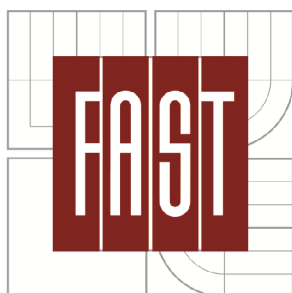


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV GEOTECHNIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF GEOTECHNICS

# OVĚŘENÍ SPOLUPŮSOBENÍ ZÁKLADOVÉ DESKY A PILOTY

VERIFICATION OF INTERACTION BETWEEN THE FOUNDATION PLATE AND THE PILE

DISERTAČNÍ PRÁCE – ZKRÁCENÁ VERZE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ING. MARCELA KOZÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. VLADISLAV HORÁK, CSC.

BRNO 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná dizertační práce se zabývá otázkou spolupůsobení plošného zakládání prostřednictvím základové desky a hlubinného zakládání v podobě vrtaných pilot v případě skeletové konstrukce. Konkrétně je problematika přerozdělení napětí ze sloupu mezi desku a pilotu zkoumána na objektu „Obchodní a zábavní centrum Fórum Nová Karolina“, kde byl proveden monitoring vybraných sloupů a zatěžovací zkoušky pilot. Hodnoty osového zatížení pilot, které byly odvozeny z měření a zkoušek, stejně jako skutečná deformace konstrukce, byly porovnány s výsledky chování konstrukce dle numerického modelování.

## **Klíčová slova**

základová deska, vrtaná pilota, spolupůsobení, přerozdělení napětí, mobilizace únosnosti, osové zatížení, plášťové tření, únosnost na patě piloty, kontaktní napětí, statická zatěžovací zkouška, nivelační měření, numerický model

## **Abstract**

The doctoral thesis deal with the interaction between the foundation plate and deep foundation in the form of bored piles in the case of skeleton construction. The issue of tension redistribution from the column between the plate and the pile is investigated on specific object – „Shopping and entertainment center Fórum Nová Karolina“. On this object were selected columns monitored and load tests of the piles was executed. Values of the axial loading of the piles and the actual deformation of the construction have been derived from measurements and tests. They were compared with the results of structural behavior by numerical modeling.

## **Keywords**

foundation plate, bored pile, interaction, redistribution of tension, mobilization of load capacity, axial load, sheathing friction, load capacity on the bottom of the pile, contact tension, static load test, leveling measurement, numerical model

## **OBSAH:**

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....	3
2 STANOVENÍ ÚNOSNOSTI VRTANÝCH PILOT OSOVĚ ZATÍŽENÝCH.....	4
2.1 Mobilizace únosnosti pilot.....	4
2.2 Výpočet únosnosti osamělých plovoucích pilot.....	6
3 SLEDOVANÝ OBJEKT „FÓRUM NOVÁ KAROLINA – 1.B003 OBCHODNÍ A ZÁBAVNÍ CENTRUM“ .....	8
3.1 Popis objektu.....	8
3.2 Inženýrskogeologické a hydrogeologické poměry .....	10
3.3 Konstrukční řešení založení objektu .....	11
3.4 Statické zatěžovací zkoušky .....	13
3.4.1 Popis zkušebních zatěžovacích pilot .....	13
3.4.2 Průběh zatěžovací zkoušky.....	14
3.5 Nivelační měření .....	14
4 VÝPOČET REÁLNÉHO ZATÍŽENÍ MONITOROVANÝCH PILOT OBJEKTU FÓRUM NOVÁ KAROLINA .....	15
4.1 Vyhodnocení statické zatěžovací zkoušky.....	15
4.2 Výpočet zatížení sledovaných pilot .....	17
4.3 Analýza výsledků výpočtu .....	18
4.3.1 Vyhodnocení přenosu zatížení do piloty, tvoří-li základovou spáru zemina tř. G318	
4.3.2 Vyhodnocení přenosu zatížení do piloty, tvoří-li základovou spáru zemina tř. F819	
4.3.3 Vyhodnocení přenosu zatížení do piloty pro obor sedání 8 až 12 mm.....	20
5 MATEMATICKÝ MODEL .....	21
5.1 Analýza výsledků.....	22
6 POROVNÁNÍ MATEMATICKÉHO MODELU S REALITOU.....	24
7 ZÁVĚR.....	25
7.1 Doporučení pro další vývoj ověřování spolupůsobení základových konstrukcí.....	27
8 LITERATURA .....	29

# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

V dnešní době se již velice málo setkáváme s tak jednoduchými případy staveb, kdy není třeba posuzovat samotné horninové prostředí, tzn. že není zkoumána napjatost v zemině a její deformace. Již při návrhu běžných konstrukcí musí projektanti dopravních, průmyslových, obchodních či občanských staveb řešit chování horninového prostředí, protože každá stavba musí být nějak založena a vnější síly musí být přeneseny do kvalitnějšího podloží. Horninový masív vstupuje do projektu jako podloží základových konstrukcí objektů, nebo prostředí, v němž se samy nacházejí, tj. u pilotových základů, podzemních jímek apod.

Již v devadesátých letech došlo k tomu, že se nová výstavba začala realizovat i na staveništích, která byla podle dřívějších zásad prakticky nevhodná. Patří mezi ně i tak nevhodná podloží, jako jsou bývalé skládky odpadů a podobná území negativně ovlivněná antropogenní činností, nestabilní svážná území, málo únosné a silně deformovatelné podzákladí či v neposlední řadě heterogenní podloží starých zrušených zástaveb. Stalo se vzácností stavět na štěrcích a píscích, a to celosvětově, mimo jiné i díky ekologické ochraně mnoha území, kde by se zakládalo velmi dobře, ale stavební činnost tam prostě je, jistě správně, zakázána. Postupně tedy vznikla situace, že prakticky každý projekt musí být z hlediska založení pečlivě posouzen a otázka založení plošně či hlubinně ovlivňuje celou koncepci stavby už od úvodních studií. [9]

Vzhledem k tomu, že se v dnešní době projektují čím dál okázalejší a modernější stavby, které samozřejmě kladou čím dál větší požadavky na základové konstrukce, musí dnes již převážné množství zajímavých projektů počítat s hlubinným zakládáním v podobě pilot. A velice často se navrhuje toto hlubinné zakládání v interakci se zakládáním plošným prostřednictvím základové desky. **V případě skeletových konstrukcí, kdy je pod každým sloupem umístěná pilota, vyvstává otázka, jaké zatížení ze sloupu přenáší základová deska do základové spáry a jaké osově zatížení vstupuje do piloty. Návrh pilot za předpokladu, že by přenášely veškeré osově napětí, je velice neekonomický, ale na druhou stranu, v případě podcenění hodnoty podílu zatížení přenášeného pilotou, může dojít k nadměrnému sedání konstrukce a k jejím poruchám, a to zejména v případě sedání nerovnoměrného. Právě touto otázkou se zabývá dizertační práce.**

Horninové prostředí je mimořádně složité a lze jej zkoumat pouze tak, že pomineme celou řadu skutečností, které se dají považovat za méně významné pro daný úkol. Vzhledem k současným možnostem výpočetní techniky však roste možnost numerické realizace i složitějších algoritmů. Analýza základových konstrukcí je pak omezena řešitelností problému modelování části základu, který je v kontaktu s podložím. Nejlepší řešení je použít 2D model podloží, který přibližně představuje deformační vlastnosti celého masívu pod základy pomocí modelu povrchu. Vlastnosti takového modelu jsou vyjádřeny interakčními parametry označovanými, jako parametry C. Tyto parametry jsou určovány přímo na konstrukčních prvcích, které jsou v kontaktu s podložím a ovlivňují matici tuhosti. [9], [11]



V případě řešení konstrukcí, kde se na přenosu zatížení do základové půdy podílí základová deska a hlubinné zakládání v podobě pilot, se při numerickém modelování využívá pro podepření základové desky nástroj SOILIN, který určuje parametry C. Piloty se potom nahrazují pružinami, jejichž tuhost odpovídá reálnému sedání, na které jsou piloty navrženy. V praxi se dokonce setkáváme i s takovými případy, kdy se numerické modelování podloží nevyužívá a podíl zatížení, které přenáší deska a piloty statici pouze odhadují. To může vést, v případě podcenění vlivu základové desky, k neekonomickému návrhu hlubinného zakládání nebo, v případě horším, kdy je přenos deskou nadhodnocen, k nadměrnému sedání pilot a možným poruchám konstrukce. Nejčastěji se předpokládá, že piloty přenáší 80% a více z celkového zatížení z horní stavby, výjimkou však nejsou ani případy, kdy bylo pilotám přisuzováno pouze 60% zatížení či dokonce méně. **Jsou-li výsledky matematického modelování podloží podobné realitě, či je-li možné podíl zatížení přenášené pilotami pouze obecně odhadovat, však nebylo ještě dodnes ověřeno.**

Možnost, jak tuto skutečnost ověřit, tkví v podrobném monitoringu vybrané stavby a co nejpřesnějším vyhodnocení získaných dat. Monitoring spočívá v nivelaci sedání vybraných sloupů v určitých fázích výstavby. Ideálně by měl být monitoring doplněn i o tenzometrická měření, aby mohla být data spolehlivěji ověřena. Aby byly výsledky co nejspolehlivější je nutné na staveništi provést i statické zatěžovací zkoušky pilot, které charakterizují skutečné chování piloty v daném geologickém prostředí. Tento komplex měření se však ve skutečnosti v podstatě vůbec neprovádí, neboť je velice finančně nákladný a investoři nemají zájem jej financovat.

Výjimkou se stal objekt 1.B003 „Obchodní a zábavní centrum“, který je součástí celého komplexu projektu „FÓRUM NOVÁ KAROLINA“. Zde byly provedeny dvě zatěžovací zkoušky pilot a monitoring sedání vybraných sloupů. **Úkolem této dizertační práce je zjištění, jaký podíl zatížení, které působí do základových konstrukcí ze sloupu, v tomto konkrétním případě, přebírá základová deska a jaký pilota.**

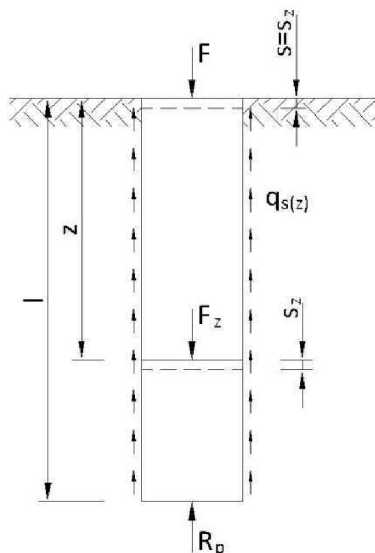
Jelikož se jedná pouze o jeden případ, nelze brát výsledky jako zcela průkazné, ale jedná se o velice důležitý první krok v této problematice. Ten by měl být ideálně v budoucnu následován na dalších stavbách, tak aby bylo možné vysledovat závislost podílu zatížení vstupujícího do pilot vzhledem ke geotechnickým podmínkám, velikosti napětí, tuhosti základových konstrukcí apod.

