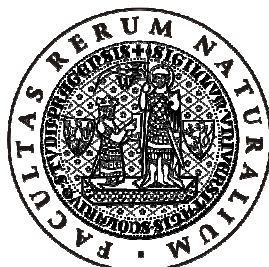


**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta**  
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



## **Zlepšování základových půd metodou vibroflotace**

Diplomová práce

**Lenka Janáčková**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Mühl  
Praha, listopad 2010



Tuto diplomovou práci jsem vypracovala na Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky pod vedením Ing. Jiřího Mühla. Prohlašuji, že jsem ji vypracovala samostatně a převzaté prameny jsem řádně citovala. Souhlasím s jejím zapůjčením ke studijním účelům.

Především děkuji svému školiteli Ing. Jiřímu Mühlovi za nesmírnou trpělivost a odborný dohled nejen při mnoha hodinách konzultací, které pro mne vždy byly cennou inspirací nepolevit a jít dál. Zároveň mu děkuji za podporu a téměř rodičovský přístup. Dále děkuji Ing. Juliu Mojžíšovi za nezištnou ochotu věnovat se mi na stavbách a za poskytnutí cenných dat společností KELLER, díky kterým jsem mohla zpracovat zadané téma. Poděkování patří také společnosti Zakládání staveb, a.s. za poskytnutí databáze penetrací.

V neposlední řadě děkuji mým rodičům a přátelům za psychickou podporu a motivaci dotáhnout vše do zdárného konce.

### **Abstrakt**

Předkládaná práce se zabývá problematikou hloubkového zlepšování zemin a jeho použití v České republice . V úvodu jsou stručně shrnuty používané metody zlepšování základových půd a jejich nasazení v našich podmínkách. V dalších kapitolách se již práce věnuje pouze hloubkovému zlepšování zemin, a to jak samotné vibroflotaci, tak i aplikaci štěrkových pilířů. Nejdříve jsou metody popsány technicky dle standardů a mnoholetých zkušeností s prováděním ve světě. Cílem práce bylo posoudit faktory, které mohou ovlivnit použití u nás. Mezi tyto faktory patří geologická stavba České republiky, zkoušky použitelnosti a způsoby ověřování kvality provedení hloubkového zlepšení a použitelnost v zastavěném území. V práci nechybí reporty ze staveb a jako závěr překládám mapy použitelnosti dle jednotlivých vstupních podmínek.

### **Abstract**

Presented master thesis deals with the issues of deep compaction of soils and its application in the Czech Republic. In the introduction part are briefly resumed current methods of improving foundation soils and their application in our conditions. In following chapters the thesis address only to improving foundation soils, both the very vibroflotation, and application of gravel columns. First, the methods are technically described according standards and many years of experience with the implementation worldwide. The aim of this work was to assess the factors which may affect the application in our conditions. These factors include the geological structure of the Czech Republic, applicability tests, methods to verify the quality of the deep improvement construction and the application in the urban areas. The work contains also reports from various construction areas. The maps of applicability? according to individual input conditions are presented in the conclusion part.

# OBSAH

<b>CÍL PRÁCE .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>1. ÚVOD KE ZLEPŠOVÁNÍ ZÁKLADOVÝCH PŮD .....</b>	<b>- 10 -</b>
1.1. Základová půda .....	- 10 -
1.2. Zlepšování základové půdy .....	- 11 -
1.2.1. Povrchové metody zlepšování: .....	- 11 -
A) VÝMĚNA PŮVODNÍ ZEMINY ZA VHODNĚJŠÍ ZEMINU .....	- 11 -
B) MECHANICKÁ ZMĚNA STAVU ZEMINY .....	- 12 -
C) CHEMICKÁ STABILIZACE .....	- 14 -
D) TERMICKÁ STABILIZACE.....	- 15 -
E) VYZTUŽOVÁNÍ.....	- 15 -
1.2.2. Hlubkové metody zlepšování základových půd .....	- 16 -
A) INJEKTÁŽ .....	- 16 -
B) TRYSKOVÁ INJEKTÁŽ .....	- 17 -
C) ZMRAZOVÁNÍ.....	- 19 -
D) FRANKI PILOTY.....	- 19 -
E) DEEP SOIL MIXING – DMS .....	- 20 -
F) GEODRÉNY – PREFABRIKOVANÉ VERTIKÁLNÍ DRÉNY .....	- 21 -
<b>2. HLOUBKOVÉ ZHUTŇOVÁNÍ ZÁKLADOVÉ PŮDY .....</b>	<b>- 22 -</b>
2.1. Historie vibroflotace.....	- 22 -
2.2. Pracovní postup .....	- 22 -
2.3. Hlubkový vibrátor .....	- 22 -
2.4. Poznatky z praxe.....	- 23 -
2.5. Účinky vibrační jehly.....	- 24 -
2.6. Hlubkový dosah.....	- 24 -
2.7. Hlubkové vibrační zhutňování - vibroflotace .....	- 25 -
2.8. Plnicí materiál a rastr.....	- 26 -
<b>3. LIMITY POUŽITELNOSTI TECHNOLOGIE .....</b>	<b>- 27 -</b>
3.1. 4 základní faktory.....	- 27 -
3.1.1. Křivka zrnitost a propustnost .....	- 27 -
3.1.2. Profil.....	- 28 -
3.1.3. Hlubkový dosah .....	- 28 -
3.1.4. Vzdálenost od okolních objektů .....	- 29 -
3.2. Případová studie geofyzikální měření dynamických účinků vibrátoru ...	- 29 -
3.2.1. Výpočet.....	- 31 -
3.2.2. Vyhodnocení .....	- 32 -
3.2.3. Závěr.....	- 35 -
<b>4. PRŮZKUM.....</b>	<b>- 36 -</b>
4.1. Stanovení relativní ulehlosti.....	- 37 -
4.1.1. Laboratorní stanovení relativní ulehlosti.....	- 37 -
4.1.2. Stanovení relativní ulehlosti in situ .....	- 38 -
4.1.2.1. Statická penetrační zkouška .....	- 38 -
4.1.2.2. Dynamická penetrační zkouška.....	- 39 -
4.2. Stanovení zhutnitelnosti.....	- 41 -
4.3. Teorie vibračního zhutňování .....	- 41 -
4.3.1. Zhutňování hrubozrnné zeminy .....	- 41 -
4.3.2. Zhutňování jemnozrnné zeminy.....	- 42 -
<b>5. ŠTĚRKOVÉ PILÍŘE.....</b>	<b>- 43 -</b>

5.1.	<i>Materiál pro vibrované štěrkové pilíře .....</i>	- 44 -
5.2.	<i>Postup s horním plněním bez vodního výplachu.....</i>	- 45 -
5.3.	<i>Postup s horním plněním s vodním výplachem .....</i>	- 46 -
5.4.	<i>Postup s dolním plněním bez vodního výplachu .....</i>	- 46 -
5.5.	<i>Další varianty hloubkového vibračního zhutňování .....</i>	- 47 -
<b>6.</b>	<b>KONTROLA PROVÁDĚNÍ HLOUBKOVÉHO VIBRAČNÍHO ZHUTŇOVÁNÍ - 49 -</b>	
6.1.	<i>Zkoušení kvality provedení .....</i>	- 50 -
<b>7.</b>	<b>POUŽITÍ HLOUBKOVÉHO ZLEPŠOVÁNÍ VE VÝSYPKÁCH ZÁKLADOVÝCH PŮD .....</b>	<b>- 53 -</b>
7.1.	<i>Výsypka jako základová půda .....</i>	- 53 -
7.2.	<i>Zkoušky štěrkových pilířů Všebořice u Ústí nad Labem .....</i>	- 53 -
7.2.1.	<i>Závěr:.....</i>	- 56 -
<b>8.</b>	<b>REPORTY Z PRAKTICKÝCH ČÁSTÍ NA STAVBÁCH .....</b>	<b>- 57 -</b>
8.1.	<i>Rychlostní komunikace R55 - stavba 5503 Skalka - Hulín .....</i>	- 57 -
8.2.	<i>Letní koupaliště v Hradci Králové.....</i>	- 62 -
8.3.	<i>Závěr.....</i>	- 70 -
<b>9.</b>	<b>METODIKA SESTAVENÍ SCHÉMATICKÝCH MAP PRO POUŽITÍ HLOUBKOVÉHO ZHUTŇOVÁNÍ ZEMIN .....</b>	<b>- 71 -</b>
A)	<i>OBLAST PALEOGENNÍCH A NEOGENNÍCH SEDIMENTŮ.....</i>	- 71 -
B)	<i>OBLAST KŘÍDOVÝCH SEDIMENTŮ S PODÍLEM KLASTIK .....</i>	- 72 -
C)	<i>OBLASTI PÍŠČITĚ ZVĚTRÁVAJÍCÍCH GRANITOIDŮ .....</i>	- 72 -
D)	<i>OBLASTI FLUVIÁLNÍCH ULOŽENIN PODÉL VĚTŠÍCH ŘÍČNÍCH TOKŮ .....</i>	- 73 -
E)	<i>OBLASTI HALD A VÝSYPEK PO TĚŽBĚ UHLÍ, EVENT. KAOLÍNU.....</i>	- 73 -
<b>10.</b>	<b>SHRNUTÍ.....</b>	<b>- 75 -</b>
<b>11.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>- 77 -</b>

### **Seznam příloh:**

**Příloha 1:** Mapa lokalit z databáze penetrací České republiky od společnosti Zakládání staveb, a. s.

**Příloha 2:** Mapa A - Schématická situace oblastí paleogenních a neogenních sedimentů vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin (scan)

**Příloha 3:** Mapa B - Schématická situace oblastí křídových sedimentů s podílem klastik vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin (scan)

**Příloha 4:** Mapa C - Schématická situace oblastí písčité zvětrávajících granitoidů vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin (scan)

**Příloha 5:** Mapa D - Schématická situace oblastí fluviálních klastik podél větších říčních toků vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin (scan)

**Příloha 6:** Mapa E - Schématická situace hald a výsypek po těžbě hnědého uhlí evnt. kaolínu vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin (scan)

**Příloha 7:** Schématická situace geologických formací vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin

**Příloha 8:** Mapa A - Schématická situace oblastí paleogenních a neogenních sedimentů vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin

**Příloha 9:** Mapa B - Schématická situace oblastí křídových sedimentů s podílem klastik vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin

**Příloha 10:** Mapa C - Schématická situace oblastí písčité zvětrávajících granitoidů vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin

**Příloha 11:** Mapa E - Schématická situace hald a výsypek po těžbě hnědého uhlí evnt. kaolínu vhodných pro použití metod hloubkového zhutňování zemin



## **Cíl práce**

Cílem práce je zhodnotit metody hloubkového zhutňování zemin, jedné z progresivních metod zlepšování základových půd, jako metody aplikovatelné v geologických podmínkách České republiky, vymežit její funkčnost a přiblížit její dosavadní použití v různých geologických a hydrogeologických podmínkách. Abych rozšířila možnosti použití hloubkového zhutňování zemin, pojednává moje práce také o využití této metody pro tvorbu štěrkových pilířů.

# 1. Úvod ke zlepšování základových půd

Od počátku lidstva člověk buduje obydlí, veřejné objekty, technické stavby a cesty. Díky nepřetržitě rostoucí výstavbě spojené s rostoucí populací a její vyspělostí se v 21. století setkáváme s problémem, kde stavět.

Výstavba na „zelené louce“ je již vzácností, jsme proto nuceni stavět ve složitějších ba dokonce nevyhovujících základových podmínkách, ať se již jedná o nekvalitní nestejnorodou půdu, navážky, výsyvky či dokonce budování umělých ostrovů.

Díky novým technologiím se navrhuje stále složitější projekty, které vyžadují nový pohled nejen na problematiku konstrukcí, ale také na způsob zakládání staveb.

Klasické metody zakládání staveb nabízejí spolehlivý způsob založení díla, bývají však technicky náročné, používají se drahé a málo vhodné technologie a materiály.

Je nutné si uvědomit, že přidávání umělých materiálů do základové půdy není z environmentálního hlediska vhodné. Vždy je lepší zamyslet se, zda nelze docílit kvality základové půdy jinou metodou, ať už se jedná o hutnění, nebo způsob v kombinaci se změnou zrnitostní křivky.

Rostoucí konkurence také nutí dodavatele k ekonomičtějším řešením splňujícím požadavky na kvalitu i bezpečnost.

## 1.1. Základová půda

Základová půda, součást každého stavebního díla, je část zemského povrchu, do níž jsou stavbou přenášeny vyvozené účinky vnějších sil. Na základovou půdu působí kromě účinků zatížení vlastní stavbou i jiné vlivy, např. změna vlhkosti, kolísání hladiny podzemní vody, tepelné změny, dynamické účinky.

Geologické a hydrogeologické poměry staveniště mají zásadní vliv na způsob založení dané stavby. Při nevyhovujících zakládajících podmínkách je nutné navrhnout opatření k jejich zlepšení – ke zlepšování základové půdy. Pro výstavbu nových objektů je potřeba, resp. nutnost využití z geotechnického hlediska podmínečně vhodných i nevhodných stavenišť, jako jsou bažiny, pozemky s kolísající hladinou podzemní vody, výsyvky, neřízené skládky apod. Zakládání zde bylo řešeno pouze pomocí hlubinného zakládání na pilotách. Současně je základním aspektem hloubkového zlepšování zemin využití stávajících zemin, aniž by byly podstatným způsobem odstraňovány. Existuje mnoho aplikací vedoucích k jejich zlepšení.

## 1.2. Zlepšování základové půdy

Zlepšováním základové půdy změním vlastnosti základové půdy, díky kterým se stane vhodnou podložní vrstvou stavby, která spolupůsobí se stavbou – zvýšení pevnosti, zmenšení deformací, snížení propustnosti apod. Zlepšujeme zeminy, jelikož u hornin není zlepšování obvykle zapotřebí, kromě snižování propustnosti injektáží.

Zlepšování základové půdy lze rozdělit dle dosahu zhutnění na:

- mělké, povrchové, podpovrchové
- hloubkové

### 1.2.1. Povrchové metody zlepšování:

- a) výměna původní zeminy za vhodnější zeminu
- b) mechanická změnou stavu zeminy
- c) chemická stabilizace
- d) termické metody
- e) vyztužování

#### a) Výměna původní zeminy za vhodnější zeminu

Jestliže se pod plošným základem nachází neúnosná zemina (stlačitelná s nevhodnými deformačními vlastnostmi), odstraní se a nahradí vrstvou únosné zeminy.

Dle rozsahu prací rozlišujeme způsoby provádění:

- plomba – výměna neúnosné zeminy v omezené části půdorysu základu
- polštář – náhrada zeminy pod celým základem (roznášecí, vyrovnávací)
- ponechání neúnosné zeminy a překrytí kvalitní zeminou
- podsyp – tenčí vrstva štěrku pod základem – ochrana proti klimatu

U roznášejících polštářů se nahrazuje nevhodná zemina pod celým plošným základem, aby se zajistilo snížení velikosti sedání. Polštáře se budují pod základovými pasy a patkami. Tloušťku polštáře volíme tak, aby napětí na styku polštáře a původní zeminy nepřekročilo výpočtovou únosnost. Tloušťka polštáře by měla být rovna 1/3 šířky základu.

Vyrovnávací polštáře se používají k docílení rovnoměrného sedání u rozsáhlých stavebních děl. Část stavby se nachází na nestlačitelné vrstvě a část na stlačitelné.

Nestlačitelná vrstva (hornina) se odstraní a vzniklá deprese se vyplní hlinitým pískem.

Výhoda těchto metod spočívá v rychlosti provedení, kompletní mechanizaci, v práci s přírodním materiálem, a pokud není propojeno více metod, nepřidávají se žádné chemické přísady. Metoda je účinná, avšak vhodná pro mělčí výměny nad hladinou podzemní vody. Ekonomicky smysluplná je tloušťka polštáře do 1,5 – 2 m. U nutnosti větších tloušťek je vhodné upravit základovou půdu jinými metodami. Nově upravená základová půda zajistí rovnoměrné sedání budoucí stavby. Výměny pod hladinou podzemní vody značně ztěžují práce a kvalitu provedení. Je nutné zajistit odvodnění.

Limitní je umístění deponie i zemníku s vhodnou zeminou. Dopravování zeminy může značně celou výměnu prodražit.

## **b) Mechanická změna stavu zeminy**

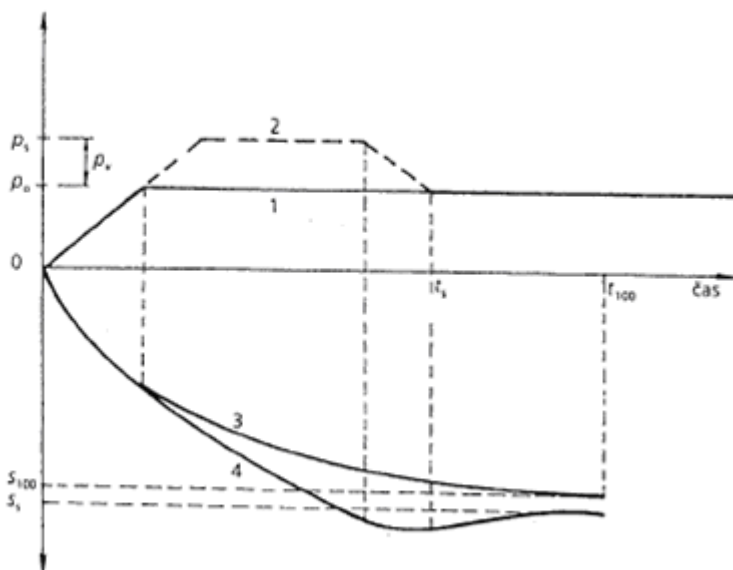
### Snížení hladiny podzemní vody

Nejjednodušším způsobem je gravitační odvodnění. To umožní již zakládat objekty v suchu a může sloužit i pro odvod agresivní vody.

Metodu je vhodné používat pro dočasné odvodnění staveniště spíše než jako trvalé řešení zlepšení základové půdy. Trvalé odvodnění přináší rizika – změna hydrologického režimu okolí (nevratné snížení hladiny podzemní vody v okolí), v případě stavebních objektů vzniká změnou depresní křivky přetížení v základové spáře, čímž hrozí sedání objektů. Během čerpání dochází k vyplavování jemných částic, sufozi.

### Předtížení

Předtížení násypem, jedna z nejstarších metod zhutňování, je možné v dnešní době uplatnit při budování dálnic např. ve výsypkách. Výhodou této metody je rovnoměrné sednutí násypu. Nevýhodou je velké množství zemních prací a dlouhá doba konsolidace. Křivka č. 4 (Obrázek 1) ukazuje urychlení konsolidace a z obrázku je patrné, že po odstranění násypu již nedojde k dalšímu sedání, jelikož sednutí s nadnásypem je větší, než by bylo bez něj.



**Obrázek 1:** Sedání násypu v čase; 1 - násyp, 2 - nadnásyp, 3 - sedání násypu, 4 - sedání násypu s nadnásypem (Masopust)

### Zhutňování

Zhutňováním se upravuje zemina buď přirozeně uložená, nebo ze sypaných materiálů. Největší uplatnění nalézá tato metoda v silničním, železničním a vodohospodářském stavitelství, kde se zhutňují velké plochy. V pozemním stavitelství se takto upravují základové spáry u plošných základů, podlahy u průmyslových hal. Hutněním se zvyšuje smyková pevnost a deformační modul zeminy a snižuje se její propustnost.

Pro soudržné zeminy se využívají statické válce, hutní se pouze pojezdy, kdežto u nesoudržných zemin je statický účinek doplněn o vibraci. Hmotnost válců se standardně pohybuje od 2 – 12 t, u pneumatikových až do 50 t.

Nástroje pro hutnění pojezdy:

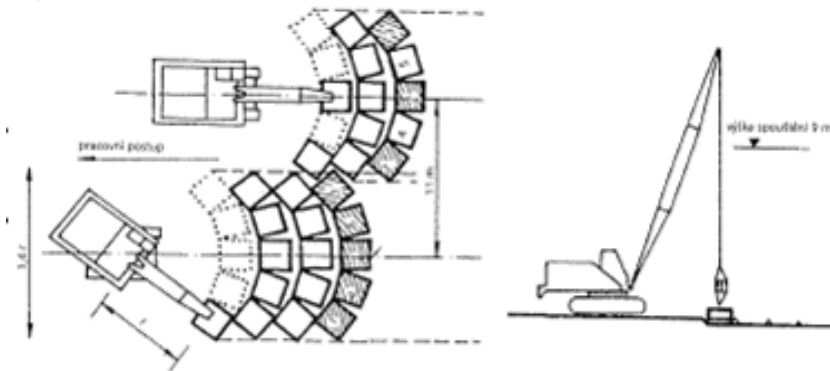
- statické válce
- vibrační válce
- hnětače
- pneumatikové válce
- ježkové
- kombinované stroje

Výhodou hutnění zemin pojezdy je nízká cena a kompletní mechanizace stroji, které jsou buď vlečeny, nebo samy mají pohon. V blízkosti budov může být nebezpečné zhutňování provádět a je nutné použít menší, méně účinné ruční prostředky (žáby).

Dohutňování válců se využívá jako doplněk k hlubinným metodám, jelikož u některých nedochází k zhutnění až k povrchu.

### Dynamická konsolidace

Dynamická konsolidace je založena na principu volného pádu v uspořádané síti dopadových bodů. Závaží (ocelová deska) o hmotnosti 12 – 20 t zavěšena na výložníku jeřábu padá z výšky 10 - 20 m (Obrázek 2). Na každé předem projektem určené místo dopadá deska vícekrát, avšak s časovými rozestupy.



**Obrázek 2:** Technologický postup dynamické konsolidace (Masopust)

Výhodou dynamické konsolidace je její účinnost, nízké náklady i požadavky na technické vybavení. Použití této metody musí předcházet podrobný rozbor základové půdy, jelikož např. u jílovitých zemin hrozí zplastizování jílu a zvětšení objemu.

V České republice dynamická konsolidace není běžně používána, pro širší přehled je ji zde zapotřebí zmínit.

### **c) Chemická stabilizace**

Chemickou stabilizací základové půdy se vylepšují vlastnosti nevyhovujících místních materiálů, aby splňovaly požadavky projektu. Tento způsob zlepšování půdy se uplatňuje zejména v dopravním stavitelství pro zvětšování únosnosti jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky, snížení namrzavosti, ochraně povrchu svahů před erozí a během výstavby zajišťuje sjízdnost při nepřízní počasí (Obrázek 3). Jako stabilizátor se používá vápno, cement, bitumen, polymery atd. V současnosti se využívají organické látky.

