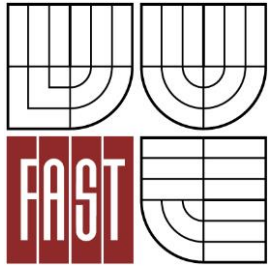




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

1 BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV GEOTECHNIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
2 INSTITUTE OF GEOTECHNICS

## TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ

JET GROUTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

TOMÁŠ KUBÍN

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. VĚRA GLISNÍKOVÁ, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav geotechniky

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Tomáš Kubín
<b>Název</b>	Trysková injektáž
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Věra Glisníková, CSc.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2014
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

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

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

### Podklady a literatura

Podklady budou předány vedoucí bakalářské práce samostatně.

Literatura:

MASOPUST, J.: Speciální zakládání staveb - 1. díl, AN CERM, s.r.o., Brno, 2004.  
ISBN 80-214-2770-1.

MASOPUST, J.: Speciální zakládání staveb - 2. díl, AN CERM, s.r.o., Brno, 2006.  
ISBN 80-7204-489-3.

XANTHAKOS, P.P. et al: Ground Control and Improvement, John Wiley & sons, USA, 1994.

MASOPUST, J.: Navrhování základových a pažicích konstrukcí. Příručka k ČSN EN 1997. Informační centrum ČKAIT, Praha, 2012. ISBN 978-80-87438-31-2.

## **Zásady pro vypracování**

Trysková injektáž je metoda zlepšování vlastností základové půdy založená na rozrušení struktury základové půdy, jejího částečného nahrazení a smíchání základové půdy s cementačním pojivem.

Bakalářská práce se zabývá principem a využitím této metody. Součástí práce je i praktická aplikace.

Při vypracovávání bakalářské práce (BP) vycházejte ze zadaných podkladů, pokynů vedoucího BP a odborné literatury.

## **Struktura bakalářské/diplomové práce**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Věra Glisníková, CSc.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Cílem této práce je popsat tryskovou injektáž. Jsou zde vymezeny základní metody zlepšování zemin a shrnuty možnosti využití tryskové injektáže. Dále se práce zaměřuje na konkrétní stavby a rekonstrukce v Brně, kde byla tato metoda využita. Podrobněji se zabývá rekonstrukcí paláce Chlumeckých, kde byla trysková injektáž použita jako pažení stavební jámy. Součástí práce je numerický model této stavební jámy a porovnání výsledků při použití různých konstitutivních modelů chování zemin.

## **Klíčová slova**

trysková injektáž, zlepšování zemin, numerické modelování, Plaxis, konstitutivní modely

## **Abstract**

The aim of this thesis is to describe jet grouting. There are specified base methods of ground improvement and described possibilities of jet grouting. Furthermore thesis is focused on certain constructions and reconstructions in Brno, where this method was used. In detail it is concerned on reconstruction of the palace of Chlumecky, where jet grouting was used as shoring of foundation pit. Next part of this thesis is a numerical model of this foundation pit and comparison of the results from different constitutive models of soil.

## **Keywords**

jet grouting, ground improvement, numerical modeling, Plaxis, constitutive models

...

## **Bibliografická citace VŠKP**

Tomáš Kubín *Trysková injektáž*. Brno, 2015. 63 s., 30 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Věra Glisníková, CSc.

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21.5.2015

.....  
podpis autora  
Tomáš Kubín

## **Poděkování:**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce, paní Ing. Věře Glisníkové CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Karlu Vítkovi za poskytnutí podkladů a nakonec panu Ing. Juraji Chalmovskému za praktické rady při numerickém modelování konstrukce.

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Zlepšování základové půdy</b> .....	<b>4</b>
2.1	Zhutňování .....	5
2.2	Výměna základové půdy .....	6
2.3	Stabilizace zemin .....	7
2.4	Injektování.....	8
2.5	Snižování vlhkosti .....	10
2.6	Zmrazování zemin.....	11
2.7	Vypalování zeminy.....	12
<b>3</b>	<b>Trysková injektáž</b> .....	<b>13</b>
3.1	<b>Historie tryskové injektáže</b> .....	<b>13</b>
3.1.1	Vývoj klasické injektáže .....	13
3.1.2	Vývoj tryskové injektáže .....	15
3.2	<b>Technologie tryskové injektáže</b> .....	<b>16</b>
3.2.1	Dělení podle metody provádění .....	16
3.2.2	Technologický postup .....	18
3.2.3	Vývoj a budoucnost tryskové injektáže .....	20
3.3	<b>Oblast využití tryskové injektáže</b> .....	<b>20</b>
3.3.1	Oblast použití metody .....	22
3.3.2	Vztah pevnosti a druhu tryskové injektáže .....	23
3.3.3	Konstrukce z tryskové injektáže.....	24
3.3.4	Výhody tryskové injektáže .....	24
<b>4</b>	<b>Využití tryskové injektáže v praxi</b> .....	<b>25</b>
4.1	<b>Geologie širšího okolí Brna</b> .....	<b>25</b>
4.2	<b>Dům č. 16 na Mendlově náměstí</b> .....	<b>25</b>
4.2.1	Širší souvislosti.....	25
4.2.2	Geologie základové půdy .....	26
4.2.3	Pravděpodobné příčiny poruch domu .....	27



4.2.4	Sanace tryskovou injektáží .....	28
<b>4.3</b>	<b>CARLA – Centrum podpory humanitních věd MU .....</b>	<b>29</b>
4.3.1	Širší souvislosti.....	29
4.3.2	Základové poměry .....	29
4.3.3	Zajištění stavební jámy .....	30
4.3.4	Podchycení tryskovou injektáží.....	30
<b>5</b>	<b>Palác Chlumeckých .....</b>	<b>32</b>
<b>5.1</b>	<b>Informace o objektu.....</b>	<b>32</b>
5.1.1	Historie Paláce Chlumeckých .....	32
5.1.2	Popis objektu před rekonstrukcí.....	32
5.1.3	Geologie základové půdy .....	33
5.1.4	Rozsah rekonstrukce .....	33
<b>5.2</b>	<b>Numerický model.....</b>	<b>35</b>
5.2.1	Zjednodušení modelu .....	35
5.2.2	Geometrie a prvky konstrukce .....	36
5.2.1	Vstupní parametry .....	37
5.2.2	Fáze výpočtu .....	39
<b>5.3</b>	<b>Výstupy .....</b>	<b>39</b>
5.3.1	Vnitřní síly.....	39
5.3.2	Vodorovné deformace .....	41
5.3.3	Svislé deformace .....	44
5.3.4	Plastické body .....	46
<b>5.4</b>	<b>Shrnutí výsledků.....</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>50</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>51</b>
	<b>Seznam použitých zkratk .....</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam použitých obrázků .....</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam použitých tabulek .....</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>56</b>

# 1 ÚVOD

Náplní předložené bakalářské práce je popis technologie tryskové injektáže. Jedná se o velmi univerzální metodu použitelnou při řešení mnoha různých geotechnických problémů. Nicméně je třeba znát její možnosti a limity. Při nerespektování technologického postupu se nemusí dostavit očekávaný výsledek, a pak může být neprávem považovaná za nevhodnou. Jedná se o relativně mladý a dynamicky se rozvíjející způsob zlepšování základové půdy. V poslední době vzniklo více studií, které se zabývají interakcí mezi tryskovou injektáží a různými druhy zeminy. Zatím se však nedostaly do povědomí praktikujících inženýrů a jsou známy spíše jen odborníkům z akademických kruhů.

Téma tryskové injektáže jsem se rozhodl zpracovat z toho důvodu, že se jedná o mladou a rychle se rozvíjející součást zakládání staveb, o které toho zatím nebylo příliš napsáno. V teoretické části je nejprve obecně pojednáno o základních způsobech zlepšování zemin. Dále se práce soustředí na tryskovou injektáž. Je zde popsána její historie, metody provádění, potřebné vybavení a také oblasti, ve kterých je vhodné tuto metodu použít. Praktická část se již zabývá konkrétními aplikacemi tryskové injektáže v Brně. Hlavní pozornost je věnována rekonstrukci paláce Chlumeckých, kde byla pomocí tryskové injektáže pažená stavení jáma a zároveň sloužila jako podchycení budovy. Součástí práce je numerický model stavební jámy vytvořený v programu Plaxis. Pro model byly použity tři různé konstitutivní modely chování zemin a nakonec byly porovnány výsledné deformace a vnitřní síly sloupů tryskové injektáže.

## 2 ZLEPŠOVÁNÍ ZÁKLADOVÉ PŮDY

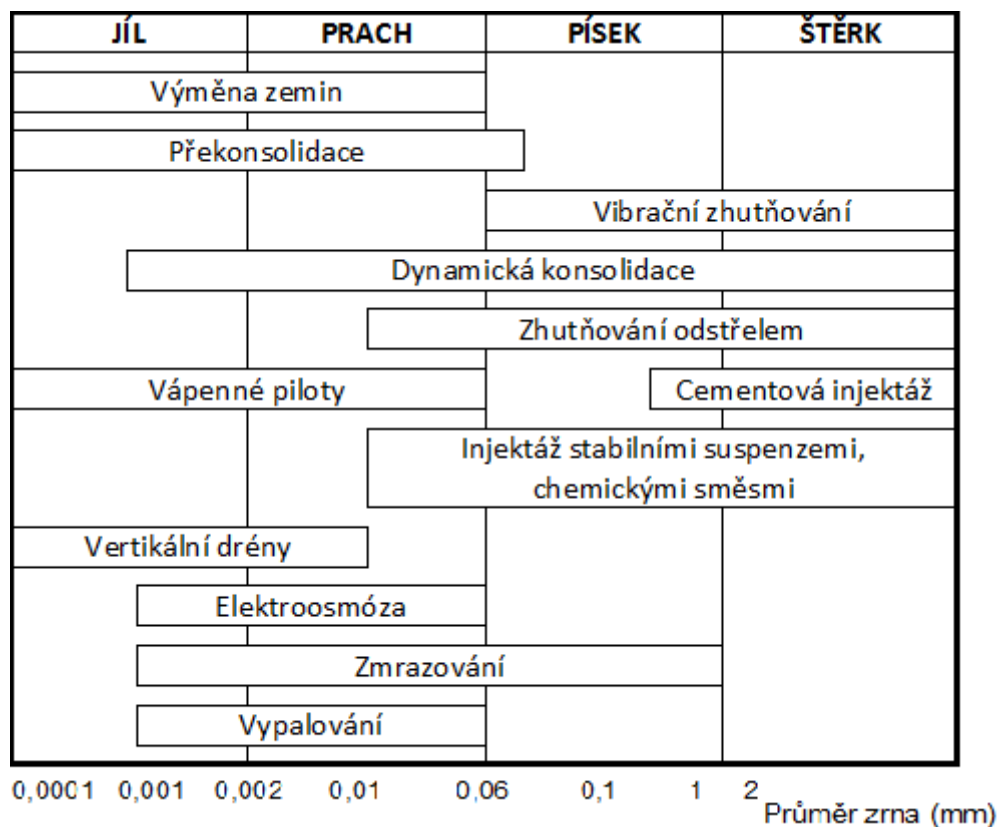
Zlepšování vlastností zemin patří mezi nejdynamičtější se rozvíjející oblast zakládání staveb. Pojem zlepšování vlastností zemin zahrnuje takové technické zásahy do geologického prostředí, ať už přírodního nebo umělého, jejichž cílem je zvýšení únosnosti podloží, dosažení rovnoměrného sedání pod celým objektem, snížení velikosti sedání, urychlení konsolidace, snížení propustnosti zemin, účelnější vytváření stavebních jam, apod. Výběr způsobu zlepšování závisí na požadavku změny vlastností a na druhu stavby. Nesmíme zapomenout ani na ekonomickou efektivitu metody pro řešení daného problému. Úspěch způsobu zlepšování závisí na správném návrhu metody zlepšení, dodržení technologického postupu a kontrole realizace.

Základní metody zlepšování jsou (Obrázek 2-1):

- Zhutňování zemin
- Výměna základové půdy
- Stabilizace zemin
- Injektování zemin
- Snižování vlhkosti
- Vápenné piloty
- Zmrazování zemin
- Vypalování zemin

Obecně se nedá stanovit způsob zakládání v neúnosném podloží. Výběr vhodné metody závisí na mnoha faktorech:

- druh zeminy a její konkrétní vlastnosti
- požadovaná půdorysná plocha prostoru zlepšení
- potřebná tloušťka zlepšované zeminy
- druh stavby a jejího zatížení
- přípustná deformace konstrukce
- dostupnost materiálů a technologických zařízení
- okolní zástavba
- místní zkušenosti
- hospodárnost řešení



Obrázek 2-1: Hranice použitelnosti metod zlepšování [1]

Zásadní kritérium pro výběr vhodné metody je dodržení konstrukčních požadavků (únosnost a přetvárnost zemin), zároveň by však měly být splněny ekonomické podmínky. Výhodou většiny metod zlepšování je nízká materiálová náročnost, technologická rozmanitost v konkrétních podmínkách, zrychlení doby výstavby a ekonomická výhodnost oproti tradičním způsobům výstavby. [1]

## 2.1 Zhutňování

Cílem zhutňování je zvýšení smykové pevnosti a snížení stlačitelnosti a propustnosti zeminy. Je možné zhutňovat všechny druhy zemin. Efektivita zhutňování závisí na správné volbě zhutňovací metody podle druhu zeminy. Vhodné metody pro syké zeminy jsou: válcování vibračními válci, ubíjení, dynamická konsolidace, hloubková vibrace, prolévání vodou. Pro soudržné zeminy se hodí: válcování, dynamická konsolidace.

Nejstarším způsobem zhutňování je přitížení násypem. Tento postup je však časově a materiálově náročný. Nejrozšířenější metodou zhutňování je válcování. Na tuto metodu

je potřeba dostatečný prostor, v blízkosti překážek a objektů musí být nahrazena jiným postupem. Válce můžeme dělit podle pohonu (samohybné, tažené), podle zhutňovacích účinků (statické, vibrační) a z hlediska konstrukce (hladké, ježkové, mřížové a pneumatické). Ve stísněných podmínkách se používají pěchovadla, známá pod pojmem žáby. Jejich účinek je převážně dynamický. Dieselová varianta pěchovadla poskakuje po povrchu a elektrická má spíše vibrační účinek.

Další metodou je dynamická konsolidace. Patří také k velmi starým zhutňovacím metodám. Její princip spočívá v pádu závaží z výšky. Závaží má hmotnost obvykle desítky tun a padá z výšky 12 – 20 m. Zhutňování většinou probíhá v několika cyklech s jedno až čtyřtydenními přestávkami. Mezi další způsoby zhutňování patří hloubková vibrace. Nejvýhodnější použití této metody je v kyprých písčítých a štěrkovitých zeminách větší mocnosti. Hloubková vibrace je buď bez přidání dalšího materiálu anebo s přidáním štěrkovité zeminy nebo betonu. Vodorovná vibrace se nazývá vibroflotace.

Další metodou, nepříliš frekventovanou, je hydromechanické zhutňování. Jedná se o prolévání zeminy vodou. Tímto způsobem se dá odstranit například prosedavost spraší. Zhutňování odstřelem patří mezi další zhutňovací metody. Používá se zřídka kvůli přísným bezpečnostním předpisům, protože se zde pracuje s trhavinami. Výbuch nálože způsobí v soudržné zemině válcovou dutinu a ztekucený písek v nadloží do té dutiny vteče a vytvoří v ní pískový pilíř.

Po použití těchto hutnicích metod by měla následovat kontrola kvality zhutnění. Zemina je zhutněna, jestliže dosáhla požadované míry zhutnění, např.: objemovou tíhu předepsané míry podle Proctorovy zkoušky, rovnovážnou objemovou tíhu, požadovanou relativní ulehlost nebo předepsanou hodnotu modulu deformace. Nejběžnějším kritériem zhutnění zeminy je Proctorova zkouška. Objemová tíha velkých zemních konstrukcí ze stejnorodých zemin se může kontrolovat pomocí radiometrických metod. Tyto zkoušky však nejsou natolik přesné jako klasické metody.

[1]

## **2.2 Výměna základové půdy**

Mezi klasické způsoby zlepšování zemin patří výměna základové půdy. Jedná se o relativně jednoduchý a bezpečný způsob zlepšování. Podle rozsahu můžeme rozdělit na: *podšyp* (vrstva štěrku pod plošným základem, tloušťka obvykle do 0,2 m, chrání

podloží před rozbředáním a urychluje konsolidaci), *plombu* (výměna zeminy pod částí základů, umožnění použití stejné technologie na celé základy nebo zamezení změně rozměrů základů, operativní řešení při nepředvídaných geologických podmínkách), *polštář* (náhrada neúnosné zeminy pod celým plošným základem, polštáře roznášecí a vyrovnávací).

Roznášecí polštáře umožní zmenšení sedání a zvýší únosnost podloží. Dovolí zmenšit hloubku založení a pomůžou odvodnit nasycené jílovité zeminy pod polštářem a urychlí tím konsolidaci. Obvykle se dělají do tloušťky 2 m, při větší výšce již ztrácejí ekonomické výhody. Vhodným materiálem pro roznášecí polštáře je štěrk nebo písek bez příměsí jemnozrnných zemin.