## **2 STANOVENÍ ÚNOSNOSTI VRTANÝCH PILOT OSOVĚ ZATÍŽENÝCH**

### **2.1 MOBILIZACE ÚNOSNOSTI PILOT**

Vrtané piloty, přenášejí svislé tlakové zatížení do okolního horninového prostředí jednak svým pláštěm a dále patou. Jedná-li se o piloty plovoucí, tj. neopřené patou o nestlačitelné podloží, pak při malém zatížení, dochází nejprve k aktivaci plášťového

tření, které s navyšující se deformací roste až dostáhne svého maxima. Při dalším navyšování zatížení zůstává plášťové tření neměnné, případně dokonce klesá na reziduální hodnotu. Naopak napětí v patě piloty, které je zpočátku malé, se postupně navyšuje až se vzrůstajícím sedáním. Na velikost mobilizovaného plášťového tření a napětí na patě má podstatný vliv geologické prostředí, ve kterém se daná část piloty nachází.



**Obr. 1** Přenos zatížení piloty do okolního prostředí [1]

Přenos vnějšího zatížení piloty  $F$  do podloží je dán průběhem normálového napětí v dřívku piloty, resp. průběhem osové síly  $F_z$  v pilotě, která se se zvyšující hloubkou snižuje. [1]

Za předpokladu, že stlačení dřívku piloty (betonu) je zanedbatelné, je sednutí piloty v hloubce  $z$  ( $s_z$ ) rovno sednutí hlavy piloty ( $s$ ). Je-li při určitém vnějším zatížení piloty  $F$  znám tento posun  $s=s_z$ , lze pro každou hloubku  $z$  stanovit tzv. přenosovou funkci  $F_{z,s}$ .

Plášťové tření v hloubce  $z$  je potom dáno rovnicí:

$$q_{s(z)} = -\frac{1}{\pi d_z} \frac{dF_{z,s}}{dz}$$

Rov. 1 [1]

$q_{s(z)}$  ... plášťové tření v hloubce  $z$

$F_{z,s}$ .... osová síla v hloubce  $z$  v dřívku piloty odpovídající sednutí  $s$

$d_z$ ..... průměr piloty v hloubce  $z$

Sednutí hlavy piloty  $s$  je funkcí působící síly  $F_{z,s}$ . Ta je dána rovnicí:

$$F_{z,s} = F - \int_0^z \pi d q_{s(z)} dz$$

Rov. 2 [1]

$F$ ..... síla působící na hlavu piloty;  $F = R_p + R_s$

$R_p$ ..... síla v patě piloty

$R_s$ ..... síla přenášená pláštěm

Rov. 3 [1]

Síla v patě piloty a síla přenášená pláštěm potom bude:

$$R_p = F - \int_0^l \pi d q_{s(z)} dz$$

Rov. 4 [1]

$$R_s = F - R_p = \int_0^l \pi d q_{s(z)} dz$$

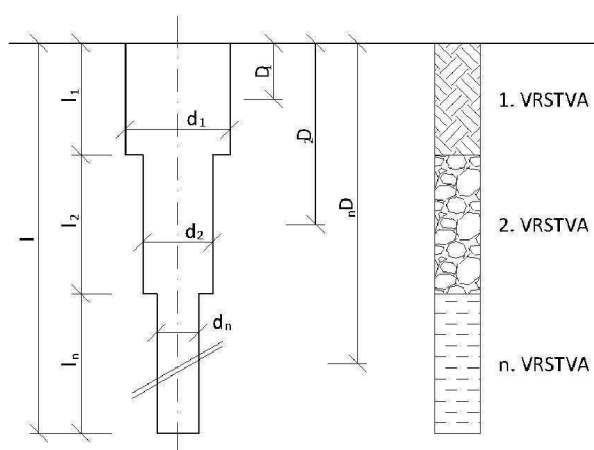
Pro návrh pilot je důležitý poměr síly přenášené patou piloty  $R_p$  k celkové působící síle:

$$\beta = \frac{R_p}{F} = 1 - \frac{\int_0^l \pi d q_{s(z)} dz}{F}$$

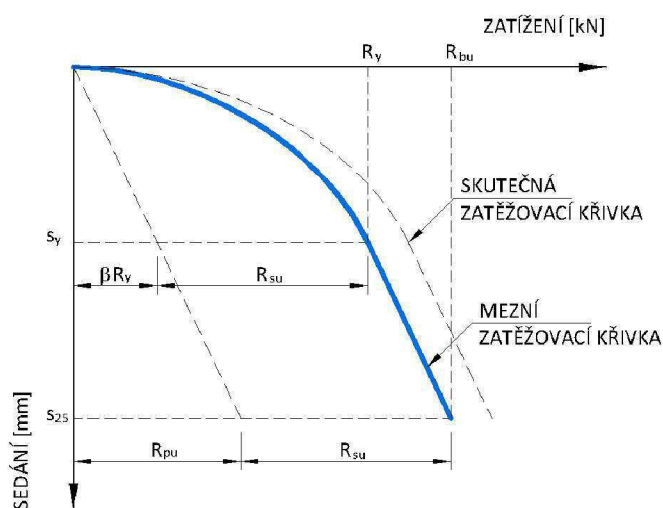
$\beta$ ..... koeficient přenosu zatížení do paty piloty

## 2.2 VÝPOČET ÚNOSNOSTI OSAMĚLÝCH PLOVOUCÍCH PILOT

Výpočtová únosnost osamělých pilot osově zatížených zahloubených do stlačitelného podloží se stanovuje podle teorie Masopusta [1], která vychází z tvaru mezní zatěžovací křivky piloty. Tato metoda byla odvozena z rovnic regresních křivek určených na základě statické analýzy výsledků zatěžovacích zkoušek pilot a pro stanovení svislé únosnosti používá regresní součinitele. Zatěžovací křivka je sestavena ze dvou větví. Mezi nulovým zatížením piloty a zatížením, kdy je plně mobilizováno plášťové tření, je závislost sedání na zatížení vyjádřena pomocí paraboly druhého stupně, pro zatížení větší je závislost lineární.



**Obr. 2** Obecné schéma vrtané piloty uložené ve vrstevnatém geologickém prostředí [1]



**Obr. 3** Mezní zatěžovací křivka osově zatížené piloty [1]

Tvar zatěžovací křivky se sestavuje podle výpočtu následujících hodnot:

- Mezní plášťové tření  $q_{si}$  pro příslušný typ zeminy:

$$q_{si} = a - \frac{b}{\frac{D_i}{d_i}}$$

$a, b$ ... regresní součinitele měrného plášťového tření

$D_i$ ..... hloubka od povrchu terénu do poloviny  $i$ -té vrstvy

$d_i$ ..... průměr piloty v  $i$ -té vrstvě

- Únosnost na plášti piloty  $R_{su}$ :

$$R_{su} = m_1 \cdot m_2 \cdot \pi \cdot \sum_{i=1}^n d_i \cdot l_i \cdot q_{si}$$

Rov. 8 [1]

$m_1$ ..... koeficient podle druhu zatížení (provozní  $m_1 = 0,7$ , extrém.  $m_1 = 1,0$ )

$m_2$ ..... součinitel vlivu ochrany dřívku piloty

$d_i$ ..... průměr piloty v  $i$ -té vrstvě

$l_i$ ..... mocnost  $i$ -té vrstvy

$q_{si}$ ..... mezní plášťové tření v  $i$ -té vrstvě

- Napětí na patě piloty  $q_p$ :

$$q_p = e - \frac{f}{\frac{l}{d_p}}$$

Rov. 9 [1]

$e, f$ .... regresní součinitelé pod patou piloty

$l$ ..... délka piloty

$d_p$ ..... průměr paty piloty

- Koeficient přenosu zatížení do paty piloty  $\beta$ :

$$\beta = \frac{q_p}{q_p + 4 \cdot \bar{q}_s \cdot \frac{l}{d_p}}$$

Rov. 10 [1]

$q_p$ ..... napětí na patě piloty

$\bar{q}_s$ ..... průměrné plášťové tření - vážený průměr mezního plášťového tření

$l$ ..... délka piloty

$d_p$ ..... průměr paty piloty

- Zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření  $R_y$ :

$$R_y = \frac{R_{su}}{1 - \beta}$$

Rov. 11 [1]

$R_{su}$  .... únosnost na plášti piloty

$\beta$  ..... koeficient přenosu zatížení do paty piloty

- Sedání odpovídající zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření  $s_y$ :

$$s_y = I \frac{R_y}{\bar{d} \cdot E_s}$$

Rov. 12 [1]

$I$ ..... příčinkový koeficient sedání piloty;  $I = I_1 \cdot R_k$

Rov. 13 [1]

$I_1$ ..... základní příčinkový koeficient závislý na poměru  $l/d$

$R_k$ ..... korekční koeficient vyjadřující tuhost piloty v závisl. na  $l/d$  a  $K=E_b/E_s$

$R_y$ ..... zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření

$\bar{d}$ ..... vážený průměr profilů piloty

$\bar{E}_s$ ..... vážený průměr sečnového modulu def. zemin  $E_s$  podél dřívku piloty

- Zatížení v patě piloty pro předepsané sedání (pro limitní sedání 25 mm)  $R_{pu}$ :

$$R_{pu} = \beta \cdot R_y \cdot \frac{s_{25}}{s_y}$$

Rov. 14 [1]

$\beta$  ..... koeficient přenosu zatížení do paty piloty

$R_y$ ..... zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření

$s_{25}$ ..... limitní sedání piloty rovnající se 25 mm

$s_y$ ..... sedání odpovídající zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření

- Únosnost piloty pro dané limitní sedání 25 mm  $R_{bu}$ :

$$R_{bu} = R_{su} + R_{pu}$$

Rov. 15 [1]

$R_{pu}$ .... zatížení v patě piloty pro předepsané limitní sedání 25 mm

$R_{su}$  .... únosnost na plášti piloty

### Rovnice zatěžovací křivky:

- První větev pro obor zatížení  $0 \leq R \leq R_y$  resp.  $0 \leq s \leq s_y$ :

$$R = R_y \sqrt{\frac{s}{s_y}} \quad \text{neboli} \quad s = s_y \left( \frac{R}{R_y} \right)^2$$

Rov. 16, Rov. 17 [1]

$R_y$ ..... zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření

$s_y$ ..... sedání odpovídající zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření

- Druhá větev pro obor zatížení  $R_y \leq R \leq R_{bu}$  resp.  $s_y \leq s \leq s_{25}$ :

$$R = R_y + \frac{R_{bu} - R_y}{s_{25} - s_y} (s - s_y) \quad \text{neboli} \quad s = s_y + \frac{s_{25} - s_y}{R_{bu} - R_y} (R - R_y)$$

Rov. 18, Rov. 19 [1]

$R_y$ ..... zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření

$s_y$ ..... sedání odpovídající zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření

$R_{bu}$ .... únosnost piloty při předepsaném limitním sedání 25 mm

$s_{25}$ ..... limitní sedání piloty rovnající se 25 mm

## 3 SLEDOVANÝ OBJEKT „FÓRUM NOVÁ KAROLINA – 1.B003 OBCHODNÍ A ZÁBAVNÍ CENTRUM“

### 3.1 POPIS OBJEKTU

Ověření přerozdělení napětí mezi základovou deskou a hlubinné zakládání v podobě pilot bylo pro tuto práci zkoumáno na objektu „1.B003 Obchodní a



zábavní centrum“, který je součástí celého komplexu projektu „FÓRUM NOVÁ KAROLINA“.