Výhoda metody spočívá v rychlé a účinné aplikaci pro velké plochy, díky níž může být využita nedostatečně únosná zemina a není potřebné její odstranění. Nevýhodou je velká spotřeba pojiv, životnost (spíše dočasná konstrukce), manipulace s pojivy může být vnímána jako neekologická.



**Obrázek 3:** Ukázka provádění chemické stabilizace

#### **d) Termická stabilizace**

Princip vypalování půdy s obsahem jemných částic nad 25% spočívá ve fyzikálně mechanických přeměnách vlastností a složení zemin po jejich zahřátí proudem horkých plynů zaváděných do svislých, šikmých nebo i horizontálních vrtů. Horké plyny se vytlačují z vypalovací pece. Zemina zahřívána nad 600 °C, pozbude trvale plasticitu a rozbředavost a při dalším zvyšování teploty, zpravidla až na 800 - 900 °C, se její jednotlivé částice spojí chemickými reakcemi v pevný celek. Vznikne keramická hmota s příznivějšími vlastnostmi.

#### **e) Vyztužování**

Provádí se pomocí speciálních rohoží z hliníku, umělých hmot nebo pomocí geotextilií, čímž se zvyšuje smyková pevnost a stabilita zeminy. Výztužné vložky zamezují posunutí a vytlačování zeminy z podloží, snižují příčné deformace a tím celkově snižují sedání.

Tento způsob úpravy je v dnešní době s oblibou využíván u dopravních staveb. Při správné aplikaci jde o velmi účinný systém zlepšení. Při zlepšování podložních vrstev se převážně využívá kombinace geomříže a kameniva (Obrázek 4). Nahrazuje se tak chemická stabilizace, jelikož aplikace je rychlejší a lze ji provádět i za nepříznivých klimatických podmínek.



**Obrázek 4:** „Zazubení“ zásypového kameniva do geomříže (Geomat, s.r.o.)

### 1.2.2. Hlubkové metody zlepšování základových půd

- a) injektáž
- b) zmrazování
- c) trisková injektáž
- d) franki piloty
- e) DSM
- f) geodrény
- g) hlubkové zhutňování zemin – vibroflotace
- h) štěrkové pilíře

#### a) Injektáž

Vtlačováním tekuté směsi pod injekčním tlakem do zeminy nebo skalních hornin je dosaženo zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností.

U skalních hornin je injekční směs vháněna do dutin, trhlin a jiných ploch nespojitosti. Dochází ke snížení propustnosti zeminy, zvýšení pevnosti v tlaku a deformačního modulu.

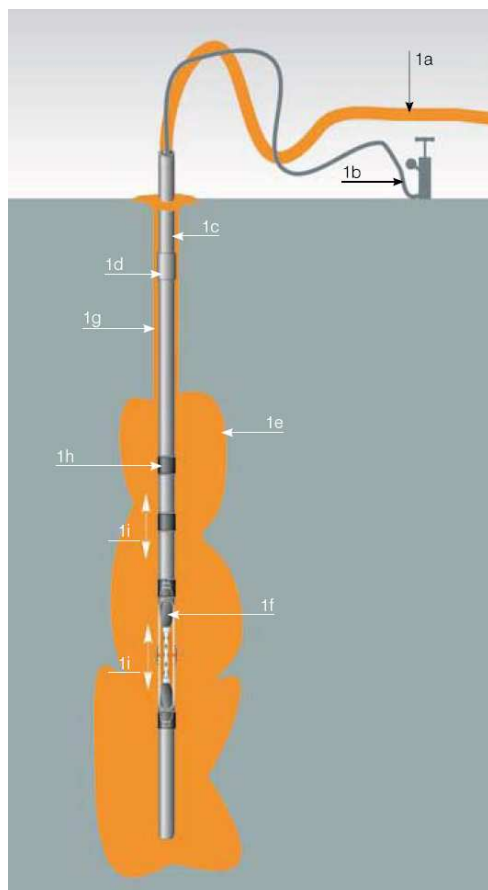
U nesoudržných zemin jsou vyplňovány póry mezi zrny zeminy (Obrázek 5). Takto stmelená zemina má lepší mechanické vlastnosti a vyšší nepropustnost.

Injekční směsi: suspenze cementové, jílové, jílovocementové, cementopískové, roztoky atd.

Výhodou je možnost sledování správnosti provádění dle tlaku a spotřeby směsi.



Nevýhodou je poměrně úzký rozsah zrnitosti, který lze injektovat. U cementové směsi je rozmezí okolo 0,5 – 6 mm, u chemické injekční směsi je rozmezí přibližně mezi 0,063 – 6 mm. Dalším záporem je doba instalace a časové prodlevy pro kompletní dokončení injektáže z jednoho vrtu, což při opačném pohledu může být výhodou díky kontrolovatelnosti a ovlivnitelnosti provedení.



**Obrázek 5:** Klasická injektáž (Zakládání staveb, a. s.)

- 1a) přívod injekční směsi
- 1b) ovládání obturátoru
- 1c) perforovaná injekční trubka
- 1d) spojník
- 1e) vytvrzená injekční směs
- 1f) dvojitý obturátor
- 1g) zálivka
- 1h) gumová manžeta
- 1i) etáž

#### **b) Trysková injektáž**

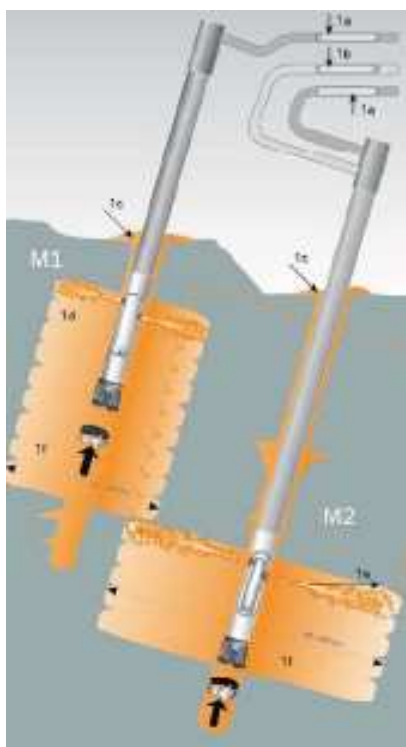
Technologie tryskové injektáže spočívá ve vhánění cementové nebo jílovcementové suspenze pod vysokým tlakem 30 – 50 Mpa z vrtu do základové půdy. Paprsek injekční směsi rozpojuje okolní základovou půdu, která se promísí s injekční směsí, čím vznikne pevný konglomerát.

Technologie provádění rozlišuje dva základní typy provedení – M1 a M2.

Jednofázová metoda M1 promíchává paprsek směsi pod tlakem okolní zeminu do vzdálenosti 20 - 60 cm. U dvoufázové metody M2, kdy je paprsek směsi navíc usměrněn koaxiálním proudem stlačeného vzduchu, je dosaženo vzdálenosti 45 - 90 cm. Pokud soutyčím ve vrtu otáčíme, vznikne základový prvek sloup, ponecháme-li soutyčím v klidu, vytváří se rovinný prvek typu stěny. Metodou docílíme snížení koeficientu filtrace a zvýšení pevnosti základové půdy.

Trysková injektáž je moderní rychlou metodou, která díky technologii provedení zaručuje spolehlivý výsledek. Je vhodná i pro poloskalní horniny (až po R6), ve kterých horninu pod tlakem podrtí a promísí se suspenzí. U nás je trysková injektáž stále více používána, jelikož nabízí rychlý způsob zlepšování základové půdy.

Doporučuje se před zahájením prací během průzkumu aplikovat injektáž na zkušebním poli.



**Obrázek 6:** Trysková injektáž aplikace M1, M2 (Zakládání staveb, a. s.)

- 1a) injekční směs
- 1b) stlačený vzduch
- 1c) vyplavený materiál
- 1d) paprsek injekční směsi
- 1e) paprsek injekční směsi a stlačeného vzduchu
- 1f) proinjektovaný sloup zeminy

### **c) Zmrazování**

Zmrazování je mechanické zpevnování zvodnělé zeminy dosažené zmrznutím vody obsažené v pórech pomocí  $\text{CaCl}_2$ , amoniaku nebo N ( $-196\text{ }^\circ\text{C}$ ). Led, ve který se změní pórová voda, způsobuje stmelení zrn, zemina se mění ve slepenec, její pevnost se zvětší a zemina je nepropustná. Zmrazování zeminy je pouze dočasné zlepšení vlastností základové půdy při zakládání staveb, jako např. je těsnění stavebních jam, pro zpevnění čelby tunelu atd.

V našich podmínkách se zmrazování používá okrajově, musí být opodstatněný důvod k použití této metody.

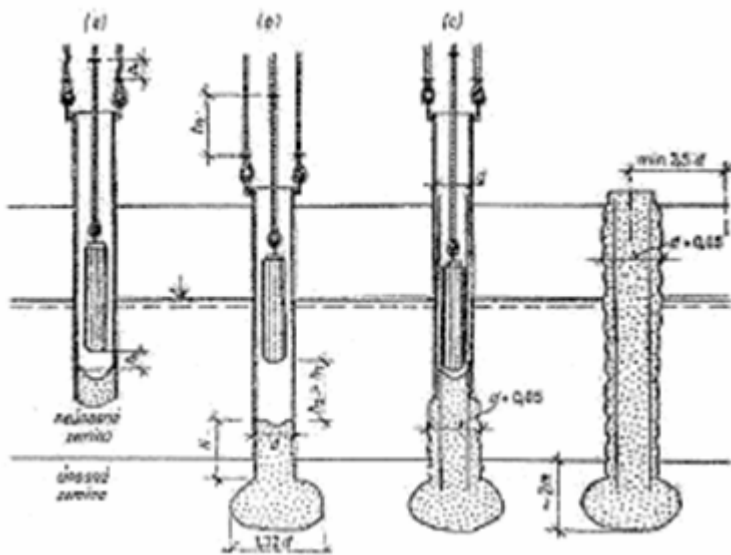
Nevýhodou je množství amoniaku, které je nutno k dokonalému provedení. K aplikaci je nutná přítomnost vody v zemině.

### **d) Franki piloty**

Franki piloty jsou především známé jako železobetonové piloty, prováděné metodou předražení. Stejnou metodu provádění lze aplikovat na formování štěrkového pilíře. Místo suchého betonu se k formování dřívku používá drceného kameniva 8 – 32 mm. Do země se pomocí volnopádového beranu zarazí výpažnice. Beran se pohybuje uvnitř výpažnice. Během zarážení je okolní zemina roztlačována do stran, nedochází tak k jejímu vytěžení. Po vytvoření zátky se dále beraní pomocí beranu přes zátku na dně. Po jejím vyražení se vytvoří pata pilíře. Kamenivo se přisypává a hutní při současném vytahování výpažnice (Obrázek 7).

Výhodou metody je schopnost prorazit překážky např. v navážkách. Je možné dosáhnout modulu deformace až 200 Mpa, větší nebývá zapotřebí. Další výhodou je možnost dosáhnout až dvojnásobného průměru pilíře, než je razící roura.

Nevýhodou jsou značné dynamické účinky, které mohou narušit okolní zástavbu.



**Obrázek 7:** Schéma provádění štěrkových pilířů metodou Franki (Masopust)

#### e) Deep Soil Mixing – DMS

Princip této moderní metody je založen na promíchávání zeminy s pojivem. Výrobní postupy se dělí na provedení mokrou nebo suchou cestou. Volba metody závisí na stupni nasycení zeminy a typu projektu. Během aplikace mokrého procesu je z míchacího zařízení dopravována např. cementová nebo bentonitová směs až k rozpojovacímu nástroji. Pro suchý proces se používá vápno, popílký či sádra. Jednou z aplikací je vrtný stroj, který je opatřen jedním až třítyčovým mixovacím zařízením (např. šnek, spirál). Při použití jednoho vrtáku vzniká kruhový pilíř, v případě více nástrojů vznikají lamely. Metodou lze dosáhnout hloubek promísení okolo 10 – 15 m. Výsledné stabilizace se pohybují od 1 MPa u jílovitých zemín až po 10 MPa v pískách.

Suchá cesta DSM (např. Herkules) probíhá ve dvou fázích. První je zavibrování mísícího zařízení do požadované hloubky a následuje za pomoci vzduchu vhánění vápna do vrtu. Metoda se používá pro zvodnělé zeminy, aby ve vápně mohlo nastat hašení a následné vytvrzení. Stroje do takto zvodnělého a nestabilního prostředí musí být lehké, disponují širokými pásovými podvozky pro roznesení váhy, mají lehkou lafetu více předsunutou před strojem.

Další možností aplikace je kombinací míchání a přívodem pojiva pomocí trysek pod tlakem – Turbojet.

Výhodou DSM je nepřítomnost dynamických účinků, proto je možné ji použít v blízkosti zástavby, a kvalita provedení.

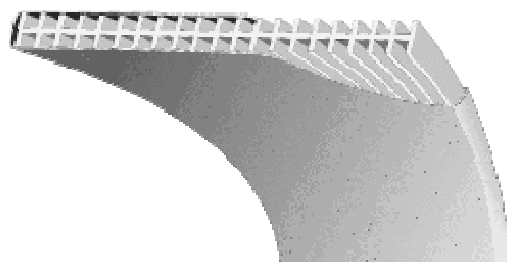
Nevýhodou je náročnost prací, velká spotřeba pojiva (80 – 450 kg/m<sup>3</sup> cementu a u popílku je to 6 – 10% objemové tíhy zeminy).

**f) Geodrény – prefabrikované vertikální drény**

Metoda se využívá pro urychlení konsolidace zkrácením odvodňovacích drah u velmi stlačitelných zemín s nízkou propustností (hlíny, jíly, bahno, organické hlíny apod.). Tyto zeminy mají stupeň nasycení  $S_r$  téměř 1. Vertikální drény mohou být osazovány do hloubek 15 – 50 m.

Jako drenáž se používají moderní prefabrikované vertikální drény. Ty se do země zavibrovávají nebo vtlačují (Obrázek 8).

Výhodou prefabrikovaných drénů je rychlost instalace a suchý proces aplikace.



**Obrázek 8:** Geodréna COFRA-CHEMIA, SPOL. S.R.O.

## **2. Hloubkové zhutňování základové půdy**

Z důvodů zmíněných v úvodu mé diplomové práce se v dalších bodech práce budu věnovat hloubkovému zhutňování zemin a jeho nástavbě – štěrkovým pilířům.

### **2.1. Historie vibroflotace**

Jako první se používala klasická vibroberanidla při použití vhodných nástrojů (H profil, pažnice). Metoda vznikla kolem roku 1930 v Německu. Společnost KELLER patentovala hloubkový vibrátor v roce 1934, který nejdříve používala pro zhutňování písků a štěrků.

V 60. letech minulého století byla vibroflotace vyzkoušena v rámci protipovodňových opatření poprvé při sanaci stávajících ochranných hrází mezi Klosterneuburgem a Hainburgem v Rakousku. Tyto hráze jsou budovány pouze z písku bez hutnění. Problémem byla změna geometrie příčného profilu hráze při velkých povodních, a proto se přistoupilo k provedení dodatečných opatření pro utěsnění hráze.

V roce 1982 vyrobila společnost PTC Vibroflot 3 L1 s horizontálními vibracemi za použití agregátu 215 kW. Dalším vývojem se dospělo k dnešním modelům označovaným Vibroflotace.

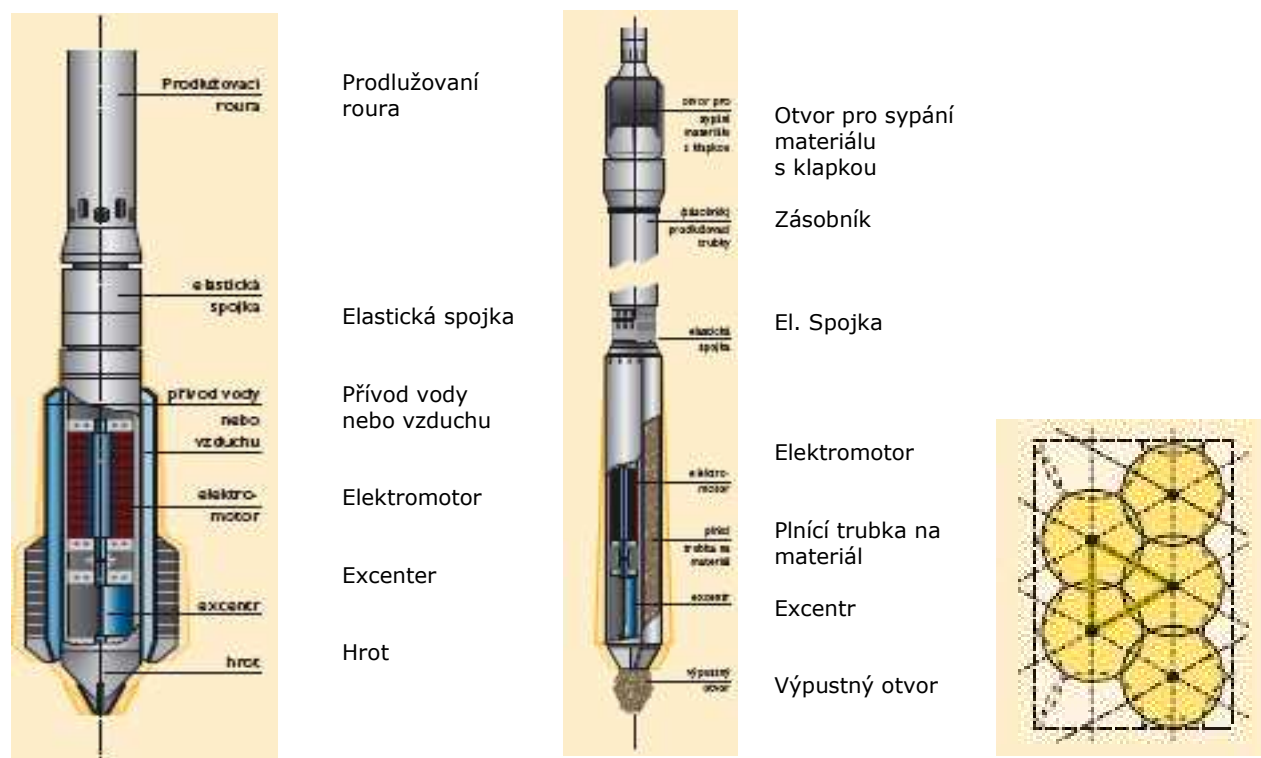
### **2.2. Pracovní postup**

Proces vibroflotace se skládá ze dvou základních fází. Za první je to zavedení kmitajícího vibrátoru do požadované hloubky, následně odspodu nahoru dle metody začne zhutňování zeminy nebo tvorba nosného štěrkového pilíře.

### **2.3. Hloubkový vibrátor**

Vibrační jehla válcovitého tvaru je zhruba 3 až 8 metrů dlouhá, o průměru 0,3 – 0,5 m. Váží cca 2 tuny. Špice doplněna křídly brání v rotaci jehly. Důležitou součástí je elektrický excenter, který ji uvádí do kmitavého pohybu v horizontálním směru, čímž se dostává do požadované hloubky. Vibrační jehla je za pomoci prodlužovacích trubek buď zavěšena na jeřábovém nosiči (do země proniká vlastní

tíhou), nebo je pevně osazena na lafetě vrtné soupravy. Jehla je dále doplněna otvory pro přívod stlačeného vzduchu či vody k špici vibrátoru (Obrázek 9).



**Obrázek 9:** Schématické uspořádání vibrační jehly a jehly s plnicí trubicou a ukázka rastru (KELLER)

Přístroj		Bauer		Keller				Vibroflotation		
		TR13	TR85	M	S	A	L	V10	V23	V42
Délka	m	3,13	4,20	3,30	3,00	4,35	3,10	2,73	3,57	4,08
Průměr	mm	300	420	290	400	290	320	250	350	378
Váha	kg	1000	2090	1600	2450	1900	1815	820	2200	2600
Výkon	kW	105	210	50	120	50	100	70	130	175
Otáčky	počet/min	3250	1800	3000	1800	2000	3600	3600	1800	1500
Amplituda	mm	3	11	3,60	9	6,90	2,70	5	11,50	21
Síla rázu	kN	150	330	150	220	160	201	150	300	472

**Tabulka 1:** Druhy vibračních jehel (Fellin, 2000)

## 2.4. Poznatky z praxe

Praktické zkušenosti z provádění vibroflotace ukázaly, že písky se nejlépe zhutňují při nižší frekvenci a při nižších otáčkách (30 – 70 Hz) a při větší amplitudě (5 – 10 mm). Pro štěrky se neudávají žádné podmínky (Simons a Kahl, 1987).

Měření Simons a Kahl (1987) u vibračních jehel KELLER v píscích prokázalo, že k největšímu zhutnění dochází v prvních dvou minutách, delší hutnění má minimální účinky.

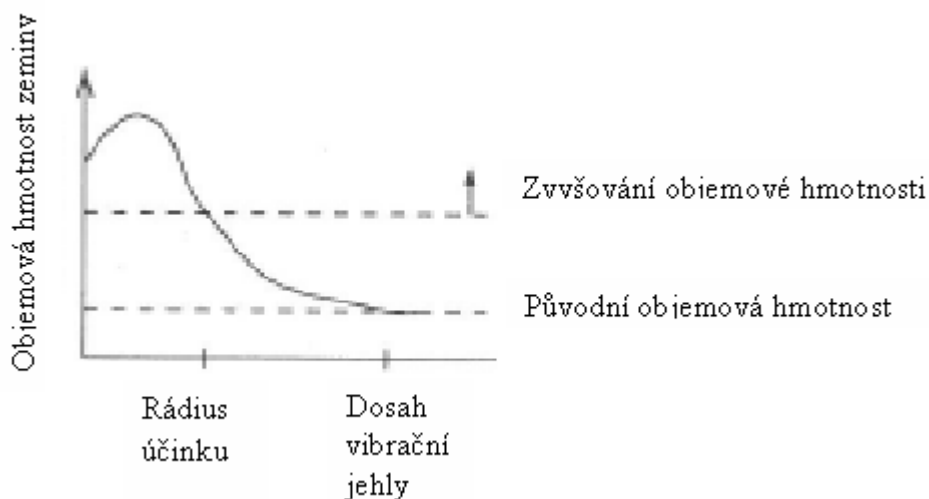
Ke stejnému závěru také došla společnost KELLER, která posuzuje působení vibračních jehel. Jehla s vysokou frekvencí a vysokou silou rázu doplněná vodním výplachem umožňuje rychlejší pronikání i ve zhoršených podmínkách. Jehla s menší frekvencí docílí v jemných píscích lepšího výsledku než jehla s vysokou frekvencí. Pro malé hloubky a méně komplikované prostředí základové půdy stačí použít nižší sílu rázu.

