům za neustálou podporu a motivaci během mého studia.

Obsah

1	Úvod	10
1.1	Postup vyhodnocení.....	11
2	Základní údaje o lokalitě, konstrukci a technologii	11
2.1	Zájmové území.....	11
2.2	Analyzované horninové kotvy	12
2.3	Konstrukce trvalých horninových kotev	13
2.4	Optovláknové snímače	14
2.5	Postup zkoušení vyhodnocovaných kotev	16
3	Výpočtová volná délka	18
3.1	Výpočtová volná délka – standardní měření	18
3.2	Výpočtová volná délka – měření optickými snímači	20
3.3	Posuny podle standardního měření a podle optických snímačů.....	23
4	Tření ve volné délce táhla	26
4.1	Problémy s oscilací dat.....	28
4.2	Tření při napínání.....	29
4.3	Zobrazení tření.....	29
4.3.1	Tření - kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m.....	30
4.3.2	Tření – kotva #52, t_1 ; $l_i = 2$ m	31
4.3.3	Tření – kotva #52, t_1 ; $l_i = 4$ m.....	32
4.4	Srovnání tření na pramencích	33
4.5	Zhodnocení tření ve volné délce táhla	34
5	Analýza přechodu volná – kotevní délka táhla	37
5.1	Prokluz mezi jednotlivými částmi vyhodnocovaných kotev	37
5.2	Separáčnické délky, kotva #52.....	39
5.3	Separáčnické délky, kotva #36.....	41
5.4	Chování vnější injektáže u hlavy kotev.....	43
6	Závěr	44

Seznam obrázků.....	46
Seznam tabulek.....	46
Seznam grafů	47
Použité symboly	47
Seznam příloh.....	49

1 Úvod

Horninové kotvy jsou jedním z nejčastěji používaných prvků pro zajištění svahů nebo pažících konstrukcí. Jejich návrhem, výrobou a prováděním se zabírají specializované společnosti. Návrhové přístupy však vycházejí ze zjednodušených teorií a pro jejich optimalizaci je potřeba vynaložit nemalé úsilí a finanční prostředky. Zjištění informací o skutečném chování kotev v zemině je velmi náročné kvůli samotnému umístění.

Momentálně pro posouzení správného chování kotev postačují zatěžovací zkoušky, které jsou založené na tahovém namáhání táhla kotvy a následném vyhodnocování osového přetvoření v závislosti na čase a silovém působení. Posun táhla bývá měřen jako výsun napínacího lisu například pomocí potenciometru. Postupem času a technologickým rozvojem vznikly metody, jak kotvy a jejich přetvoření sledovat po celé délce kupříkladu pomocí odporových tenzometrů. V současnosti je možné kotvu vystrojit optickými snímači o průměru několika milimetrů a díky nim sledovat přetvoření po částech v řádech milimetrů až centimetrů.

Téma této práce bylo získáno díky spolupráci Ústavu geotechniky, Fakulty stavební VUT v Brně se společností KELLER špeciálne zakladanie, spol. s.r.o. Tato společnost je slovenskou pobočkou jednoho z největších evropských podniků, který se orientuje na speciální zakládání a pro zlepšení a optimalizaci své práce propojuje své realizované projekty s vědeckým výzkumem. Na projektu zároveň spolupracovali pracovníci z technologické univerzity v Grazu, kteří obstarávali měření optovláknovými snímači.

Cílem práce je vyhodnotit zatěžovací zkoušky trvalých horninových kotev, které jsou osazeny optovláknovými snímači. Bude provedeno porovnání klasického měření s měřením optovláknovými snímači. Také se bude usilovat o vytvoření nápadů na zlepšení objevených problémů a podat náměty na možná pokračování v tématu.

1.1 Postup vyhodnocení

1. Nejdříve byly stanoveny výpočtové volné délky pomocí záznamu standardního monitoringu. Následně se zpracovaly data z optovláknových snímačů, která naměřil výzkumný tým z TU Graz a z nich se vyhodnotila výpočtová volná délka. Tento krok byl ukončen finálním srovnáním výsledků výpočtových volných délek a hodnot absolutního prodloužení táhel.
2. Druhý krok byl zaměřen na vyhodnocení a názorné zobrazení tření ve volných délkách táhel. Tření bylo stanoveno pouze pro zatěžovací kroky.
3. Posledním krokem vyhodnocení kotev byla analýza chování přechodových oblastí, kdy volné délky přechází v kořenové délky táhel a charakterizovat vztahy mezi jednotlivými částmi kotvy.

2 Základní údaje o lokalitě, konstrukci a technologii

2.1 Zájmové území

Kotvy, kterých se vyhodnocení týká, jsou součástí komplexního zajištění skalního masivu v podhradí Bratislavského hradu. Staveniště se nachází na Dvořákově nábřeží, kde se v daleké minulosti rozprostírala osada Vydrica. Nyní se zde buduje stejnojmenný developerský projekt, díky kterému v dané lokalitě vznikne několik bytových a administrativních budov.

Zajišťovaný svah je částí Bratislavského masívu, který je tvořen drobnozrnnými, biotitickými a muskoviticko-biotitickými granodiority. Masív byl utvářen v prvohorách a spadá do regionu Malé Karpaty [1].

Obavy ohledně celkové stability a únosnosti horninového masivu vedou investora ke zřízení monitorovacího systému, který se skládá z inklinometrů a geodetické totální stanice, zaznamenávající posuny v kotevních podporách. Optická vlákna sledující chování kotev zde byla pořízena jako doplněk k již zmíněným způsobům monitoringu a umožní provádět měření přetvoření kotev i v budoucnu [2]. Pro případ dalšího zajištění svahu je uvažováno s možným přidáním kotev do předpřipravených otvorů v kotevních podporách.



Obr. 2-1 Staveniště v Bratislavě s vyznačenou polohou řešených kotev [2]

2.2 Analyzované horninové kotvy

Pro zajištění svahu byly použity trvalé pramencové kotvy, kterých je zde více než 150 kusů v celkových délkách 40–70 m. Jejich značení v této práci je identické se značením kotev ve stavební dokumentaci. Kotvy nesou označení #52 a #36. Táhla obou kotev jsou tvořena 19 pramenci. Průřezová plocha jednoho pramence je 150 mm^2 . Pevnost oceli je 1860 MPa. Sklon kotvy #52 je 25° a kotvy #36 je 15° . Délka kořene je u obou kotev 20 m a volná délka táhel je 30 m, čili obě kotvy jsou dlouhé 50 m a jsou uloženy ve vrtech o průměru 200 mm [2].

Tabulka 2-1 Charakteristiky vyhodnocovaných kotev

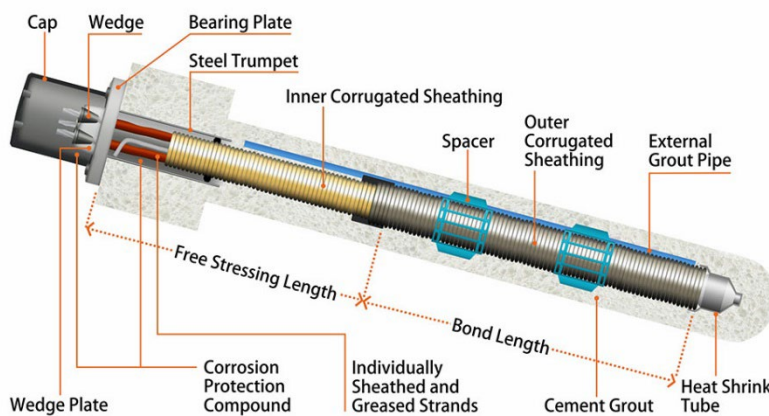
Značení kotvy	Počet pramenců - n [ks]	Průřezová plocha pramence - A_p [mm^2]	Modul pružnosti - E [GPa]	Pevnost oceli - f_{tk} [MPa]	Zkušební síla - P_p [kN]	Kotevní síla - P_o [kN]	Předtížení - $P_{10\%}$ [kN]	Úhel - α [$^\circ$]	Průměr vrtu - d [mm]	Délka vrtu - L [m]	Volná délka - l_{rf} [m]	Délka kořene - l_{tb} [m]
#52	19	150	195	1860	4200	3000	420	25	200	50	30	20
#36	19	150	195	1860	4200	3000	420	15	200	50	30	20

2.3 Konstrukce trvalých horninových kotev

Trvalé kotvy se od dočasných odlišují dvojitou antikorozní ochranou, která zaručuje jejich životnost delší než 2 roky. Kvalitní antikorozní ochranou se zajišťuje bezproblémová funkčnost kotvy po celou dobu životnosti kotvené konstrukce [3]. V případě tohoto projektu jde o bezpečné zajištění skalního masivu na dobu užívání nově vzniklých budov.

Kořenová část i volná délka táhla jsou navlečeny ve vrubované polyethylenové trubici. Ve volné délce jsou jednotlivé pramence namazány tukem a následně povlečeny flexibilním povlakový pláštěm. Obalení jednotlivých pramenců se zřizuje proto, aby bylo umožněno prodloužení táhla ve volné délce a došlo k přenesení síly do kořenové délky táhla. Pramence se natírají tukem, aby byly eliminovány ztráty třením mezi pramenci a povlakovým pláštěm při napínání kotev. Společně s jednotlivými pramenci je vnitřkem PE vrubované trubice vedena hadička pro vnitřní injektáž. V kořenové délce táhla nejsou pramence chráněny flexibilním opláštěním a ani pomazány tukem. Jsou odmaštěny a přímo vyvedeny do vnitřní injektáže. Pro správné umístění pramenců v kořenové části se používají distanční prvky umístěné v rozmezí 1-3 metry podle dimenze kotvy. Je důležité, aby v kořenové délce došlo ke spojení injektáže s pramenci. Vně PE trubice je vedena hadička pro vnější injektáž. Následně se zde také nachází centralizační prvky, které zajišťují rovnoměrné krytí kotvy vnější injektáží [3]. Přenos síly u trvalé horninové kotvy probíhá v kořenové části nejprve na rozhraní táhlo – vnitřní injektáž, následně na rozhraní vnitřní injektáž – vnější injektáž přes PE trubici a naposledy je rozhraní vnější injektáž – okolní horninové prostředí.

Permanent Strand Anchor



- Strand Anchor — pramencová kotva
- Wedge — kuželík
- Wedge plate — kotevní objímka
- Cap — víko
- Bearing plate — kotevní deska
- Steel Trumpet — ocelová průchodka
- Spacer — distančník
- Corrugated sheathing — vrubovaná trubka
- Cement grout — cementová injektáž
- External grout pipe — vnější injektážní trubice
- Free stressing length — volná délka táhla
- Bond length — kořenová délka

Obr. 2-2 Schéma trvalé horninové kotvy [9]

Kotevní hlavy jsou u trvalých kotev chráněny ocelovým nebo plastovým krytem [3]. V případě řešených kotev to jsou ocelová víka, která mají upravený povrch žárovým pozinkováním. Prostor pod víkem je vyplněn antikoročním tukem, kterému se mění vlastnosti s teplotou a to tak, že s klesající teplotou tuhne. Víko je odnímatelné, aby bylo možné hlavu kotvy zkontrolovat. Vyhodnocované kotvy jsou vybaveny siloměry, které zaznamenávají tlak, který je vyvozen přítláčnou silou táhla a tím lze měřit aktuální síly v kotvě. Siloměr má podobu prstence pod kotevní deskou.



Obr. 2-4 Detail kotevní hlavy se siloměrem (modrý prstenec),
foto: autor



Obr. 2-3 Průchodová trubice s kotevní deskou a víko,
foto: autor

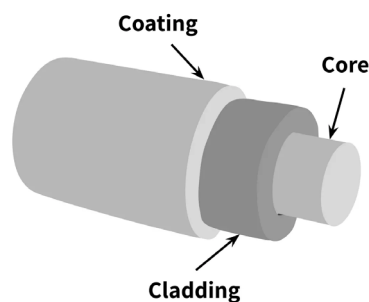


Obr. 2-5 Víka trvalých kotev, kotva vpravo
vybavena siloměrem, foto: autor

2.4 Optovláknové snímače

Optovláknové neboli optické snímače sledující chování kotev zde byly zřízeny jako doplněk ke standardnímu způsobu monitoringu pomocí inklinometrů a totální stanice [2]. Hlavním přínosem optických snímačů je měření deformací kontinuálně po celé délce kotvy. Snímače je možné umístit do injektáže nebo přímo spojit s ocelovými pramenci. Při použití vícero snímačů je možné získat komplexní informace o chování kotvy jako celku.

Optická vlákna, která jsou součástí snímačů se skládají ze 3 hlavních částí: skleněného jádra („core“), reflexního skla („cladding“) a ochranného pláště („coating“), viz Obr. 2-5. Skleněné jádro slouží k proudění světelného paprsku. Reflexní vrstva zajišťuje průchod světelného paprsku při zakřivení vlákna. Aby byl zajištěn dokonalý odraz, je potřeba, aby materiál jádra byl z opticky hustšího materiálu a reflexní vrstva musí být z materiálu opticky řidšího. Vlákna mohou být z oxidů křemene, skla, či plastu. Materiál se volí podle způsobu využití tak, aby odolal případné deformaci. Ochranný plášť zabraňuje poškození jádra a může být vyhotoven z vícero vrstev. Nejčastěji je vyroben z polymerů. Pro náročnější prostředí to pak bývají HDPE (vysokopevnostní polyethyleny), PA (polyamidy) nebo i kovy [4].



Obr. 2-6 Skladba optického vlákna [5]

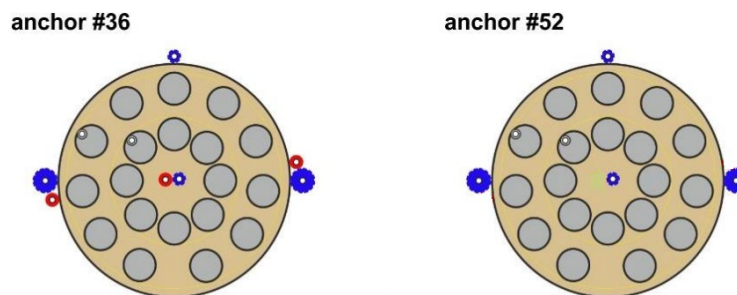
Princip měření deformací pomocí optických snímačů lze zjednodušeně popsat takto. Jádro kabelu je jako skleněný válec, ve kterém jsou za sebou průhledné mřížky ve svislé pozici, které na sobě mají určitý vzor. Každý vzor zaručuje, že světlo o určité vlnové délce se zde rozdělí na 2 paprsky, kdy jeden paprsek pokračuje v původním směru a druhý se odrazí a vrací se zpět. Následně je vyhodnocovací software schopen na změně času průchodu světla určit, jak se změnila poloha jednotlivých mřížek. Optická vlákna jsou velmi citlivá na teplotní změny, proto je při měření deformací vhodné doplnit měření snímači teploty. Měření optickými snímači je nezávislé na elektrické energii, díky tomu nám elektromagnetická pole či jiné negativní vlivy nezkreslí výsledky, což lze označit za jednu z hlavních výhod tohoto druhu měření [5] [6] [7].

Jak je již zmíněno, měření optickými snímači zajišťovali pracovníci TU Graz a popis technologie zde má informativní charakter.

Rozmístění snímačů v řešených kotvách je následující. Kotva #36 byla vystrojena 5 optickými snímači pro měření deformací a jedním snímačem pro

měření teploty. Snímače pro deformaci měly různou geometrii v závislosti na prostředí, ve kterém byly využity. Pro měření na pramencích byly využity 2 optické snímače se skleněnými vlákny a kovovým pláštěm. Měření deformace ve vnitřní a vnější injektáži zajišťují stejné snímače s plastovým pláštěm. Tyto 4 snímače sloužily ke krátkodobému měření. Pro dlouhodobá měření bude využit poslední, pátý, snímač. Pátý snímač je masivnějšího průřezu, aby byla zaručena jeho životnost, jelikož je určen pro dlouhodobé opakované měření a měření pro tuto práci na něm nebylo provedeno. Snímač pro dlouhodobá měření je zapojen do smyčky, proto je na Obr. 2-6 zobrazen 2x u každého průřezu.

Kotva #52 byla vystrojena identicky, s výjimkou teplotních snímačů, neboť se předpokládá, že vedení tepla v masivu bude pro obě kotvy podobné a bude možnost použít teplotní hodnoty z kotvy #36 [2].

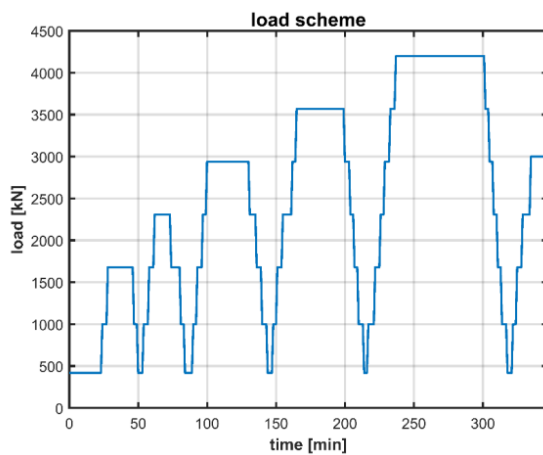


Obr. 2-7 Schématické příčné řezy kotvami se znázorněním snímačů [2]

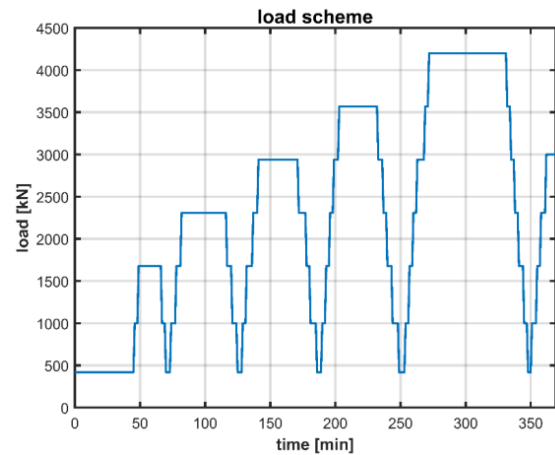
2.5 Postup zkoušení vyhodnocovaných kotev

Zkoušení kotvy #52 bylo provedeno dne 03.06.2021, o den později byla provedena zkouška kotvy #36. Pro napínání obou kotev byl použit napínací lis TENSA 4800 kN (Obr. 2.10), a to v kombinaci s olejovým čerpadlem s ručním ovládáním (Obr. 2-11). Po usazení lisu byly kotvy předtíženy silou 420 kN, což odpovídá 10 % zkušební síly. Následně bylo provedeno nulové čtení přetvoření na snímačích. Jednalo se o ověřovací zkoušky a jejich průběhy jsou zobrazeny na Obr. 2-8 a 2-9. Tyto postupy se mírně lišily od standardního provedení, a to tím, že intervaly mezi jednotlivými kroky byly mírně prodlouženy. Prodloužení intervalů bylo rozhodnuto na základě předpokladů, že delší prodleva přispěje k ustálení snímačů a data budou přesnější. Po provedení posledního odtížení byla kotva dopnuta na kotevní sílu 3000 kN [2].

Při provádění zkoušek bylo provedeno standardní měření posunů hlavy lisu pomocí potenciometru. Souběžně s tím tým pracovníků z TU Graz prováděl měření optickými snímači. Naměřené hodnoty byly zaslány jako soubory .xlsx. Tyto soubory obsahovaly hodnoty poměrného přetvoření, rozdělené v jednotlivých sloupcích po zatěžovacích cyklech, vztažených vždy k určité hloubce kotvy. Data byla naměřena ze snímačů pro krátkodobý monitoring, tedy 2 snímače na pramencích, 1 ve vnitřní injektáži, 1 ve vnější injektáži. Zobrazení všech naměřených dat se nachází v Příloze A.



Obr. 2-8 Schéma zatěžovací zkoušky, kotva #52, [2]



Obr. 2-9 Schéma zatěžovací zkoušky, kotva #36, [2]



Obr. 2-11 Olejové čerpadlo s ručním ovládním, foto: autor



Obr. 2-10 Hydraulický lis Tensa 4800 kN, foto: autor

3 Výpočtová volná délka

Výpočtová volná délka L_{app} je parametr, který udává polohu fiktivního bodu, kterým se přenáší síla do okolního prostředí. Tento bod vymezuje počátek kotevní délky táhla [3].

Vztah pro stanovení výpočtové volné délky [3]:

$$L_{app} = \frac{(A_t \cdot E_t \cdot \Delta s_{el})}{\Delta P} \quad (3-1)$$

A_t — průřezová plocha táhla

E_t — je modul pružnosti táhla

Δs_{el} — je elastické prodloužení táhla

ΔP — je zkušební síla po odečtu předpínací síly

Horní hranice výpočtové volné délky je dána vztahem (3-2) nebo (3-3), kdy rozhoduje větší hodnota [3]:

$$L_{app} \leq l_{tf} + l_e + 0,5 \cdot l_{tb} \quad (3-2)$$

Nebo

$$L_{app} \leq 1,1 \cdot l_{tf} + l_e \quad (3-3)$$

l_{tf} — volná délka

l_e — manipulační délka táhla

l_{tb} — kořenová délka táhla

Vztah pro stanovení dolní hranice výpočtové volné délky [3]:

$$L_{app} \geq 0,8 \cdot l_{tf} + l_e \quad (3-4)$$

l_{tf} — volná délka

l_e — manipulační délka táhla

3.1 Výpočtová volná délka – standardní měření

Pro určení L_{app} byly použity hodnoty posunů z protokolu standardního měření. Tyto posuny jsou obsaženy v tabulkách 3-8 a 3-9. Výpočet je proveden pro

každý zatěžovací stupeň na obou kotvách. Jako vstupní hodnoty byly brány posuny vždy po nejdelším časovém intervalu. Pro zatěžovací stupeň $P/P_p = 40\%$ kotvy #52, zde bude uveden podrobný výpočet. Ostatních výsledků bylo docíleno identickým výpočtem.

Výpočet $L_{app, \#52, t 1, P/P_p=40\%}$:

Tabulka 3-1 Vstupní hodnoty pro výpočet $L_{app, \#52, t 1, P/P_p=40\%}$

Vstupní hodnoty	
s [mm]	72,30
s_p [mm]	11,54
A_t [mm ²]	2850
E_t [GPa]	195
P_p [kN]	1680
$P_{10\%}$ [kN]	420

$$L_{app} = \frac{(A_t \cdot E_t \cdot \Delta s_{el})}{\Delta P} = \frac{(2850 \cdot 10^{-6} \cdot 195 \cdot 10^6 \cdot (72,30 - 11,54) \cdot 10^{-3})}{(1680 - 420)} = 26,80 \text{ m}$$

$$L_{app} \leq l_{tf} + l_e + 0,5 \cdot l_{tb} = 30 + 1,55 + 0,5 \cdot 20 = 41,55 \text{ m} \dots\dots\dots 26,80 \leq 41,55$$

$$L_{app} \geq 0,8 \cdot l_{tf} + l_e = 0,8 \cdot 30 + 1,55 = 25,55 \text{ m} \dots\dots\dots 25,55 \leq 26,80$$

Stanovení výpočtových volných délek pro ostatní zatěžovací stupně proběhlo analogicky jako předešlý výpočet. Jejich výsledky se nachází v tabulce 3-2 a 3-3.

Tabulka 3-2 Výpočtové volné délky, kotva #52, standardní měření

#52	
P/P_p [%]	L_{app} [m]
40	26,800
55	27,167
70	26,085
85	29,174
100	29,265

Tabulka 3-3 Výpočtové volné délky, kotva #36, standardní měření

#36	
P/P _p [%]	L _{app} [m]
40	27,223
55	27,788
70	28,456
85	28,603
100	28,604

Všechny výpočtové délky stanové z dat standardního měření vyhovují okrajovým mezím.

