

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA GEOTECHNIKY



Vzorkování, uchovávání a zkoušení čerstvé cementové injekční směsi

Sampling, Storage and Testing of Fresh Cement Grout

Diplomová práce

Vypracoval: Bc. Adam Kroy

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Kos, CSc.

Praha, leden 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Kroy Jméno: Adam Osobní číslo: 423197
Zadávací katedra: 135 - geotechniky
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vzorkování, uchovávání a zkoušení čerstvé cementové injekční směsi
Název diplomové práce anglicky: Sampling, Storage and Testing of Fresh Cement Grout

Pokyny pro vypracování:

Součástí diplomové práce bude rešerše literatury k problematice technologií injektáží na bázi cementu a odběru, uchovávání a zkoušení vlastností zkušebních technologických vzorků injekčních směsí na bázi cementu. V experimentální části budou zkoumány mechanické charakteristiky vzorků injekčních směsí připravených v laboratoři a odebraných v terénu a faktory, které je mohou ovlivnit..

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 12716: Provádění speciálních geotechnických prací - Trysková injektáž. Praha: ČNI, 2002. 36 p.
KUTZNER, Ch. Grouting of Rock and Soil. Rotterdam: A.A.Balkema, 1996. 271 p.
DIN 4093 a další dle dohody

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Jan Kos, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018 Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

3.10.2018

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vzorkováním, uchováváním a zkoušením čerstvé cementové injekční směsi. Hlavním cílem práce je ukázat vliv sedimentace cementového pojiva směsi, uložené za různých podmínek, na pevnost v prostém tlaku. Podmínky uložení jsou dány hloubkou, odvodněním a časem zrání. Směs, která byla připravená v laboratoři, je cementová suspenze složená z cementu a vody míchaná v hmotnostním poměru voda/cement 1,0. Ze zatvrdlé směsi byly odvrtány vzorky, které byly zkoušeny na pevnost v prostém tlaku. Zmíněná receptura odpovídá injekční směsi pro technologii tryskové injektáže, proto se v rámci práce zaměřuji právě na tuto metodu speciálního zakládání. Čerstvá suspenze byla také podrobena zkouškám na hustotu, viskozitu a odstoj, které jsou běžně dle norem na injekčních směsích prováděny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Trysková injektáž, cementová suspenze, injekční směs, pevnost v prostém tlaku, sedimentace, viskozita, Marshův trychtýř, hustota, objemová hmotnost, zkušební vzorek, odvodnění

ABSTRACT

This thesis deals with sampling, storage and testing of fresh cement grout. The main aim of the thesis is to demonstrate, how uniaxial compressive strength of the grout, which is stored in different conditions, is influenced by sedimentation of cement binder. Storage of the grout is conditioned by depth, drainage and curing time. The grout, which was mixed in laboratory, is cement suspension composed of cement and water mixed by water/cement ratio 1,0. There were samples drilled off the hardened suspension and tested for uniaxial compressive strength. Mentioned formula of the suspension is equivalent to grout of jet grouting technology and therefore the thesis focus on this technology. The fresh grout was put to tests of density, viscosity and decantation as well. These tests of cement grout are conducted regularly according to standards.

KEY WORDS

Jet grouting, cement suspension, grout, uniaxial compressive strength, sedimentation, viscosity, Marsh cone, density, unit weight, testing samples, drainage

PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne 6.1. 2018

.....
podpis autora

Adam Kroy

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych touto cestou poděkovat panu Ing. Janu Kosovi, CSc., za jeho odborné vedení při provádění laboratorních zkoušek a poskytnuté konzultace při zpracování diplomové práce. Dále děkuji také firmě Keller – speciální zakládání, spol. s.r.o. a Ing. Václavovi Račanskému za poskytnutí námětu práce a odborné konzultace.

OBSAH

1	ÚVOD	9
1.1	Hypotézy k ověření.....	10
2	INJEKČNÍ SMĚSI	11
2.1	Injektáž.....	11
2.2	Suspenze, roztok, emulze, malta.....	11
2.3	Druhy injekčních směsí	12
2.4	Materiály k výrobě cementové injekční směsi	12
2.4.1	Cement	12
2.4.2	Voda	13
2.5	Charakteristiky cementové suspenze	13
2.5.1	Viskozita	13
2.5.2	Mez tečení.....	14
2.5.3	Sedimentace.....	15
2.5.4	Pevnost.....	16
3	TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ	17
3.1	Historie tryskové injektáže	17
3.2	Technologie	19
3.2.1	Pracovní postup.....	19
3.2.2	Zařízení a stroje	20
3.2.3	Systémy provádění	21
3.2.4	Parametry.....	22
3.3	Aplikace	23
3.3.1	Tvary prvků.....	23
3.3.2	Využití.....	24
3.4	Vlastnosti materiálu tryskové injektáže.....	26
3.4.1	Pevnost v tlaku	26
3.4.2	Oblast použití	27
3.4.3	Tíha prvku	27
3.4.4	Propustnost	28
3.5	Zkoušky, dohled a měření.....	29
3.5.1	Předběžné zkoušky.....	29
3.5.2	Dohled a zkoušení	29
3.5.2.1	Hustota	30
3.5.2.2	Odstoj (dekantace) vody.....	30
3.5.2.3	Viskozita podle Marshe.....	31
3.5.2.4	Doba tuhnutí.....	32
3.5.2.5	Zkouška pevnosti v prostém tlaku	32
3.5.3	Zkoušky pro stanovení geometrie prvku	33
3.5.3.1	Metoda ACI (Acoustic Column Inspector).....	33

4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
4.1	Plán laboratorních zkoušek.....	34
4.2	Směs ze stavby	36
4.3	Hustota.....	37
4.4	Dekantace.....	37
4.5	Viskozita podle Marshe	38
4.6	Zatěžovací zkoušky.....	41
4.6.1	Rozměry vzorku	41
4.6.2	Rychlost zatěžování	41
4.6.3	Stáří zkušebních těles pro zkoušení pevnosti.....	42
4.6.4	Cement.....	42
4.6.5	Pevnost v tlaku po 3 dnech - lavor	43
4.6.6	Pevnost v tlaku po 7 dnech - trubka neodvodněná.....	47
4.6.7	Pevnost v tlaku po 7 dnech - lavor	52
4.6.8	Pevnost v tlaku po 7 dnech - lavor, vysušené vzorky	54
4.6.9	Pevnost v tlaku po 7 dnech - trubka odvodněná 1.....	57
4.6.10	Pevnost v tlaku po 7 dnech - trubka odvodněná 2.....	59
4.6.11	Pevnost v tlaku po 14 dnech - lavor	62
4.6.12	Pevnost v tlaku po 28 dnech - lavor	64
5	VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ.....	66
6	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY.....	72

1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá odběrem, uchováváním a zkoušením vlastností injekční směsi na bázi cementu. Cílem je ověření vlivu uchovávání injekční směsi za různých podmínek na pevnost směsi. Podmínky uložení jsou dány hloubkou, odvodněním a časem zrání směsi. Vzhledem k tomu, že cementová suspenze, která bude připravena a zkoušena ve školní laboratoři, odpovídá složení injekční směsi pro tryskovou injektáž, se tato práce soustřeďuje právě na zmíněnou technologii. Po vytryskání suspenze do zeminy dochází k sedimentaci cementového pojiva v tělese tryskové injektáže. Tento jev způsobuje, že po zatvrdnutí injekční směsi má prvek rozdílnou tlakovou pevnost po jeho výšce. Cílem experimentu je ukázat, jakou mírou sedimentace ovlivňuje pevnost materiálu. Na laboratorně připravené směsi budou kromě pevnostních zkoušek provedeny také kontrolní zkoušky, které bývají prováděny na každé injekční směsi, neboť jsou stanoveny normou, a to měření hustoty, viskozity a odstoje vody. Byla odebrána i směs z čerstvě vytryskaného sloupu na stavbě, která nakonec nebyla zkoušena.

V první, rešeršní, části jsou charakterizovány injekční směsi a rozebrány materiály, ze kterých se cementová suspenze skládá. Následně jsou popsány vlastnosti typické pro cementové suspenze, které se dotýkají tématu diplomové práce. Další, informativní, část popisuje samotnou technologii tryskové injektáže, pracovní postup, potřebná zařízení, parametry, druhy, původ a vývoj tryskové injektáže. Dále tato část uvádí vlastnosti materiálu tryskové injektáže, aplikace této technologie v dnešní době a oblast užití. Závěr kapitoly obsahuje popis testování a zkoušení injektážní směsi.

Druhá kapitola je věnována experimentální části. Je zde rozebrán plán a důvody zkoušek, které byly provedeny. U každé zkoušky je popsán postup, technologické provedení a měření charakteristik vzorků. Charakteristiky jsou uvedeny v tabulkách a okomentovány. Provedené experimenty jsou dokumentovány také fotograficky.

Následuje přehled dat a výsledků obdržných z laboratorních zkoušek, resp. jejich interpretace v podobě grafů, které zobrazují závislosti pevností v tlaku na objemových hmotnostech a pórovitostech prvků. Dále je také zobrazen vývoj pevnosti v tlaku suspenze v závislosti na čase.

V závěru je shrnuto splnění vytyčených cílů a přínos diplomové práce jako takové.

1.1 Hypotézy k ověření

Z laboratorně připravené cementové suspenze o vodním součiniteli 1,0, která bude uložena v metrových umělohmotných trubkách a latoru, budou za různých podmínek uložení odvrtána zkušební tělíska. Tato tělíska budou podrobena zkoušce pevnosti v prostém tlaku a bude u nich změřena objemová hmotnost. Podmínky budou dány hloubkou vzorku ve směsi, odvodněním a rozdílným časem zkoušení. Porovnáním a vyhodnocením výsledků budou ověřeny následující předpoklady:

- Pevnost suspenze v prostém tlaku je ovlivněna hloubkou, z jaké je vzorek odebrán
- Podmínky odvodnění mají vliv na pevnost suspenze v prostém tlaku
- Pevnost v prostém tlaku koreluje s objemovou hmotností vzorku
- Vysušení vzorku má vliv na pevnost v prostém tlaku

2 INJEKČNÍ SMĚSI

2.1 Injektáž

Injektování základové půdy je technologie, kterou se pod tlakem vpravuje prostřednictvím vrtu injekční směs do zeminy nebo skalního podloží. Vyplňováním pórů, puklin a trhlin základové půdy je docíleno zlepšení fyzikálně mechanických vlastností. Dochází ke zvýšení smykové pevnosti, modulu deformace a zmenšení koeficientu filtrace. Je tak možné podloží stabilizovat a utěsnit.

2.2 Suspenze, roztok, emulze, malta

Při výběru injekční směsi musí být vzaty v potaz vlastnosti jako reologie směsi (koheze, viskozita, atd.) stabilita, doba tuhnutí, velikost zrn, odolnost a pevnost. Tyto vlastnosti se projevují podobně u různých druhů směsí. Injekční směsi se dle normy [5] z hlediska obsahu pevných částic, vody a jejich poměru rozdělují na suspenze, roztoky, emulze a malty. [5]

Suspenze je definována jako heterogenní směs jemně rozptýlené pevné látky v kapalině. Je charakterizována křivkou zrnitosti, poměrem obsahu vody a pevných částic, rychlostí sedimentace a dekantací, schopností udržet vodu při filtraci pod tlakem, reologickými změnami chování v čase. Cementové suspenze jsou nejběžnějším typem injekčních směsí. Suspenze se dělí na koloidní a zrnité. Za koloidní jsou označovány ty suspenze, jejichž struktura je mezi homogenní a heterogenní (někdy bývá označována také jako mikroheterogenní). [5]

Roztok je definován jako homogenní směs jedné nebo více látek rozpuštěných v jiné látce. Na rozdíl od suspenze nikdy nedochází k oddělení jednotlivých složek. Mezi roztoky se řadí například silikátové injekční směsi, organosilikátové gely nebo směsi na bázi pryskyřic. Roztoky se dále rozdělují na pravé a koloidní. Jsou používány převážně při injektování skalních hornin s malými póry. [5]

Emulze je heterogenní směs dvou nebo více nemísitelných kapalin, kdy jedna kapalina je rozptýlena ve druhé. Obvykle jde o kapaliny s rozdílnou hustotou a polaritou. Vytváření emulze se nazývá emulgace nebo emulzifikace. Pro injektáž se téměř nevyužívají. [5]

Malta je heterogenní směs několika látek. Obvykle se skládá z vody, pojiva (cement, vápno, atd.) a plniva (drobné kamenivo). Injekční malty, které vykazují velké vnitřní tření, jsou používány pro plnění dutin nebo zhutňovací injektáž a jejich reologické chování je popisováno testem sednutí kužele podle Abramse. Malty tekoucí účinkem vlastní tíhy se používají pro zaplňování dutin větších objemů, otevřených puklin, dutin v zrnitých zeminách a velkých trhlín. Reologické chování takových malt je velmi podobné suspenzím a je popisováno vhodně zvoleným průtokovým viskozimetrem. Musí vykazovat stabilní chování (po 2 hodinách vykazují dekantaci nižší než 5 %). [5]

2.3 Druhy injekčních směsí

- **Cementové injekční směsi a malty** – směs obsahující cement jako pojivo a vodu. Dále směs bývá míchána s plnivem ve formě kamenné moučky, drobného kameniva, jílových materiálů nebo popílku. Používají se také přísady pro snížení viskozity, meze tečení a přísady zabraňující odlučování vody. [13]
- **Chemické suspenze a roztoky** – směsi na bázi akrylátů, polyuretanů, epoxidů a dalších. Mohou být používány pouze tehdy, jestliže vyhovují předpisům v oblasti ochrany životního prostředí. [13]

2.4 Materiály k výrobě cementové injekční směsi

2.4.1 Cement

Injekční materiály mohou být vyrobeny z Portlandského cementu, vysokopecního cementu, směsného cementu a speciálních cementů obsahujících látky zvyšující odolnost proti agresivnímu prostředí. Rozhodující vlastnost při výběru cementu je jemnost mletí a obsah hrubých a jemných částic. Jemnost mletí je hlavně důležitá z hlediska tokových a sedimentačních vlastností. Velikostní rozdělení cementových částic má vliv na schopnost suspenze vyplňovat póry v zemině a procházet spoji mezi nimi. Jemnost mletí také ovlivňuje pevnost suspenze po zatvrdnutí. [8]

Měrný povrch cementu, který závisí na jemnosti mletí, se obvykle pohybuje v rozmezí 250-400 m²/kg. Cementy, které mají měrný povrch vyšší než 300 m²/kg, jsou považovány za dostačující z hlediska požadavků na pevnost a propustnost a mohou být používány pro přípravu injekčních cementových suspenzí. Stupeň nasycení a obsah vody v suspenzi na počátku tuhnutí rozhoduje o kvalitě a životnosti injektované oblasti. [8]

Doporučované vlastnosti cementu [8]:

- Měrný povrch > 300 m²/kg
- Maximální velikost zrna 0.1 mm
- Nejméně 90 % částic < 0.05 mm

Výběr cementu se zvýšenou odolností musí být vzat v úvahu při výskytu agresivních prvků v injektovaném podloží nebo ve vodě. [8]

2.4.2 Voda

Voda v suspenzi nesmí obsahovat žádná činidla, která by mohla nepříznivě ovlivnit tuhnutí a finální vlastnosti vzniklého tělesa. Listí, kořeny a další organické látky musí být odstraněny. Pitná voda a voda z veřejných zdrojů jsou většinou vyhovující. Voda, která je získávána z přírodních zdrojů na staveništi (podzemní nebo povrchová), má být podrobena chemickému rozboru. Zkoumá se obsah chloridů, síranů a organických látek. Může být použita i mořská voda, za předpokladu, že nejsou negativně ovlivněny vlastnosti směsi. [8] [5]

2.5 Charakteristiky cementové suspenze

Injektování je hlavně používáno při stabilizaci zemin či hornin nebo utěsnění proti podzemní vodě. Proto je všechna pozornost soustředěna na propustnost a pevnostní parametry injektovaného média. Tyto parametry úzce souvisí s propustností a pevností vytryskaného materiálu samotného. [8]

Vlastnosti injekční směsi se mění z počátečního tekutého stavu, kdy je směs možné čerpat, do zcela jinak propustné a pevné formy s definovanou trvanlivostí po ztuhnutí. Tekutá forma umožňuje směsi pronikat otvory a vyplňovat póry zemin a hornin. Tokové vlastnosti a doba zpracovatelnosti musí splňovat předem určené limity. Ty jsou stanovovány pomocí viskozity a meze tečení a kombinací těchto dvou veličin. U suspenzí je také nutné při návrhu uvažovat se sedimentací. Hodnoty a limity zmíněných vlastností mohou být upravovány a optimalizovány složením směsi. [8]

Pomocí viskozity a meze tečení lze definovat podmínky, při kterých je směs optimální k injektování. [8]

2.5.1 Viskozita

Viskozita je dle normy vnitřní odpor kapaliny, který omezuje její tok. Rozlišuje se dynamická viskozita, která se značí ν , a kinematičká viskozita η . Platí vztah $\nu = \eta/\rho$, kde ρ je hustota kapaliny. [5]

Viskozita injekční směsi je zákonitě proměnná s časem díky probíhajícímu procesu tuhnutí. Po smíchání reagujících látek viskozita plynule a nepřetržitě narůstá. Je také závislá na teplotě. To platí pro cementové suspenze, chemické injekční směsi, ale i pro samotnou vodu. Viskozita vody klesá s rostoucí teplotou. Naproti tomu viskozita cementových suspenzí a silikátových injekčních směsí narůstá s rostoucí teplotou. Tento efekt může být často opomíjen při dnešních teoretických úvahách. [8]

2.5.2 Mez tečení

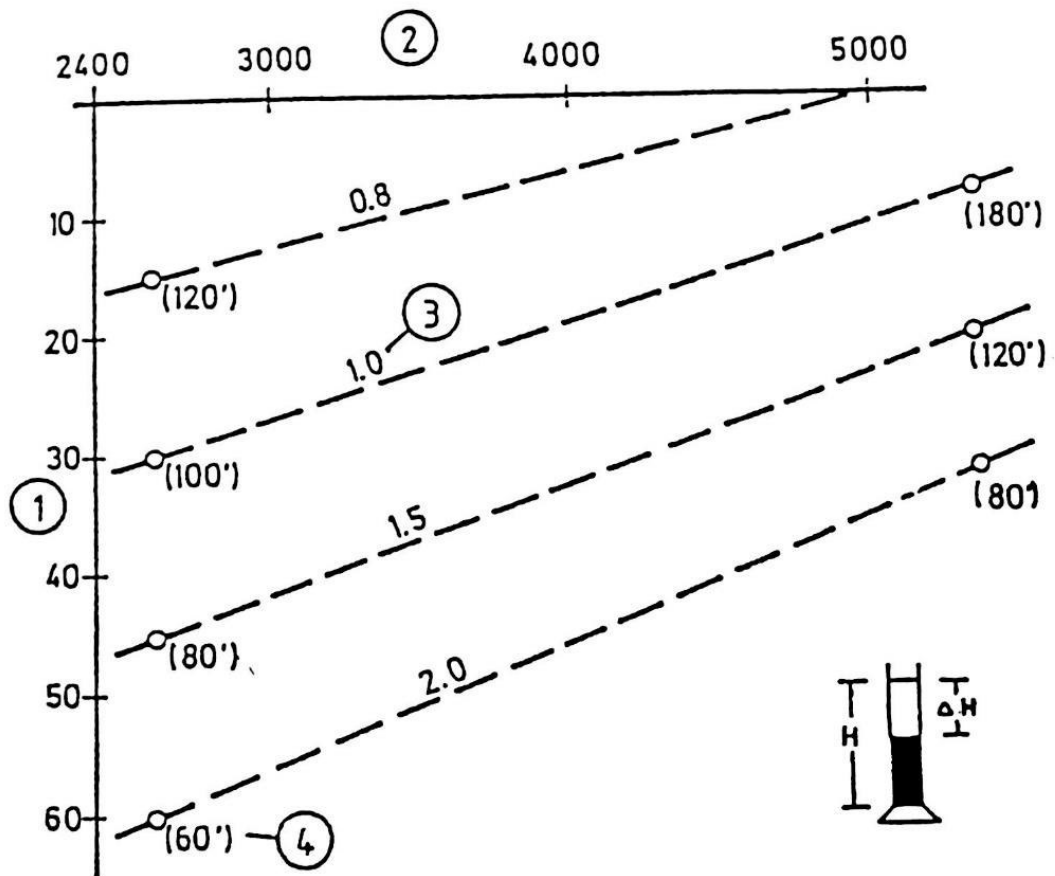
Mez tečení je dle normy smykové napětí τ_b , při kterém dochází k plastické deformaci směsi, neboli, kdy směs začíná téct. Mez tečení Newtonovy kapaliny, tedy například vody, je nula. Předpoklady jsou, že mez tečení směsi nepřekračuje maximum 50 Pa, které je považováno za limit provádění injektaže, a že podmínky tečení se výrazně nemění během injektování. Taková změna by se projevila sedimentací a srážením směsi. [5]

Pro stanovení viskozity a meze tečení jsou používána různá měřicí zařízení. V terénu je běžně využíván Marshův trychtýř, kdy je měřen čas, za který objem směsi (běžně 1 litr) proteče normovým trychtýřem. Čím je čas výtoku delší, tím je viskozita směsi vyšší. Doba výtoku závisí na drsnosti stěn trychtýře a na přesnosti měření času. Měřený čas je tedy kombinací reologických vlastností směsi, drsnosti stěn trychtýře a přesnosti měření. Mez tečení jako jednotlivá vlastnost tímto způsobem být zjištěna nemůže. Přesnějšími zařízeními, než je Marshův trychtýř, jsou různé typy viskozimetrů. Mezi nejpoužívanější patří rotační viskozimetry. Ty fungují na principu válce ponořeného do testované směsi, který rotuje různými rotačními rychlostmi. Odpor směsi vůči pohybu válce je měřen a lze z něj určit viskozitu a mez tečení jednotlivě. Předpokladem pro přesné měření jsou konstantní vlastnosti směsi během zkoušky. To znamená žádná sedimentace a srážení směsi nejsou povoleny. To platí i pro Marshovu zkoušku. [8]

2.5.3 Sedimentace

Jestliže není suspenze míchána, dochází k usazování pevných částic. Čím menší vykazuje směs sedimentaci, tím je její zpracovatelnost lepší a je vhodnější k použití pro injektování. Chování směsi z hlediska sedimentace musí být kontrolováno jednotlivě pro každou suspenzi. Závisí na velikostech částic pevné fáze směsi, na rozdílu v hustotách kapaliny a rozptýlených pevných částic, na teplotě a na rozměrech prostoru, kde dochází k usazování (rozměry nádoby). [8]