Z toho plyne, že není vždy nejvhodnější a nejehospodárnější použít nejvýkonnější a největší jehly.

Průzkum firmy Bauer Spezialtiefbau (1983) hodnotí hutnící účinek jehel (120 kN a 160 kN, 3000 otáček/min) firmy KELLER. Tyto jehly zhutní zeminu lépe, ale v horizontálním směru prokazují menší dosah zhutnění.

## 2.5. Účinky vibrační jehly

Účinky vibrační jehly jsou znázorněny v Grafu 1. Je zde znázorněn vibrační dosah ve spojení se zvyšováním objemové hmotnosti.



**Graf 1:** Účinek vibrační jehly v závislosti na zvyšování objemové hmotnosti (Beuer Spezialtiefbau GMBH, 1983)

## 2.6. Hlubkový dosah

V roce 1939 byla na staveništi v Berlíně dosažena hloubka 35 m. Dnešní možnosti dovolují za vhodných podmínek dosáhnout hloubky přes 50 m. V České republice využíváme metodu do hloubek kolem 20 m.

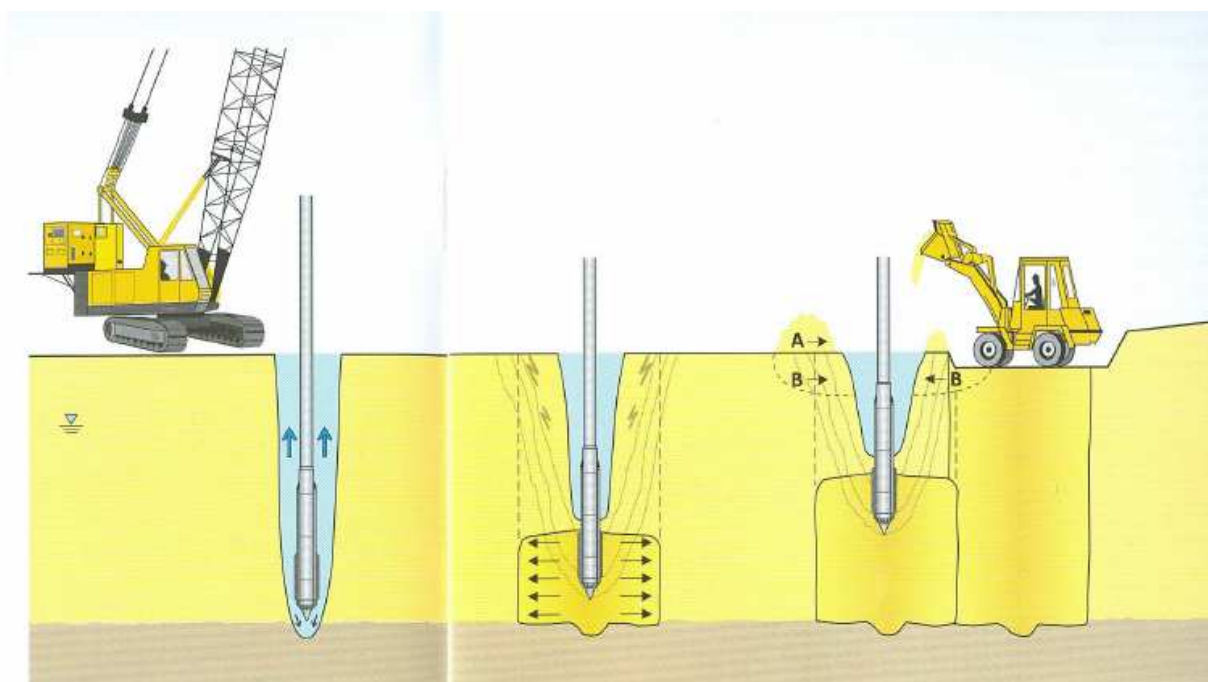


## 2.7. Hlubkové vibrační zhutňování - vibroflotace

Touto metodou se hutní nesoudržná a dostatečně neúnosná zrnitá zemina bez přidání cizího materiálu, nárůst obsahu jemných částic však snižuje její účinnost. Platí, že ji lze využít do 10% jemných částic. Do 15% je doba instalace podstatně delší.

Jednotlivé vpichy se provádějí v pravidelné síti (výjimečně v nepravidelné). Rastr sítě se určí na základě průzkumu – druhu základové půdy, na její ulehlosti a dle druhu a účelu stavby a požadavků projektanta. Zpravidla se volí pravoúhlá či trojúhelníková síť s rozměrem strany 1 – 2,5 m.

Zhutňování probíhá od spodu nahoru. Zhutňovaná zemina má tvar válce o průměru až 5 m. Kolem jehly vzniká trychtýřovitá deprese, která se zaveze místním nebo dovezeným materiálem (Obrázek 10). Účinky hutnění jsou sledovány přímo obsluhou stroje dle spotřeby elektrické energie nebo dle výkonu hydrostatického čerpadla. Existují výjimky, kde kritérium nárůstu spotřeby energie neplatí. Jsou prokázány výsledky zhutnění, aniž by nastal nárůst energií a naopak.



**Obrázek 10:** Pracovní postup hloubkového zhutňování zemin – zapaštění, hutnění, dosypávání, dokončovací práce

Dle Browna (1977) se nejlépe zhutňují písky pod hladinou podzemní vody. Zhutnění pomocí jehly není proveditelné na povrchu, proto je nutné dohutnit plochu přejezdy vibračního válce.

Dalším okruhem možnosti využití hloubkového zlepšování zemin jsou pažící konstrukce nebo těsnící clony apod. Je nutné, aby zlepšení bylo několikanásobně

účinné. Není třeba zhutňovat, ba i v některých případech nelze, ulehlou či tvrdou zeminu.

Proto je nutné kvalitní výběr oblastí, kde lze hloubkové zlepšování aplikovat. Jsou to především oblasti kolem vodních toků (nížiny, delty řek, naplaveninami vyplněná údolí apod.) a dále plochá území v přímoří, kde je zemina měkkých konzistencí či kyprých ulehlostí. Významné a společensky velmi záslužné je nasazování těchto metod do prostředí skládek, výsypek či jiných ploch s antropogenní činností.

## 2.8. Plnicí materiál a rastr

Pokud to podmínky dovolí, je neekonomičtější použít místní materiál. Nejvhodnější zásypem je středněhrubý až hrubý písek. Příliš hrubozrný písek může způsobit zpříčení ve vrtu. Jemnozrný materiál může být vyplavován proudící spodní vodou.

Dle Browna (1977) je možné vhodnost materiálu posoudit následujícím jednoduchým vzorcem:

$$\text{Koeficient použitelnosti} = 1,7 * [3/(d_{50})^2 + 3/(d_{50})^2 + 3/(d_{50})^2]^{-1}$$

Koeficient použitelnosti vypočtený vzorcem viz výše, ukazuje vhodnost materiálu jako plnicího (Tabulka 2).

	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 50	>50
Koeficient použitelnosti	velmi dobrý	dobrý	dostačující	špatný	nevhodný

**Tabulka 2:** Posouzení vhodnosti použití materiálu jako zásyrového materiálu

Použité množství zásyrového materiálu je obvykle 10 – 15%. Obecně platí, že čím menší rastr, tím větší je spotřeba zásyrového materiálu (Tabulka 3).

Zhutňování se obvykle provádí v trojúhelníkové nebo pravoúhlé síti o hraně nejčastěji 1 – 3 m (možné i více).

Autor	Rastr	m <sup>3</sup> plnícího materiálu na 1 m hloubky	% zhutňovaný objem zeminy
D'Appolonia	a = 1,82 m	0,46	15%
Brown 1976	a = 2,40 m	0,7	15%
	a = 3,60 m	1	10%
Keller			10%
Kirsch 1977			10%

**Tabulka 3:** Závislost vzdálenosti hrany rastru a spotřeby zásypového materiálu (Fellin, 2000)

Poteuer (1971) udává, že horizontální účinky vibrační jehly by měly odpovídat hraně rastru.

### 3. Limity použitelnosti technologie

Vhodnost použití vibroflotace ovlivňuje několik důležitých faktorů, které se musí vždy při záměru použít tuto metodu zohlednit.

#### 3.1. Čtyři základní faktory

**Křivka zrnitosti**

**Profil**

**Hlubkový dosah**

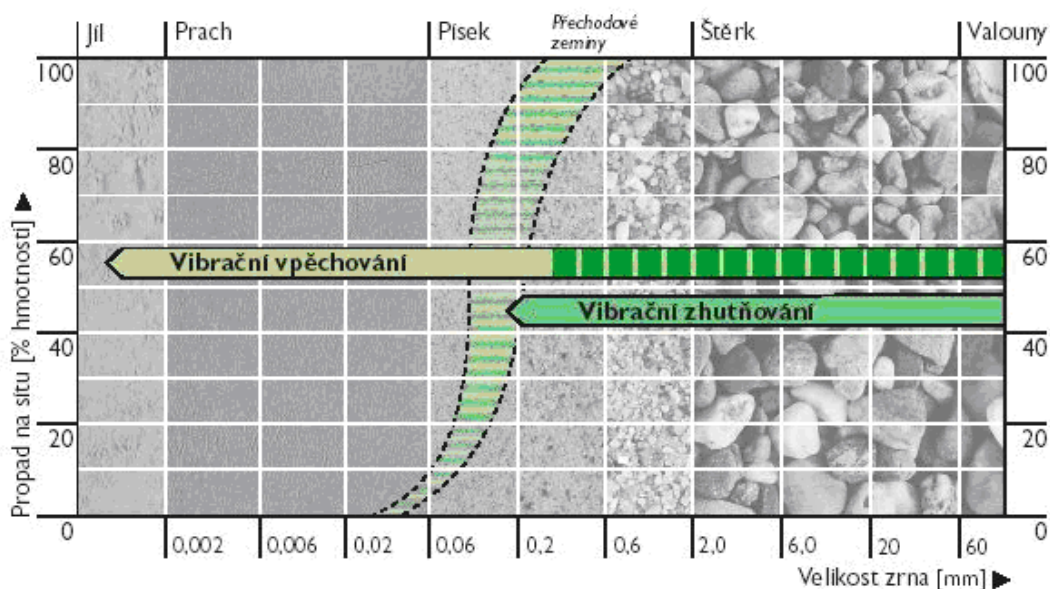
**Okolní zástavba**

##### 3.1.1. Křivka zrnitosti a propustnost

Zhodnocení se provádí na základě křivky zrnitosti a hodnot koeficientu propustnosti. Zvýšené procento jílovitých částic zhoršuje kvalitu provádění vibroflotace. Zároveň při špatně zrněné křivce obsahující velká zrna klesá schopnost zrn správně se uspořádat. Jako limitní horní hranice se udává velikost zrn 100 mm

Maximální přijatelný obsah částic menších než 0,06 mm bývá 15% (Kirsch, 1979; Smolcyc, 1991) přes 20% (Brown, 1977) až po hranici 30% (Thorburn, 1975).

Všeobecně platí, jak popisuje Obrázek 11, že pro písčité a štěrkovité zeminy se používá vibrační zhutňování a pro jemnozrnné zeminy vibrační pěchování, tedy aplikace štěrkových pilířů.



**Obrázek 11:** Oblast použití hloubkového vibračního zhutňování (KELLER)

Jak udává Greenwood (1972) a i autoři Simons a Kahl (1987), propustnost zeminy by měla být větší než  $10^{-3}$  cm/s.

### 3.1.2. Profil

Pokud je v profilu zjištěna přítomnost větších překážek, jako jsou např. balvany, je nutné tuto skutečnost zanést do projektu vyhotovení. Překážky je před samotným prováděním nutno odstranit. Při větším množství překážek je namístě zhodnotit vhodnost použití vibroflotace jako způsobu zlepšení základových půd.

### 3.1.3. Hloubkový dosah

Jak již bylo výše uvedeno, pomocí vibrační jehly lze dosáhnout hloubek kolem 50 m. U větších hloubek díky spotřebě zásypového materiálu, zvláště pak při aplikaci štěrkových pilířů, musíme vyhodnotit hospodárnost metody (cena, čas). Taktéž musíme počítat s dohutňováním v hloubce 30 – 150 cm pod povrchem, kde

v důsledku nepřítomnosti protitlaku zeminy dochází k jejímu nakypření. Úpravu provádíme pomocí pozemních zhutňovacích prostředků.

### **3.1.4. Vzdálenost od okolních objektů**

Vibrace vyvolané při provádění vibroflotace ohrožují okolní zástavbu. Dynamické účinky ovlivňuje hloubka hutnění, avšak v literaturách je udáváno, že vzdálenost od budov by měla být minimálně 10 m.

Účinky vibrací jsou samozřejmě ovlivněny geologickým profilem, hloubkou vibrování a typem vibrátoru.

## **3.2. Případová studie geofyzikálního měření dynamických účinků vibrátoru**

Pomocí měření seismických vln jsem vyhodnotila vliv účinků vibrační jehly (Tabulka 4) a pro porovnání i vibračního válce (Tabulka 5) na nebezpečí poškození nadzemních objektů blízkosti stavby.

Měření provedl Ing. Martin Stolárik (ÚGN, AVČR) pro společnost KELLER v Poříčanech u Prahy. Jednalo se o výstavbu strojírenského závodu v průmyslové zóně Poříčany. Provádělo se založení výrobní haly a vylepšení podloží pod podlahou štěrkovými pilíři.

Lokalita se nachází v české křídové pánvi, v labské oblasti. Jedná se o slínovce středního turonu, při povrchu navětralé (3 – 5 m pod terénem). Na nich spočívají fluvialní sedimenty. Území je pak překryto mladšími holocenními uloženinami jílovitého až jílovitopísčitého charakteru. Na povrchu terénu se nacházely antropogenní navážky mocnosti 1-2 m (Stuchlík, 2007).

Dle Tabulky 4 měření byla provedena na několika vibrovaných pilířích v různých vzdálenostech přístrojem Gaia 2T s tříložkovým senzometrem VIGEO 2. Naměřil hodnoty max. amplitud na svislé složce, vodorovné složce směrem k vibrovanému pilíři a vodorovné složce kolmo ke směru k pilotě viz Graf 2 a Graf 3.

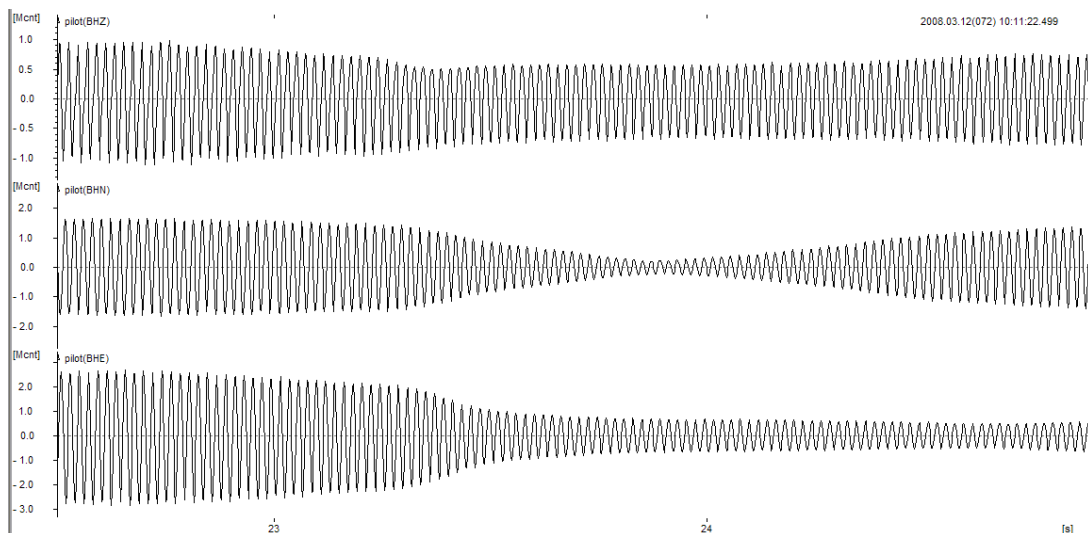
Pro test vibračních účinků při budování štěrkových pilířů byl použit vibrátor váhy 20 t s ustáleným harmonickým kmitáním s převládající frekvencí 47 Hz a vibrační válec hmotnosti taktéž 20 t s ustáleným harmonickým kmitáním s převládající frekvencí 25 Hz.

Vibrovaný pilíř	vzdálenost [m]	max amplituda na svislé složce [mm/s]	max amplituda na vodorovné složce směrem k pilotě [mm/s]	max amplituda na vodorovné složce kolmo ke směru k pilotě [mm/s]
339	5,0	5,7	12,2	13,4
376	5,8	3,6	4,5	8,0
413	7,8	3,9	3,7	7,7
450	10,3	5,5	2,2	4,9
487	13,0	0,5	2,1	2,7

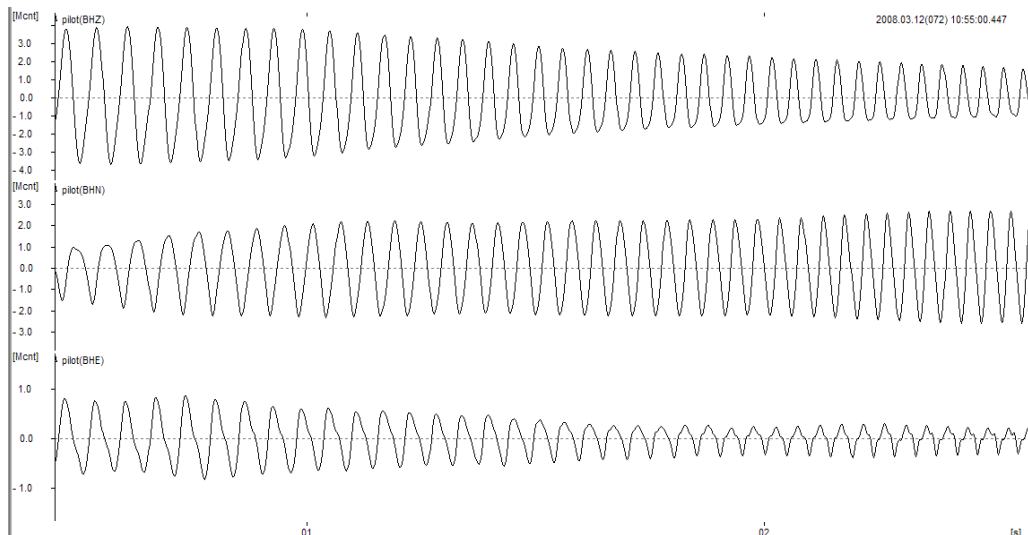
**Tabulka 4:** Naměřené hodnoty u vibrovaných šterkových pilířů

vibrační válec	vzdálenost [m]	čas	max amplituda na svislé složce [mm/s]	max amplituda na vodorovné složce směrem k válci [mm/s]	max amplituda na vodorovné složce kolmo ke směru k válci [mm/s]
	5	10:55:00	11,5	5,1	2,5
	6,7	10:55:26	2,5	5,0	2,2
	10,3	10:55:52	1,9	1,2	2,4
	14,4	10:56:18	0,2	1,1	0,6
	18,9	10:56:44	0,5	2,2	1,0

**Tabulka 5:** Naměřené hodnoty pro vibrační válec při pojezdu



**Graf 2:** Vlnový záznam – pilota 376; osa x značí čas v sekundách, osa y výchylky v mm



**Graf 3:** Vlnový záznam – vibrační válec – vzdálenost senzoru 5m; osa x značí čas v sekundách, osa y výchylky v mm

### 3.2.1. Výpočet

Z grafických záznamů měření je zřejmé, že se jedná o sinusový průběh děje. Jelikož v datech z měření není obsažen prostorový vektor, vektorově jsem sečetla maximální hodnoty amplitud do výslednice. Tento vektorový součet je větší, než by byla skutečná prostorová složka, protože maximální amplitudy v jednotlivých směrech nejsou ve stejném časovém okamžiku. Pro vyhodnocení testu je proto tato hodnota na straně bezpečnosti.

Pro vyhodnocení dle normy ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva jsou rozhodující právě efektivní hodnoty rychlosti kmitání. Pro určení efektivní hodnoty rychlosti kmitání jsem musela převést harmonický děj do obdélníkového průběhu o stejné energetické účinnosti (obrazec o rozměrech časové osy a efektivní hodnoty).

Pro převod sinusového průběhu je možné použít zjednodušený tvar:

$$V^p \cdot 1/\sqrt{2} = V^e$$

$V^p$  je naměřená hodnota rychlosti kmitání

$V^e$  je efektivní hodnota rychlosti kmitání

V následujících tabulkách (Tabulka 6 a Tabulka 7) jsou uvedeny efektivní hodnoty rychlostí kmitání získané podle vztahu viz výše.