V rámci souboru staveb se jedná o objekt v severozápadním rohu území Nová Karolina sousedící s ulicemi Místeckou a 28. října v Ostravě.



*Obr. 4 FÓRUM NOVÁ KAROLINA - Objekt „Obchodní a zábavní centrum“ [33]*

Stavba je situována na prakticky rovinném pozemku v nadmořské výšce cca 212,0 m n. m., v bývalém areálu koksovny Karolina, která byla v minulosti zdemolována. Samotný objekt 1.B.003 „Obchodní a zábavní centrum“ je čtvercového tvaru o rozměrech cca 170 x 170 m a je navržen jako železobetonový monolitický skelet. Z hlediska podlažnosti betonových konstrukcí obsahuje dvě úplná podzemní podlaží, dvě úplná nadzemní podlaží a dvě další částečná podlaží se stropními, resp. střešními deskami v jednotlivých čtvercích.

Z konstrukčního hlediska je předmětná železobetonová monolitická stavba složená z obvodových železobetonových stěn, vnitřních stěn okolo schodišť a výtahových šachet, vnitřních sloupů a stropních desek. Horní stavba je z důvodu očekávaných objemových změn rozdělena do pěti dilatačních celků, které tvoří jeden dispoziční celek. Základní osová vzdálenost podpůrných sloupů je 8,1 m avšak s mnoha dispozičními výjimkami. V případech vynášení sloupů vyšších podlaží vodorovnými podpůrnými průvlaky byly do těchto průvlaků nebo hlavic instalovány i předpínací lana. Konstrukční výška je ve všech nadzemních podlažích 6,0 m a v podzemních podlažích 3,3 m.

Založení objektu je vzhledem k níže popsaným základovým poměrům a velikosti zatížení vnitřních sloupů navrženo jako hlubinné na vrtných železobetonových pilotách, které nejsou spojeny se základovou deskou, jsou odděleny izolací vůči tlakové vodě a důlním plynům.

### 3.2 INŽENÝRSKOGEOLOGICKÉ A HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY

Z regionálně-geologického hlediska spadá zájmové území do celku předhlubní karpatských příkrovů. Předkvartérní podloží lokality je tvořeno miocenními jíly. Kvartérní pokryv je tvořen komplexem fluviálních sedimentů údolní terasy řeky Ostravice. V nadloží fluviálního komplexu se pak vyskytují antropogenní navážky proměnlivé mocnosti. [24]

Od poloviny 90. let minulého století byla v předmětném území prováděna sanace zemin podloží kontaminovaných od dřívější průmyslové výroby, která spočívala ve výměně kontaminované zeminy. V některých částech došlo k odtěžení veškerých kvartérních sedimentů až na bázi šterkového kolektoru, ve zbývajících částech bylo provedeno pouze odtěžení přípovrchových kontaminovaných částí zemního prostředí.

Na lokalitě se povrch bádenských sedimentů nachází v hloubce 8 až 10 m pod povrchem terénu. Na většině plochy je povrch miocenních jílu poměrně plochý. Petrograficky se jedná o plastické vápnité jíly, ojediněle s laminami jílovitého písku. I při přechodu do větších hloubek si zachovávají plastický charakter deformace. Na povrchu jsou jíly víceméně tuhé konzistence a směrem do hloubky přechází v pevnou a postupně až téměř tvrdou konzistenci. Ještě hlouběji přechází až v geneticky zpevněné jílovce.

Na povrch jílu naléhají fluviální sedimenty říčních šterků kvartérního stáří s povrchem v hloubce 2 až 4 m pod stávajícím terénem a mocností převážně 4 až 5 m, ojediněle v rozmezí 1,5 až 10 m. Povrch šterků víceméně kopíruje morfologii podložních miocenních jílu. Litologicky jsou tyto šterky převážně písčité až jílovitopísčité, střednězrné až hrubozrné.

Nad šterky se nachází jemnější fluviální hlíny jílovitého až jílovitopísčitého charakteru tuhé konzistence. Vrstva fluviálních hlín byla původně souvislá v celém zájmovém prostoru, avšak v důsledku intenzivní lidské činnosti byla na většině území odstraněna. V přirozeném, stavební činností nenarušeném stavu, dosahuje poloha mocnosti 2 až 3 m, avšak prakticky v celé ploše území byl původní povrch horizontu fluviálních hlín narušen a redukován stavební činností a na podstatné části území byl odstraněn úplně. V současné době je zachována pouze v okrajových částech území.

Na celém povrchu se nachází antropogenní navážky, jejichž mocnost je velmi variabilní v širokém rozpětí 0 až 10 m. Charakter i původ navážek je velmi rozmanitý. Jsou tvořeny různorodým materiálem, převážně směsí úlomků stavebního odpadu s hlínami, důlní hlušinou - haldovinou a struskami. Převážně se pak jedná o původní, odtěžené a zpět uložené šterky splňující sanační limity, nebo šterky dekontaminované termickou desorpcí.

Hydrogeologické poměry jsou ovlivněny sousedstvím řeky Ostravice, která tvoří východní hranici staveniště celého komplexu staveb městského celku Nová Karolína, a rovněž i jejím nedalekým pravobřežním přítokem říčky Lučina. Podložní miocenní jíly mají charakter izolátoru a jsou pro vodu víceméně nepropustné. Nadložní fluviální jíly mají charakter poloizolátoru a mohou způsobovat mírnou

napjatost v kolektoru podzemních vod, kterým jsou na předmětné lokalitě kvartérní fluviální štěrky. Tento štěrkový kolektor je charakterizován průlinovou propustností a je v něm vyvinuta souvislá zvodeň o mocnosti 1,8 - 6,6 m. Úroveň hladiny podzemní vody se pohybuje od 209,0 do 207,0 m n. m., tj. v hloubce cca 2 až 6 m pod terénem.

Podzemní voda dle normy ČSN EN 206-1 „Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti a shoda“ vykazuje agresivitu stupněm XA2. Jedná se o středně agresivní prostředí s obsahem síranových iontů.

### 3.3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ZALOŽENÍ OBJEKTU

Vzhledem k tomu, že objekt „Obchodního a zábavního centra“ má převážně dvě podzemní podlaží, je základová spára objektu až na úrovni cca 207,0 až 204,0 m n. m., tj. cca 7,3 až 10,3 m pod stávajícím terénem. Nachází se tedy v celé ploše pod hladinou podzemní vody. Základové konstrukce tudíž byly prováděny z výkopu, zapaženém kotvenými štětovými stěnami, které byly vetknuty do nepropustného podloží, a podzemní voda byla odčerpána. V průběhu výstavby, ve fázi kdy již nehrozilo „nadzvednutí“ konstrukce vztlakem podzemní vody, byly štětové stěny odstraněny.

Základovou konstrukci objektu tvoří základová železobetonová vana v interakci s hlubinným založením. Piloty nejsou spojeny se základovou deskou z důvodu nutnosti provedení izolace vůči podzemní tlakové vodě a důlním plynům a odseparování spodních podlaží od účinků bludných proudů. Piloty jsou opatřeny přechodovými železobetonovými hlavicemi, které eliminují kontaktní napětí na hydroizolaci mezi deskou a pilotami.

V základové spáře převážné části objektu se nacházejí fluviální říční štěrky v přirozeném uložení, či v jejich umělé poloze po sanaci území. Ve snížené části objektu, kde se pohybuje základová spára okolo 204,0 m n. m., tvoří tuto spáru již miocenní jíly konzistence tuhé až pevné.

Pro návrh pilot měla zásadní vliv vrstva miocenních jílu a podružně pak vrstva jílovitých štěrků v přirozeném resp. umělém uložení. Dle výsledků zatěžovací zkoušky má vrstva uměle uložených štěrků z hlediska únosnosti pilot shodné vlastnosti jako v přirozeném uložení. Báze štěrků se v prostoru objektu pohybuje na kótě 204,0 m n. m. a zastihuje tak piloty maximálně v mocnosti 3,0 m. Ve snížené části objektu tvoří základovou půdu v okolí dříku pilot pouze miocenní jíly.

Typická geologie uvažována při návrhu pilot je následující:

- *Základová spára na G3:*
  - 0 – (0,8 - 3,0 m) G3 štěrk s příměsí jemnozrné zeminy v přirozeném či umělém uložení, středně ulehlý až ulehlý
  - > (0,8 – 3,0 m) F8 jíl s vysokou plasticitou, tuhé až pevné konzistence
- *Základová spára na F8:*
  - > 0 m F8 jíl s vysokou plasticitou, tuhé až pevné konzistence

Piloty byly provedeny technologií klasického vrtání se zapažením pomocí ocelových pažnic a těžením vrtu vrtným spirálem. Při dostatečné stabilitě stěn vrtu



bylo vrtáno bez pažení, avšak byla dodržena minimální délka paženého vrtu 5,0 m. Piloty jsou průměru 630, 900 a 1 200 mm délky 4,0 až 27,5 m. V případě velkého zatížení, byly navrženy i dvojice pilot. Celkem je objekt založen na 611 ks pilot celkové délky 8 892 m.

Aby nedošlo ke znehodnocení základové spáry během realizace pilot, byly vrtné práce provedeny z pracovní pláne vybudované přibližně 1,0 až 2,0 m nad úrovní základové spáry a piloty byly provedeny s hluchým vrtáním. Piloty jsou z betonu C25/30 XA2 XC2, konzistence směsi S3-S4. Vyztuženy jsou pouze konstrukčně.