3.2 Výpočtová volná délka – měření optickými snímači

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.5, data z optických snímačů byla v podobě poměrných přetvoření po určitých vzdálenostech. Poměrná přetvoření z pramenců byla získána po 5 mm a přetvoření z obou injektáží byla po 10 mm. Přetvoření je poměr mezi prodloužením a počáteční délkou, na které je přetvoření měřeno (3-5).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3-5)$$

Pro celkový posun je potřeba sečíst jednotlivá prodloužení všech malých celků, na kterých byly deformace měřeny, takový vztah má podobu (3-7). Z naměřených dat jsou známy vzdálenosti, po kterých byla poměrná přetvoření měřena. Počáteční délka je brána vždy jako vzdálenost jednotlivých snímačů (3-6).

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_{0,i}} \Rightarrow \Delta l_i = \varepsilon \cdot l_{0,i} \quad (3-6)$$

Celkový posun na táhle se získá ze vztahu:

$$s_t = \sum_{i=1}^n \Delta l_i \quad (3-7)$$

Celkové součty jednotlivých posunů byly provedeny pro všechny zatěžovací i odtěžovací stupně, vždy pro oba měřené pramence na každé kotvě. Celkový posun na začátku volné délky na pramenci je označen s_t a posun po odtížení je značen s_p . Jelikož data z optických snímačů neobsahovala přetvoření v manipulační délce táhla, byl přičten zvlášť posun s_m , který v manipulační délce vznikl. Tato délka je vymezena od bodu ukotvení v hlavě po konec hydraulického lisu. U hydraulického lisu TENSA 4800 kN se manipulační délka rovná 1,55 m, přičemž není uvažováno s plastickými deformacemi v této délce. Následně byl určen rozdíl Δs_{el} dle (3-8). V posledním kroku byla stanovena výpočtová volná délka pro všechny zatěžovací stupně. Pro zjednodušení se uvažovalo vždy s tím, že naměřené hodnoty jsou vztaženy ke všem pramencům dané kotvy. Všechny vypočítané hodnoty jsou v tabulkách 3-4, 3-5, 3-6, 3-7.

$$\Delta s_{el} = s_t + s_m - s_p \quad (3-8)$$

Tabulka 3-4 Výpočtové volné délky, kotva #52, t_1 ; měření optickými snímači

Kotva #52, t_1								
P/P _p [%]	s_t [mm]	s_m [mm]	s_p [mm]	Δs_{el} [mm]	ΔP [kN]	A_t [mm ²]	E_t [GPa]	L_{app} [m]
40	61,704	3,514	9,088	56,130	1260	2850	195	24,757
55	92,855	5,271	7,281	90,846	1890	2850	195	26,713
70	125,291	7,028	10,164	122,156	2520	2850	195	26,940
85	158,022	8,785	10,223	156,584	3150	2850	195	27,626
100	192,348	10,543	14,371	188,519	3780	2850	195	27,717

Tabulka 3-5 Výpočtové volné délky, kotva #52, t_2 ; měření optickými snímači

Kotva #52, t_2								
P/P _p [%]	s_t [mm]	s_m [mm]	s_p [mm]	Δs_{el} [mm]	ΔP [kN]	A_t [mm ²]	E_t [GPa]	L_{app} [m]
40	61,065	3,514	9,042	55,538	1260	2850	195	24,496
55	92,080	5,271	7,203	90,149	1890	2850	195	26,508
70	124,491	7,028	10,237	121,282	2520	2850	195	26,747
85	157,059	8,785	11,427	154,418	3150	2850	195	27,244
100	191,068	10,543	17,068	184,542	3780	2850	195	27,132

Tabulka 3-6 Výpočtové volné délky, kotva #36, t_1 ; měření optickými snímači

Kotva #36, t_1								
P/P_p [%]	S_t [mm]	S_m [mm]	S_p [mm]	ΔS_{el} [mm]	ΔP [kN]	A_t [mm ²]	E_t [GPa]	L_{app} [m]
40	60,230	3,514	6,834	56,911	1260	2850	195	25,102
55	91,120	5,271	8,147	88,244	1890	2850	195	25,948
70	123,35	7,028	9,652	120,726	2520	2850	195	26,624
85	155,419	8,785	9,352	154,853	3150	2850	195	27,320
100	189,612	10,543	47,173	152,981	3780	2850	195	22,492

Tabulka 3-7 Výpočtové volné délky, kotva #36, t_2 ; měření optickými snímači

Kotva #36, t_2								
P/P_p [%]	S_t [mm]	S_m [mm]	S_p [mm]	ΔS_{el} [mm]	ΔP [kN]	A_t [mm ²]	E_t [GPa]	L_{app} [m]
40	60,434	3,514	7,037	56,911	1260	2850	195	25,102
55	91,381	5,271	8,373	88,279	1890	2850	195	25,958
70	123,512	7,028	9,776	120,765	2520	2850	195	26,633
85	155,394	8,785	9,931	154,248	3150	2850	195	27,214
100	189,345	10,543	46,971	152,916	3780	2850	195	22,482

Naměřená poměrná přetvoření u kotvy #36 po odtížení stupně P/P_p – 100 % ukázala na obou snímačích na pramencích trvalé přetvoření po celé volné délce táhla. Jelikož přetvoření byla řádově větší než u kotvy #52, bylo rozhodnuto o nezahrnutí těchto výsledků při finálním zobrazení v grafu 3-2. Standardním měřením byly u kotvy #36 naměřeny plastické posuny velikostně podobné, jako u kotvy #52. Ovšem u kotvy #52 nebyly stanoveny nijak velké plastické posuny z dat z optických snímačů. Naměřené trvalé prodloužení je zobrazeno v Příloze A, Obr. A-10, A-12.

Naměření těchto trvalých deformací může být způsobeno nejspíše tím, že došlo ke skřípnutí optického vlákna kuželíkem v kotevní objímce na předposledním stupni odtížení [7]. Samozřejmě by neměla být opuštěna teorie, že pramence kotvy #36 zůstaly trvale prodlouženy.

3.3 Posuny podle standardního měření a podle optických snímačů

Posuny naměřené různými metodami jsou zobrazené v tabulce 3-8 a 3-9. Jsou zde uvedeny i absolutní hodnoty rozdílů mezi nimi. Ty jsou v rozmezí od nižších jednotek milimetrů do nižších jednotek centimetrů. Větší rozdíly jsou při zatěžovacích krocích než při odtěžovacích. Největší hodnoty jsou naměřeny standardním měřením, a to jak při zatížení, tak i odtížení.

Tabulka 3-8 Srovnání posunů táhla pro obě metody měření, kotva #52

Kotva #52	P/P _p [%]		40	55	70	85	100	
	Standardní měření			S [mm]	72,30	108,69	147,98	186,59
		S _p [mm]	11,54	16,30	20,63	21,23	23,46	
Optické snímače	Pramenec t ₁	S [mm]	65,22	98,13	132,32	166,81	202,89	
		S _p [mm]	9,09	7,28	10,16	10,22	14,37	
	Pramenec t ₂	S [mm]	64,58	97,35	131,52	165,84	201,61	
		S _p [mm]	9,04	7,20	10,24	11,43	17,07	
Rozdíly	Pramenec t ₁	ΔS [mm]	7,08	10,56	15,66	19,78	19,62	
		ΔS_p [mm]	2,45	9,02	10,47	11,01	9,09	
	Pramenec t ₂	ΔS [mm]	7,72	11,34	16,46	20,75	20,90	
		ΔS_p [mm]	2,50	9,10	10,39	9,80	6,39	

Tabulka 3-9 Srovnání posunů táhla pro obě metody měření, kotva #36

Kotva #36	P/P _p [%]		40	55	70	85	100	
	Standardní měření			S [mm]	72,48	110,14	149,06	187,80
		S _p [mm]	10,76	15,64	20,03	25,68	34,22	
Optické snímače	Pramenec t ₁	S [mm]	63,74	96,39	130,38	164,20	200,15	
		S _p [mm]	6,83	8,15	9,65	9,35	47,17	
	Pramenec t ₂	S [mm]	63,95	96,65	130,54	164,18	199,89	
		S _p [mm]	7,04	8,37	9,78	9,93	46,97	
Rozdíly	Pramenec t ₁	ΔS [mm]	8,74	13,75	18,68	23,60	29,51	
		ΔS_p [mm]	3,93	7,49	10,38	16,33	12,95	
	Pramenec t ₂	ΔS [mm]	8,53	13,49	18,52	23,62	29,77	
		ΔS_p [mm]	3,72	7,27	10,25	15,75	12,75	

Plastické posuny, naměřené optickými snímači na kotvě #36, jsou téměř 3x větší (asi o 3 cm) než u kotvy #52. Mírně větší plastické posuny jsou naměřeny i standardním měřením, ale rozdíl mezi kotvami je asi 1 cm. Je tedy zjevné, že jev je lehce pozorovatelný optickými snímači, ale je těžce rozpoznatelný standardním měřením.

Optické snímače mohly poskytnout nižší hodnoty posunů kvůli možnému zatlačení kotevního bloku do horniny. Podle svědectví obsluhy lisu i stavbyvedoucího jistý pohyb betonových bloků nastal při napínání kotev se samostatnými betonovými bloky. Pokud k posunu bloku dojde, je potřeba napínací lis více vysunout a tím se zvětší posun naměřený potenciometrem. Optické snímače zaznamenávají přetvoření po celé délce kotvy, od konce až po kotevní hlavu, a tím nedojde ke zkreslení naměřených hodnot při případném posunu. Tato skutečnost by mohla v negativním smyslu nadhodnotit výpočtově volné délky táhla vypočítané ze standardního měření.

Při pohledu na vyhodnocení výpočtových délek zobrazených v závislosti posunu na stupni zatížení, viz Graf 3-1 a Graf 3-2, lze prohlásit, že obě metody mají velmi podobný průběh hodnot. Hodnoty posunutí pro horní mez jsou stanoveny dle (3-9), pro dolní mez (3-10), a pro výpočtovou volnou délku podle (3-11).

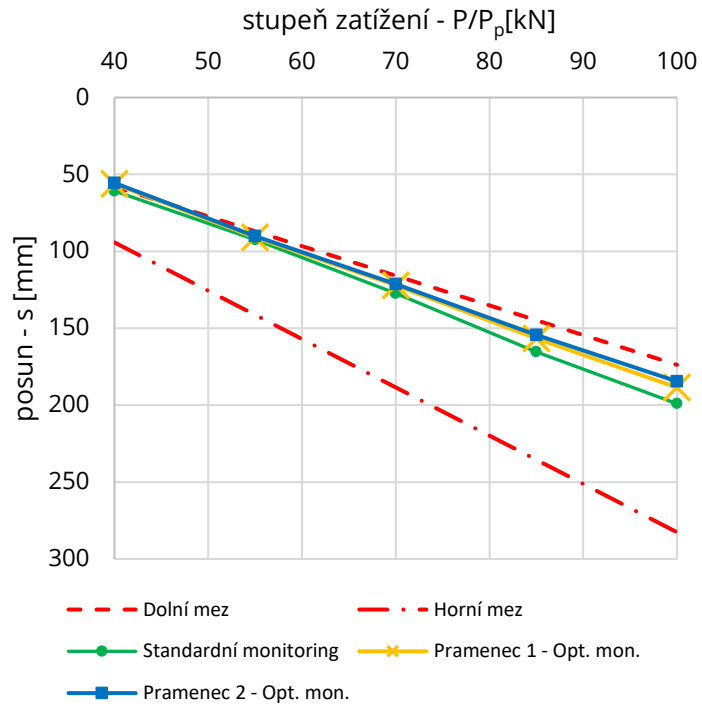
$$A = \frac{\Delta P}{(A_t \cdot E_t)} \cdot (l_{tf} + l_e + 0,5 \cdot l_{tb}) \quad (3-9)$$

$$B = \frac{\Delta P}{(A_t \cdot E_t)} \cdot (0,8 \cdot l_{tf} + l_e) \quad (3-10)$$

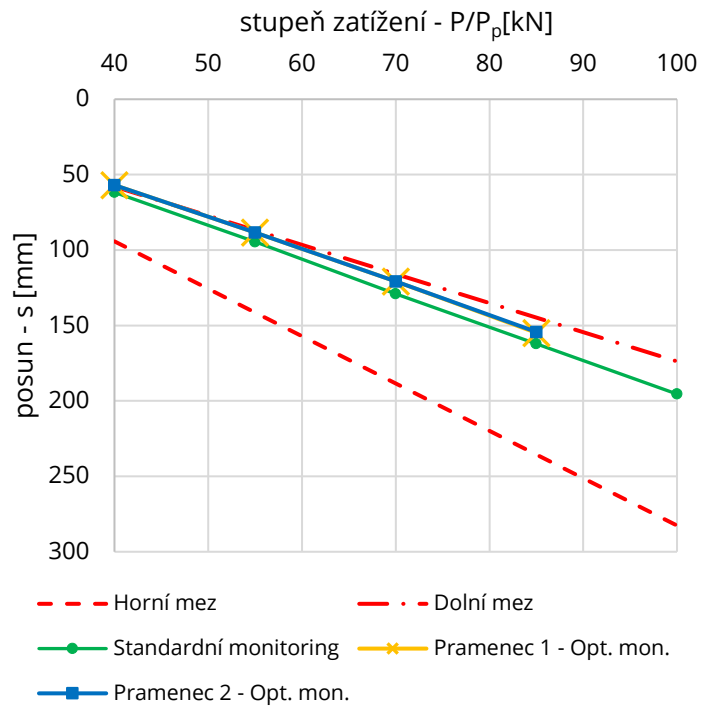
$$s = \frac{\Delta P}{(A_t \cdot E_t)} \cdot (L_{app}) \quad (3-11)$$

Grafy 3-1 a 3-2 ukazují, že na prvním zatěžovacím stupni výpočtová volná délka stanovená podle měření optickými snímači nevyhovuje a přesahuje dolní mez, a to dokonce u obou kotev. S dalšími zatěžovacími stupni přechází L_{app} do oblasti, která je vyhovující. Mírně uspokojující je, že výsledky u obou kotev, měřeny na 2 různých pramencích, jsou téměř identické. Dále L_{app} stanovená z obou metod má podobný průběh, kdy jsou výsledky blíže dolní mezi nežli střední hodnotě.

Na Grafu 3-2 není zobrazena závislost na posledním stupni zatížení kvůli již zmíněnému trvalému přetvoření pramenců.



Graf 3-1 Srovnání metod měření při vyhodnocení výpočtové volné délky, kotva #52

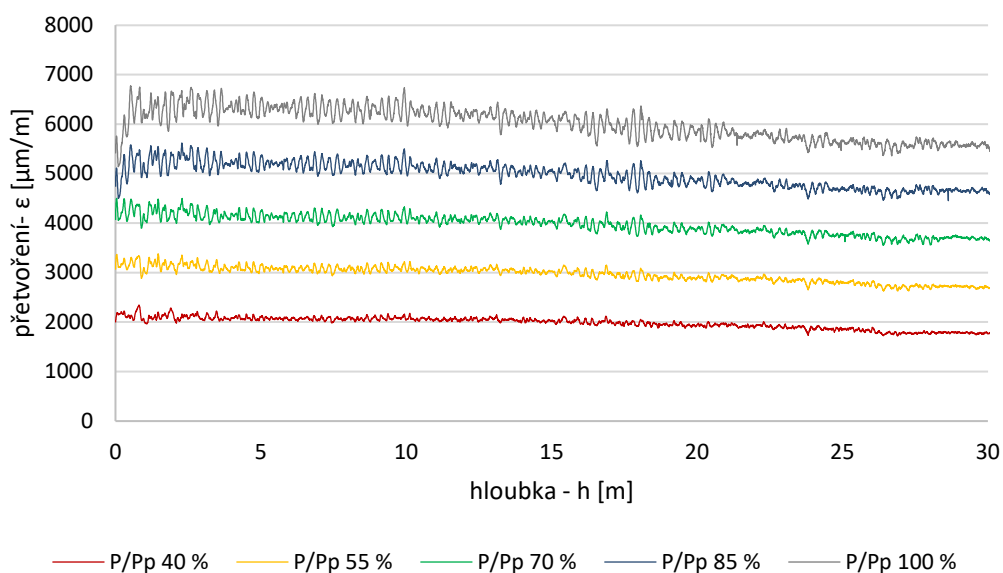


Graf 3-2 Srovnání metod měření při vyhodnocení výpočtové volné délky, kotva #36

4 Tření ve volné délce táhla

Ve volné délce táhla dochází k protažení táhla kotvy díky povlakové ochraně, která zajišťuje oddělení všech pramenců od vnitřní injektáže. Pramence jsou potřeny speciálním tukem, který eliminuje vznikající tření mezi protahujícím se pramencem a plášťovým obalem pramenců. I přes přítomnost tuku dochází ke tření a kvůli tomu dochází k poklesu přenesené síly. Při zobrazení průběhu poměrného přetvoření táhla lze pozorovat mírný pokles přetvoření. Takový pokles je pozorovatelný i v případě řešených kotev. Například zobrazení naměřeného přetvoření u kotvy #52 na měřeném pramenci t_1 (viz Graf 4-1), kde lze pozorovat postupný pokles přetvoření. Ze stejného zobrazení je patrná i oscilace naměřených dat, které bude věnována pozornost později.

Zobrazení průběhu tření po celé volné délce je důležité pro zjištění případných problémů, které by mohly zapříčinit zmenšení únosnosti kotevního systému. Možným problémem dlouhých kotev je zakřivení vrtu, které by způsobovalo nadměrné tření.



Graf 4-1 Přetvoření naměřené optickými snímači ve volné délce, kotva #52, t_1

V rámci práce je vyhodnocováno tření ve volné délce táhla. Tření v této části táhla je bráno jako úbytek síly v pramenci, který je rozprostřen do plochy plášťové ochrany pramence. Jelikož je naměřeno poměrné přetvoření pramence po 5 mm, po aplikaci Hookova zákona lze stanovit sílu v pramenci vždy v místě známého přetvoření. Princip vyhodnocení je následovný. Podle vzorce (4-1) se stanoví napětí dle příslušného přetvoření. Stejně napětí by měla vyvodit síla na odpovídající průřezové ploše pramence dle vzorce (4-2). Při rovnosti obou napětí, viz (4-3), se získá vztah pro stanovení síly v pramenci pro dané poměrné přetvoření na pramenci (4-4). Samozřejmě je nutné při vyhodnocení prvního segmentu odečíst od zkušební síly hodnotu předtížení předtížení, která je rovna 420 kN.

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4-1) \\ \sigma = \frac{F}{A} \quad (4-2) \end{array} \right\} \frac{F}{A} = E \cdot \varepsilon \quad (4-3)$$

Výpočet síly v konkrétním místě se známým přetvořením (4-4):

$$F_i = E \cdot \varepsilon_i \cdot A \quad (4-4)$$

Jak je již zmíněno, tření ve volné délce je bráno jako úbytek síly mezi dvěma měřenými body, proto je nutností vždy určit délkové úseky neboli segmenty, na kterých bude tření vyjádřeno. Poté je tření vyjádřeno jako rozdíl sil na začátku a na konci daného segmentu, rozprostřený do pláště ochranného obalu viz (4-5). Je potřeba, aby síla měla sestupnou tendenci a na konci úseku byla menší než na začátku.

Stanovení tření pro jednotlivý úsek na pramenci (4-5):

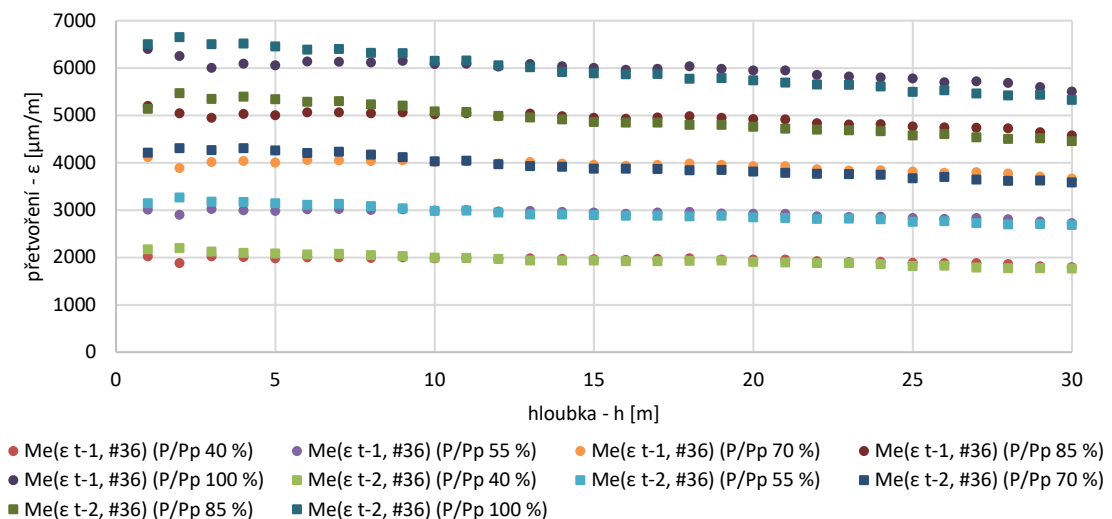
$$\tau_i = \frac{F_{i-1} - F_i}{\pi \cdot l_i \cdot d} \quad (4-5)$$

4.1 Problémy s oscilací dat

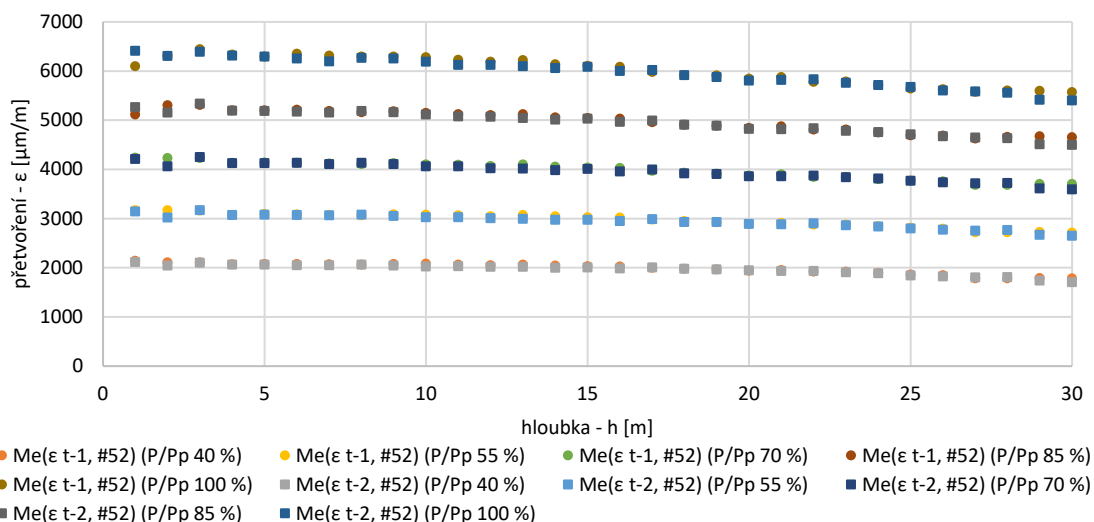
Stanovení sil v pramencích by mohlo být provedeno pro každé naměřené přetvoření. V takovém případě by vznikly úseky dlouhé 5 mm a průběh síly by se dal nazvat kontinuálním a kontinuálně by se dalo tedy vyjádřit i tření. Poměrná přetvoření měřená ve volné délce vykazovala určité oscilace. To spolu s malou vzdáleností měřících bodů vede k oscilacím sil i vypočtených hodnot tření. Pro vyhodnocení, které by dalo reálný průběh tření je nutné určit takové úseky, které by daly rovnoměrně klesající poměrné přetvoření. K tomu byl použit medián, a to pro 3 různé délkové úseky. Tři různě dlouhé úseky jsou určeny pro demonstrování rozdílných výsledků tření.