Vyrovnávací polštáře se využívají, když je třeba zajistit rovnoměrné sedání konstrukce. Taková situace zpravidla nastane, když část objektu leží na nestlačitelném (skalním) podloží. Ta část konstrukce, která je na skále, se podsype stlačitelnou zeminou (hlínou) a tím se zajistí potřebné sednutí. Při zakládání dvou objektů umístěných těsně vedle sebe na silně stlačitelných zeminách vzniká problém ve střední části, kde se kvůli zvýšenému zatížení zvýší i sednutí a budovy se nakloní k sobě. Tento problém je možné vyřešit proměnnou tloušťkou vyrovnávacího polštáře, který má největší výšku na rozhraní obou budov. Sedání je pak rovnoměrné. [1]

### **2.3 Stabilizace zemin**

Tato metoda spočívá v míchání zemin. Hlavní oblast využití stabilizace zemin je v dopravních stavbách. Tímto postupem se snažíme zlepšit mechanické parametry, hlavně pevnost a zabránit namrzavosti. Stabilizovat je možné většinu zemin. Neměly by však obsahovat zrna, která jsou větší jak 45 mm. Dále by také měly mít alespoň 20% zrn menších než 2 mm a neměly by obsahovat významnější příměsí organických látek. Ke stabilizaci můžeme použít jiné zeminu, hydraulická pojiva, bitumeny, případně chemické látky.

Jinou zeminou se stabilizují jemnozrnné zeminy bez příměsí hrubších frakcí, které jsou špatně zpracovatelné, a jejich pevnost výrazně závisí na vlhkosti. Pokud se smíchá soudržná zemina se sypkou v takovém poměru, aby jemná zrna vyplnila mezery mezi hrubšími, tak vznikne zemina s velkou pevností, malou smrštitelností a za deště nerozbředá.

Ke stabilizaci hydraulickým pojivem se používá převážně cement. Zemina se rozdrobí, přimíchá se k ní cement v požadovaném množství, zvlhčí se na optimální vlhkost a zhutní se válcováním. Stabilizace cementem není vhodná pro příliš jemnozrnné zeminy. Nežádoucí jsou také organické příměsi. Při vyšším obsahu jílovitých částí je třeba nejprve přidat vápno a později cement. Pro jemnozrnné zeminy s vysokou vlhkostí se používá nehašené vápno a pro zeminy, které je třeba dovlhčovat, je vhodný vápenný hydrát. Část cementu je také možné nahradit popílkem, který je schopný zneutralizovat kyselou zeminu a je levnější než cement. Po rozprostření cementu je třeba směs zhutnit do 6 hodin. Delší prodleva se již negativně podepíše na výsledné pevnosti. Stabilizovanou zeminu je třeba ještě týden po zhutnění kropit a ošetřovat a měsíc ji chránit před mrazem. Po týdnu je možné ji zatížit stavební dopravou.

Stabilizace bitumenem se hodí pro sypké i jemnozrnné zeminy. U sypkých zemin působí bitumen jako pojivo a zvyšuje pevnost v tlaku. U soudržných zemin působí jako těsnění a snižuje propustnost. Mezi bitumenová pojiva patří silniční dehty, ředěné asfalty nebo asfaltové emulze. Často je vhodné doplnit asfaltovou stabilizaci vápencovou moučkou nebo cementem.

Dalším možným způsobem je stabilizace chemickými látkami. Používají se v podstatě všechny látky, které se využívají při injektování. Dělí se do dvou hlavních skupin na makromolekulární polymery a povrchově aktivní látky. Polymery mají vysokou adhezi a s jejich pomocí se dosahuje vysoké pevnosti zeminy, přitom jejich spotřeba je v porovnání s cementem několikanásobně menší. Povrchově aktivní látky zase zajistí lepší zpracovatelnost zeminy a menší namrzavost. Využití chemických látek je však drahé a u některých látek hrozí znečištění podzemní vody, proto je třeba dobře zvážit jejich případné použití.

K provádění potřebujeme relativně rozsáhlou strojní sestavu, která musí zvládnout rozprostření pojiva, kropení, promíchání se zeminou a zhutnění. Zásadní je stroj pro míchání zeminy s pojivem. Využívá se k tomu zemní fréza nebo univerzální silniční stroj pro podkladní vrstvy nebo zemědělské nářadí v kombinaci se zemními stroji, případně míchací centrum. [1]

## **2.4 Injektování**

Injektování je vtlačování tekutých směsí do podloží, kde po nějaké době ztvrdnou. Cílem injektování je zpevnění nebo utěsnění, případně oboje dohromady. Je možné

injektovat jak zeminy, tak rozpukané skalní horniny. Injekční látka se volí podle technologie injektáže a geologických podmínek. Injekční směs musí mít tyto vlastnosti: snadná zpracovatelnost, dobrá schopnost pronikání, objemová stálost a odolnost proti erozi a vyhovující pevnost v tlaku. Podle reologického chování se injekční směsi dělí na nestabilní suspenze, stabilní suspenze, chemické směsi, bitumeny a plynné emulze.

Nestabilní suspenze je směs cementu a vody. Když se nechá chvíli v klidu ustát, tak se zrna cementu začnou usazovat, proto se nazývá nestabilní. Je vhodná pro injektování hrubozrnných štěrků, skalních puklin a zdiva. U jemnozrnnějších zemin vznikají při injektáži ucpávky, které zabraňují pronikání suspenze. Složení směsi je cement : voda = 1 : 5~10. Cementová suspenze není odolná vůči agresivnímu prostředí. Tato odolnost se dá zlepšit přimícháním jemně mletého popílku.

U stabilních suspenzí nedochází k vylučování vody a vnitřní struktura směsi odolává gravitaci. Směs nesedimentuje. Do této kategorie patří jílocementové směsi a chemicky stabilizované suspenze jílu. Nejvhodnější jíly jsou illit a bentonit. Směs cementu a jílu bývá v poměru 5:1. U směsí pro těsnící účely jsou velmi přísná kritéria pro kvalitu jílu. Po injektáži dosahuje pevnost prostředí 0,1 – 5 MPa.

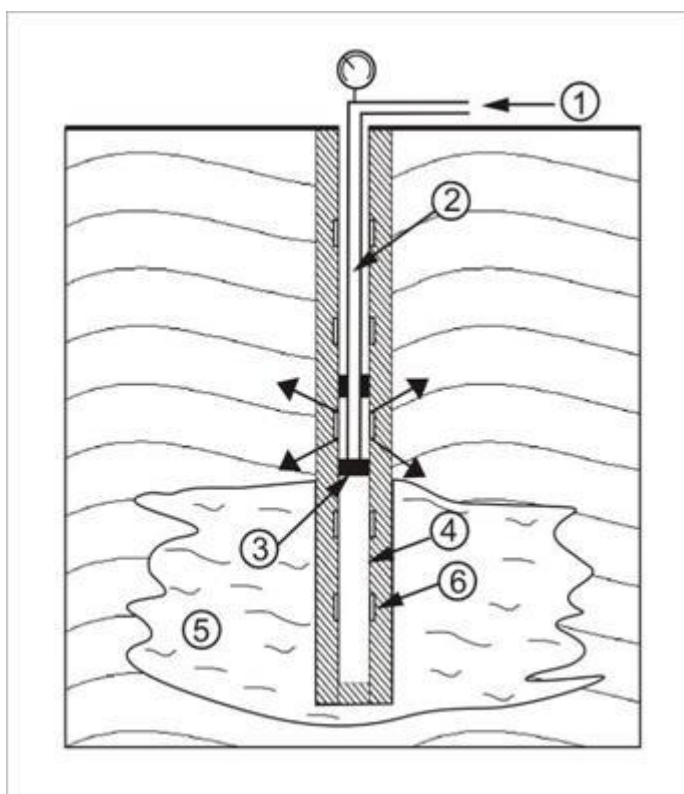
Chemické směsi se dělí na koloidní roztoky (z vodního skla) a organické pryskyřice. Po přidání reaktivu do vodního skla začne roztok gelovatět a přitom tuhnout. Jako reaktiva se používají různé látky, například HCl nebo  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Plastické gely mají výbornou schopnost pronikání, je to však vykoupeno pak následnou nízkou pevností, proto se používají k dotěsňování. Organické pryskyřice buď jsou, nebo nejsou ředitelné vodou. Častěji se používají pryskyřice ředitelné vodou, které jsou na bázi akrylamidu, fenolu a aminoplastů. Při aplikaci chemických směsí je však třeba dodržovat zvýšená bezpečnostní opatření a jejich použití se v současné době redukuje.

Bitumeny se k injektování využívají v málo propustných zeminách a jen výjimečně. Po aplikaci zůstávají v měkké konzistenci. Plynné emulze jsou směs cementové nebo jílocementové suspenze se vzduchovými bublinami, které mají řídicí účinek. Nevznikají ucpávky a směs lépe proniká. Plynné emulze se dají použít pro injektování širokých trhlin se silným prouděním vody.

V současnosti je v podstatě jedinou používanou technologií injektáž pomocí manžetových trubek podle patentu Solétanche. Nejdříve se vyhloubí vrt, vyčistí se, načerpá se do něj jílocementová zálivka a zapustí se do ní perforovaná manžetová trubka. Přibližně dva až tři dny se nechá zálivka zatuhnout na pevnost 0,1 - 0,2 MPa, a



pak může začít vlastní injektování. Do vypláchnuté manžetové hloubky se do hloubky, ve které se bude injektovat, spustí dvojitý obturátor a upne se ke stěnám manžetové trubky. Zálivka zabraňuje vertikálnímu úniku injekční směsi. Injektuje se po jednotlivých etážích, které jsou obvykle po 33 cm. Jednotlivé etáže je možné injektovat i vícekrát a může se také měnit složení směsi. Vhodný injekční tlak závisí na tíze nadloží. Stanoví se vodní tlakovou zkouškou nebo zkušební injektáží. Příliš malý tlak způsobí nedostatečné proinjektování a velký tlak zase může způsobit klakáž, což je roztrhání struktury. (Na tomto principu funguje trysková injektáž) Injekční směs se vyrábí v aktivační míchačce. Dále se přečerpá do pomaluběžné míchačky. Odsud směs pokračuje do dávkovače a potom do injekčního čerpadla. Při velkých objemech injektáže se vše soustřeďuje do automatických injekčních stanic. [1]



- 1 – injektážní směs
- 2 – injektážní trubka,
- 3 – dvojitý obturátor
- 4 – manžetová trubka
- 5 – proinjektovaná zóna
- 6 – gumová manžeta

Obrázek 2-2: Schéma injektážního vrtu [14]

## 2.5 Snižování vlhkosti

Snížení vlhkosti původní zeminy může často způsobit zlepšení mechanických vlastností u soudržných zemin a urychlení konsolidace. Všechny metody fungují na principu zkrácení dráhy průsaku. Hlavní využívané způsoby jsou vertikální drény a elektroosmóza.

Vertikální drény jsou vhodné do velmi stlačitelných jílovitých zemin. Po jejich aplikování převáží vodorovný tok odváděné vody a zkrátí se tím čas primární konsolidace. Jedná se buď o pilíře z písku či štěrku nebo tvarované plastické geodrény. Na horním konci většinou bývá pískový nebo štěrkový podsyp. Efektivnost systému se zvýší násypem. Realizace pískových a štěrkových pilířů je jednoduchá. Pískem se vyplní otvor, který vznikne buď roztlačením zeminy, nebo jejím vyvrtáním. Při roztlačení se zároveň zhutní okolní zemina, proto je tento způsob účinnější. Geodrény mají malé rozměry a lehko se zatlačují do podloží. Po geodrénech se požaduje, aby jejich filtrační obal byl velmi propustný. Musí přitom zadržet jemné částice zeminy, které unáší voda.

Elektroosmóza je zavedení stejnosměrného proudu do zvodnělé zeminy s malou propustností. Elektrický proud uvolní vodu, která je v zemině vázaná, a ta se potom může odčerpávat. Proud protéká od kladných elektrod, které jsou zhotoveny z kovových tyčí ke studním, které jsou tvořené zápornými elektrodami. Vodu je třeba odčerpávat, jinak by se vracela zpátky. [1]

## **2.6 Zmrazování zemin**

Způsobí dočasné zmrazení zemní konstrukce, která pak odolá tlaku vody. Výhody této metody jsou: použitelnost ve všech vlhkých a vodou nasycených zeminách, zachování hladiny a kvality podzemní vody, neměnnost vlastností zeminy, nepotřebnost pažení. Mezi nevýhody zas patří vysoké náklady nebo dlouhá doba zmrazování.

Zmrazení vytvoří ze zeminy vodonepropustnou těsnicí, někdy i nosnou stěnu s ledem. Teplo ze zeminy se odvádí chladicí látkou, která se vhání do zapuštěných trubek. Po ukončení stavby se zmrazovací trubky vytáhnou a zemina roztaje. Existují 2 základní systémy zmrazování, uzavřený a otevřený systém. V uzavřeném systému je chladicí médium (solanka – roztok soli ve vodě) v nuceném oběhu mezi chladicím zařízením a trubkami. V otevřeném systému se chladicí médium (kapalina, plyn) rovnou použije do zmrazovacích vrtů, kde se pak vypařuje. Není třeba chladicí stanice, médium se na stavbu přepravuje ve speciálních cisternách. Také nehrozí nebezpečí kontaminace zeminy solným roztokem. Okamžité zmrazení vyloučí vznik ledových čoček, nevzniknou trhliny v zemině a objem se změní jen minimálně. V chladných oblastech je možné použít chlazení studeným vzduchem.

Zmrazování je nejvhodnější pro zvodnělé nesoudržné zeminy, ve kterých je voda bez pohybu. Tato metoda je v aktivní etapě velmi energeticky náročná a trvá řádově

měsíce. V pasivní fázi už jsou energetické nároky výrazně nižší, protože zmrazená zemní konstrukce už je vytvořená a je třeba ji jen udržovat. Pevnost zmrazené zeminy závisí na druhu zeminy a stoupá se snižující se teplotou, může však dosahovat až 20 MPa. Těsnicí funkci začne zmrazená zemina plnit, pokud má tloušťku alespoň 10 – 15 cm. Pro nosnou stěnu však musí být tato tloušťka větší. Zmrazování je možné kombinovat s injektováním nebo s jinými metodami. [1]

## **2.7 Vypalování zeminy**

Vypalováním se vytvoří z podloží cihelná hmota. Je možné jej využít v zeminách, které obsahují alespoň 15% jílovitých částic. Nejvhodnější jsou spraše a sprašové hlíny, u kterých se vypalováním zvýší pevnost a zároveň se odstraní prosedavost. Působením vysoké teploty se zvýší pevnost strukturních vazeb a z pórů se odpaří volná a elektromolekulárně vázaná voda. Teplota při vypalování dosahuje 600 – 900 °C. Jako palivo se používá zemní plyn, nafta, mazut, atd. To se smíchá se vzduchem a tryskou se vhání do vrtů. Na podporu hoření se přidává do vrtu stlačený vzduch. Vypalování trvá 5 – 10 dní. Vznikne pilíř o průměru 1,5 – 3 m. V našich podmínkách se však tato metoda nepoužívá. Vypalování je rizikové z hlediska úniku ropných látek a znečištění životního prostředí. Jako ekologickou náhradu za vypalování je možné použít vhánění horkého vzduchu, čímž se dosáhne v podstatě stejných výsledků. [1]

## 3 TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ

Trysková injektáž (dále TI) je metoda zlepšování základových půd. Podstatou této metody je využití dynamické energie paprsku cementové injekční směsi tryskané velkou rychlostí (přes 100 m/s) a pod vysokým tlakem. Paprsek injekční směsi svojí vysokou mechanickou energií rozruší zeminu, smísí se s jejími částicemi, a vznikne kompozitní materiál o pevnosti mezi 1 až 20 MPa. Pevnost vzniklého materiálu záleží na druhu zeminy (jílovitá, písčitá, balvanitá...).

### 3.1 Historie tryskové injektáže

#### 3.1.1 Vývoj klasické injektáže

TI je relativně nová metoda. Její vznik předcházela dlouhý vývoj klasické injektáže. Za vynálezce injektáže se považuje Francouz Bérigny, který roku 1802 utěsnil podloží jezu Dieppe. K injektáži použil nárazové čerpadlo (dřevěný válec s kovovou tryskou). Pro těsnění podloží použil jílovou suspenzi a při rekonstrukci vlastního tělesa jezu využil maltu. Podobným způsobem úspěšně injektoval při opravách plavebních komor Tréportu, Saint Valéry a v Le Havru. Při stavbě přístavního bazénu v Dieppe injektoval kvůli snížení přítoku vody.

V roce 1837 provedl Raynal první injektáž zdiva suspenzí z hydraulického vápna při opravě akvaduktu na Lanquedockém kanálu. První pokusy s injektáží pomocí cementové suspenze začaly v 50. letech 19. století. Prováděl je W. R. Kinipple. Tyto práce vyvrcholily při stavbě přístavní hráze Hermitage v St. Helier v Jersey (1887), kde injektoval příkop vyplněný kamenivem. Práce probíhaly pod vodou. Po tomto úspěchu se dá Kinipple považovat za zakladatele injektáže pomocí cementu.

V roce 1893 bylo provedeno systematické utěsnění rozpukané horniny na přehradě New Croton v USA. V základové spáře byly navrtány vrty o délce 4 až 30 metrů. Vyplachovány a injektovány byly pomocí cementové suspenze. Na počátku 20. století se injektování rozpukaných hornin rozšířilo do různých zemí. Mezi lety 1900 až 1930 proběhla řada úspěšných utěšňovacích prací na různých přehradách.