Pilíř	l	Vz	Vp	Vpř	W
339	5	4,0	8,6	9,5	13,4
376	5,8	2,5	3,2	5,7	7,0
413	7,8	2,8	2,6	5,4	6,6
450	10,3	3,9	1,6	3,5	5,4
487	13	0,4	1,5	1,9	2,4

**Tabulka 6:** Efektivní hodnoty pro vibrační jehlu  
l – vzdálenost od piloty; Vz – amplituda svislé složky [mm/s]; Vp – amplituda vodorovné složky směrem k pilotě [mm/s];  
Vpř – amplituda vodorovné složky kolmo k pilotě [mm/s];  
W – prostorový vektor [mm]

	l	Čas	Vz	Vp	Vpř	W
Vibrační válec	5	10:55:00	8,1	3,6	1,8	9,1
	5,8	10:55:26	1,8	3,5	1,6	4,2
	7,8	10:55:52	1,3	0,8	1,7	2,3
	10,3	10:56:18	0,1	0,8	0,4	0,9
	13	10:56:44	0,4	1,6	0,7	1,7

**Tabulka 7:** Efektivní hodnoty pro vibrační válec  
l – vzdálenost od piloty; Vz – amplituda svislé složky [mm/s]; Vp – amplituda vodorovné složky směrem k pilotě [mm/s];  
Vpř – amplituda vodorovné složky kolmo k pilotě [mm/s];  
W – prostorový vektor [mm]

### 3.2.2. Vyhodnocení

Vypočtené hodnoty jsem vyhodnotila podle normy ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva. V normě jsou popsány objekty z hlediska významu (ekonomický, strategický). Nejdůležitější objekty jako jsou významné mosty, přehradní hráze apod. se značí U. Označení I. zahrnuje inženýrské stavby sloužící k dopravě, těžní věže, elektrárny, veřejné budovy, sportoviště apod. Třída II zatřídí obytné a občanské objekty, objekty pro průmyslovou a rostlinnou výrobu, ústřední sklady pro zásobování obyvatelstva, komunikace nižších tříd. Poslední skupinou III jsou objekty pro skladování zemědělských výrobků, hnojiv, uhlí apod., pokud nejsou obsaženy v předchozích skupinách. Podobně jsou stavby rozděleny v normě ČSN 73 0031 Spolehlivost stavebních konstrukcí a základových pūd.

Nejčastějšími objekty kolem provádění staveb s použitím vibračních přístrojů jsou objekty II. kategorie. Právě s kategorií II jsem porovnávala efektivní hodnoty



vzešlé z měření dle ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva. Tabulka 8 začleňuje objekty do tříd dle odolnosti. Nejběžnější třídou je skupina D.

Tabulka 9 vymezuje kategorizace odezvy konstrukce podle efektivní rychlosti pohybu  $v_{ef}$  a třídy odolnosti objektu.

Třída odolnosti objektu	Objekty bytové, občanské, průmyslové a zemědělské	Objekty inženýrské	Objekty podzemní	Podzemní inženýrské sítě a kabely
A	chatrné stavby, neodpovídající stavebním předpisům, zříceniny; historické budovy z neopracovaného kamene nebo cihel s klenutými překlady, průvlaků a plošnými klenbami nad místnostmi v přízemí a suterénu; kamenné a zděné pomníky a kašny; budovy s rozsáhlou plastikou výzdobou; budovy ve zvláštní památkové péči; archeologické objekty;			
B	běžné cihelné stavby, izolované nebo řadové domky s půdorysnou plochou do 200 m <sup>2</sup> , nejvýše o 3 podlažích			
C	veliké budovy z cihel a tvárnice, dobře ztužené stavby panelové a montované z betonových prvků; zděno na cementovou maltu	kamenné mosty (sochy a ozdoby) opěrné a ochranné zdi z kamene a cihel, zděné vodojemy	keramické a kamenné obklady a dlažby v podzemních objektech metra, v podchodech	potrubí osinkocementové, kameninové, kabelové spojky, Popinovy skříně na sdělovacích kabelech
D	budovy ze skeletu ocelového nebo betonového, dřevěné a hrázdné stavby s dobrým ztužením, prostý beton	opěry mostů z opracovaného kamene, monolitické vodojemy	cihelné, kamenné a tvárnice vyzdívků v podzemních objektech	potrubí litinové, betonové, potrubí z umělých hmot
E	železobetonové a ocelové konstrukce, výrobní a provozní objekty, železobetonová síla a zásobníky	železobetonové inženýrské stavby, ocelové stožáry	betonové monolitické konstrukce podzemních objektů; vyzdívané a monolitické štoly kruhového a vejčitého tvaru; stoky a technologické tunely z dílců a trub o průměru větším než 800 mm; podzemní železobetonové stěny, kotvení - kořeny kotev	kabely žilové a koaxiální sdělovací kabely
F			železobetonové a ocelové ostění tunelů metra a kolektorů; úkryty civilní obrany	potrubí ocelové

**Tabulka 8:** Třídy odolnosti objektů podle normy ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva

Třída odolnosti objektu	$v_{ef}^{(1)}$									
	Třída významu objektu (podle ČSN 73 0031) <sup>1)</sup>									
	U		I		II		III		Pro všechny třídy významu	
	není třeba dynamický výpočet	je třeba dynamický výpočet	není třeba dynamický výpočet	je třeba dynamický výpočet	není třeba dynamický výpočet	je třeba dynamický výpočet	není třeba dynamický výpočet	je třeba dynamický výpočet	možnost poruch	5 % objektů je poškozeno <sup>2)</sup>
A	0,2	0,6	0,6	1,8	0,8	2,2	1,2	3,6	4,5	7,0
B	0,4	1,6	1,0	3,6	1,4	4,0	2,0	6,0	9,0	14,0
C	0,95	3,8	1,8	5,0	2,4	6,8	3,0	9,0	25,0	50,0
D	1,1	4,5	2,4	7,0	2,8	9,0	4,0	12,0	40,0	80,0
E	1,6	5,0	3,0	10,0	4,0	15,0	6,0	20,0	60,0	100,0
F	2,0	7,0	4,0	14,0	6,0	17,0	8,0	25,0	70,0	120,0

<sup>1)</sup> Meziřádkové hodnoty tříd významu se posuzují podle úvahy.  
<sup>2)</sup> Jde o poškození stupně 1, viz tabulka 13.

**Tabulka 9:** Kategorizace odezvy konstrukce podle efektivní rychlosti pohybu  $v_{ef}$  v mm/s podle normy ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva

Pro vibrační jehlu použitou v daných geologických podmínkách, kategorii dle významu objektu II a pro třídu odolnosti objektu D je vyhodnocení v Tabulce 10.

Pilíř č.	I	W	výpočet není nutný	výpočet je nutný	vyhodnocení
339	5	9,1	2,8	9,0	je nutný dynamický výpočet
376	5,8	7,0	2,8	9,0	na úvaze řešitele
413	7,8	6,6	2,8	9,0	na úvaze řešitele
450	10,3	5,4	2,8	9,0	na úvaze řešitele
487	13	2,4	2,8	9,0	není nutný dynamický výpočet

**Tabulka 10:** vyhodnocení pro vibrované pilíře, kde I – vzdálenost od piloty; W – prostorový vektor [mm]

Pro běžné objekty třídy odolnosti D je možné hodnoty efektivních rychlostí kmitání 9mm/s považovat za bezpečné bez posouzení dynamickým výpočtem.

Pro stanovení bezpečné vzdálenosti v daných geologických a hydrogeologických podmínkách posuzované technologie od objektů vycházím z výsledků pro pilíře 339 a 376. Hraniční efektivní rychlost kmitání 9 mm/s se nachází mezi těmito pilíři. Z uvedeného vyplývá bezpečná vzdálenost mezi 5m a 5,8m.

S přihlédnutím k zjednodušeným předpokladům uvedeným výše a k souboru výsledků měření jsem zvolila hodnotu 6m jako bezpečnou vzdálenost.

Výsledky pro vibrační válec jsou popsány v Tabulce 11.

vibrační válec	l	W	výpočet není nutný	výpočet je nutný	vyhodnocení
339	5	9,1	2,8	9,0	nutný dynamický výpočet
376	5,8	4,2	2,8	9,0	na úvaze řešitele
413	7,8	2,3	2,8	9,0	na úvaze řešitele
450	10,3	0,9	2,8	9,0	na úvaze řešitele
487	13	1,7	2,8	9,0	není nutný dynamický výpočet

**Tabulka 11:** vyhodnocení pro vibrační válec, kde l – vzdálenost od piloty;  
W – prostorový vektor [mm]

S přihlédnutím k zjednodušeným předpokladům uvedeným výše a k souboru výsledků měření lze hodnotu 9,1mm/s považovat jako bezpečnou hodnotu 9mm/s.

Lze tedy vzdálenost 5m považovat v daných geologických a hydrogeologických podmínkách jako bezpečnou vzdálenost pro použití daného typu vibračního válce.

### 3.2.3. Závěr

Vzhledem k danému množství dat nemohu závěr vznést jako všeobecně platící, ale je možné pro dané podmínky a metody vznést tyto závěry:

Je možné použít vibrační jehlu pro aplikaci vibrovaných pilířů od vzdálenosti 6m od objektů typu D a 2m od objektů typu B. U vibračního válce je tato vzdálenost 5m, respektive 6m.

Použití metod hloubkového zhutňování zemin lze tedy uvažovat i v blízkosti stavebních objektů. Musí se však zohlednit jejich stav a účel dle ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva. Doporučuji provést vždy pasportizaci objektů.

## 4. Průzkum

Průzkum staveniště musí být proveden dle požadavků normy ČSN EN 1997-1 Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 1: Obecná pravidla a ČSN EN 1997-2 Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy. Rozsah volíme také dle návrhu objektu.

Abychom dostatečně charakterizovali poměry na staveništi, musíme navrhnout vhodný rozsah a hloubku prací pro reprezentativní závěr průzkumu.

Průzkum musí obsahovat topografii terénu, popis všech geologických vrstev, úroveň podzemní vody a její agresivitu, musí být zaznamenány všechny překážky, tvrdé vrstvy a další nestejnorodosti, které by mohly bránit zapouštění vrtného nástroje. Dále musí být zjištěny zeminy náchylné k porušení, prosedání, rozbředání, polohy navážek atd.

Vzhledem k strojní technice, která je k vibroflotaci zapotřebí, je nutné zhodnotit sjízdnost terénu, přítomnost podzemních i nadzemních sítí.

Standardně se provádějí penetrační zkoušky, průzkumné vrty, čerpací zkoušky či statické zatěžovací zkoušky. Pokud je to nutné také je možno využít geofyzikálních metod.

Společnost Zakládání staveb, a. s, mi poskytla databázi penetračních zkoušek. U jednotlivých lokalit je vždy popsána geologie, prováděná metoda a použitá technika. Ke každému místu jsou numerická i graficky zpracovaná data a především závěrečná zpráva s posouzením.

Pro snazší orientaci při výběru metody zlepšení základové půdy jsem sestavila mapu jednotlivých lokalit (Obrázek 12). Pokud v daném místě byly již provedeny penetrační zkoušky, je možné jejich výsledky zahrnout do návrhu.



**Obrázek 12:** Mapa databáze penetrací ČR od společnosti Zakládání staveb, a.s.

Základním výstupem průzkumu a zkoušek je stanovení zrnitosti, relativní ulehlosti, propustnosti, zhutnitelnosti a pro návrh štěrkových pilířů jsou zkoušky doplněny o mez stlačitelnosti, konzistenční meze, neodvodněnou smykovou pevnost a senzitivitu jílu.

#### **4.1. Stanovení relativní ulehlosti**

Relativní ulehlost základové půdy se stanovuje již před započítáním prací. Díky ní lze zjistit kvalitu zhutnění po provedení zhutnění opětovnou zkouškou. Index ulehlosti zohledňuje tvar a uložení zrn i vlhkost zeminy. Díky vibroflotaci lze dosáhnout hodnoty relativní ulehlosti až  $I_D = 0,7 - 0,8$ .

Relativní ulehlost se standardně zjistí pomocí penetračních zkoušek nebo laboratorně.

##### **4.1.1. Laboratorní stanovení relativní ulehlosti**

Laboratorně se relativní ulehlost stanovuje pomocí zkoušení vzorků. Jelikož se zpravidla jedná o hrubozrnný, nezpevněný materiál, je odebraní vzorku ze šachtic či

vrtů složité, čímž mohou být výsledky ovlivněny. Laboratorní práce jsou i časově náročné. Výsledné zatřídění pojmenovává Tabulka 12.

Pro zkoušku je nutné odebrat 5 – 20 kg vzorku.

Relativní ulehlost (Index ulehlosti) spočítáme ze vztahu

$$I_d = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$$

$e$  – číslo pórovitosti

$e_{\max}$  – maximální pórovitost

$e_{\min}$  – minimální pórovitost

$$e = V_p / V_s$$

kde  $V_p$  je objem pórů a  $V_s$  je celkový objem

$$I_d = \rho_{d \max} (\rho_d - \rho_{d \min}) / \rho_d (\rho_{d \max} - \rho_{d \min})$$

$\rho_{d \max}$  – maximální objemová hmotnost ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_{d \min}$  – minimální objemová hmotnost ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_d$  – objemová hmotnost zhutněné suché zeminy dosažené na stavbě ( $\text{kg/m}^3$ )

$I_D$	Pojmenování zeminy
0 až 0,15	velmi kyprá
0,15 až 0,35	kyprá
0,35 až 0,65	středně ulehlá
0,65 až 0,85	ulehlá
0,85 až 1,0	velmi ulehlá

**Tabulka 12:** Pojmenování stavu ulehlosti podle EN ČSN 14688-2 (2005)

Dle Kirsche (1977) je složitější zhutňovat již ulehlou zeminu. Jako příklad udává, že docílit větší relativní ulehlosti u zeminy s  $I_D=60\%$  na  $I_D=80\%$  je daleko těžší a je zapotřebí více práce než u zeminy s  $I_D=38\%$  a docílit  $I_D=80\%$ .

#### 4.1.2. Stanovení relativní ulehlosti in situ

Index relativní ulehlosti lze v terénu zjistit z parametrů získaných pomocí penetračních zkoušek, ať se již jedná o statickou či dynamickou penetraci.

##### 4.1.2.1. Statická penetrační zkouška

Statická penetrační zkouška (CPT) spočívá v zatlačování ocelového soutyčí zakončeného kuželovým hrotem kolmo do země. Zatlačování se děje konstantní

rychlostí a současně je měřeno několik veličin. Zatlačování obstarává zpravidla speciálně upravený nákladní automobil, přičemž protiváhu tvoří hmotnost samotného automobilu.

Základní měřenou veličinou mechanického hrotu je odpor na hrotu ( $q_c$ ), tedy odpor vůči pronikání hrotu do zeminy. Další měřenou veličinou je tzv. plášťové tření ( $f_s$ ), tj. tření pláště soutyčí (resp. pouze jeho části – třecí manžety) o okolní zeminu. Z naměřených hodnot a jejich poměru je možné stanovit typ zeminy a její vlastnosti. Měření s mechanickým hrotem je vhodné spíše v hrubozrnných a dobře propustných zeminách. Možnosti statické penetrace podstatně rozšiřuje použití modernějšího, tzv. elektrického hrotu. Tento typ hrotu umožňuje měření dalších veličin, z nichž nejběžnější je měření pórových tlaků v oblasti hrotu. Měření pak dává dobré výsledky i pro méně propustné, např. jílovité zeminy.

Stanovení relativní ulehlosti z výsledků CPT:

Existuje celá řada možností, jak ze statické penetrační zkoušky určit ulehlost. V Tabulce 13 je stanovení dle norského geotechnického institutu. U této klasifikace se nepřihlíží k zrnitosti písčitého materiálu.

Na základě praktických zkušeností s touto klasifikací se zjistilo, že nejlépe vyhovuje pro klasifikaci středně zrnitých písků (Matys, 1990).

Odpor na hrote $q_{51}$ (MPa)	Hutnost	Stupeň hutnosti $I_D$
< 2,5	veľmi kyprý	< 0,15
2,5 až 5,0	kyprý	0,15 až 0,35
5,0 až 10,0	středně hutný	0,35 až 0,65
10,0 až 20,0	hutný	0,65 až 0,85
> 20,0	veľmi hutný	> 0,85

**Tabulka 13:** Klasifikace hutnosti písku (NGI)

#### 4.1.2.2. Dynamická penetrační zkouška

Oproti CPT je při dynamické penetrační zkoušce pro zatlačování soutyčí využíváno mechanických rázů beranu, který je pouštěn ze stanovené výšky. Podle vrcholového úhlu a průměru hrotu, hmotnosti beranu a výšky, ze které na konstrukci soutyčí dopadá, se různé varianty penetračních souprav liší. Průběh zkoušky je ale u

všech obdobný. Výstupem zkoušky je vždy počet úderů potřebný k zaražení soutyčí o danou vzdálenost (běžně o 10 cm). Z počtu úderů se dále stanovuje měrný dynamický penetrační odpor  $q_{dyn}$ . Dle normy ČSN EN 72 1004 Geotechnický průzkum a zkoušení – Terénní zkoušky – Část 2: Dynamická penetrační zkouška je stanovení penetračního odporu  $q_{dyn}$  následovně.

$$q_{dyn} = [m / (m + m')] * r_d$$

Kde  $m$  je hmotnost beranu v kg,  $m'$  celková hmotnost nástavných tyčí, kovadliny a vodících tyčí v kg a  $r_d$  značí hodnoty odporu v Pa.

Během zkoušky lze také jako dodatečnou informaci měřit plášťové tření otáčením celého soutyčí pomocí momentového klíče. Vzhledem k charakteru zkoušky není možné měření pórových tlaků, a proto není vhodná do málo propustných zemin. Jejím využitím se proto omezuje spíše na zeminy hrubozrnné, případně jemnozrnné nad hladinou podzemní vody.

Pro stanovení relativní ulehlosti z výsledků dynamické penetrační zkoušky lze využít například vztahů dle Bondarika (Matys, 1990) v Tabulce 14 pro písky nebo dle Olberta (Matys, 1990) v Tabulce 15 pro štěrky a písčité štěrky.

Hutnosť pieskov	$q_{dyn}$ (MPa)
Velmi kyprý	< 2,5
Kyprý	2,5 až 5,0
Kyprý až stredne hutný	5,0 až 10,0
Hutný	10,0 až 20,0
Velmi hutný	20,0 až 40,0

**Tabulka 14:** Relativní hutnost písků z  $q_{dyn}$  ( Bondarik)

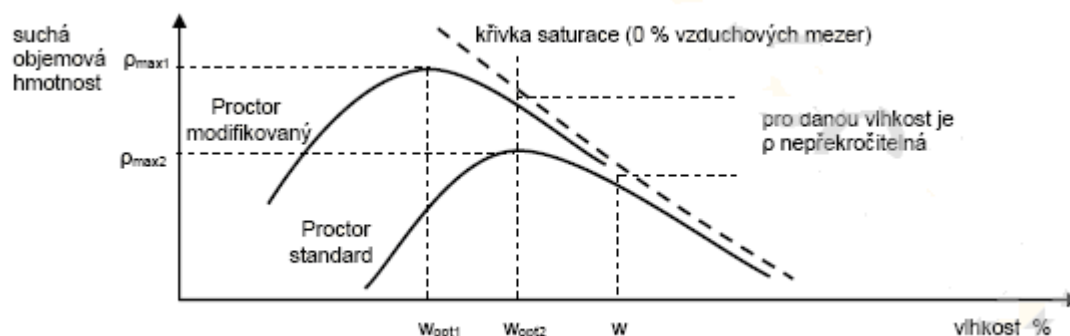
Hutnosť štrkov až písčitých štrkov	$q_{dyn}$ (MPa)
Kyprý	< 11,2
Stredne hutný	11,2 až 23,0
Hutný	> 23,0

**Tabulka 15:** Relativní hutnost štěrků a písčitých štěrků z  $q_{dyn}$  ( Obert)



## 4.2. Stanovení zhutnitelnosti

Princip hutnění: zemina se zhutňuje pomocí vnější hutnicí síly, snižuje se číslo pórovitosti, zvyšuje objemová hmotnost za optimální vlhkosti. Kvalitu hutnění ovlivňuje zrnitost zeminy a vlhkost. Zhutnitelnost se stanoví pomocí Proctorovy zkoušky (Obrázek 13). Kapilární menisky přitahují zrna k sobě největší silou za optimální vlhkosti.



**Obrázek 13:** Závislost suché objemové hmotnosti na vlhkosti při hutnění

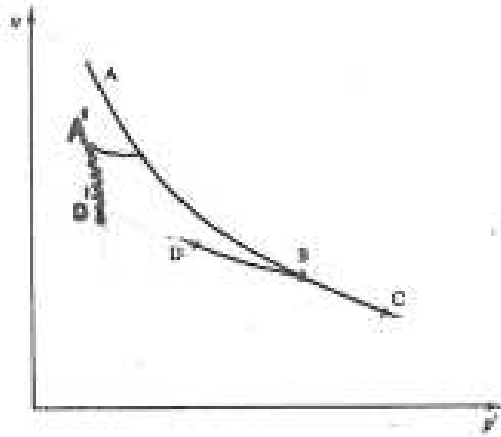
## 4.3. Teorie vibračního zhutňování

### 4.3.1. Zhutňování hrubozrnné zeminy

Isotropní konsolidací dochází vlivem vzrůstajícího středního napětí ke zvyšování efektivního napětí, čímž může dojít k dosažení čáry normální konsolidace NCL, a po opětovném odlehčení se zemina nachází v překonsolidovaném stavu. Tím dojde ke snížení čísla pórovitosti a nárůstu objemové hmotnosti zeminy.

U vibračního zhutňování dochází k překonsolidaci zeminy, tedy ke snížení čísla pórovitosti za konstantního středního napětí (Obrázek 14). Je vidět pohyb stavu zeminy přímo z bodu A do bodu D. Vibrace tedy způsobují přeskupování zrn bez změny napjatosti zeminy.

Podmínkou úspěšného vibračního zhutňování zeminy je to, že nesmí docházet k nárůstu pórového tlaku, který by způsobil pokles efektivního napětí, čímž by došlo ke „ztekucení zeminy“. Rozhodujícím faktorem je tedy podíl jemnozrnné frakce, která snižuje propustnost zeminy a zpomaluje disipaci pórových tlaků. Účinky vibračního zhutňování se tedy nejlépe projeví u hrubozrnných zemin s vysokou propustností. Vliv na účinek vibračního zhutňování zemin bude mít i granulometrie (tvar zrn).



**Obrázek 14:** Průběh vibračního zhutňování  $\dot{A} - D'$ . Na ose x je střední napětí a na ose y je číslo pórovitosti

### 4.3.2. Zhutňování jemnozrnné zeminy

Při stlačování i dynamickém zhutňování jemnozrnných zemin dochází v závislosti na obsahu jemných částic vlivem pomalé disipaci pórových tlaků k jejich nárůstu a k neodvodněnému zatížení. V zemině nemůže docházet k objemovému přetvoření a následkem snížení efektivního napětí dojde k poklesu smykové pevnosti a ztekucení zeminy. Jemnozrnnou zeminu tedy nelze takto zhutnit.