Medián, který je prostřední aritmetickou hodnotou uspořádaného souboru seřazeného vzestupně, byl zvolen, protože nepodléhá vlivu extrémních hodnot. Nejdříve byl medián pro přetvoření proveden po 2 m. Následně bylo uskutečněno vyhodnocení po polovičním a dvojnásobném intervalu čili po 1 a 4 m. Výsledky tření jsou v práci uvedeny od nejmenšího segmentu po největší.

Po prohlédnutí zobrazení mediánů po 1 m (Graf 4-2) je patrné, že takto dlouhý segment není dostatečně dlouhý, aby medián vyrovnal oscilaci dat. Ze stejného zobrazení je pozorovatelné, že nežádoucí občasný nárůst přetvoření se vyskytuje v každém zatěžovacím stupni minimálně jednou, někdy i vícekrát. Kotva #52 vykazuje podobné chování jako kotva #36, ale nárůst poměrného prodloužení není tak častý (Graf 4-3). Delší segmenty již téměř dostatečně dlouhé jsou.



Graf 4-2 Medián přetvoření po 1 m, kotva #36



Graf 4-3 Medián přetvoření po 1 m, kotva #52

4.2 Tření při napínání

Při napínání kotev dochází k napnutí pramenců. Směr působení síly je ven z vrtu a tření působí proti této síle tedy směrem hlouběji do vrtu. Znaménková konvence je taková, že kladné hodnoty tření označují působení tření proti směru zkoušení. Záporné síly by znamenaly podpůrné síly, které by pomáhaly v napínání lana. Tyto síly nejsou reálné a záporné hodnoty by správně neměly nastat.

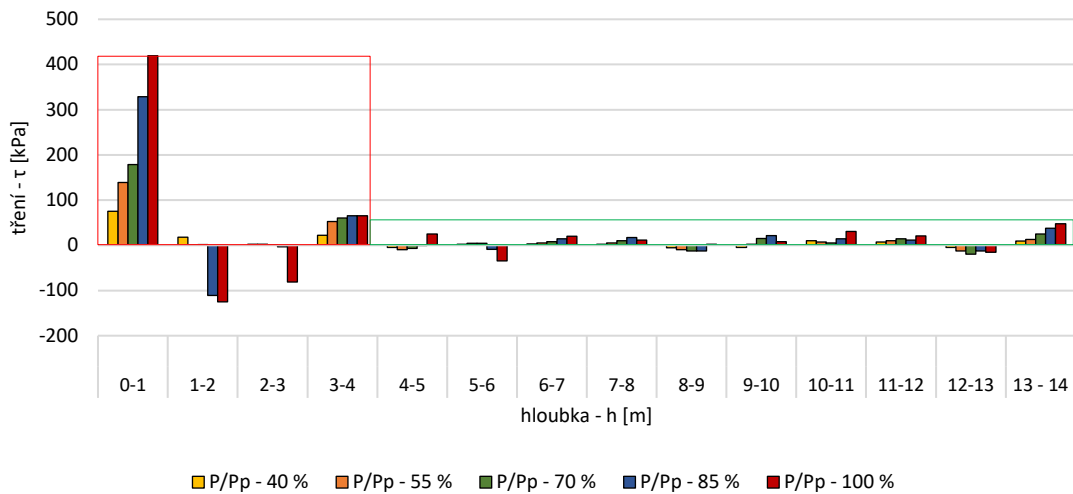
Tření ve volné délce je vždy stanoveno zvlášť pro oba pramence osazené optickými snímači u obou kotev. Uvažuje se, že síla působící na pramenec je přesně 1/19 celkové zkoušecí síly pro aktuální stupeň zatížení. Plocha pramence je 150 mm² a průměr pramence pak 15,7 mm a jeho obvod má zjednodušeně tvar kružnice. Reálně je pramenec tvořen 7 dráty, takže tvar kružnice neodpovídá skutečnosti, ale pro zjednodušení s ním bude uvažováno.

4.3 Zobrazení tření

Z důvodu nemožného vyjádření tření po naměřených vzdálenostech přetvoření, bude tření vyhodnoceno po již zmíněných segmentech, na kterých bude uvažováno konstantní tření po celé jejich délce.

Jelikož na počátku kotvy vzniká velké tření, bude vynechán počáteční úsek volné délky táhla dlouhý 4 m. Podle názoru autora by mohlo být zvýšené tření na začátku kotvy způsobeno tím, že kotevní deska není dokonale kolmá k ose vrtu, a proto dochází k zalomení pramenců a při napínání vzniká extrémní tření. Tření na začátku táhla dosahovalo vždy maximálních hodnot u všech zkoumaných pramenců

a dosahovalo takových hodnot, že tření na zbylých částech volných délek bylo téměř zanedbatelné, viz Graf 4-4, který zobrazuje průběh tření kotvy #52, t_1 .

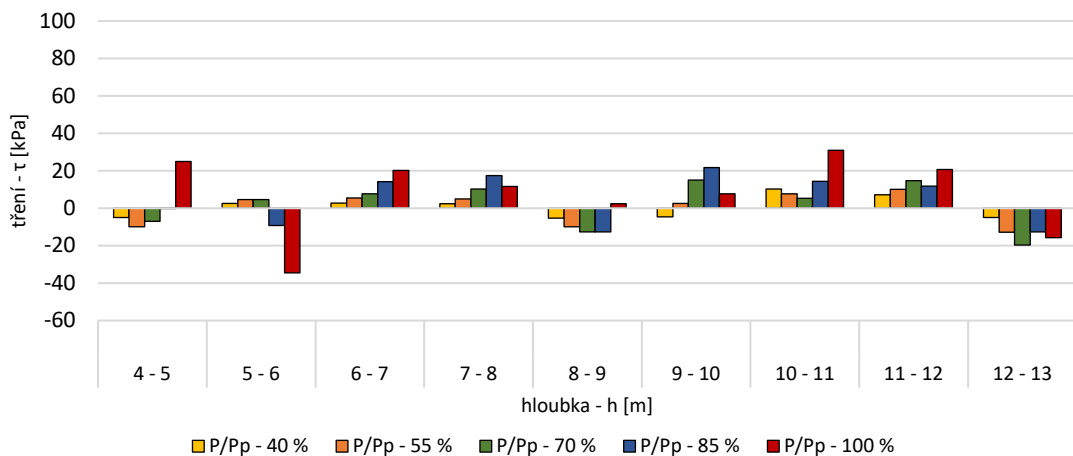


Graf 4-4 Zobrazení tření včetně začátku kotvy, kotva #52, t_1

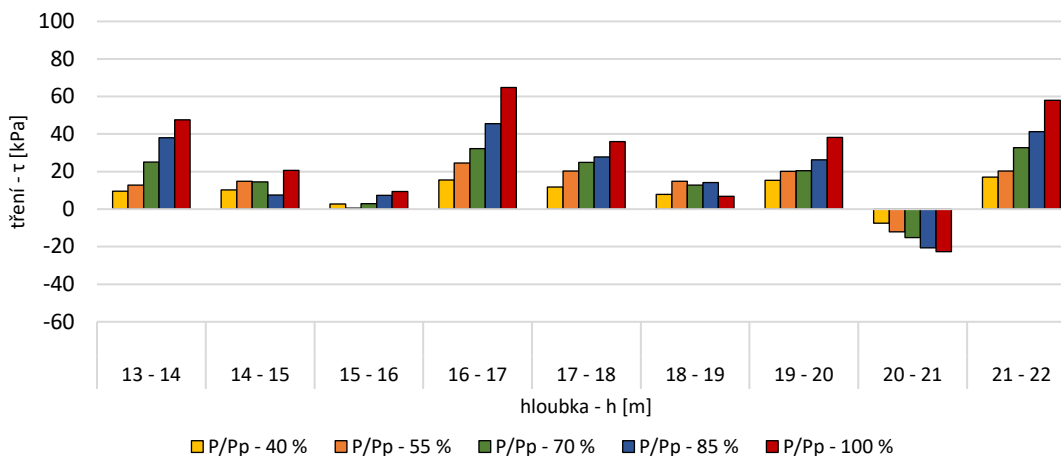
V textové části bude zobrazen průběh tření pro kotvu #52, stanovené na pramenci t_1 . Uvedená zobrazení budou provedena bez hodnot z prvních 4 metrů. Grafy 4-5, 4-6, 4-7, 4-8, 4-9 jsou rozděleny na části kvůli jejich horizontální orientaci. Zobrazení celých volných délek táhel s průběhem tření se nachází v příloze B.

4.3.1 Tření - kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m

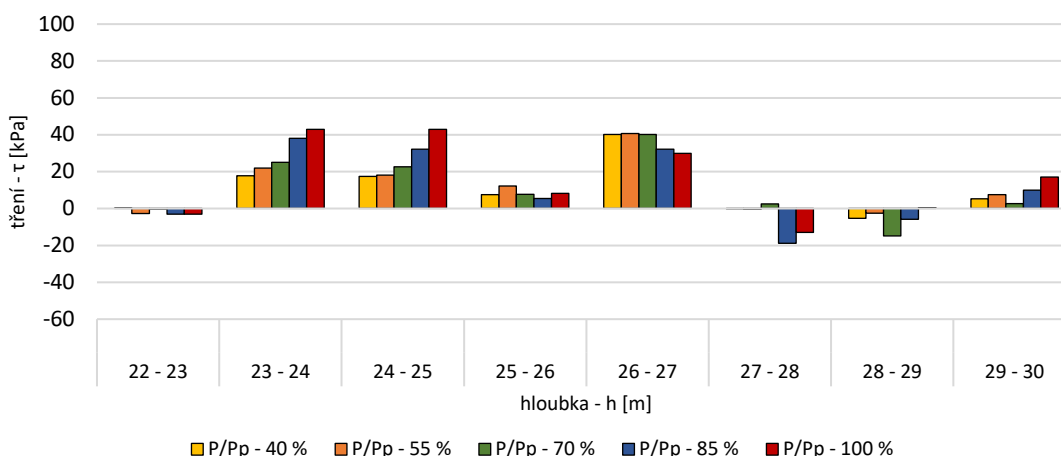
Nyní následuje zobrazení tření při délce segmentu 1 m pro kotvu #52 stanovené z měření na pramenci t_1 . Tření stanovená po segmentech délky 1 m pro ostatní kotvy a pramence jsou zobrazena v Příloze B, konkrétněji Obr. B-1 až B-4.



Graf 4-5 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m (část 1/3)



Graf 4-6 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m (část 2/3)

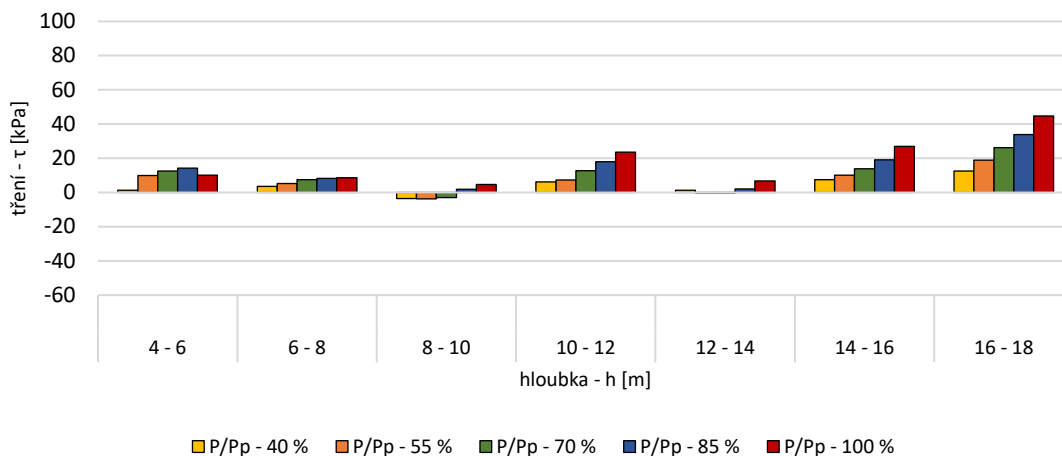


Graf 4-7 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m (část 3/3)

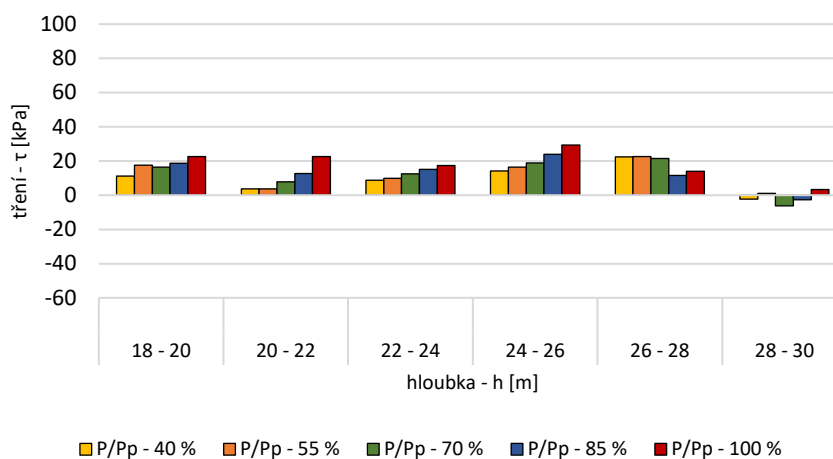
Při zobrazení tření po segmentech dlouhých 1 metr vznikají nereálné záporné hodnoty tření. Je zajímavé, že pouze na segmentu hloubky 20-21 došlo k situaci, že záporné hodnoty byly přítomné při všech zatěžovacích stupních. Maximální tření je stanoveno na segmentu při hloubce 16-17 m, kde hodnota při největším zatěžovacím stupni byla $\tau = 64$ kPa. Delší úsek, kde dochází ke zvýšeným hodnotám tření je v hloubce mezi 16 až 27 metry. Sice se v tomto úseku nachází i lokální minima a záporné hodnoty, ale převážně se zde vyskytuje zvýšené tření.

4.3.2 Tření – kotva #52, t_1 ; $l_i = 2$ m

Tato kapitola obsahuje zobrazení tření při délce segmentu 2 m pro kotvu #52 stanovené z měření na pramenci t_1 . Zbylá tření stanovená po segmentech délky 2 m jsou zobrazena v Příloze B, konkrétněji Obr. B-5 až B-8.



Graf 4-8 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 2$ m (část 1/2)

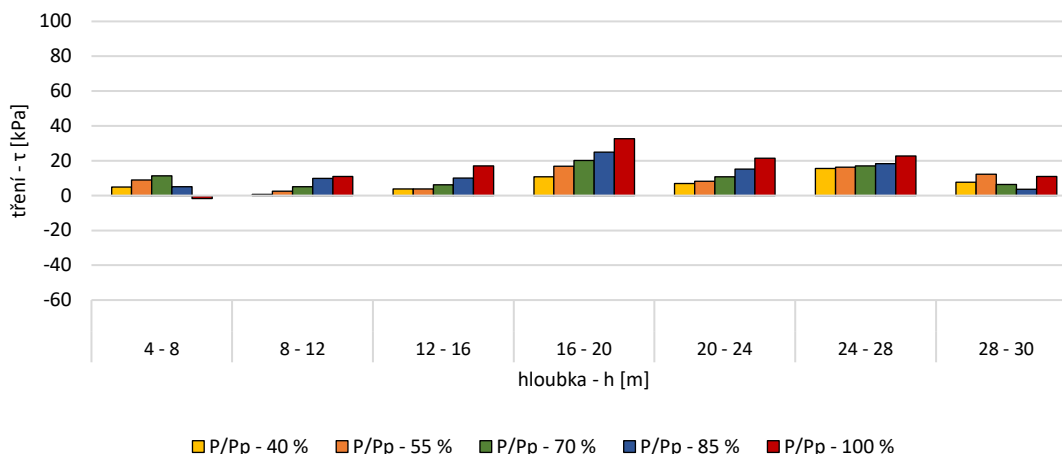


Graf 4-9 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 2$ m (část 2/2)

Segmenty dlouhé 2 metry vykazují celkově menší tření nežli segmenty metrové. Největší tření je na segmentu v hloubce 16-18, a to $\tau = 44$ kPa. Nereálné záporné tření se zde téměř nevyskytuje, ale když už je přítomné, tak pouze při některých zatěžovacích stupních, ale ne při všech stupních u jednoho segmentu. Oblast zvýšených tření je ve druhé polovině volné délky. Na koncovém segmentu dochází k minimu, což je velmi zajímavá situace.

4.3.3 Tření – kotva #52, t_1 ; $l_i = 4$ m

Zde je zobrazeno tření při délce segmentu 4 m pro kotvu #52 stanovené na pramenci t_1 . Zbývá tření stanovená pro další pramence po segmentech délky 4 m jsou zobrazena v Příloze B, konkrétněji Obr. B-5 až B-8.



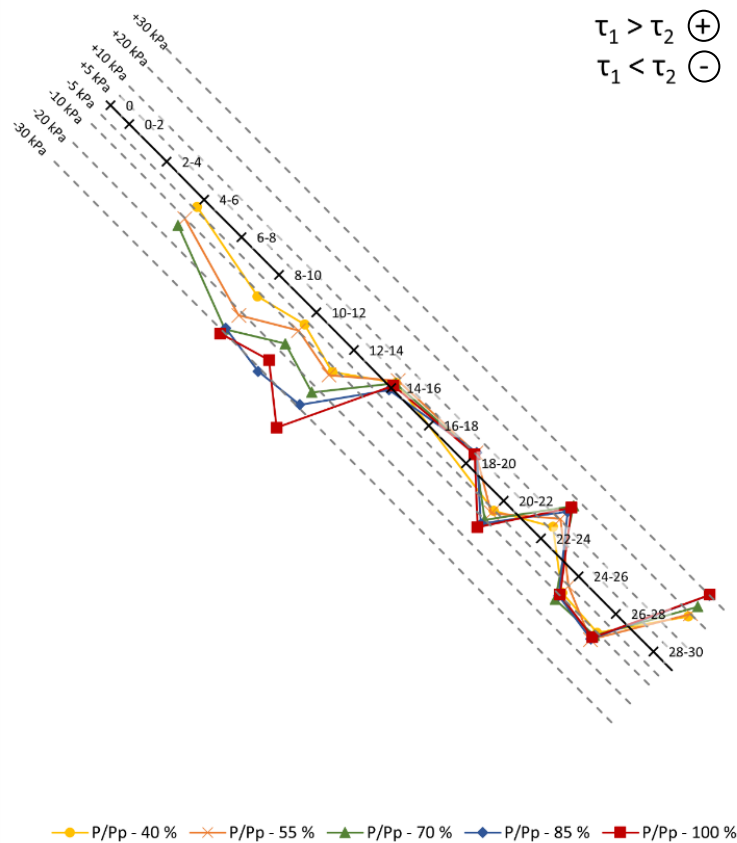
Graf 4-10 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 4$ m

Poslední zobrazení tření, a to na segmentech délky 4 metry, představuje nejplynulejší průběh tření. Kromě prvního segmentu při zatížení $P/P_p = 100$ % se zde nevyskytuje záporné tření. Maximální hodnota je $\tau = 32$ kPa, která je ovšem poloviční, oproti případu, kdy segment byl dlouhý 1 m. Nejvyšší hodnoty tření jsou také na druhé polovině volné délky táhla.

4.4 Srovnání tření na pramencích

Srovnání tření ve volné délce táhla je provedeno vždy jako rozdíl hodnot stanovených z pramenců t_1 a t_2 stejné kotvy po jednotlivých segmentech. Zobrazení rozdílů je uskutečněno po celé volné délce táhla a body po jednotlivých segmentech jsou spojeny, aby názorně reflektovaly vývoj rozdílu. Každý rozdíl pro určitý segment má podobu bodu, který se nachází buď na plné nebo čárkované ose. Čím je bod blíže plné ose, tím je rozdíl menší. Čárkované osy jsou označeny kladnou nebo zápornou hodnotou, který vyjadřuje hodnotu rozdílu. Pokud je hodnota kladná, větší tření je na pramenci t_1 . Záporně popsané osy reprezentují větší tření na pramenci t_2 . Všechna zobrazení se nachází v příloze C.

Pro názornost byl vybrán průběh rozdílů tření na kotvě #36, $l_i = 2$ m. Tento průběh je na grafu 4-11. Na této kotvě je krásně pozorovatelné, že v první polovině volné délky je větší tření na pramenci t_2 . Rozdíly na této polovině jsou závislé na zkušební síle. Ve druhé polovině volné délky jsou rozdíly napříč zatěžovacími stupni téměř identické a střídavě se překlápí ve prospěch jiného pramence. Maximální rozdíly dosahují hodnot 30 kPa, což je při délce segmentu 2 m téměř maximální hodnota tření.



Graf 4-11 Rozdíl tření, kotva #36, $l_i = 2 \text{ m}$

4.5 Zhodnocení tření ve volné délce táhla

Zobrazení všech výsledných průběhů tření se nachází v Příloze B. Příloha C obsahuje zobrazení rozdílů mezi pramenci na stejných kotvách. Jak již bylo zmíněno, tření bylo stanoveno po 3 různě dlouhých segmentech. Délky segmentů byly 1, 2 a 4 m a náležitosti a rozdíly těchto variant jsou uvedeny v této kapitole. Průběh tření nezahrnuje první 4 m kotvy, jelikož zde dochází k příliš extrémním hodnotám tření, viz kapitola 4.3.

Největší hodnoty tření nastávaly na segmentech délky 1 m. Vyhodnocení po takových segmentech ukazuje i nereálná záporná tření. Takové hodnoty tření jsou způsobeny oscilací dat z optických snímačů. I rozdíly tření mezi pramenci dosahují nejvyšších hodnot a zároveň průběhy rozdílů mají oscilující charakter. Je možné, že by se lokálně mohlo vyskytovat tření velikostně srovnatelné s vyhodnocením při $l_i = 1 \text{ m}$, ale nejspíše nelze očekávat takto proměnný průběh.

Celkově menších hodnot bylo dosaženo při vyhodnocení na delších segmentech. Platí zde závislost, že čím delší byl řešený segment, tím nižších hodnot bylo dosaženo a současně čím delší segment, tím byl plynulejší průběh a změna

tření. Při $l_i = 2$ m již téměř vymizela záporná tření. Maxima tření se zmenšila někdy až o 30 % oproti vyjádření tření po 1 m. Segmenty délky 4 m mají maxima někdy až na 50 % původních maxim ze segmentů $l_i = 1$ m.

Velice zajímavý je rozdílný průběh tření na posledních a předposledních segmentech. Vždy u každé kotvy je na jednom pramenci zvýšené tření a na druhém pramenci snížené. Takto rozdílné chování u stejné kotvy je velmi složitě vysvětlitelné.

Kromě oblasti u hlavy kotvy vznikají zvýšené hodnoty tření u obou kotev od zhruba od 16 m až po 28 m od hlavy kotvy. Takové chování může být způsobeno klesající teplotou, která se snižuje se vzrůstající hloubkou vrtu. S klesající teplotou dochází k tuhnutí tuku, který následně nedokáže efektivně eliminovat tření. Dalším možným jevem by mohlo být mírné zakřivení vrtu. Tato varianta by mohla mít negativní vliv na kotevní systém jako celek, jelikož zakřivení vrtu by způsobilo, že zakřivený táhlo by vyvozovalo radiální zatížení na spodní hranu vrtu a tím způsobovalo přetížení.