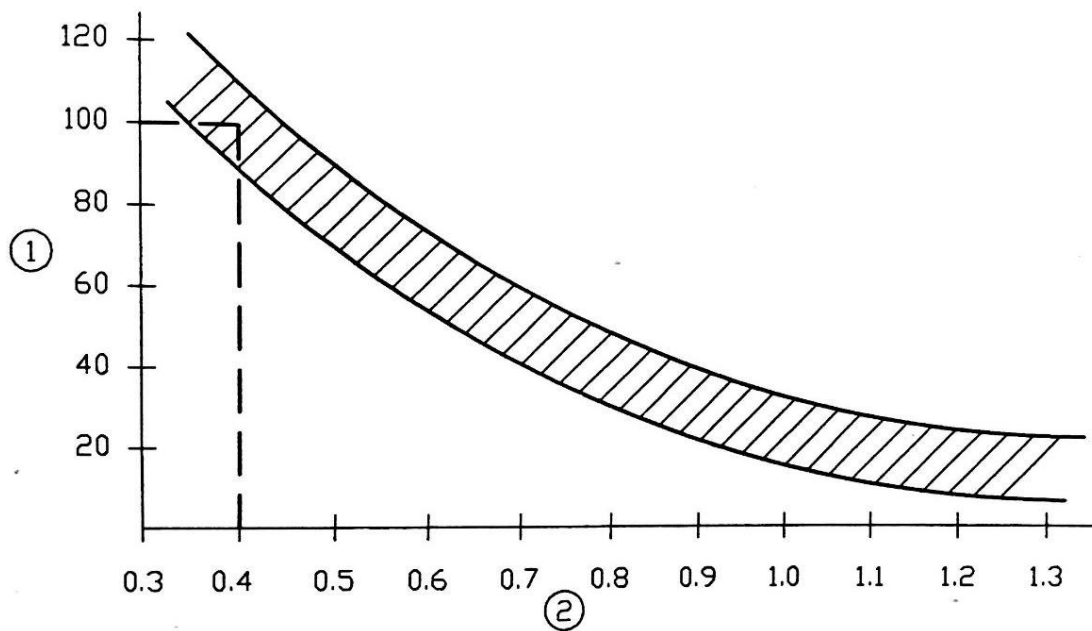
Průměrné hodnoty sedimentace (odstoj, dekantace) cementových suspenzí jsou zobrazeny na obr. č. 1. Graf zobrazuje spojitost usazování částic v závislosti na jemnosti mletí cementu a vodním součiniteli směsi neboli koncentraci pevných částic. Dekantace klesá s klesajícím vodním součinitelem, avšak k usazování částic dochází pomaleji. [8]



Obr. č. 1 – Průměrná dekantace cementové suspenze s vodními součiniteli v odměrném válci, 1 - odstoj v [%] (svislá osa), 2 - měrný povrch cementu v [cm²/g] (vodorovná osa), 3 – vodní součinitel, 4 – čas do konce sedimentace. Graf převzat z [8]

2.5.4 Pevnost

Pevnost v prostém tlaku zatvrdlé suspenze s rozdílným poměrem vody ve směsi je zobrazen na obr. č. 2 . Graf, který uvádí Ch. Kutzner ve své knize Grouting of Rock and Soil, je složen z výsledků mnoha rozdílných zkoušek a publikovaných dat. Ukazuje, že pevnost suspenze je dostatečně vysoká, pokud obsah vody v suspenzi je dostatečně nízký na začátku tuhnutí. V případě míchání vody a cementu v hmotnostním poměru 1:1, vykazuje směs po 28 dnech zrání až 4 x menší pevnost, než při obsahu vody a cementu v poměru 1:2. [8]



Obr. č. 2 – Pevnost v tlaku [%] (svislá osa - 1) cementové suspenze po 28 dnech v závislosti na vodním součiniteli (vodorovná osa - 2) s odkazem pevnosti pro vodní součinitel 0,4. Graf převzat z [8]

Pevnost v tahu dosahuje hodnot okolo 15 % pevnosti v tlaku. Může být určena přímo nebo pomocí pevnosti za ohybu. S touto hodnotou se běžně ve výpočtech neuvažuje. [8]

3 TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ

Metody zlepšování zemin jsou v dnešní době nedílnou součástí mnoha stavebních projektů, neboť umožňují řešení jak běžných, tak složitých geotechnických problémů. Mezi tyto metody patří i trysková injektáž, jež je považována za jednu z moderních, rychlých a efektivních metod, která slouží k vytváření speciálních základových prvků v zeminách eventuálně ve zvětralých skalních horninách. Principem je využití dynamické energie paprsku většinou cementové injekční směsi tryskané pod vysokým tlakem. Tím je zemina rozrušena a současně promíšena se směsí, takže na místě vzniká kompozitní materiál složený z částic zeminy a cementu. Pevnost tohoto materiálu je potom výrazně vyšší než pevnost původní zeminy. Pohybuje se v rozsahu 2-25 MPa. Takovýmto způsobem lze upravovat zeminy, od jílu až po balvanité štěrky. [4]

Této injektážní technologii je v diplomové práci věnována pozornost z důvodu receptury, která je používána pro injektážní směs, a také proto, že byly odebrány vzorky čerstvé směsi smíchané se zeminou ze stavby za účelem testování (viz kapitola 4.2).

Nejčastěji je tryskovou injektáží vpravována do zeminy cementová suspenze s vodním součinitelem 0,6-1,4. V laboratoři byla připravena suspenze s vodním součinitelem 1,0 a podrobena pevnostním zkouškám s upravenými podmínkami uložení a některým dalším kontrolním zkouškám suspenzí.

3.1 Historie tryskové injektáže

Původ technologie sahá do 60. let 20. století, kdy došlo k první aplikaci vysokotlaké injektáže britskou firmou Cementation Company, Ltd. na těsnící stěně v Pákistánu v roce 1962. Nicméně všeobecně se za průkopníky tryskové injektáže považují Japonci (Nakanishi), kteří byli inspirováni zkušenostmi a pokusy použití vysokorychlostních trysek pro rozrušování skalních a poloskalních hornin (Farmer and Attewell). V roce 1972 se zapsali do historie díky první patentované verzi technologie zvané CCP (Chemical Churning Pile), při které byla nejprve při mísení se zeminou používána chemická pojiva, ale ta byla později nahrazena směsí vody a cementu. [2][3]

Stejná skupina inženýrů potom během několika let vyvinula pokročilejší metodu známou jako JSP (Jumbo Special Pile), která cílila na možnosti provádění většího průměru prvku. Paprsek cementové suspenze byl obalen proudem stlačeného vzduchu, tudíž nedocházelo k takové ztrátě energie při tryskání a bylo možné injektovat zeminu do větších vzdáleností. [2][3]

Téměř současně byl vyvinut další systém nazvaný Jet Grout, kdy docházelo k rozrušování zeminy pomocí vysokorychlostních vodních trysek a následnému vyplnění rozrušeného materiálu cementovou injekční směsí ze spodní trysky. Nicméně spodní tryska byla zvedána od spodu vrtu bez rotace a mohla být tedy použita pouze pro stavbu vertikálních lamel. [2][3]

Metody CCP a Jet Grout přišly do povědomí evropských společností a inženýrů na začátku 70. let, speciálně pak italských společností, a to při mezinárodní soutěži pro stabilizaci Šikmé věže v italské Pise, kde metoda CCP byla navrhována jako jedno z možných řešení. [2][3]

Další vývoj vedl k metodě CJG (Column Jet Grout), také známé pod názvem Kajima method podle jména japonské společnosti, která metodu vymyslela. Podstatou bylo současné zvedání a rotace vrtného soutyčí, kde spodní část obsahovala horní trysku pro rozrušování podloží paprskem vody a stlačeného vzduchu a spodní trysku sloužící pro injektování cementové suspenze. [2][3]

Tento dlouholetý vývoj a zkušenosti vedly k dnešnímu rozdělení technologie tryskové injektáže podle počtu složek vpravovaných do zeminy (viz. kapitola 3.2). Nejdříve bylo na tryskovou injektáž pohlíženo jako na způsob zlepšení vlastností základové půdy pro založení velkých a složitých konstrukcí. Později však byla tato technologie přijata i jako geotechnický nástroj pro mnohé další aplikace, jako jsou vodotěsnící bariéry, klenby při tunelování, stabilizace svahu, bariéra kontamicí atd. (dále viz. kapitola 3.3). [2][3]

V 80. letech vstoupila technologie na americký trh, následně potom do dalších částí světa. Nicméně jako nová a neznámá metoda měla vždy zpočátku menší využití. Dnes je trysková injektáž využívána hojně po celém světě. [2][3]

3.2 Technologie

3.2.1 Pracovní postup

A. Vrtání

Dochází k zavrtání vrtného soutyčí s hlavou tryskové injektáže a vrtnou korunkou do potřebné hloubky v zemině. Vrtání podporuje zpravidla výplach ze suspenze, který zároveň slouží jako pažení mezikruží mezi stěnou vrtu a vrtným soutyčím. Pro vrtání skrz beton nebo zdivo se používá speciální vrtná korunka. [10]

B. Rozrušování zeminy

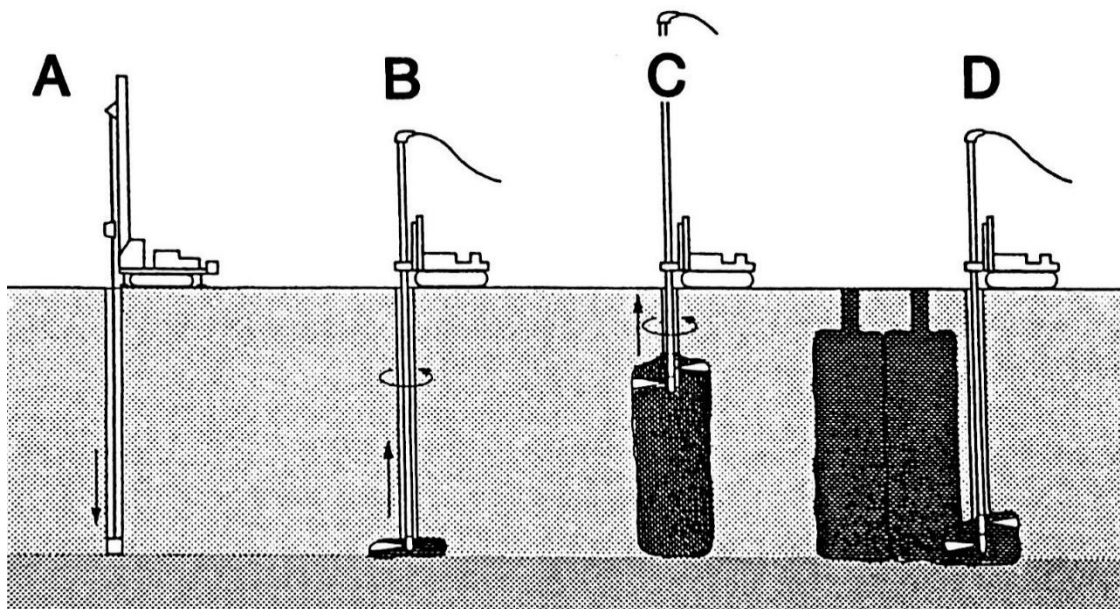
Rozrušování zeminy je prováděno od nejhlubšího místa vrtu směrem nahoru pomocí trysky, ze které vychází velkou rychlostí paprsek vody. Přebytečná směs zeminy, suspenze a vody vytéká vrtem na povrch. [10]

C. Tryskání

Současně při rozrušování zeminy dochází k přívodu cementové suspenze, která je pod tlakem a pomocí turbulentního proudění vpravována do zeminy, s níž je promísena. [10]

D. Rozšiřování

Tělesa tryskové injektáže lze libovolně kombinovat a propojovat, a to jak v čerstvém stavu, tak i čerstvý sloup se zatvrdnutým. Pořadí zhotovení prvků tryskové injektáže se provádí v závislosti na podmínkách stavby a zadání. [10]

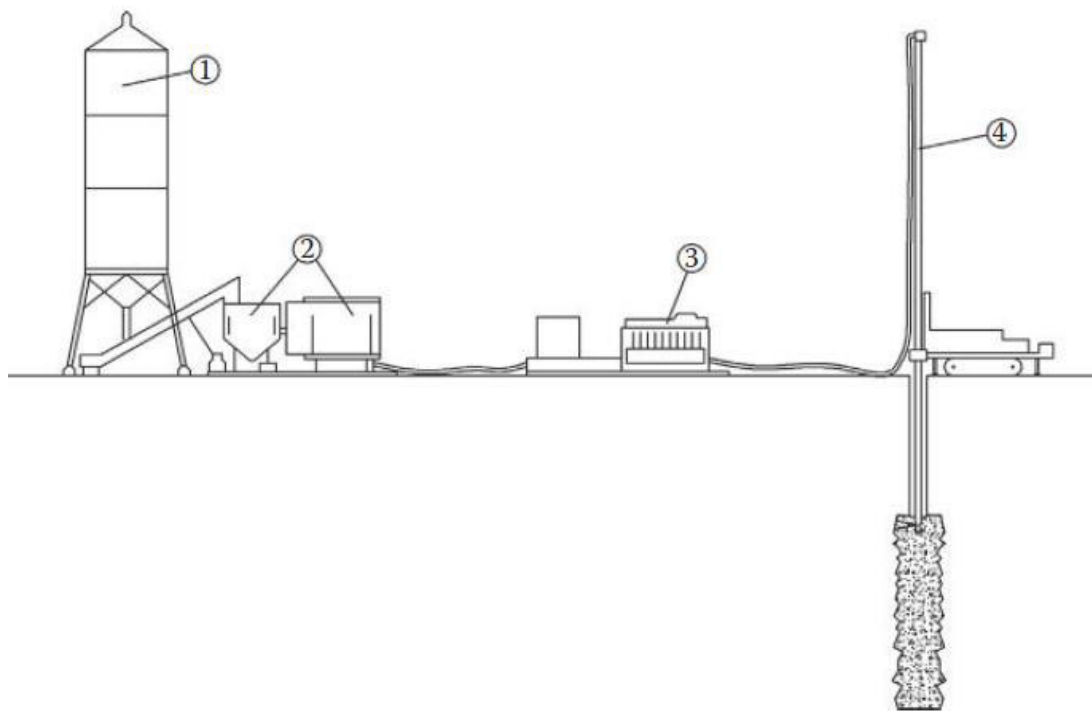


Obr. č. 3 - Fáze pracovního postupu tryskové injektáže. Převzato z [8]

3.2.2 Zařízení a stroje

Soustava pro tryskovou injektáž je složena z následujících komponent [1][2]:

- Vrtná souprava vybavená vrtným soutyčím pro tryskovou injektáž, monitorem upevněným na konci vrtného soutyčí a zařízením k pohonu soutyčí
- Zásobník na cement
- Dávkovač a míchací zařízení pro přípravu suspenze
- Čerpací zařízení (pumpa)
- Vysokotlaké potrubí spojující pumpu s vrtnou soupravou
- Vzduchový kompresor (v případě provádění vícefázové tryskové injektáže)
- Vysokotlaká vodní pumpa (v případě provádění vícefázové tryskové injektáže)



Obr. č. 4 - Typické složení soustavy pro jednofázovou tryskovou injektáž (1-zásobník na cement, 2-dávkovač a míchací zařízení, 3-vysokotlaká pumpa, 4-vrtná souprava).
Obrázek převzat z [2]

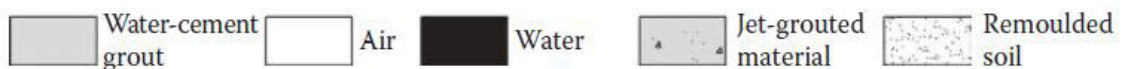
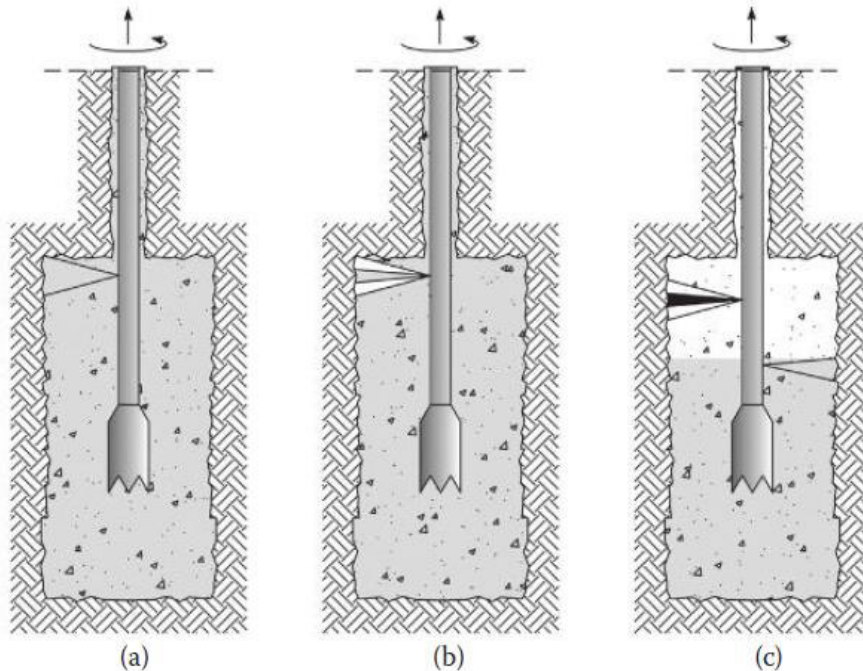
3.2.3 Systémy provádění

Z hlediska provádění, resp. počtu složek vpravovaných do zeminy, rozděluje norma tryskovou injektáž na tři kategorie [1][10]:

- a) **Jednofázový systém** – rozrušování i zpevnění zeminy je dosaženo jedním médiem o vysoké mechanické energii (výstupní rychlost přibližně 100 m/s), nejčastěji paprskem cementové suspenze. Používá se v jednoduše rozpojitelných zeminách, pro zhotovení malých až středních průměrů.
- b) **Dvojfázový systém (vzduchový)** – rozrušování i zpevnění zeminy je dosaženo paprskem (obvykle cementové suspenze) o vysoké mechanické energii (výstupní rychlost přibližně 100 m/s) obaleným stlačeným vzduchem jakožto druhým médiem. Používá se pro lamelové stěny, těsnění dna a podchycování.

Dvojfázový systém (vodní) – rozrušování zeminy je dosaženo paprskem vody o vysoké mechanické energii a zpevnění zeminy je realizováno odděleným paprskem injekční směsi.

- c) **Trojfázový systém** – rozrušování zeminy je dosaženo paprskem vody o vysoké mechanické energii za podpory obalujícího stlačeného vzduchu a zpevnění zeminy je provedeno odděleným paprskem injekční směsi. Používá se na těsnicí stěny, těsnění dna a podchycování.



Obr. č. 5 - a) Jednofázový systém b) Dvojfázový systém (vzduchový) c) Trojfázový systém. Převzato z [2]

3.2.4 Parametry

Rozrušování zeminy je docíleno vysokou mechanickou energií paprsku média používaného k rozrušování, jímž je injekční směs v případě jednofázového systému a dvojfázového systému vzduchového, voda v případě dvojfázového systému vodního a systému třífázového. [1]

U jednofázového a dvojfázového systému vzduchového je směs injektována pod tlakem 30 až 50 MPa. V ojedinělých případech byly použity snížené tlaky do 10 MPa, například pro sloupy malého průměru ve velmi málo ulehlých zeminách. Výkonnější zařízení pro tryskovou injektáž umožňuje používat i vyšší tlaky (70 MPa). [1]

Parametry tryskové injektáže	jednofázový systém	dvojfázový systém (vzduchový)	dvojfázový systém (vodní)	třífázový systém
Tlak na čerpadle injekční směsi (MPa)	30 až 50	30 až 50	> 2	> 2
Průtok injekční směsi (l/minuta)	50 až 450	50 až 450	50 až 200	50 až 200
Tlak vody (MPa)	n.p.	n.p.	30 až 60	30 až 60
Průtok vody (l/minuta)	n.p.	n.p.	50 až 150	50 až 150
Tlak vzduchu (MPa)	n.p.	0,2 až 1,7	n.p.	0,2 až 1,7
Množství vzduchu (m ³ /minuta)	n.p.	3 až 12	n.p.	3 až 12
n.p. není používáno				

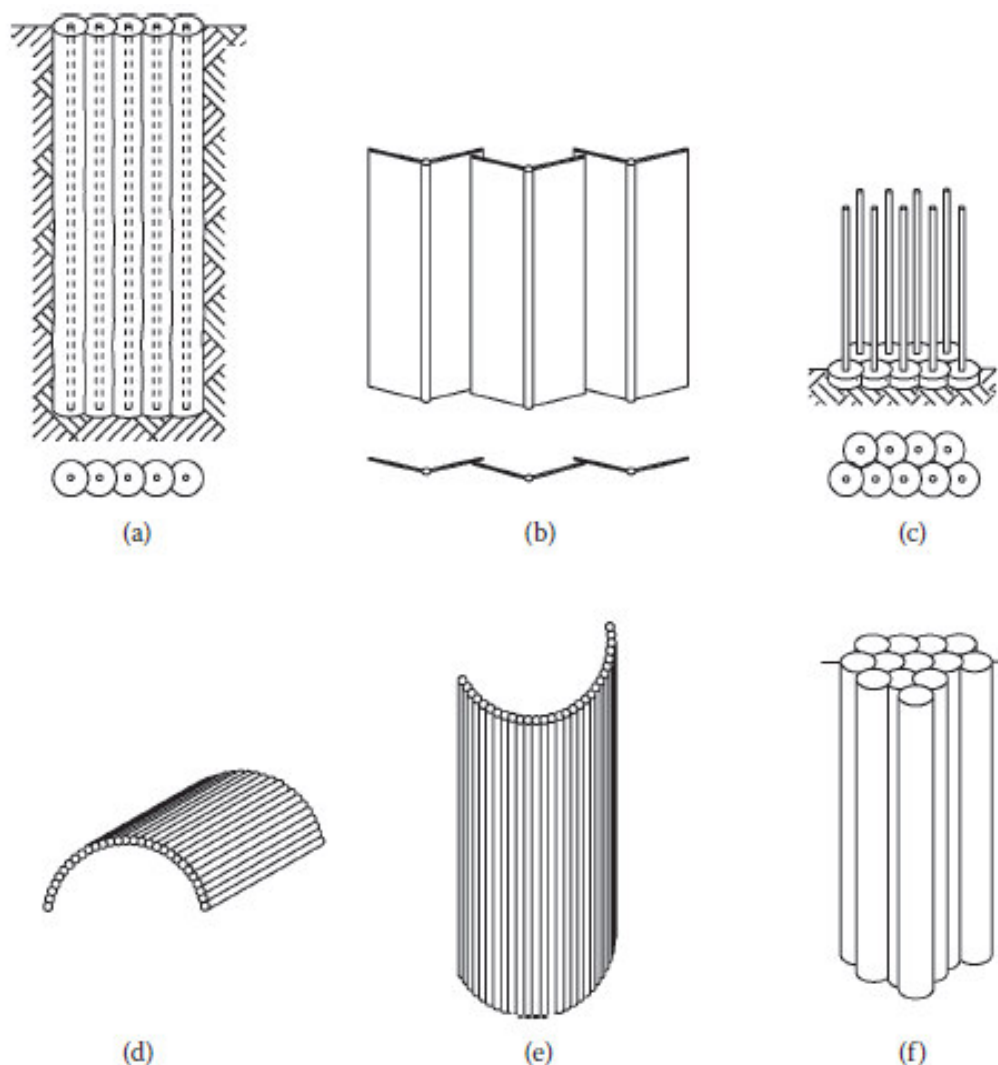
Obr. č. 6 - Rozsah parametrů tryskové injektáže pro jednotlivé systémy provádění. Převzato z [1].