Nadpilotové hlavice byly navrženy kopané o půdorysném rozměru od 0,8 x 0,8 m do 1,6 x 1,6 m a jednotné výšky 0,5 m. Nad dvojicemi pilot byla navržena obdélníková hlavice o rozměru 1,4 x 3,1 m s výškou 0,5 m. Beton patek je značky C25/30 XA2 XC2 konzistence S2.

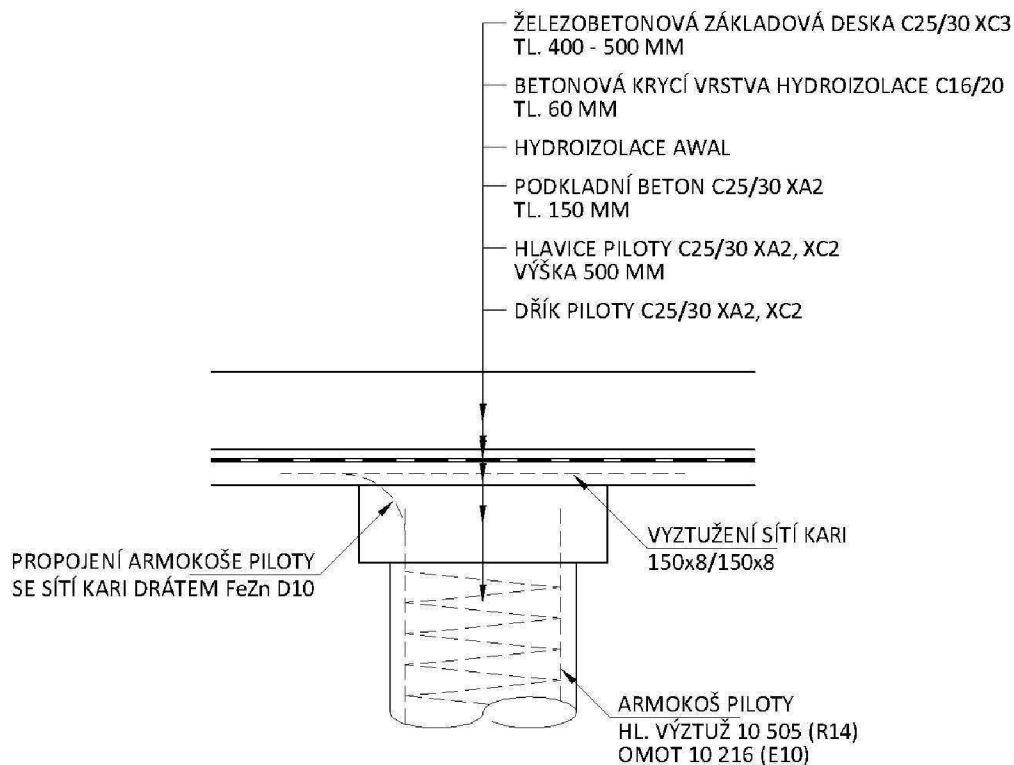
Teprve po dokončení pilot a jejich hlavic, byl proveden dokop a vyčištění daného záběru výkopu z pilotovací úrovně na finální dno jednotlivých výkopových figur a ihned byla provedena betonáž podkladního betonu tak, aby bylo zamezeno znehodnocení základové spáry klimatickými vlivy a stavebními mechanismy. Základová spára byla dočištěna pouze drobnými mechanismy, popř. ručně. Pod základovou deskou nebyly provedeny jakékoliv podsypy; základová spára byla pouze ve vyčištěném rostlém terénu.

Podkladní beton je tloušťky 150 mm v kvalitě betonu C25/30 XA2. Tvar spodního líce podkladního betonu byl dán tvarem finálního dna dílčích figur výkopu. Vzhledem k tomu, že piloty nejsou nikde se základovou deskou propojeny, probíhá podkladní beton přes horní hrany pilot, tj. nad hlavicemi pilot.

Na podkladní beton byla položena vodorovná hydroizolace tvořená volně pokládaným SBS modifikovaným pásem, svařovaným ve spojích. Nad hydroizolací byla provedena separační vrstva umožňující vzájemný prokluz asfaltového pásu a základové desky a vybetonována ochranná vrstva v tloušťce 60 mm a kvalitě betonu C16/20.

Základová deska pod suterénem byla navržena tloušťky 400 mm resp. 500 mm; v místě většího zatížení (zásobovacích dvorů a hypermarketu) je deska zesílena pruhem pod sloupy či hlavicemi celkové tloušťky 1 000 mm, které jsou skryty ve vrstvě násypu.

Deska byla provedena z vodostavebního betonu C25/30 XC3, konzistence směsi S3, maximální průsak 35 mm dle ČSN EN 12 390-8, s ochraněním pracovních spár injektážními hadičkami. V místě hlavic a zesílení v prostoru supermarketu byl použit beton C35/45 XC3, konzistence S3. Výztuž byla navržena s ohledem na omezení šířky trhlin hodnotou 0,25 mm. Horní povrch desky je strojně hlazený a byl opatřen stěrkou překlenující aktivní trhliny do 0,4 mm.



*Obr. 5 Typové schéma v místě piloty [25, upraveno autorem]*

### 3.4 STATICKÉ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY

#### 3.4.1 Popis zkušebních zatěžovacích pilot

Na předmětné stavbě byly v termínu 6. – 13.8.2008 provedeny dvě statické zatěžovací zkoušky.

Osově zatěžované nesystémové zkušební piloty ZZ1 a ZZ2 byly provedeny v časovém předstihu před vlastním založením objektu v místě předpokládaných systémových pilot, tzn. i ve stejných geologických podmínkách. Vzhledem k tomu, že předmětný objekt má dvě podzemní podlaží, byly zkoušky provedeny z výkopu. Výkop nemohl být proveden až na výšku hlav budoucích systémových pilot, tj. základové spáry, jelikož se hladina podzemní vody nacházela nad touto úrovní. Proto byly zatěžovací zkoušky provedeny z úrovně vyšší a to těsně nad hladinou podzemní vody a plášť pilot byl po této výšce (rozdíl mezi hlavou zkušebních a systémových pilot) oddělen separací.

Vzhledem k tomu, že u zkušební piloty ZZ1 došlo k takzvanému „utržení pláště piloty“, nebyla tato zkouška považována za průkaznou a z vyhodnocení byla vyloučena. Odvození únosnosti pilot bylo tedy provedeno na základě statické zatěžovací zkoušky na pilotě ZZ2.

Zkušební pilota ZZ2 byla provedena 11.7.2008 z výškové úrovně 208,5 m n.m.. Do hloubky 4,5 m byla pažená výpažnicí o nominálním průměru 1 200 mm. Poté byla provedena spirálový vrtákem o průměru 1 080 mm a to do celkové hloubky 14,0 m. Pilotou ZZ2 byla zastížena následující geologie, typická pro celé staveniště:

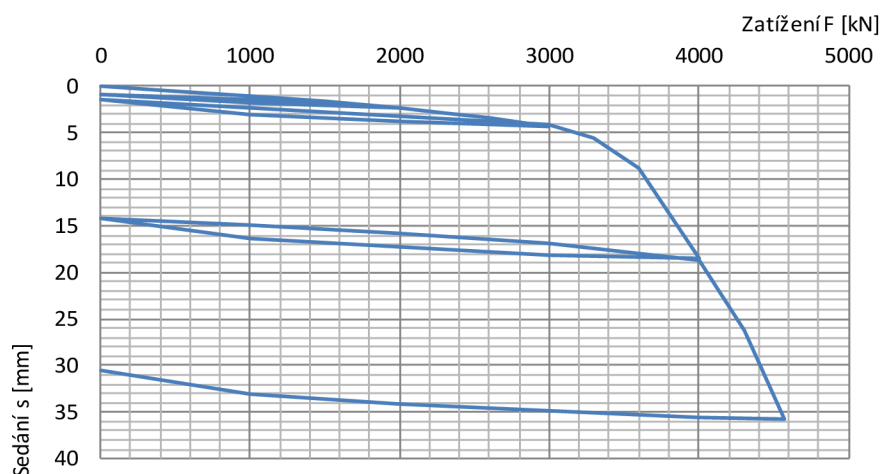
- 0,0 – 3,5 m Navážka – Štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy (G3), středně ulehlý, v umělém uložení po sanaci
- 3,5 – 14,0 m Jíl s vysokou plasticitou (F8), tuhé až pevné konzistence
- Hladina podzemní vody byla naražena v hloubce 0,5 m od pilotovací pláně.

### 3.4.2 Průběh zatěžovací zkoušky

Zatěžovací zkouška probíhala po zatěžovacích stupních 500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 300, 2 600, 3 000, 3 300, 3 600, 4 000, 4 300 a 4 600 kN. Během zkoušky byly provedeny čtyři odlehčovací stupně a to po dosažení čtvrtého, sedmého, desátého a dvanáctého zkušebního zatížení. Na daném zatěžovacím stupni byly sledovány v pravidelných intervalech přírůstky posunu, dokud nebylo splněno kritérium ustalování posunů, tj. v případě, že za posledních 20 sledovaných minut nedošlo k přírůstku sedání větším než 0,1 mm, minimálně však po 60 minutách.

Za účelem sledování průběhu sil po délce zkušební piloty na jednotlivých zatěžovacích stupních, byly do zkušební piloty osazeny strunové tenzometry. Ty byly osazeny ve dvojicích v hloubce 2,1 m, 6,0 m, 9,9 m a 13,8 m od hlavy piloty. Tenzometrické měření bylo provedeno vždy na začátku a na konci zatěžovacího stupně.

Na základě realizované zatěžovací zkoušky na nesystémové zkušební pilotě ZZ2 byl stanoven pracovní diagram piloty (Obr. 6)



Obr. 6 Pracovní diagram piloty

### 3.5 NIVELAČNÍ MĚŘENÍ

Součástí projektu pilotového založení objektu 1.B.003 „Obchodní a zábavní centrum“ byl i návrh monitoringu sedání pilotových základů. Měření sedání sloužilo jako kontrolní mechanismus pilotových základů a jako indikátor jejich funkčnosti při daném zatížení. Sledování probíhalo v průběhu výstavby objektu, bohužel již k němu nedošlo po uvedení stavby do provozu. Pro účely této dizertační práce bylo měření využito pro zjištění přerozdělení zatížení ze sloupu mezi základovou desku a pilotu.