Asi nejjasnějším zobrazením vlivu tření je stanovení sil působících v táhle v určitých částech kotvy. Jsou vypracovány tabulky, ve kterých je uvedena síla vyvozená lisem zmenšená o předtížení, jelikož měření proběhla po předtížení. Dále zde jsou hodnoty sil stanovených z mediánů poměrného přetvoření pro části kotvy 0-1 m a 29-30 m. Hodnoty sil budou stanoveny ze vztahu (4-4).

Tabulka 4-1 Hodnoty sil v kotvě podle přetvoření na pramenci t_1 u kotvy #52

Kotva #52, t_1							
		P/P_p [%]	40	55	70	85	100
		$P - P_{10\%}$ [kN]	1260	1890	2520	3150	3780
Segment	0 - 1	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	2140	3166	4234	5113	6094
		F [kN]	1189	1760	2353	2842	3387
	29 - 30	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	1780	2712	3700	4653	5569
		F [kN]	989	1507	2056	2586	3095

Tabulka 4-2 Hodnoty sil v kotvě podle přetvoření na pramenci t_2 u kotvy #52

Kotva #52, t_2							
P/ P_p [%]		40	55	70	85	100	
P - $P_{10\%}$ [kN]		1260	1890	2520	3150	3780	
Segment	0 - 1	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	2115	3145	4212	5266	6408
		F [kN]	1175	1748	2341	2926	3561
	29 - 30	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	1703	2645	3594	4492	5403
		F [kN]	947	1470	1997	2497	3000

Tabulka 4-3 Hodnoty sil v kotvě podle přetvoření na pramenci t_1 u kotvy #36

Kotva #36, t_1							
P/ P_p [%]		40	55	70	85	100	
P - $P_{10\%}$ [kN]		1260	1890	2520	3150	3780	
Segment	0 - 1	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	2017	3005	4111	5196	6398
		F [kN]	1121	1670	2285	2888	3555
	29 - 30	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	1788	2721	3658	4573	5502
		F [kN]	994	1512	2033	2541	3058

Tabulka 4-4 Hodnoty sil v kotvě podle přetvoření na pramenci t_2 u kotvy #36

Kotva #36, t_2							
P/ P_p [%]		40	55	70	85	100	
P - $P_{10\%}$ [kN]		1260	1890	2520	3150	3780	
Segment	0 - 1	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	2164	3143	4209	5135	6502
		F [kN]	1203	1747	2339	2854	3613
	29 - 30	ϵ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	1759	2682	3577	4453	5320
		F [kN]	978	1491	1988	2475	2957

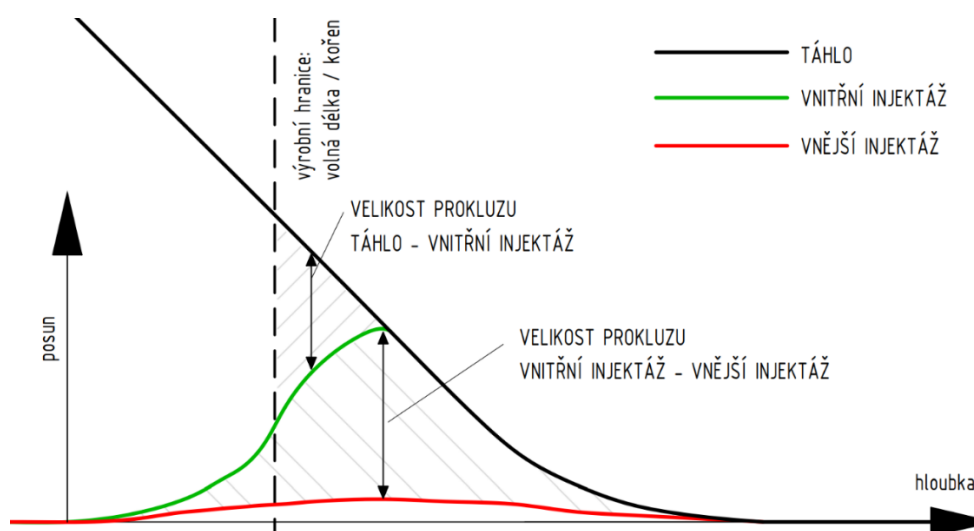
Z výše uvedených tabulek 4-1 až 4-4 je patrné, že síly v pramencích poklesnou hned na prvním metru o 60 až 300 kN. To je úbytek o 4–10 %. Síly na posledním metrovém segmentu klesají na zhruba 80 % síly, která je měřením reflektována. Je pozorovatelné, že procentuálně větší úbytky nastávají při nižších zatěžovacích stupních.

5 Analýza přechodu volná – kotevní délka táhla

Při návrhu trvalé kotvy se předpokládá, že dojde k dokonalému spojení na rozhraních táhlo – vnitřní injektáž a vnitřní injektáž – vnější injektáž. Rozhraní mezi injektážemi je tvořeno vrubovanou trubicí, která v příčném směru rozděluje kotvu na 2 části. Dokonalé spojení všech zmíněných částí zajistí, že přetvoření na táhle a v injektážích bude identické a síla v táhle bude přenesena do okolního prostředí. V praxi je však pozorováno, že pravidelně dochází k oddělení některých sousedních částí. Oddělení je teoreticky možné mezi táhlem a vnitřní injektáží, mezi vnitřní a vnější injektáží a také mezi vnější injektáží a okolním prostředím [8]. Poslední zmíněné by za žádných okolností nemělo nastat nebo jen na malém úseku, jelikož návrh kotvy podléhá posudku na vytržení kořene.

5.1 Prokluz mezi jednotlivými částmi vyhodnocovaných kotev

Díky instrumentaci kotev optickými snímači na pramencích i v obou injektážích lze zjistit, zda dochází k jednotné deformaci všech částí či nikoli. Po vynesení průběhů posunů všech částí bylo odhaleno, že posuny nejsou stejné a dochází k prokluzu mezi částmi. Všechny posuny byly postupně sčítány od konce kotvy, protože tam se předpokládá nulový posun. Při prokluzu pramence s vnitřní injektáží dochází ke zdánlivému posunutí přechodu mezi volnou délkou a kořenovou délkou. Posuny jednotlivých částí odpovídaly průběhům posunů na Obr. 5-1. Zde je vidět, že na začátku kořenové délky táhla dojde k oddělení všech částí. Postupně s poklesem síly v táhle dojde ke spojení vnitřní injektáže s táhlem, oddělení injektáže přetrvává dále.

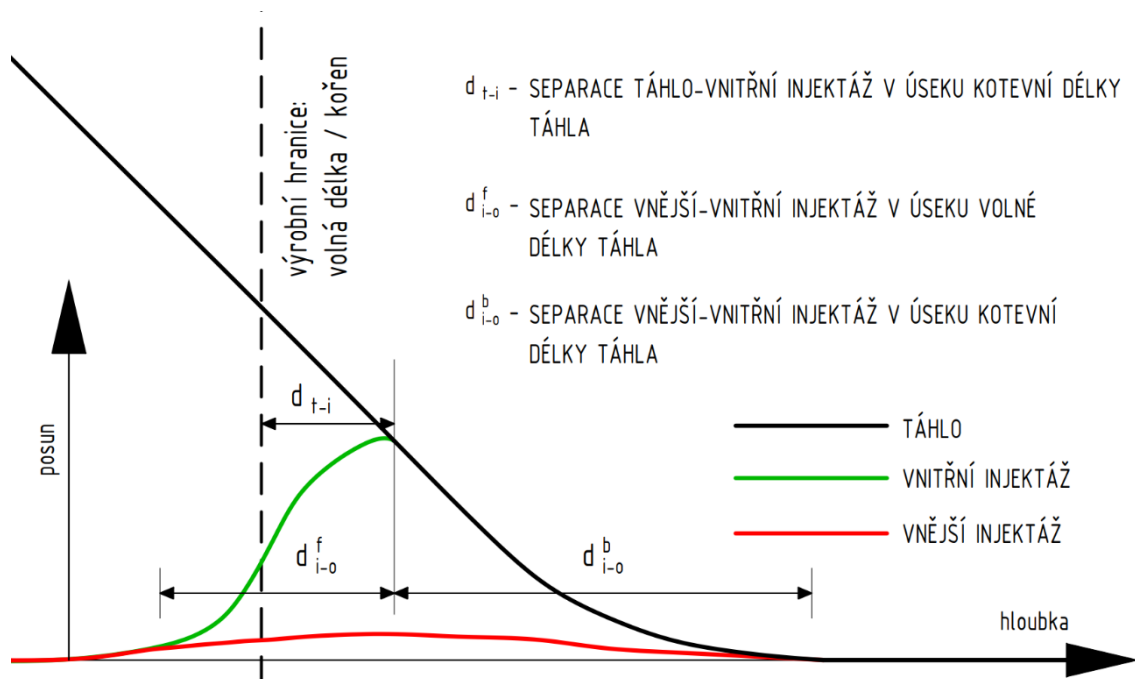


Obr. 5-1 Schéma velikosti prokluzu

V práci jsou sledovány separační délky. Jsou to oblasti, na kterých dochází k oddělení sousedních částí. Nejdříve je sledována separační délka d_{t-i} , ve které dochází k separaci táhla od vnitřní injektáže. Dále je pozorována separační délka mezi injektážemi. Ta probíhá ve volné i kořenové délce táhla, a právě podle umístění separace jsou sledovány délky d_{i-o}^f a d_{i-o}^b . Tyto délky jsou procentuálně vyjádřeny dle vzorců (5-1) a (5-2). Znázornění polohy a velikosti separačních délek viz Obr. 5-2.

$$\lambda_{i-o}^f = \frac{d_{i-o}^f + d_{i-o}^b}{d_{i-o}^f} \cdot 100 \quad (5-1)$$

$$\lambda_{i-o}^b = \frac{d_{i-o}^f + d_{i-o}^b}{d_{i-o}^b} \cdot 100 \quad (5-2)$$



Obr. 5-2 Schéma separačních délek a jejich poloh

Pro relevantní odečet délek d_{t-i} , d_{i-o}^f a d_{i-o}^b je důležité, aby průběhy protažení jednotlivých částí byly co nejpodobnější schématu na Obr. 5-2. Při zobrazení posunů injektáží se při některých stupních zatížení zobrazily průběhy, které neumožnily odečet zkoumaných parametrů. Proto byly některé odečty provedeny po úpravě křivek. V takovém případě budou hodnoty v tabulkách graficky označeny.

5.2 Separační délky, kotva #52

Níže jsou uvedeny jednotlivé separační délky pro kotvu #52 dle schématu v Obr. 5-2.

Tabulka 5-1 Velikosti separačních délek, Kotva #52, t_1

Kotva #52, t_1						
Pramenec t_1	P/P _p [%]	d_{t-i} [cm]	d_{i-o}^f [cm]	d_{i-o}^b [cm]	λ_{i-o}^f [%]	λ_{i-o}^b [%]
	40	51	77	210	27	73
	55	57	102	238	30	70
	70	(60)	(107)	(259)	(29)	(71)
	85	61	121	290	29	71
	100	(59)	(128)	(346)	(27)	(73)

Tabulka 5-2 Velikosti separačních délek, Kotva #52, t_2

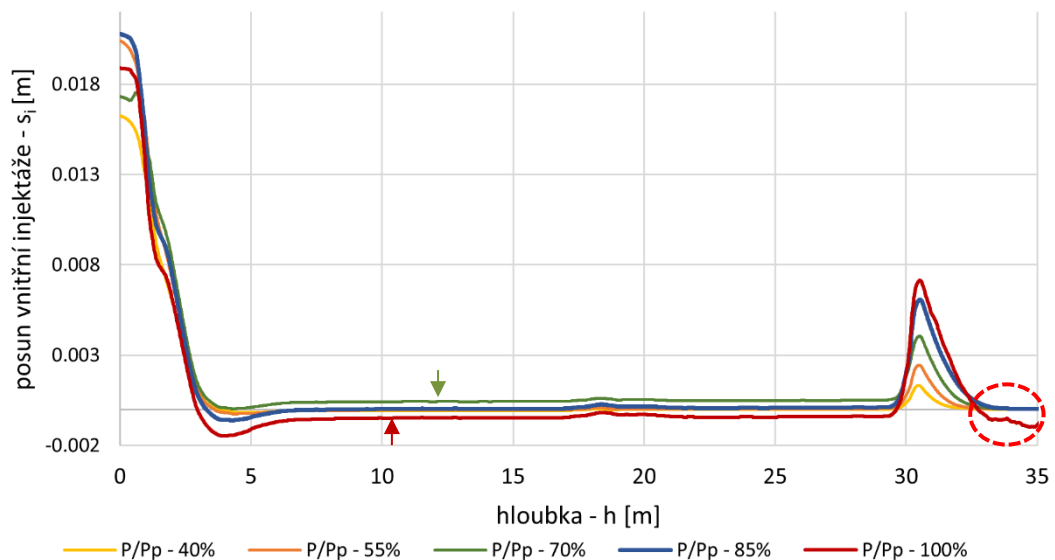
Kotva #52, t_2						
Pramenec t_2	P/P _p [%]	d_{t-i} [cm]	d_{i-o}^f [cm]	d_{i-o}^b [cm]	λ_{i-o}^f [%]	λ_{i-o}^b [%]
	40	51	77	210	27	73
	55	57	102	238	30	70
	70	(60)	(107)	(259)	(29)	(71)
	85	61	121	290	29	71
	100	(59)	(128)	(346)	(27)	(73)

Hodnoty separačních délek d_{t-i} jsou stejné u obou pramenců, protože hodnoty posunů na obou táhlech byly téměř identické, a to při všech zatěžovacích stupních. Velikost d_{t-i} se zvětšuje s rostoucími zkušebními silami. Po prvním zatěžovacím stupni byla separační délka 51 cm a při posledním stupni zkoušení se tato hodnota zvětšila o 10 cm na konečnou hodnotu 61 cm.

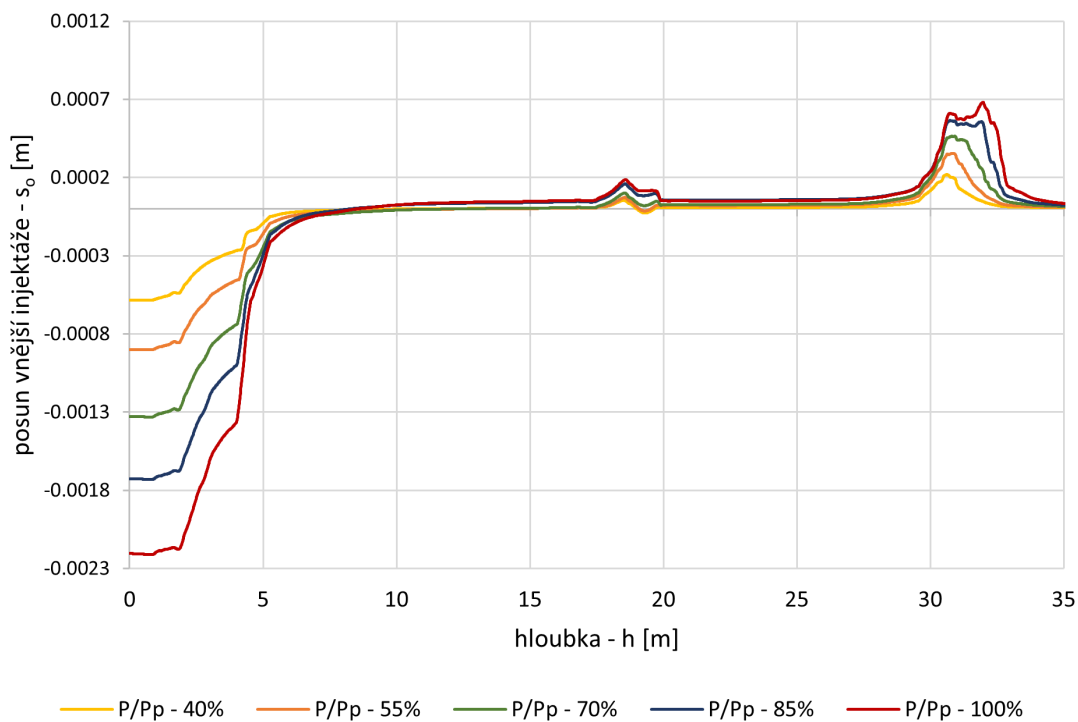
Rozdělení separačních délek d_{i-o}^f a d_{i-o}^b bylo v průměru 29 % pro volnou délku táhla a 71 % pro kořenovou délku táhla. Největšího rozdílu bylo dosaženo v prvním zatěžovacím stupni, kdy rozdělení bylo $\lambda_{i-o}^f = 27\%$ a $\lambda_{i-o}^b = 73\%$.

Vyhodnocení nebylo možné jednoznačně provést při stupních $P/P_p = 70\%$ a $P/P_p = 100\%$, a to kvůli průběhu přetvoření vnitřní injektáže. Při zatěžovacím stupni $P/P_p = 70\%$ vykazuje vnitřní injektáž prodloužení a pro zatěžovací stupeň $P/P_p = 100\%$ je naopak injektáž stlačená, viz Graf 5-1. V těchto případech byly odečty provedeny tak, že se vodorovné části průběhů posunů ve volné délce táhla přemístily k průběhům zbylých stupňů tak, jak naznačují šipky v grafu 5-1. Tento postup byl proveden, jelikož posunutí při zatížení $P/P_p = 70\%$ na vnější injektáži bylo téměř rovné 0 mm a také, protože posun vnitřní injektáže při vyšším stupni $P/P_p = 85\%$ má nulovou hodnotu, viz Graf 5-2. Podobný postup úpravy křivek byl proveden i u stupně $P/P_p = 100\%$. Není jasné, zda tento krok měření proběhl naprosto správně, protože vnitřní injektáž ukazuje stlačení, a to i v kořenové délce táhla (Graf 5-1 označená část). Tvar průběhu posunu odpovídá zbylým průběhům posunů, jenom se nachází níže. Proto celá křivka byla zvednuta a následně byly délky odečteny.

Zobrazení posunů pro vyhodnocení délek separací se nachází v příloze D.



Graf 5-1 Průběh posunů vnitřní injektáže, kotva #52



Graf 5-2 Průběh posunů injecktáže, kotva #52

5.3 Separační délky, kotva #36

Tabulky 5-3 a 5-2 obsahují jednotlivé separační délky pro kotvu #36.

Tabulka 5-3 Velikosti separačních délek, Kotva #36, t₁

Kotva #36, t ₁						
Pramenec t ₁	P/P _p	d _{t-i}	d _{i-o} ^f	d _{i-o} ^b	λ _{i-o} ^f	λ _{i-o} ^b
	[%]	[cm]	[cm]	[cm]	[%]	[%]
	40	47	71	232	23	77
	55	50	93	278	25	75
	70	53	113	340	25	75
	85	55				
100	57					

Tabulka 5-4 Velikosti separačních délek, Kotva #36, t_2

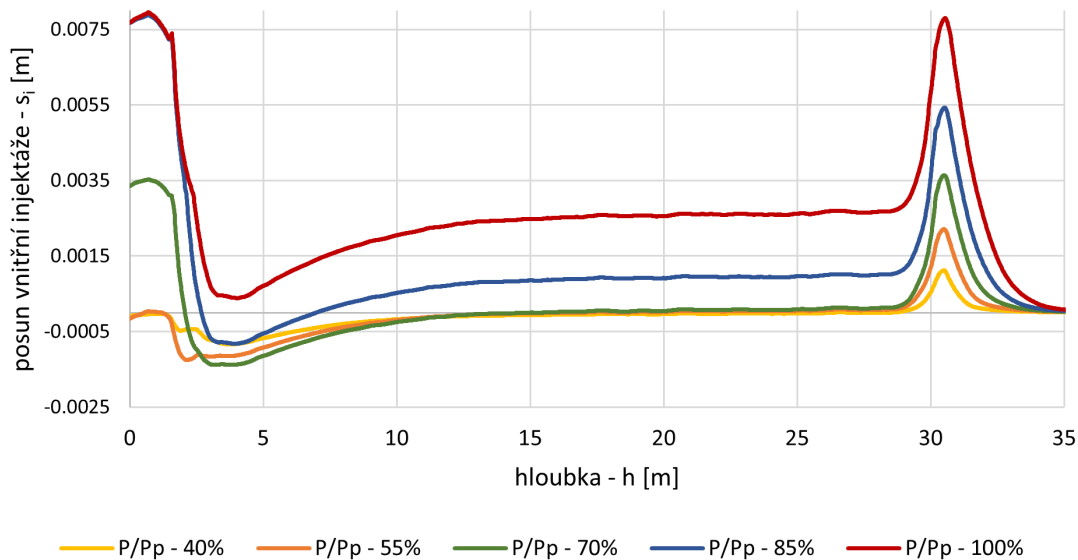
Kotva #36, t_2						
Pramenec t_2	P/P _p [%]	d_{t-i} [cm]	d_{i-o}^f [cm]	d_{i-o}^b [cm]	λ_{i-o}^f [%]	λ_{i-o}^b [%]
	40	51	75	228	25	75
	55	57	100	271	27	73
	70	60	120	333	26	74
	85	64				
	100	66				

Kotva #36 měla jednotlivé posuny na pramencích vzájemně mírně posunuty. Díky tomu vznikl rozdíl mezi pramenci t_1 a t_2 při vyhodnocení separační délky d_{t-i} . Při prvním zatěžovacím stupni byl rozdíl mezi pramenci roven 4 cm a při posledním stupni 9 cm. Separační délky na rozhraní táhlo - vnitřní injektáž jsou srovnatelné s hodnotami u kotvy #52. Velikost taktéž narůstá s rostoucí napínací silou. U pramence t_1 je nárůst separační délky 10 cm z počátečních $d_{t-i} = 47$ cm na konečných $d_{t-i} = 57$ cm. U pramence t_2 je nárůst 15 cm z počáteční separační délky $d_{t-i} = 51$ cm na konečných $d_{t-i} = 66$ cm. Separační délka d_{t-i} byla vyčíslitelná ve všech zatěžovacích stupních.

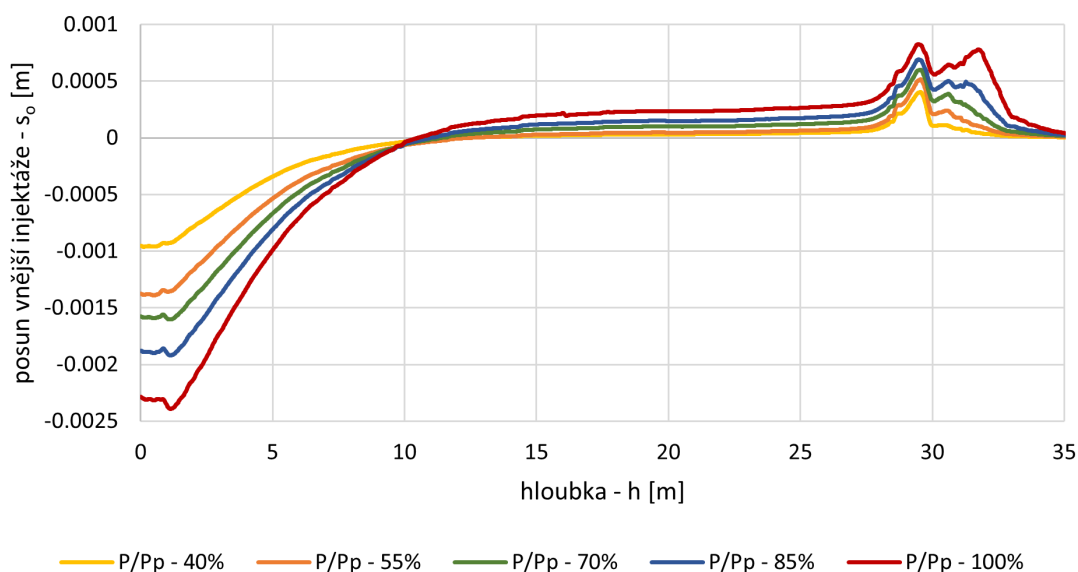
Procentuální rozdělení separace mezi injektážemi je v průměru $\lambda_{i-o}^f = 25$ % a $\lambda_{i-o}^b = 75$ %, ale pouze u změřitelných stupňů. Oproti kotvě #52 se separační délka mezi injektážemi nachází více na kořenové délce táhla.