Realizace první injekční clony proběhla na přehradě Estacada Dam na řece Clackamas. Podloží přehrady tvořily velmi propustné vulkanické brekcie. Injektáž

proběhla pomocí cementové suspenze. Její úspěch se pak ověřoval vodní tlakovou zkouškou. Od stavby Hooverovy přehradě v USA v letech 1932 – 1935 se začaly injekční práce navrhovat systematicky. V té době se používala kontaktní (kobercová) injektáž (mělká a pod malým tlakem), konsolidační injektáž (pod vyšším tlakem na návodní straně přehradě ve vrtech do 30 m) a vysokotlaká injektáž.

V té době začal vznikat základ moderní injektáže, jak ji známe nyní. Pracím se začala věnovat velká pozornost. Měřil se vztlak vody, zabývalo se složením injekční směsi. Také se začala objevovat první utříděná a ucelená pojednání o tomto tématu. To vše pomohlo k velkému rozvoji a pokroku injektování.

Na území Československa proběhly injekční práce poprvé ve skalních horninách na betonové přehradě Janov v letech 1912 až 1914. Když byla přehrada částečně napuštěna, tak se na levém vzdušném svahu objevily velké výrony. Na návodní straně byly provedeny vrty o hloubce 16 až 33 m a injektovalo se cementovou suspenzí. Průsak se podařilo snížit na zlomek původní hodnoty.

Potřeba injektovat nesoudržné zeminy vznikla hlavně pro účely důlních staveb, kde bylo třeba zpevnit a utěsnit tekoucí písky. V roce 1887 k tomu bylo využito dvouroztokové injektáže z vodního skla a chloridu vápenatého. Problém však byl v tom, že tyto látky při vzájemném styku spolu okamžitě reagují a vytváří gel. Ve 20. letech byla patentována směs vodního skla se síranem hlinitým. Ve stejné době se také začala používat chemická směs s nízkou viskozitou – křemičitý gel.

Postupný zákaz používání chemických směsí vedl k hledání vhodné náhrady. Dobrých výsledků se dosáhlo pomocí velmi jemně mletých cementů. Další pokrok způsobily směsi z umělých pryskyřic.

Významným objevem se stala manžetová trubka, která byla poprvé použita v roce 1933. Používá se jak pro nesoudržné zeminy, tak pro soudržné. V současné době naprostá většina injektáží probíhá pomocí manžetové trubky.

Rozsáhlá a úspěšná injektáž proběhla v Československu v roce 1963 při zakládání hydrocentrály Gabčíkovo ve vodotěsné vaně. Ve velké míře se také injektovalo při zpeňování nesoudržných náplavů v Praze při stavbě metra. [5]

### **3.1.2 Vývoj tryskové injektáže**

Současná podoba a úroveň TI rozhodně není nic definitivního. Neustále se rozvíjí a zdokonaluje. Její počátky sahají již do 60. let 20. století. První použití vysokotlaké injektáže, která rozrušuje zeminu a smíchává se s ní, bylo v roce 1962 při stavbě těsnící zdi v Pákistánu. Injektáž provedla firma Cementation. Většinou se však mluví o Japonsku, jako o zemi, kde byla tato technologie vyvinuta.

Ke konci 60. let se skupina japonských odborníků inspirovala poznatky o rozrušování horniny pomocí vysokorychlostního tryskání a napadlo je, že by se tento způsob dal využít při zlepšování zeminy. Jejich představa spočívala v tom, že by se vysokým tlakem injektovalo tekuté pojivo, které by způsobilo rozrušení zeminy. Přitom by se promíchalo se zeminou a vznikl by kompaktní sloupový prvek.

Nejdříve byla vyvinuta metoda Chemical Churning Pile (CCP), která používala ze začátku chemické pojivo, ale to bylo později nahrazeno cementovou suspenzí.

Vývoj pokračoval a během několika let dospěl k Jumbo Special Pile (JSP). K injekčnímu paprsku se přidal stlačený vzduch, který ho obalil a způsobil větší průraznost a dosah.

Téměř ve stejné době vznikl rozdílný systém zvaný Jet Grout (JG). Zemina byla rozrušená vysokorychlostním vodním paprskem z horní trysky a potom z nižší trysky následovala cementová injektáž do rozvolněné zeminy. V počátcích se trysky vysouvaly nahoru bez rotace a vznikaly tím svislé desky.

Takovým pomyslným vyvrcholením byl vznik metody zvané Column Jet grout (CJG). Zde jsou v podstatě předchozí postupy spojené do jednoho. Injekční tyč se vysouvá a současně se otáčí. Z horní trysky jde paprsek vody obalený stlačeným vzduchem a rozrušuje zeminu a ze spodní trysky se injektuje cementová suspenze. Pomocí této metody vznikne sloupový prvek o výrazně větším průměru než při použití CCP.

Je zajímavé, že například do USA začala trysková injektáž pomalu pronikat až během 80. let. Přitom v té době byla již v Evropě hojně užívaná při řešení různých geotechnických problémů. [4] [5]

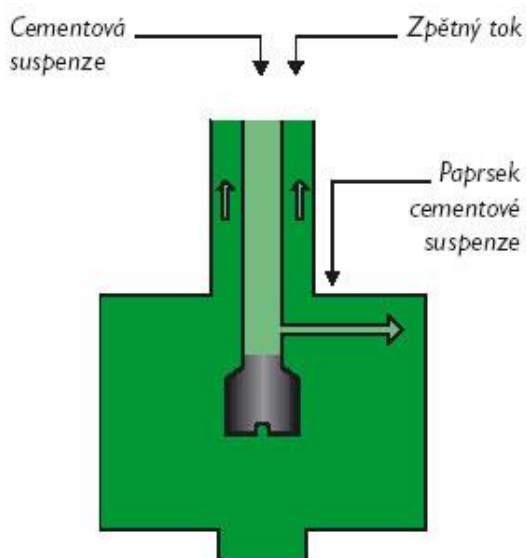
V našem regionu byla TI poprvé použita na přehradě Josefův Důl v roce 1979. Pomocí metody JG se tu vytvořila těsnící clona v porušených žulách. O pár let později se pomocí TI těsnila přehrada Nýrsko. [5]

## 3.2 Technologie tryskové injektáže

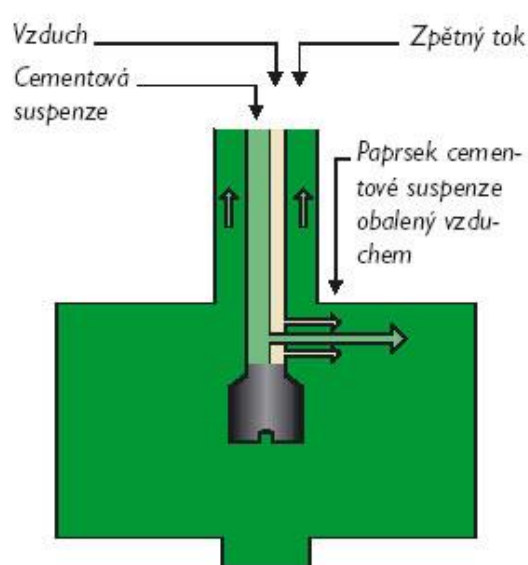
### 3.2.1 Dělení podle metody provádění

- jednofázový systém (M1,R1) – rozrušení i zpevnění zeminy se dosahuje jedním médiem o vysoké mechanické energii, obvykle paprskem cementové suspenze (Obrázek 3-1)
- dvojfázový systém vzduchový (M2, R2) – rozrušení zeminy se dosahuje vysokou mechanickou energií tryskaného paprsku, obvykle cementové suspenze za podpory stlačeného vzduchu jako druhého média. Vzduch obaluje paprsek cementové suspenze a činí jej průraznějším. (Obrázek 3-2)
- dvojfázový systém vodní (M2, R2 s vodním předřezem) – rozrušení zeminy je dosaženo pomocí vodního paprsku a zpevnění je způsobené odděleným paprskem injekční směsi
- trojfázový systém (M3, R3) – rozrušení zeminy je dosaženo vodním paprskem za podpory stlačeného vzduchu a zpevnění je způsobené odděleným paprskem injekční směsi.[2] (Obrázek 3-3)

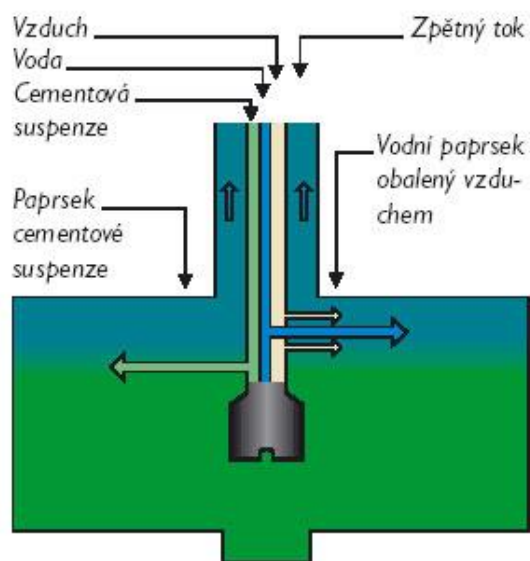
Paprsek s rozrušující funkcí (ať už suspenze nebo voda) musí mít rychlost nejméně 100 m/s. Jednofázový systém je vhodný do lehce rozrušitelných zemín pro zhotovení malých až středních průměrů sloupů. Dvojfázový systém vzduchový se používá pro lamelové stěny, podchytávání a těsnění dna. Při trojfázovém systému nebo dvojfázovém vodním systému musí být tlak suspenze více než 15 atm. [11]



Obrázek 3-1: Jednofázový systém [11]



Obrázek 3-2: Dvojfázový systém vzduchový [11]



Obrázek 3-3: Trojfázový systém [11]

V následující tabulce (Tabulka 3-1) je zobrazen přibližný rozsah parametrů tryskové injektáže pro různé systémy.

Tabulka 3-1: Přibližný rozsah parametrů tryskové injektáže pro různé systémy [3]

Parametry tryskové injektáže	Jednofázový systém	Dvojfázový systém (vzduchový)	Dvojfázový systém (vodní)	Trojfázový systém
Tlak na čerpadle injektáže směsi [MPa]	30 - 50	30 - 50	> 2	> 2
Průtok injekční směsi [l/min]	50 - 450	50 - 450	50 - 200	50 - 200
Tlak vody [MPa]	NP	NP	30 - 60	30 - 60
Průtok vody [l/min]	NP	NP	50 - 150	50 - 150
Tlak vzduchu [MPa]	NP	0,2 - 1,7	NP	0,2 - 1,7
Množství vzduchu [m <sup>3</sup> /min]	NP	3 - 12	NP	3 - 12
NP = není používáno				



### **3.2.2 Technologický postup**

Pro provádění TI je třeba kompaktní mísící a čerpací stanice, zásobníky a síla. Na místě provádění TI je vrtná souprava, která je s čerpací stanicí propojena pomocí svazku hadic a kabelů. Výška věže soupravy TI může být 2 m pro práci v suterénu a může dosáhnout až 35 m pro práci na volném staveništi.

Vrtná souprava (Obrázek 3-4) je vybavena soutyčím pro TI, monitorem a zařízením určeném k pohonu soutyčí. Toto zařízení musí být uzpůsobeno tak, aby se vrtné soutyčí pohybovalo stanovenou rychlostí posunu a otáčení. Průměr vrtu má obvykle 120 – 150 mm.

Vrtné soutyčí je duté, aby bylo možné během vrtání vyplachovat. Při tryskání tudy zase proudí injekční směs.

Monitor je ocelový válec namontovaný na konci vrtného soutyčí, hned nad vrtným nástrojem. Uvnitř je dutý a přivádí se tudy potřebná média (cementová suspenze, voda, vzduch – záleží na metodě provádění). V monitoru je jedna nebo více trysek podle prováděcí metody. Vnitřní průměr trysky je od 2 do 8 mm. Na dně monitoru, v úrovni vrtacího nástroje, je otvor, který slouží při vrtání k výplachu. Když se přechází z vrtací fáze do fáze tryskání, tak se do vrtného soutyčí vhodí ocelová kulička, která zacpe otvor na dně monitoru. Potom se může zvýšit tlak a započít s tryskáním.

Další potřebnou součástí je mísící centrum, které musí zajistit kontinuální produkci a namíchat požadovanou směs. Obvyklá spotřeba směsi je 10 – 20 m<sup>3</sup>/h. Primární míchaní probíhá v aktivační míchačce. Připravená směs se odsud přesune do skladovacího kontejneru, ve kterém je domíchávač. Odsud jde připravená směs do čerpadla.

Čerpadlo (Obrázek 3-5) musí dokázat vyvinout tlak 50 MPa nebo i více. Jsou k tomu používána pístová čerpadla a jsou umístěna v čerpací stanici. Vzduchový kompresor je třeba jen při dvojfázovém a trojfázovém systému. Požaduje se po něm, aby mohl dosáhnout tlaku 1,2 - 2,5 MPa při průchodu 200 – 300 l/s. [4]



Obrázek 3-4: Maloprofilová vrtací souprava [7]



Obrázek 3-5: Čerpací a tlaková stanice tryskové injektáže [12]

### **3.2.3 Vývoj a budoucnost tryskové injektáže**

V současné době se vývoj soustředí na výkonnější a silnější čerpadla a na zefektivnění celého procesu a snížení ztrát. Velké ztráty mohou vznikat v tryskách. Snaha je dosáhnout minimalizace úbytku rychlosti při průchodu tryskaného paprsku tryskou. Hlavní roli hraje tvar trysky. Její tvar také ovlivňuje chování paprsku a jeho rychlost po jejím průchodu.

Dalším místem, kde dochází ke ztrátám, je přechod mezi potrubím ve vrtném soutyčí a tryskou. Tryska je vzhledem k potrubí kolmá. Tato ztráta se sníží zakřivením spoje. S větším poloměrem oblouku se ztráty zmenšují. Další ztráty způsobuje zakřivení potrubí, kterým se přivádí suspenze pod tlakem.

Jedna z nových metod se jmenuje Cross jet method. V monitoru jsou umístěny 2 trysky nad sebou. Jsou ukloněné k sobě a v určité požadované vzdálenosti se jejich paprsky protínají. Touto metodou je možné dosáhnout přesnějších tvarů prvků TI. Zatím se však v praxi nepoužívá.[4]

### **3.3 Oblast využití tryskové injektáže**

TI je možné využít v následujících geotechnických oblastech:

- zakládání nových staveb (náhrada hlubinných základů)
- podchycování stávajících základů a konstrukcí za účelem zvýšení únosnosti v základové spáře
- podchycování stávajících základů a konstrukcí za účelem umožnění jejich odkopání, popř. podkopání
- pažící a současně i těsnící konstrukce pro těsnění boků stavebních jam
- dotěsňování jiných konstrukcí (např. štětové stěny) při jejich napojování na stávající stavby
- těsnění dna stavebních jam v propustných zeminách
- dočasné zajišťování výrubu štol, kolektorů nebo tunelů
- zlepšení vlastností základové půdy
- urychlení konsolidace podloží násypů

I když TI nabízí obrovskou variabilitu možností využití, tak ne všude je její použití výhodné. Například budování hlubinných základů pro novostavby pomocí TI je velmi drahé a kvalita vzniklých prvků není tak dobrá jako např. železobetonových pilot. Horší

vlastnosti jsou způsobené méně kvalitním betonem, který vznikne smíšením rozrušeného podloží s injekční směsí a absencí výztuže, která by mohla přenášet tahová napětí.

Při použití TI jako pažící konstrukce je nevýhoda její nedostatečná ohybová tuhost. Je sice možné ji vyztužit (ocelová trubka, betonářské pruty, případně válcovaný profil), což její tuhost zvýší, ale rozhodně není možné na ni pohlížet jako na železobetonovou konstrukci. Tento problém je možné vyřešit buď pomocí dostatečné tloušťky konstrukce, která zminimalizuje tahová napětí nebo spolupůsobením s dalšími prvky (např. mikropiloty).

Pokud se paží jáma, která navazuje na stávající zástavbu, často bývá požadavek na co největší zábor pozemku. Stávající konstrukce je zpravidla mělce založená, proto je třeba ji podchytit a toto podchycení pak i působí jako zapažení stavební jámy. Nejvhodnější bývá konstrukce z překrývajících se sloupů TI. Do hloubky asi 2 metrů obvykle vyhoví jednoduchá řada sloupů. Při zvětšující se hloubce je již třeba kotvit. Kotvení stabilizuje podchycující a pažící konstrukci a umožní její příznivé namáhání. Jedná se o dočasnou konstrukci do výstavby suterénu. Slouží pro něj jako ztracené bednění.

Stěny ze sloupů TI mohou dobře plnit těsnící funkci. Používají se například jako těsnění záporového pažení, případně pilotových stěn ve zvodnělých úsecích základové půdy.