3.3 Aplikace

Technologie tryskové injektáže zahrnuje širokou škálu využití v různých oblastech speciálního zakládání staveb. Její přednost je především v rozmanitosti tvarů a velikosti prvků, které je možné vytvářet, a tudíž i v rozsáhlých možnostech aplikací. Limitující podmínkou může být pevnost materiálu, ve kterém je trysková injektáž realizována.

3.3.1 Tvary prvků

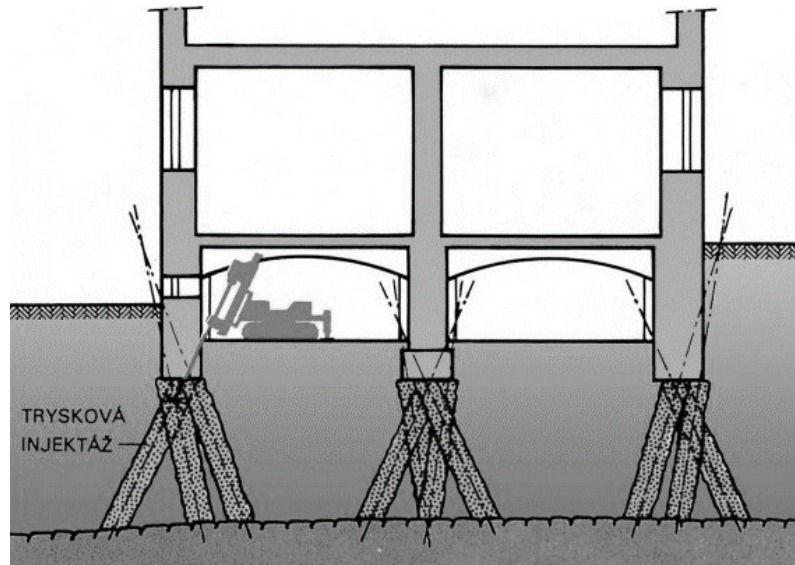
Základními prvky, které lze tryskáním vytvářet, jsou sloupy a lamely. Díky propojení, navázání a kombinaci těchto prvků vznikají komplexní konstrukce, sloužící k různým účelům. Ty jde rozdělit na jednorozměrné, dvojrozměrné a třírozměrné konstrukce. Typickou jednorozměrnou konstrukcí je samostatný sloup, kde většinou převládá délka sloupu nad jeho průměrem. Naopak mezi dvojrozměrné konstrukce patří stěny složené z vzájemně propojených sloupů či lamel a desky vzniklé z navázaných sloupů, u kterých převládá průměr sloupu nad délkou. Dále se do této kategorie řadí například klenba z horizontálních sloupů. Poslední kategorií jsou trojrozměrné konstrukce, kam patří blok tvořený skupinou sloupů s délkou výrazně vyšší, než je průměr sloupu. [2]



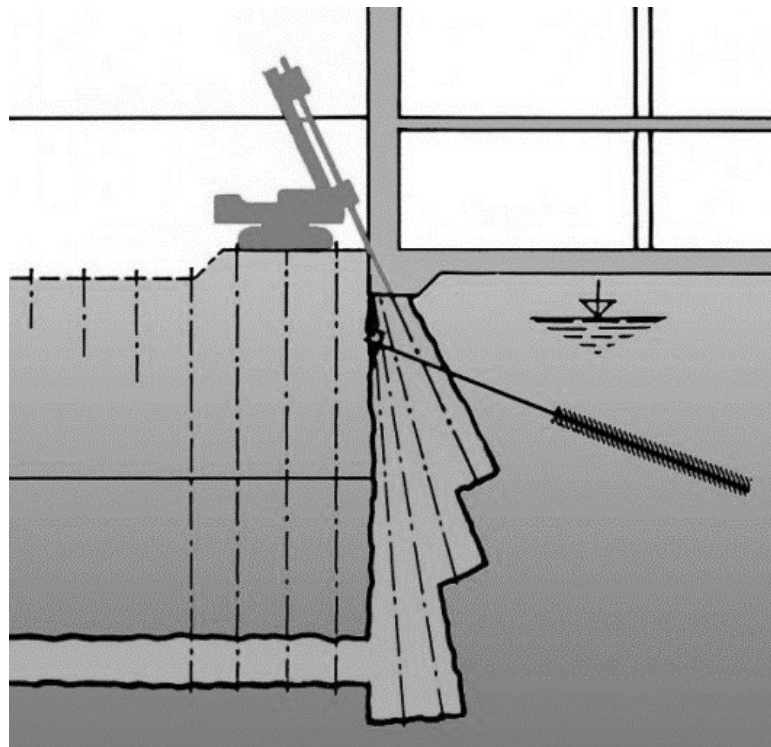
Obr. č. 7 - Dvoj a třírozměrné konstrukce z tryskové injektáže: a) stěna ze sloupů b) stěna z lamel c) deska d) klenba e) stěna ze sloupů (šachta) f) blok. Převzato z [2]

3.3.2 Využití

Trysková injektáž je prakticky nenahraditelnou technologií při **podchycování základů** stávajících objektů, ať z důvodu nerovnoměrného sedání objektu, či rekonstrukce porušených základů. Velmi častým důvodem bývá hloubení stavební jámy v těsné blízkosti stávajícího objektu, jejíž dno je položeno níže než základová spára přilehlého objektu. Sloupy z tryskové injektáže mohou být také vhodnou alternativou vrtaných pilot pro založení a ve stísněných prostorách, kde nelze použít mechanismy jiných metod.

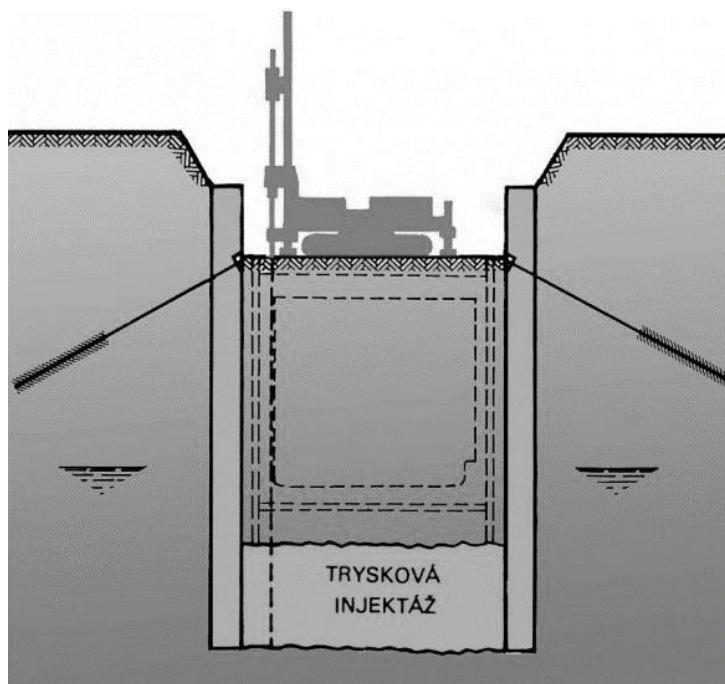


Obr. č. 8 - Podchycení základů při rekonstrukci. Převzato z [4]



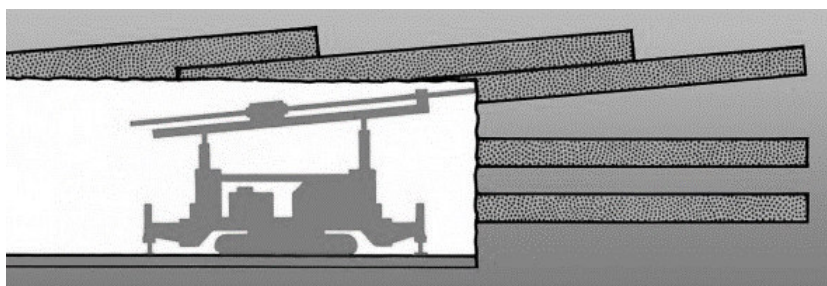
Obr. č. 9 - Zajištění stavební jámy a přilehlého objektu
Převzato z [4].

Další využití je samotné **pažení stavební jámy**, kde se obvykle využívá vlastnosti vzniklého kompozitu, a tou je vodotěsnost. Tryskovou injektáž lze tedy použít jako **těsnicí bariéru** před působením podzemní vody. Zatěsnění se dá rozdělit na **těsnění svahu** pomocí stěny nebo **těsnění dna** pomocí desky z krátkých sloupů. Nicméně injektování nemusí sloužit pouze pro zadržování vody, ale také jako **kontaminační bariéra** v zemině bránící průchodu nejrůznějším škodlivým látkám.



Obr. č. 10 - Zatěsnění dna stavební jámy. Převzato z [4]

Nemalé uplatnění nachází tryskání při výstavbě podzemních děl, jako jsou tunely, kolektory a šachty, a to v podobě **klenby vytvořené ze sloupů** takovým způsobem, aby bylo docíleno zabezpečení ražby.



Obr. č. 11 - Zabezpečení ražby tunelu. Převzato z [4]

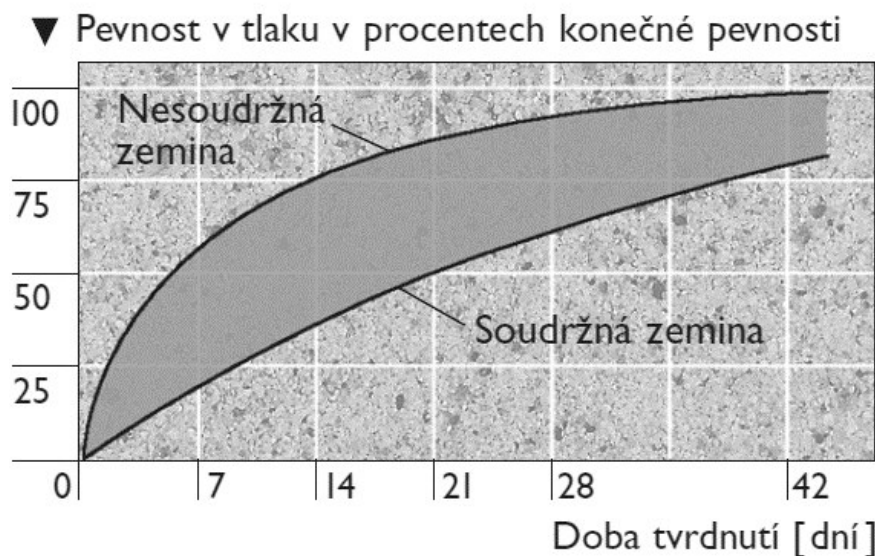
3.4 Vlastnosti materiálu tryskové injektáže

Mechanické vlastnosti vytryskaného materiálu mohou nabývat velkých rozptylů. Záleží nejen na efektivnosti promíchání původní zeminy s přidávaným cementem, ale také na složení těchto dvou komponent. Běžně je pro směs používán Portlandský cement nebo Portlandský směsný cement. Nicméně ve specifických případech mohou být použity cementy se speciálními vlastnostmi, jež jsou zajištěny přísadami (například bentonit, popílek). Samotný technologický proces injektování a specifika daného místa stavby také přispívají k heterogenitě podloží a tím i k zvětšení rozptylu vlastností materiálu. [2]

3.4.1 Pevnost v tlaku

Pevnost materiálu tryskové injektáže závisí na množství a druhu cementu přidávaného do cementové suspenze a také na pevnosti zrn původní zeminy. Běžně se pevnosti v prostém tlaku pohybují v rozmezí 2 až 25 MPa. Nižší hodnoty platí pro jílovité a prachovité zeminy, střední hodnoty pro písky a vyšší hodnoty pro zeminy šterkovité. [10]

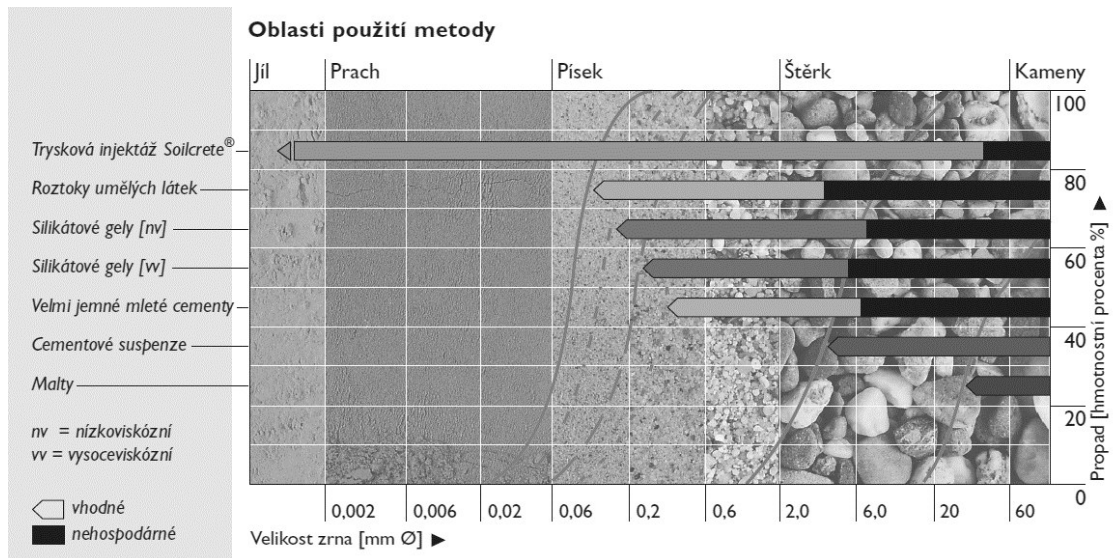
Vývoj tlakové pevnosti tělesa tryskové injektáže v závislosti na čase je zobrazen na obr. č. 12. Pro nesoudržné zeminy, kde není zadržována voda, je nárůst pevnosti strmější. Zpomalený nárůst pevnosti směsi vytryskané cementové suspenze a soudržných zemin je způsoben vodou, která zůstává v pórech, a zbývající přebytečnou vodou ze suspenze (a v případě vodního předřezu i vodou z vodního paprsku). [8]



Obr. č. 12 - Nárůst pevnosti tělesa tryskové injektáže v soudržných a nesoudržných zeminách. Převzato z [10]

3.4.2 Oblast použití

Hrubozrné zeminy, jako jsou písky a štěrky, lze injektovat také klasickou injektáží. Hrubozrné zeminy jsou náchylnější k rozrušování, tím pádem je v nich lépe proveditelný i větší průměr sloupu tryskové injektáže. Tryskovou injektáž je možné provádět i v jílovitých a prachovitých zeminách. V hodně jemnozrnných jílech se stává tryskání obtížnější, neboť zeminu nelze jednoduše rozrušit a injektování se tak může stát méně efektivním.



Obr. č. 13 - Oblasti použití metody. Převzato z [10]

3.4.3 Tíha prvku

Jsou případy použití tryskové injektáže, kde vlastní tíha prvku hraje důležitou roli, jako například pažení a těsnění dna stavební jámy nebo ražby tunelu. Vlastní tíha závisí na následujících faktorech [2]:

- Specifická tíha zrn původní zeminy
- Specifická tíha tuhé cementové směsi
- Podíl zeminy a cementové směsi
- Podíl pórů

Vzhledem k variabilitě výše uvedených faktorů se tíha materiálu nedá stanovit jinak než experimentálně. Jako příklad jsou na následujícím obrázku (obr. č. 14) uvedeny objemové tíhy suchých vzorků tryskové injektáže získaných jednofázovým systémem tryskání v různých typech zemin, nalezené různými autory. Každá sada dat byla statisticky zpracována a byla vybrána střední hodnota s variačním koeficientem, jež jsou uvedeny v tabulce. Porovnání ukazuje velký rozptyl s nejvyšší hodnotou 22,80 kN/m³ náležící směsi se štěrkem a nejnižší hodnotou 13,89 kN/m³ pro pyroklastické písky.

Z těchto výsledků lze usuzovat, že hmotnost tělesa tryskové injektáže při jednofázovém systému tryskání koreluje s hmotností původní zeminy. Při dvojfázovém tryskání byly zjištěny lehce menší hodnoty hmotností, a to pravděpodobně z důvodu většího množství pórů ve směsi od injektovaného vzduchu. U trojfázového systému tato redukce hmotností pozorována nebyla. [2]

<i>Soil type</i>	$\bar{\gamma}_{dc} (kN/m^3)$	$CV(\gamma_{dc})$	<i>Reference</i>
Clay	16.25	0.05	Botto and Capolupo (1989)
Silty clay	16.81	0.04	Xanthakos et al. (1994)
Silty sand	18.32	0.04	Xanthakos et al. (1994)
Sandy silt	17.89	0.08	Croce et al. (2004a)
Pyroclastic sand	13.89	0.07	Croce and Flora (1998)
Gravel	22.80	0.04	Mongiovi et al. (1991)

Obr. č. 14 - Objemové tíhy vysušených vzorků tryskové injektáže získané jednofázovým systémem tryskání v různých typech zemin. Převzato z [2]

3.4.4 Propustnost

Propustnost tělesa tryskové injektáže bývá relativně nízká v porovnání s propustností původní zeminy. Velký vliv na propustnost mají jílovité látky přidávané do suspenze, např. bentonit. Těsnicí vlastnosti jsou pak určovány na základě těchto látek a vlastností původní zeminy. V praxi se Darcyho koeficient upravené zeminy pohybuje v rozmezí 10^{-7} až 10^{-9} m/s. Výjimkou může být případ čistých štěrků se vzájemně propojenými zrny, kde se může stát, že při tryskání nedojde k plnému nasycení pórů. To vede k vyšším koeficientům filtrace. [2]

3.5 Zkoušky, dohled a měření

3.5.1 Předběžné zkoušky

Před započítím prací by měly být provedeny zkušební prvky tryskové injektáže v případě, že nejsou k dispozici podklady a zkušenosti s tryskáním ve srovnatelných geotechnických podmínkách. Pokud tyto prvky lze odkrýt, mají na nich být stanoveny mechanické a geometrické vlastnosti pomocí laboratorních zkoušek na vrtných jádrech a pozorování. V případě, že tyto prvky odkrýt nelze, mají být důležité vlastnosti stanoveny jádrovými vrty, přímým měřením ještě v nezatvrdlé suspenzi nebo nepřímými zkouškami. Přehled nepřímých zkoušek je uveden v příloze C normy ČSN EN 12 716. [1]

3.5.2 Dohled a zkoušení

Při provádění tryskové injektáže je třeba měřit a sledovat několik veličin a jevů. Měří se tlak suspenze jdoucí do monitoru (obvykle u čerpadla). Při delším vedení směsi u velkých hloubek je nutno zohlednit ztráty tlaku v potrubí. Dále by měl být ověřován sklon tryskaných prvků měřením sklonu vrtného soutyčí před a během vrtání. V neposlední řadě je třeba sledovat množství a vzhled vyplaveného materiálu a jeho objemovou hmotnost. Mají být odebrány reprezentativní vzorky vyplaveného materiálu a ty podrobeny dalším zkouškám. [1]

Pro případ průkazných zkoušek má být suspenze podrobena těmto zkouškám [1]:

- **Hustota**
- **Odstoj** (měření po 3 hodinách v měřicím válci o objemu 1 litr a průměru 60 mm)
- **Viskozita Marsh**
- **Doba tuhnutí**
- **Zkouška pevnosti v prostém tlaku** na válcových vzorcích (s poměrem výška/průměr = 2:1) po 3, 7, 28 dnech, a pokud je použita pomalu tuhnoucí suspenze také po 56 dnech)

V průběhu prací má být suspenze podrobena následujícím zkouškám [1]:

- **Hustota**
- **Viskozita Marsh** (denně)
- **Odstoj** (dekantace)

Způsob měření výše uvedených veličin je uveden v Příloze A ČSN EN 12 715.