Z průběhů posunů všech částí kotvy #36 bylo možné odečíst separační délky mezi injektážemi pouze pro první 3 zatěžovací stupně. Podle průběhů posunů vnější a vnitřní injektáže, viz Graf 5-3 a Graf 5-4, lze pozorovat, že posuny vnitřní injektáže jsou téměř po celé volné délce a posuny vnější injektáže se vyskytují od desátého metru. Proto nebylo možné provést dílčí úpravy, alespoň pro přibližný odečet.

Všechny grafy použité pro odečty se nacházejí v příloze D.



Graf 5-3 Průběh posunů vnitřní injecktáže, kotva #36



Graf 5-4 Průběh posunů vnější injecktáže, kotva #36

5.4 Chování vnější injecktáže u hlavy kotev

Při pohledu na grafy 5-2 a 5-4 je viditelné, že na začátku kotev jsou vnější injecktáže stlačené. Hodnoty stlačení jsou v rozmezí 0,8 až 2,5 mm vždy podle stupně zatížení. Takové chování by mohlo potvrdit, že kotevní blok svým posunem stlačil vnější injecktáž (kapitola 3.3).

6 Závěr

V první části práce byla srovnána měření standardní metodou s měřením optickými snímači z pohledu vyhodnocení výpočtové volné délky. V přímém srovnání vycházely větší hodnoty ze standardního měření. To by mohlo být způsobeno zatlačením kotevního bloku do skály. Autor práce považuje jako přesnější metodu měření optickými snímači, protože ty měřily přetvoření táhla po celé jeho délce až k hlavě kotvy, zatímco standardním měřením se zaznamenává výsun napínacího lisu, který je při posunu bloku větší. Ke skutečnosti, že k zatlačení bloku došlo vedou i pozorovaná stlačení vnější injektáže u hlav kotev. Pokud by při pohybu bloku byly měřeny posuny kotevního bloku, bylo by možné stanovit postupy pro korelaci měření standardní metodou.

Druhá část vyhodnocení, věnovaná tření, přinesla několik zajímavých poznatků. Prvním je, že extrémní tření vznikají u samotné kotevní hlavy. Tyto extrémní snižují sílu v pramencích od 4 % do 10 %. To může být způsobeno tím, že osa vrtu nemusí být kolmá ke kotevní desce. V takovém případě se táhlo okamžitě ostře zalomí na začátku vrtu, čímž se okamžitě snižuje síla. Případně by to mohlo být způsobeno nedokonalým průchodem pramenců kotevní deskou. Za druhý poznatek lze označit, že i když jsou deformace pramenců měřeny kontinuálně, tak tření není možné takto vyhodnotit, protože naměřená přetvoření oscilují. Vyjádření tření je možné provést pouze po jednotlivých segmentech, kdy je brána konstantní velikost tření na celém segmentu. Délky segmentů ovlivňují velikost a průběh tření. Čím delší segment, tím plynulejší změna tření nastává, ale hodnoty nabývají menších hodnot. Ze stanovených průběhů tření je pozorovatelné, že dochází k postupnému nárůstu tření ve druhé polovině volné délky táhla u obou zkoumaných kotev, konkrétněji od 16 do 28 m. Těžko zjistit, zda zvýšené tření je způsobené nižší teplotou a tím se měnícím tukem, nebo zda dochází k zakřivení vrtu. Pokud by se dalo přímo odstranit oscilaci naměřených deformací, vyjádření tření by přineslo přesnější výsledky.

Třetím bodem vyhodnocení kotev bylo analyzování přechodu volné a kořenové délky táhla. Při porovnání posunů jednotlivých částí bylo zjištěno, že táhlo, vnitřní injektáž i vnější injektáž mají rozdílné posuny a dochází mezi nimi k prokluzům. Jednotlivé separační délky byly odečítány dle schématu, které bylo vytvořeno přímo pro tuto práci. Separační délky táhel od vnitřní injektáže nejsou natolik závažné, že by mohlo dojít k vytržení pramenců z vnitřní injektáže. Délky těchto separací byly okolo 50–60 cm, což zasahuje do zhruba prvních 3 % celkové kořenové délky táhla. Pokud průběhy posunů dovolily odečíst separační délky mezi injektážemi, tak tyto délky byly téměř zanedbatelné z celkové délky kotvy. Dále

zaznamenané posuny ve vnější injektáž ve volné délce táhla byly až nepatrné (vyjma začátků kotev).

Jako možná doporučení autor udává podrobnější sledování pohybů betonových bloků při napínání velkými silami. Dále by se dalo zaměřit na zkoumání tření po odtěžovacích krocích, jelikož po odtížení by mohly být lépe vidět oblasti, kde je více bráněno navrácení pramence zpět do polohy. Analýza přechodové oblasti by mohla být provedena pomocí matematického modelování. V softwaru určenému na modelaci stavebních konstrukcí by mělo být možné vytvořit model přechodu z volné délky na kořenovou.

Optické snímače a jejich možnosti měření přináší velmi rozmanitou možnost, jak sledovat stavební konstrukce. Je třeba mít na paměti, že i takové metody mají své nedostatky a je důležité brát jejich výsledky s jistou obezřetností. Z pohledu autora má smysl pokračovat v měření optickými snímači, ale je třeba sledovat veškeré vedlejší jevy, které by mohly měření jakkoli ovlivnit.

Citovaná literatura

- [1] Geologická mapa Slovenska M 1:50000. *Štátný geologický ústav Dionýza Štúra* [online]. 2022 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.geology.sk/geoinfoportal/mapovyportal/geologicke-mapy/geologicka-mapa-slovenska-m-50-000/>
- [2] WOSCHITZ, Helmut a Madeleine WINKLER. *Fiber Optic Measurements during load tests and prestressing of Ground-Anchor #36 and #52*. GRAZ UNIVERSITY OF TECHNOLOG, 2021.
- [3] MASOPUST, Jan. *Speciální zakládání staveb*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 80-214-2770-1.
- [4] Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií. *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů*. [online]. 2012, červen [cit. 2023-05-22]. Učební texty k semináři ve formátu PDF. Dostupné z http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_06_1206.
- [5] How Does an Optical Strain Gauge Work?. *Tacuna Systems* [online]. 1100 Johnson Rd. Unit 17364 Golden, CO 80402, 2021 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://tacunasystems.com/knowledge-base/how-does-an-optical-strain-gauge-work/>
- [6] Optical Strain Gauges: What You Need to Know. *Hottinger Brüel & Kjær* [online]. 2021 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.hbm.com/en/6827/article-how-does-an-optical-strain-gauge-actually-work/?product_type_no=How%20Does%20an%20Optical%20Strain%20Gauge%20Work
- [7] WOSCHITZ, H. *Princip měření a možné problémy měření* [ústní sdělení]. Staveniště. Dvořákovo nábřeží, Bratislava 01.03.2023
- [8] *Engineering Structures* [online]. 74. 2014 [cit. 2023-05-22]. ISSN 01410296. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029614003009>
- [9] Ground Anchors. *ForceTec LLC* [online]. Dubai, UAE, 2021 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://forcetecgroup.com/strand-anchors/>

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Staveniště v Bratislavě s vyznačenou polohou řešených kotev [2].....	12
Obr. 2-2 Schéma trvalé horninové kotvy [9].....	13
Obr. 2-5 Průchodová trubice s kotevní deskou a víko, foto: autor.....	14
Obr. 2-4 Detail kotevní hlavy se siloměrem (modrý prstenec), foto: autor.....	14
Obr. 2-3 Víka trvalých kotev, kotva vpravo vybavena siloměrem, foto: autor	14
Obr. 2-6 Skladba optického vlákna [5]	15
Obr. 2-7 Schématické příčné řezy kotvami se znázorněním snímačů [2]	16
Obr. 2-8 Schéma zatěžovací zkoušky, kotva #52, [2].....	17
Obr. 2-9 Schéma zatěžovací zkoušky, kotva #36, [2].....	17
Obr. 2-10 Hydraulický lis Tensa 4800 kN, foto: autor	17

Obr. 2-11 Olejové čerpadlo s ručním ovládním, foto: autor	17
Obr. 5-1 Schéma velikosti prokluzu.....	37
Obr. 5-2 Schéma separačních délek a jejich poloh.....	38

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Charakteristiky vyhodnocovaných kotev.....	12
Tabulka 3-1 Vstupní hodnoty pro výpočet $L_{app, \#52, t_1, P/Pp=40\%}$	19
Tabulka 3-2 Výpočtové volné délky, kotva #52, standardní měření	19
Tabulka 3-3 Výpočtové volné délky, kotva #36, standardní měření	20
Tabulka 3-4 Výpočtové volné délky, kotva #52, t_1 ; měření optickými snímači	21
Tabulka 3-5 Výpočtové volné délky, kotva #52, t_2 ; měření optickými snímači	21
Tabulka 3-6 Výpočtové volné délky, kotva #36, t_1 ; měření optickými snímači	22
Tabulka 3-7 Výpočtové volné délky, kotva #36, t_2 ; měření optickými snímači	22
Tabulka 3-8 Srovnání posunů táhla pro obě metody měření, kotva #52.....	23
Tabulka 3-9 Srovnání posunů táhla pro obě metody měření, kotva #36.....	23
Tabulka 4-1 Hodnoty sil v kotvě podle přetvoření na pramenci t_1 u kotvy #52	35
Tabulka 4-2 Hodnoty sil v kotvě podle přetvoření na pramenci t_2 u kotvy #52	36
Tabulka 4-3 Hodnoty sil v kotvě podle přetvoření na pramenci t_1 u kotvy #36	36
Tabulka 4-4 Hodnoty sil v kotvě podle přetvoření na pramenci t_2 u kotvy #36	36
Tabulka 5-1 Velikosti separačních délek, Kotva #52, t_1	39
Tabulka 5-2 Velikosti separačních délek, Kotva #52, t_2	39
Tabulka 5-3 Velikosti separačních délek, Kotva #36, t_1	41
Tabulka 5-4 Velikosti separačních délek, Kotva #36, t_2	42

Seznam grafů

Graf 3-1 Srovnání metod měření při vyhodnocení výpočtové volné délky, kotva #52.....	25
Graf 3-2 Srovnání metod měření při vyhodnocení výpočtové volné délky, kotva #36.....	25
Graf 4-1 Přetvoření naměřené optickými snímači ve volné délce, kotva #52, t_1	26
Graf 4-2 Medián přetvoření po 1 m, kotva #36	28
Graf 4-3 Medián přetvoření po 1 m, kotva #52	29
Graf 4-4 Zobrazení tření včetně začátku kotvy, kotva #52, t_1	30
Graf 4-5 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m (část 1/3)	30
Graf 4-6 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m (část 2/3)	31
Graf 4-7 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m (část 3/3).....	31
Graf 4-8 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 2$ m (část 1/2).....	32
Graf 4-9 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 2$ m (část 2/2).....	32
Graf 4-10 Průběh tření τ , kotva #52, t_1 ; $l_i = 4$ m	33
Graf 4-11 Rozdíl tření, kotva #36, $l_i = 2$ m	34
Graf 5-1 Průběh posunů vnitřní injektáže, kotva #52	40
Graf 5-2 Průběh posunů injektáže, kotva #52	41

Graf 5-3 Průběh posunů vnitřní injektáže, kotva #36	43
Graf 5-4 Průběh posunů vnější injektáže, kotva #36	43

Použité symboly

A_p	Plocha pramence kotvy	[mm ²]
A_t	Plocha táhla kotvy	[mm ²]
n	Počet pramenců kotvy	[ks]
E_t	Youngův modul pružnosti táhla	[GPa]
f_{tk}	Charakteristická pevnost ocele	[MPa]
P_p	Zkušební síla	[kN]
P_o	Kotevní síla	[kN]
$P_{10\%}$	Síla předtížení	[kN]
ΔP	Zkušební síla zmenšená o předpínací sílu	[kN]
α	Úhel sklonu kotvy od vodorovné osy	[°]
d	Průměr vrtu	[mm]
L	Délka vrtu	[m]
l_{tf}	Volná délka táhla	[m]
l_{tb}	Délka kořene kotvy	[m]
l_e	Manipulační délka	[m]
L_{app}	Výpočtová volná délka	[m]
ΔS_{el}	Elastické prodloužení táhla	[mm]
ε_i	Přetvoření jednoho naměřeného údaje	[-] nebo [μm/m]
s	Celkový posun táhla	[mm]
s_t	Posun táhla po hlavu kotvy	[mm]
s_m	Posun táhla v manipulační délce	[mm]
s_p	Plastický posun táhla	[mm]
F	Síla v táhle	[kN]
τ_i	Tření na segmentu	[kPa]
l_i	Délka segmentu	[m]
d_{t-i}	Separáčnická délka táhlo - vnitřní injektáž	[cm]
d_{i-o}^f	Separáčnická délka vnitřní - vnější injektáž ve volné délce táhla	[cm]
d_{i-o}^b	Separáčnická délka vnitřní - vnější injektáž v kotevní délce táhla	[cm]
λ_{i-o}^f	Procentuální zastoupení separace vnitřní - vnější injektáž ve volné délce táhla	[%]
λ_{i-o}^b	Procentuální zastoupení separace vnitřní - vnější injektáž v kotevní délce táhla	[%]

Seznam příloh

Příloha A

Obr. A-1 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #52, t_1	50
Obr. A-2 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #52, t_1	50
Obr. A-3 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně, kotva #52, t_2	50
Obr. A-4 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #52, t_2	50
Obr. A-5 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #52, vnitřní injektáž	51
Obr. A-6 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #52, vnitřní injektáž.....	51
Obr. A-7 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #52, vnější injektáž.....	51
Obr. A-8 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #52, vnější injektáž.....	51
Obr. A-9 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #36, t_1	52
Obr. A-10 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #36, t_1	52
Obr. A-11 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #36, t_2	52
Obr. A-12 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #36, t_2	52
Obr. A-13 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #36, vnitřní injektáž	53
Obr. A-14 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #36, vnitřní injektáž.....	53
Obr. A-15 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #36, vnější injektáž	53
Obr. A-16 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #36, vnější injektáž.....	53

Příloha B

Obr. B-1 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m.....	54
Obr. B-2 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_2 ; $l_i = 1$ m.....	55
Obr. B-3 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_1 ; $l_i = 1$ m.....	56
Obr. B-4 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_2 ; $l_i = 1$ m.....	57
Obr. B-5 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_1 ; $l_i = 2$ m.....	58
Obr. B-6 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_2 ; $l_i = 2$ m.....	59
Obr. B-7 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_1 ; $l_i = 2$ m.....	60
Obr. B-8 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_2 ; $l_i = 2$ m.....	61
Obr. B-9 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_1 ; $l_i = 4$ m.....	62
Obr. B-10 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_2 ; $l_i = 4$ m	62
Obr. B-11 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_1 ; $l_i = 4$ m	63
Obr. B-12 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_2 ; $l_i = 4$ m	63

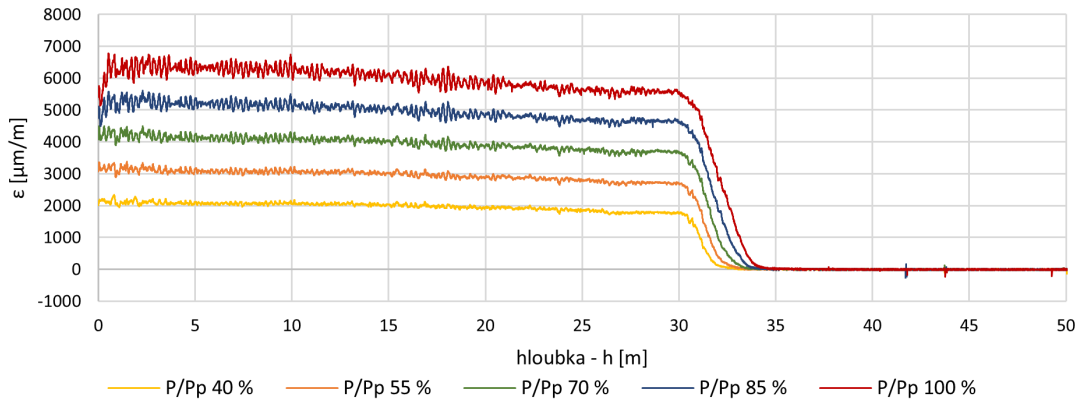
Příloha C

Obr. C-1 Rozdíl tření, kotva #52, $l_i = 1$ m.....	64
Obr. C-2 Rozdíl tření, kotva #36, $l_i = 1$ m.....	64
Obr. C-3 Rozdíl tření, kotva #52, $l_i = 2$ m.....	65
Obr. C-4 Rozdíl tření, kotva #36, $l_i = 2$ m.....	65
Obr. C-5 Rozdíl tření, kotva #52, $l_i = 4$ m.....	66
Obr. C-6 Rozdíl tření, kotva #36, $l_i = 4$ m.....	66

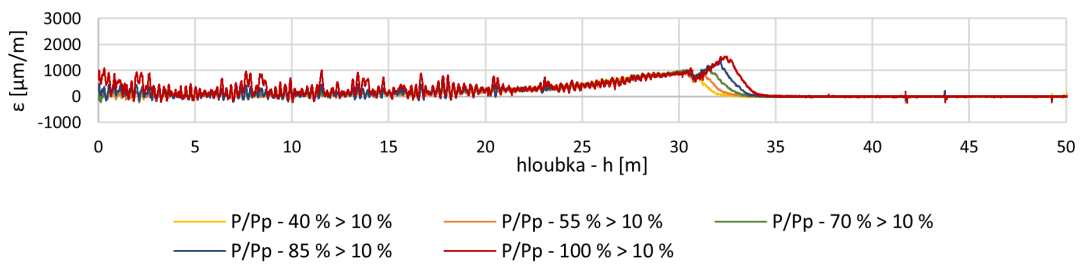
Příloha D

Obr. D-1 Průběhy posunů jednotlivých částí pro zat. stupně 40 %, 55 %, 85 %; kotva #52...67	
Obr. D-2 Průběhy posunů jednotlivých částí pro zat. stupně 70 %, 100 %; kotva #52.....67	
Obr. D-3 Průběhy posunů jednotlivých částí pro zat. stupně 40 %, 55 %, 70 %; kotva #36...68	
Obr. D-4 Průběhy posunů jednotlivých částí pro zat. stupně 85 %, 100 %; kotva #36.....68	

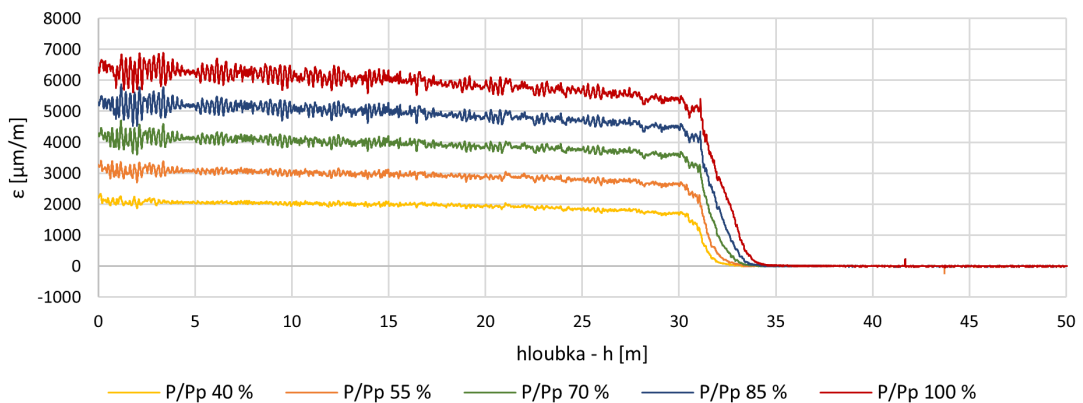
Příloha A



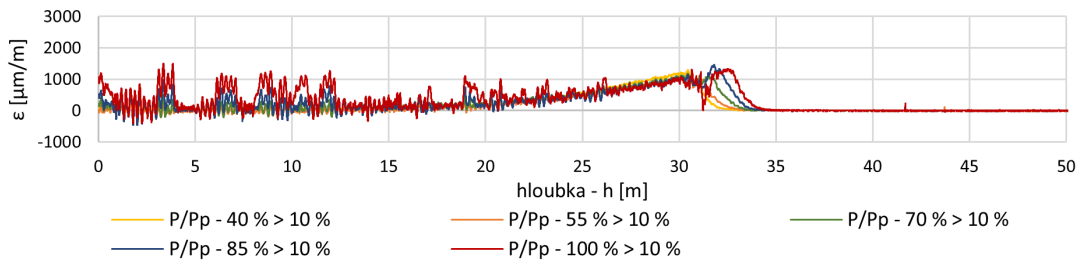
Obr. A-1 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #52, t_1