Těžiště využití TI spočívá v podchycování stávajících základů. Používá se buď z důvodu zvýšení únosnosti v základové spáře, nebo umožnění výkopu podél základů, případně v kombinaci obojího. Důležitou výhodou podchycování stávajících základů pomocí sloupů z tryskové injektáže je skutečnost, že při správném geometrickém uspořádání není nutné budovat žádné spojovací konstrukce, které by zprostředkovaly přenos zatížení ze základů do podchycujících prvků. Pomocí miniaturních vrtných souprav lze podchycovat konstrukce i ze suterénu. Jedná se však o složitou technologii a je třeba důsledně kontrolovat její průběh, protože i krátkodobé ucpání vrtu může způsobit nadzvednutí stávajících základů a poškození objektu. Proto je důležité kvalitně zdokumentovat stav před a po injektáži, aby se později předešlo dohadům o míře zavinění a poškození konstrukce. Také je třeba zajistit přístup do všech sousedních prostor tak, aby mohl být průběh tryskové injektáže stále monitorován. [2]

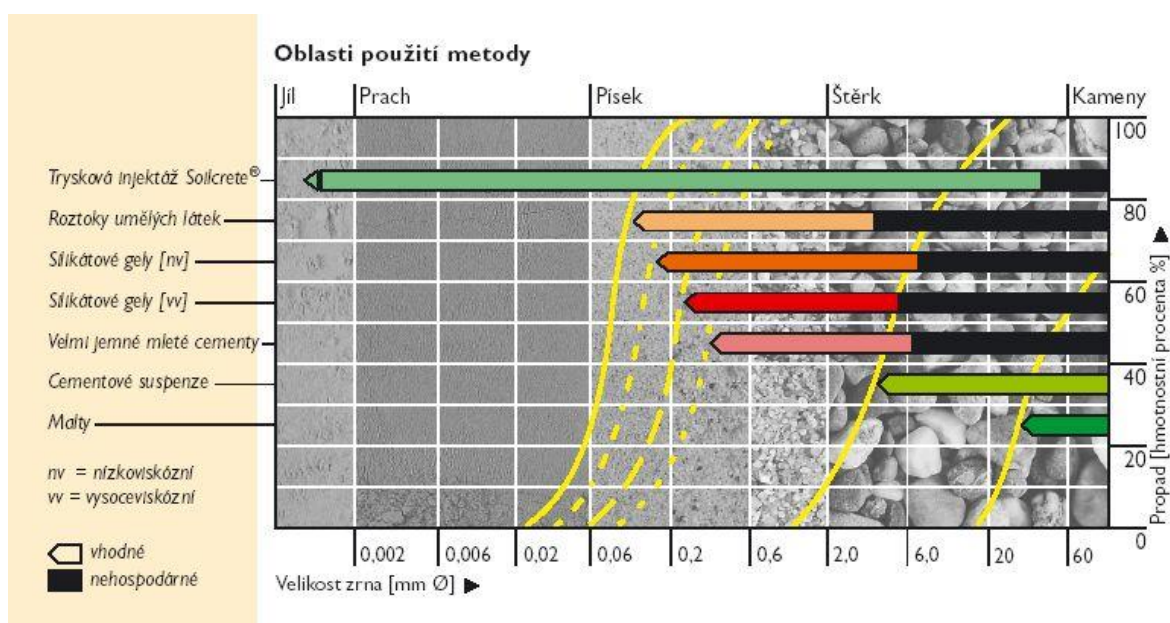
### 3.3.1 Oblast použití metody

Rozrušená zemina se míchá s cementovou suspenzí. Určitá část vzniklé směsi je vytlačována okolo vrtu k jeho ústí. Dosah paprsku v základové půdě závisí na druhu injektované zeminy, metody a použitého média. V kyprých zeminách může být erózní dosah paprsku až 2,5 m.

Na rozdíl od klasických injektáží, TI se využívá za účelem zpevnění nebo utěsnění téměř ve všech druzích zeminy včetně jílu (Obrázek 3-6). Je možné ji využít i pro nehomogenní zeminy a zeminy obsahující organické součásti. Dokonce je možné ji využít i ve skalním podloží, např. v nekvalitních pískovcích.

TI může mít buď funkci zpevňující, nebo těsnící. Často se využívá kombinace obou těchto vlastností. Pevnost tělesa TI se určuje podle druhu a množství podílu cementu, a podle druhu částic zeminy, které dohromady tvoří těleso TI. Pevnost se pohybuje v rozmezí od 2 do 25 MPa. Menší hodnoty pevnosti platí pro jílovité zeminy a vyšší pevnosti pro hrubozmnější zeminy.

Pokud se klade důraz na těsnící funkci TI proti podzemní vodě, tak se do cementových suspenzí přidávají jílovité složky, např. bentonit. Těsnící vlastnosti TI se pak určují zase podle druhu a množství přidaných látek a podle druhu injektované zeminy. Těsnící TI snižuje propustnost  $k_F$  o několik řádů. V případě náročných požadavků na stupeň utěsnění se výrazně zvýší výrobní náklady. [11]



Obrázek 3-6: Oblast použití metody[11]

### **3.3.2 Vztah pevnosti a druhu tryskové injektáže**

Jeden z hlavních problémů navrhování tryskové injektáže je stanovení reálných rozměrů sloupů TI a jejich pevnosti. Nejvhodnějším způsobem je testovací TI, její následovné odkopání a změření hledaných parametrů.

Tímto výzkumem se zabývá studie Silesian University of Technology v Polsku, kterou vedla prof. Joanna Bzówka. Na zkušebním místě bylo vytvořeno celkem 16 sloupů TI o výšce 4 m jednofázovým a dvoufázovým systémem. Byly použity 2 různé tlaky tryskání: 18 a 36 MPa a 2 rozměry trysky: 2,8 a 4,0 mm. Rychlost otáčení byla buď 12 nebo 25 m/s. Geologický profil se zde skládal z písku a přibližně metrového pásu organických jíílů v hloubce 3 m.

Měsíc po provedení byly sloupy TI odkopány 2,5 m pod úroveň terénu. Průměr sloupů vytvořených jednofázovým systémem byl 85 – 115 cm a u sloupů vytvořených dvoufázovým systémem to bylo 135 – 190 cm. Tím bylo potvrzeno, že přidáním stlačeného vzduchu způsobí větší průměr sloupů TI.

Hned po provedení TI byly odebrány vzorky směsi, převezeny do laboratoře a nechaly se tam vytvrdnout. Po 28 dnech na nich provedeny zkoušky pevnosti v prostém tlaku. U vzorků odebraných z jednofázové TI se pevnost pohybovala od 3,0 do 7,0 MPa a u dvoufázové TI od 1,5 do 3,0 MPa.

Pro stanovení reálné pevnosti byly provedeny jádrové vývrty sloupů TI a zkoušky pevnosti byly provedeny i na nich. Průměrná hodnota pro sloupy z jednofázového systému byla 9,5 MPa (4,0 – 35,0 MPa) a pro dvoufázový systém to bylo 2,0 MPa (1,0 – 4,5 MPa).

Ze studie vyplývá, že pevnost sloupů TI ovlivňuje hlavně:

- druh injektáže
- druh zeminy, kde je injektáž prováděna
- množství injektovaného cementu, které záleží na tlaku a průměru trysek

Výzkum také ukazuje, že při pomalejším otáčení monitoru a větším průměru sloupu se zmenší jeho pevnost.

Výzkum potvrdil, že větší průměry sloupů vznikají při použití dvoufázového systému TI, ale větší hodnota pevnosti v tlaku je dosažena při jednofázovém systému TI. [13]

### **3.3.3 Konstrukce z tryskové injektáže**

Základní konstrukční prvky TI jsou buď sloupy (vysouvání tyče s rotací) nebo lamely (vysouvání tyče bez rotace). Ty je možné kombinovat s jinými prvky (kotvy, mikropiloty, stříkaný beton).

Z těchto konstrukčních prvků je možné vytvořit následující konstrukce. Stěny z TI jsou z lamel nebo ze sloupů, které se vzájemně dotýkají. Desky z TI jsou horizontální konstrukce vytvořené z nízkých vertikálních sloupů, které se navzájem překrývají. Klenba z TI je vytvořená z horizontálních nebo mírně ukloněných sloupů. Blok z TI je třírozměrná konstrukce vytvořená zpravidla ze sloupů. [2]

Délka vytryskaných sloupů se může pohybovat od velmi krátkých délek i do 60 m. Vrty mohou být svislé nebo šikmé. V jednom příčném řezu lze vytvářet celé vějíře, čímž se zvýší stabilita. Sloupy TI je možné vyztuzit maloprofilovými ocelovými trubkami a také mohou být kotveny.[10]

### **3.3.4 Výhody tryskové injektáže**

K vytvoření sloupu TI je třeba jen maloprofilový vrt, a proto se nemusí odstraňovat velké množství vyvrtaného materiálu. Jako stavební materiál je použita cementová směs smíchaná s přírodním zemním materiálem, který se nemusí odtěžovat, převážet a zpracovávat. Další výhodou je možnost vytvoření podzemní konstrukce s téměř libovolným tvarem, která má dobré mechanické vlastnosti a nízkou propustnost.

V některých speciálních případech přinesla TI nové řešení geotechnických problémů (např. těsnění dna stavební jámy). Výrazně tím zjednodušila proces výstavby a změnila filozofii navrhování.[4]

Obrovskou výhodou TI je fakt, že je možné ji použít v obtížných a stísněných podmínkách, protože na ni není třeba těžká mechanizace. V dnešní době existují vrtací soupravy, které projedou dveřmi o profilu 80x200 cm. Proto není problém provádět TI například ze suterénu budovy nebo jiných míst s nedostatkem pracovního prostoru.

Pokud je třeba pažit stavební jámu, která se nachází v těsné blízkosti stávajícího objektu, tak je možné využít všechny výhody TI, kterými jsou malé nároky na prostor, schopnost vrtné soupravy dovtat se i do tvrdých hornin, vodotěsnosti stěny TI a zároveň podchycení stávajícího objektu. Není nutné, aby konstrukce z TI zasahovala vně podchytávaného objektu. [10]

## 4 VYUŽITÍ TRYSKOVÉ INJEKTÁŽE V PRAXI

V této části budou popsány některé stavby a rekonstrukce staveb v poslední době, při kterých byla metoda tryskové injektáže úspěšně použita. Všechny stavby jsou situovány na území města Brna.

### 4.1 Geologie širšího okolí Brna

Dle geomorfologického členění České republiky se území města Brna nachází na rozhraní dvou geomorfologických celků. Ze severozápadu to je provincie Česká vysočina, subprovincie Českomoravská soustava, podsoustava Brněnská vrchovina. Z druhé strany to je provincie Západní Karpaty, subprovincie Vněkarpatské sníženiny, podsoustava Západní Vněkarpatské sníženiny, celek Dyjskosvratecký úval.

Severozápadní okraj Brna vybíhá do Drahanské vrchoviny a Bobravské vrchoviny, které jsou odděleny Kuřimským prolomem. Středová část města je zaplněna sníženinami, které se souhrnně nazývají jako Brněnská kotlina. Jižní a jihovýchodní část města již náleží Dyjsko-svrateckému úvalu.

Skalní podloží je zde tvořené horninami brněnského masivu – granodiority a diority, nad kterými leží neogénní spodnobádenské jíly (tégly) s vložkami písků. Kvartérní pokryv je tvořen částečně terasovými sedimenty údolních niv Svitavy, Ponávky a Městského potoka (štěrk, písky a povodňové hlíny), částečně svahovými sedimenty (jílovité hlíny s úlomky nezvětralých hornin) a také eolickými sedimenty (spraše, sprašové a prachové hlíny). Tyto jsou překryty antropogenními sedimenty - navážkami - o mocnosti 2 - 5 m z četné stavební činnosti v historii i současnosti. [7]

### 4.2 Dům č. 16 na Mendlově náměstí

#### 4.2.1 Širší souvislosti

Rekonstrukce domu č. 16 na Mendlově náměstí v Brně souvisí s plánovanou celkovou přestavbou a revitalizací Mendlova náměstí. Jedná se o šestiposchoďový funkcionalistický dům, který byl navržen a postaven známým brněnským architektem a stavitelem Václavem Dvořákem v meziválečném období. Objekt byl součástí původní



bytové zástavby. Dříve byla součástí tohoto komplexu i radnice. Budovy však byly postupně odbourávány.

Dům byl v havarijním stavu. V obvodovém zdivu byly velké trhliny z důvodu rozdílného sedání základů. Uvažovalo se o jeho demolici, ale nakonec bylo rozhodnuto, že tato funkcionalistická budova bude opravena z důvodu zachování historické architektury, a proto bylo nutné ji staticky zajistit. Rekonstrukce započala v létě v roce 2014.[9]

#### **4.2.2 Geologie základové půdy**

Zájmový prostor se nachází na okraji soutokové údolní nivy Svratky a Svitavy. Dotčené území leží na levém břehu Svratky při patě komplexní vyvýšeniny Žlutého kopce. Stavba údolní nivy je tvořena dvěma vzájemně se odlišujícími souvrstvími. Svrchní část je tvořena jemnozrnnými, většinou soudržnými povodňovými hlínami. Spodní část souvrství je tvořena především hrubozrnnými sedimenty. Vyskytují se tu štěrky s různými stupni příměsí písku. V patě údolního svahu jsou terasové štěrkopísky překryty vrstvou eolických spraší až sprašových hlín tuhé až pevné konzistence.

V místě stavby byly provedeny 3 jádrové vrty do hloubky 15 m, jeden z nich byl vystrojen jako hydrovrt s výpažnicí a byly zde provedeny čerpací zkoušky. Horní vrstva je navážka z velmi různorodých materiálů s rozdílnými a těžko specifikovatelnými geotechnickými vlastnostmi. Sahá do hloubky 2,4 – 3,5 m (od povrchu chodníku). Svrchní vrstva navážky je tvořená většinou nesoudržnou stavební sutí. Spodní část je tvořena místními prachovitými hlínami s příměsí úlomků stavebního odpadu. V době stavby se stavební suť používala jako zlepšení problematických náplavů. V hloubce kole 3 m byly popsány značně ztrouchnivělé fragmenty dřeva, které byly pravděpodobně součástí původního opevnění koryta bývalého Svrateckého náhonu.

Pod vrstvou navážky do hloubky 6 m se nachází prachovito-jílovité hlíny třídy F6 až F8 v průměru tuhé konzistence. V hydrovrtu byl v podobné hloubce zastižen jíl s vysokou plasticitou, velmi měkké konzistence a velmi silně organogenní. Tato zemina je objemově nestálá a silně stlačitelná. Pod těmito vrstvami jsou hlinité a jílovité písky s příměsí drobných valounů štěrku, které postupně přecházejí do štěrkopísků s příměsí jemnozrnné zeminy. V hloubce 8 – 9 m se nachází ukloněný povrch neogenních jílu třídy F8. Pod touto vrstvou vysoce plastických jílu pevné konzistence se nachází prachovité písčité jíly.

Hladina podzemní vody se pohybuje v hloubce 5 m pod terénem a značně kolísá. Výška hladiny podzemní vody je částečně ovlivňována stavem vody ve Svatce. Podzemní voda zde vykazuje zvýšenou koncentraci síranů. [7]

#### **4.2.3 Praviděpodobné příčiny poruch domu**

Příčiny poruch s velkou pravděpodobností vycházely již z projektu stavby. Založení objektu bylo příliš mělké pro tak složitou konstrukci šestipodlažního domu. Základy budovy jsou tvořené kombinací základových pasů a patek. Základová spára je nehomogenní, se značně rozdílnými geotechnickými vlastnostmi. Také byl podceněn vliv podzemní vody, její proudění a kolísání hladiny.



*Obrázek 4-1: Trhliny v nosné zdi domu č. 16 na Mendlově náměstí [7]*

Jihozápadní nepodsklepený roh objektu je založen na patce a právě zde se projevil nejvýraznější pokles, který způsobil šikmé trhliny ve zdi (Obrázek 4-1). Nosná konstrukce byla nedostatečně vodorovně ztužena (dřevěné stropy), a proto nemohla zmírnit pokles části základů. Základové konstrukce byly poddimenzované a zemina nebyla dostatečně únosná, aby přenesla požadované zatížení. Ještě navíc byla základová půda v době užívání podmáčena porušenou kanalizací. Ke zhoršení stavu

objektu také nejspíše přispěly dynamické účinky vibrací způsobených kolejovou dopravou. V těsné blízkosti domu dochází k brzdění a rozjíždění tramvajových souprav. [7]

#### **4.2.4 Sanace tryskovou injektáží**

Řešením poruch objektu byla nejdříve sanace a stabilizace vlastních základových konstrukcí. Jako nejvhodnější řešení bylo vybráno podchycení základů. Bylo třeba zajistit, aby navržené řešení negativně neovlivnilo sousední domy, s nimiž je sanovaný objekt spojen. Bylo třeba zajistit, aby podchycením nevznikla hydraulická bariéra, která by způsobila nadržení vody, zvýšení ustálené hladiny, podmáčení konstrukcí a následné zhoršení geotechnických vlastností zemin a zhoršení stavu základových konstrukcí sousedních domů.

Nabízely se v zásadě dvě varianty podchycení. První variantou byla trysková injektáž a druhou mikropiloty. Ačkoliv z hlediska hladiny podzemní vody by byly výhodnější mikropiloty, aby nevznikla nepropustná bariéra, tak byla zvolena metoda TI (Obrázek 4-2).



*Obrázek 4-2: Provádění tryskové injektáže v domě č. 16 na Mendlově náměstí [7]*

Sloupy TI sahaly do hloubky 9 m pod terénem. Základové pásy byly podchyceny jednou řadou překrývajících se sloupů TI o průměru 1100 mm. V případě více zatížených pásů byl zvolen průměr 1500 mm. Patky byly podchyceny vždy skupinou překrývajících se nebo dotýkajících se 3 až 4 sloupů TI o průměru 1100 nebo 1500 mm. [7]

### **4.3 CARLA – Centrum podpory humanitních věd MU**

#### **4.3.1 Širší souvislosti**

Jednalo se o dostavbu nové budovy současně s rekonstrukcí stávajících budov Filozofické fakulty Masarykovy univerzity v Brně při ulicích Gorkého a Arne Nováka. Z původních tří budov byla jedna zbourána a dvě opraveny a dále tu byl přistavěn objekt se dvěma podzemními a šesti nadzemními podlažími.