V rámci monitoringu pilotových základů bylo provedeno měření sedání objektu metodou velmi přesné nivelace, kdy došlo v několika etapách výstavby k výškovému zaměření vybraných sloupů. Z hodnot deformací vyplynuly absolutní hodnoty sednutí každého sloupu, nerovnoměrné sednutí „sousedních“ sloupů a nárůsty deformací v čase výstavby a užívání. Výběr sloupů byl proveden tak, aby maximum sloupů tvořilo přímou linii a procházely charakteristickými částmi objektu. Na sloupy byl v úvodní fázi výstavby objektu osazen nivelační hřeb a výškově zaměřen. Přesnost měření byla minimálně  $\pm 1$  mm. Osazení měřících hřebů a provedení nultého měření probíhalo v období 18.6. až 25.8.2010, tj. co nejdříve po provedení sloupů a jejich odbednění. Během výstavby byly provedeny další dvě standartní měření, první dne 10.10.2010 (Zatěžovací stav 1. - ZS1) a druhé 14.11.2010 (ZS2). Třetí zaměření proběhlo po dokončení hrubé stavby (kompletní provedení ŽB monolitických konstrukcí, instalací ocelových konstrukcí a vnesení části zatížení charakteru dlouhodobého nahodilého) dne 26.1.2011 (ZS3). Čtvrté měření bylo uskutečněno v době kolaudace objektu (kompletní zatížení stálé a dlouhodobé nahodilé) a to dne 22.1.2012 (ZS4). K monitoringu při užívání objektu bohužel již nedošlo. Souběžně s měřením deformací byla provedena fotodokumentace objektu za účelem stanovení míry zatížení.

Pro monitoring bylo vybráno celkem 51 sloupů, pod kterými jsou umístěny piloty průměru 630, 900 a 1 200 mm, délky 8 až 25 m, přičemž průměr a délka pilot narůstá se vzrůstajícím zatížením. Sledované piloty zastihují typickou geologii lokality. Hlava většiny se nachází ve vrstvě štěrku s příměsí jemnozrné zeminy (G3) v přirozeném uložení či po sanaci, v případě šesti pilot je základová spára v poloze nižší, štěrky již nezasahuje, a je tak tvořena vysoceplastickým jílem (F8). Měření sedání neproběhlo vždy u všech pilot z důvodu nepřístupnosti, nebo úplného zničení bodu.

## **4 VÝPOČET REÁLNÉHO ZATÍŽENÍ MONITOROVANÝCH PILOT OBJEKTU FÓRUM NOVÁ KAROLINA**

**Úkolem této dizertační práce je zjištění, jaký podíl zatížení, které působí do základových konstrukcí ze sloupu, přebírá základová deska a jaký pilota.** Tento poměr byl zjišťován na objektu 1.B003 „Obchodní a zábavní centrum – FÓRUM NOVÁ KAROLINA“, a to na základě provedené statické zatěžovací zkoušky pilot viz odst. 3.4 a monitoringu sedání vybraných sloupů viz odst. 3.5.

Stěžejní úlohou dizertační práce je tedy výpočet osového zatížení, který ve skutečnosti přenáší piloty.

### **4.1 VYHODNOCENÍ STATICKE ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY**

Na základě realizované zatěžovací zkoušky na nesystémové zkušební pilotě ZZ2 byl stanoven pracovní diagram piloty (Obr. 6) a dále byla z tenzometrického měření sestavena soustava tzv. přenosových funkcí (Obr. 8), které udávají průběh osově síly v dřívku piloty při určitém zatěžovacím stupni. Z měření vyplynulo, že realizovaná

separace horní vrstvy, ve které se systémové piloty nebudou nacházet, nefunguje stoprocentně, a proto byl vyhodnocen přenos zatížení do okolního geologického prostředí i v této vrstvě.

Napětí v pilotě z měření pomocí strunových tenzometrů je určeno Hookovým zákonem, avšak problém nastává v určení skutečného modulu pružnosti betonu  $E_b$ . Pro stanovení reálného modulu pružnosti betonu  $E_b$  bylo použito „cejchování“ pomocí měření napětí na tenzometrech umístěných nejbližší k hlavě piloty. Hodnota osové síly v hloubce  $z$  je potom dána rovnicí:

$$F_{z,s} = E_b \cdot k_E \cdot \varepsilon_{z,s} \cdot A_z$$

Rov. 20

$F_{z,s}$ ..... osová síla v hloubce  $z$  v dřívku piloty odpovídající sednutí  $s$

$E_b$ ..... tabulkový modul pružnosti betonu

$k_E$ ..... koeficient „cejchování“ modulu pružnosti betonu

$\varepsilon_{z,s}$ ..... naměřené poměrné přetvoření v hloubce při zatížení odp. sednutí  $s$

$A_z$ ..... průměr piloty v hloubce  $z$

Z průběhu přenosových funkcí bylo v jednotlivých zatěžovacích stupních stanoveno napětí na patě piloty a plášťového tření. Pro důkladnou analýzu únosnosti piloty bylo mobilizované plášťové tření zjišťováno v jednotlivých geologických vrstvách, kterými dřívok piloty prochází. Z průběhu přenosových funkcí vyplývají následující vlastnosti jednotlivých vrstev:

▪ **Navážka (odseparovaná vrstva):**

- provedená separace nefunguje stoprocentně, vrstva se podílela na přenosu zatížení,
- pro únosnost systémových pilot je vrstva nezajímavá, protože se piloty v této vrstvě nenacházejí.

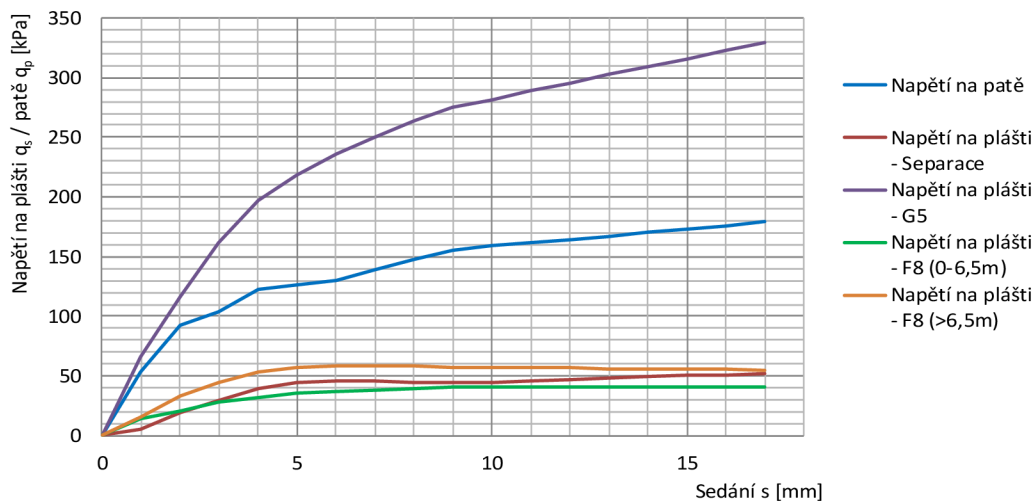
▪ **G3 Štěrky s příměsí jemnozrnné zeminy:**

- zastížené štěrky v nepřírozeném uložení jsou dobré kvality a lze je považovat pro výpočet únosnosti pilot za středně ulehlé až ulehlé, stejně jako štěrky v přírozeném uložení,
- příliš vysoké hodnoty plášťového tření ukazují na vytvoření kaverny ve zkušební pilotě; pro únosnost systémových pilot byly tudíž redukovány.

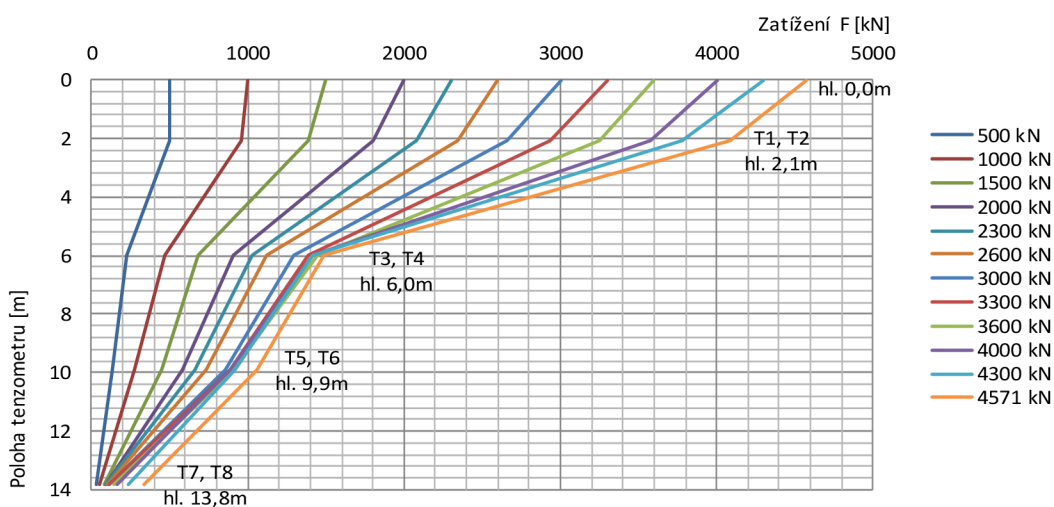
▪ **F8 Jíl s vysokou plasticitou:**

- z hlediska únosnosti piloty nevykazuje příliš dobré vlastnosti,
- horní sub vrstvu mocnosti 6,5 m lze pro výpočet únosnosti považovat maximálně za jíl tuhé konzistence, v nižším uložení potom za jíl konzistence tuhé až pevné,
- velice malá únosnost paty piloty odpovídá jílu tuhé konzistence; podíl paty na únosnosti piloty je menší než 10%.

Mobilizaci napětí na patě a plášti piloty zobrazuje následující graf.



Obr. 7 Napětí na plášti  $q_s$  / patě  $q_p$



Obr. 8 Průběh přenosových funkcí  $F_{z,s}$

## 4.2 VÝPOČET ZATÍŽENÍ SLEDOVANÝCH PILOT

Skutečné zatížení, které působí na piloty, bylo zjištěno na základě výpočtu únosnosti osamělých plovoucích pilot osově zatížených vycházející z tvaru mezní zatěžovací křivky. Při výpočtu byly zohledněny poznatky z provedené statické zatěžovací zkoušky nesystémové piloty ZZ2, která je popsána v odstavci 3.4 a vyhodnocena v odstavci 4.1. Zatížení bylo zjišťováno na souboru pilot, jejichž sedání bylo monitorováno v jednotlivých zatěžovacích stavech, při kterých proběhla nivelace, jak je popsáno v odstavci 3.5.