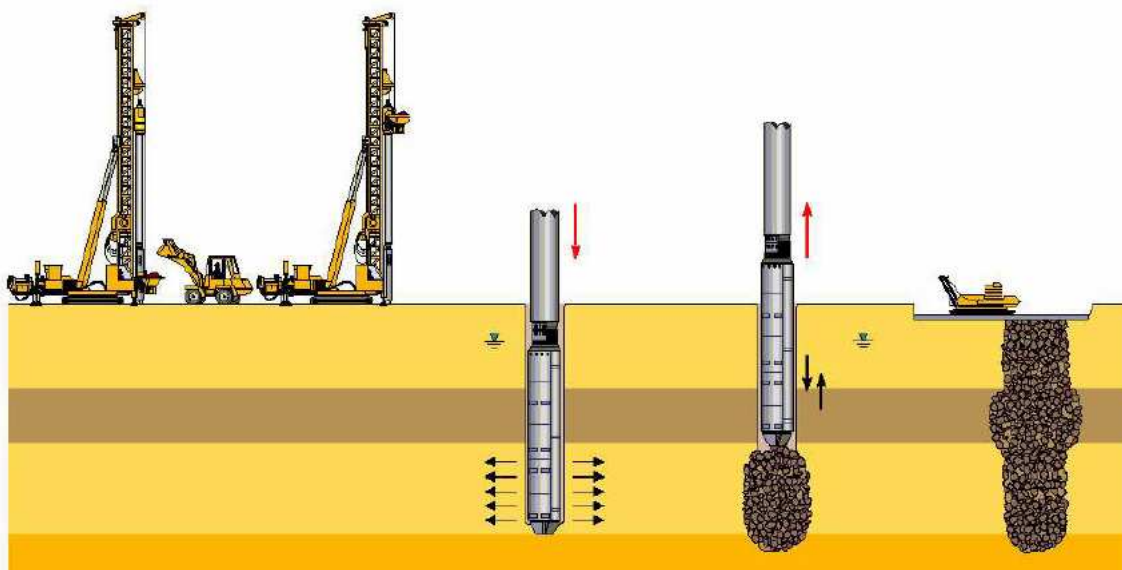
Z teorie je patrné, že čím větší obsah jemnozrnných jílovitých částic je obsažen v zemině, tím je zhoršena možnost vibračního zhutnění. Díky malému koeficientu filtrace dochází k pomalé disipaci pórových tlaků. U většího obsahu jemných částic (15%, dle jiných autorů až 30%) již nedocílíme kvalitního zlepšení zeminy pouhou vibrací, proto přistupujeme k aplikaci štěrkových pilířů, které fungují jako drén a tím urychlují konsolidaci základové půdy.

## 5. Štěrkové pilíře

Štěrkové pilíře jsou variantou, jak ekologicky, rychle a účinně vyztužit zemní těleso a vytvořit tak hlubinný základový prvek (Obrázek 15). Jedná se o prvky typu „displacement“. Používají se v zemině, která se sama pomocí vibroflotace nezhuťne. U smíšených a jemnozrnných zemin s podílem jemných částic 10 – 15% se nedá zhuťnění prokázat, proto se přistupuje k prokazatelnému zlepšování pomocí štěrkových pilířů.

Zlepšení spočívá ve zdokonalení mechanicko-fyzikálních parametrů soudržných i nesoudržných zemin - zvýšení tuhosti a smykové pevnosti štěrkových pilířů. Tuhost pilíře je mnohonásobně větší než tuhost okolní zeminy. Instalací se zvýší průměrné velikosti modulu přetvárnosti. Díky materiálu výplně, štěrku, působí jako svislé drény a tím urychlují konsolidaci.

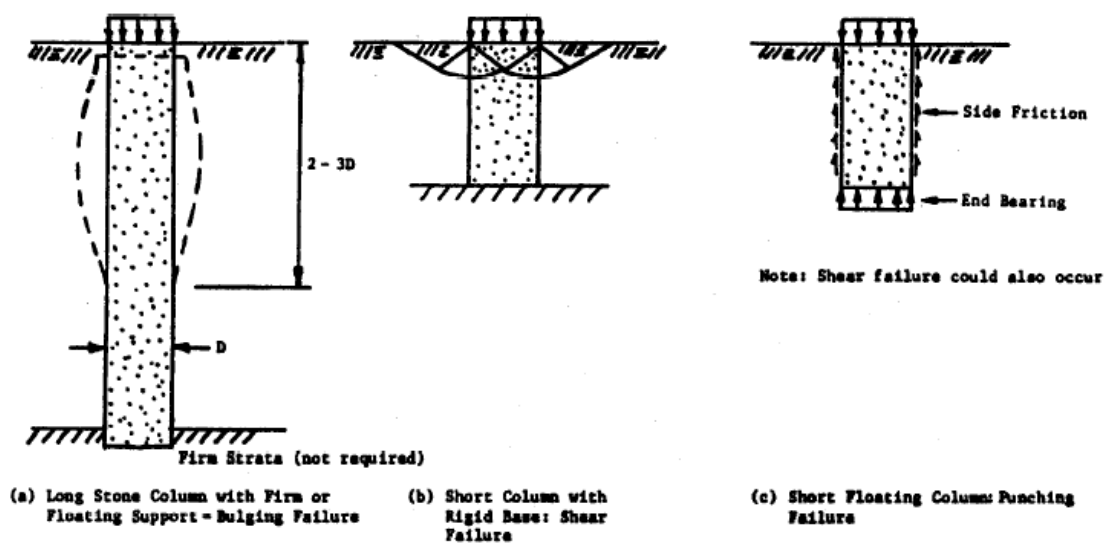
Tato technologie se osvědčila u zpevňování neulehlých násypů a měkkých, málo únosných zemin. Metodu lze uplatnit jak pro velké plochy, tak pro dílčí průmyslové stavby, vodní díla či např. válcové zásobníky.



**Obrázek 15:** Tvorba štěrkového pilíře (KELLER)

Štěrkové pilíře se musí budovat co nejsvisleji. Vibrační jehla se nesmí při formování pilíře odklonit o více než 1/20 délky.

Od klasických pilot se liší tím, že piloty jako tuhý prvek přenáší zatížení do základové půdy třením na plášti a napětím na patě. Štěrkové pilíře podléhají schopnosti okolní zeminy vzdorovat boulení pilíře viz Obrázek 16.



**Obrázek 16:** Mechanismus porušení osamělého pilíře v homogenní zemině (Barksdale, Bachus).

Dle normy ČSN, EN 14731 existují tři základní metody provádění štěrkových pilířů.

- A) Postup s horním plněním bez vodního výplachu
- B) Postup s horním plněním s vodním výplachem
- C) Postup s dolním plněním bez vodního výplachu

## 5.1. Materiál pro vibrované štěrkové pilíře

Materiál výplně vibrovaných štěrkových pilířů může být drcené kamenivo, štěrk nebo i druhotně recyklované materiály (beton, cihly). V ČR se převážně používá ostrohranného materiálu, avšak v zahraničí jsou pro tuto metodu běžně používány říční štěrky (např. Švýcarsko).

Materiál musí zůstat stabilní během procesu instalace, životnosti pilíře a odolný vůči místním podmínkám hydrogeologickým poměrům. Pro každý způsob výroby pilíře je dána zrnitost kameniva, aby vznikl ulehlý pilíř plně propojený s okolní zeminou (Tabulka 16). U použitého kameniva je nutné provést zkoušku zrnitosti, nasákavosti, otlukovosti a zkoušku na přítomnost síranů a dalších chemických látek.

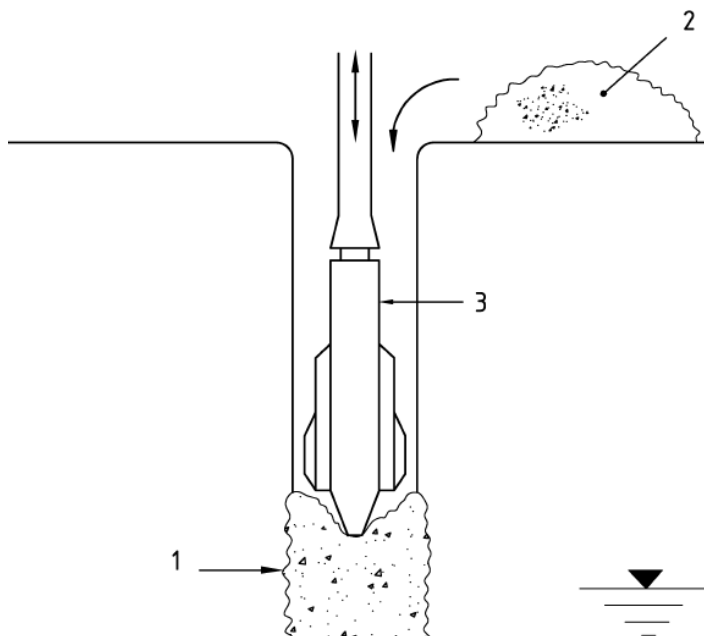
Způsob instalace	Zrnitost výplně v mm
S horním plněním bez vodního výplachu	40 až 70
S horním plněním s vodním výplachem	25 až 70
S dolním plněním bez vodního výplachu	8 až 50

**Tabulka 16:** Typická zrnitostní složení používaná při instalaci štěrkových pilířů dle ČSN 14731 Provádění speciálních geotechnických prací – Hloubkové zhutňování zemin

## 5.2. Postup s horním plněním bez vodního výplachu

Metoda se používá v nesoudržných zeminách nad hladinou podzemní vody. Pomocí vibrování, vlastní tíhy a vzduchového výplachu, který vychází z trysek. Po zavedení do požadované hloubky se po krátkém podržení vibrátor začne vytahovat. Do vibrací vzniklého otvoru se přisype menší množství čistého invertního sypkého materiálu (40 – 70 mm), následně se opět vibrátor zapustí a díky vibraci dochází k zhutňování sypkého materiálu a jeho propojování s okolní zeminou. Postupným opakováním fází nadzvednutí jehly, přidávání materiálu a jeho zavibrování vzniká ulehlý štěrkový pilíř až do úrovně povrchu (Obrázek 17).

Míru zhutnění sleduje obsluha stroje dle spotřeby elektrické energie nebo dle výkonu hydrostatického čerpadla.



**Obrázek 17:** Postup s horním plněním bez vodního výplachu (ČSN 14731, 2006)  
1 formování štěrkového pilíře, 2 zásoba sypkého zásypu, 3 vibrátor

### 5.3. Postup s horním plněním s vodním výplachem

Tato metoda je vhodná pro méně stabilní prostředí, kdy nelze použít metodu bez vodního výplachu. Vibrátor je oproti předchozí metodě opatřen tryskami pro vodní výplach, které se otevřou po vetknutí vibrátoru do podloží. Vibrátor pomocí vibrací svou vlastní vahou a vodním výplachem proniká do požadované hloubky. Během vibrování se částečně odplaví jemné částičky zeminy. Po dosažení požadované hloubky, ve které je vibrátor ponechán, se sníží přítok vody a do ústí vrtu se přisypává čistý inertní materiál. Ten se mísí s okolní zeminou a postupným povytahováním a opětným zavibrováváním vibrátoru vzniká štěrkový pilíř. Přítok vody musí být zachován až do dosažení povrchu. Vzniká tak kompaktní štěrkový pilíř spojený s okolní zeminou. Zrnění výplně je 25 - 75 mm

Tato metoda musí již v projektové fázi počítat s velkou spotřebou vody, kterou je nutné na stavenišťe dopravit, nejlépe z místního zdroje, což zvětšuje cenu technologie. Myslet se musí také na uložení a zlikvidování odpadní vody. Je nutné zřizovat jímky, odvodňovací příkopy apod.

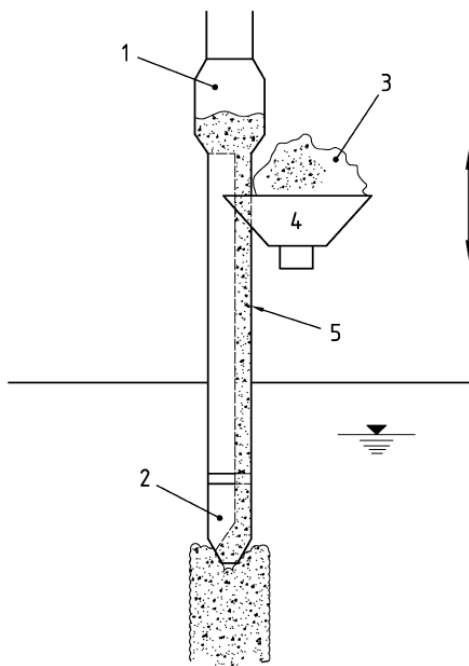
### 5.4. Postup s dolním plněním bez vodního výplachu

Tento postup využíváme pro nestabilní zeminy, které nedovolují povytahování vibrátoru, ten zůstává neustále ve vrtu během formování pilíře. Nahrazuje tak postup s vodním výplachem. Vibrátor používaný u této metody je opatřen plnicí trubicí, která je po straně vedena až ke špici jehly, jež je součástí vibrátoru.

Vrtný stroj je opatřen zásobníkem na kamenivo upevněným na speciálním pásovém nosiči s věží, který plní trubku vedoucí ke špici jehly. Nosič umožňuje zajištění přítlaku během zapouštění a hutnění. Sypký materiál působí v trubce jako zátko. Po zavibrování jehly do požadované hloubky pomocí vlastní tíhy, vibrací, stlačeného vzduchu a přítlaku se jehla lehce nadzvedne a tím se vysype kamenivo a vibrátor se opět stlačí na dávku materiálu, aby došlo k jeho zhutnění a pevnému spojení s okolní zeminou. Takto se celý proces opakuje až k dosažení povrchu podloží (Obrázek 18). Násypku je nutné doplňovat i během procesu pomocí nakladače. Pro tento způsob používáme menší zrnitost 8 – 50 mm.

Výhody použití vibrátoru se zásobníkem:

- Materiál je dávkován přímo z hrotu jehly – vytvoření plynulého sloupu
- Postačí jen jednorázový postup v daném místě
- U kritických zemin nedojte k prolomení základové půdy
- Lafeta, která vede vibrátor, zaručí svislou realizaci pilíře
- Nedochozí k rozbředání pracovní plochy

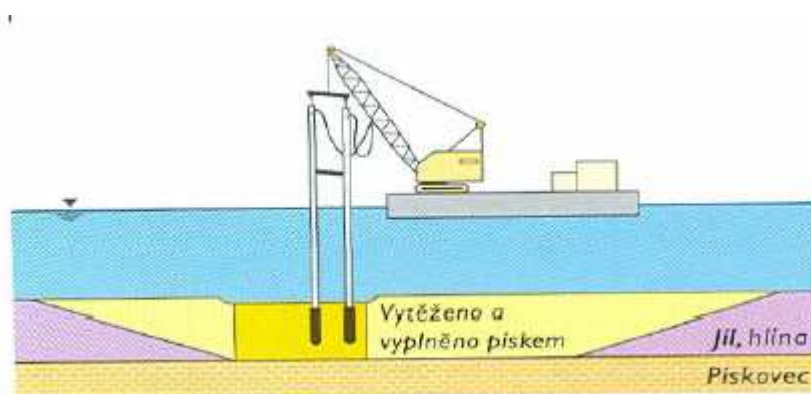


**Obrázek 18:** Postup s dolním plněním bez vodního výplachu (ČSN 14731, 2006)

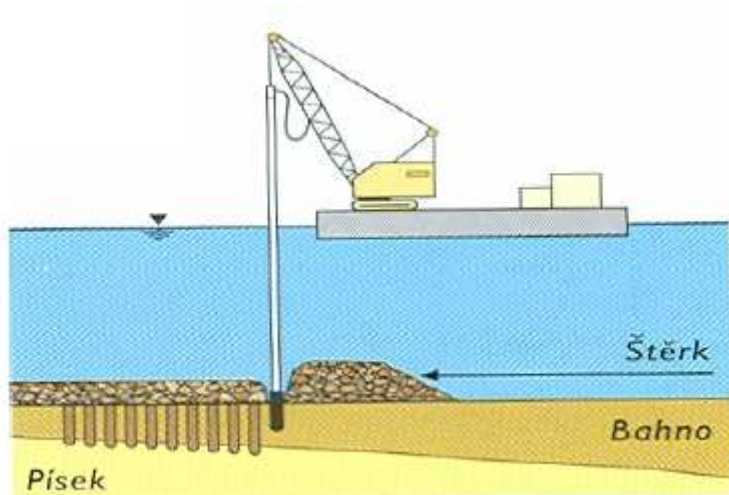
1 tlaková komora, 2 vibrátor, 3 zásoba kameniva, 4 plnicí koš na kamenivo, 5 plnicí trubka na kamenivo

## 5.5. Další varianty hloubkového vibračního zhutňování

Zhutňování velkých ploch nad i pod hladinou vody lze urychlit osazením více vibrátorů najednou. Slouží k tomu speciální konstrukce s větším počtem lafet. Nevhodná zemina se odtěží a vniklý prostor se vyplní pískem, který se pomocí vibrátorů zavibroavává do podloží (Obrázek 19). Při budování nábrežních zdí či mostních pilířů pod hladinou vody se obvykle postupuje tak, že se na dno nasype vrstva štěrku, který se opět zavibroavává do podloží (Obrázek 20).



**Obrázek 19:** Provádění vibroflotace pod vodou (KELLER)



**Obrázek 20:** Instalace štěrkových pilířů pod vodou (KELLER)

Pokud to základové poměry dovolí, je možné takto postupovat i na povrchu. Na určené místo se rozprostře vrstva štěrku, předem navržená (vypočítaná), který se bez či s pomocí vodního výplachu zavibrovává, vzniká tak trychtýř, do kterého zapadá štěrk. Vodní výplach udržuje prstenec kolem otvoru a zrychluje zapouštění jehly. Výhodou této metody je to, že není nutné speciální vrtný stroj se zásobníkem, ale vibrátor lze volně zavěsit na jeřáb či výložník rypadla. Objem propadu štěrku do vrtu odpovídá nanesené vrstvě. V tomto případě není obvykle nutné vrstvu nahoře dohutňovat.

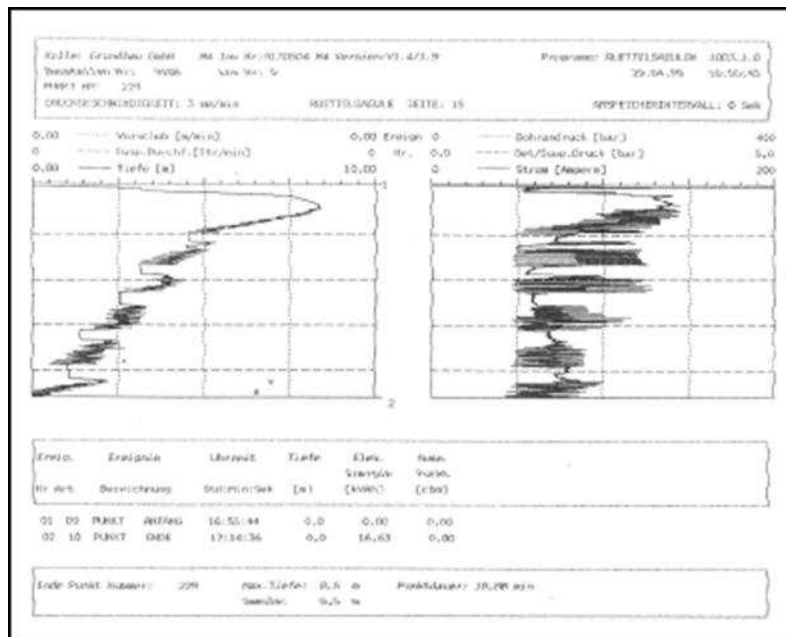


## 6. Kontrola provádění hloubkového vibračního zhutňování

Plán kontroly se stanoví ještě před započítím prací a je neustále ponechán na staveništi. Jsou v něm uvedeny kontrolní parametry, které zapisuje odpovědný pracovník. Zaznamenává zde stav staveniště, jeho základové poměry a překážky v podloží, které zabraňují průniku vibrační jehly. Každé nové dílčí vlastnosti základové půdy je nutné zaznamenat. Díky tomu se vyhodnotí další postupy prací.

Během provádění se vytváří průběžný záznam, který musí obsahovat všechny nezbytné údaje dle ČSN 14731 Provádění speciálních geotechnických prací – Hloubkové zhutňování zemin:

- umístění a referenční číslo každého bodu
- dobu provádění každého bodu
- povětrnostní podmínky
- metodu zhutňování
- hloubku zapuštění v každém místě
- čas potřebný k dosažení požadované hloubky
- čas potřebný k dosažení povrchu
- spotřebu energie k zapuštění a k hutnění
- překážky či jiné okolnosti vedoucí k nemožnosti provádění
- u štěrkových pilířů množství kameniva použitého pro každý pilíř
- při použití vodního výplachu nebo při postupu s dolním plněním se zaznamenávají události, které vedly k vytažení vibrátoru během formování pilíře



**Obrázek 21:** Záznam hutnění z počítače v kabině stroje (KELLER)

Již obsluha vrtné soupravy díky počítači umístěného v kabině kontroluje kvalitu provádění. Z čerpaných dat vidí, v jaké je hloubce, kolik elektrické energie spotřebává, čas, posun, přítlak (Obrázek 21). Tato data se také přeměňují na grafický záznam z vrtání každého bodu. Materiály se schraňují a slouží pro vyhodnocení kvality každého vrtu. Pokud se zjistí nepříznivý účinek na okolní podloží, je nutné navrhnout monitoring.

U hloubkového vibračního zhutňování se do monitoringu přidává také množství doplněného plniva, jeho druh, původ a frakce. V případě, že se vrt nedoplňuje zásypanem, sleduje se sedání terénu.

U vibrovaných štěrkových pilířů je velmi důležité sledovat kvalitu přidávaného štěrku, spotřebované množství pro stejnou délku pilíře a také vyhodnotit každou změnu v dodávce kameniva.

## 6.1. Zkoušení kvality provedení

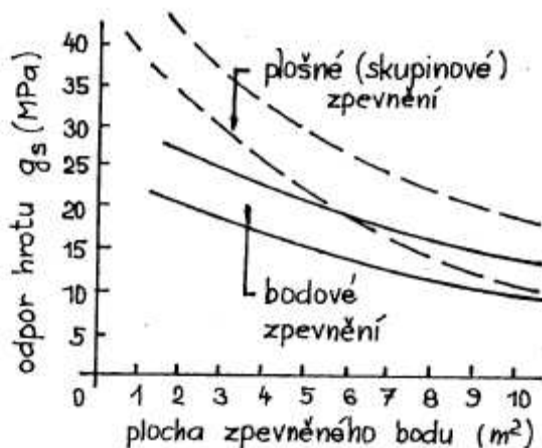
### Penetrační zkoušky

Penetrační zkoušky, jak již bylo popsáno v kapitole 4, mají velmi podstatný význam při posuzování kvality provedení.