Stávající budovy tu začaly vznikat podle plánů brněnského stavitele Josefa Arnolda v novorenesančním stylu už před 140 lety a sloužily v tehdejší době jako sirotčinec. Budovy měly jedno podzemní a tři nadzemní podlaží. V roce 1919 byl areál předán nově založené Masarykově univerzitě. V roce 1953 bylo přistaveno čtvrté patro. V průběhu let zde bylo přistaveno několik menších, většinou nepodsklepených budov. Jako poslední objekt tu v roce 2001 přibyla fakultní knihovna. Jedná se o železobetonový skelet založený na základové desce, která je kombinovaná s vrtanými pilotami.

Nově navržený objekt má rozměry 50,6 x 36,8 m. Podzemní podlaží jsou určena pro parkovací stání a pro rozšíření depozitářů knihovny. Z konstrukčního hlediska se jedná o monolitický železobetonový stěnový systém se stropními deskami, který je pro větší rozpětí stropních desek doplněn částečným předepnutím. Objekt je založen na základové desce v kombinaci s vrtanými pilotami. Železobetonová vana suterénu je navržena jako bílá vana z vodonepropustného betonu s těsněnými spárami proti zvýšené zemní vlhkosti. [7]

#### **4.3.2 Základové poměry**

Svrchní vrstva základové půdy je tvořena navážkami z písčité hlíny tř. F3 tuhé až pevné konzistence se zbytky stavební sutě. Pod navážkou se nachází vrstva sprašové hlíny tř. F6 tuhé až pevné konzistence. Jedná se o prachově až jílovitoprachové hlíny

charakteru drobně přemístěných, původně eolických sprašových hlín ve svrchní části půdního profilu. Další vrstvou jsou jílovité až jílovito-prachové hlíny tř. F8 tuhé až pevné konzistence. Ještě hlouběji se nachází říční terasa středně ulehých jílovito-písečných štěrků tř. G4. V nejspodnější vrstvě je neogénní jíl, tuhý až pevný tř. F8.

Základová spára nového objektu se nachází v hloubce kolem 8 m od stávajícího terénu. V této hloubce se nachází jílovito-prachové hlíny tř. F6 s přechodem na silně vápnité prachové jíly. Hladina podzemní vody se nachází přibližně 2 m pod základovou párou. [7]

#### **4.3.3 Zajištění stavební jámy**

Výkop byl řešen jako pažená stavební jáma na volných okrajích zajištěná dvojnásobně kotvenou záporovou stěnou (Obrázek 4-3). Části jámy, které přiléhají ke stávajícím budovám, jsou zapaženy tryskovou injektáží, která zároveň podchytává cihelné základy těchto budov a je zajištěna kratšími aktivovanými kotvami pod stávající objekty. Prohloubení pro komunikační jádro pod stávající budovou bylo zajištěno rozepřeným záporovým pažením. [7]

#### **4.3.4 Podchycení tryskovou injektáží**

Některé okraje stavební jámy přímo sousedí se základy stávajících budov, jejichž základová spára byla výš než dno stavební jámy. Proto bylo nutné je podchytit pomocí sloupů TI (Obrázek 4-4). Zároveň sloužily jako pažení stavební jámy. Sloupy TI měly průměr 0,8 - 0,9 m a byly ukloněné pod úhlem 3 – 10°. Sloupy byly vyztuženy trubkami 89/10. Tato stěna z překrývajících se sloupů TI byla kotvena dvěma řadami dočasných kotev přes ocelové převázky, které jsou zapuštěné do sloupů TI. Vyčnívající části TI byly po odkopání ubourány, aby byla zajištěna rovinnost pažicí konstrukce. Na tento povrch byla provedena vrstva stříkaného betonu vyztužená betonářskými ocelovými sítěmi.

Ve stávajících objektech byly některé konstrukce vybourány. Způsobilo to redistribuci zatížení, a proto bylo nutné základy těchto konstrukcí také podchytit sloupy TI. Tuto TI bylo nutné provádět v uzavřených prostorech. [7]



*Obrázek 4-3: Stavební jáma Filozofické fakulty MU [7]*



*Obrázek 4-4: Objekt podchycený TI s odbouranou přesahující částí [7]*

## 5 PALÁC CHLUMECKÝCH

### 5.1 Informace o objektu

Většina uvedených informací a podkladů k paláci Chlumeckých pochází od firmy Keller.

#### 5.1.1 *Historie Paláce Chlumeckých*

Palác Chlumeckých je budova, která se nachází na rohu ulic Česká a Jakubská v historickém centru města Brna. Byla postavena ve 40. nebo 50. letech 19. století v pozdně klasicistním stylu. Jedná se o jeden z nejstarších nájemních domů v Brně. Vznikl na místě původních čtyř měšťanských domů.

První majitelkou tohoto domu byla Anna Chlumecká, žena velkostatkáře a dvorního rady Antona Johanna Rittera von Chlumetzky. Jejich rodinný znak je možné vidět na původním portálu z ulice Česká. Od roku 1852 tu sídlila Obchodní a živnostenská komora a od roku 1856 Vojenský zemský soud. Také tu působil 1. brněnský pěvecký a čtenářský kroužek pro dělníky a živnostníky, který byl založen roku 1867. Mezi lety 1907 až 1942 tu měla sídlo redakce Lidových novin. V jedné kanceláři zde roku 1928 spáchal sebevraždu Rudolf Těsnohlídek. V posledních letech před rekonstrukcí v přízemí sídlila pivnice a restaurace Středověká krčma.

Palác byl v roce 2011 zakoupen společností Magnum, která následující rok zahájila rekonstrukci objektu, který již byl tou dobou v havarijním stavu. [8]

#### 5.1.2 *Popis objektu před rekonstrukcí*

Je to rozsáhlý pětipatrový objekt s vysokým půdním patrem. Čtyřkřídlá dvoutraktová dispozice se zadním východním jednotraktovým křídlem uzavírá velký obdélníkový dvůr. Ten je z velké části zastavěn novodobými přízemními objekty. V ose křídla při ulici Česká je situován hlavní průjezdový vstup. Přibližně asi ½ objektu je podsklepená.

Půdorysné rozměry objektu jsou přibližně 41 x 41 m. Výška po hřeben se pohybuje od 20 do 25 m.

### **5.1.3 Geologie základové půdy**

Byly zde provedeny 3 kopané sondy z důvodu zjištění průběhu základů a geologie. Jako relativní 0 byla zvolena výška 216,80 m n.m., která odpovídá úrovni chodníku ve vjezdu v ulici Česká. Sondy byly vykopány do hloubky cca 0,6 – 1,1 m pod úroveň podlahy sklepů (cca -2,8...-3,0 m).

Stávající objekt je založen v prachových hlínách s pevnou konzistencí F6 CL a pod nimi je vrstva neogenního jílu F8 CH. Dle sond je hladina podzemní vody v hloubce - 3,7 m. Podzemní voda nevykazuje uhličitou agresivitu, obsah síranů se pohybuje 150 – 200 mg\*l<sup>-1</sup>, proto lze charakterizovat agresivitu prostředí jako malou až střední.

### **5.1.4 Rozsah rekonstrukce**

V letech 2013-2014 proběhla rozsáhlá rekonstrukce paláce Chlumeckých. V prvních dvou podlažích se nyní nachází obchody, ve třetím vznikly kanceláře a v horních dvou patrech jsou byty a apartmány. Do vnitřního dvora byla vestavěna třípatrová konstrukce s jedním podzemním podlažím. Vznikla v ní parkovací stání.

Při zakládání budovy ve vnitřním dvoře musela být vyhloubena stavební jáma, která dosahovala hloubky přes 7 m (Obrázek 5-1). Jámu bylo třeba zapažit a zároveň i podchytit stávající základy budovy. Byla zvolena metoda kotvené tryskové injektáže (Obrázek 5-2).

Vestavěná konstrukce je z monolitického železobetonu. Je založena na základové desce v systému „bílá vana“ a je propojena s 1. PP ve stávajícím objektu, kde byly prohloubeny úrovně podlah a sníženy stávající základové spáry pomocí tryskové injektáže.

Trysková injektáž byla použita při celkovém podchycení stávajících základů. V místech, která bezprostředně nesousedila s jámou a ani nebyla prohlubována, to bylo z toho důvodu, aby bylo sníženo kontaktní napětí v základové spáře.





Obrázek 5-1: Stavební jáma ve vnitřním dvoře Paláce Chlumeckých [7]



Obrázek 5-2: Vrtání horninových kotev [7]

## 5.2 Numerický model

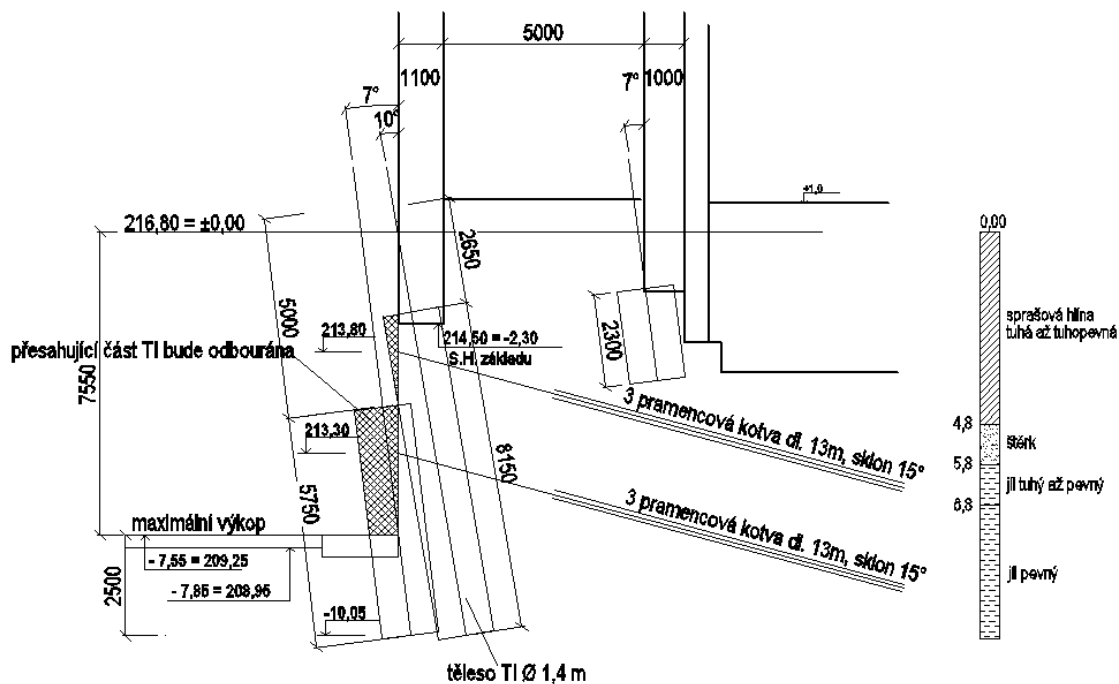
Cílem numerického modelování bylo vytvořit model stavební jámy a určit vnitřní síly a deformace sloupů TI. Nejdříve jsem měl v plánu porovnat reálné deformace s těmi vymodelovanými, ale žádná měření neproběhla. Proto jsem se tedy rozhodl vytvořit tři stejné modely s rozdílným konstitutivním modelem chování zeminy. Jako první jsem zvolil často používaný lineárně-plastický Mohr-Coulombův model (dále M-C model), jako druhý již méně používaný a složitější Hardening Soil model (dále HS model) se dvěma na sobě závislými plochami plasticity a nakonec jsem použil nejsložitější Hardening Soil model with small strain stiffness (dále HSS model), který vychází z HS modelu, v oblasti malých smykových deformací však počítá se zvýšeným smykovým modulem. Na závěr jsem porovnal jejich výsledky.

### 5.2.1 Zjednodušení modelu

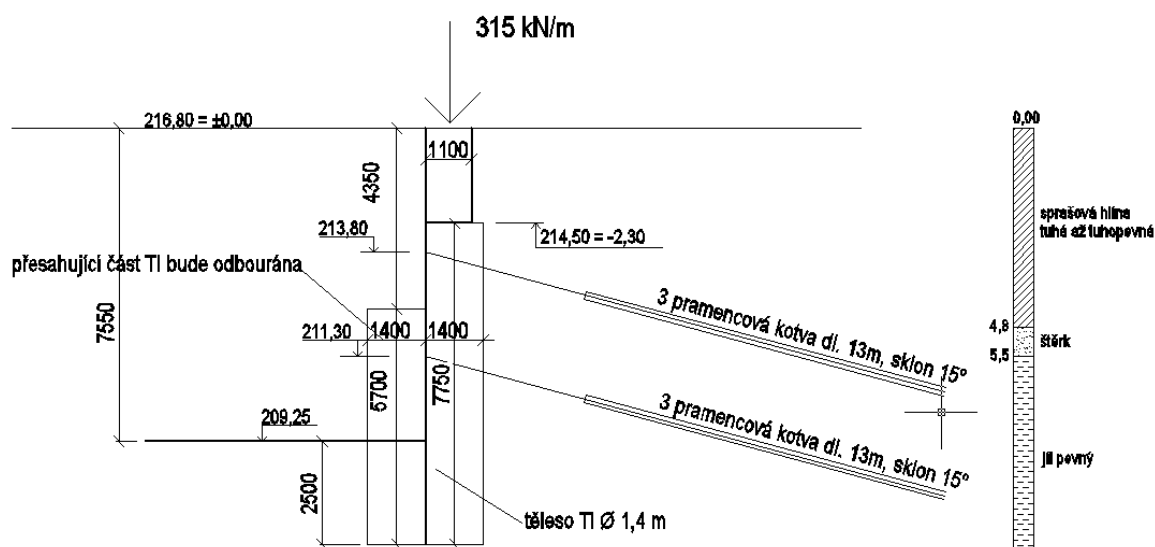
Jedná se o velmi složitou konstrukci, kde by bylo třeba zahrnout mnoho různých vlivů, abychom dosáhli přesného výsledku (Obrázek 5-3). Na místě nebyly provedeny laboratorní zkoušky, které by stanovily přesné pevnostní a deformační parametry zemin. Zeminy byly pouze zatřízeny a v modelu byly použity charakteristické hodnoty, které se dají považovat pouze za přibližné.

Model konstrukce byl vytvořen v 2D modulu programu Plaxis. Výstižnější by jistě bylo řešit úlohu jako prostorovou, ale už z důvodu nepřesných vstupních parametrů zemin bylo 2D řešení dostatečné. Úloha je uvažována jako rovinná deformace. Byly použity 15uzlové prvky. V modelu je 1805 prvků a 14592 uzlů.

Dalším zjednodušením modelu bylo vynechání hladiny podzemní vody. Sloupy TI jsou svislé (ve skutečnosti ukloněné o několik stupňů z důvodu možnosti realizace). A dále sloupy TI mají po celé výšce stejné vlastnosti, i když prochází zeminami s různými pevnostními parametry. Geometrie byla dále zjednodušena odstraněním ostatních částí stávající budovy a ponecháním pouze vnější nosné zdi. Vrstva šterku je v hloubce 4,8 – 5,5 m, místo původních 4,8 – 5,8 m. Tato úprava byla provedena z toho důvodu, aby bylo rozhraní zemin ve stejné hloubce jako spodní řada kotvení (Obrázek 5-4).



Obrázek 5-3 Řez skutečnou konstrukcí [7]



Obrázek 5-4: Geometrie modelu [autor]

### 5.2.2 Geometrie a prvky konstrukce

Celkové rozměry modelu jsou 50 x 20 m. Okrajové podmínky modelu jsou normální. Geotechnický profil se skládá ze 3 vrstev zemin:

- |               |                |        |
|---------------|----------------|--------|
| • 0 – 4,8 m   | sprašová hlína | F6 CL  |
| • 4,8 – 5,5 m | štěrk          | G3 G-F |
| • 5,8 – 20 m  | pevný jíł      | F8 CH  |

Sloupy TI jsou modelovány jako objemový prvek s příslušnými pevnostními parametry. Průměr sloupů TI je 1,4 m. V modelované části konstrukce se nachází 2 řady sloupů. Hlavní řada je spojena se stávajícím základem. Její horní okraj je v hloubce 2,30 m a sahá do hloubky 10 m. Druhá řada je situována směrem do stavební jámy v hloubce 4,35 – 10 m, a v průběhu výkopu bude odbourávána až ke dnu stavební jámy.

Konstrukce je kotvená ve dvou řadách. Jednotlivé kotvy jsou od sebe vzdálené 2,4 m. Mají délku 13 m a jsou pod úhlem 15° od vodorovné roviny. Jejich volná délka je 4 m a kořenová část 9 m. Byly modelovány pomocí prvků node-to-node anchor a geogrid.

### **5.2.1 Vstupní parametry**

Základní pevnostní a deformační parametry zemin (Tabulka 5-1) jsem převzal ze zprávy o geologicko-inženýrském průzkumu, který zde byl před stavbou proveden. V rámci tohoto průzkumu byly zatříděny zeminy, které se tu nacházely, a podle toho jim byly přiřazeny odpovídající charakteristické vlastnosti. Laboratorní zkoušky pro přesnější stanovení vlastností nebyly provedeny.