Osová síla působící na pilotu byla odvozena ze zatěžovací křivky na základě jejího sedání. Zatěžovací křivka každé piloty byla sestavena podle výpočtu uvedeném v odstavci 2.2. Parametry zemin, které vstupují do výpočtu, byly zvoleny tak, aby mezivýsledky výpočtu byly v souladu se závěry zatěžovací zkoušky a hodnota zatížení byla tak co nejpřesnější. Korespondují si:

- Mobilizované plášťové tření pilot v jednotlivých zeminách (pouze hodnoty u G3 byly sníženy na reálnou hodnotu, odpovídající téměř ulehlému šterku,



jelikož nadměrné hodnoty u zkušební piloty ukazují, že zde zřejmě došlo k vytvoření kaverny).

- Napětí na patě piloty.
- Reálný modul pružnosti betonu (pro zhotovení systémových pilot byl použit shodný beton, jako u piloty zkušební, u které bylo z tenzometrického měření zjištěno, že modul pružnosti betonu je v případě pilot ve skutečnosti mnohem nižší).

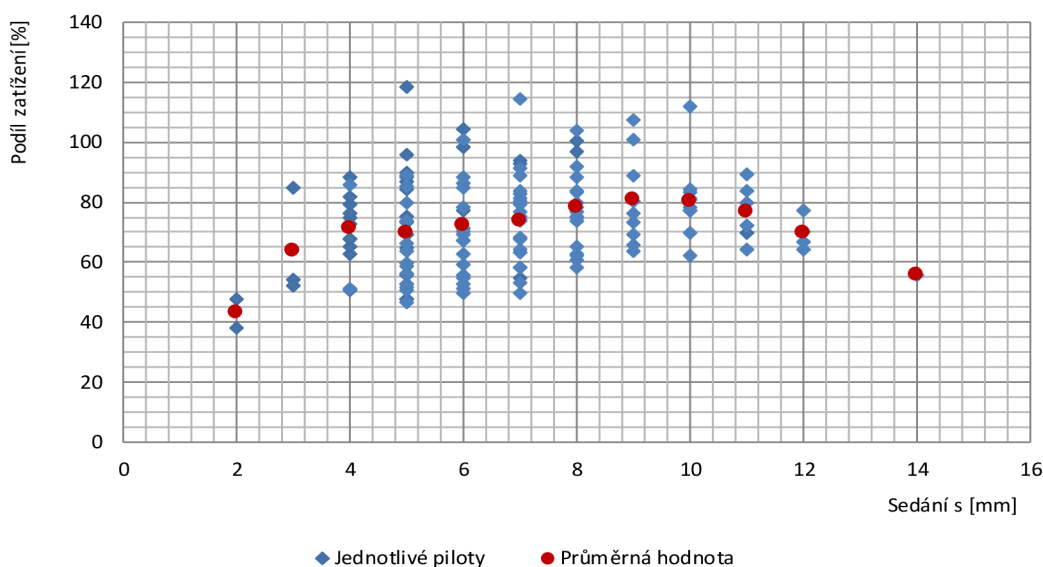
Pro každou sledovanou piloty byla sestavena zatěžovací křivka. Z té byla poté na základě velikosti sedání v určitém zatěžovacím stupni odečtena hodnota osově síly působící na hlavu piloty.

### 4.3 ANALÝZA VÝSLEDKŮ VÝPOČTU

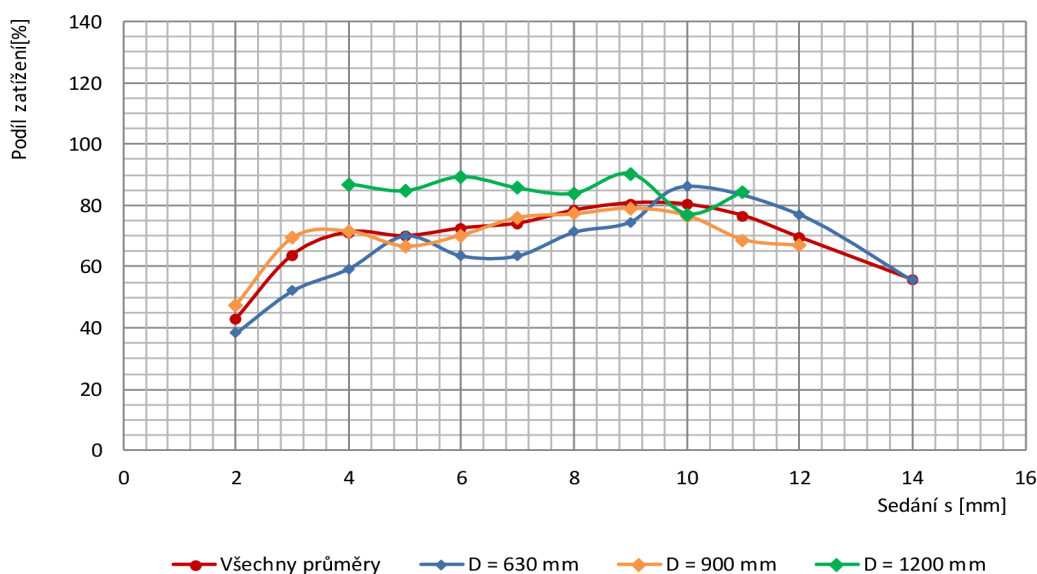
Základová deska objektu 1.B003 „Obchodní a zábavní centrum – FÓRUM NOVÁ KAROLINA“ je uložena ve dvou zcela rozdílných inženýrskogeologických poměrech. Základová spára převážné části objektu se nachází na středně ulehlém až ulehlém štěrku s příměsí jemnozrnné zeminy tř. G3, zbylý úsek, který je uložen níže, tvoří vysoceplastický jííl tuhé až pevné konzistence tř. F8. Z tohoto důvodu byla snaha sledovat přerozdělení celkového zatížení ze sloupu mezi základovou desku a pilotu zvláště pro jednotlivé základové poměry. Bohužel použitelných výsledků v prostředí jílovité zeminy je velice málo a vyhodnocení nelze brát jako průkazné.

**Vypočítané hodnoty podílu zatížení, které pilota přebírá, se pohybují mezi 30 až 115%.** Ojedinelé hodnoty nad 100% lze přisoudit nepřesnostem ve výpočtu únosnosti pilot, odhadu zatížení a technologickému postupu při provádění pilot, který má na jejich únosnost značný vliv.

#### 4.3.1 Vyhodnocení přenosu zatížení do piloty, tvoří-li základovou spáru zemina tř. G3



**Obr. 9** Zatížení přenášené pilotou v závislosti na velikosti sedání



Obr. 10 Zatížení přenášené pilotou v závislosti na průměru piloty

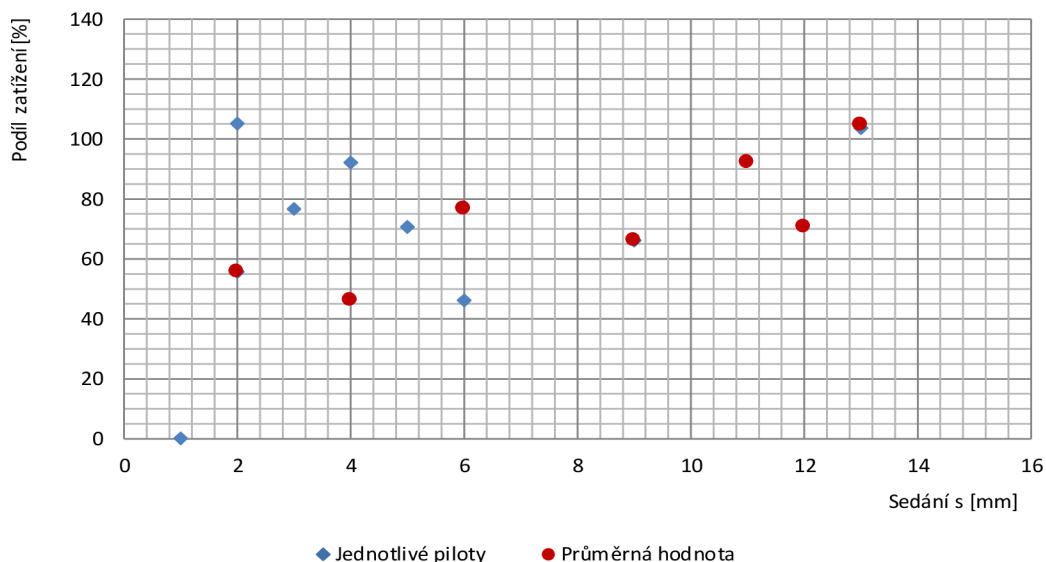
Z uvedených grafů lze říci:

- Průměrná hodnota podílu síly ze sloupu, který přenáší do podloží pilota je 73%, základová deska tedy přenáší průměrně 27%.
- Nebyla vysledována výraznější závislost podílu zatížení, které přenáší pilota, na velikosti sedání. Vyloučíme-li z vyhodnocení případy, kdy je průměrný podíl stanoven pouze z minima hodnot (pro sedání 2, 3 a 14 mm) je průměrný podíl přenosu zatížení do piloty takřka na velikosti sedání nezávislý. Z toho lze usuzovat na fakt, že při takto malém sedání (do cca 14 mm) nedochází k plné aktivaci podzákladí desky a vytvořené kontaktní napětí zdaleka nedosahuje hodnot únosnosti základové půdy.
- Lze sledovat závislost podílu na zatížení přenášeného pilotou na velikosti průměru piloty, tj. na velikosti únosnosti piloty. Piloty průměru 630 mm mají únosnost (při maximálním sedání  $s_{max} = 25$  mm)  $R_{bu,630} = 700 - 1150$  kN v závislosti na geologii a délce piloty. Pro piloty průměru 900 mm je  $R_{bu,900} = 1200 - 2250$  kN. U pilot průměru 1200 mm dosahuje únosnost hodnoty  $R_{bu,1200} = 2500 - 3450$  kN. Pro obor sedání do 9 mm se jeví, že piloty o menší únosnosti přenáší menší podíl celkového zatížení, než piloty únosnější. Tato závislost však při velikosti sedání větším než 9 mm zaniká.

#### 4.3.2 Vyhodnocení přenosu zatížení do piloty, tvoří-li základovou spáru zemina tř. F8

Dat je pro tuto kategorii tak málo, že z nich nelze usuzovat na jakékoli závěry. Lze však alespoň říci, že se nepotvrdil předpoklad, že piloty budou v případě méně únosné základové spáry přenášet větší podíl celkového zatížení a to zřejmě se stejného jevu, který byl vyzorován v případě, tvoří-li základovou spáru únosnější zemina tř. G3.