Obr. A-2 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #52, t_1

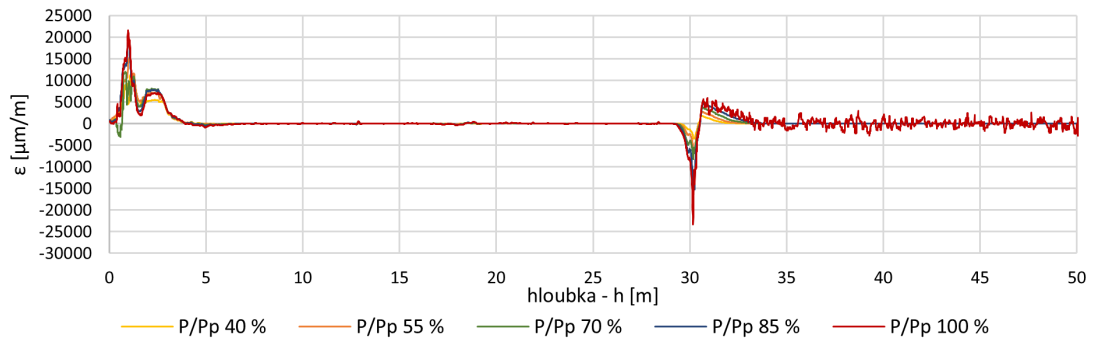


Obr. A-3 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně, kotva #52, t_2

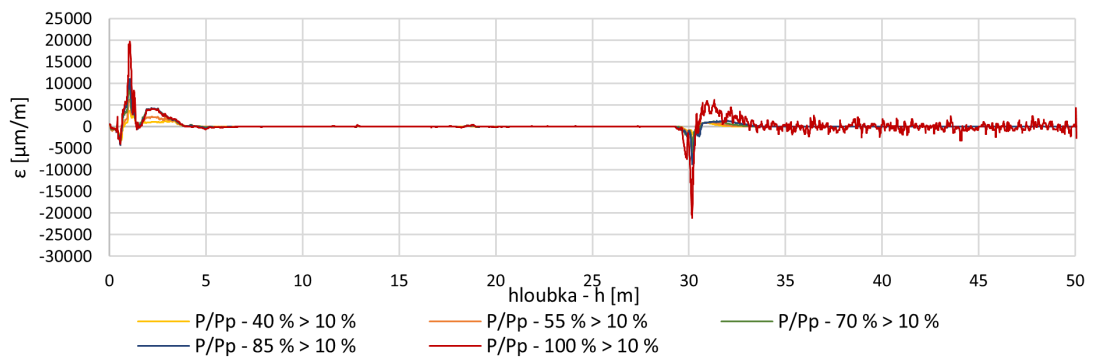


Obr. A-4 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #52, t_2

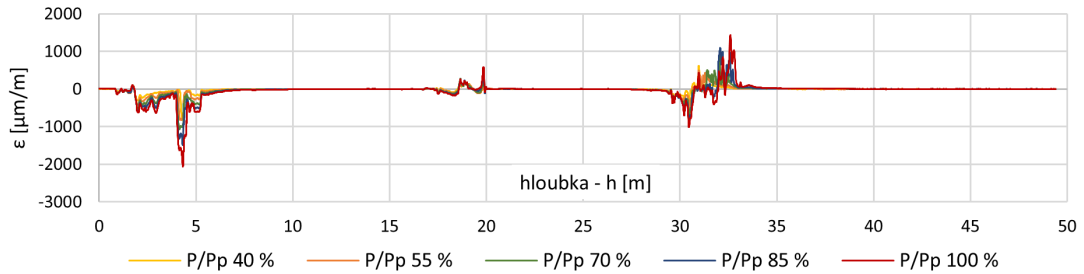
Příloha A



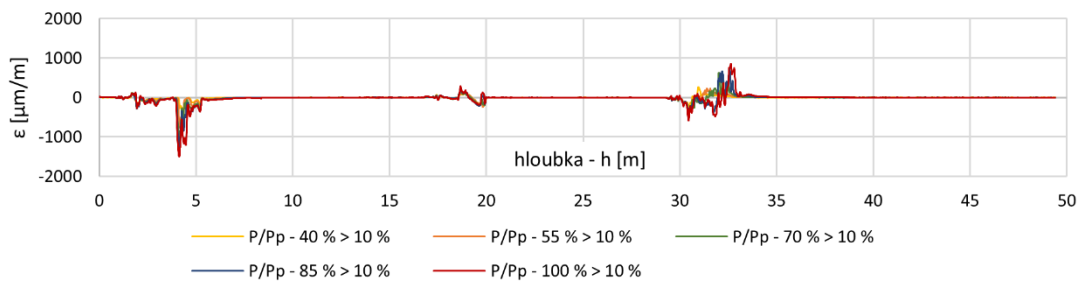
Obr. A-5 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #52, vnitřní injektáž



Obr. A-6 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #52, vnitřní injektáž

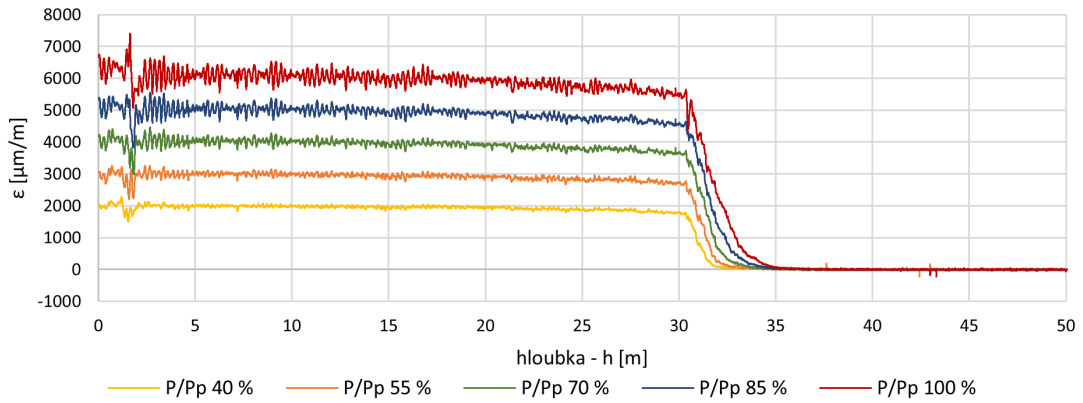


Obr. A-7 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #52, vnější injektáž

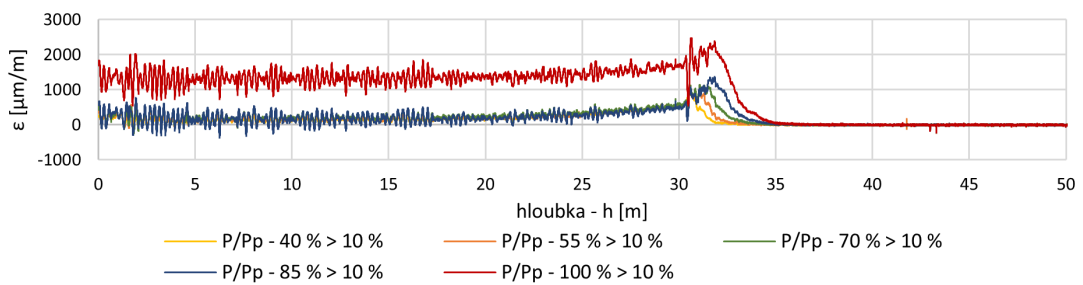


Obr. A-8 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #52, vnější injektáž

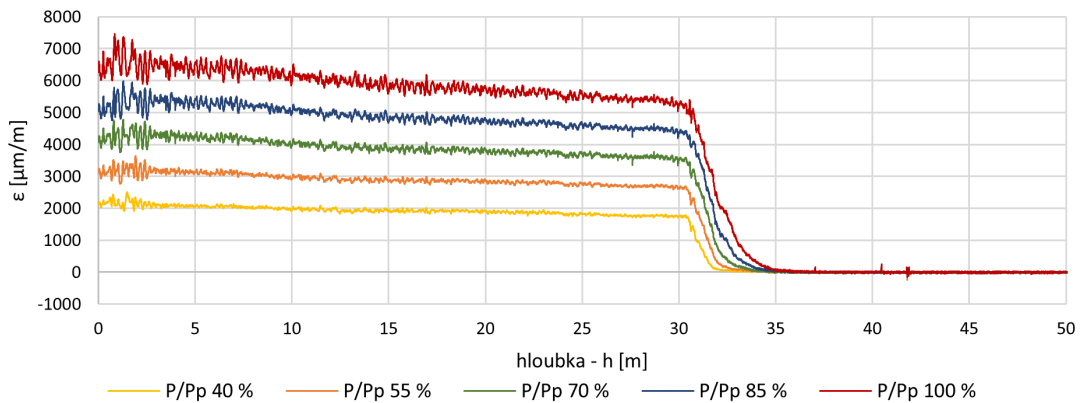
Příloha A



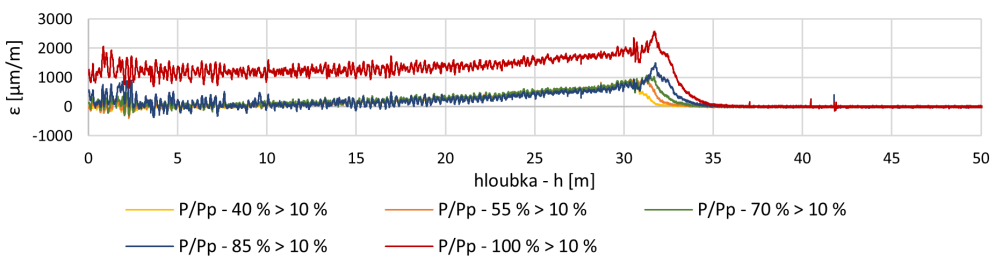
Obr. A-9 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #36, t_1



Obr. A-10 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #36, t_1

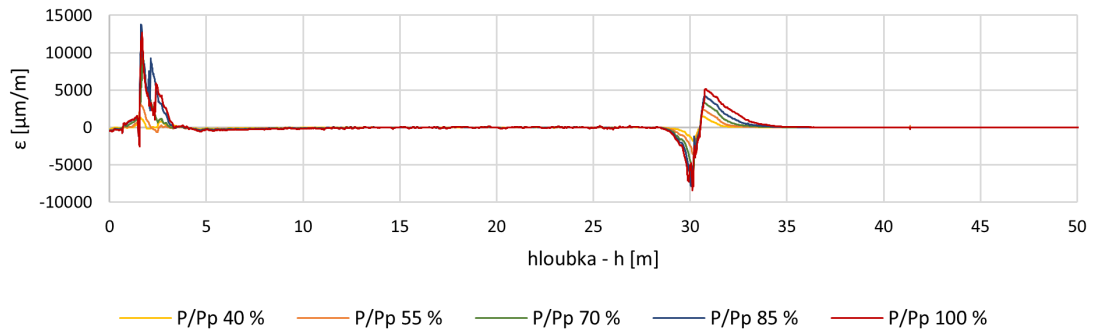


Obr. A-11 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #36, t_2

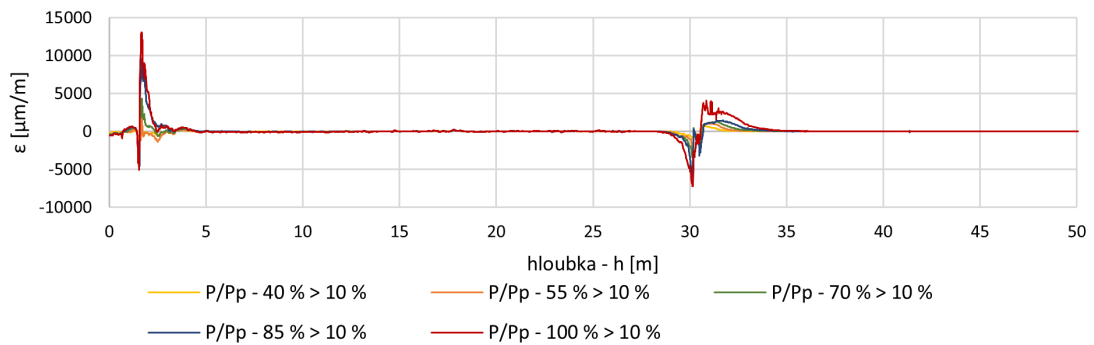


Obr. A-12 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #36, t_2

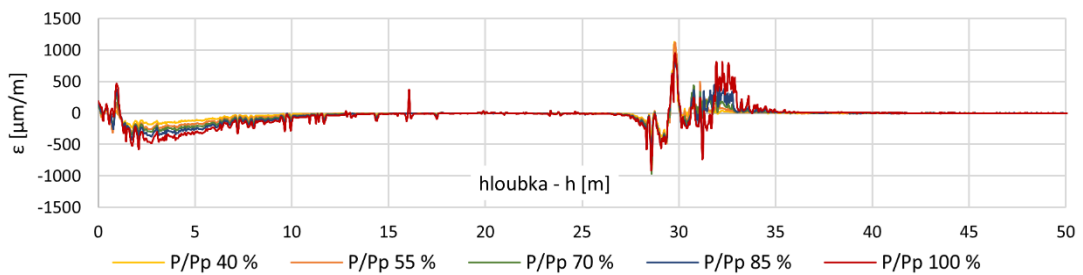
Příloha A



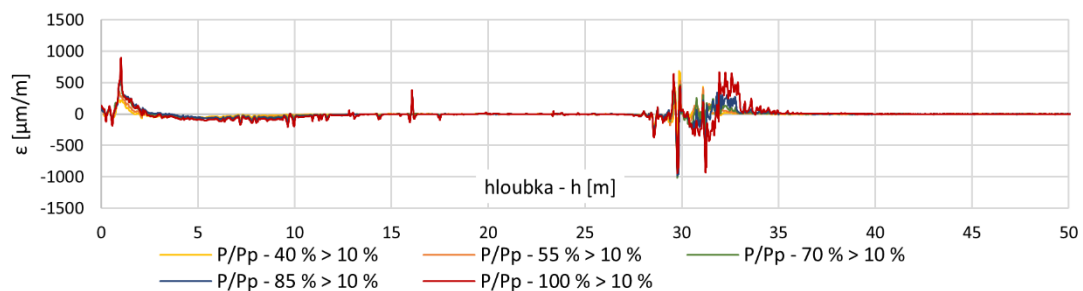
Obr. A-13 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #36, vnitřní injektáž



Obr. A-14 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #36, vnitřní injektáž

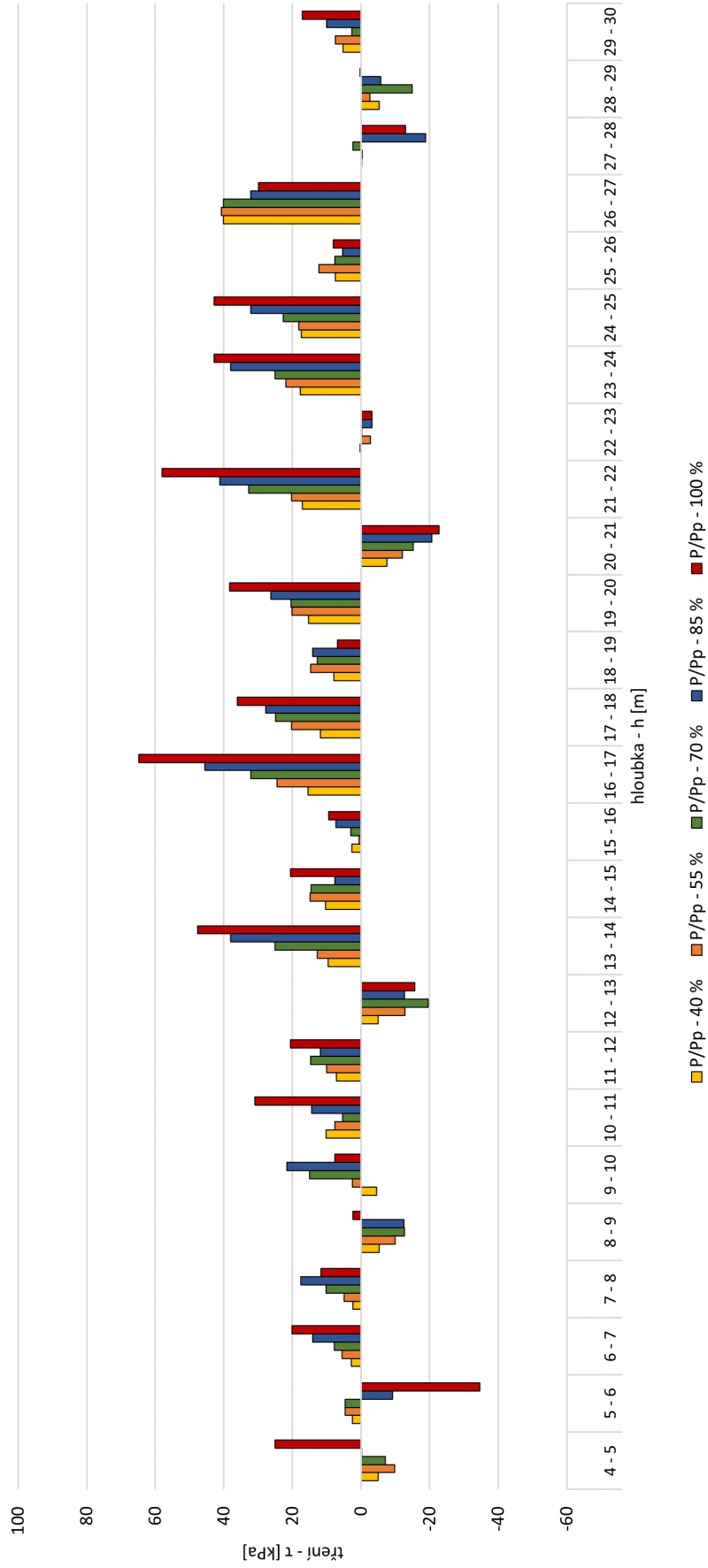


Obr. A-15 Průběh přetvoření; zatěžovací stupně; kotva #36, vnější injektáž



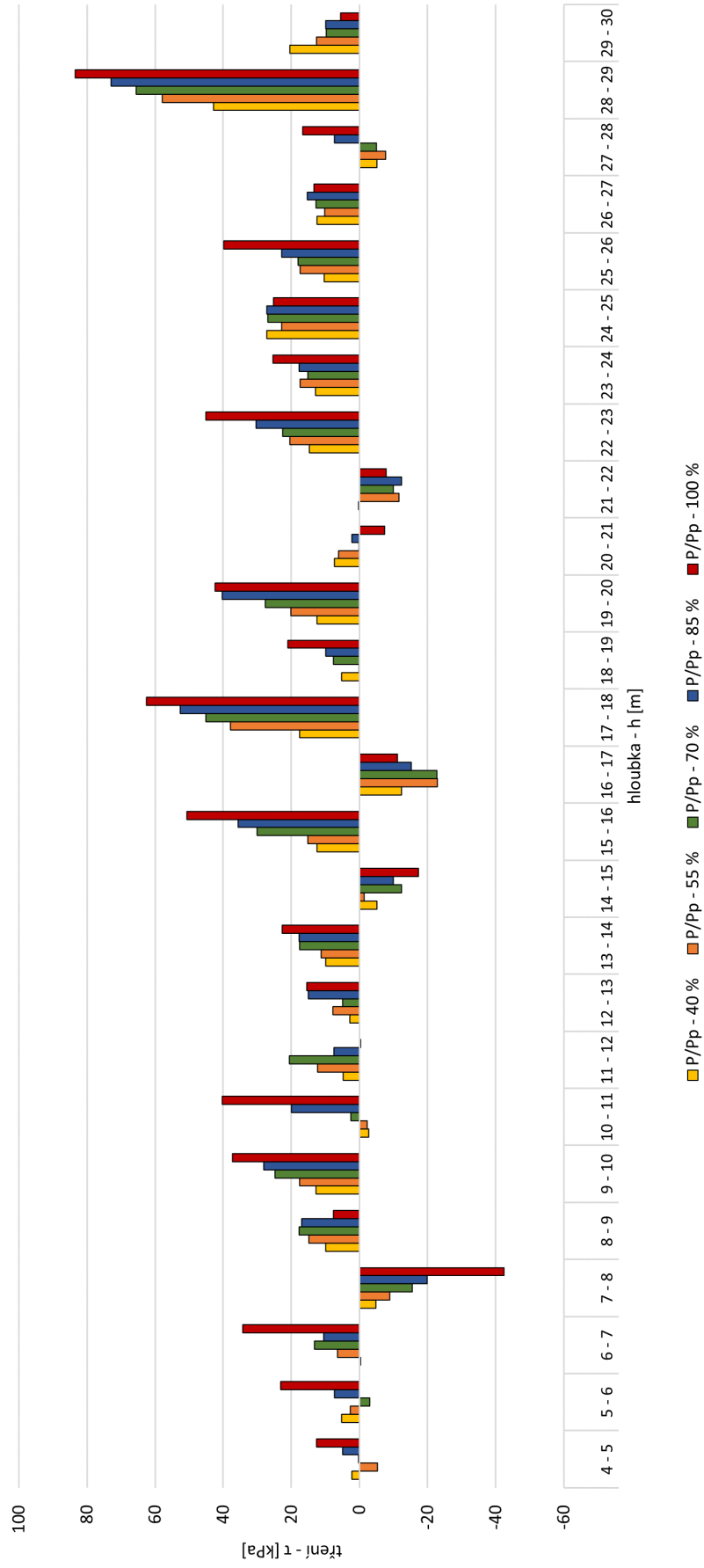
Obr. A-16 Průběh přetvoření; odtěžovací stupně; kotva #36, vnější injektáž

Příloha B



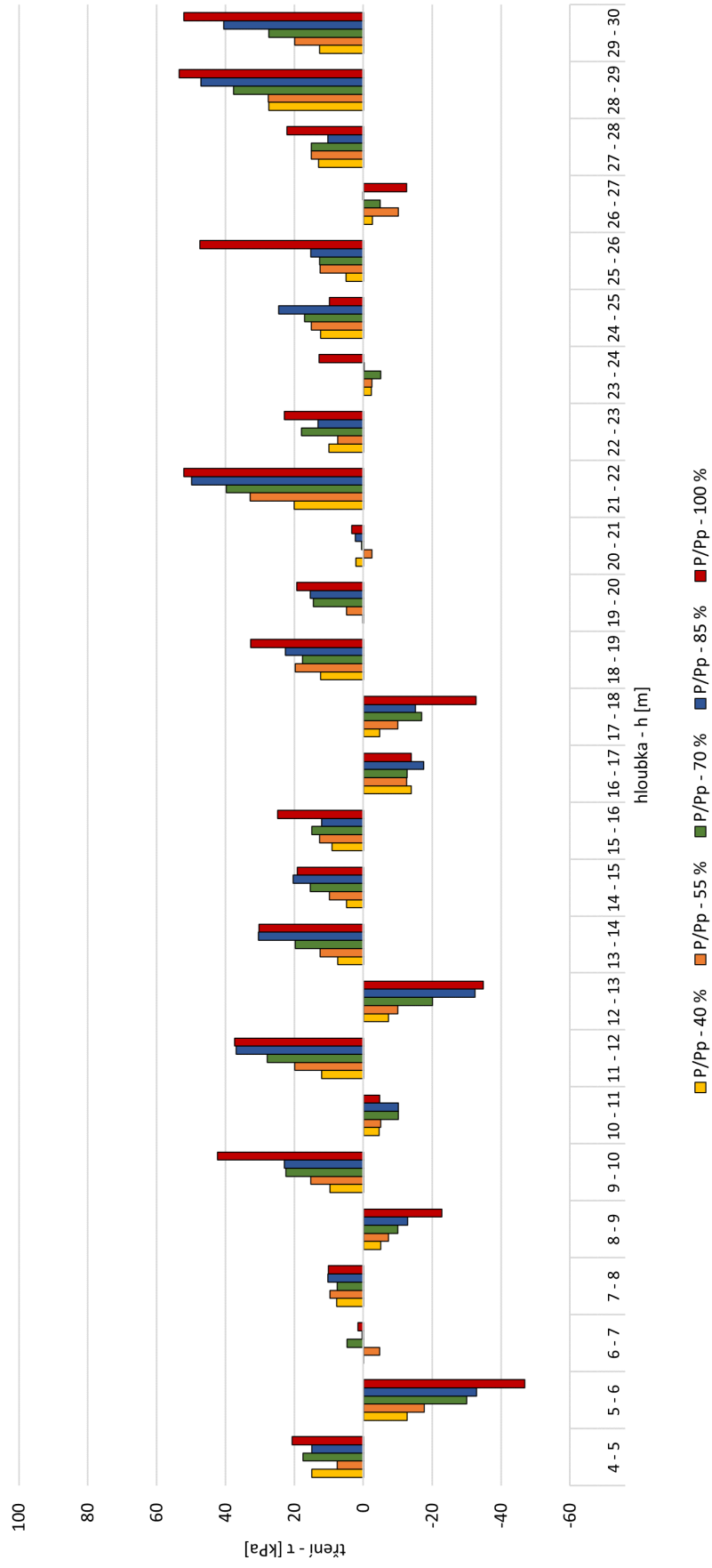
Obr. B-1 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_1 ; $l_i = 1$ m