Tyto sondy mohou procházet přímo štěrkovými pilíři a posuzovat jejich stupeň ulehlosti nebo při relativně blízkém rozponu štěrkových pilířů mohou sloužit ke stanovení rozdílu ve velikostech deformačního modulu v zemině mezi pilíři před a po zlepšení (Marek, 2005).

Účinek provedení zpevnění hloubkovou vibrací, ověřený penetrační zkouškou je různý podle rozsahu, geometrie a hloubky hutnění (velkoplošné zpevnění, plošné omezené zpevnění) (Chlost, 1989).

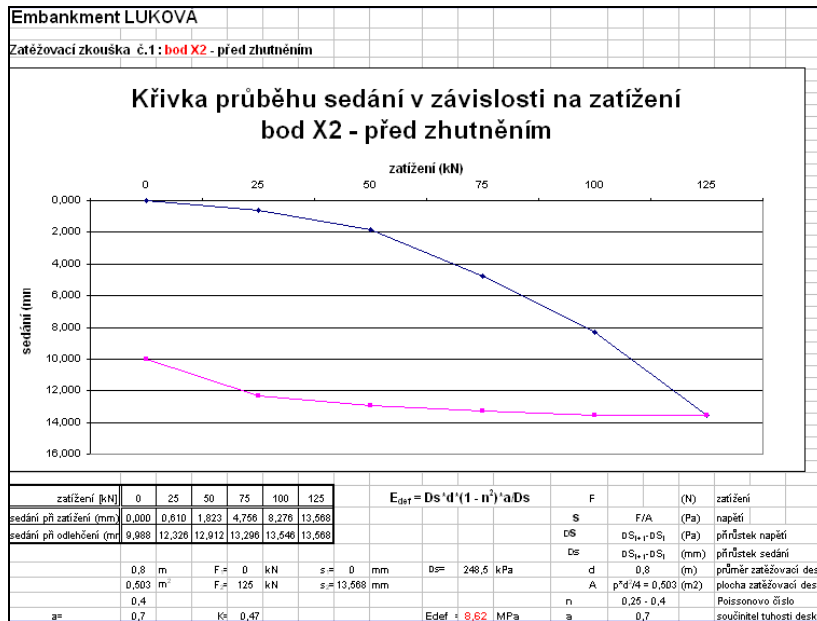
Na Obrázku 22 je znázorněn vztah dosaženého zpevnění na účinné ploše jednoho bodu pro různé rozsahy zpevnění a různé typy vibrátorů. Hodnoty odporu hrotu při penetraci bodového zpevnění jsou pod hodnotami, jež je dosahováno u velkoplošných zpevnění, zejména je-li menší vzdálenost pilířů v síti (Chlost, 1989).



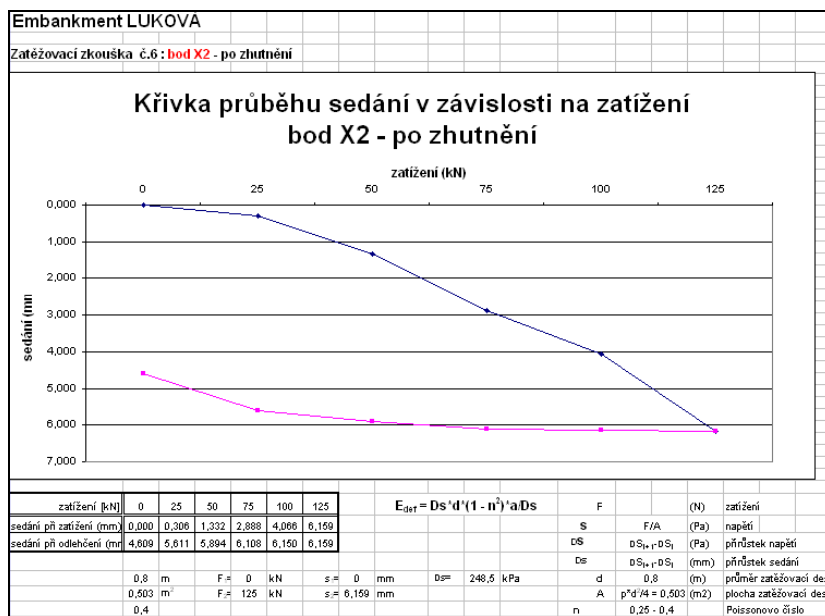
**Obrázek 22:** Vliv rozsahu zpevněné plochy na účinnosti zpevnění (Jebe et al., 1983)

### Statická zatěžovací zkouška

Statickou zatěžovací zkouškou se stanovuje modul deformace podloží. Zařízení je vybaveno elektronickými snímači síly, tlaku a elektronickou vyhodnocovací jednotkou. Zkouška dostatečně vypovídá o kvalitě hutnění základové půdy. Jak je patrné ze záznamů zkoušky u železničního násypu v obci Luková, naměřené sedání po odlehčení je před zlepšením násypu 10 mm a následně 4,5 mm (Obrázek 23 a 24).



**Obrázek 23:** Záznamy statických penetračních zkoušek násypu Českých drah v obci Luková před provedením šterkových pilířů. Osa x značí zatížení v kN a osa y sedání v mm (KELLER)



**Obrázek 24:** Záznamy statických penetračních zkoušek násypu Českých drah v obci Luková po provedení šterkových pilířů. Osa x značí zatížení v kN a osa y sedání v mm (KELLER)

## **7. Použití hloubkového zlepšování ve výsypkách základových půd**

### **7.1. Výsypka jako základová půda**

Vlivem těžby nerostných surovin, a to především díky těžbě hnědého uhlí, vznikala potřeba k ukládání odpadního nevyužitého materiálu především jílovité povahy. Vznikaly tak prostorově obsáhlé plochy, které se budovaly pouze nasypáním materiálu. Neprováděly se žádné upravující opatření jako např. hutnění zeminy.

Výsypky jsou sypaná tělesa obsahující i velké kusy hornin. V důsledku toho v nich vzniká dvojí pórovitost, intragranulární (pórovitost nasypaného materiálu) a intergranulární (pórovitost mezi jednotlivými hroudami).

Celková pórovitost, tedy ta původní navýšená o mezerovitost, může u čerstvě nasypané výsypky dosahovat až 70% (Zahradník, 2008)

Dnes jsou rekultivované výsypky využívány k výstavbě nadzemních objektů či liniových staveb. Díky dvojí pórovitosti a složitým hydrogeologickým podmínkám se projektanti potýkají s velmi odlišným geotechnickým prostředím.

Vlivem času, vlhkosti, zvětrávání a tíhy nadložních vrstev se z výsypek stává opět jílovitá zemina. Proto je důležité brát v úvahu rozdílnost svrchní a spodní výsypky.

Rozdílné sedání vnitřních a vnějších výsypek nesmí být také podceněno. Vnější výsypky vykazují vlivem nepřekonsolidovaného podloží větší sedání než výsypky vnitřní, tedy výsypky uvnitř lomu.

Hlavním problémem u výsypek je nehomogenita prostředí. Variantu zlepšení výsypek jako základové půdy nabízí instalace štěrkových pilířů, které právě nestejnorodé prostředí do určité míry homogenizují tím, že pilíře vyplněné stejnorodým kamenivem jsou od sebe vzdáleny cca 1 – 3 m, čímž vzniká jednotnější základová půda. O použití této metody na výsypkách můžeme uvažovat díky druhu materiálu, zrnitostnímu složení a penetrovatelnosti výsypek. Tato úvaha byla potvrzena např. při zkoušení metody hloubkového zhutňování zemin ve Všebořicích, jak je popsání níže.

### **7.2. Zkoušky štěrkových pilířů Všebořice u Ústí nad Labem**

Příkladem využití metody hloubkového zhutňování na výsypkách je stavba dálnice D8. K ověření vhodnosti této metody provedla společnost Zakládání staveb, a.

s. sérii zkoušek u Všebořic u Ústí nad Labem, které vyhodnotil Doc. Ing. Jan Masopust, CSc. Společnost Zakládání staveb, a.s. ověřovala tak použití štěrkových pilířů k homogenizaci výsypek a díky drénování štěrkového materiálu k urychlení konsolidace zeminy.

Prvotně zkoušky musely ověřit, zda je možné vibrační jehlu zavibrovat do výsypkového materiálu, čas a výkon provedení s použitím pouze vzduchového výplachu a nutnou spotřebu výplňového materiálu.

Po ověření použitelnosti metody byla realizována dvě zkušební pole štěrkových pilířů. Ještě před započítáním prací byly provedeny statické penetrační zkoušky, které určily geotechnický profil na staveništi a následně sloužily k ověření zlepšení výsyvky pomocí štěrkových pilířů.

Geotechnický profil:

0,0 – 1,0 m – navážky štěrkovité, písčité a hlinité

1,0 – 3,0 m – navážky štěrkovité a písčité s hlinitou výplní

> 3 m – hlinitojílovité zeminy až tuhé konzistence

První skupina sedmi pilířů byla provedena do hloubky 8 m v trojúhelníkovém rastru o straně 1,50 m.

Celková plocha testovacího území byla 12,57 m<sup>2</sup>, plocha pilířů činila 2,83 m<sup>2</sup>.

Vzhledem k nemožnosti zhutnit zeminu do hloubky 1 m, byla tato hloubka vyjmuta z vyhodnocení testu.

Výsledky penetrace jsou uvedeny v Tabulce 17 včetně procentuálního zlepšení odporu na hrotu a plášťového tření. Tabulka 18 udává edometrické moduly před a po aplikaci štěrkových pilířů.

Vrstva č. (interval)	Penetrační sonda P1		Penetrační sonda P7		QST7/QST1 x 100 %	FS7/FS1 x 100 %
	QST1 (MPa)	FS1 (MPa)	QST7 (MPa)	FS7 (MPa)		
1. (0,0 – 2,0)	7,38	0,099	21,26	0,164	288,1	165,7
2. (2,0 – 7,0)	1,27	0,062	2,33	0,099	183,5	159,7

**Tabulka 17:** Shrnutí výsledků penetrační zkoušky pro 1. skupinu pilířů

Vrstva č. (interval)	zemina před zhutněním	zemina po zhutnění	štěrkový pilíř	zemina s pilíři
	$E_{det1}$ (MPa)	$E_{det2}$ (MPa)	$E_{det3}$ (MPa)	$E_{det4}$ (MPa)
1. (0,0 – 2,0)	6,63	10,98	50,0	19,76
2. (2,0 – 7,0)	4,15	6,60	50,0	16,37

**Tabulka 18:** Moduly deformace stanovené z výsledků penetračních zkoušek

Druhou prováděnou skupinou bylo další sedm pilířů délky 8 m o hraně trojúhelníkového rastru 2,50 m.

Celková plocha základové půdy byla 36, 53 m<sup>2</sup> a plocha pilířů byla 3, 14 m<sup>2</sup>.

Vzhledem k nemožnosti zhutnit zeminu do hloubky 1 m, byla tato hloubka vyjmuta z vyhodnocení testu.

Výsledky penetrace jsou uvedeny v Tabulce 19 včetně procentuálního zlepšení odporu na hrotu a plášťového tření. Tabulka 20 udává edometrické moduly před a po aplikaci štěrkových pilířů.

Vrstva č. (interval)	Penetrační sonda P3		Penetrační sonda P9		QST9/QST3 x 100 %	FS9/FS3 x 100 %
	QST1 (MPa)	FS1 (MPa)	QST7 (MPa)	FS7 (MPa)		
1. (0,0 – 2,0)	2,58	0,056	8,72	0,192	337,9	342,8
2. (2,0 – 7,0)	1,26	0,081	1,51	0,087	119,8	107,4

**Tabulka 19:** Shrnutí výsledků penetrační zkoušky pro 2. skupinu pilířů

Vrstva č. (interval)	zemina před zhutněním	zemina po zhutnění	štěrkový pilíř	zemina s pilíři
	$E_{def,1}$ (MPa)	$E_{def,2}$ (MPa)	$E_{def,3}$ (MPa)	$E_{def,4}$ (MPa)
1. (0,0 – 2,0)	5,60	12,80	50,0	15,99
2. (2,0 – 7,0)	5,40	5,80	50,0	9,60

**Tabulka 20:** Moduly deformace stanovené z výsledků penetračních zkoušek

Dalším samostatným pokusem bylo vyhodnocení čtyř pilířů hloubky 8 m v osových vzdálenostech 1, 80 m (Tabulka 21 a 22).

Celková zlepšovaná plocha byla velikosti 7,29 m<sup>2</sup> a plocha pilířů 1,70 m<sup>2</sup>.

Vrstva č. (interval)	Penetrační sonda P5		Penetrační sonda P11		QST11/QST5 x 100 %	FS11/FS5 x 100 %
	QST5 (MPa)	FS5 (MPa)	QST11 (MPa)	FS11 (MPa)		
1. (0,0 – 2,0)	5,17	0,107	5,91	0,139	115,0	129,9
2. (2,0 – 7,0)	1,14	0,065	1,25	0,072	109,6	110,8

**Tabulka 21:** Shrnutí výsledků penetrační zkoušky pro skupinu čtveřice pilířů

Vrstva č. (interval)	zemina před zhutněním	zemina po zhutnění	šterkový pilíř	zemina s pilíři
	$E_{def1}$ (MPa)	$E_{def2}$ (MPa)	$E_{def3}$ (MPa)	$E_{def4}$ (MPa)
1. (0,0 – 2,0)	7,16	9,31	50,0	18,79
2. (2,0 – 7,0)	4,35	4,82	50,0	15,35

**Tabulka 22:** Moduly deformace stanovené z výsledků penetračních zkoušek u skupiny čtveřice pilířů

### 7.2.1. Závěr

Výsledky jednotlivých měření prokázaly zlepšení základové půdy díky provedení šterkových pilířů. Dokazuje to nárůst penetračního odporu při provádění statických penetračních zkoušek. Dle Masopusta je patrný vliv hustoty šterkových pilířů, a to u 1. skupiny (rastr 1,50 m) pilířů byl nárůst modulu deformace 3,5x, u 2. skupiny (rastr 2,50 m) nárůst 2x. U skupiny čtyř pilířů se zlepšení projevilo trojnásobným nárůstem deformačního modulu.

Je patrné, že metody hloubkového zhutňování zemin, potažmo šterkové pilíře, mohou být vhodným nástrojem ke zlepšení výsypek, proto jsou výsypky zakresleny v mapě použitelnosti metod.

Jak právě poukazuje mapové schéma e, použití metody hloubkového zhutňování zemin se nabízí i v dalších antropogenních útvarech, jako jsou výsypky z těžby kaolínu, bentonitu atd. či další navážky různorodé povahy.



## 8. Reporty z praktických částí na stavbách

Reporty jsou ze dvou staveb, kterých jsem se účastnila a na kterých bylo využito hloubkového zlepšování zemin. Projekty realizovala společnost KELLER, zde jsem našla i pečlivého ze které se mi pečlivě věnoval pan Ing. Julius Mojžíš, který mi i nadále poskytoval data pro mou práci a byl i ochotným konzultantem.

### 8.1. Rychlostní komunikace R55 - stavba 5503 Skalka - Hulín

Na této stavbě jsem si prakticky ozkoušela metodu aplikace štěrkových pilířů s dolním plněním.

Projektovaná akce je součástí souboru staveb rychlostní silnice R55 Olomouc – Břeclav (Obrázek 25). Stavba navazující na severovýchodní obchvat Otrokovic je navržena jako R 24,5/120 o délce 10,8 km. Stavba je vedena v nezastavěném území převážně po zemědělských plochách.



Obrázek 25: Situace zájmového území

Zájmové území vede přes karpatskou předhlubeň, tvoří jej převážně pliocénní písky a jílovitá souvrství.

Inženýrskogeologický průzkum ke stanovení základových poměrů byl prováděn pomocí penetrací a vrtaných sond v místech mostních objektů. Např. v staničení km 9,018 byla pomocí penetračního sondování prováděného firmou Geotrend Slaný stanovena relativní ulehlost v sondě P-224 v průměru 0,15 pro kvartérní uloženiny a 0,27 pro pliocénní uloženiny.

Tyto hodnoty a další průzkumné práce poukázaly na nutnost zvýšení únosnosti základové půdy a urychlení konsolidace při stavbě vysokých násypů. Velká část konsolidace by měla proběhnout již během výstavby.

Podzemní voda byla zachycena v hloubkách 1 – 1,8 m pod terémem.

Metodou hloubkového zhutňování zemin – postup s dolním plněním bez vodního výplachu – byly zlepšeny jak úseky v linii stavby, tak i přeložky silnic (Obrázek 26).



**Obrázek 26:** Přeložka místí komunikace – štěrkové pilíře pod vysokým náspem

Úseky zlepšované pomocí štěrkových pilířů:

SO 113 Tlumačov Sanace podloží pod násypem SO 121 v km 0,130 – 0,170 a 0,220 – 0,290

SO 011 Tlumačov Sanace podloží pod násypem SO 101 v km 2,600 – 2,685 a 4,900 – 5,300

SO 207 Chrástčany Most přes místní komunikaci v km 9, 015 812

SO 012 Hulín Sanace podloží pod násypem SO 102 v km 8,840 – 8,900 a 9,050 – 9,120

Celkem na úseku Skalka – Hulín bylo realizováno 7441 ks štěrkových pilířů o celkové délce 42 531 m. Vytyčení vpichů bylo provedeno převážně v trojúhelníkovém rastru (SO 113, SO 011, SO 207) o velikosti strany 2,1 – 2,6 m. Při aplikaci štěrkových pilířů v místě mostního objektu SO 207, kde bylo sanováno podloží pod násypem komunikace SO 102, a v místě zakládání mostu byl zvolen čtvercový rastr o straně 1,4 m. Průměr vpichů byl volen od 600 mm do 800 mm.

Jako výplň vibrovaných pilířů bylo použito kamenivo zdvojené frakce 8/32 z kamenolomu Kobeřice.

U mostních objektů byly vibrované pilíře použity jako hlubinné založení pod základovou deskou mostních pilířů.

Kvalita zlepšení základové půdy byla ověřována dynamickou penetrací i v průběhu prací.

Fotky z výstavby pilířů deklarují Obrázky 27 – 30.



**Obrázek 27:** Metoda s dolním plněním bez vodního výplachu. Stroje společnosti KELLER



**Obrázek 28:** Linie stavby R55 - Tlumačov



**Obrázek 29:** Zhotovený štěrkový pilíř



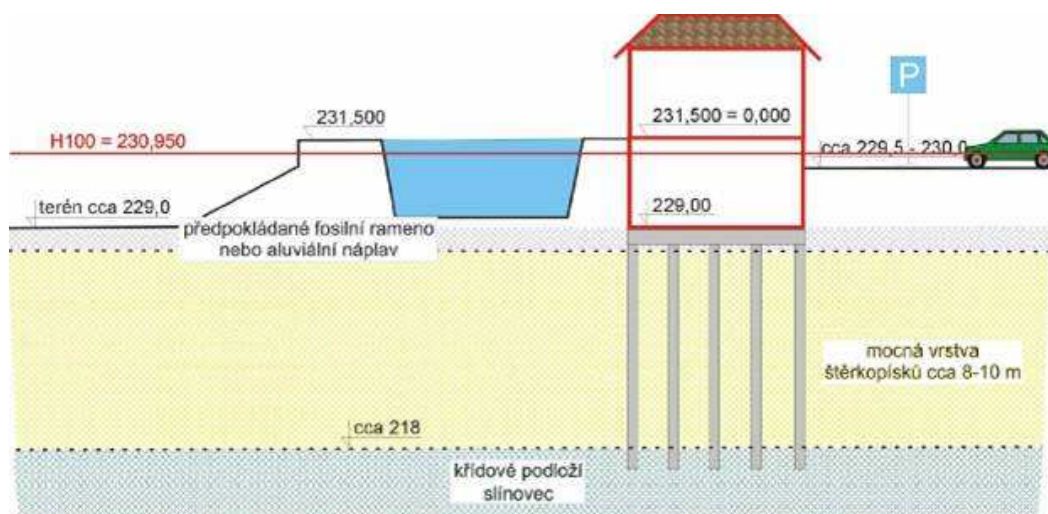
**Obrázek 30:** Vibrační jehla se vzduchovým výplachem

## 8.2. Letní koupaliště v Hradci Králové

Zlepšování základové půdy prováděla společnost KELLER, která mi umožnila přístup na stavbu, poskytla cenná data, seznámila s metodami vibroflotace a tvorbou štěrkových pilířů metodou s dolním plněním.

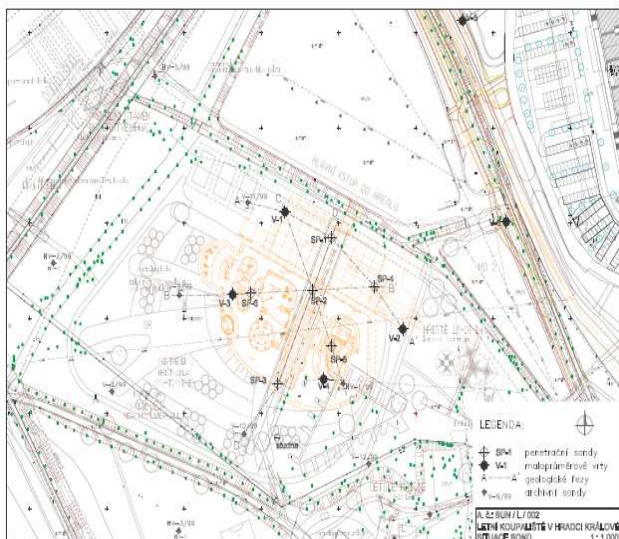
Jedná se o rozsáhlý investiční záměr města Hradec Králové, které nechalo vybudovat „sportovně relaxační centrum se zaměřením na vodní sporty a rekreaci“ v oblasti Pivovarská fošna (Obrázek 31). Projekt zahrnoval složitý systém vodních bazénů, technické zázemí, komerční objekty, parkoviště atd.

Oblast leží v České křídové pánvi v tzv. Pardubické tabuli. V těsné blízkosti areálu teče řeka Orlice. Zájmové území je lemováno protipovodňovými hrázi.