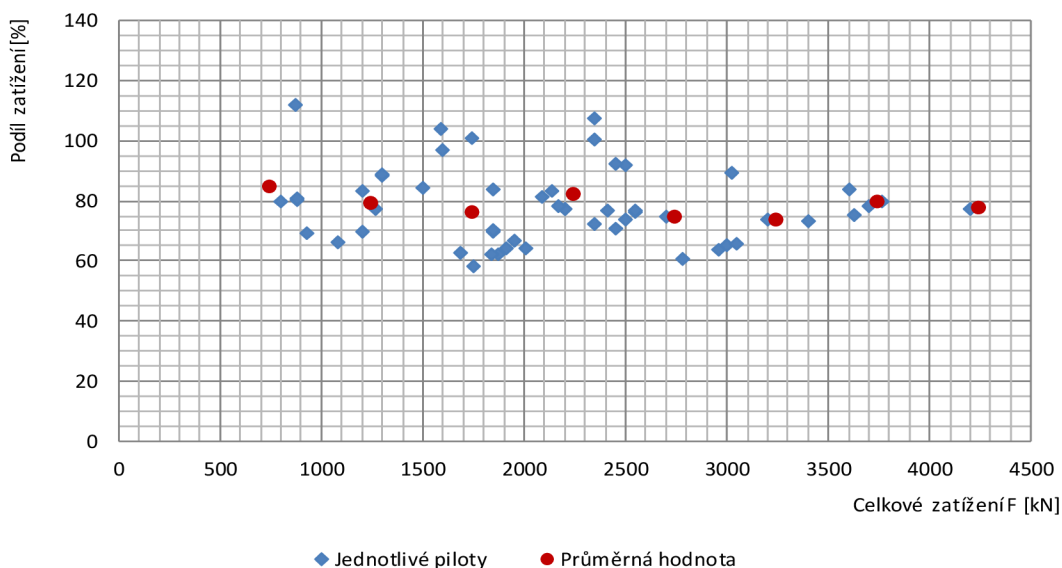




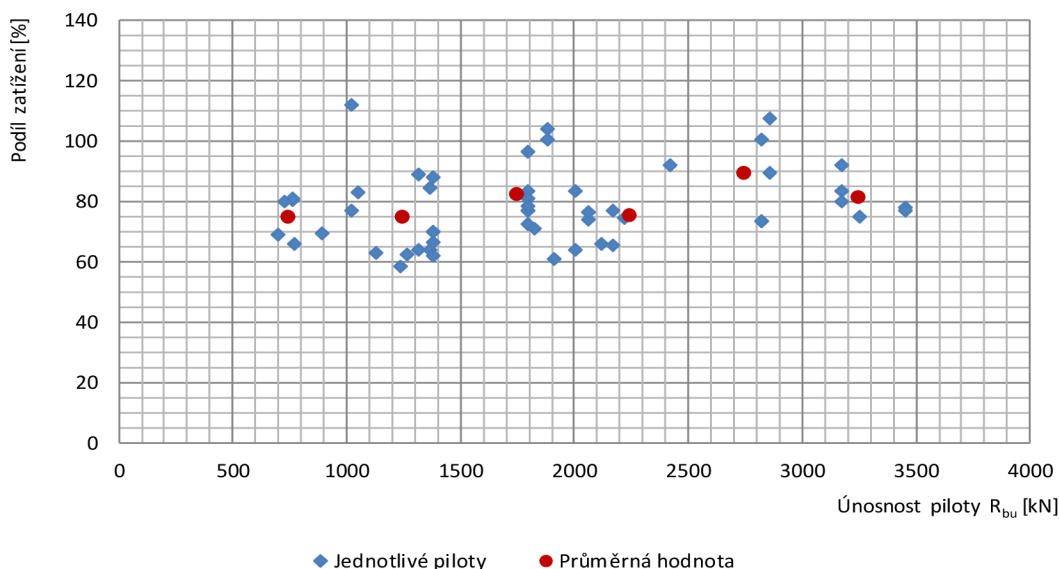
**Obr. 11** Zatížení přenášené pilotou v závislosti na velikosti sedání

### 4.3.3 Vyhodnocení přenosu zatížení do piloty pro obor sedání 8 až 12 mm

Pilotové základy se obvykle navrhují na sedání okolo 10 mm, z tohoto důvodu byla podrobněji vyhodnocena data odpovídající právě sedání 8 až 12 mm. Protože nebyl zjištěn významnější rozdíl v přenosu zatížení do pilot, tvoří-li základovou spáru zemina tř. F8, nebo výrazně únosnější zemina tř. G3, byla tato data vyhodnocována společně.



**Obr. 12** Závislost podílu zatížení přenášeného pilotou na celkovém zatížení



Obr. 13 Závislost podílu zatížení přenášeného pilotou na únosnosti piloty

Podle tvaru sestaveného histogramu a faktu, že medián hodnot se téměř shoduje s aritmetickým průměrem, lze datům přisoudit Gaussovo rozdělení, tj. normální rozdělení.

Gaussovo rozdělení  $f(x)$  dané proměnné, tj. podílu zatížení přenášeného pilotou, je charakterizováno následujícími hodnotami:

- Aritmetický průměr .....  $\bar{x} = 78,1\%$
- Medián .....  $\mu = 77,0\%$
- Směrodatná odchylka .....  $\sigma = 12,4\%$

*Z uvedených dat lze konstatovat, že pro obor sedání mezi 8 až 12 mm platí:*

- Průměrná hodnota podílu síly ze sloupu, který přenáší do podloží pilota je 77%, základová deska tedy přenáší průměrně 23%.
- Velikost podílu přenosu zatížení do piloty nezávisí při daném sedání na velikosti působícího zatížení.
- Velikost podílu přenosu zatížení do piloty nezávisí při daném sedání na velikosti únosnosti piloty.
- Z uvedeného rozboru vyplývá, že při běžném sedání, na které se hlubinné základy navrhují, ještě nedochází k plné aktivaci základové půdy a kontaktní napětí nedosahuje hodnot únosnosti. Ta se může orientačně pohybovat v případě štěrků s příměsí jemnozrné zeminy tř. G3 okolo 500 kPa, resp. 120 kPa v případě jílu s vysokou plasticitou tuhé až pevné konzistence. K plné funkci podzákladí dochází až při větším sedání.

## 5 MATEMATICKÝ MODEL

Stanovené hodnoty ztížení v pilotách byly porovnány s výsledky matematického modelu provedeného ve výpočetním programu Scia Engineer 14.0. Model byl vytvořen následovně:

- Model byl rozdělen do pěti částí, které odpovídají dilatačním celkům.
- Modelována byla pouze základová deska, na kterou byly vloženy účinky z horní stavby. Zatížení bylo vloženo do uzlů v základové desce v místě sloupů.
- Základová deska byla podepřena zemním prostředím – parametry C1x, C1y, C1z, C2x a C2y, zjištěnými postupnou iterací nástrojem SOILIN.
- Piloty byly nahrazeny pružinami s lineárním nárůstem tuhosti.

Tuhosti pružin, nahrazující jednotlivé piloty byly stanoveny pro stav, který odpovídá sedání 10 mm.

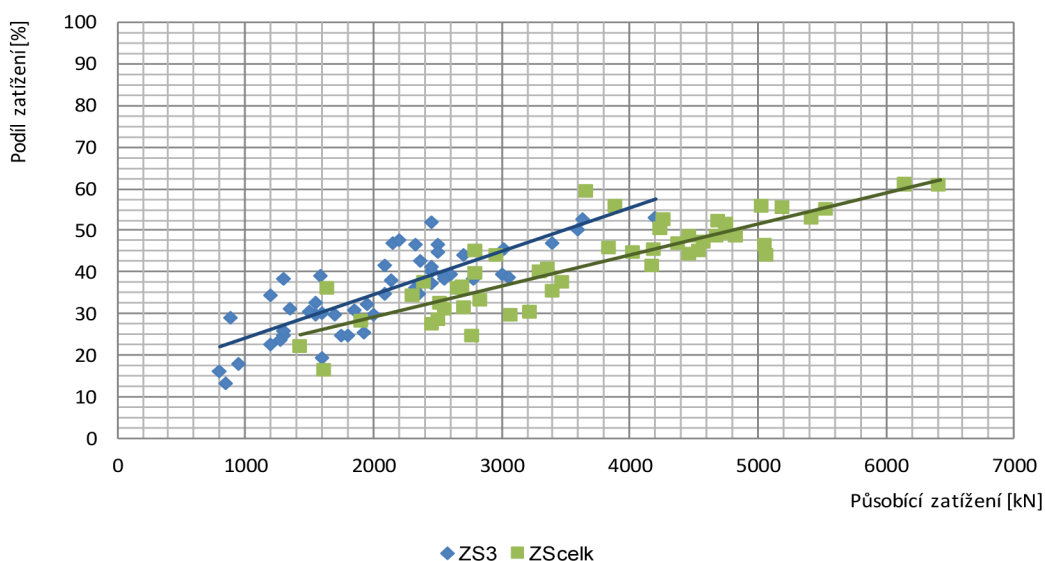
V matematickém modelu byly uvažovány dva různé inženýrskogeologické profily označeny GP1 – PŘ a GP2 – SAN. Liší se pouze vlastnostmi šterkové vrstvy. Zatímco dilatační celky K1 a K4 spadají do oblasti, kde se vyskytují přirozeně uložené šterky, dilatační celky K2, K3 a K5 se nacházejí v oblasti sanované. Zde jsou šterky uměle uloženy a mají nižší únosnost. Parametry byly převzaty ze závěru provedeného inženýrskogeologického průzkumu [23].

Aby mohly být výsledky matematického modelu porovnány se skutečností, byl každý dilatační celek posuzován v zatěžovacím stavu ZS3, který odpovídá fázi výstavby ze dne 26.1.2011, kdy došlo k nivelaci monitorovaných pilot. Z modelu bylo určeno, jaký podíl zatížení ze sloupu přebírá pilota.