Příloha B



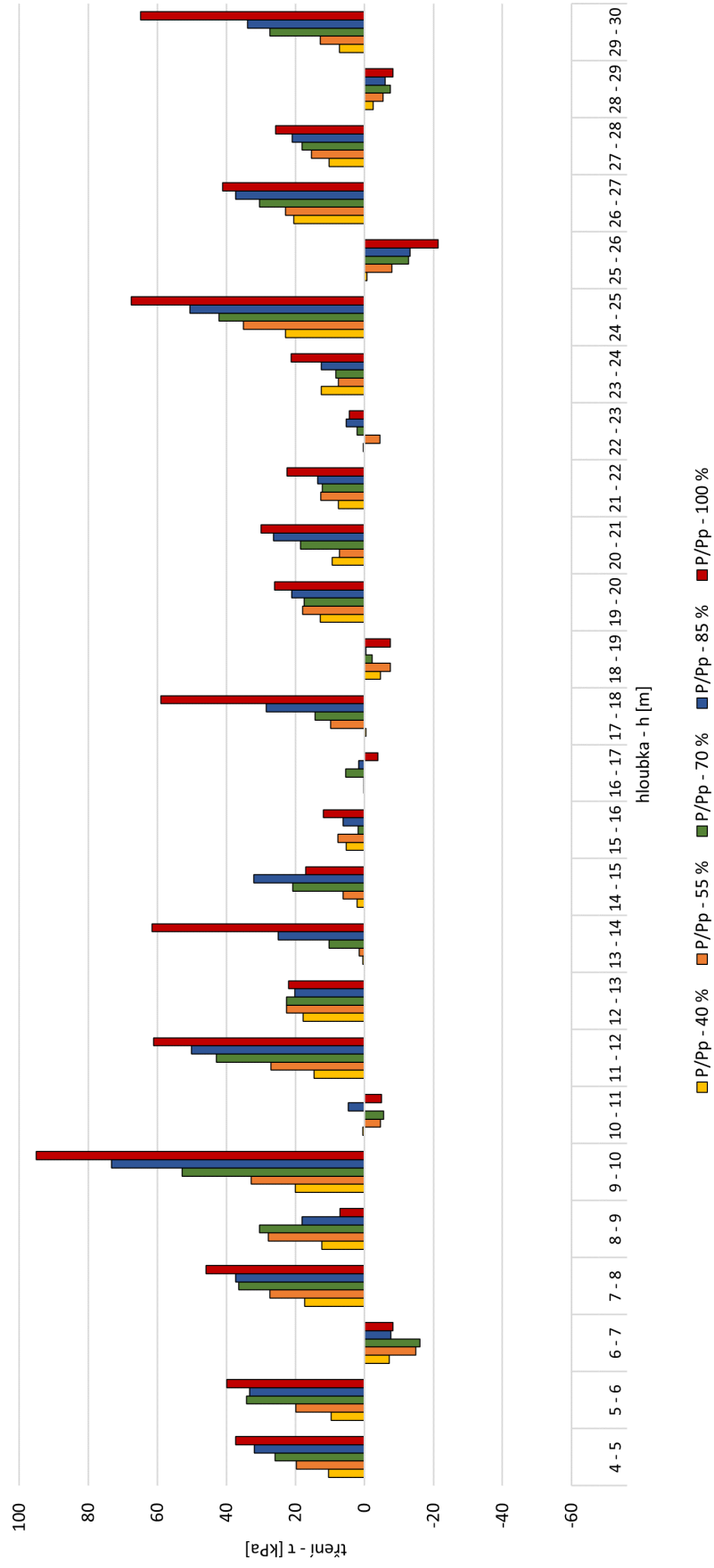
Obr. B-2 Průběh tření τ ; Kotva #52; t_2 ; $l_i = 1$ m

Příloha B



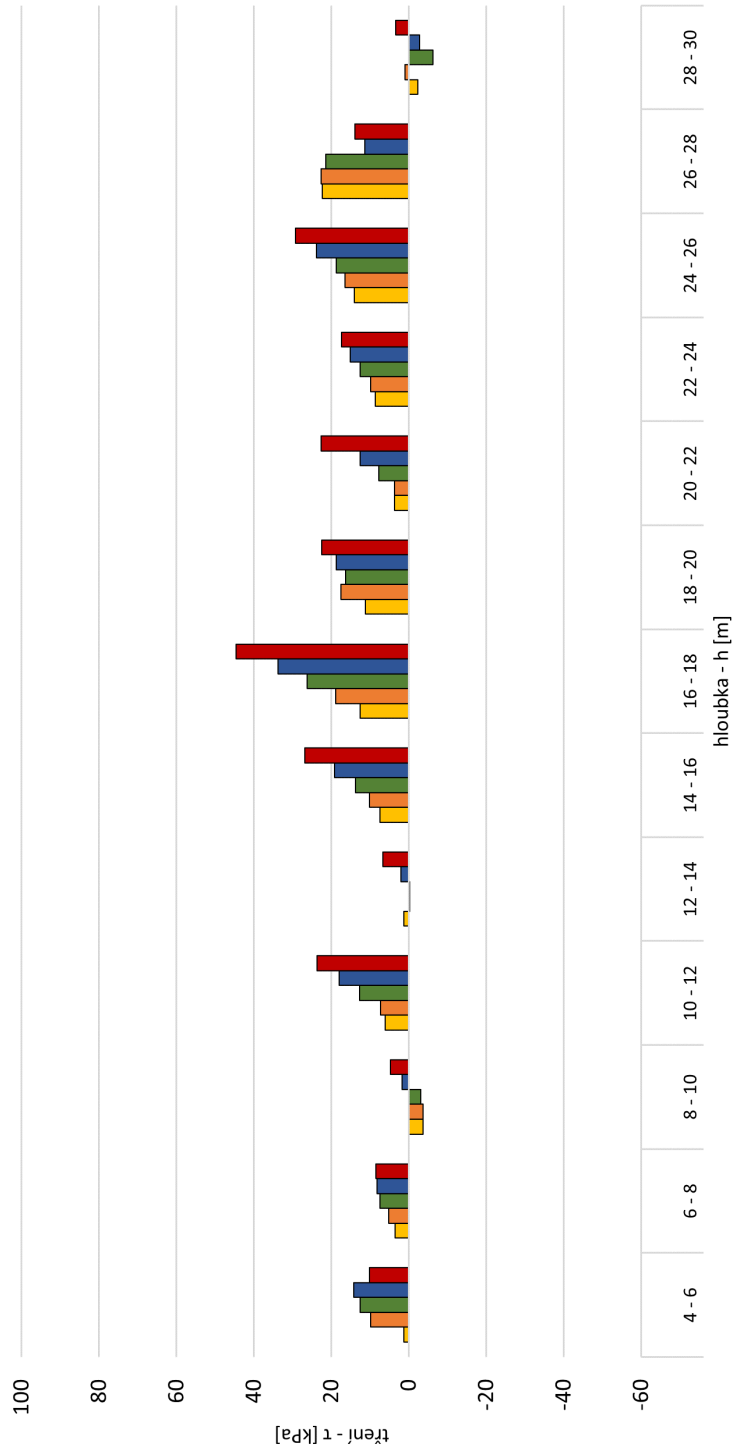
Obr. B-3 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_1 ; $l_i = 1$ m

Příloha B



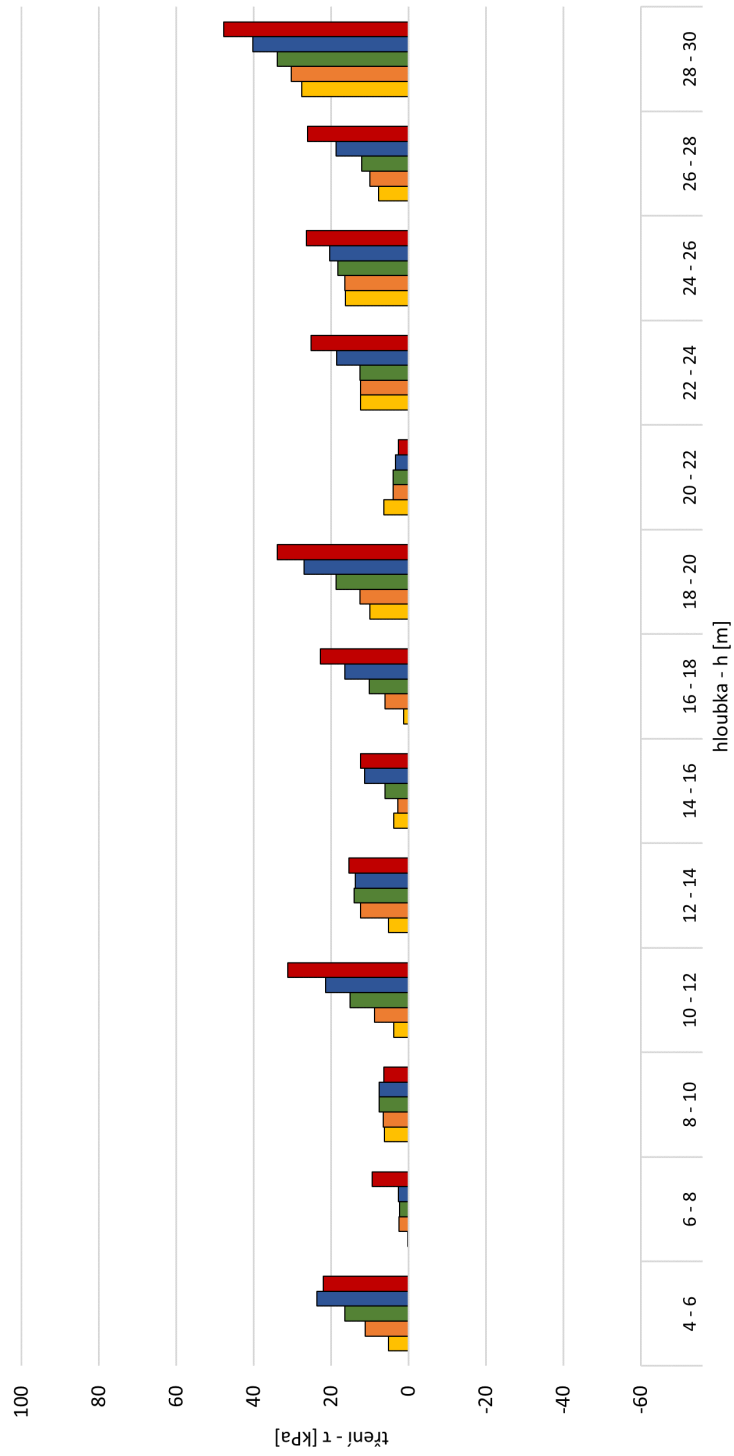
Obr. B-4 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_2 ; $l_i = 1$ m

Příloha B



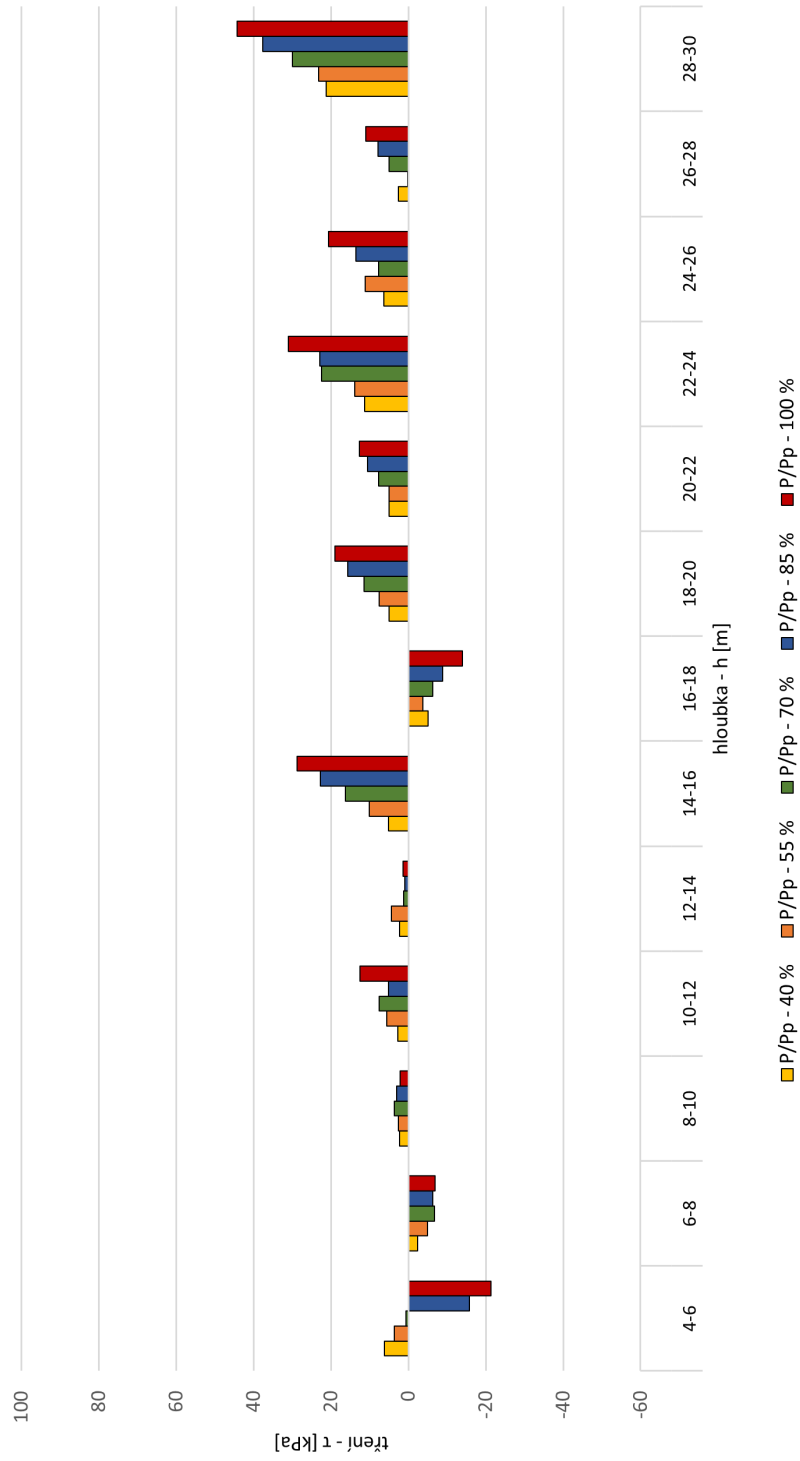
Obr. B-5 Průběh tření τ; Kotva #52, t₁; l_i = 2 m

Příloha B



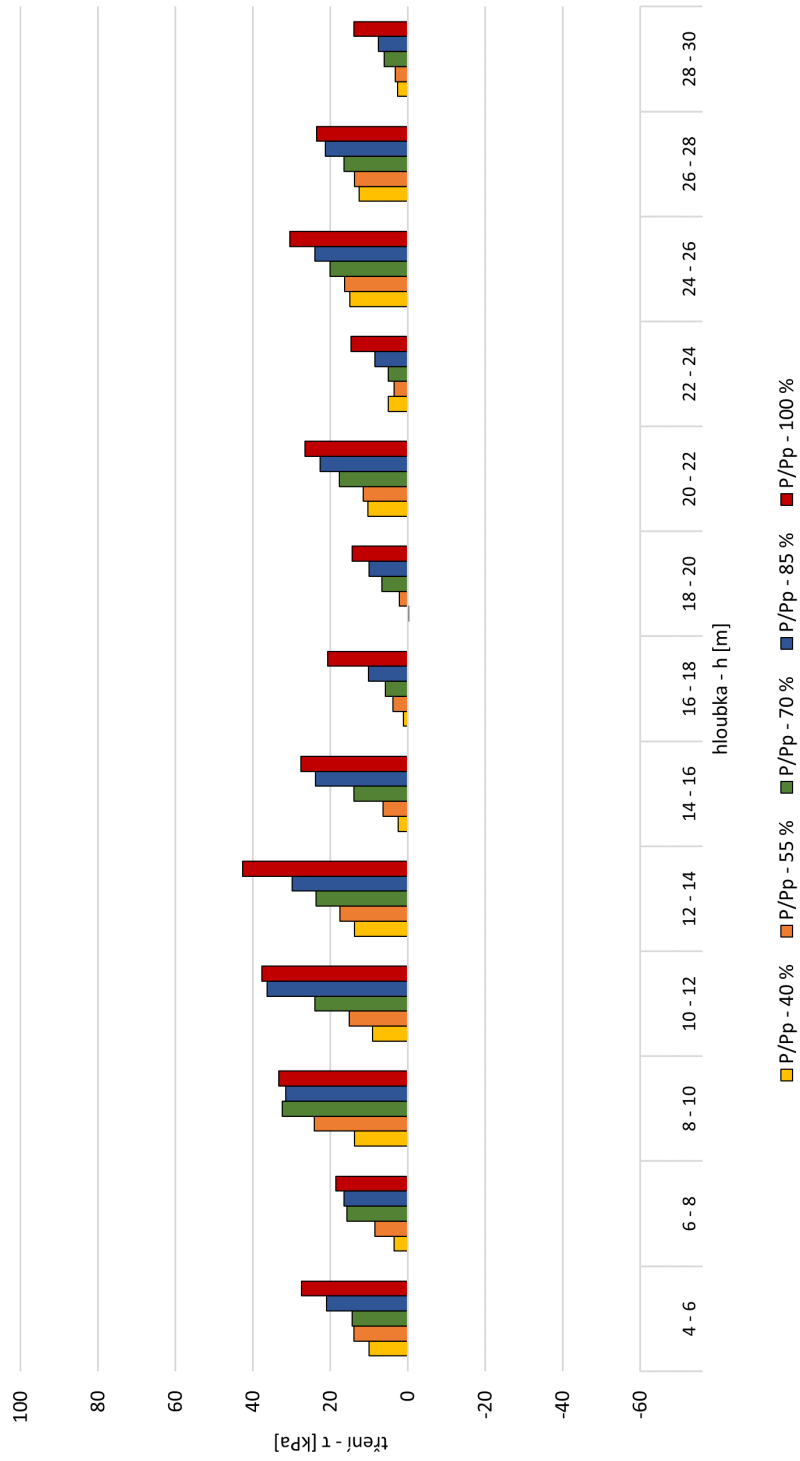
Obr. B-6 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_2 ; $l_i = 2$ m

Příloha B



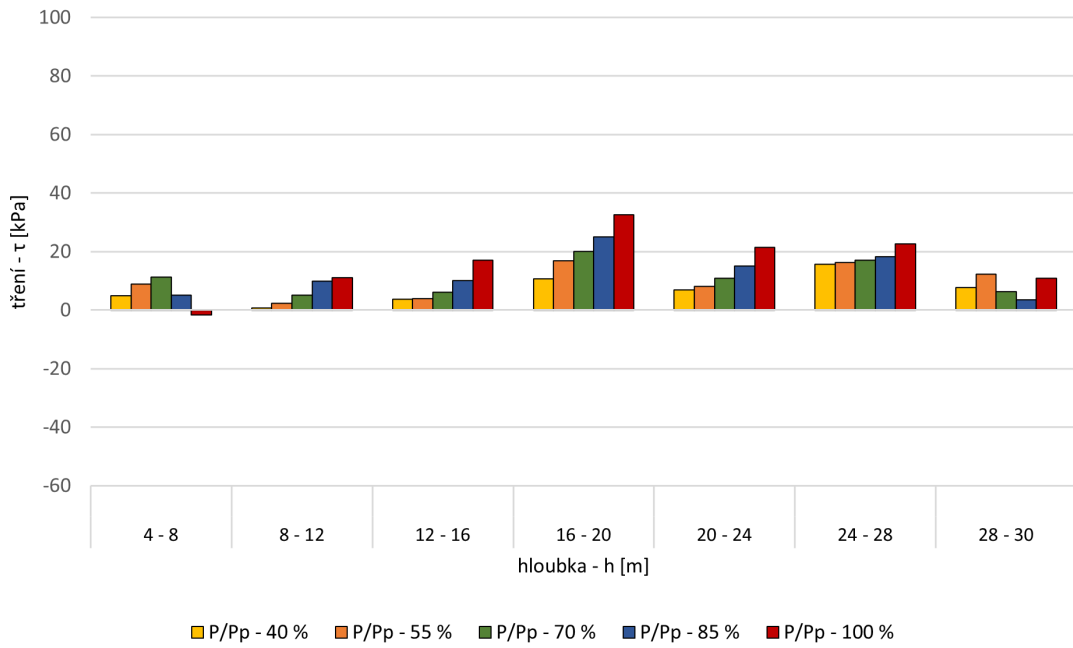
Obr. B-7 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_1 ; $l_i = 2$ m