**Obrázek 31:** Příčný řez areálem Pivovarské fošny

Geologické, hydrogeologické a inženýrskogeologické průzkumné práce v areálu obsahovaly zkoušky dynamické penetrace, průzkumné vrty a také byly využity archivní sondy přímo v místě (Obrázek 32). Z odběrů vzorků byla stanovena křivka zrnitosti a provedena zkouška zhutnitelnosti.



**Obrázek 32:** Situační schéma rozmístění penetračních sond, vrtů a archivních sond

### **Geologický profil:**

- 0 – 3,5 m hlinito-aluviální náplavy, organogenní výplně fosilního ramene Orlice
- 3,5 – 10,5 m štěrkopísky údolní terasy
- >10 m křídové slínovce

V areálu bylo průzkumnými pracemi odhaleno fosilní rameno Orlice (holocén), které výrazně ovlivňuje směr proudění podzemní vody v kvartérní zvodni a lze je klasifikovat jako nevhodnou základovou půdu (Ing. Jiří Petera - JIP Hradec Králové, 2005).

Hladina podzemní vody byla zachycena v úrovni 1 – 2 m pod terénem, mocnost zvodně je 9 m. Koeficient  $k = 6,2 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Základová spára nadzemních objektů (budovy, parkoviště, komunikace) byla umístěna do střídajícího se prostředí navážek, aluviálních náplavů a do organogenní výplně fosilního ramena řeky Orlice nebo na povrch štěrkopísčitých teras. Jednalo se tedy o značně nehomogenní prostředí s nižší geotechnickou kvalitou zemin, a to malou únosností a rozdílnou stlačitelností.

Objekty zakládané pod hladinou podzemní vody, především bazény, byly navrženy ve štěrkopísčité terase, která byla silně zvodnělá a neumožňovala zakládat stavby bez předchozích opatření.


### **Objekty pod hladinou podzemní vody:**

V místě založení objektů pod hladinou podzemní vody bylo z důvodu nutnosti snížení koeficientu filtrace navrženo zlepšení základové půdy pomocí vibroflotace. Pro lepší a rychlejší instalaci bylo vnikání doplněno vodním výplachem (Obrázek 37).

Bylo zhotoveno 560 vpichů do hloubky 6,50 m pod terén (Obrázek 33). Kvalita provádění byla sledována pomocí záznamů parametrů hutnění z počítače hutnicí soupravy. Po celou dobu instalace byly prováděny čerpací zkoušky a zkoušky dynamické penetrace (Obrázek 38). Ty zjistily v některých místech menší úroveň zlepšení, proto bylo nutné přistoupit k provedení dohušťovacích vpichů v počtu 23 kusů délky 5, 60 m.

Porovnání penetrací před a po provedení zlepšení jasně ukazuje Obrázek 34. Červeně je znázorněna zkouška před vibroflotací, kde jsou patrná místa s minimálním odporem proti hrotu, a zeleně je penetrační zkouška po aplikaci vibroflotace. Je zde velmi patrný, až pětinasobný, nárůst penetračního odporu, čímž prokazatelně dochází ke zlepšení základové půdy.



<b>Hlubkové zhutňování</b>										<b>System Keller</b>					 <b>speciální zakládání,</b> <b>spol. s r.o.</b> 140 00 Praha 4 Na Pankráci 30 Telefon 226 211 301 Fax 226 211 300	
<b>Denní přehled č. 1</b>										<b>Číslo stavby: 12 / 561 / 9114</b>						
Po	Út	St	Čt	Pá	So	Ne	D	N	Stavba: <b>Letní koupaliště</b>							
				X			X		Místo: <b>Hradec Králové</b>							
Datum: 05.06.2009																
Objednatel: GEOSAN GROUP a.s.																
Použitá technologie:																
RDV			RSV			VSS			FSS			BSS			BRS	
Zhutňování nesoudr. zemín			Štěrkový pilíř			Injektovaný štěrkový pilíř			Betonový pilíř			Betonový pilíř			Betonový pilíř	
X																
Výkaz výměr			Stroj č. 4.10.0158			Pracovní plán cca -3,00 = 228,50										
Pořadové číslo	Pořadové číslo celkem	Bod číslo	Hloubka pilíře [m]	Délka pilíře [m]	Hluchá délka [m]	Štěrka [m²]	Injektovaná délka [m]	Pořadové číslo	Pořadové číslo celkem	Bod číslo	Hloubka pilíře [m]	Délka pilíře [m]	Hluchá délka [m]	Štěrka [m²]	Injektovaná délka [m]	
1	1	241	6,00	6,00				27	27	209	6,50	6,50				
2	2	201	6,00	6,00				28								
3	3	161	6,50	6,50				29								
4	4	162	6,40	6,40				30								
5	5	242	6,50	6,50				31								
6	6	202	6,50	6,50				32								
7	7	243	6,50	6,50				33								
8	8	163	6,50	6,50				34								
9	9	203	6,50	6,50				35								
10	10	244	6,50	6,50				36								
11	11	164	6,50	6,50				37								
12	12	204	6,50	6,50				38								
13	13	165	6,50	6,50				39								
14	14	245	6,50	6,50				40								
15	15	205	6,50	6,50				41								
16	16	166	6,50	6,50				42								
17	17	246	6,50	6,50				43								
18	18	206	6,50	6,50				44								
19	19	167	6,50	6,50				45								
20	20	247	6,50	6,50				46								
21	21	207	6,50	6,50				47								
22	22	168	6,50	6,50				48								
23	23	248	6,50	6,50				Součet 1 - 27		Počet bodů	174,4					
24	24	208	6,50	6,50				Převod z Dp č. 1								
25	25	169	6,50	6,50				Celkem		27	174,4					
26	26	249	6,50	6,50												
<b>Denní protokol</b>			Začátek práce	Konec práce	Počet pracovníků	Teplota	Počasí									
			7:00 hod	20:00 hod	4 + 2	12 °C	Zataženo									
Zvláštní události ( např. změna podloží, přerušení prací, atd. )																
Brno, 30.6.2009																
Místo, Datum, podpis Keller - spec. zakládání, spol s r.o.										Místo, Datum, podpis objednatele					PC-Formularstand: 2006-01-24	

**Obrázek 33:** Denní záznam z provádění vibroflotace

**RAMMSONDIERUNG**

gem. ÖNORM B4419, Teil 1

GOK von RS 1 vv = m = müA

Nr.: **RS 1 vv** & **RS 1 nv**

speciální zakládání spol. s r.o.

Na Pankráci 30  
140 00 Praha 4

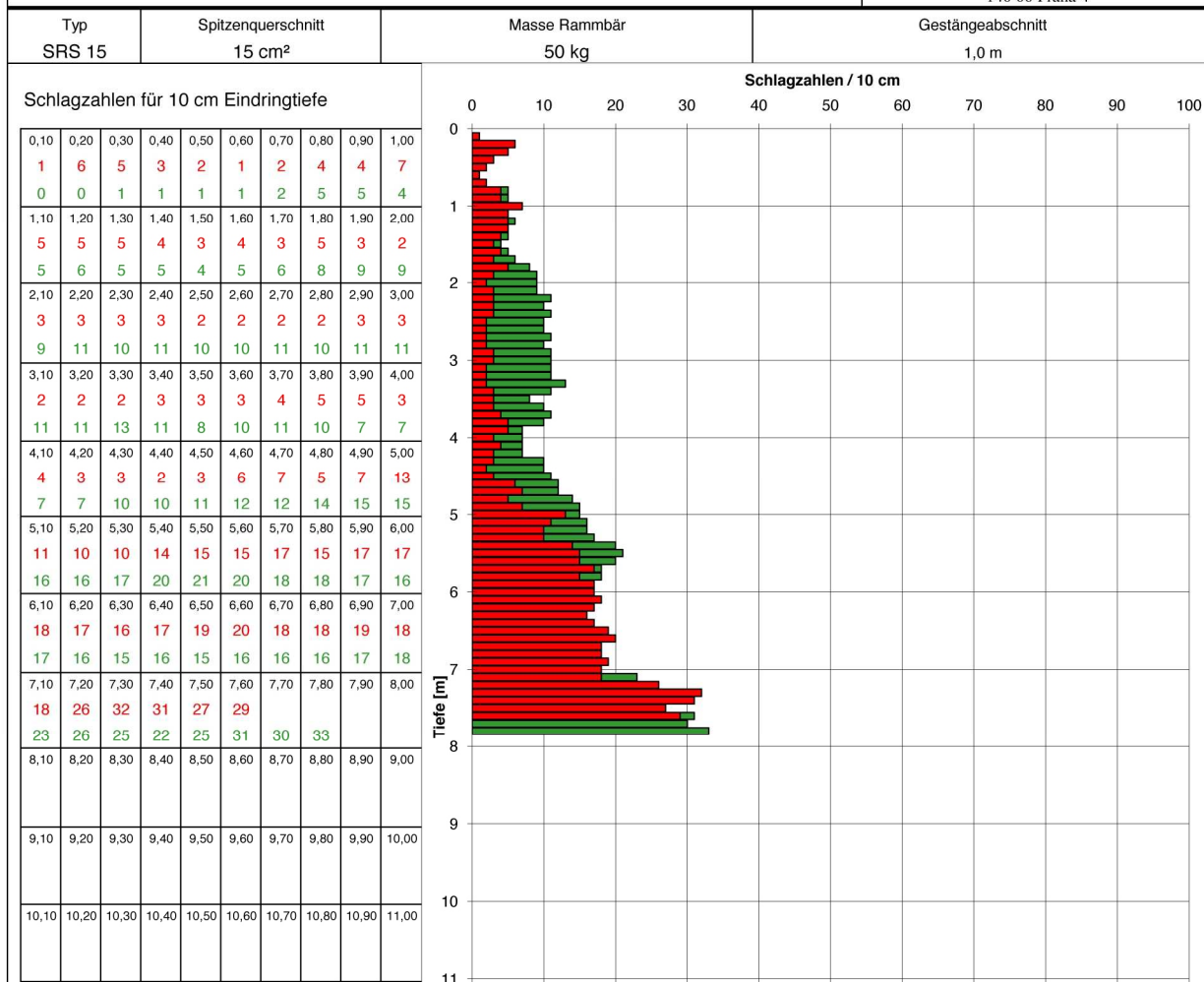
Bauvorhaben: 12 / 561 / 911

Koupaliště Hradec Králové

Ort: Hradec Králové

Auftraggeber: GEOSAN - GROUP, a.s.

Datum: 4.6.2009 &amp; 10.6.2009




**Obrázek 34:** Záznam dynamické penetrace před a po provedení vibroflotace v místech založení objektů pod hl. p. v.

### Objekty nad hladinou podzemní vody:

V místě nadzemních objektů jako jsou např. budovy sloužící veřejnosti, technické zázemí, komunikace atd. byla dle průzkumu zjištěna dosti nestejnoroďá a geotechnicky nevyhovující půda pro založení těchto objektů.

Jako technicky i ekonomicky výhodnou variantou se zdejevila aplikace vibroflotace s provedením štěrkových pilířů. Bylo zhotoveno 324 pilířů metodou s dolním plněním bez vodního výplachu. Jako výplň bylo použito řádně laboratorně ozkoušené drcené kamenivo zdvojené frakce 8/32 a max. délky 7,60 m (Obrázek 35)

Průběh hloubkového zhutňování zemin je vyobrazen na Obrázcích 36 – 39.

Hloubkové zhutňování							Systém Keller			 speciální zakládání, spol. s r.o. 140 00 Praha 4 Na Pankráci 30 Telefon 226 211 301 Fax 226 211 300					
Denní přehled č. 1							Číslo stavby: 12/561/9114								
Po	Út	St	Čt	Pá	So	Ne	D	N	Stavba: <b>Letní koupaliště</b>						
			X				X		Místo: Hradec Králové						
Datum: 11.06.2009															
Objednatel: GEOSAN GROUP a.s.															
Použitá technologie:															
RDV		RSV		VSS		FSS		BSS		BRS					
Zhutňování zemin nesoudržných		Štěrkový pilíř		Injektovaný štěrkový pilíř		Betonový pilíř		Betonový pilíř		Betonový pilíř					
		X													
Výkaz výměr				Stroj č. 4.10.0158				Pracovní plán cca -3,00 = 228,50							
Pořadové číslo	Pořadové číslo celkem	Bod číslo	Hloubka pilíře [m]	Délka pilíře [m]	Hluchá délka [m]	Štěrk [m <sup>2</sup> ]	Injektovaná délka [m]	Pořadové číslo	Pořadové číslo celkem	Bod číslo	Hloubka pilíře [m]	Délka pilíře [m]	Hluchá délka [m]	Štěrk [m <sup>2</sup> ]	Injektovaná délka [m]
1	1	1	7,20	7,20				27							
2	2	10	6,00	6,00				28							
3	3	2	3,40	3,40				29							
4	4	11	6,80	6,80				30							
5	5	3	6,90	6,90				31							
6	6	12	6,30	6,30				32							
7	7	4	6,90	6,90				33							
8	8	13	6,50	6,50				34							
9	9	14	6,70	6,70				35							
10	10	5	6,60	6,60				36							
11	11	15	6,50	6,50				37							
12	12	6	6,50	6,50				38							
13	13	7	6,50	6,50				39							
14	14	16	6,50	6,50				40							
15								41							
16								42							
17								43							
18								44							
19								45							
20								46							
21								47							
22								48							
23								Součet	1 - 14	Počet bodů	89,3				
24								Převod							
25								z Dp č.	1						
26								Celkem		14	89,3				
Denní protokol			Začátek práce	Konec práce	Počet pracovníků	Teplota	Počasí								
			7:00 hod	20:00 hod	3 + 2	18 °C	Zataženo, déšť								
Zvláštní události ( např. změna podloží, přerušení prací, atd. )															
Brno, 30.6.2009															
Místo, Datum, podpis Keller - spec. zakládání, spol s r.o.								Místo, Datum, podpis objednatele				PC-Formularstand: 2006-01-24			

**Obrázek 35:** Denní záznam z instalace štěrkových pilířů



**Obrázek 36:** Na stavbě byly nasazeny dvě soupravy společnosti KELLER



**Obrázek 37:** Provádění vibroflotace v místech založení bazénů. Na obrázku je vidět zapuštění vibrační jehly.



**Obrázek 38:** Zkoušky dynamické penetrace během stavby



**Obrázek 39:** Stávající vzhled areálu

### **8.3. Závěr**

Stavba komunikace R55 v úseku Skalka – Hulín i realizace Letního koupaliště v Hradci Králové jsou příklady různorodého využití vibroflotace ať se jedná o samotné zhutňování, či tvorbu štěrkových pilířů. Kvalitu provedení dobře deklarují penetrační zkoušky, které i před vyhodnocením přímo na místě dávají představu o dosaženém zlepšení základové půdy, čímž lze pružně reagovat a případně provést úpravy v postupu prací i ve vlastní technologii provádění (např. dohušťování vpichy).

Z obou reportů vyplývá, že vhodnost použití vibroflotace se nevztahuje jen na jedny určité geotechnické podmínky. Lokalita Skalka – Hulín se nachází v oblasti paleogenních a neogenních sedimentů na Moravě, což koresponduje s mapovým listem, a lokalita v Hradci Králové leží v křídové pánvi, kterou značí mapový list b. Lze tedy použití hloubkového zhutňování zemin uvažovat i v dalších formacích, které jsou penetrovatelné (mapové listy v závěru a – e viz závěr).

## 9. Metodika sestavení schematických map pro použití hloubkového zhutňování zemin

Pro svou práci jsem sestavila 6 mapových schémat, která vyobrazují možnosti použití metod hloubkového zhutňování zemin.

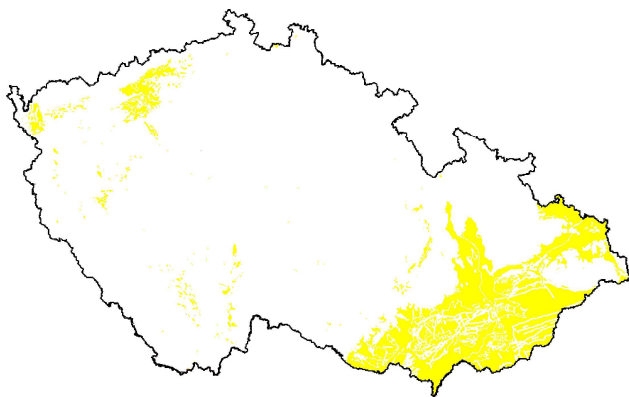
Podkladem pro vytvoření těchto situací byla základní geologická mapa 1:500 000, situace již dříve realizovaných aplikací hloubkového zhutňování zemin a databáze penetrací po celé České republice poskytnutých společností Zakládání staveb, a. s. a vybrané geologické formace, které mohou být zdrojem mocnějších klastických zvětralin a kvartérních i antropogenních uloženin.

Popis jednotlivých mapových listů schematických situací geologických formací vhodných pro použití hloubkového zhutňování zemin:

- a) Oblasti paleogenních a neogenních sedimentů
- b) Oblasti křídových sedimentů s podílem klastik
- c) Oblasti písčité zvětrávajících granitoidů
- d) Oblasti fluvialních klastik podél větších říčních toků
- e) Oblasti hald a výsypek po těžbě uhlí, event. kaolínu

### a) Oblast paleogenních a neogenních sedimentů

V oblastech paleogenních a neogenních sedimentů karpatské čelní předhlubně a v oblastech podkrušnohorských pánví jsou rozsáhlejší výskyty sedimentů klastické povahy, jejíž zvětraliny, pokud by se uvažovaly jako základová půda, by bylo možné zlepšovat metodou hloubkového zhutňování zemin (Obrázek 40)

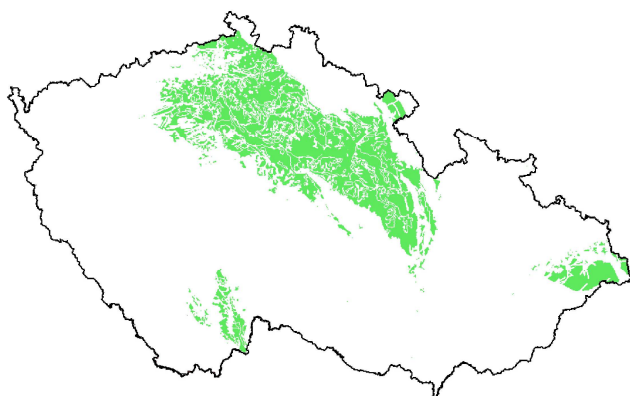


**Obrázek 40:** Oblasti paleogenních a neogenních sedimentů

Jako příklad mohu uvést stavbu „Modernizace trati Moravský Písek – Huštěnovice, kde společnost Zakládání staveb, a. s. realizovala zlepšování základové půdy metodou vibroflotace k docílení snížení koeficientu filtrace. Kvalita prací byla ověřena dynamickou penetrační zkouškou.

#### **b) Oblast křídových sedimentů s podílem klastik**

V oblasti sedimentů svrchní křída jsou rozsáhlé klastické partie, zvláště v centrální oblasti severočeské křída, které zvětrávají do nezpevněných písčitéch uloženin. Metody hloubkového zhutňování zemin lze aplikovat i ve zvětralinách jílovitého rázu (Obrázek 41).

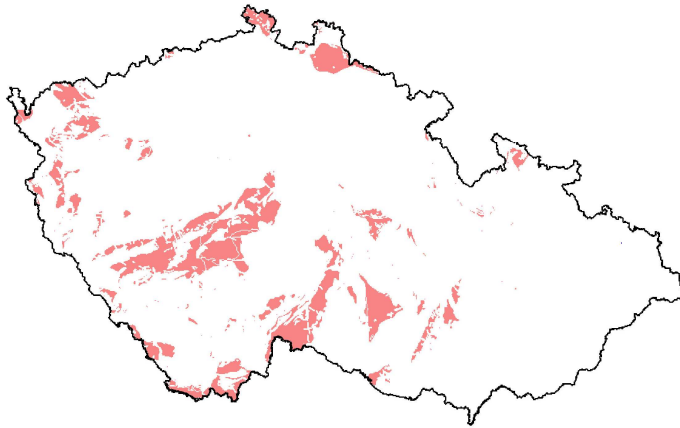


**Obrázek 41:** Oblasti křídových sedimentů s podílem klastik

#### **c) Oblasti písčité zvětrávajících granitoidů**

Oblasti granitoidních masivů, jejichž některé části mohou být hluboce zvětralé, případně chemicky alterované a rozložené na nezpevněné písky, vlivem klimatických změn nakypřené. Jde pouze o partie masivů, kde není rozpad ve formě žoků a balvanů (Obrázek 42).

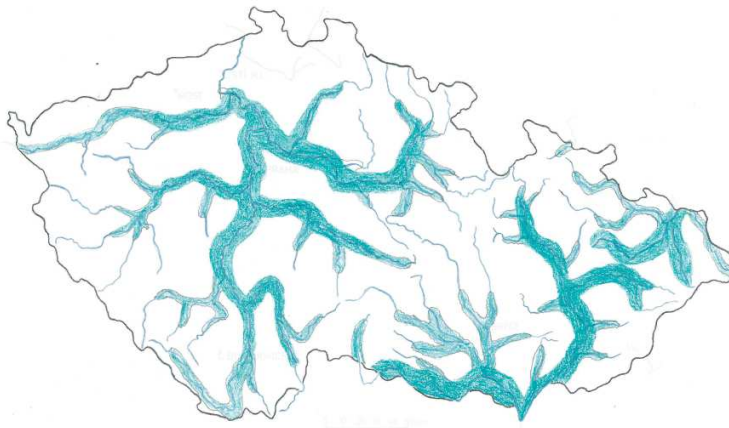




**Obrázek 42:** Oblasti písčité zvětrávajících granitoidů

**d) Oblasti fluvialních uloženin podél větších říčních toků**

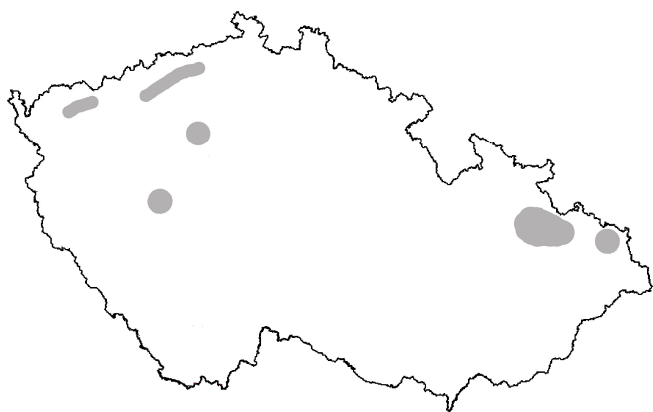
Oblasti fosilních (pliocenních a pleistocenních) i recentních (holocenních) povrchových vodotečí v podobě izolovaných „teras“ v různých výškových úrovních a v současných nivách. Totéž se týká i jemnozrnných slabě ulehých holocenních náplavů (Obrázek 43).