3.5.2.1 Hustota

Hustota suspenze je dána hmotností jednotkového objemu suspenze. Dle [5] se měří pomocí pyknometru, odměrné kádinky či výplachových vah (Barořid). Určuje se jako podíl hmotnosti čerstvé suspenze a objemu suspenze. [5]

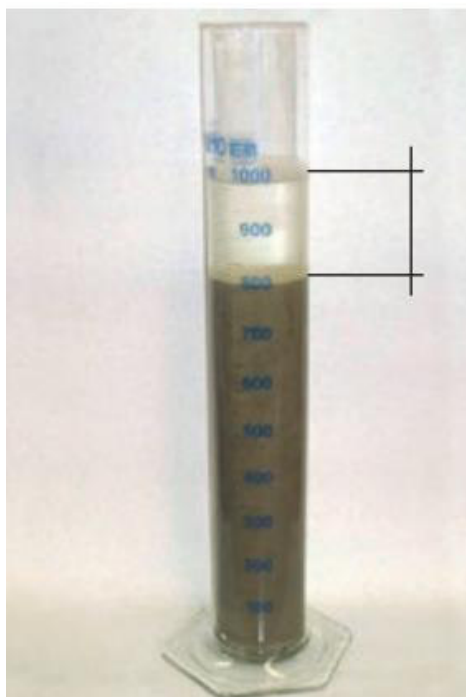
$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Kde: m... hmotnost suspenze [kg]

V... objem suspenze [m³]

3.5.2.2 Odstoj (dekantace) vody

Odstoj směsi neboli také dekantace či sedimentace je měřena ve válci o objemu 1 000 ml s vnitřním průměrem 60 mm. Dle [1] se určuje po 3 hodinách jako poměr objemu odstáté vody k celkovému objemu suspenze. Dle [5] se měří po 2 hodinách. Vyjadřuje se v [%] nebo jako podíl [m³/m³]. Tzv. stabilní suspenze jsou charakterizovány tím, že po 2 hodinách vykazují dekantaci nižší než 5 %. Pro použití injektáže jsou vhodné spíše právě stabilní suspenze, u kterých nedochází k odstoji. [1][5]



Obr. č. 15 - Odměrný válec s odstátou suspenzí [9]

3.5.2.3 Viskozita podle Marshe

Viskozita je parametr, který lze rozdělit na tzv. Dynamickou viskozitu a tzv. Průtokovou viskozitu neboli dobu průtoku. Dynamická viskozita je zjišťována pomocí rotačních viskozimetrů nebo reometrů v laboratořích a její jednotka je [Pa·s]. Naproti tomu Průtoková viskozita, kam spadá i Viskozita podle Marshe, se měří průtokovým kuzelem a její jednotkou je čas. [5]

Marshova metoda se často používá pro stanovení viskozity přímo na stavbě, neboť je nenáročná na čas a přesnost. Průtoková viskozita je zjišťována pomocí Marshova trychtýře. Ten je vyroben z odolného plastu, který odolává změnám teplot a zajišťuje objemovou přesnost. Trychtýř je vybaven plastovou rukojetí a dodává se včetně jednolitrové plastové odměrky. [6][7]

Je nutné upevnit trychtýř do svislé polohy tak, aby se už během zkoušky neměnila. Zkouška se provádí tak, že se prstem uzavře spodní otvor trychtýře a skrz síto se naplní výplachem až po spodní okraj síta (odpovídá 1500ml). Pod trychtýř se umístí odměrka. Následně se otevře spodní otvor a měří se čas, za který vyteče 1 000 ml výplachu. Těsně před zkouškou suspenze se provede zkouška s náplní čisté vody. [6][7]



Obr. č. 16 - Marshův trychtýř s odměrkou. Obrázek převzat z [7]

3.5.2.4 Doba tuhnutí

Doba tuhnutí závisí jak na objemu směsi, tak na teplotě. Podle technologie injekčních prací a druhu směsi se dle normy [5] používají různé zkoušky, kterými se dá tato vlastnost popsat [5]:

- Naklánění či obracení zkušebního válce se zaznamenáváním času, kdy se suspenze již nechová jako kapalina
- Posouzení, jestli se suspenze odděluje od stěn při mírném poklepání zkušební nádržky
- Provedení zkoušky pomocí vnikání jehly, například Vicatova jehla

Počátek doby tuhnutí je definován jako stupeň ztuhnutí injekční směsi, běžně stanovený jako hodnota času potřebného k tomu, aby tuhnoucí cementová suspenze kladla odpor zatěžovací jehle. [5]

Zařízení a zkouška, které mají být použity, a hodnoty, kterých má být dosaženo, musí být určeny v projektové dokumentaci. [5]

3.5.2.5 Zkouška pevnosti v prostém tlaku

Jak již bylo zmíněno, zkouška pevnosti v prostém tlaku vzorků tryskové injektáže má být prováděna **na válcových vzorcích (s poměrem výška/průměr = 2:1) po 3, 7, 28 dnech**, a pokud se používá pomalu tuhnoucí suspenze také po 56 dnech. V případě zkoušení na vrtných jádrech, má do hodnocení být zahrnut vliv odběru, úpravy vzorků a druh zkušební metody. [1]

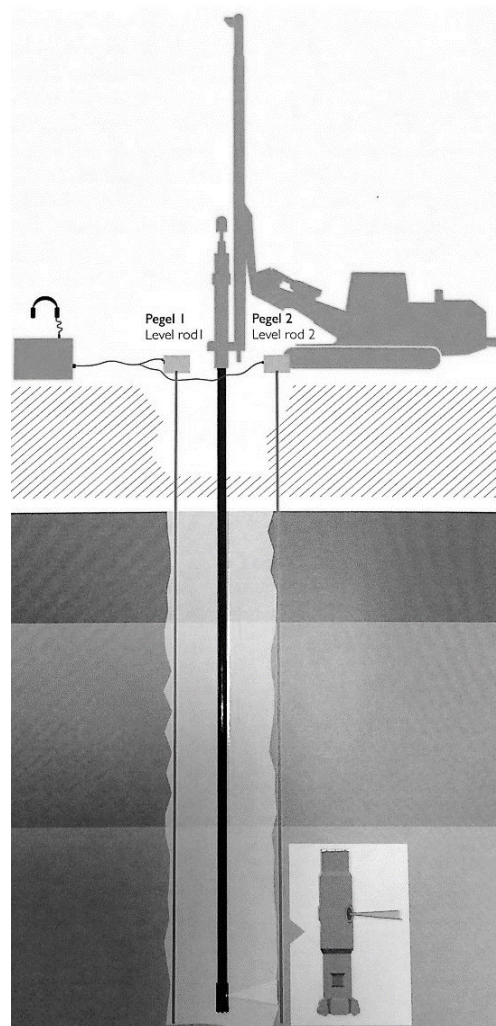
Vzorky odebrané pro mechanické zkoušky mají být uchovávány v prostředí s kontrolovanou teplotou (dle [11] 15 až 22 °C) a vlhkostí. Nárůst pevnosti a modulu pružnosti v čase je silně závislý na druhu zeminy, přičemž u zemin s vysokým obsahem jemných zrn se tento čas prodlužuje.

3.5.3 Zkoušky pro stanovení geometrie prvku

V naprosté většině případů nelze pro stanovení rozměrů prvků tryskové injektáže použít přímá měření a pozorování, neboť prvky často nelze obnažit. Geometrické údaje prvku se tedy ověřují například jádrovými nebo profilovými vrty prováděnými kolmo na osu prvku nebo paralelně s osou prvku. [1]

3.5.3.1 Metoda ACI (*Acoustic Column Inspector*)

Jednou z metod ověřování požadovaného průměru sloupu tryskové injektáže při samotném provádění je metoda ACI (*Acoustic Column Inspector*), která umožňuje optimální přizpůsobení výrobních parametrů geologickým podmínkám. Akustický sloupkový inspektor (ACI) používá piezosenzory k zaznamenávání vibrací vyvolaných tryskajícím paprskem, při zásahu tyček zavrtaných rovnoběžně s osou testovaného sloupu v požadovaných vzdálenostech od jeho osy. Jak akusticky, tak i vizuálně, je na připojené ústředně rozpoznán rozsah. Unikátním řízením tryskání je také možné prokázat spojení s existujícími prvky, jako jsou vrtané piloty, již provedené sloupy tryskové injektáže nebo existující zdivo. [14]



Obr. č. 17 – Metoda ACI. Převzato z [14]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

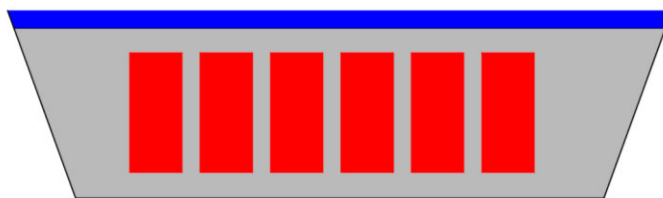
Hypotézy uvedené v úvodní části diplomové práce, jež jsem se rozhodl experimentálně ověřit, budou testovány pomocí tří typů uložení vzorků, viz níže. Dále budou provedeny zkoušky cementové suspenze pro stanovení hustoty, viskozity a odstoje.

4.1 Plán laboratorních zkoušek

Laboratorní směs bude připravena smícháním vody s cementem typu R 32,5 (bližší specifikace v kapitole 4.6.4) v poměru $W/C = 1,0$. U takto připravené směsi bude měřena její hustota, odstoj a viskozita Marsh. Následně bude směs uložena v níže popsáných podmínkách a po uplynutí předepsané doby podrobena zkoušce pevnosti v prostém tlaku.

První typ uložení je lavor/vana, kdy jsou všechny vzorky uloženy v jedné hloubce. Ten slouží pro zjištění referenčních hodnot pevností pro další dva typy. Z lavoru bude odvrtáno celkem 21 zkušebních tělísek, která budou zkoušena následujícím způsobem:

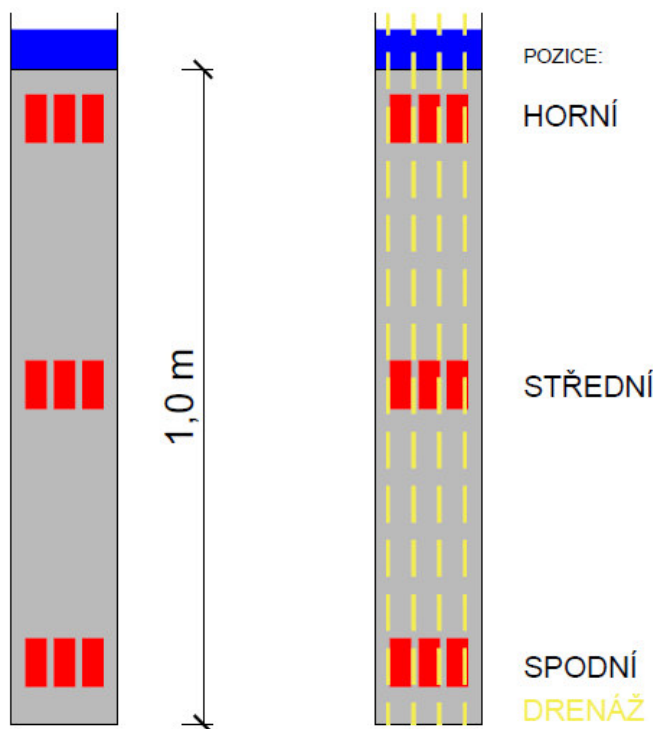
- **6 vzorků v přirozeně vlhkém stavu** pro pevnost v prostém tlaku měřenou **po 3 dnech** + objemová hmotnost
- **6 vzorků v přirozeně vlhkém stavu** pro pevnost v prostém tlaku měřenou **po 7 dnech** + objemová hmotnost
- **3 vzorky ve vysušeném stavu** pro pevnost v prostém tlaku měřenou **po 7 dnech** + objemová hmotnost
- **3 vzorky v přirozeně vlhkém stavu** pro pevnost v prostém tlaku měřenou **po 14 dnech** + objemová hmotnost
- **3 vzorky v přirozeně vlhkém stavu** pro pevnost v prostém tlaku měřenou **po 28 dnech** + objemová hmotnost



Obr. č. 18 - Typ 1 uložení směsi

Druhý a třetí typ uložení jsou plastové trubky o vnitřním průměru 150 mm a délce 1 m. Typ 2 je plnostěnná trubka modelující neodvodněné podmínky a typ 3 trubka perforovaná po délce, která simuluje odvodněné podmínky. Z každé trubky bude odvrtáno alespoň devět zkušebních vzorků, vždy tři z horní úrovně, ze středu a ze spodní úrovně trubky.

- **Typ 2 - 3 vzorky z horní úrovně** trubky v přirozeně vlhkém stavu pro pevnost v prostém tlaku měřenou po 7 dnech + objemová hmotnost
 - **Typ 2 - 3 vzorky ze střední úrovně** trubky v přirozeně vlhkém stavu pro pevnost v prostém tlaku měřenou po 7 dnech + objemová hmotnost
 - **Typ 2 - 3 vzorky z dolní úrovně** trubky v přirozeně vlhkém stavu pro pevnost v prostém tlaku měřenou po 7 dnech + objemová hmotnost
-
- **Typ 3 - 3 vzorky z horní úrovně** trubky v přirozeně vlhkém stavu pro pevnost v prostém tlaku měřenou po 7 dnech + objemová hmotnost
 - **Typ 3 - 3 vzorky ze střední úrovně** trubky v přirozeně vlhkém stavu pro pevnost v prostém tlaku měřenou po 7 dnech + objemová hmotnost
 - **Typ 3 - 3 vzorky z dolní úrovně** trubky v přirozeně vlhkém stavu pro pevnost v prostém tlaku měřenou po 7 dnech + objemová hmotnost



Obr. č. 19 - Typ 2 (vlevo) a typ 3 uložení směsi

Odvodnění u uložení směsi typu 3 je provedeno pomocí podélných zářezů do stěny trubky, která je zevnitř po obvodě pokryta geotextilií o plošné hmotnosti 200 g/m². Tím je zajištěn odvod volné vody a nikoliv cementu.

4.2 Směs ze stavby

Směs odebraná přímo ze stavby z čerstvě provedeného sloupu technologií tryskové injektáže, měla být zkoušena za stejných podmínek uložení jako směs připravená v laboratoři.

Směs byla odebrána pomocí odběrného válce (viz foto), který byl našroubován na vrtné soutyčí soupravy pro tryskovou injektáž a ponořen do vytryskaného sloupu, kde byl v hloubce 8 metrů pod terénem naplněn směsí zeminy a cementové suspenze. Objem odběrného zařízení je cca 10-15 litrů. Po pěti odběrech byly naplněny směsí plastové trubky a vana (obr. č. 20).

Po přeříznutí zatvrdlé směsi byla zjištěna struktura materiálu, která obsahovala zrna hornin o velikostech mnohokrát převyšujícím maximální velikost zrna ve zkušebním vzorku. Ten byl vzhledem k možnostem školní laboratoře geotechniky, průměru plastové trubky a dostupnosti jádrového vrtáku s diamantovou korunkou stanoven na 32 mm. V případě, že by z odebírané čerstvé směsi měla být vyloučena nadměrně velká zrna zeminy, muselo by být použito při odběru síto o průměru oka maximálně 5 mm (dle [11] má být průměr zrna ve vzorku při zkoušení injektážní směsi maximálně 1/6 průměru vzorku). Je otázka, zda by se materiál takovýmto způsobem vůbec podařilo odebrat a jaká směs by vlastně byla zkoušena.



Obr. č. 20 - Přeříznuté vzorky obsahující zrna nevyhovující velikosti, odebrané vzorky, odběrný válec namontovaný na vrtné soupravě

4.3 Hustota

Hmotnost jednotkového objemu suspenze byla určena pomocí odměrného válce se suspenzí o objemu (1000 ± 10) ml, který byl zvážen. Měření bylo provedeno třikrát.

Měření a výsledky

- Objem 1005 ml hmotnost 1453,77 g hustota **1446,53 kg/m³**
- Objem 1010 ml hmotnost 1458,66 g hustota **1444,29 kg/m³**
- Objem 1000 ml hmotnost 1445,18 g hustota **1445,18 kg/m³**

Průměrná hustota suspenze: **1445,33 kg/m³**.

Z určené hustoty suspenze lze při znalosti vodního součinitele dopočítat měrnou hmotnost cementu.

$$\frac{2}{\rho_{susp}} = \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_s}$$

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{2}{\rho_{susp}} - \frac{1}{\rho_w} = \frac{2}{1445,33} - \frac{1}{1000} = 3,8377 \times 10^{-4} \Rightarrow \rho_s = 2606 \text{ kg/m}^3$$

Ze suspenze by odpovídala měrná hmotnost cementu přibližně 2600 kg/m³. Nicméně vzhledem k tomu, že studiem dalších zdrojů bylo zjištěno, že měrná hmotnost směsných cementů se pohybuje okolo 3000 kg/m³, bude dále při výpočtu uvažováno s touto hodnotou. Pravděpodobným vysvětlením nižší hodnoty určené ze suspenze je přítomnost vzduchu ve směsi. Přesné měření měrné hmotnosti cementu pyknometricky nebylo v rámci této práce prováděno.

4.4 Dekantace

Dekantace byla měřena ve válci o objemu 1 000 ml s vnitřním průměrem 60 mm. Od začátku vsypání cementu do vody byla suspenze míchána 10 minut. Poté byla suspenze o objemu (1000 ± 10) ml odlita do odměrného válce. Dekantace směsi byla odečtena po 2 a 3 hodinách (v normě ČSN EN 12 716 Provádění speciálních geotechnických prací – Trysková injektáž je uvedeno měření po 3 hodinách, v normě ČSN EN 12 715 Provádění speciálních geotechnických prací – Injektáže je uvedeno měření po 2 hodinách). Zkouška byla provedena třikrát.

Měření a výsledky

- | | | |
|-----------------|----------------------|-------------------------|
| • Objem 1005 ml | po 2 hodinách 885 ml | dekantace 11,9 % |
| | po 3 hodinách 820 ml | dekantace 18,4 % |
| • Objem 1010 ml | po 2 hodinách 890 ml | dekantace 11,9 % |
| | po 3 hodinách 825 ml | dekantace 18,3 % |
| • Objem 1000 ml | po 2 hodinách 885 ml | dekantace 11,5 % |
| | po 3 hodinách 820 ml | dekantace 18,0 % |

Průměrná dekantace po 2 hodinách: **11,8 %**

Průměrná dekantace po 3 hodinách: **18,2 %**



Obr. č. 21 - Odměrný válec s cementovou suspenzí po odlití, po 2 hodinách a po 3 hodinách

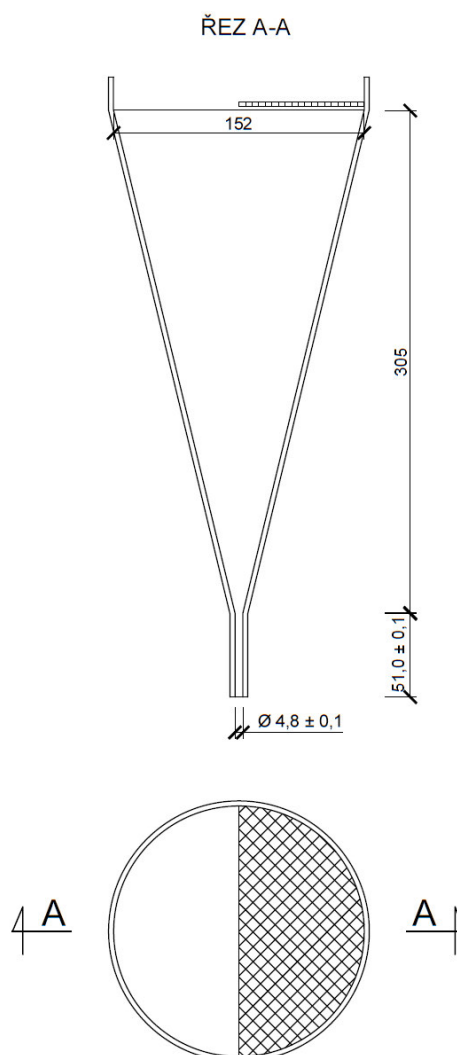
4.5 Viskozita podle Marshe

Zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN 14117 Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení viskozity cementových injektážních výrobků, která popisuje zkušební metodu pro stanovení doby výtoku (viskozity) cementových injektážních směsí.

Míra viskozity cementové injektážní směsi je stanovena na základě měření doby potřebné k protečení daného objemu směsi normovým kuželem (Marshův kužel, viz. obr. č. 22). [12]

Zařízení potřebná ke zkoušce [12]:

- Výtokový kužel (Marshův kužel) vyrobený z nerezového materiálu, opatřený sítím polokruhového tvaru o poloměru 76 mm s otvory o rozměru 2 mm, výtokovou trubicí o průměru $(48 \pm 0,1)$ mm a délce $(51,0 \pm 0,5)$ mm.
- Kruhový podstavec nebo jiné zařízení schopné udržet kužel ve stabilní svislé poloze
- Jímací nádoba umožňující měřit objem suspenze (1000 ± 10) ml
- Vodováha pro ověření svislé polohy kužele
- Plnicí nádoba umožňující měřit objem suspenze (1500 ± 15) ml
- Stopky s přesností 1 s
- Teploměr s přesností $0,5$ °C
- Míchačka nebo míchadlo s nádobou pro přípravu suspenze



Obr. č. 22 - Marshův trychtýř – rozměry. Vytvořeno podle [12]

Zkouška byla provedena při teplotě 19 °C, což odpovídá normovému předpokladu, který je (21 ± 2) °C. Výtokový kužel byl upevněn a vyrovnán. Nejprve byla zkouška provedena pouze s vodou. Trychtýř byl naplněn vodou o množství 1,5 litru a otvor výtokové trubice uzavřen prstem ruky. Bylo měřeno, za jak dlouho proteče 1 litr. Test byl proveden třikrát. V prvním případě voda protékla za 28,9 s, ve druhém za 27,3 s a ve třetím za 27,8 s, což odpovídá správné kalibraci. Uvádí se [9], že voda o množství jeden litr by měla trychtýřem protéct za 28 s. [12]

Mezi tím byla míchána cementová suspenze. Po 10 minutách míchání směsi a jednu minutu po vypuštění vody byl trychtýř naplněn přes půlkruhové síto směsí o objemu 1,5 litru a stejně jako u vody změřen čas výtoku 1 litru směsi s přesností 10 ml. Zkouška byla provedena třikrát vždy s použitím čerstvé směsi, přičemž před každým měřením byl výtokový kužel a jímací nádoba zcela čisté. [12]

Výsledky:

- 1. měření Doba výtoku 1 litru: **34,8 s**
- 2. měření Doba výtoku 1 litru: **32,3 s**
- 3. měření Doba výtoku 1 litru: **33,4 s**

Průměrná doba výtoku (Marsh time): **33,5 s**



Obr. č. 23 - Marshův trychtýř a odměrný válec použité pro zkoušení

4.6 Zatěžovací zkoušky

4.6.1 Rozměry vzorku

Dle normy ČSN EN 12716 Provádění speciálních geotechnických prací – Trysková injektáž má být zkouška pevnosti suspenze v prostém tlaku na válcových vzorcích s poměrem výška/průměr 2:1. Průměr vzorku blíže specifikován není. S ohledem na možnosti laboratoře a rozměry trubek, kde byly vzorky uchovávány, byl zakoupen jádrový vrták délky 150 mm s diamantovou korunkou vnějšího průměru 38 mm a vnitřního průměru 32 mm. **Průměr válcového zkušebního tělíska byl tedy stanoven na 32 mm a výška 64 mm.** [1]



Obr. č. 24 - Jádrový vrták 38 x 150 mm

4.6.2 Rychlost zatěžování

Rychlost zatěžování byla uvažována dle německé normy DIN 4093 (Design of strengthened soil – Set up by means of jet grouting, deep mixing and grouting), která uvádí v příloze A – Provádění pevnostních zkoušek maximální rychlost zatěžování vzorků $0,05 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$. V případě válcovitých těles s pevností $f_m > 4 \text{ N}/\text{mm}^2$ lze zvýšit rychlost zatěžování až na $0,2 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$. [11]

Při zkouškách byla použita rychlost zatěžování $0,05 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ tedy **2,12 kN/min.**

4.6.3 Stáří zkušebních těles pro zkoušení pevnosti

V případě určení časového rozmezí pro zkoušení pevnosti bylo postupováno podle normy ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. Stáří zkušebních těles se počítá od nulového času. To je čas zahájení míchání vody a cementu s přesností jedné minuty. Zkoušky pevnosti v různém stáří se pak provedou v následujících časových rozmezích [15]:

- 24 hodin ± 15 minut
- 48 hodin ± 30 minut
- **72 hodin ± 45 minut**
- **7 dnů ± 2 hodiny**
- **28 dnů ± 8 hodin**

4.6.4 Cement

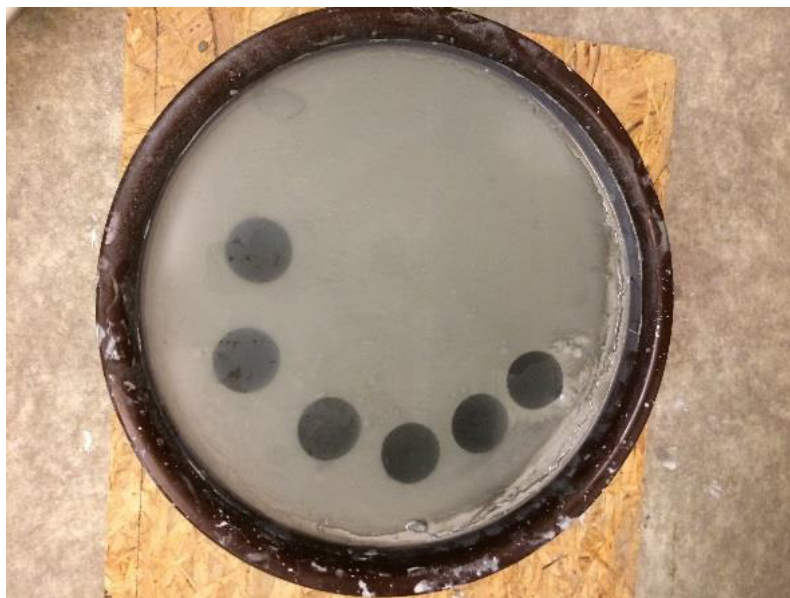
Pro zkoušení byl použit cement s označením CEM V/A (S-V) 32,5 R. Jde o směsný cement obsahující příměsi v množství 6 až 20 % z celkové hmotnosti. Příměsemi jsou vysokopecní struska a křemičité popílkky. Tento cement spadá do třídy s rychlým nárůstem počáteční pevnosti, která dosahuje po 2 dnech zráním alespoň 10 MPa a minimální hodnoty 32,5 MPa po 28 dnech zráním. Tyto hodnoty ovšem platí při stanovení pevnosti cementu dle normy ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Stanovení pevnosti, kde se zkušební tělesa zhotovují z plastické malty složené z cementu a vody v poměru voda/cement 0,5 a normalizovaného písku. Pro tuto práci tedy nemají vypovídající charakter. [16] [17]



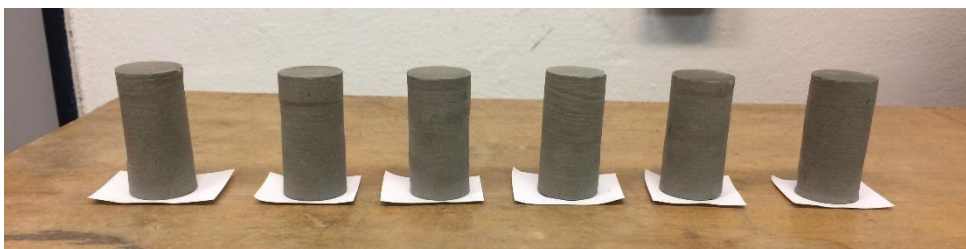
Obr. č. 25 - Cement použitý pro výrobu cementové suspenze

4.6.5 Pevnost v tlaku po 3 dnech - lavor

Pevnost v tlaku cementové suspenze po 3 dnech tvrdnutí byla měřena na 6 zkušebních vzorcích, které byly odvrtný z lavoru o průměru 32 cm a hloubce 12 cm. Přičemž výška ztvrdlé suspenze byla po dekantaci 9 cm a trvale pod hladinou podzemní vody.