Pro složitější HS a HSS modely (Tabulka 5-2) bylo potřeba doplnit deformační parametry  $E_{50}$ ,  $E_{oed}$  a  $E_{ur}$ . Dále bylo třeba určit exponent  $m$  a součinitel vodorovného tlaku  $K_0$ . Tyto hodnoty jsem zvolil podle doporučení ing. Juraje Chalmovského. Za  $E_{50}$  a  $E_{oed}$  jsem dosadil stejné hodnoty jako u M-C modelu za  $E'$ .  $E_{ur}$  jsem zvolil jako trojnásobek této hodnoty. Exponent  $m$  se pro soudržné zeminy blíží 1 a pro nesoudržné 0,5. Pro spraš a jíl jsem použil 0,8 a pro štěrk 0,52. Velikost  $K_0$  jsem určil ze vztahu:  $K_0 = 1 - \sin \varphi$ .

Pro HSS model (Tabulka 5-3) bylo třeba ještě stanovit hodnotu smykového modulu  $G_0$  při velmi malých deformacích a parametr  $\gamma_{0,7}$ , který udává deformaci, při které je dosaženo snížení  $G_0$  na 72 %. Pro jíl a sprašovou hlínu jsem zvolil hodnoty smykového modulu 60 MPa a pro parametr  $\gamma_{0,7}$  deformaci 0,0001, opět podle doporučení ing. Chalmovského. Pro štěrk jsem zadal stejnou deformaci a 150 MPa pro smykový modul. [6]

Sloupy TI jsem modeloval jako objemové prvky, a proto bylo třeba určit jejich pevnostní parametry. Vycházel jsem z [4], kde byly uvedeny úhel vnitřního tření  $\varphi$  a koheze  $c$  pro sloupy TI vytvořené v různých materiálech. Vzhledem k tomu, že kromě metrového pásu štěrku zhruba uprostřed výšky, sloupy TI prochází sprašovou hlínou a jílem, pro které byly uvedené smykové parametry podobné, tak jsem zvolil pro kohezi hodnotu

1,1 MPa a pro úhel vnitřního tření 41°. Tyto hodnoty přibližně odpovídají jak jílu, tak sprašové hlíně. U TI je dovolená pevnost v tahu na hodnotu 1,5 MPa.

Zdivo základu bylo modelováno také jako objemový prvek. Jeho parametry jsou však nepodstatné, protože slouží pouze k přenosu zatížení od budovy do sloupů TI a nijak neovlivní působení a deformace konstrukce. Zvolil jsem je podobné jako u TI, aby působily jako tuhý, těžko deformovatelný prvek, který bez problému přeneše příslušné zatížení.

*Tabulka 5-1: Vstupní parametry Mohr-Coulombova modelu [autor]*

Materiál	$\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\nu$ [-]	$c_{\text{ef}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi_{\text{ef}}$ [°]	$\psi$ [°]	Tahová pevnost [kN/m <sup>2</sup> ]
Sloup TI	20	-	5000000	0,25	1100	41	-	1500
Pevný jíl F8	17	20,5	6000	0,4	8	15	0	-
Spr. hlína F6	17,5	21	8000	0,4	16	19	0	-
Štěrk G3	16	19	80000	0,25	1	33	3	-

*Tabulka 5-2: Přidané vstupní parametry Hardening Soil modelu [autor]*

Materiál	$E_{50}^{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$m$ [-]	$K_0$ [-]
Pevný jíl F8	6000	6000	18000	0,8	0,700
Sprašová hlína F6	8000	8000	24000	0,8	0,650
Štěrk G3	80000	80000	240000	0,52	0,460

*Tabulka 5-3: Přidané vstupní parametry HSS modelu [autor]*

Materiál	$G_0$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_{0,7}$ [-]
Pevný jíl F8	60000	0,0001
Sprašová hlína F6	60000	0,0001
Štěrk G3	150000	0,0001

*Tabulka 5-4: Parametry hrominových kotev [7]*

Řada	Síla [kN]	$s^{\text{spacing}}$ [m]	Volná délka [m]	kořen [m]
Horní	330	2,4	4,0	9,0
Spodní	350	2,4	4,0	9,0

### **5.2.2 Fáze výpočtu**

Výpočet je rozdělen do několika fází podle pracovního postupu. Fáze 0 a fáze 1 jsou pro navození počátečního stavu, který byl před provedením TI.

- Fáze 0: Initial phase
- Fáze 1: Zatížení stávajícího základu
- Fáze 2: Tryskání
- Fáze 3: Odkop 1
- Fáze 4: Kotvení 1
- Fáze 5: Odkop 2
- Fáze 6: Odbourání 1
- Fáze 7: Kotvení 2
- Fáze 8: Odkop 3
- Fáze 9: Odbourání 2 – konečná fáze

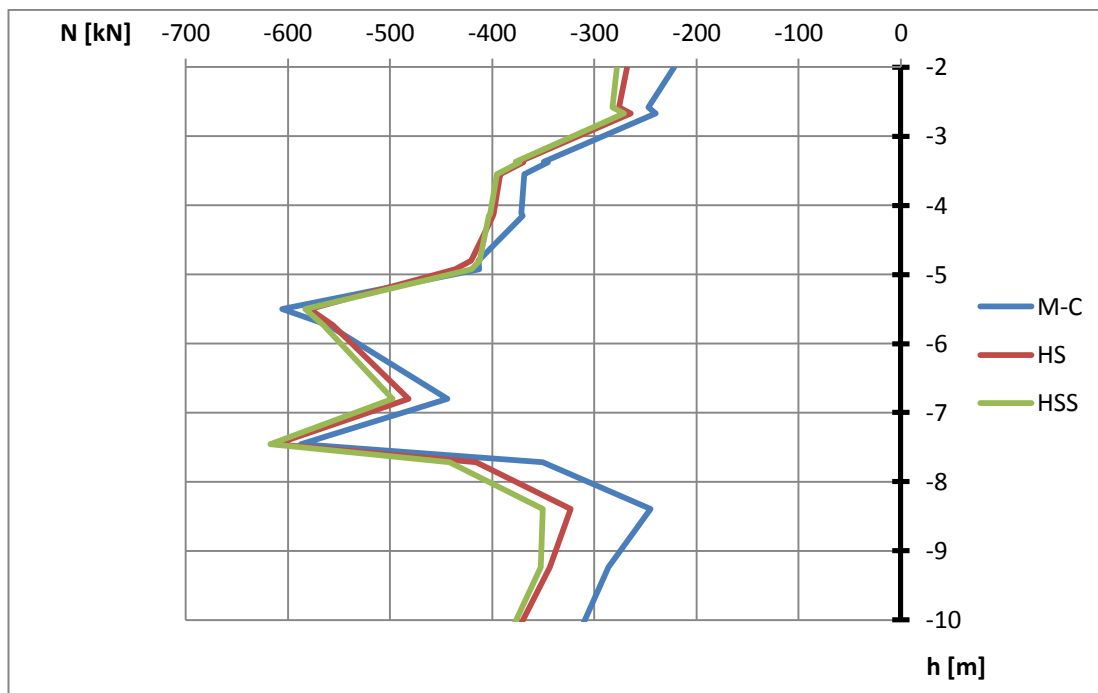
## **5.3 Výstupy**

Vzhledem k velkému množství fází výpočtu jsem provedl porovnání výsledků výpočetních modelů pouze ve fázi 9: Odbourání 2 – konečná fáze. Nejdříve jsem porovnal vnitřní síly ve sloupech TI, potom jejich vodorovné a svislé posuny. Nakonec jsem srovnal výskyt a množství plastických bodů v modelu. Výsledky některých dalších fází se nachází v příloze A.

### **5.3.1 Vnitřní síly**

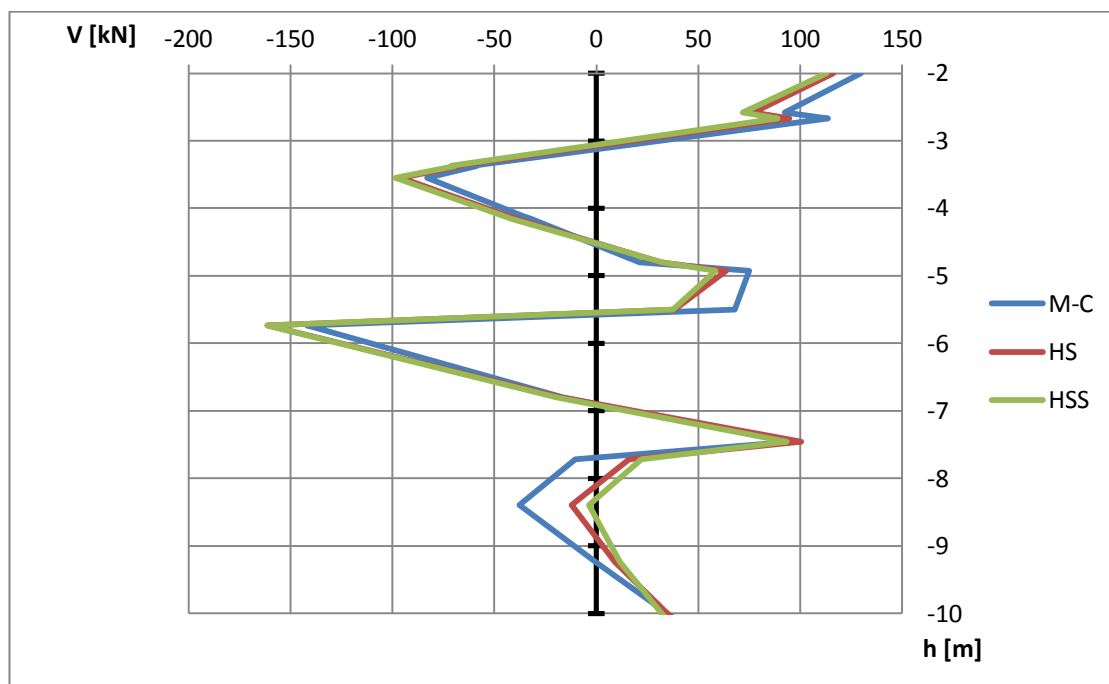
Následující tři grafy zobrazují normálové a posouvající síly a ohybové momenty. Výsledné vnitřní síly se při použití různých konstitutivních modelů od sebe navzájem výrazně neliší.

Na prvním grafu (Obrázek 5-5) jsou zobrazeny normálové síly. Maximální hodnota něco přes 600 kN byla dosažena u všech tří modelů. Průběh normálové síly pro HS model a HSS model je téměř totožný. U M-C modelu se průběh normálové síly místy lehce odlišuje, ale žádný výrazný rozdíl tu není.



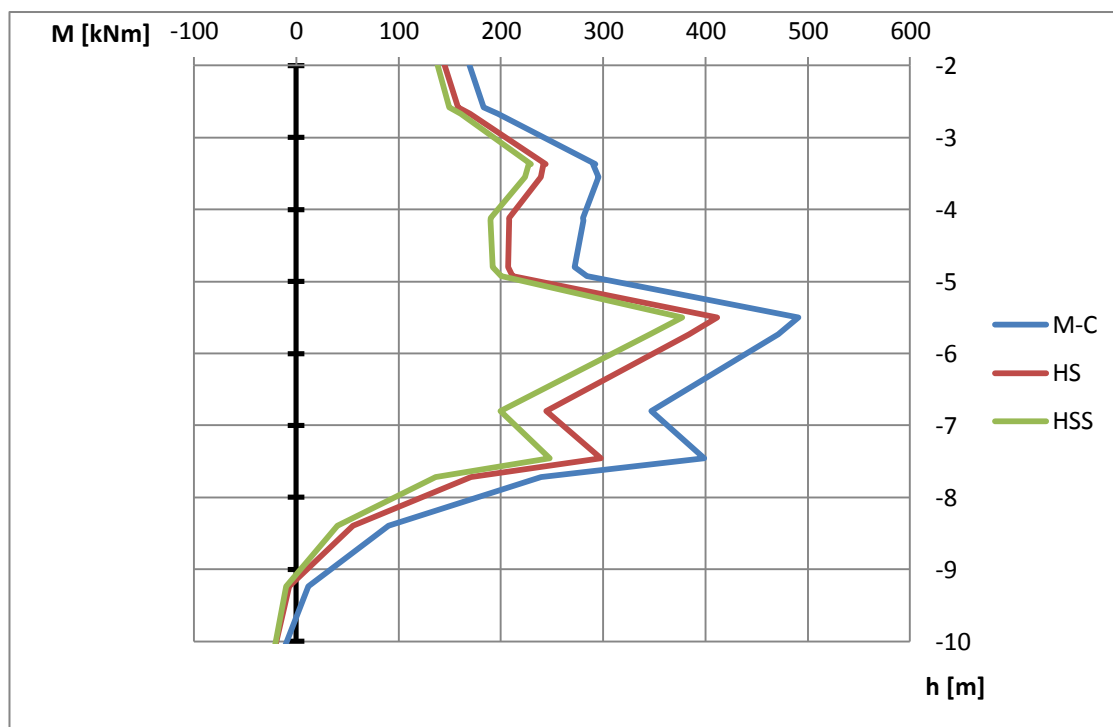
Obrázek 5-5: Srovnání normálových sil ve Fázi 9: konečná fáze

Na druhém grafu (Obrázek 5-6) je zobrazen průběh posouvajících sil. I zde jsou v podstatě hodnoty u všech tří modelů totožné. V některých místech se lehce liší M-C model od ostatních.



Obrázek 5-6: Srovnání posouvajících sil ve Fázi 9: konečná fáze

Nejvýraznější rozdíly jsou vidět na průběhu ohybových momentů na třetím grafu (Obrázek 5-7). Maximální moment 500 kNm byl dosažen v M-C modelu. Nejpříznivěji vyšel moment na HSS modelu – 375 kNm. HS model se pohybuje někde mezi, blíže k HSS modelu. Ale v zásadě rozdíly ve výsledcích také nejsou příliš významné.



Obrázek 5-7: Srovnání ohybových momentů ve Fázi 9: konečná fáze

### 5.3.2 Vodorovné deformace

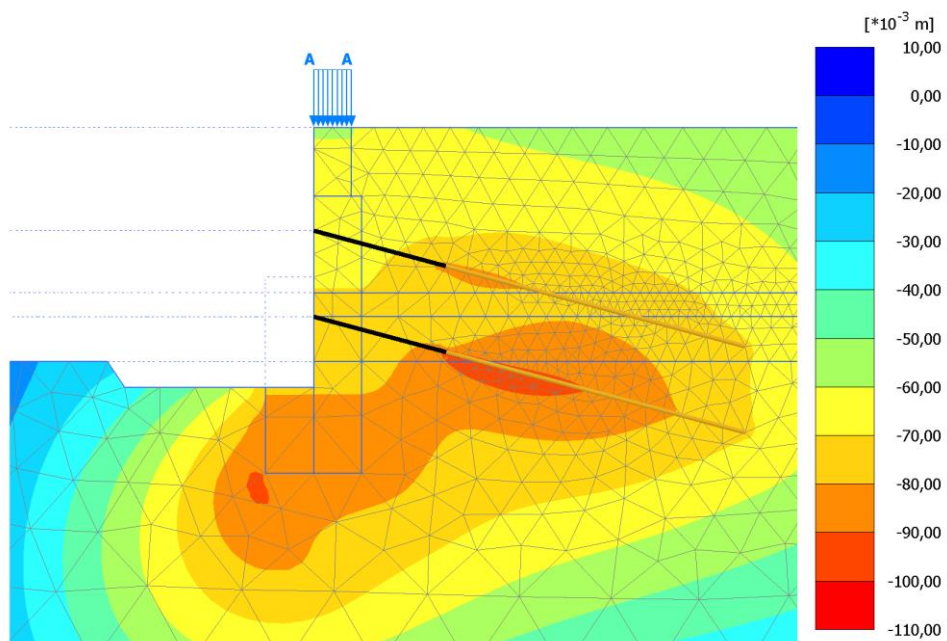
Na následujících třech obrázcích jsou zobrazeny vodorovné deformace  $u_x$  pro konečnou fázi. Na prvním jsou posuny při použití M-C modelu, na druhém při použití HS modelu a na třetím jsou výsledky z HSS modelu. Pak následuje graf, na kterém jsou porovnány výsledky.

Obrázek 5-8 ukazuje, že největší vodorovné posuny vznikly v kořenové oblasti horninové kotvy a u paty sloupů z TI. Vodorovný posun dosáhl na některých místech až 110 mm. Vodorovná deformace není po celé výšce stejná. U vrchu sloupů je výrazně menší než u jejich paty.