Příloha B

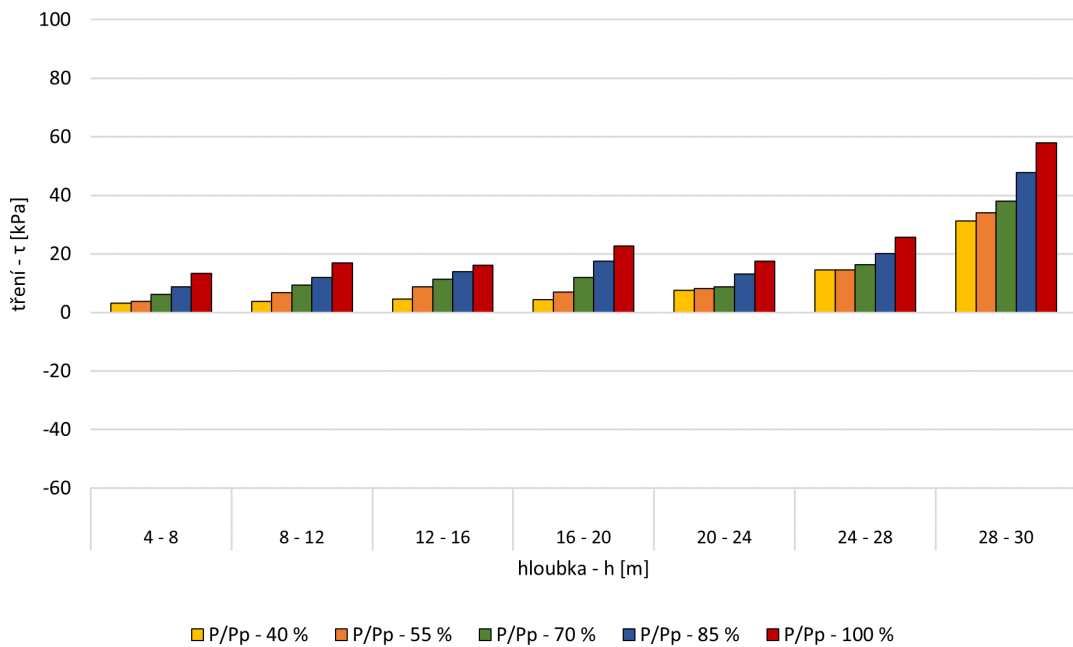


Obr. B-8 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_2 ; $l_i = 2$ m

Příloha B

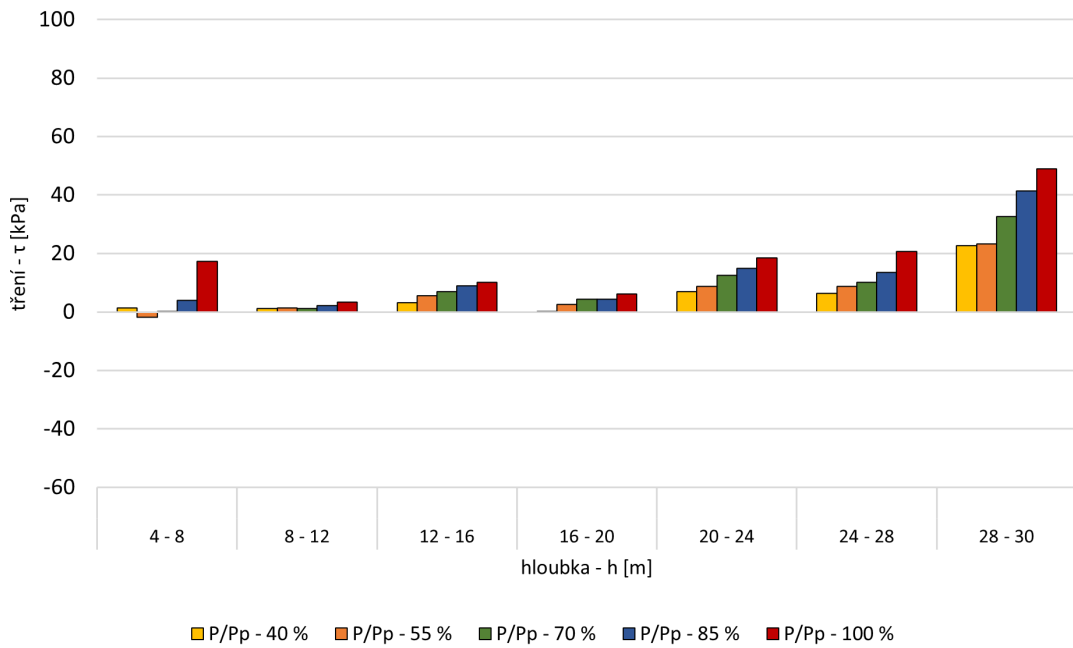


Obr. B-9 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_1 ; $l_i = 4$ m

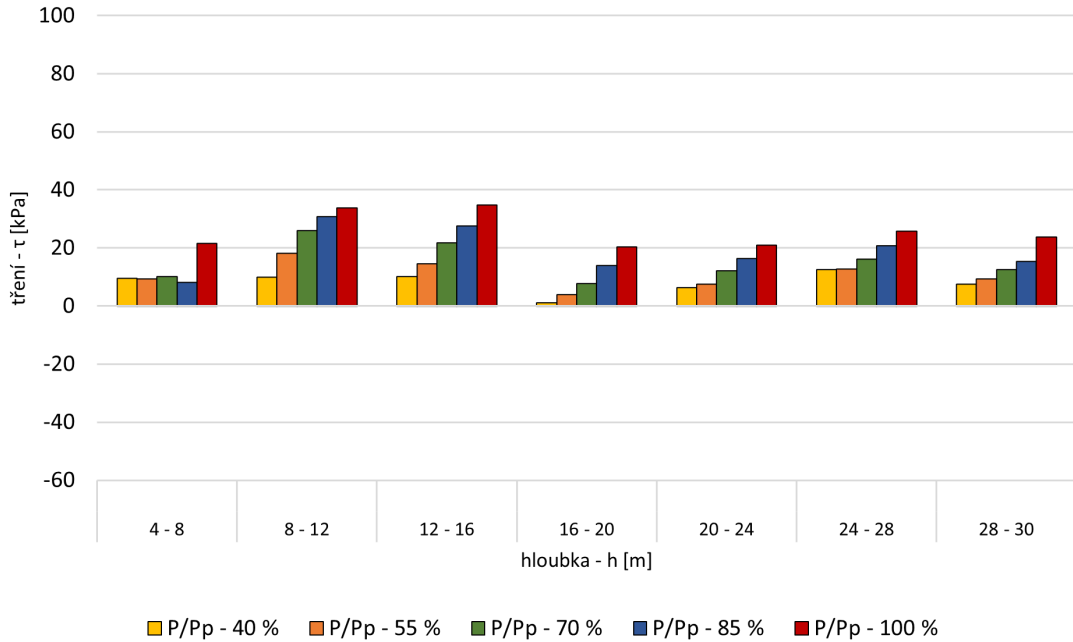


Obr. B-10 Průběh tření τ ; Kotva #52, t_2 ; $l_i = 4$ m

Příloha B

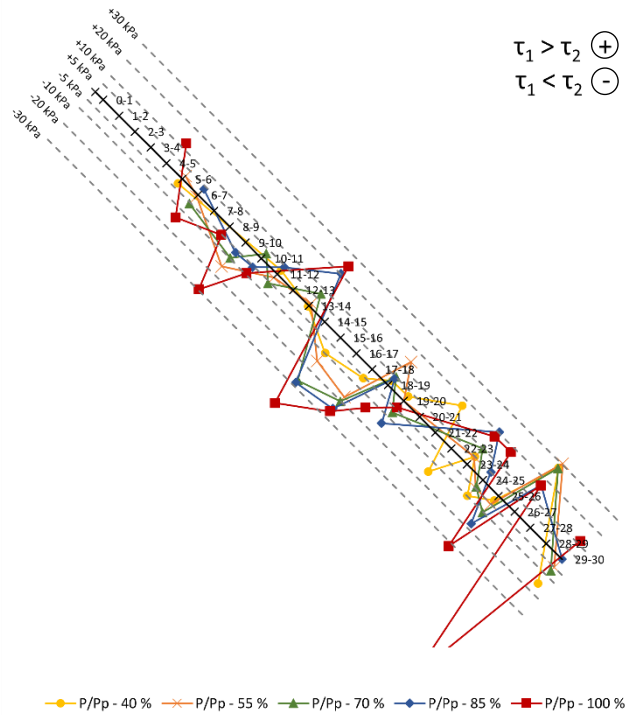


Obr. B-11 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_1 ; $l_i = 4$ m

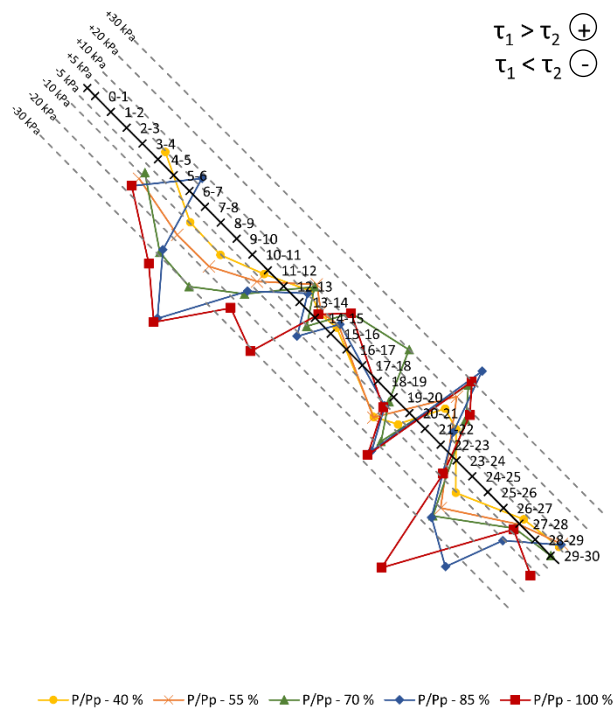


Obr. B-12 Průběh tření τ ; Kotva #36, t_2 ; $l_i = 4$ m

Příloha C

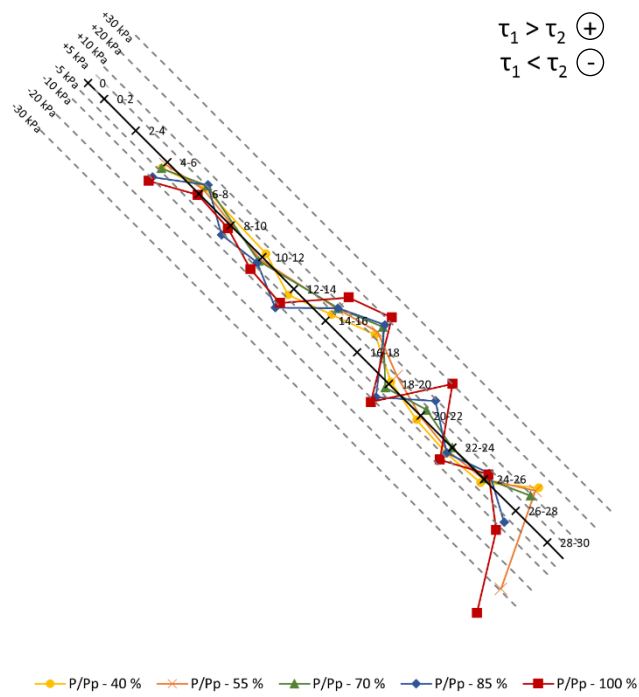


Obr. C-1 Rozdíl tření, kotva #52, $l_i = 1$ m

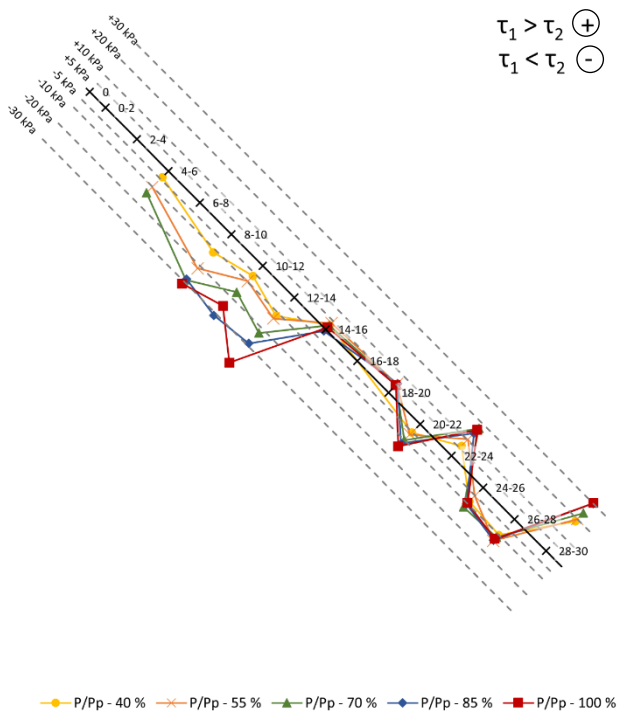


Obr. C-2 Rozdíl tření, kotva #36, $l_i = 1$ m

Příloha C

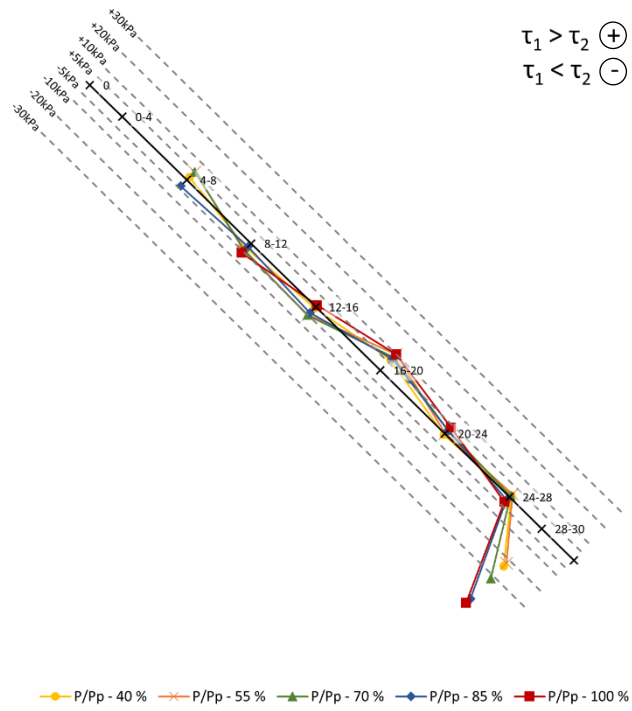


Obr. C-3 Rozdíl tření, kotva #52, $l_i = 2 \text{ m}$

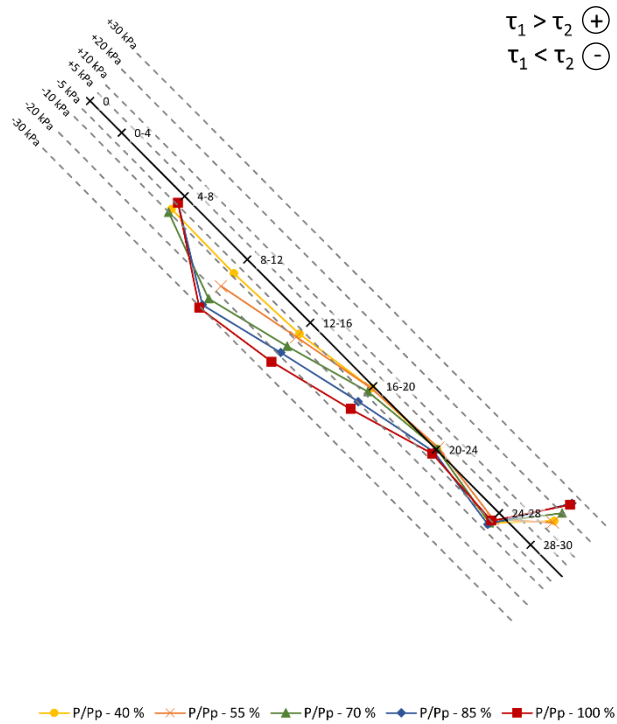


Obr. C-4 Rozdíl tření, kotva #36, $l_i = 2 \text{ m}$

Příloha C

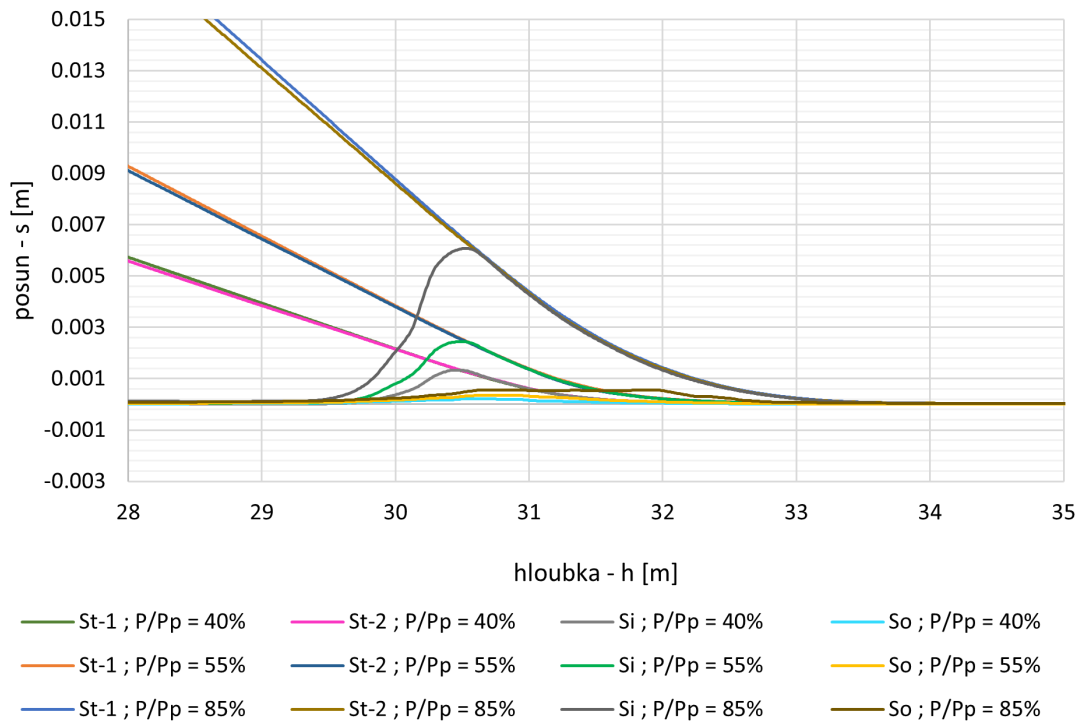


Obr. C-5 Rozdíl tření, kotva #52, $l_i = 4 \text{ m}$

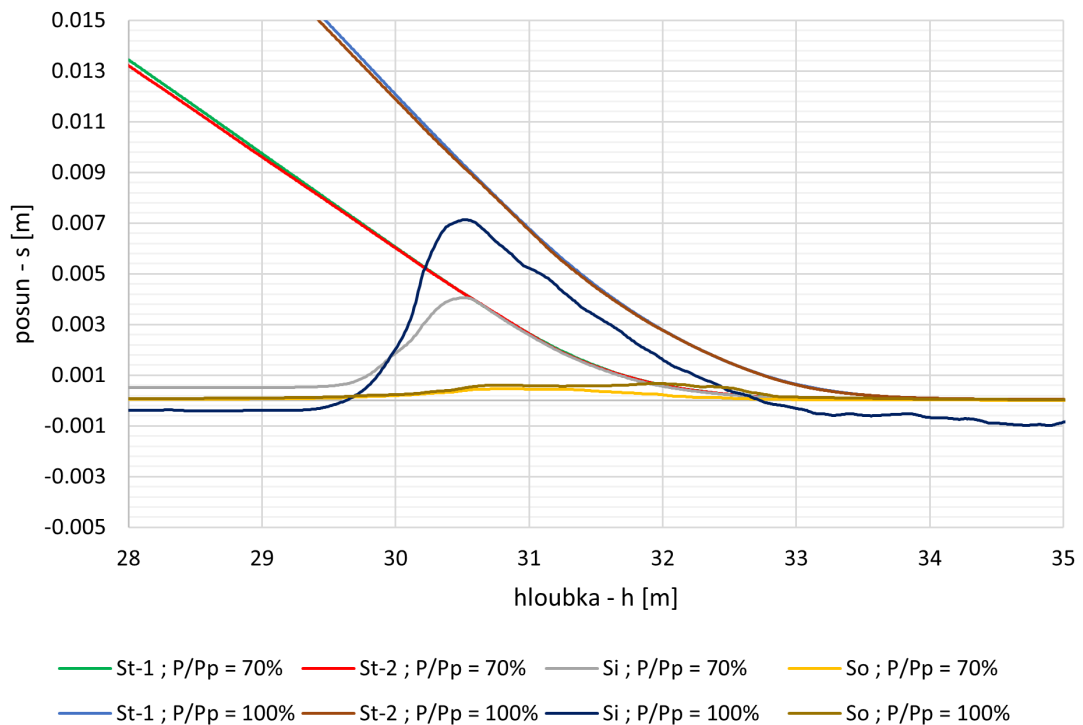


Obr. C-6 Rozdíl tření, kotva #36, $l_i = 4 \text{ m}$

Příloha D

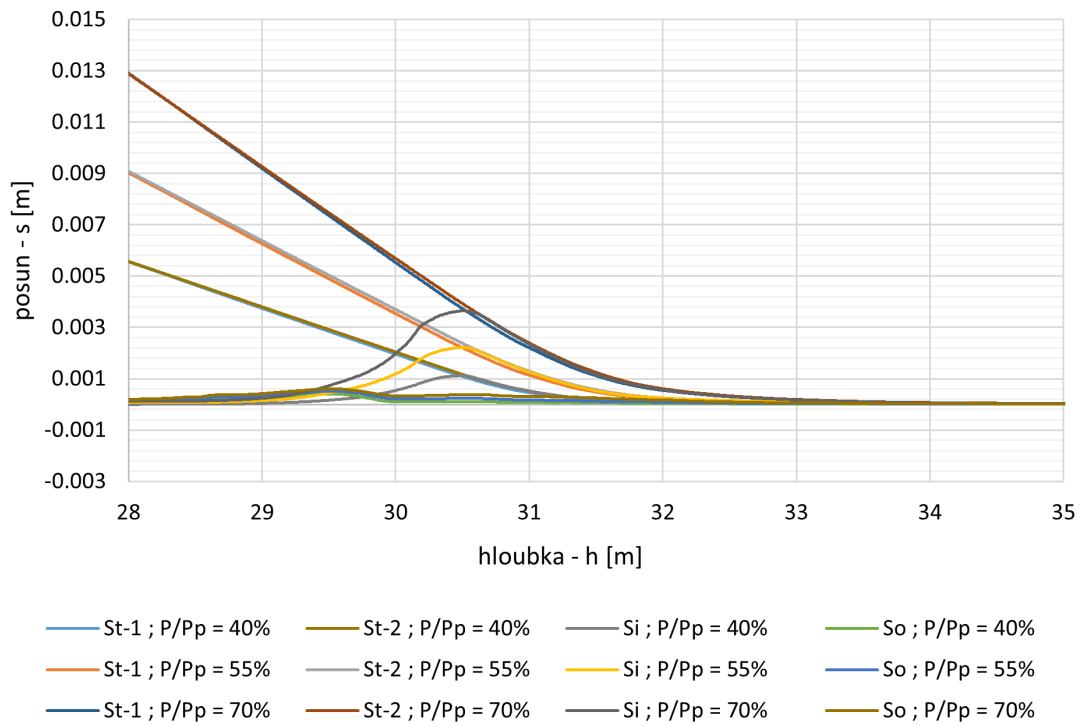


Obr. D-1 Průběhy posunů jednotlivých částí pro zat. stupně 40 %, 55 %, 85 %; kotva #52

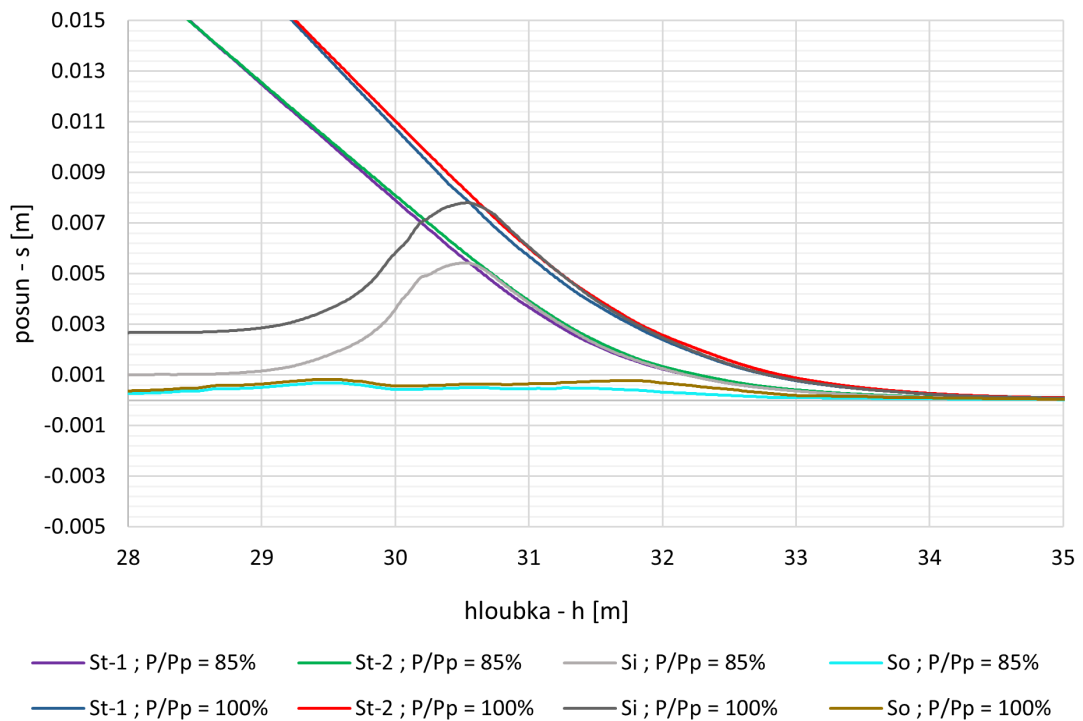


Obr. D-2 Průběhy posunů jednotlivých částí pro zat. stupně 70 %, 100 %; kotva #52

Příloha D



Obr. D-3 Průběhy posunů jednotlivých částí pro zat. stupně 40 %, 55 %, 70 %; kotva #36



Obr. D-4 Průběhy posunů jednotlivých částí pro zat. stupně 85 %, 100 %; kotva #36