Obr. č. 26 - Lavor s otvory po odvrtných zkušebních vzorcích



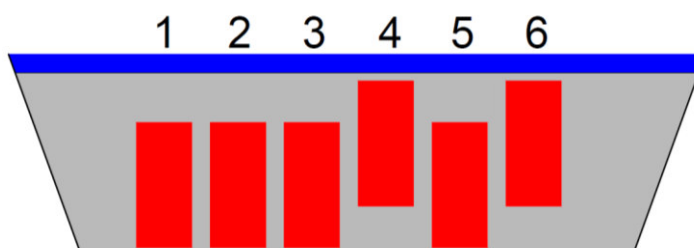
Obr. č. 27 - 6 zkušebních vzorků pro pevnost v tlaku po 3 dnech

Tabulka 1: Naměřené a vypočtené parametry vzorků zkoušených po 3 dnech

Číslo vzorku	Průměr			Výška			Plocha průřezu	Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost nasycen.
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[m ³]	[g]	[kg/m ³]
1	30,2	30,9	30,6	63,5	63,7	63,6	733,0	0,0000466	76,19	1634,3
2	30,5	31,3	30,9	62,2	62,3	62,3	749,9	0,0000467	77,19	1653,5
3	30,4	30,8	30,6	62,5	62,5	62,5	735,4	0,0000460	76,75	1669,8
4	30,8	30,7	30,8	63,5	63,4	63,5	742,6	0,0000471	75,13	1594,4
5	30,2	30,7	30,5	62,2	62,1	62,2	728,2	0,0000453	75,72	1673,0
6	31,2	31,2	31,2	62,9	62,9	62,9	764,5	0,0000481	75,23	1564,4

Číslo vzorku	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Hmotnost části vzorku	Hmotnost vysušené části vzorku	Objemová hmotnost vysušen.	Stupeň nasycení	Pórovitost
[-]	kN	MPa	[g]	[g]	[kg/m ³]	[-]	[%]
1	2,562	3,495	73,29	46,16	1029,3	0,92	65,69
2	2,485	3,314	72,85	45,84	1040,5	0,94	65,32
3	2,614	3,554	73,75	46,59	1054,9	0,95	64,84
4	1,675	2,255	70,96	43,82	984,6	0,91	67,18
5	2,470	3,392	64,23	40,63	1058,3	0,95	64,72
6	1,838	2,404	62,01	38,32	966,7	0,88	67,78

Z výsledků je patrné, že dva ze šesti vzorků (vzorky číslo 4 a 6) mají nižší objemovou hmotnost a pevnost v tlaku. Bylo zjištěno, že tento jev je způsoben odlišným opracováním vzorků. Výška ztvrdlé suspenze v latoru byla 9 cm. Po odvrtání zkušebních těles o průměru cca 31 mm je bylo nutné zkrátit na výšku zhruba 62 mm. V případě těles číslo 1, 2, 3, 5 byla odříznuta horní podstava s rezervou pro zarovnání, spodní podstava byla pouze zarovnána. Naproti tomu u vzorků číslo 4 a 6 byla odříznuta spodní podstava. Vzorky tak nebyly všechny uloženy ve stejné hloubce (viz obr. č. 28).



Obr. č. 28 – Skutečné uložení vzorků v latoru pro stanovení pevnosti po 3 dnech

Vliv sedimentace cementového pojiva v suspenzi je značný i na takto malém výškovém rozdílu.

Způsob porušení vzorků je vidět na následujících obrázcích. V zásadě došlo vždy k vytvoření kuželovitého klínu na horní (ve většině případů) nebo spodní podstavě, který svým zatlačením vytvořil podélnou trhlinu (trhliny).



Obr. č. 29 - Porušení vzorků, zleva č. 1 a 2



Obr. č. 30 - Porušení vzorků, zleva č. 3 a 4



Obr. č. 31 - Porušení vzorků, zleva č. 5 a 6

Z každého porušeného zkušební tělesa byl odebrán co největší objem vzorku pro stanovení pórovitosti a stupně nasycení. Vzorek byl vložen do pece s teplotou 105 °C a po vysušení zvážen. S uvažovanou měrnou hmotností směsného cementu 3000 kg/m³ byla dopočítána pórovitost a stupeň nasycení následujícím způsobem:

Pórovitost pro vzorek č. 1

$$n = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_{s,zk} \times \frac{m}{m_{zk}}}{V} = \frac{V - \frac{m_s}{\rho_s} \times \frac{m}{m_{zk}}}{V} = \frac{4,66 \times 10^{-5} - \frac{46,16 \times 10^{-3}}{3000} \times \frac{76,19}{73,29}}{4,66 \times 10^{-5}} = 0,657$$

Kde:

- n ...Pórovitost zkušební tělesa
- V ...Objem zkušební tělesa
- V_p ...Objem pórů zkušební tělesa
- V_{s,zk} ...Objem skeletu zkušební vzorku
- m ...Hmotnost zkušební tělesa
- m_{zk} ...Hmotnost zkušební vzorku
- m_s ...Hmotnost skeletu zkušební vzorku
- ρ_s ...Měrná hmotnost cementu

Stupeň nasycení pro vzorek č. 1

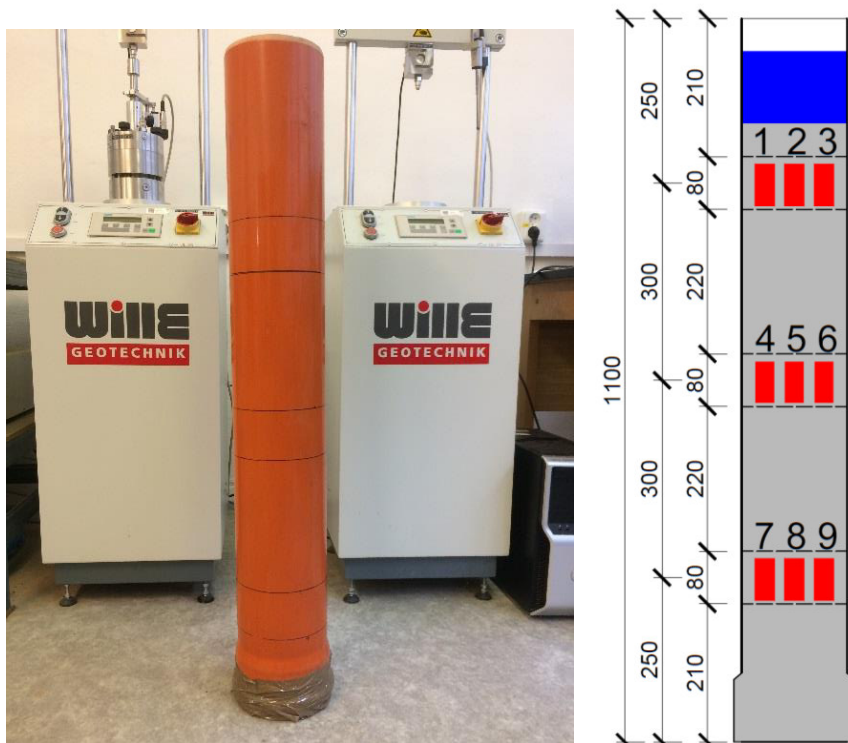
$$S_r = \frac{V_w}{V_p} = \frac{\rho - \rho_d}{\rho_w \times n} = \frac{1634,29 - 1029,32}{1000 \times 0,657} = 0,921$$

Kde:

- S_r ... Stupeň nasycení zkušební tělesa
- V_w ...Objem vody ve zkušebním tělese
- V_p ...Objem pórů zkušební tělesa
- ρ ...Objemová hmotnost přirozeně nasyceného zkušební tělesa
- ρ_d ...Objemová hmotnost přirozeně vysušeného zkušební tělesa
- ρ_w ...Měrná hmotnost vody
- n ...Pórovitost zkušební tělesa

4.6.6 Pevnost v tlaku po 7 dnech - trubka neodvodněná

Trubka se zatvrdlou suspenzí byla po 7 dnech (s přesností ± 2 hodiny) vyříznuta na 3 válcová tělesa výšky 8 cm v úrovních dle obr. č. 32. Z těchto těles byly odvrtny vždy 3 zkušební vzorky. Vzhledem ke zjištění možnosti významnějšího ovlivnění pevnosti vzorků rozdílným výškovým uložením byla pro větší přesnost měření u všech tří vzorků z každé úrovně po odvrtní odříznuta vždy horní část a spodní pouze zarovnána.



Obr. č. 32 – Rozmístění vzorků v neodvodněné trubce



Obr. č. 33 - Válcové těleso odříznuté z trubky s otvory po vyvrtaných jádrech



Obr. č. 34 - Vyvrtané upravené vzorky před zkouškou pevnosti (zleva č. 1-9)



Obr. č. 35 - Způsob vrtání vzorků. Vrtačka, stojan, vrtací jádrová korunka, válec se zatvrdlou suspenzí

Tabulka 2: Naměřené a vypočtené parametry vzorků z neodvodněné trubky

Číslo vzorku	Průměr			Výška			Plocha průřezu	Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost nasycen.	
	[-]	[mm]			[mm]			[mm ²]	[m ³]	[g]	[kg/m ³]
HORNÍ	1	31,5	31,4	31,5	63,3	63,3	63,3	776,8	0,0000492	73,59	1496,5
	2	31,6	31,7	31,7	63,5	63,4	63,5	786,8	0,0000499	74,81	1498,6
	3	31,5	31,4	31,5	63,1	63,1	63,1	776,8	0,0000490	74,46	1519,0
STŘEDNÍ	4	31,4	31,4	31,4	62,2	63,3	62,8	774,4	0,0000486	77,12	1587,1
	5	31,6	31,6	31,6	63,5	63,4	63,5	784,3	0,0000498	77,96	1566,7
	6	31,6	31,6	31,6	62,4	62,4	62,4	784,3	0,0000489	75,61	1545,0
SPODNÍ	7	31,4	31,4	31,4	64,2	64,2	64,2	774,4	0,0000497	79,95	1608,2
	8	31,9	31,8	31,9	62,8	62,8	62,8	796,7	0,0000500	78,68	1572,5
	9	31,8	31,8	31,8	63,7	63,8	63,8	794,2	0,0000506	79,69	1573,9

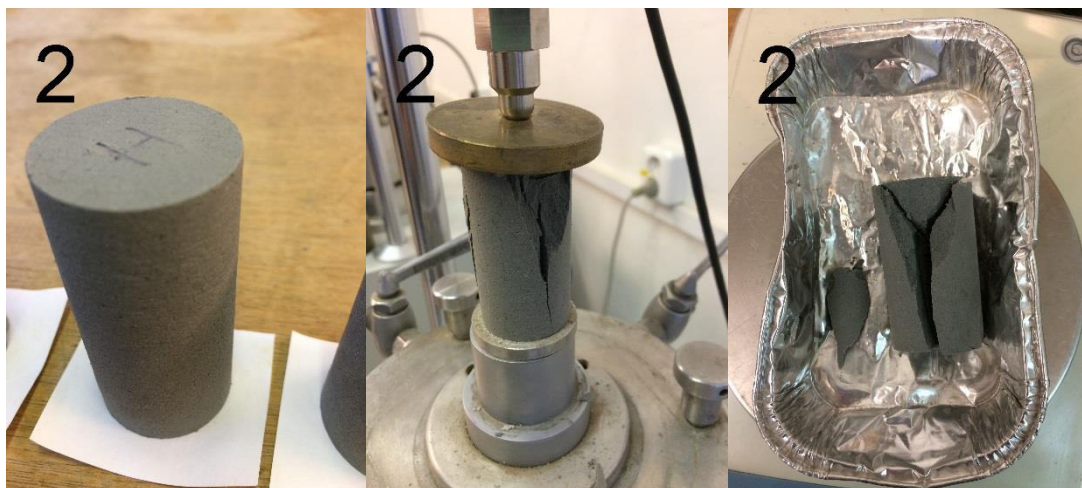
Číslo vzorku	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Hmotnost části vzorku	Hmotnost vysušené části vzorku	Objemová hmotnost vysušen.	Stupeň nasycení	Pórovitost	
[-]	kN	MPa	[g]	[g]	[kg/m ³]	[-]	[%]	
HORNÍ	1	2,224	2,863	72,60	40,34	831,54	0,92	72,28
	2	2,385	3,031	73,66	41,09	835,98	0,92	72,13
	3	2,546	3,277	73,56	41,28	852,43	0,93	71,59
STŘEDNÍ	4	3,537	4,568	73,03	43,87	953,39	0,93	68,22
	5	3,513	4,479	75,38	45,02	935,68	0,92	68,81
	6	3,194	4,073	73,92	43,40	907,11	0,91	69,76
SPODNÍ	7	4,499	5,810	78,34	48,18	989,05	0,92	67,03
	8	4,269	5,358	76,83	47,34	968,93	0,89	67,70
	9	4,687	5,901	72,61	44,92	973,69	0,89	67,54

Projevil se očekávaný nárůst objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku se zvětšující se hloubkou, a naopak pokles pórovitosti se zvětšující se hloubkou. Narůstající pevnost odvrtaných vzorků byla znát i na jejich konečném mechanickém opracování.

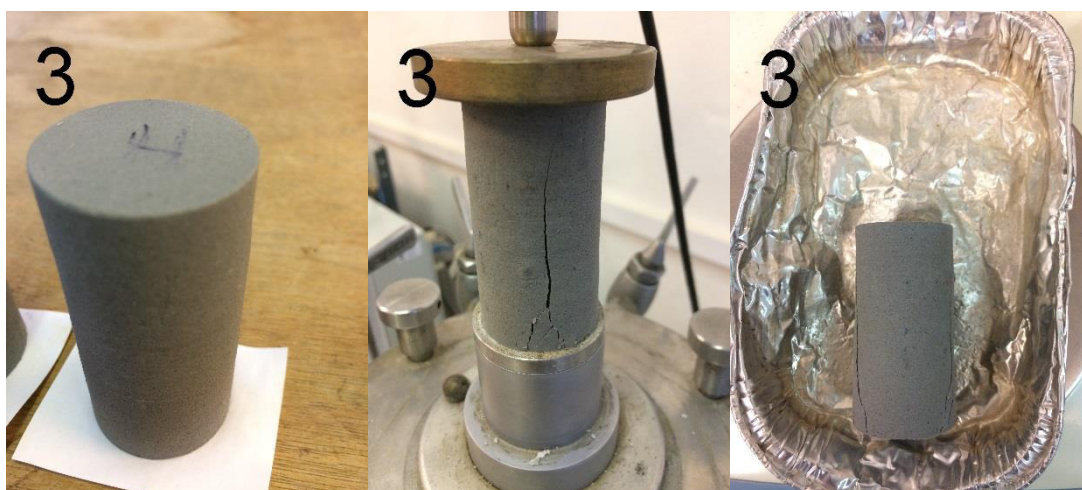
Porušení se s narůstající pevností vzorků projevilo náhlejší kolapsem doprovázeným silnějším zvukovým efektem.



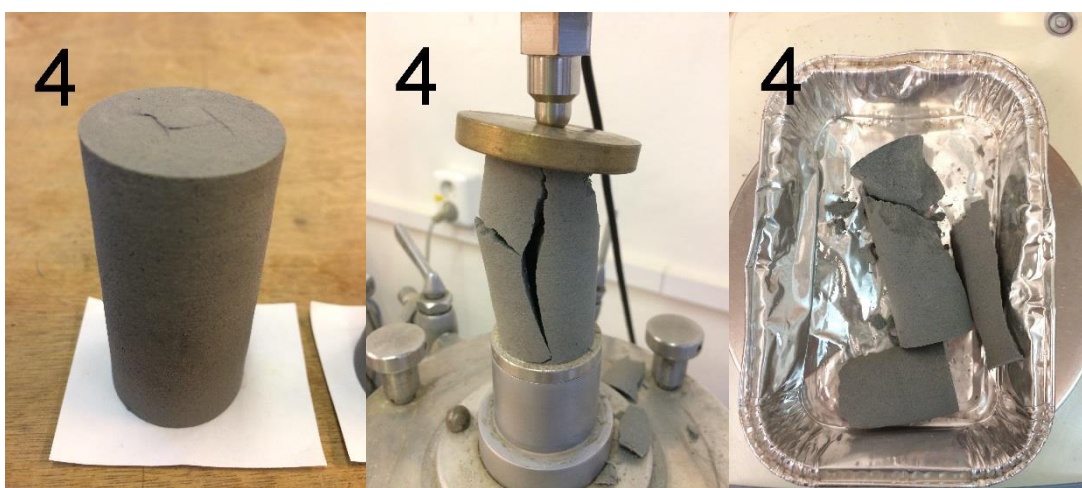
Obr. č. 36 - Vzorek č. 1 před a po zkoušce



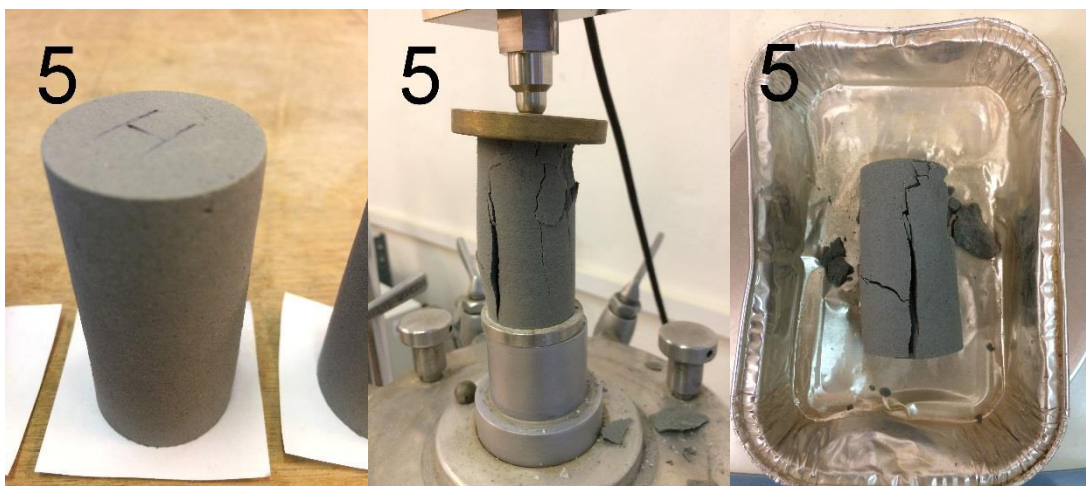
Obr. č. 37 - Vzorek č. 2 před a po zkoušce



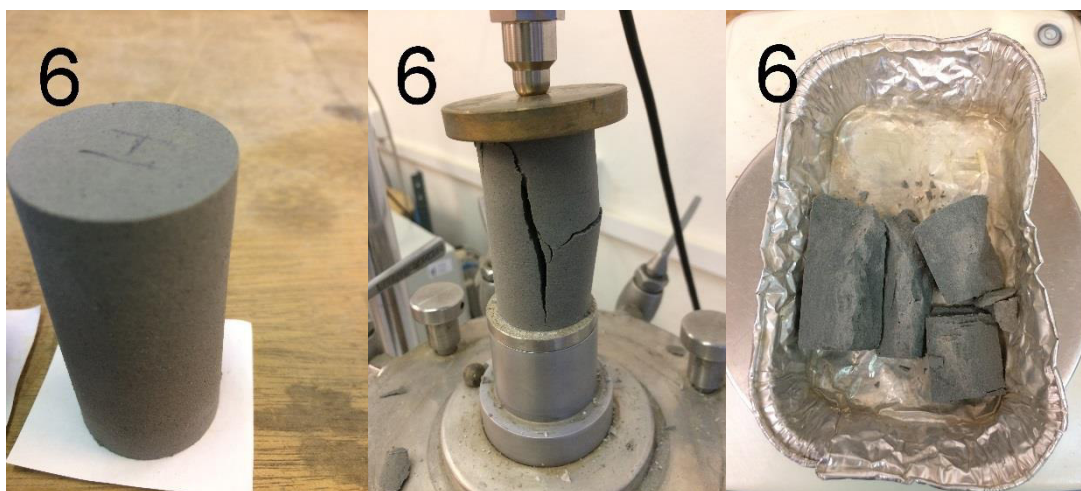
Obr. č. 38 – Vzorek č. 3 před a po zkoušce



Obr. č. 39 - Vzorek č. 4 před a po zkoušce



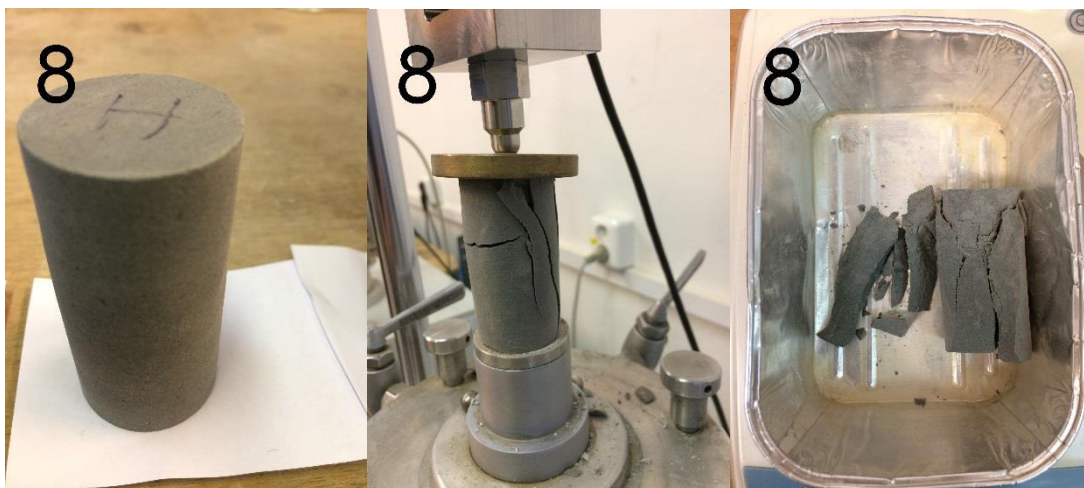
Obr. č. 40 - Vzorek č. 5 před a po zkoušce



Obr. č. 41 - Vzorek č. 6 před a po zkoušce



Obr. č. 42 - Vzorek č. 7 před a po zkoušce



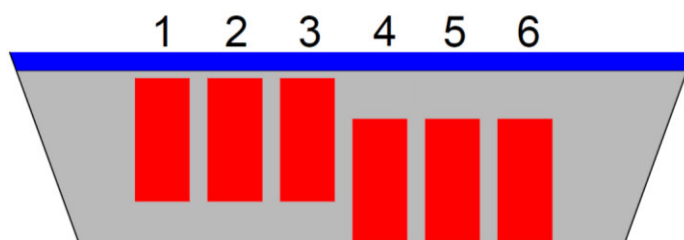
Obr. č. 43 - Vzorek č. 8 před a po zkoušce



Obr. č. 44 - Vzorek č. 9 před a po zkoušce

4.6.7 Pevnost v tlaku po 7 dnech - lavor

Celkem bylo odvrtáno a odzkoušeno 6 zkušebních vzorků. Při zkoušení po 3 dnech byly u vzorků, které byly uloženy hlouběji, zjištěny pevnosti přibližně o 1 MPa vyšší. Pro ověření tohoto jevu a pro větší přesnost měření byly zkoušeny 3 vzorky s hlubším uložením a 3 vzorky s uložením blíže k povrchu.