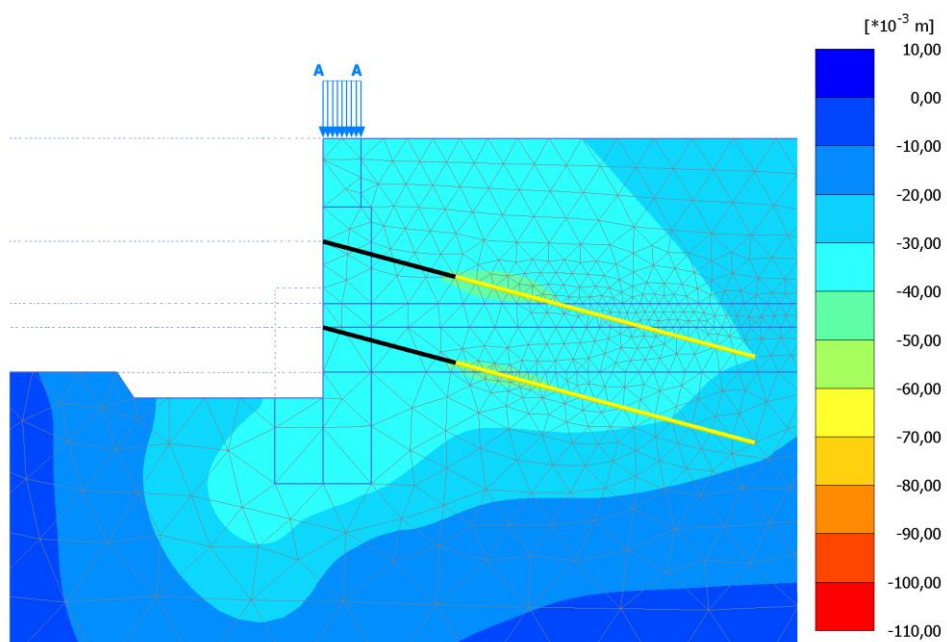
Na dalším obrázku (Obrázek 5-9) už dosahují maximální deformace jen 50 mm. Zase jsou v oblasti kořenů horninových kotev. Po výšce sloupu jsou přibližně konstantní.

Deformace HSS modelu (Obrázek 5-10) dosahují maximálně 30 mm.

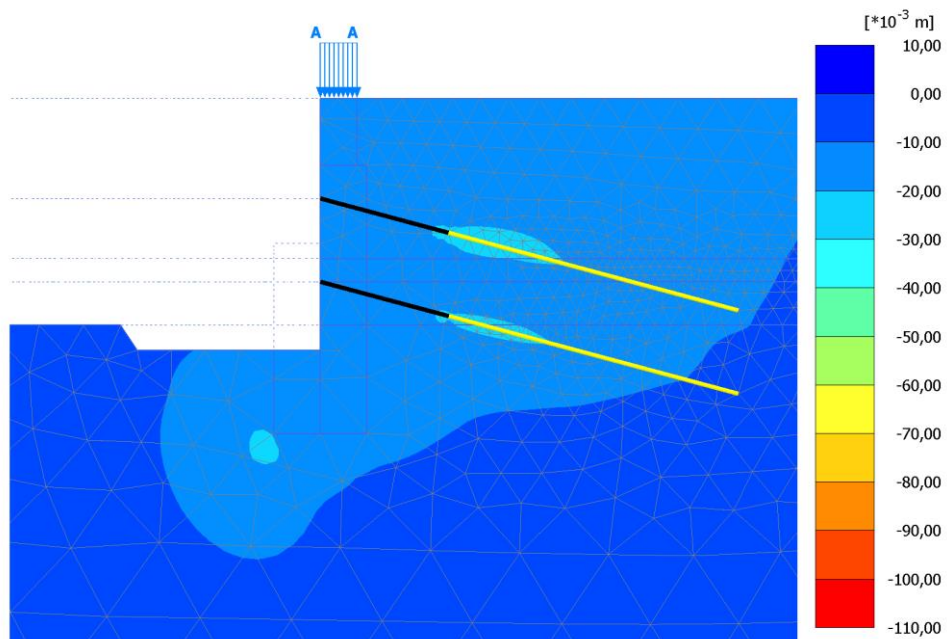




Obrázek 5-8: M-C, deformace  $u_x$ , konečná fáze

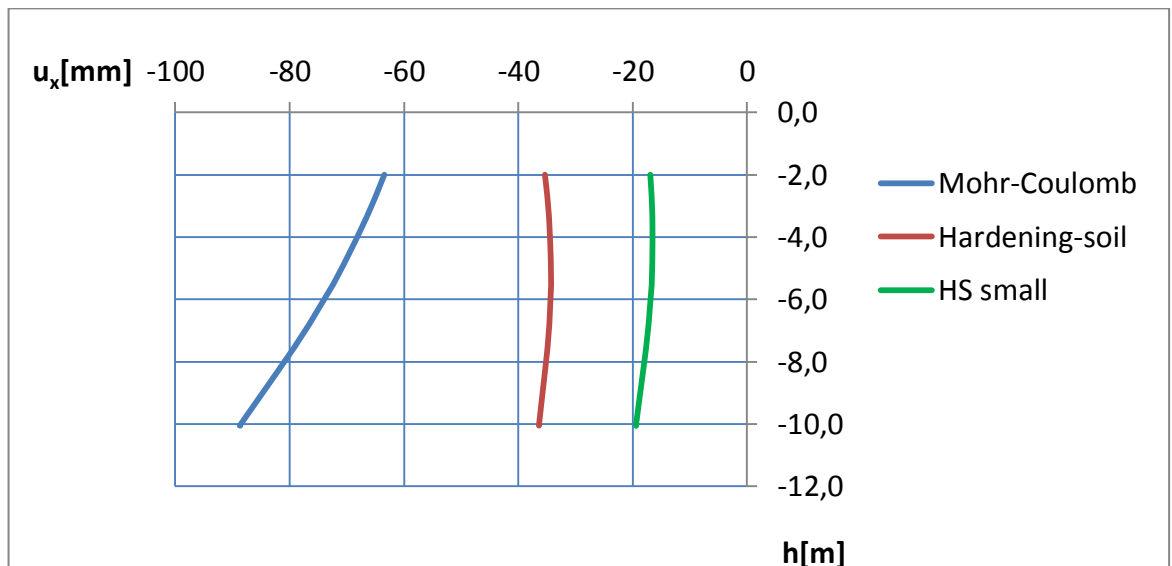


Obrázek 5-9: HS, deformace  $u_x$ , konečná fáze



Obrázek 5-10: HSS, deformace  $u_x$ , konečná fáze

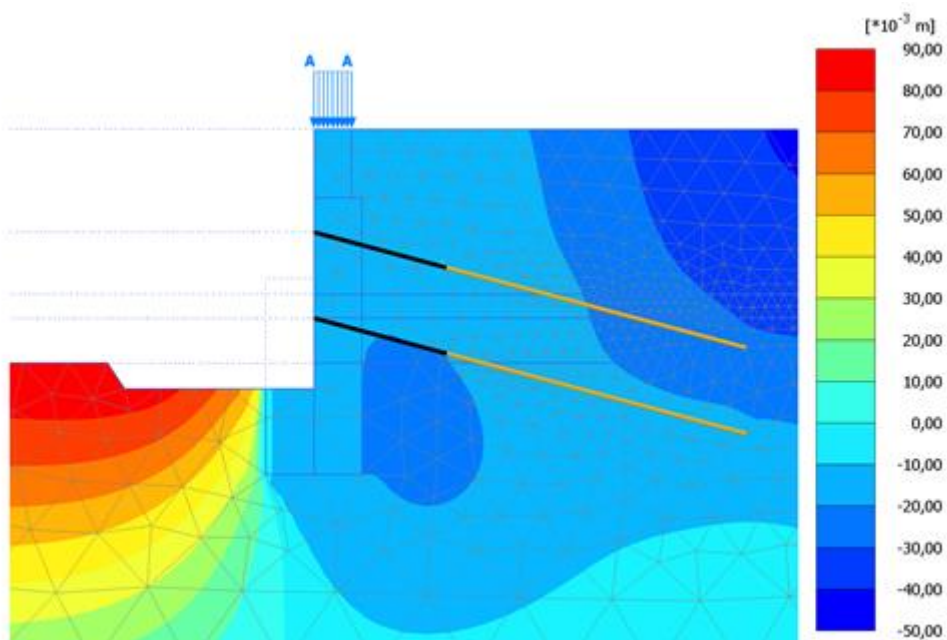
Graf (Obrázek 5-11) znázorňuje vodorovné deformace sloupu T1 po jeho výšce. Je z něj patrné, že největší deformace nastaly u M-C modelu a zároveň se po výšce velmi mění. U HS a HSS modelu jsou v podstatě konstantní. Nejmenší posuny vyšly pro HSS model, přibližně čtyřikrát menší než pro M-C model.



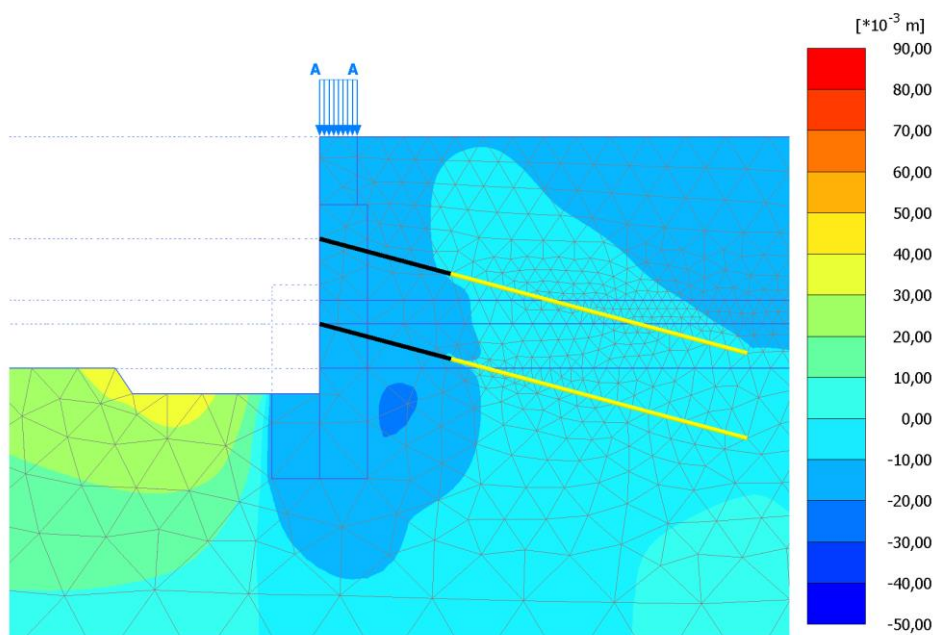
Obrázek 5-11: Srovnání vodorovných posunů ve Fázi 9: konečná fáze

### 5.3.3 Svislé deformace

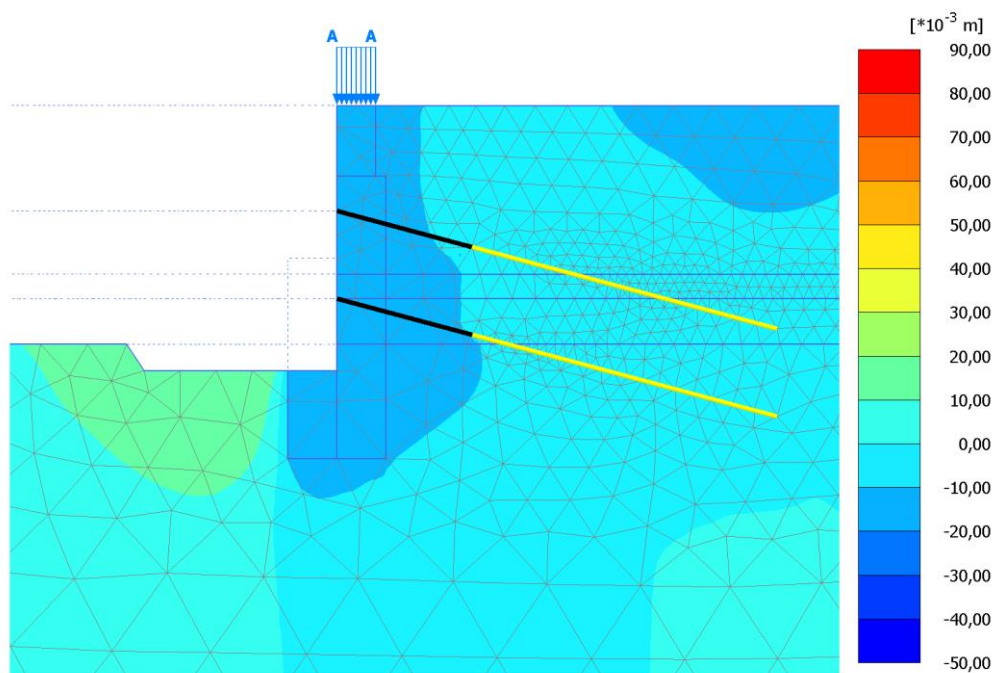
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny svislé deformace modelu při konečné fázi. U všech modelů sloupy TI poklesly a dno stavební jámy se nadzvedlo.



Obrázek 5-12: M-C, deformace  $u_y$ , konečná fáze

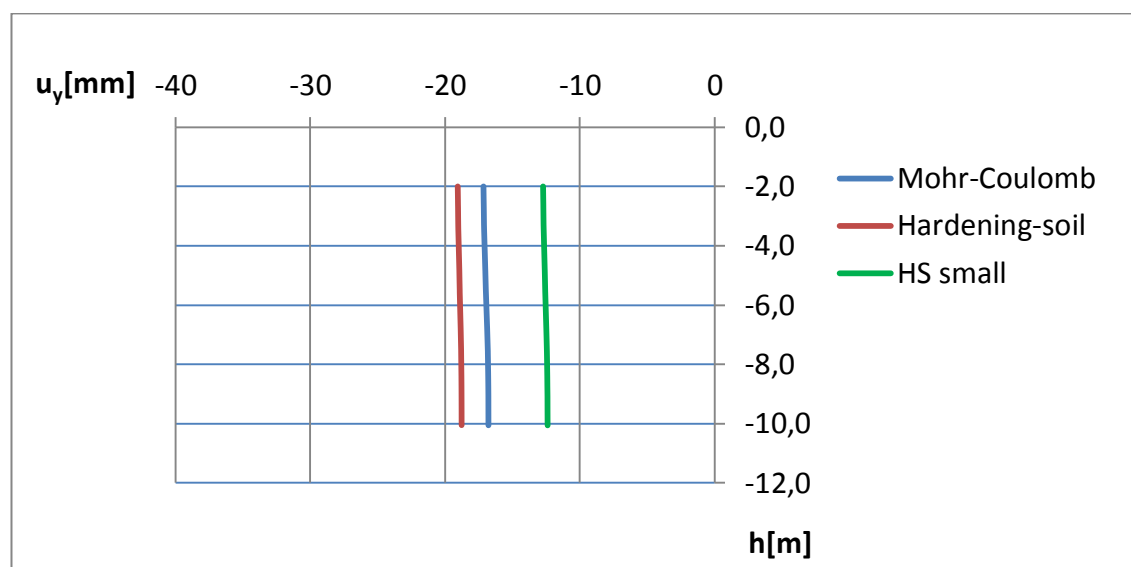


Obrázek 5-13: HS, deformace  $u_y$ , konečná fáze



Obrázek 5-14: HSS, deformace  $u_y$ , konečná fáze

Graf (Obrázek 5-15) porovnává svislé posuny sloupů T1. Oproti vodorovným posunům již nevznikly takové rozdíly v jednotlivých modelech. Největší deformace tentokrát vyšly pro HS model. Nejmenší zase pro HSS model. Velikost sednutí se pro jednotlivé modely pohybuje od 12 do 19 mm.



Obrázek 5-15: Srovnání svislých posunů ve Fázi 9: konečná fáze

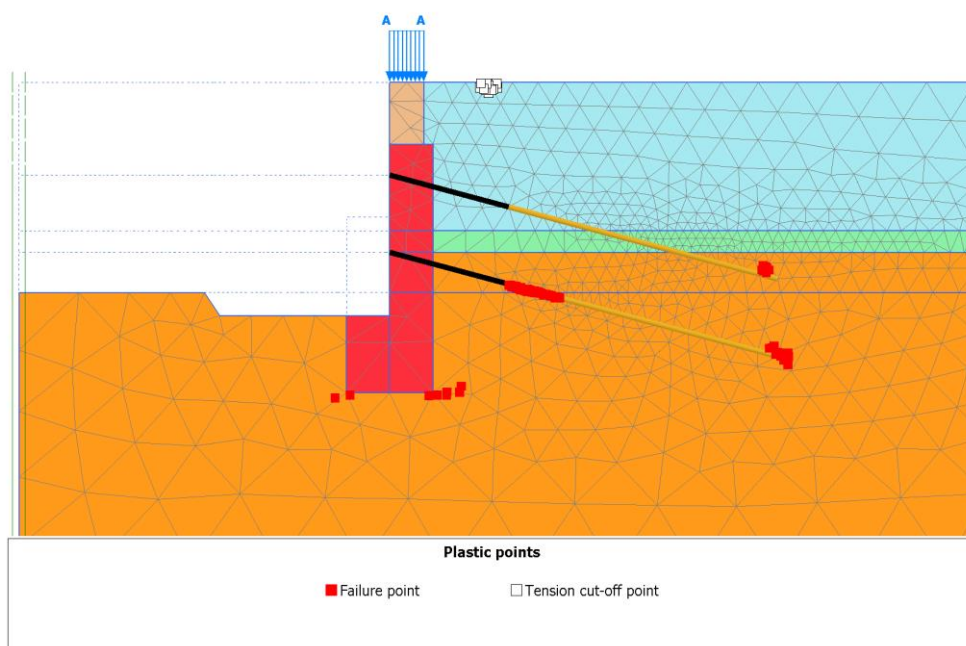
### 5.3.4 Plastické body

Dále jsem porovnal plastické a tahové body, které vznikly při konečné fázi výpočtu.