**Obrázek 43:** Oblast fluvialních klastik podél větších říčních toků

**e) Oblasti hald a výsypek po těžbě uhlí, event. kaolínu**

Oblasti umělých akumulací výsypek a hald klastické i jílovité povahy, v nichž lze předpokládat možnost použití hloubkového zhutňování zemin (Obrázek 44).



**Obrázek 44:** Oblasti hald a výsypek po těžbě uhlí, event. kaolínu

## 10. Shrnutí

V první části práce jsem se věnovala přehlednému shrnutí zlepšování základových půd, kde jsem uspořádala metody dle způsobu použití. V dalších částech jsem se zaměřila na metody hloubkového zhutňování zemin jako progresivního způsobu zlepšování půd. Metodu je možné aplikovat bez přidávání cizorodého materiálu, jako je např. výztuž při hlubinném zakládání, chemické látky apod.

Tato metoda je ve světě s oblibou používána a mým úkolem bylo zhodnotit možnosti využití pro Českou republiku.

Snažila jsem se zohlednit všechny parametry, které při výběru metody hrají důležitou roli. Výběrem mám na mysli zahrnutí vibroflotace do úvah při hledání možných řešení na dané zadání technického úkolu, potažmo jako jednu z výhodných metod zlepšení základové půdy.

Metodu, respektive možné limity pro její uplatnění, jsem tedy zhodnotila z několika hledisek.

Prvním hlediskem byla geologická stavba České republiky, kde jsem vytipovala vhodné geologické útvary s ohledem na schopnost penetrace vibračního zařízení do předmětného prostředí na základě údajů stanovených výrobcí, normou a v neposlední řadě ze zkušeností firem provádějících tuto metodu.

Jako druhý faktor pro závěry mojí práce uvádím penetrační zkoušky. Díky databázi penetračních zkoušek, která mi byla poskytnuta společností Zakládání staveb, a. s. (Příloha 1), jsem mohla vytipovat vhodné lokality pro vznesení předpokladu použitelnosti vibroflotace ke zlepšení základové půdy. Disponuji databází jak dynamických, tak i statických zkoušek. U jednotlivých lokalit je vždy popsána geologie, prováděná metoda a použitá technika. Ke každému místu jsou numerická i graficky zpracovaná data a především závěrečná zpráva s posouzením penetrovatelnosti jednotlivých vrstev zeminy vibrováním či beraněním, čímž jsem získala perfektně vypovídající data. Toto deklaruje mapa jednotlivých penetrací.

Penetrační zkoušky, ať již se jedná o dynamickou či statickou penetrační zkoušku, jsou vhodným nástrojem pro měření požadované kvality zlepšení základové půdy díky okamžité názornosti zlepšení, které je patrné již během měření. Při dynamické penetraci před a po provedení zlepšení je ihned patrná změna v odporu zeminy. Zlepšená zemina metodou hloubkového zlepšování zemin vykazuje u šterkových pilířů až několikasetprocentní nárůst počtu vpichů na určitou hloubku penetrování. Proto právě penetrace dokazuje měřitelnost kvality provedení a lze ji brát jako adekvátní zkoušku kvality provedení s jasným výsledkem.

Třetím faktorem hodnocení se staly dynamické účinky, které mohou narušit objekty v okolí výstavby. Dle vyhodnocení seismických měření na lokalitě v Poříčanech dle normy ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva jsem došla k závěru, že hraniční vzdáleností pro použití metody je 6 m od objektu třídy D a 2 m od objektů třídy B (Kapitola 3.2.). Obecně však lze konstatovat, že pokud je nutno provádět metodu vibroflotace v blízkosti objektů, je nutné posoudit vliv vyvolaných dynamických účinků na každý takový objekt zvlášť. Pokud jsou v projektu výstavby objekty bližší než 6 m, respektive 2 m, můžeme s vysokou pravděpodobností vibroflotaci jako možnost zlepšení základové půdy vyloučit.

Všechny tyto závěry (geologická stavba, penetrovatelnost) prakticky zhodnocují stavby R55 Skalka - Hulín a Letní koupaliště v Hradci Králové, na kterých jsme si metodu mohla osahat a posbírat praktické zkušenosti a rady od odborníků.

Úsek Skalka – Hulín stavby R55 leží v terciéru karpatské předhlubně (Příloha 2 a 8), zemina je zde dobře penetrovatelná a zkoušky dynamické penetrace po provedení prokázaly kvalitu zhutnění.

Areál stavby Letního koupaliště v Hradci Králové leží v České křídové pánvi (mapový list 3 a 9). Byly zde aplikované jak štěrkové pilíře jako základový prvek, tak i samotná vibroflotace pro snížení hladiny podzemní vody.

Na základě jednotlivých zhodnocených bodů jsem sestavila schematické mapové listy, ve kterých je zohledněna geologická stavba České republiky a penetrovatelnost půd. Lokality jsem také, pokud to bylo možné, posoudila s již provedenými projekty.

Moje práce poslouží geotechnikům, kteří při řešení technických úkolů navrhnou vhodné zlepšení základové půdy. Sestavený materiál může podpořit jejich úvahu o vhodnosti nasazení metody vibroflotace v daných geotechnických podmínkách, zejména ve vazbě na geologickou stavbu zájmového území, na předpokládanou penetrovatelnost prostředí a v neposlední řadě na vliv na okolní zástavbu.

Hlubkové zlepšování zemin nabízí dvě základní varianty. První z nich je vibroflotace, metoda k použití v nesoudržné a dostatečně neúnosné zrnité zemině, a to pro snížení hladiny podzemní vody či k zhutnění. Další aplikací jsou štěrkové pilíře. Vyrábí se pro urychlení konsolidace, homogenizaci (výsyvky) a k tvorbě hlubinných základových prvků.

Při správném použití nabízí rychlou, ekonomicky výhodnou a zkouškami ověřitelnou metodu zlepšení základové půdy.

## 11. Závěr

Metoda hloubkového zlepšování zemin je použitelná v geologických podmínkách České republiky. Pokud nelze provést zlepšení pomocí vibroflotace, lze přistoupit k aplikaci štěrkových pilířů, které je možné využít jako základový prvek.

Studie vibračních účinků dokazuje, že lze metodu použít v blízkosti zástavby dle její kategorizace. Vždy však záleží na individuálním posouzení mezní vzdálenosti.

Kvalita zlepšení je měřitelná pomocí penetračních zkoušek či zatěžovacích testů. Zkouškami lze ověřovat kvalitu již během provádění – díky tomu je možné pružně reagovat a např. navrhnout větší rozsah zlepšování základové půdy.

Pokud zájmové území leží ve vhodných geologických a geotechnických podmínkách, navrhuji vzít možnost zlepšení pomocí hloubkového zhutňování zemin metodou vibroflotace v úvahu a posoudit její použitelnost jako metody rychlé, ekonomicky výhodné, nezatěžující životní prostředí a s prokazatelnou měřitelností kvality provedení.

## SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek 1: Sedání násypu v čase; 1 - násyp, 2 – nadnásyp, 3 – sedání násypu, 4 – sedání násypu s nadnásypem (Masopust).....	13 -
Obrázek 2: Technologický postup dynamické konsolidace (Masopust) .....	14 -
Obrázek 3: Ukázka provádění chemické stabilizace.....	15 -
Obrázek 4: „Zazubení“ zásypového kameniva do geomříže (Geomat, s.r.o.).....	16 -
Obrázek 5: Klasická injektáž (Zakládání staveb, a. s.) .....	17 -
Obrázek 6: Trysková injektáž aplikace M1, M2 (Zakládání staveb, a. s.).....	18 -
Obrázek 7: Schéma provádění štěrkových pilířů metodou Franki (Masopust) .....	20 -
Obrázek 8: Geodrén COFRA-CHEMIA, SPOL. S.R.O. ....	21 -
Obrázek 9: Schématické uspořádání vibrační jehly a jehly s plnicí trubicí a ukázka rastru (KELLER) .....	23 -
Obrázek 10: Pracovní postup hloubkového zhutňování zemin – zapuštění, hutnění, dosypávání, dokončovací práce .....	25 -
Obrázek 11: Oblast použití hloubkového vibračního zhutňování (KELLER).....	28 -
Obrázek 13: Závislost suché objemové hmotnosti na vlhkosti při hutnění.....	41 -
Obrázek 14: Průběh vibračního zhutňování $\bar{A} - D'$ . Na ose x je střední napětí a na ose y je číslo pórovitosti.....	42 -
Obrázek 15: Tvorba štěrkového pilíře (KELLER) .....	43 -
Obrázek 16: Mechanismus porušení osamělého pilíře v homogenní zemině (Barksdale, Bachus). ....	44 -
Obrázek 17: Postup s horním plněním bez vodního výplachu (ČSN 14731, 2006)-	45 -
Obrázek 18: Postup s dolním plněním bez vodního výplachu (ČSN 14731, 2006)-	47 -
Obrázek 19: Provádění vibroflotace pod vodou (KELLER).....	47 -
Obrázek 20: Instalace štěrkových pilířů pod vodou (KELLER).....	48 -
Obrázek 21: Záznam hutnění z počítače v kabině stroje (KELLER).....	50 -
Obrázek 22: Vliv rozsahu zpevněné plochy na účinnosti zpevnění (Jebe et al., 1983).- 51 -	
Obrázek 23: Záznamy statických penetračních zkoušek násypu Českých drah v obci Luková před provedením štěrkových pilířů. Osa x značí zatížení v kN a osa y sedání v mm (KELLER) .....	52 -
Obrázek 24: Záznamy statických penetračních zkoušek násypu Českých drah v obci Luková po provedení štěrkových pilířů. Osa x značí zatížení v kN a osa y sedání v mm (KELLER).....	52 -
Obrázek 25: Situace zájmového území .....	57 -
Obrázek 26: Přeložka místí komunikace – štěrkové pilíře pod vysokým náspem .-	58 -
Obrázek 27: Metoda s dolním plněním bez vodního výplachu. Stroje společnosti KELLER .....	60 -
Obrázek 28: Linie stavby R55 - Tlumačov.....	60 -
Obrázek 29: Zhotovený štěrkový pilíř .....	61 -
Obrázek 30: Vibrační jehla se vzduchovým výplachem.....	61 -
Obrázek 31: Příčný řez areálem Pivovarské fošny .....	62 -
Obrázek 32: Situační schéma rozmístění penetračních sond, vrtů a archivních sond ..-	63 -
Obrázek 33: Denní záznam z provádění vibroflotace .....	64 -
Obrázek 34: Záznam dynamické penetrace před a po provedení vibroflotace v místech založení objektů pod hl. p. v. ....	66 -
Obrázek 35: Denní záznam z instalace štěrkových pilířů.....	67 -
Obrázek 36: Na stavbě byly nasazeny dvě soupravy společnosti KELLER.....	68 -
Obrázek 37: Provádění vibroflotace v místech založení bazénů. Na obrázku je vidět zapuštění vibrační jehly. ....	68 -
Obrázek 38: Zkoušky dynamické penetrace během stavby .....	69 -
Obrázek 39: Stávající vzhled areálu.....	69 -
Obrázek 40: Oblasti paleogenních a neogenních sedimentů .....	71 -
Obrázek 41: Oblasti křídových sedimentů s podílem klastik .....	72 -
Obrázek 42: Oblasti písčité zvětrávajících granitoidů .....	73 -
Obrázek 43: Oblasti hald a výsypek po těžbě uhlí, event. kaolínu.....	74 -

## SEZNAM TABULEK:

Tabulka 1: Druhy vibračních jehel (Fellin, 2000) .....	- 23 -
Tabulka 2: Posouzení vhodnosti použití materiálu jako zásypového materiálu ....	- 26 -
Tabulka 3: Závislost vzdálenosti hrany rastru a spotřeby zásypového materiálu (Fellin, 2000).....	- 27 -
Tabulka 4: Naměřené hodnoty u vibrovaných štěrkových pilířů .....	- 30 -
Tabulka 5: Naměřené hodnoty pro vibrační válec při pojezdu.....	- 30 -
Tabulka 6: Efektivní hodnoty pro vibrační jehlu.....	- 32 -
Tabulka 7: Efektivní hodnoty pro vibrační válec.....	- 32 -
Tabulka 8: Třídy odolnosti objektů podle normy ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva .....	- 33 -
Tabulka 9: Kategorizace odezvy konstrukce podle efektivní rychlosti pohybu $v_{ef}$ v mm/s podle normy ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva ...	- 34 -
Tabulka 10: vyhodnocení pro vibrované pilíře, kde $l$ – vzdálenost od piloty; .....	- 34 -
Tabulka 11: vyhodnocení pro vibrační válec, kde $l$ – vzdálenost od piloty; .....	- 35 -
Tabulka 12: Pojmenování stavu ulehlosti podle EN ČSN 14688-2 (2005) .....	- 38 -
Tabulka 13: Klasifikace hutnosti písku (NGI).....	- 39 -
Tabulka 14: Relativní hutnost písků z $q_{dyn}$ ( Bondarik).....	- 40 -
Tabulka 15: Relativní hutnost štěrků a písčitých štěrků z $q_{dyn}$ ( Obert) .....	- 40 -
Tabulka 16: Typická zrnitostní složení používaná při instalaci štěrkových pilířů dle ČSN 14731 Provádění speciálních geotechnických prací – Hloubkové zhutňování zemin .....	- 45 -
Tabulka 17: Shrnutí výsledků penetrační zkoušky pro 1. skupinu pilířů .....	- 54 -
Tabulka 18: Moduly deformace stanovené z výsledků penetračních zkoušek .....	- 54 -
Tabulka 19: Shrnutí výsledků penetrační zkoušky pro 2. skupinu pilířů .....	- 55 -
Tabulka 20: Moduly deformace stanovené z výsledků penetračních zkoušek .....	- 55 -
Tabulka 21: Shrnutí výsledků penetrační zkoušky pro skupinu čtveřice pilířů .....	- 55 -
Tabulka 22: Moduly deformace stanovené z výsledků penetračních zkoušek u skupiny čtveřice pilířů.....	- 56 -

## **Seznam použité literatury:**

Barksdale R. D., Bachus C. (1983): „ Design and construction of columns, Volume 1“. Schoul of Civil Engineering Institute of Technology, Atlanta

Bauer Spezialtiefbau GMBH (1983): „Tiefenrüttler“. Firmenschrift R 700/1 (30/03/89).

Beneš I. et al. (2003): „Zakládání staveb, výrobní program“. Zakládání staveb a. s., Praha.

Brown R. (1977): „Vibroflotation Compaction of Cohesionless Soils“. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE.

Chlost J. (1989): „ Zakládání na štěrkových pilířích“. Výzkumný ústav pozemních staveb, Praha.

ČSN 14 731 Provádění speciálních geotechnických prací – Hlubkové zhutňování zemin

ČSN EN 72 1004 Geotechnický průzkum a zkoušení – Terénní zkoušky – Část 2

ČSN EN 72 1003 Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařídování zemin - Část 2: Zásady pro zařídování

ČSN 73 0040 Zatížení technickou seismicitou a jejich odezva

Databáze penetrací. Zakládání staveb, a. s., Praha.

Fellin W. (2000): „Rütteldruckverdichtung als plastodynamische Problem“. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

Cháb J. et al. (2007): „Geologická mapa České republiky 1:500 000“. Česká geol. Služba, Praha.

Greenwood D. (1972): „Baugrundverbesserung durch Tiefenverdichtung“. Baumaschine und Bautechnik, 19. Jahrgang.

Hasenöhrl J. (1988): „Geologie a zakládání staveb II“. Nakladatelství technické literatury, Praha.

Kirsch K., (1977): „Soil improverment by deep vibration techniques. In 5th South Asian Konfernce on Soil Engeneering“. Bangkok Thailand.

Kirsch K., (1979): „Erfahrungen mit der Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttler“. Geotechnik.

Marek P. (2005): „Spolupůsobení konstrukcí na horninové prostředí“. Doktorandská disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno.

Masopust J.: „ Speciální zakládání staveb 2“. Akademické nakladatelství CERM, 2006.

Masopust J. (2001): „Všebořice u Ústí nad Labem – výsypka. Zkoušky štěrkových pilířů“. Zakládání staveb, a. s., Praha.



Matula M., Pašek J. (1982): „Regionálna inžinierska geológia ČSSR“. Univerzita Komenského v Bratislave.

Matys M., Ťavoda O., Cuninka M. (1990): „Poľné skúšky zemín“. Alfa, Svitavy.

Poteur M., (1971) „Beitrag zur Tauchrüttelung in rolligen Beden“. Baummaschine und Bautechnik, 18. Jahrgang.

Simons H., Kahl M. (1987): „Experimentelle Untersuchungen zur Verdichtung norddeutscher Sande mit Tiefenrüttlern“. IRB-Verlag, Stuttgart.

Thorburn S. (1975): „Building structures supported by stabilized ground. Geotechnique.

Zahradník O., (2008): „Statické penetrační zkoušky a možnosti jejich využití při stanovení stlačitelnosti hnědouhelných výsypek“. Diplomová práce, Univerzita Karlova v Praze, Praha.

### **Zdroje vyhodnocovaných dat**

Modernizace trati Moravský Písek – Huštěnovice SO 27-18-01 silniční komunikace II. tř. S9.5/60 k podjezdu Km 131.510 – část 3 – vibroflotace. Zakládání staveb, a. s., září 2001.

JKZ Bučovice – penetrační zkoušky. Srovnání penetrační zkoušek před zahájením a po dokončení štěrkových pilířů. KELLER, listopad 2005.

Trans Cabest Krupka – stavba 12/561/7108. Srovnání penetrační zkoušek před zahájením a po dokončení štěrkových pilířů. KELLER, březen 2007.

CS Kaufland Modelenice – stavba 12/561/6105. Záznamy penetračních zkoušek. KELLER, březen 2006.

Poříčany u Prahy - Měření technické seizmicity vyvolané vibrováním štěrkových pilot a vibračním válcem. KELLER, březen 2008.

Fakultní nemocnice Hradec Králové – Dostavba pavilonu interních oborů. Referenční zpráva. KELLER, 2005.

Poříčany u Prahy. Podrobná inženýrsko-geologický průzkum pro výstavbu strojírenského závodu v průmyslové zóně Poříčany. Ing. J. Stuchlík, listopad 2007.

VZP Hradec Králové – stavba 11/561/8108. Srovnání penetrační zkoušek před zahájením a po dokončení štěrkových pilířů. KELLER, leden 2008.

Psychiatrie Hradec Králové – stavba 11/561/7104. Srovnání penetrační zkoušek před zahájením a po dokončení štěrkových pilířů. KELLER, březen 2007.

Embankment Luková II – stavba. Srovnání penetrační zkoušek před zahájením a po dokončení štěrkových pilířů, Statické zatěžovací zkoušky. KELLER, září 2009

Siemens-Matsushita Components Šumperk. Referenční zpráva. KELLER, 1999.

Walter Kuřim – stavba 12/561/5115. Srovnání penetrační zkoušek před zahájením a po dokončení štěrkových pilířů. KELLER, říjen 2005.

Obchodní centrum DDK Hodonín. Referenční zpráva. KELLER, 2005.

Založení deponiční haly v Čelákovicích pomocí vibrační technologie. Referenční zpráva. KELLER, 2004.

Dálnice D47 Lipník n/B – Ostrava - konsolidační štěrkové pilíře. Referenční zpráva. KELLER, 2002.

Dálnice D8 – SO A 260.1 – Trmice. Referenční zpráva. KELLER, 2005.

Energocentrum Kladno, založení chladicí věže. Referenční zpráva. KELLER, 1997.

Oprava povodňové hráze a uložení plynovodní shybky u Veltrus. Zakládání staveb a. s., 2003.

Teplárna Trmice – založení chladicí věže. Referenční zpráva. KELLER, 1996.

Hradec Králové – Pivovarská fošna Komplexní geologický průzkum. Hydrogeologie Pardubice, leden 2000, aktualizace 2004.

Městské koupaliště Hradec Králové, Geologické, hydrogeologické a geotechnické zhodnocení architektonického návrhu. Ing. Jiří Patera, JIP soukromá kancelář pro průzkum a inženýrskou činnost, leden 2005.

Letní koupaliště Hradec Králové, Doplnující geologický a hydrogeologický průzkum. Centroprojekt a. s., březen 2007.

Letní koupaliště Hradec Králové – stavba 12/561/9114. Penetrační zkoušky před zahájením stavby. KELLER, březen 2007.

Letní koupaliště Hradec Králové , Denní přehledy hloubkového zhutňování zemin. KELLER, červen 2009.

Letní koupaliště Hradec Králové – stavba 12/561/9114. Srovnání penetrační zkoušek před zahájením a po dokončení štěrkových pilířů. KELLER, červen 2009..

R55 Skalka – Hulín, SO 207 Most přes místní komunikaci v km 9, 015812. Technická zpráva. VIN konsult, listopad 2008.

R55 Skalka – Hulín. Záznamy penetračních zkoušek. KELLER, listopad 2008.

R55 Skalka – Hulín. Souhrnná závěrečná zpráva zhotovitele o hodnocení jakosti díla – SO 011 Sanace podloží pod násypem SO 101. KELLER, červenec 2007.

R55 Skalka – Hulín. Souhrnná závěrečná zpráva zhotovitele o hodnocení jakosti díla – SO 012 Sanace podloží pod násypem SO 102. KELLER, říjen 2009.

R55 Skalka – Hulín. Souhrnná závěrečná zpráva zhotovitele o hodnocení jakosti díla – SO 013 Sanace podloží pod násypem SO 121, KELLER, červenec 2009.

R55 Skalka – Hulín. Dílčí závěrečná zpráva zhotovitele o hodnocení jakosti díla – SO 207 Most přes místní komunikaci v km 9,015 812 Sanace podloží. KELLER, říjen 2009.