Obr. č. 45 – Skutečné uložení vzorků pro stanovení pevnosti po 7 dnech

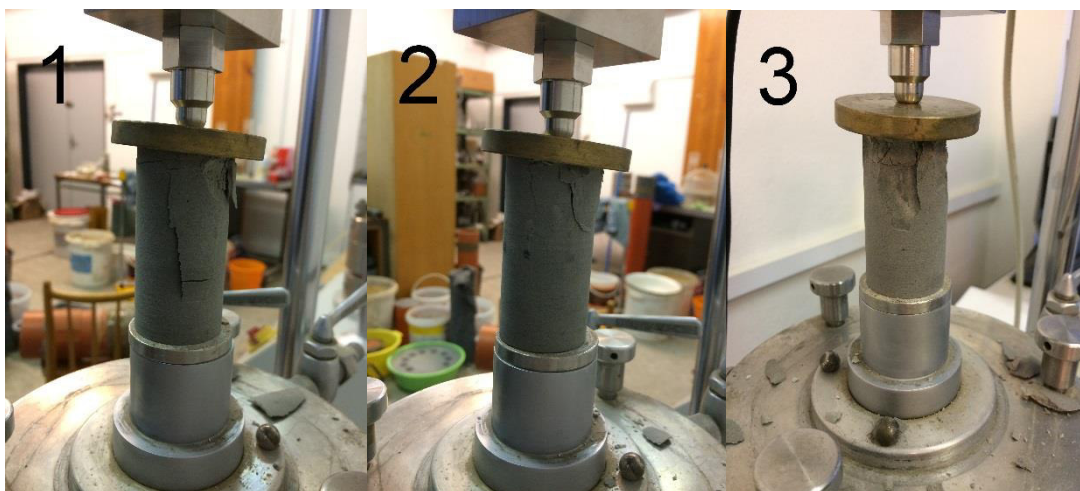


Obr. č. 46 - Vzorčky před zkouškou v tlaku

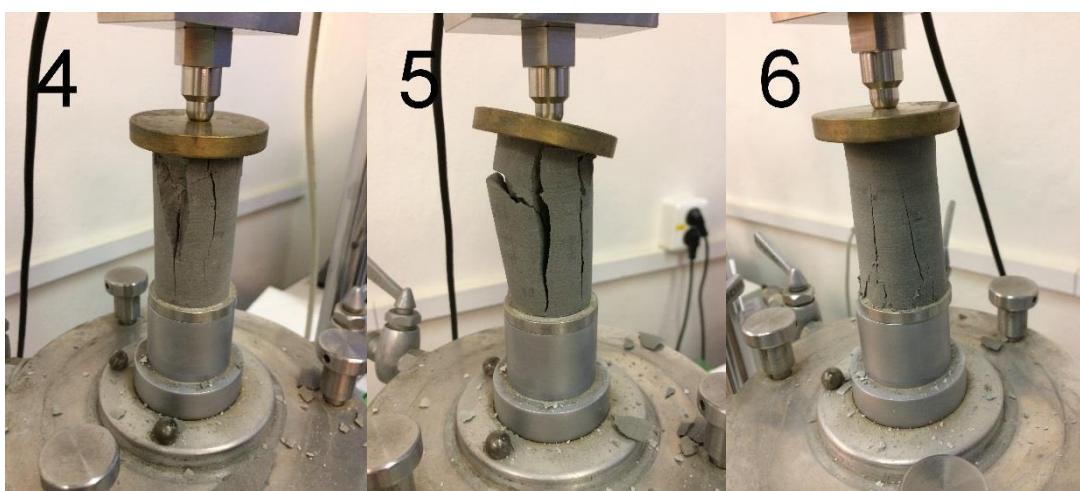
Tabulka 3: Naměřené a vypočtené parametry vzorků z laboru zkoušených po 7 dnech

Číslo vzorku	Průměr			Výška			Plocha průřezu	Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost nasycen.
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]				
1	31,7	31,8	31,8	63,5	63,8	63,7	791,7	0,0000504	80,27	1592,9
2	31,7	31,8	31,8	63,9	63,8	63,9	791,7	0,0000506	80,37	1589,8
3	31,7	31,7	31,7	63,1	62,9	63	789,2	0,0000497	79,19	1592,7
4	31,8	31,8	31,8	63,8	63,8	63,8	794,2	0,0000507	82,88	1635,6
5	31,7	31,7	31,7	62,5	62,5	62,5	789,2	0,0000493	80,65	1635,0
6	31,7	31,6	31,7	63,7	63,8	63,8	786,8	0,0000502	82,33	1641,5

Číslo vzorku	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Hmotnost části vzorku	Hmotnost vysušené části vzorku	Objemová hmotnost vysušen.	Stupeň nasycení	Pórovitost
[-]	kN	MPa	[g]	[g]	[kg/m ³]	[-]	[%]
1	3,213	4,058	76,02	48,01	1005,96	0,88	66,47
2	3,006	3,797	78,45	49,41	1001,33	0,88	66,62
3	3,450	4,371	72,18	45,40	1001,75	0,89	66,61
4	5,900	7,429	81,36	52,74	1060,26	0,89	64,66
5	5,310	6,728	78,32	50,33	1050,68	0,90	64,98
6	6,024	7,657	80,72	52,19	1061,32	0,90	64,62



Obr. č. 47 - Porušené vzorky č. 1-3

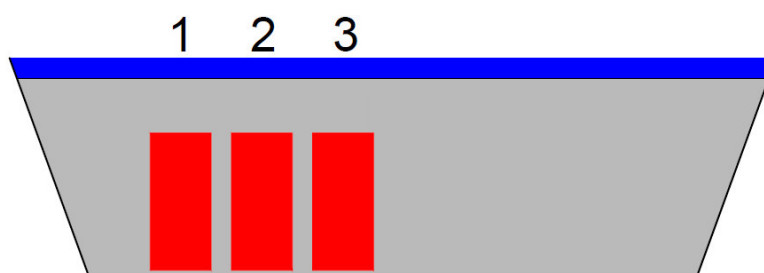


Obr. č. 48 - Porušené vzorky 4-6

4.6.8 Pevnost v tlaku po 7 dnech - lavor, vysušené vzorky

Vzorky pro stanovení pevnosti ve vysušeném stavu po 7 dnech zrání byly odebrány sedmý den zrání a vloženy na 24 hodin do pece s teplotou 105 °C. Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena osmý den po namíchání směsi. Předpokládá se, že hydratace je v krátkém časovém horizontu po vložení do pece pozastavena, neboť vzorek velmi rychle ztrácí vodu v sobě navázanou.

Pozice těchto vzorků v lavoru odpovídala pozici u dna (viz obr. č. 49)



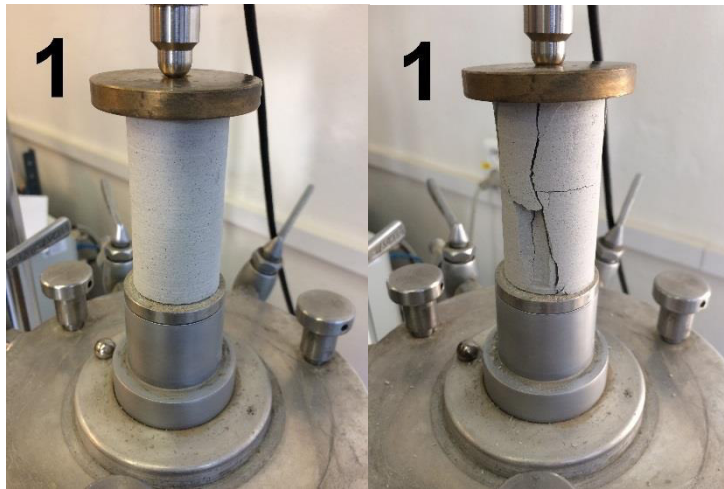
Obr. č. 49 - Skutečné uložení vzorků pro stanovení pevnosti po 7 dnech (vysušených)

Tabulka 4: Naměřené a vypočtené parametry vzorků z lavour (vysušených)

Číslo vzorku	Průměr			Výška			Plocha průřezu	Objem	Hmotnost
[-]	[mm]			[mm]			[mm ²]	[m ³]	[g]
1	31,7	31,6	31,7	64,8	64,7	64,8	786,8	0,0000509	83,21
2	31,7	31,8	31,8	64,1	64,1	64,1	791,7	0,0000507	82,20
3	31,6	31,6	31,6	63,5	63,5	63,5	784,3	0,0000498	81,79

Číslo vzorku	Objemová hmotnost	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Hmotnost vysušeného vzorku	Objemová hmotnost vysušeného vzorku	Stupeň nasycení	Pórovitost
[-]	[kg/m ³]	kN	MPa	[g]	[kg/m ³]	[-]	[%]
1	1633,4	8,465	10,759	52,98	1040,0	0,91	65,33
2	1619,7	8,529	10,773	52,52	1034,9	0,89	65,50
3	1642,3	8,402	10,713	52,08	1045,8	0,92	65,14

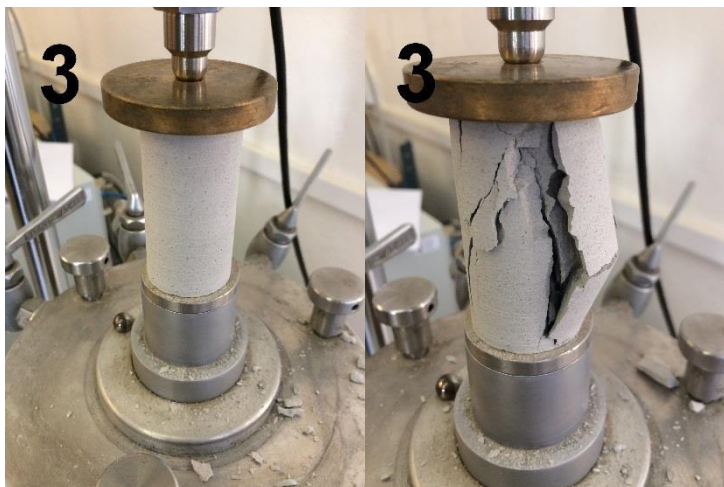
Vysušené vzorky vykazují výrazně vyšší pevnost proti stejně starým a stejně uloženým vzorkům.



Obr. č. 50 – Vzorek č. 1



Obr. č. 51 - Vzorek č. 2



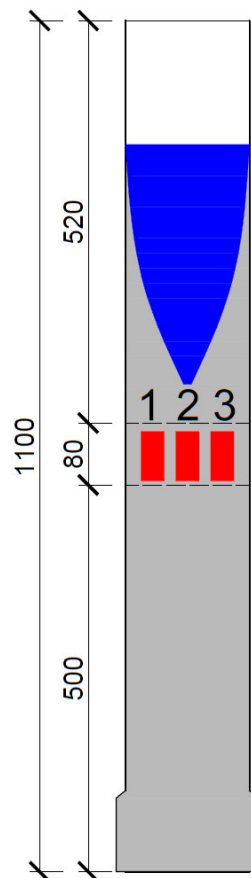
Obr. č. 52 - Vzorek č. 3

4.6.9 Pevnost v tlaku po 7 dnech - trubka odvodňená 1

Odvodnění trubky bylo provedeno pomocí podélných řezů po celé části trubky kromě horních 20 cm. Vnitřek trubky byl po obvodě pokryt geotextilií o plošné hmotnosti 200 g/m². Po namíchání suspenze byla směs vylita do trubky. Díky geotextilii nedocházelo k odvodu cementového pojiva, ale pouze vody. Nicméně voda odtékala vyšší rychlostí, než bylo předpokládáno, a došlo tak k výraznějšímu poklesu hladiny směsi, resp. zmenšení objemu. Suspenze zůstala uchycena na geotextilii po obvodu a došlo k vytvoření trychtýře (viz obr. č. 53).

Vzhledem k výrazné ztrátě objemu směsi jsem se rozhodl pokus opakovat. Tentokrát bylo odvodnění provedeno jiným způsobem (viz. kapitola 4.6.10).

Pro zkoušku byly odvrtány 3 zkušební jádra z jedné úrovně.



Obr. č. 53 - Rozmístění vzorků v odvodňené trubce 1



Obr. č. 54 - Otvory po odvrtaných vzorcích

Tabulka 5: Naměřené a vypočtené parametry vzorků z odvodněné trubky 1

Číslo vzorku	Průměr			Výška			Plocha průřezu	Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost nasycen.
[-]	[mm]			[mm]			[mm ²]	[m ³]	[g]	[kg/m ³]
1	31,7	31,7	31,7	65,5	65,5	65,5	789,2	0,0000517	89,79	1736,9
2	31,8	31,7	31,8	64,2	64,2	64,2	791,7	0,0000508	87,68	1725,0
3	31,2	31,2	31,2	63,5	63,5	63,5	764,5	0,0000485	84,70	1744,7

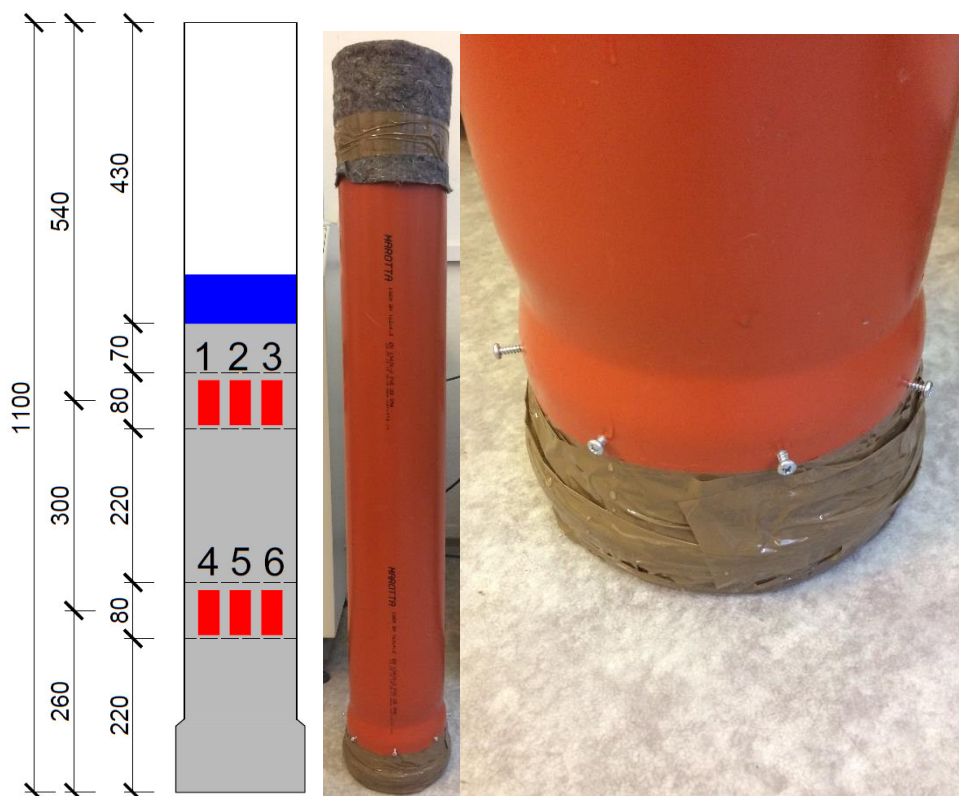
Číslo vzorku	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Hmotnost části vzorku	Hmotnost vysušené části vzorku	Objemová hmotnost vysušen.	Stupeň nasycení	Pórovitost
[-]	kN	MPa	[g]	[g]	[kg/m ³]	[-]	[%]
1	10,820	13,709	64,24	44,86	1212,92	0,88	59,57
2	13,150	16,609	83,17	57,84	1199,64	0,88	60,01
3	14,160	18,521	83,29	58,18	1218,69	0,89	59,38

Díky odloučení vody došlo k výraznému snížení vodního součinitele směsi. To se projevilo na výsledcích. Objemová hmotnost i pevnost v tlaku jsou výrazně vyšší než u směsi s vodním součinitelem 1,0.

Zkouška pevnosti v tlaku byla prováděna na lisu s rozsahem působící síly do 10 kN. Po otestování prvního vzorku bylo zjištěno, že je nutné tuto sílu překročit, aby došlo k porušení. Byl proto zatížen znovu na jiném lisu s vyšší kapacitou. Při opakovaném zatížení prvního vzorku však byla překročena mezní rychlost zatěžování. Z těchto důvodů se pevnost vzorku č. 1 liší. I proto bylo rozhodnuto zkoušku opakovat.

4.6.10 Pevnost v tlaku po 7 dnech - trubka odvodněná 2

Odvodnění v tomto případě bylo provedeno pomocí osmi otvorů o velmi malém průměru (přibližně 3 mm), do kterých byly našroubovány vruty. Díky tomu bylo možné odvod vody regulovat. Geotextilie pro zamezení odvodu cementu byla použita stejně jako v předchozí zkoušce. Připravené drenážní otvory však nebyly nakonec použity. Voda drénovala skrz geotextilii a spodní zátku trubky samovolně (netěsnostmi). Odvod vody byl o hodně pomalejší než v předchozím pokusu. Došlo však také ke značnému poklesu hladiny směsi.