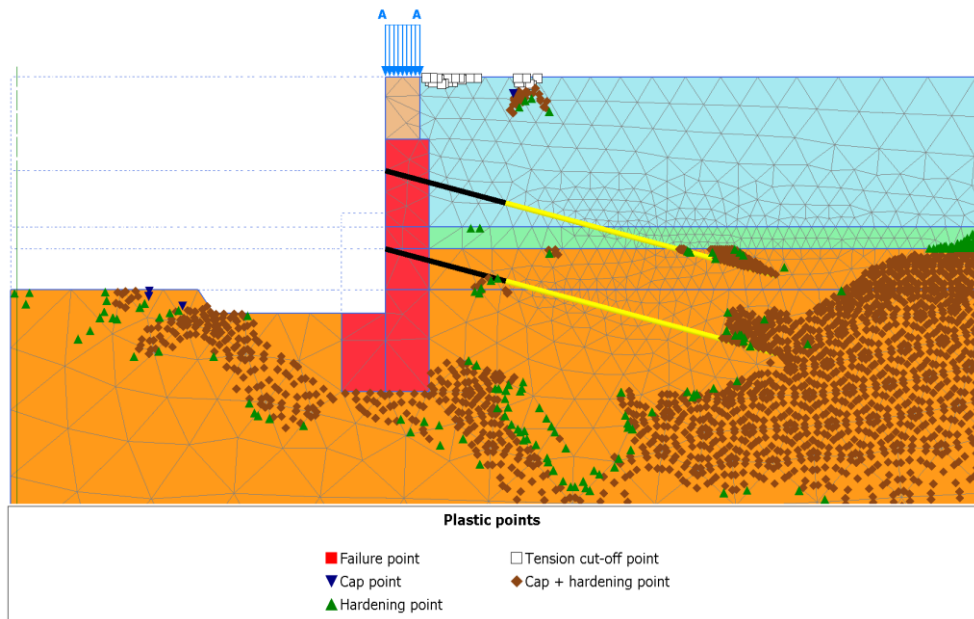
Nejméně těchto bodů vzniklo při použití M-C modelu (Obrázek 5-16). Objevilo se tu pár tahových bodů u povrchu za rubem konstrukce. Smyková pevnost byla porušena velmi nepatrně pod patou sloupů TI a trochu více v oblasti kořenů horninových kotev.

U HS modelu (Obrázek 5-17) vzniklo více tahových bodů ve stejné oblasti jako u M-C modelu. V téže oblasti se objevilo i několik bodů, kde byla aktivována jak smyková tak objemová plocha plasticity. Těchto bodů vzniklo více pod sloupy TI a v oblasti za kořeny horninových kotev. Dále se tu objevila místa, kde byla aktivována buď jenom smyková plocha plasticity anebo objemová plocha plasticity. V žádném místě však nedošlo k překročení únosnosti zeminy.

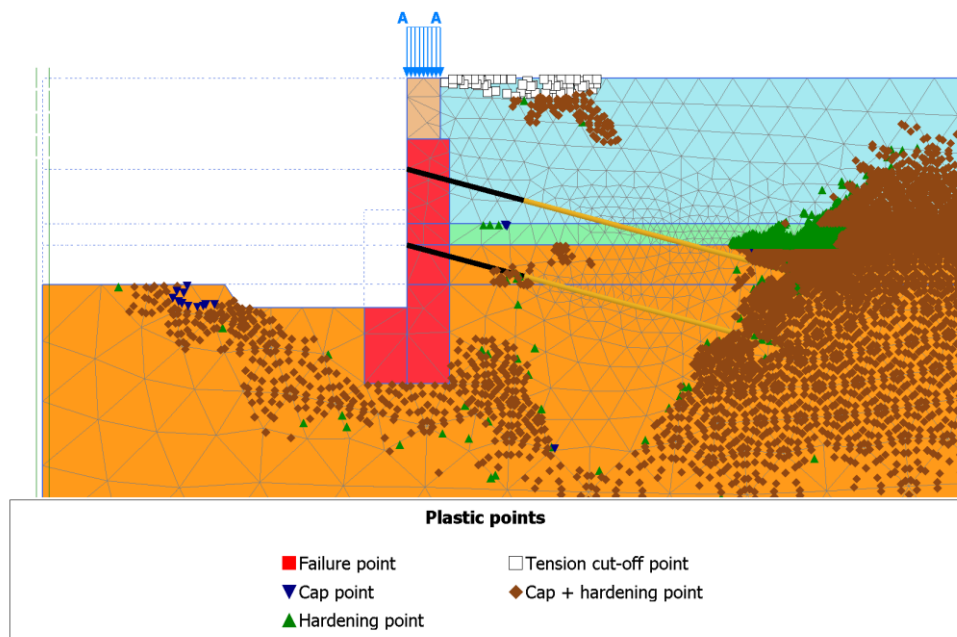
V HSS modelu (Obrázek 5-18) je rozmístění plastických bodů podobné jako u HS modelu, akorát se tu vyskytují ve větším množství. Stejně tak jako u HS modelu se tu neobjevily žádné body selhání.



Obrázek 5-16: M-C, plastické body a tahové body, konečná fáze



Obrázek 5-17: HS, plastické body a tahové body, konečná fáze



Obrázek 5-18: HSS, plastické body a tahové body, konečná fáze

## 5.4 Shrnutí výsledků

Všechny tři modely byly téměř totožné. Jediné, co se lišilo, byl model chování zeminy, a přesto některé výsledky byly velmi rozdílné.

Na vnitřní síly neměla změna konstitutivního modelu příliš velký vliv. Nejvýraznější rozdíly se projevily u ohybových momentů. Maximální hodnota momentu 500 kNm byla dosažena u M-C modelu. Nejnižší maximální hodnota 375 kNm vyšla u HSS modelu. V absolutním měřítku vyšel nejvyšší moment 650 kNm ve fázi 7: Kotvení 2 u M-C modelu. (viz příloha A)

U všech modelů vyšly větší vodorovné deformace než svislé. Sednutí se pohybovalo u všech modelů mezi 10 až 20 mm.

Při použití M-C modelu vyšly největší vodorovné i svislé deformace. Vodorovné byly místy až 110 mm, a zároveň došlo k nezanedbatelnému pootočení sloupů TI. V úrovni původního základu vyšla vodorovná deformace 65 mm. Kdyby tu sloupy TI měly pouze funkci pažení stavební jámy, tak by to nebyl zase takový problém. Ale vzhledem k tomu, že zároveň sloužily i jako podchycení základů, tak by takovéto posuny velmi závažně ovlivnily stabilitu podchycené budovy.

Při použití HS modelu byly vodorovné deformace přibližně poloviční oproti M-C modelu. Naopak sednutí sloupů TI vyšlo o několik milimetrů větší. Konstrukce se nijak nenatočila.

Nejpříznivější jsou výsledky z HSS modelu. Vodorovné posuny nepřesáhly 20 mm, což je polovina oproti HS modelu a dokonce jenom čtvrtina oproti M-C modelu. Sedání vyšlo okolo 13 mm, což je také ze všech modelů nejméně.

Pažení a podchycení TI bylo pravděpodobně navrženo na klidový tlak, to znamená, že se nepřipouštěly žádné vodorovné posuny. Bohužel není možné určit, jestli k nějakým deformacím ve skutečnosti došlo, protože žádná reálná měření neproběhla, a proto nelze s jistotou stanovit, který model je výstižnější. Skutečnosti se pravděpodobně nejvíce přibližují výsledky z HSS modelu.

Přesnost výsledků je však třeba brát s rezervou z důvodu zjednodušení modelu a nepřesných vstupních parametrů.

Z výsledků modelování plyne, že změna konstitutivního modelu chování zeminy nijak zásadně nezmění průběh vnitřních sil, ale může velmi výrazně ovlivnit deformace konstrukce. Proto je třeba být velmi rozvážný při volbě modelu.



## 6 ZÁVĚR

Trysková injektáž je metoda, která má před sebou jistě velkou budoucnost, avšak stále je finančně náročná. Drahé je jak pořízení technologie, tak samostatné provádění. V dnešní době je v některých případech tato metoda speciálního zakládání těžko nahraditelná nebo je dokonce jediným možným způsobem, jak vyřešit problémy se zakládáním ve složitých geotechnických podmínkách. Obrovská výhoda tryskové injektáže spočívá v její prostorové nenáročnosti. To se dá velmi dobře využít ve stísněných poměrech, při rekonstrukcích a přestavbách již stojících objektů.

Numerické modelování tryskové injektáže je relativně náročný úkol. Vyskytuje se v něm mnoho různých faktorů, které mohou výrazně ovlivnit správnost výsledku. Pro přesné modelování a použití vyspělejších konstitutivních modelů (HS, HSS) je třeba znát velké množství parametrů, které je někdy problematické až skoro nemožné stanovit. Pro jejich určení se musí provádět náročné laboratorní zkoušky, na které v praxi obvykle není čas. Ale i při pouhém odhadu těchto parametrů, který odpovídá charakteristickým hodnotám pro modelované zeminy, je možné dosáhnout kvalitativně lepších výsledků než při použití jednodušších modelů, jako je například Mohr-Coulombův.

Určitě by však nebylo správné při návrhu ať už pažící nebo jakékoliv jiné geotechnické konstrukce spoléhat pouze na matematické modelování. Vždy je vhodné, aby výsledky numerického modelování byly porovnány s analytickým výpočtem, případně fyzikálním modelováním.

Cílem této práce bylo popsat způsoby zlepšování zemin a zmapovat metodu tryskové injektáže, shmout její historii, současný stav a oblasti, kde je vhodné ji využít. Dále v ní bylo popsáno několik konkrétních aplikací s hlavním zaměřením na stavební jámu v objektu paláce Chlumeckých. Byl vytvořen numerický model a vyhodnoceny jeho výsledky. Vše bylo splněno v rozsahu odpovídajícím zadání.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] TURČEK, Peter. *Zakládání staveb*. Bratislava: Jaga, 2005, 302 s. Architektura, stavebnictví, bydlení. ISBN 8080760233.
- [2] MASOPUST, Jan. *Navrhování základových a pažicích konstrukcí: příručka k ČSN EN 1997*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2012, 208 s. ISBN 978-80-87438-31-2.
- [3] ČSN EN 12716. *Provádění speciálních geotechnických prací: Trysková injektáž*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2002.
- [4] CROCE, Paolo, Alessandro FLORA a Giuseppe MODONI. *Jet grouting: technology, design and control*. xvii, 284 pages. ISBN 041552640x, 2014.
- [5] VERFEL, Jaroslav. *Injektování hornin a výstavba podzemních stěn*. Vyd. 2., přeprac. Bratislava: MÚS BRADLO, 1992, 511 s., 16 příl. ISBN 80-7127-043-1.
- [6] NORDAL, Edited by Thomas Benz & Steinar. *Numerical methods in geotechnical engineering: proceedings of the Seventh European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Trondheim, Norway, 2-4 June 2010*. Leiden: CRC Press, 2010. ISBN 9780415592390.
- [7] Materiály od firmy Keller
- [8] Palác Chlumeckých. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Pal%C3%A1c\\_Chlumeck%C3%BDch](http://cs.wikipedia.org/wiki/Pal%C3%A1c_Chlumeck%C3%BDch)
- [9] SVOBODOVÁ, Karolína. 2014. Stánky musí pryč. Historickou budovu na Mendlově náměstí v Brně opraví. *IDNES.cz: Brno a jižní Morava* [online]. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: [http://brno.idnes.cz/funkcionalisticka-budova-na-mendlaku-dwn-/brno-zpravy.aspx?c=A140813\\_2090321\\_brno-zpravy\\_daj](http://brno.idnes.cz/funkcionalisticka-budova-na-mendlaku-dwn-/brno-zpravy.aspx?c=A140813_2090321_brno-zpravy_daj)
- [10] 3.2.4 *Trysková injektáž* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://technologie.fsv.cvut.cz/aitom/podklady/online-zakladani/textjama324.html>
- [11] *Trysková injektáž Soilcrete* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.kellergrundbau.cz/technologie/files/67-03CZ.pdf>

- [12] Grout line Grout Line Soilmec. *SOILMEC AT INTERMAT 2015* [online]. [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: [http://www.soilmec.com/en/viewdoc.asp?co\\_id=3276](http://www.soilmec.com/en/viewdoc.asp?co_id=3276)
- [13] BZÓWKA, Joanna, Anna JUZWA, Konrad WANIK, Lidia WANIK a Tomasz ŻYREK. 2015. DISCUSSION ON THE INFLUENCE OF VARIOUS TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON JET GROUTING COLUMNS GEOMETRY. In: *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava*. Ostrava. ISSN 1804-4824.
- [14] Híbková injektáž. *Atlas sanačných metód environmentálnych záťaží* [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://envirozataze.enviroportal.sk/atlassanmetod/jar/default.htm?turl=WordDocuments%2Fhbkovinjekt.htm>

## Seznam použitých zkratek

<b>TI</b>	trysková injektáž
<b>tř.</b>	třída
<b>M-C</b>	Mohr-Coulomb
<b>HS</b>	Hardenind Soil
<b>HSS</b>	Hardening Soil small
<b><math>k_F</math></b>	propustnost
<b><math>\gamma_{\text{unsat}}</math></b>	objemová hmotnost vysušené zeminy
<b><math>\gamma_{\text{sat}}</math></b>	objemová hmotnost nasycené zeminy
<b><math>E'</math></b>	modul pružnosti
<b><math>\nu</math></b>	Poissonovo číslo
<b><math>c_{\text{ef}}</math></b>	koheze efektivní
<b><math>\varphi_{\text{ef}}</math></b>	úhel vnitřního tření efektivní
<b><math>\psi</math></b>	úhel dilatance
<b><math>E_{50}^{\text{ref}}</math></b>	sečnový modul z triaxiální zkoušky
<b><math>E_{\text{oed}}^{\text{ref}}</math></b>	tečnový oedometrický modul
<b><math>E_{\text{ur}}^{\text{ref}}</math></b>	modul pružnosti při odtížení a opětovném přitížení
<b><math>m</math></b>	exponent řídicí závislost deformačních charakteristik na napětí
<b><math>K_0</math></b>	součinitel klidového tlaku
<b><math>G_0</math></b>	smykový modul
<b><math>\gamma_{0,7}</math></b>	přetvoření, při kterém se smykový modul sníží na 72%

## Seznam použitých obrázků

Obrázek 2-1: Hranice použitelnosti metod zlepšování [1].....	5
Obrázek 2-2: Schéma injektážního vrtu [14] .....	10
Obrázek 3-1: Jednofázový systém [11] .....	16
Obrázek 3-2: Dvojfázový systém vzduchový [11] .....	16
Obrázek 3-3: Trojfázový systém [11].....	17
Obrázek 3-4: Maloprofilová vrtací souprava [7].....	19
Obrázek 3-5: Čerpací a tlaková stanice tryskové injektáže [12] .....	19
Obrázek 3-6: Oblast použití metody[11].....	22
Obrázek 4-1: Trhliny v nosné zdi domu č. 16 na Mendlově náměstí [7] .....	27
Obrázek 4-2: Provádění tryskové injektáže v domě č. 16 na Mendlově náměstí [7] ....	28
Obrázek 4-3: Stavební jáma Filozofické fakulty MU [7] .....	31
Obrázek 4-4: Objekt podchycený TI s odbouranou přesahující částí [7].....	31
Obrázek 5-1: Stavební jáma ve vnitřním dvoře Paláce Chlumeckých [7].....	34
Obrázek 5-2: Vrtání horninových kotev [7] .....	34
Obrázek 5-3 Řez skutečnou konstrukcí [7].....	36
Obrázek 5-4: Geometrie modelu [autor].....	36
Obrázek 5-5: Srovnání normálových sil ve Fázi 9: konečná fáze .....	40
Obrázek 5-6: Srovnání posouvajících sil ve Fázi 9: konečná fáze .....	40
Obrázek 5-7: Srovnání ohybových momentů ve Fázi 9: konečná fáze .....	41
Obrázek 5-8: M-C, deformace $u_x$ , konečná fáze.....	42
Obrázek 5-9: HS, deformace $u_x$ , konečná fáze .....	42
Obrázek 5-10: HSS, deformace $u_x$ , konečná fáze .....	43
Obrázek 5-11: Srovnání vodorovných posunů ve Fázi 9: konečná fáze .....	43
Obrázek 5-12: M-C, deformace $u_y$ , konečná fáze.....	44
Obrázek 5-13: HS, deformace $u_y$ , konečná fáze .....	44
Obrázek 5-14: HSS, deformace $u_y$ , konečná fáze .....	45
Obrázek 5-15: Srovnání svislých posunů ve Fázi 9: konečná fáze.....	45
Obrázek 5-16: M-C, plastické body a tahové body, konečná fáze .....	46
Obrázek 5-17: HS, plastické body a tahové body, konečná fáze.....	47
Obrázek 5-18: HSS, plastické body a tahové body, konečná fáze .....	47

## Seznam použitých tabulek

Tabulka 3-1: Přibližný rozsah parametrů tryskové injektáže pro různé systémy [3] .....	17
Tabulka 5-1: Vstupní parametry Mohr-Coulombova modelu [autor] .....	38
Tabulka 5-2: Přidané vstupní parametry Hardening Soil modelu [autor].....	38
Tabulka 5-3: Přidané vstupní parametry HSS modelu [autor].....	38
Tabulka 5-4: Parametry hominových kotev [7] .....	38

## **Seznam příloh**

Příloha A: Výsledky modelování stavební jámy z programu PLAXIS

Příloha B: Podklady k paláci Chlumeckých