Obr. č. 55 - Odvodněná trubka s detailem odvodnění

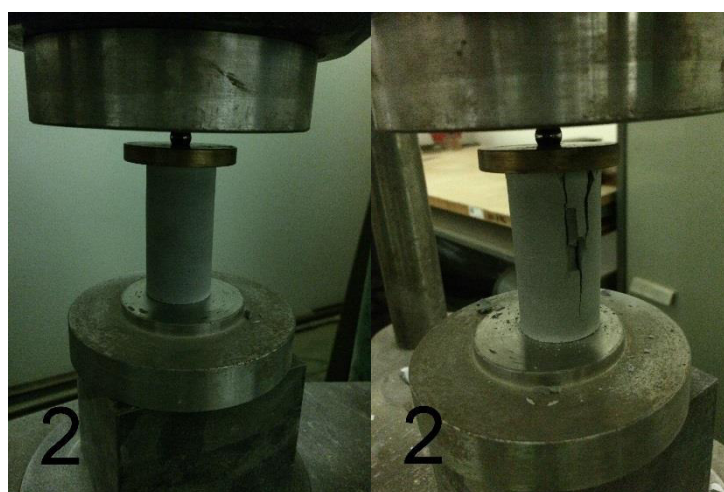
Tabulka 6: Naměřené a vypočtené parametry vzorků z odvodněné trubky 2

Číslo vzorku	Průměr			Výška			Plocha průřezu	Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost nasycen.	
	[mm]			[mm]			[mm ²]	[m ³]	[g]	[kg/m ³]	
HORNÍ	1	31,8	31,9	31,9	63,5	63,6	63,6	796,7	0,0000506	85,44	1687,5
	2	31,8	31,9	31,9	63,9	63,8	63,9	796,7	0,0000509	85,64	1683,5
	3	31,7	31,8	31,8	63,2	63,4	63,3	791,7	0,0000501	84,66	1689,3
SPODNÍ	7	31,7	31,8	31,8	63,2	63,3	63,3	791,7	0,0000501	85,95	1716,4
	8	31,4	31,4	31,4	63,2	63,1	63,2	774,4	0,0000489	83,92	1716,1
	9	31,7	31,7	31,7	63,9	63,8	63,9	789,2	0,0000504	87,24	1731,2

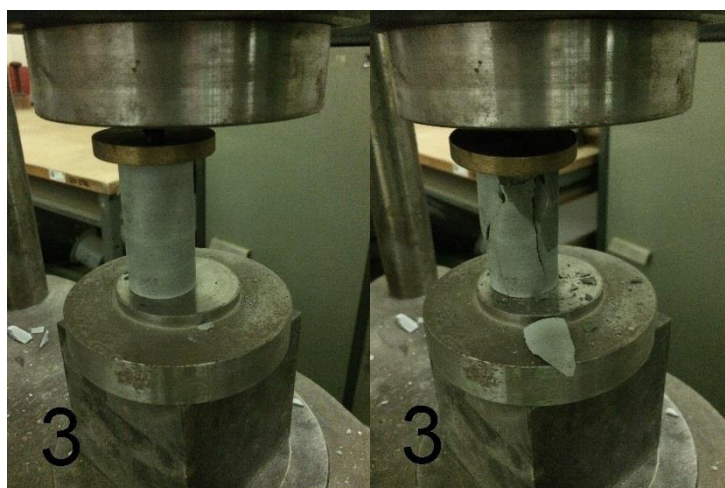
Číslo vzorku	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Hmotnost části vzorku	Hmotnost vysušené části vzorku	Objemová hmotnost vysušen.	Stupeň nasycení	Pórovitost	
[-]	kN	MPa	[g]	[g]	[kg/m ³]	[-]	[%]	
HORNÍ	1	13,150	16,505	81,75	61,99	1158,83	0,86	61,37
	2	13,360	16,769	82,00	63,67	1151,13	0,86	61,63
	3	13,520	17,077	78,82	61,42	1154,75	0,87	61,51
SPODNÍ	7	15,320	19,350	80,79	63,02	1195,23	0,87	60,16
	8	14,580	18,828	80,95	64,20	1199,89	0,86	60,00
	9	14,270	18,081	81,19	64,25	1207,51	0,88	59,75



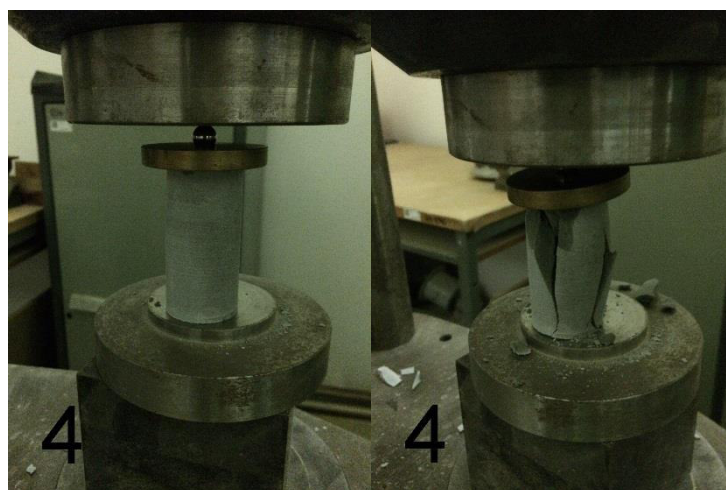
Obr. č. 56 - Vzorek č. 1 z odvodňené trubky 2



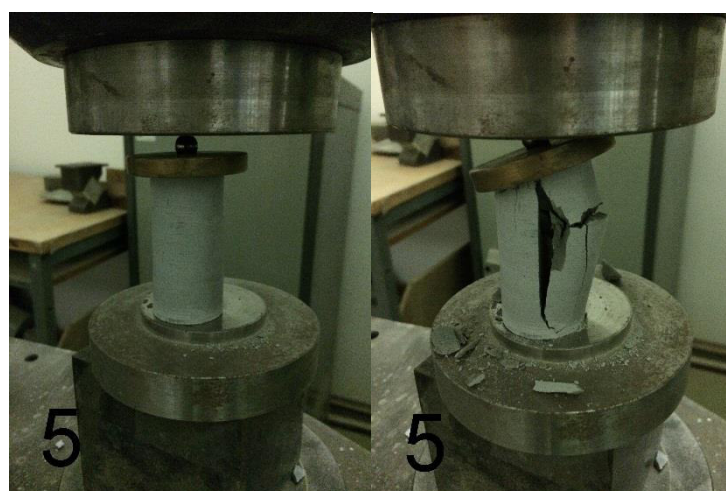
Obr. č. 57 - Vzorek č. 2 z odvodňené trubky 2



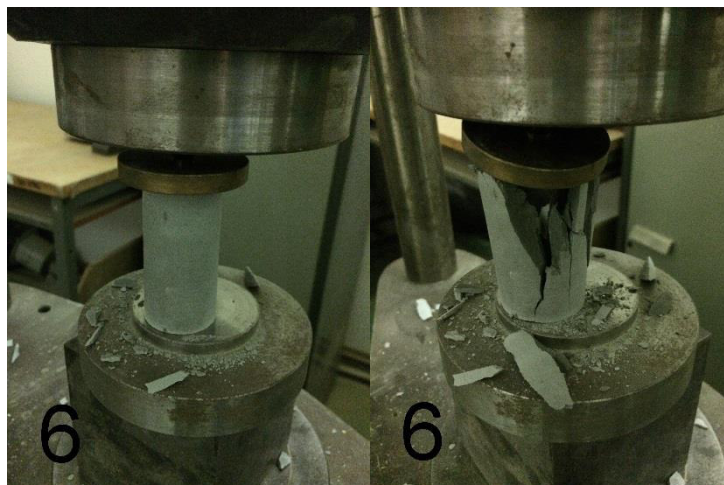
Obr. č. 58 - Vzorek č. 3 z odvodňené trubky 2



Obr. č. 59 - Vzorek č. 4 z odvodňené trubky 2

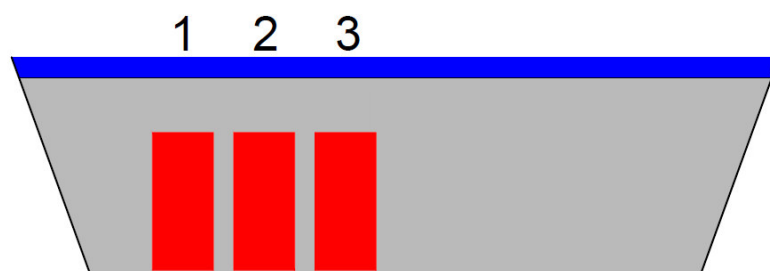


Obr. č. 60 - Vzorek č. 5 z odvodňené trubky 2



Obr. č. 61 - Vzorek č. 6 z odvodňené trubky 2

4.6.11 Pevnost v tlaku po 14 dnech - lavor



Obr. č. 62 - Skutečné uložení vzorků pro stanovení pevnosti po 14 dnech

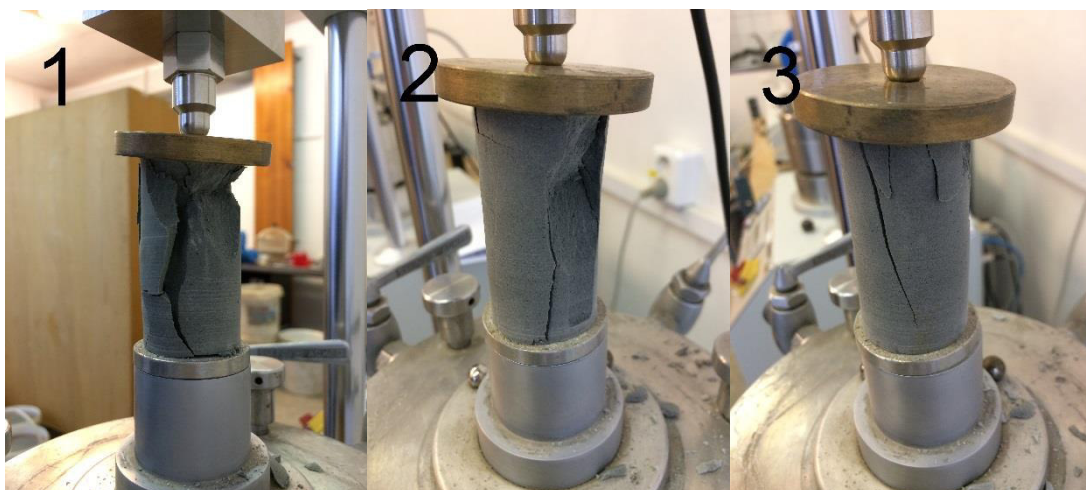


Obr. č. 63 - Lavor s otvory po odvrtných zkušebních vzorcích (po 7 a 14 dnech)

Tabulka 7: Naměřené a vypočtené parametry vzorků z lavoru zkoušených po 14 dnech

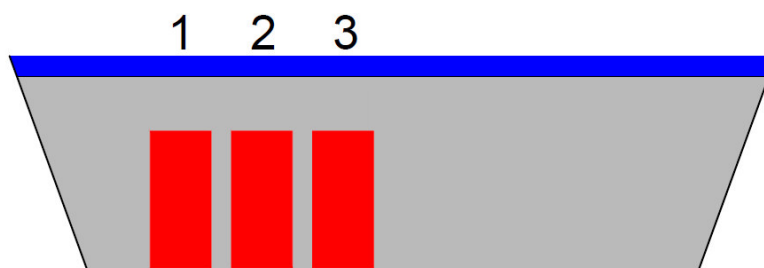
Číslo vzorku	Průměr			Výška			Plocha průřezu	Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost nasycen.
	[mm]			[mm]						
1	31,5	31,6	31,6	62,3	62,4	62,4	781,8	0,0000487	78,06	1601,4
2	31,5	31,5	31,5	63,0	62,9	63,0	779,3	0,0000491	79,18	1614,0
3	31,3	31,2	31,3	62,7	62,8	62,8	767,0	0,0000481	77,74	1615,3

Číslo vzorku	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Hmotnost části vzorku	Hmotnost vysušené části vzorku	Objemová hmotnost vysušen.	Stupeň nasycení	Pórovitost
1	7,317	9,359	72,15	46,7	1037,0	0,86	65,43
2	7,550	9,688	74,07	47,8	1042,5	0,88	65,25
3	5,880	7,666	77,02	49,6	1040,2	0,88	65,33



Obr. č. 64 - Porušené vzorky č. 1, 2, 3 po 14 dnech

4.6.12 Pevnost v tlaku po 28 dnech - lavor

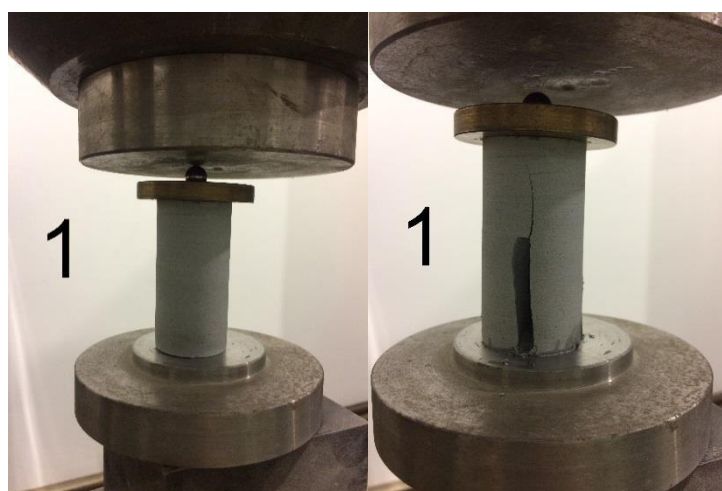


Obr. č. 65 - Skutečné uložení vzorků pro stanovení pevnosti po 28 dnech

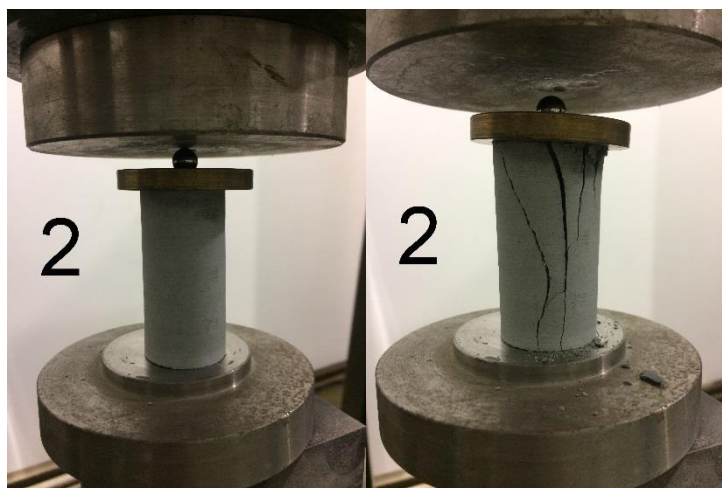
Tabulka 8: Naměřené a vypočtené parametry vzorků z lavoru zkoušených po 28 dnech

Číslo vzorku	Průměr			Výška			Plocha průřezu	Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost nasycen.
	[mm]			[mm]			[mm ²]	[m ³]	[g]	[kg/m ³]
1	31,8	31,8	31,8	64,1	64,2	64,2	794,2	0,0000509	83,32	1635,3
2	31,8	31,8	31,8	64,4	64,4	64,4	794,2	0,0000511	83,57	1633,9
3	31,7	31,6	31,7	63,8	63,9	63,9	786,8	0,0000502	82,38	1639,9

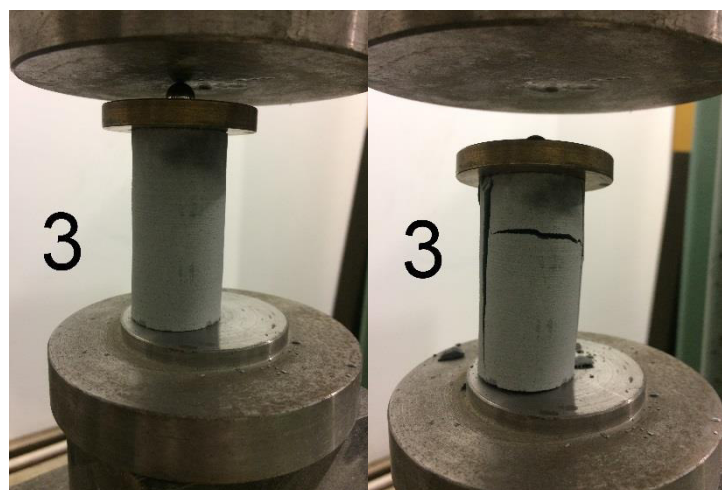
Číslo vzorku	Síla při porušení	Pevnost v tlaku	Hmotnost části vzorku	Hmotnost vysušené části vzorku	Objemová hmotnost vysušen.	Stupeň nasycení	Pórovitost
[-]	kN	MPa	[g]	[g]	[kg/m ³]	[-]	[%]
1	11,220	14,127	82,50	52,64	1043,4	0,91	65,22
2	9,200	11,584	82,99	52,97	1042,9	0,91	65,24
3	9,890	12,571	79,70	50,82	1045,7	0,91	65,14



Obr. č. 66 - Vzorek č. 1 po 28 dnech



Obr. č. 67 - Vzorek č. 2 po 28 dnech

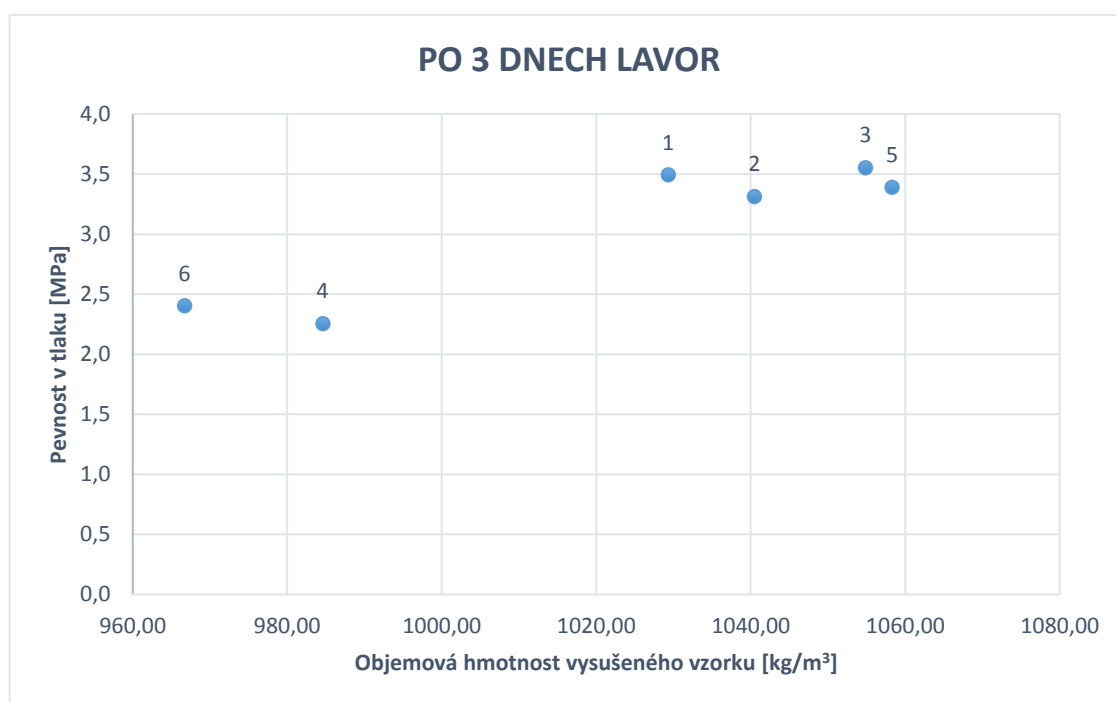


Obr. č. 68 - Vzorek č. 3 po 28 dnech

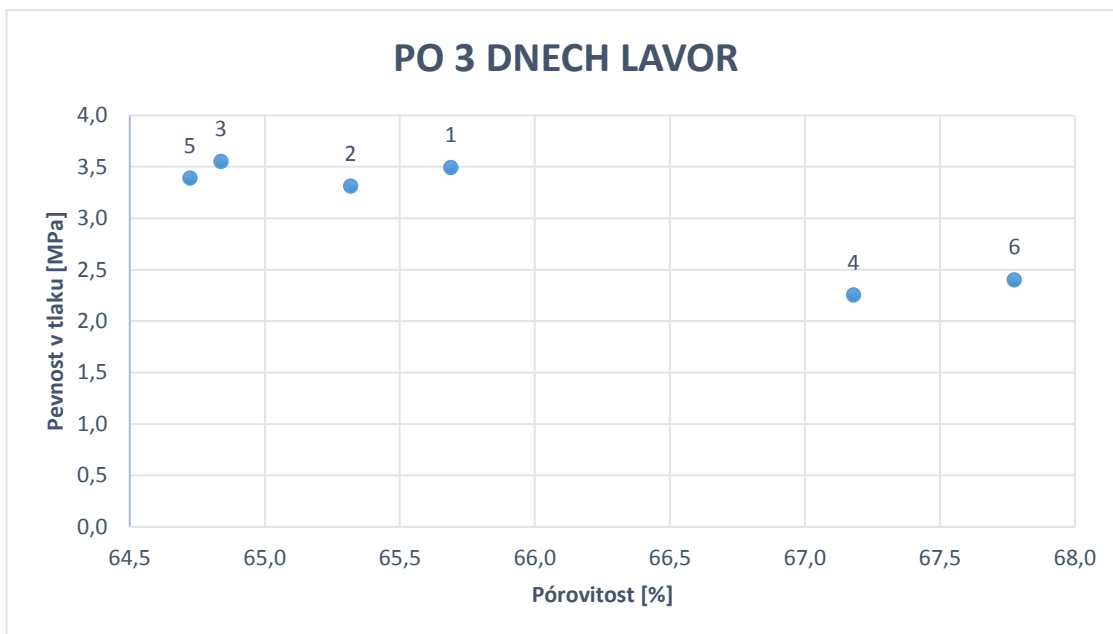
5 VÝSLEDKY A ZHODNOCENÍ

Celkem bylo odvráceno a podrobena zkoušce pevnosti v prostém tlaku 39 vzorků. Dále byla měřena objemová hmotnost, dekantace a viskozita čerstvé suspenze s vodním součinitelem 1,0.

Bylo prokázáno, že rozdíl v pevnosti je znatelný i na tak malé výšce jako je 9 cm (výška zatvrdlé směsi v latoru). Když byly zkoušeny vzorky o výšce přibližně 62 mm, které byly z úrovně horních 9 cm zatvrdlé suspenze, vykazovaly jednoznačně nižší pevnost než vzorky, které byly z dolních 9 cm. Po 3 dnech zrání směsi činil tento rozdíl v pevnosti přibližně 1 MPa (viz obr. č. 69) a po 7 dnech více než 3 MPa (viz obr. č. 71). Pevnost v tlaku koreluje s objemovou hmotností a pórovitostí vzorků.

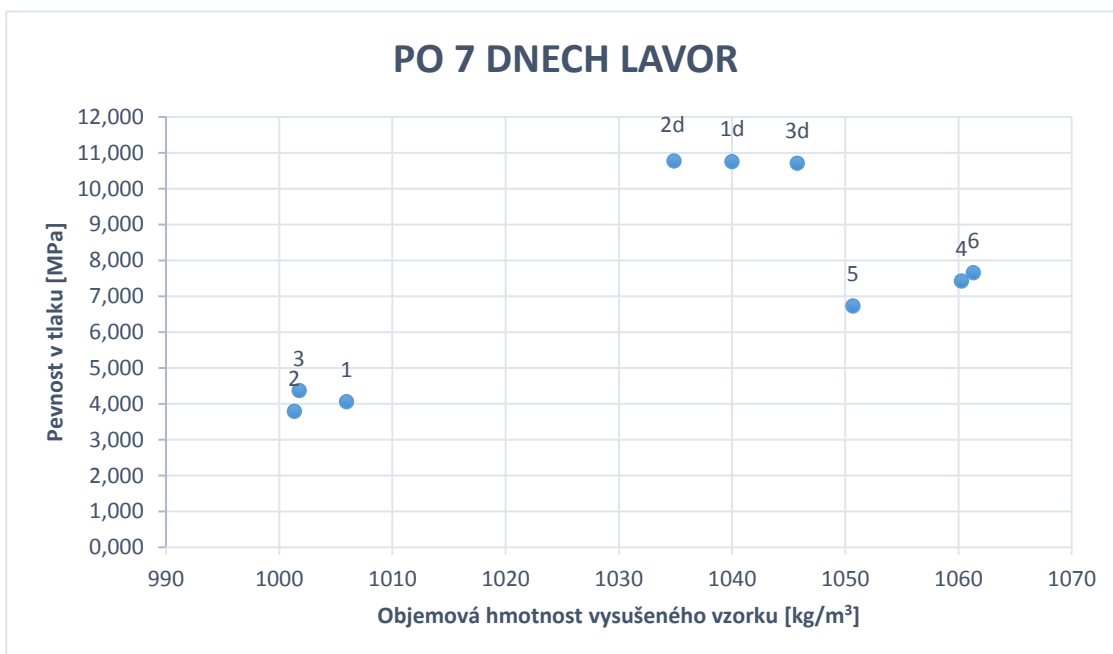


Obr. č. 69 - Graf zobrazující závislost pevnosti v tlaku vzorků v latoru (1, 2, 3, 5 - z dolní úrovně; 4, 6 - z horní úrovně) po 3 dnech zrání na objemové hmotnosti vysušených vzorků



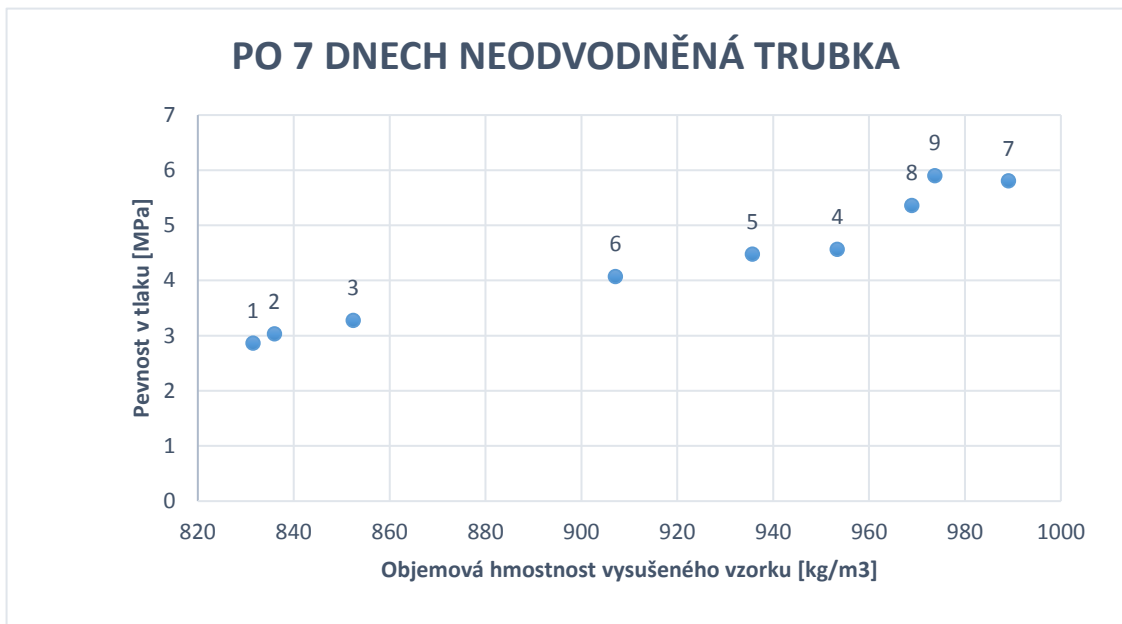
Obr. č. 70 - Graf zobrazující závislost pevnosti v tlaku vzorků v lavoru (1, 2, 3, 5 - z dolní úrovně; 4, 6 – z horní úrovně) po 3 dnech zrání na pórovitosti vzorků

Vzorky 1d, 2d a 3d byly uloženy a připraveny stejným způsobem jako vzorky 4, 5, 6 s tím rozdílem, že byly před zkouškou vysušeny. Vykazují přibližně o 3,5 MPa vyšší pevnost. Při porovnání je nutné zvážit vliv jednoho dne rozdílu zkoušení, neboť (již bylo popsáno dříve) vzorky byly po uplynutí 7 dní vloženy na 24 hodin do pece a zkoušeny až den osmý. Uložení vzorků 1, 2 a 3 bylo u povrchu náplně lavoru.

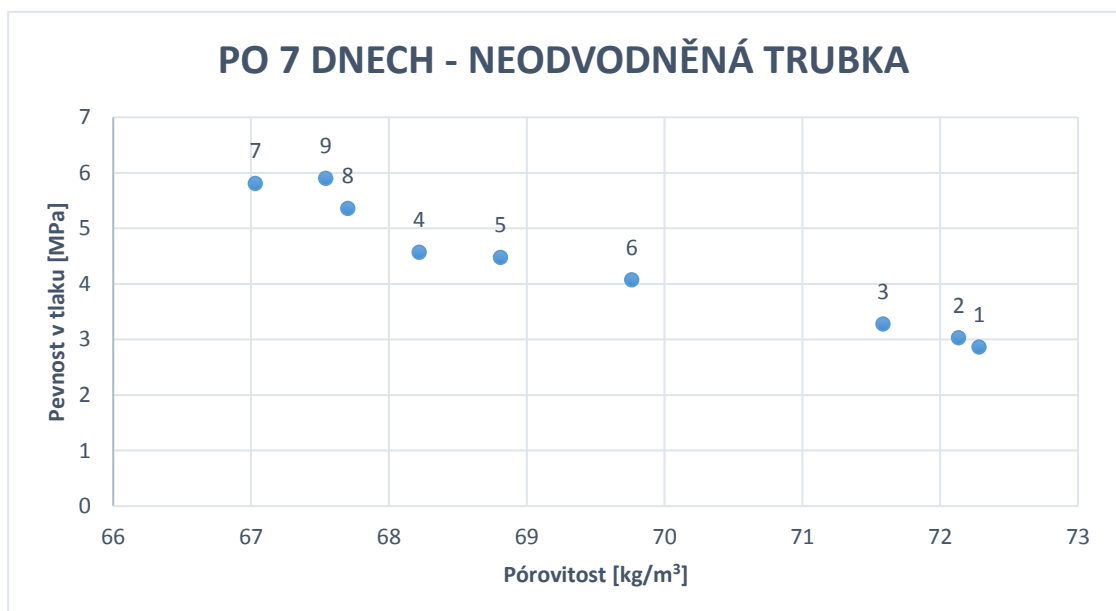


Obr. č. 71 - Graf zobrazující závislost pevnosti v tlaku vzorků v lavoru (1, 2, 3 - z horní úrovně; 4, 5, 6 – z dolní úrovně; 1d, 2d, 3d – z dolní úrovně a vysušeny před zkouškou) po 7 dnech zrání na objemové hmotnosti vysušených vzorků

V případě neodvodněné trubky s výškou zatvrdlé suspenze přibližně 1 m byl rozdíl v pevnostech (po 7 dnech zrání) vzorků z horní úrovně proti vzorkům ze spodní úrovně téměř 3 Mpa.

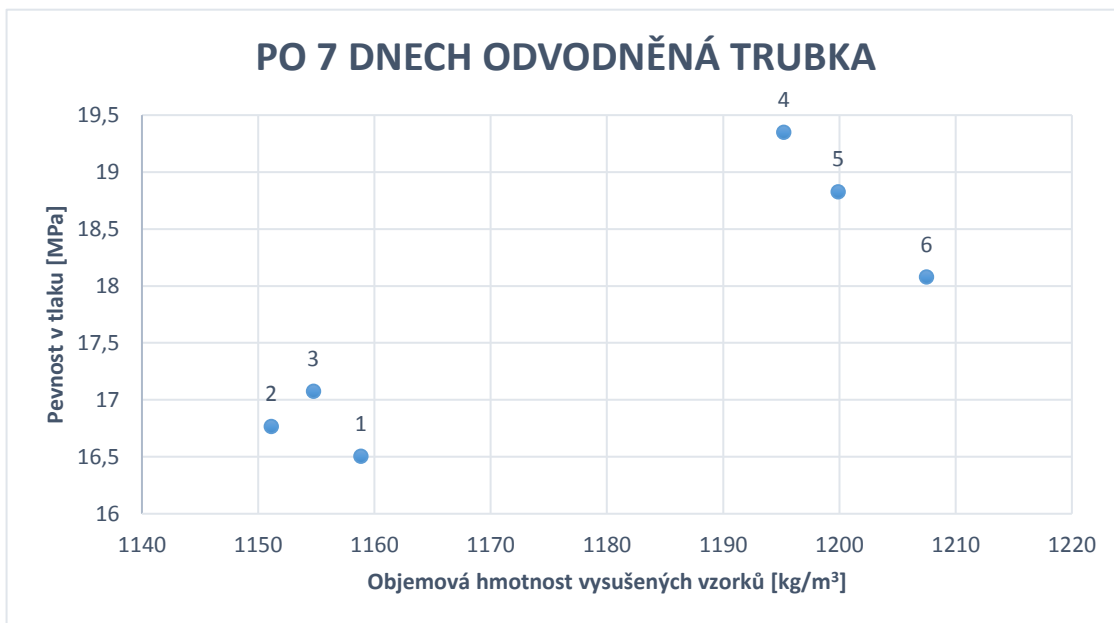


Obr. č. 72 - Graf zobrazující závislost pevnosti v tlaku vzorků v neodvodněné trubce (1, 2, 3 – z horní úrovně; 4, 5, 6 – ze středu; 7, 8, 9– z dolní úrovně) po 7 dnech zrání na objemové hmotnosti vysušených vzorků

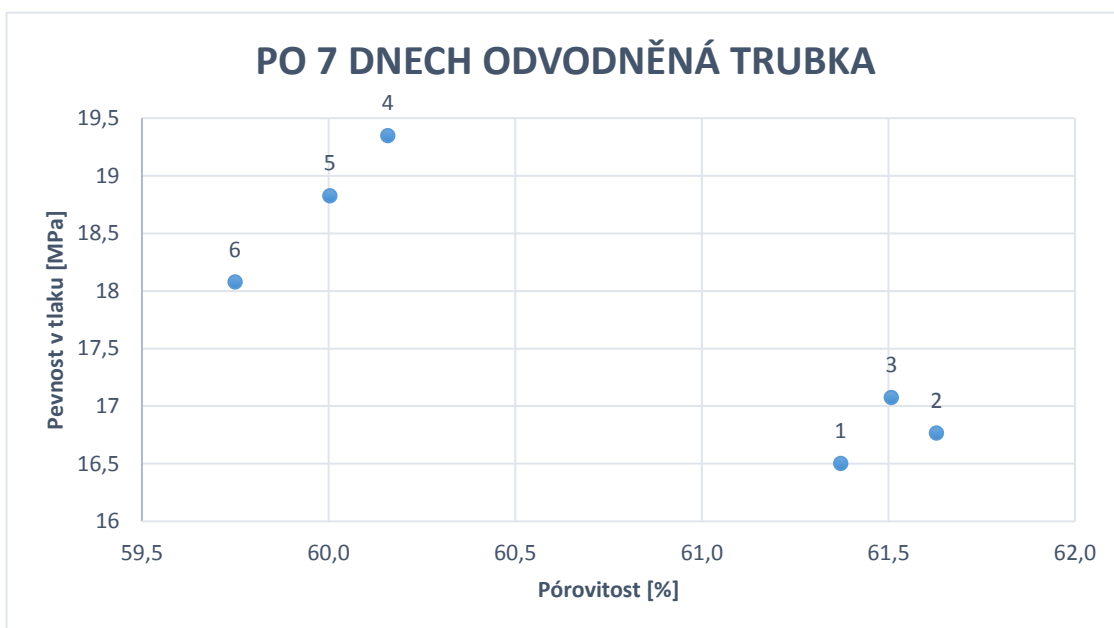


Obr. č. 73 - Graf zobrazující závislost pevnosti v tlaku vzorků v neodvodněné trubce (1, 2, 3 - z horní úrovně; 4, 5, 6 – ze středu; 7, 8, 9– z dolní úrovně) po 7 dnech zrání na pórovitosti vzorků

Možnost odvodu vody ze směsi vede k výraznému nárůstu pevnosti v tlaku. Účinek drénování je podobný jako snížení vodního součinitele směsi. V zásadě také vlivem odtoku vody došlo i ke konsolidaci pevné fáze, což také vede k nárůstu pevnosti. Opět se projevila změna v objemové hmotnosti a pevnosti s narůstající hloubkou.

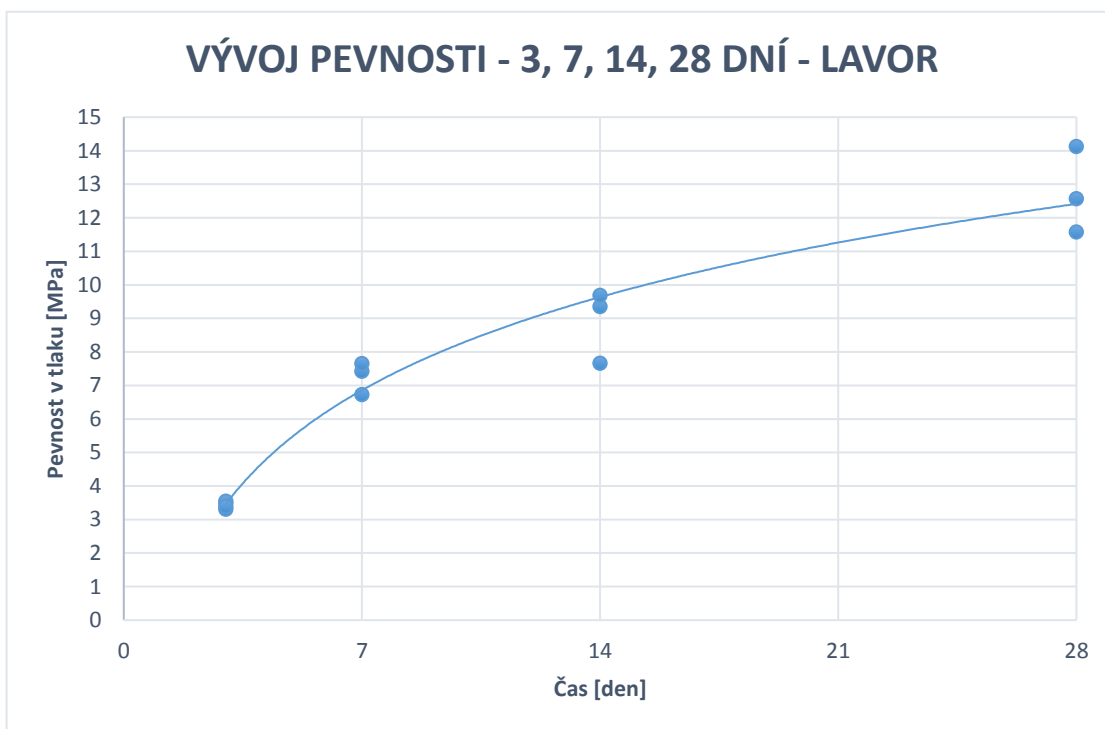


Obr. č. 74 - Graf zobrazující závislost pevnosti v tlaku vzorků v odvodněné trubce (1, 2, 3 - z horní úrovně; 4, 5, 6 – z dolní úrovně) po 7 dnech zrání na objemové hmotnosti vysušených vzorků

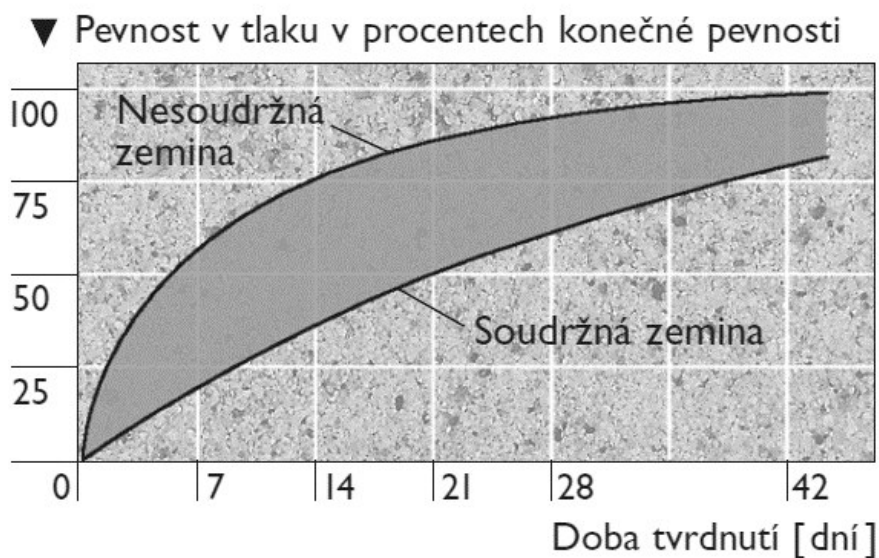


Obr. č. 75 - Graf zobrazující závislost pevnosti v tlaku vzorků v neodvodněné trubce (1, 2, 3 - z horní úrovně; 4, 5, 6 – z dolní úrovně) po 7 dnech zrání na pórovitosti vzorků

Časový vývoj pevnosti v tlaku stejně uložených vzorků v latoru je zobrazen na obr. č. 76. Průběh lze přirovnat ke grafu na obr. č. 12 - Nárůst pevnosti tělesa tryskové injektáže v soudrzných a nesoudrzných zeminách (viz níže), kde pro soudrzné zeminy platí pomalejší nárůst pevnosti. V případě laboratorních zkoušek byla směs uložena v latoru s neodvodněnými podmínkami. Průběh se spíše podobá nárůstů pevnosti soudrzných zemin, kde je voda držena v pórech zeminy a nedochází k jejímu výraznějšímu odvodu.



Obr. č. 76 - Graf zobrazující vývoj pevnosti v tlaku stejně uložených vzorků v latoru (u dna) měřené po 3, 7, 14 a 28 dnech



Obr. č. 12 - Nárůst pevnosti tělesa tryskové injektáže v soudrzných a nesoudrzných zeminách. Převzato z [10]

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověřit, jakým způsobem je ovlivněna pevnost v tlaku cementové injekční suspenze v závislosti na sedimentaci cementového pojiva. Předpoklady se podařilo ověřit. Bylo ukázáno, že v důsledku sedimentace pojiva ve směsi dochází ke značnému nárůstu pevnosti v tlaku a objemové hmotnosti v závislosti na zvětšující se hloubce. Dokládá to i průběh pórovitosti, která naopak s hloubkou klesá. Z výsledků měření lze usuzovat, že i v rámci jednoho vzorku je vykazována silná nehomogenita, která zapříčiňuje rozdílné vlastnosti po výšce vzorku. Systematická snaha byla umísťovat vzorky při zkoušce pevnosti v tlaku horní podstavou nahoru. Je pravděpodobné, že i to je důvod, proč se většina vzorků porušila tak, že došlo k vytvoření kuželovitého klínu na horní podstavě, který svým zatlačením vytvořil podélnou trhlinu (trhliny).

Dále se projevilo, že voda ve vzorku významně ovlivňuje jeho pevnost. Při stejných podmínkách uložení a stejném stáří vykazuje vysušený vzorek jednoznačně vyšší pevnost než vzorek zkoušený v přirozeně vlhkém stavu. Voda uložená v pórech působí pórovým tlakem na zrna cementového pojiva a vnáší tak do prvku přídatná smyková napětí. V případě možnosti odvodu vody z čerstvé směsi dochází k evidentnímu nárůstu objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku výrazným způsobem. Únik vody má podobný účinek jako snižování vodního součinitele. K odvodu vody z uložené čerstvé směsi dochází i u neodvodněných podmínek a to dekantací, která u testované suspenze s vodním součinitelem 1,0 byla po 3 hodinách přibližně 18 %.

Důvodem experimentů bylo možné využití poznatků a výsledků měření při navrhování reálných těles tryskové injektáže, kde je receptura injekční směsi obdobná té, která byla v této práci testována. Teorie k tématu cementových suspenzí a technologie tryskové injektáže byla zpracována v prvních dvou kapitolách. Původním záměrem bylo provést totožné zkoušky také na odebrané směsi z vytryskaného sloupu tryskové injektáže, tedy na směsi cementové injekční suspenze a zeminy. Tyto zkoušky nakonec nebyly provedeny z několika důvodů, které jsou popsány v kapitole 4.2.

Testovaných vzorků nebylo takové množství, aby mohly být nějakým způsobem statisticky zpracovány. Nicméně tato práce by mohla být námětem pro další podrobnější výzkumy. Pro mě osobně byla diplomová práce velmi obohacující, a to i přes některé komplikace, které se v průběhu objevovaly, jako například omezené podmínky ve školní laboratoři geotechniky (ke konci roku zde probíhaly instalace školou nově zakoupených přístrojů) nebo problém sehnat vhodné zařízení k realizaci jádrového vrtání.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] ČSN EN 12716 *Provádění speciálních geotechnických prací - Trysková injektáž*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 36 s. [cit. 11-2018]
- [2] CROCE, Paolo, ALESSANDRO, Flora, GIUSEPPE, Madoni *Jet Grouting – Technology, Design and Control*. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2014. [cit. 12-2018] ISBN 978-1-4822-4718-3 (eBook – PDF).
- [3] KIRSCH, Klaus, BELL, Alan *Ground Improvement – Third Edition*. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2013. [cit. 12-2018] ISBN 978-0-203-83897-6 (eBook – PDF).
- [4] Trysková injektáž. In: *SOLETANCHE* [online]. SOLETANCHE Česká republika, s.r.o. [cit. 12-2018]
Dostupné z: <http://www.soletanche.cz/technologie_tryskova_injektaz/>
- [5] ČSN EN 12715 *Provádění speciálních geotechnických prací - Injektáže*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 52 s. [cit. 11-2018]
- [6] Měřicí přístroje pro vrtný výplach. *GETRA* [online]. GE-TRA s.r.o., 2009-2018. [cit. 12-2018] Dostupné z: <<https://www.ge-tra.cz/katalog/tesnici-vyplachove-latky/merici-pristroje-pro-vrtny-vyplach>>
- [7] Viskozimetr Marsh. *Strojeprozkusebnictvi* [online]. LABTECH s.r.o., 2011. [cit. 12-2018] Dostupné z: <<https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/viskozimetr-marsh.html#zalozka-1>>
- [8] KUTZNER, Christian *Grouting of Rock and Soil*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1996. [cit. 12-2018] ISBN 90 5410 634 4.
- [9] Thermocem – *Aplikační brožura* [online]. [cit. 12-2018]
Dostupné z
<https://www.heidelbergcement.de/de/system/files_force/assets/document/0b/c4/rz_1802_thermocem_bro_24s_a4_2016_uk_web.pdf>
- [10] Keller. *Prospekt 67-03 CZ. Trysková injektáž Soilcrete*. KELLER – Speciální zakládání, spol. s.r.o. [cit. 12-2018]
- [11] DIN 4093 *Bemessung von verfestigten Bodenkörpern – Hergestellt mit Düsenstrahl, Deep-Mixing oder Injektions Verfahren*. Berlín: Německý normalizační institut, 2015-11. 19 s. [cit. 12-2018]
- [12] ČSN EN 14117 *Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí – Zkušební metody – Stanovení viskozity cementových injektážních výrobků*. Praha: Český normalizační institut, 2005. 7 s. [cit. 12-2018]
- [13] Barták, Jiří *Stavební jámy 2*. Studijní materiál [prezentace PPT]. Fakulta stavební ČVUT v Praze, katedra geotechniky, 2013. 109 s. [cit. 12-2018]
- [14] Kellergrundbau. *Acoustic Column Inspector*. Prospekt. Keller Grundbau Ges.mbH. [cit. 12-2018]

- [15] ČSN EN 196-1 *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. 32 s. [cit. 12-2018]
- [16] Kompositcemente. *SPENNER ZEMENTWERK BERLIN* [online]. Spenner Zementwerk Berlin GmbH and Co.KG, 2019. [cit. 12-2018]
Dostupné z: <<https://spenner-zementwerk.de/produkte/zement/341-2/>>
- [17] Cement–normalizované označení. *EBETON* [online]. Svaz výrobců Betonu. [cit. 12-2018]
Dostupné z: <<https://www.ebeton.cz/pojmy/cement-normalizovane-oznaceni>>