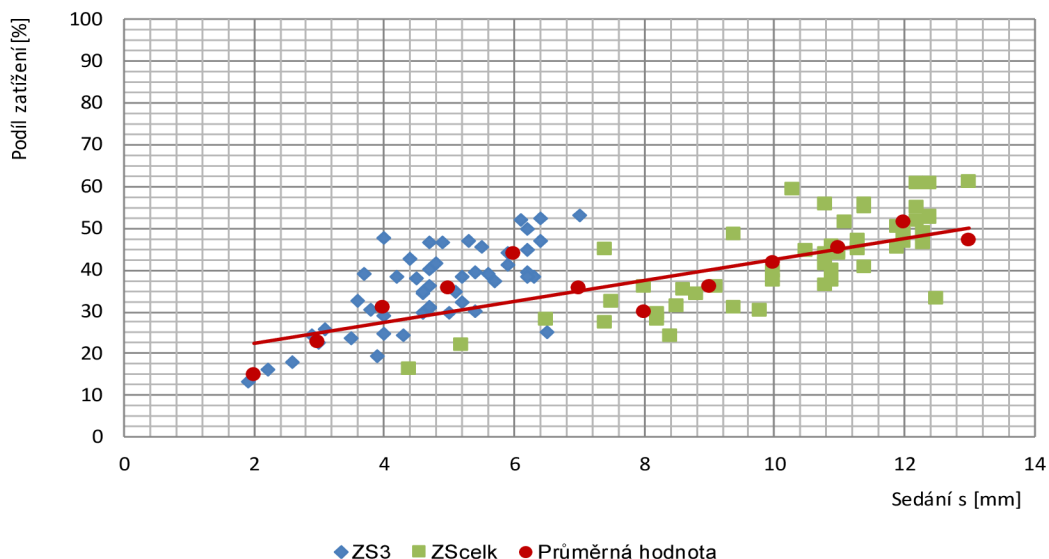
Pro zajímavost byl matematickým modelem vypočten i finální stav, ale bez účinku vztlaku podzemní vody, která objekt značně nadlehčuje. Tento případ umožňuje zjištění chování podloží a konstrukce při vyšších zatíženích, na které byly piloty projektovány.

## 5.1 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

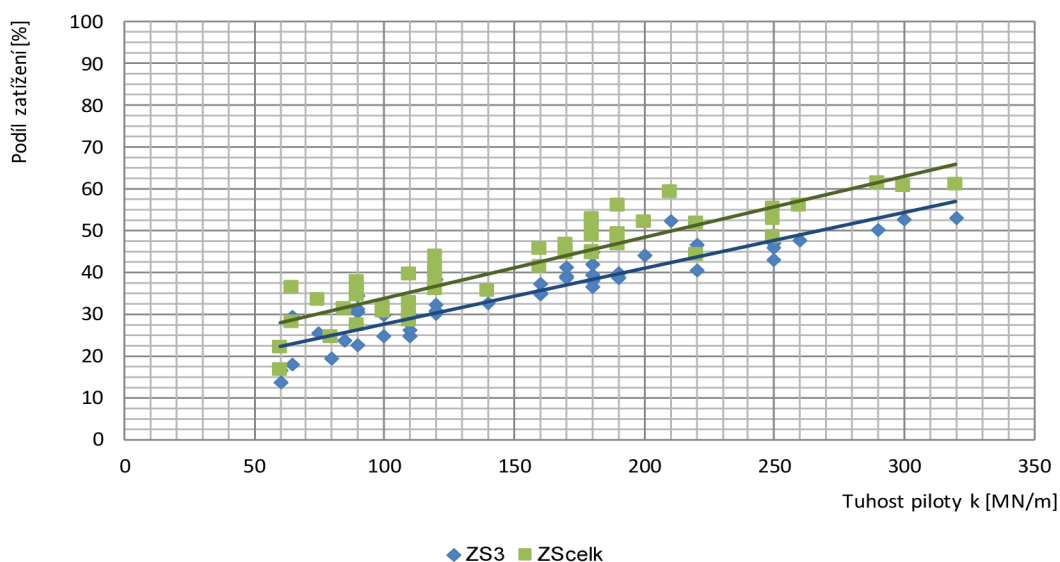
**Dle matematického modelu přebírají piloty 15 až 60% z celkového zatížení sloupu. Velikost sedání se pohybuje od 2 do 7 mm v případě fáze výstavby odpovídající zatěžovacímu stavu 3, resp. od 4 do 13 mm v případě finálního stavu bez vlivu vztlaku.**



**Obr. 14** Zatížení přenášené pilotou v závislosti na působícím zatížení



**Obr. 15** Zatížení přenášené pilotou v závislosti na velikosti sedání



**Obr. 16** Zatížení přenášené pilotou v závislosti na tuhosti piloty

Výsledným datům z numerického modelu lze přisoudit Gaussovo rozdělení. Funkce  $f(x)$  dané proměnné, tj. podílu zatížení přenášeného pilotou, je charakterizována následujícími hodnotami:

**Fáze výstavby ze dne 26.1.2011 – ZS3:**

- Aritmetický průměr .....  $\bar{x} = 35,6\%$
- Medián .....  $\mu = 37,3\%$
- Směrodatná odchylka .....  $\sigma = 9,8\%$

**Finální stav – celkové zatížení bez vlivu vztlaku – ZScelk:**

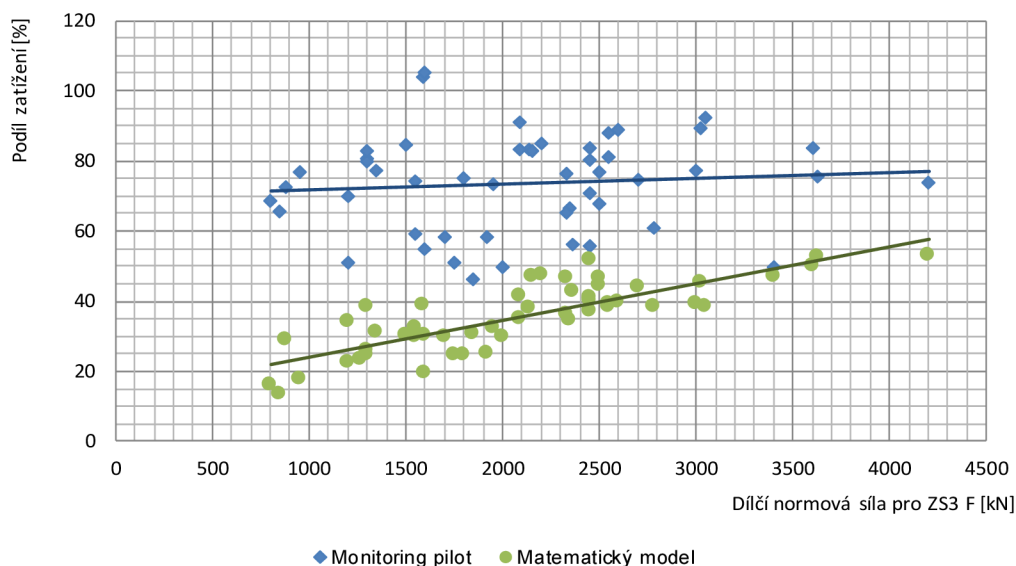
- Aritmetický průměr .....  $\bar{x} = 42,3\%$
- Medián .....  $\mu = 44,1\%$
- Směrodatná odchylka .....  $\sigma = 10,8\%$

*Z uvedeného rozboru lze konstatovat:*

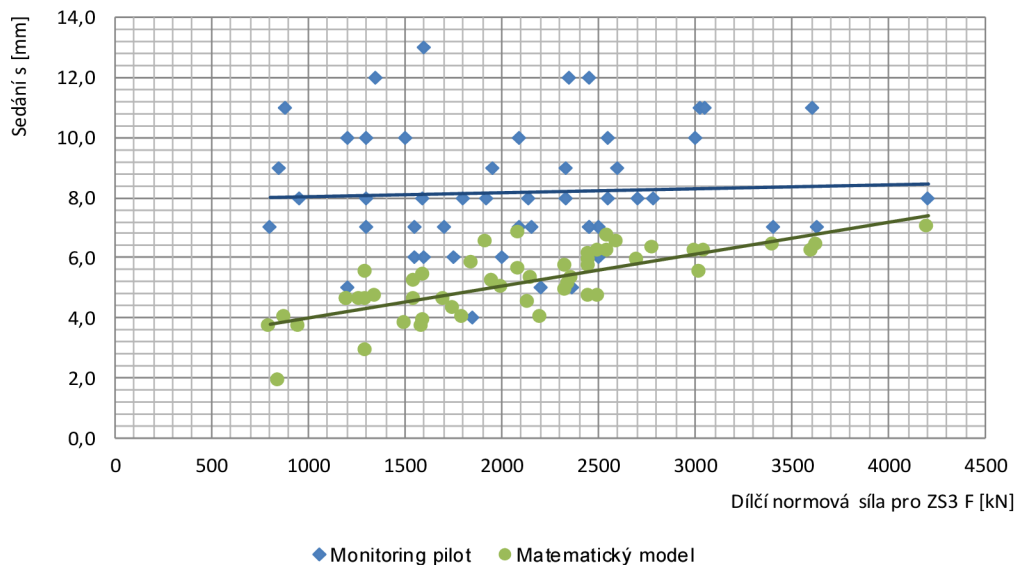
- Průměrná hodnota podílu síly ze sloupu, který přenáší pilota, stanovená matematickým modelem je 36% v případě zatěžovacího stavu 3, 42% v případě finálního zatížení (bez vlivu vztlaku), základová deska tedy dle modelu přenáší průměrně 64%, respektive 58% zatížení.
- Lze sledovat závislost podílu zatížení přenášeného pilotou na velikosti působícího zatížení, sedání a tuhosti piloty. S rostoucím působícím zatížením, tedy i sednutím a tuhostí piloty, roste i velikost podílu zatížení přenášeného pilotou a snižuje se zatížení přenášené základovou deskou.
- Kontaktní napětí se v případě ZS3 pohybuje od takřka nulové hodnoty v místě mezi sloupy až po hodnotu 60 až 90 kPa v blízkosti sloupů. V případě celkového zatížení je kontaktní napětí samozřejmě vyšší a to až 150 kPa v místě sloupů.

## 6 POROVNÁNÍ MATEMATICKÉHO MODELU S REALITOU

Hodnoty osového zatížení monitorovaných pilot, stanovené matematickým modelem vytvořeným ve výpočetním programu Scia Engineer 14, byly porovnány s reálnými hodnotami zjištěnými na základě nivelačního měření a statické zatěžovací zkoušky. Porovnáván byl zatěžovací stav 3. Taktéž bylo porovnáno i sedání sledovaných sloupů. Ve finálním stavu porovnání nebylo možné provést, protože bohužel v této fázi nedošlo k nivelačnímu měření.



*Obr. 17 Zatížení přenášené pilotou v závislosti na působící síle*



*Obr. 18 Sedání pilot v závislosti na působící síle*

**Z uvedeného porovnání vyplývá:**

- **Matematický model přisuzuje pilotě mnohem menší podíl zatížení, než bylo zjištěno z reálného chování konstrukce. Průměrně vychází osová síla stanovená matematickým modelem přibližně o polovinu menší, než výpočtem na základě monitoringu.**
- **Vlivem nižší osové síly vykazují piloty v matematickém modelu samozřejmě i nižší sedání.**
- **Se vzrůstajícím působícím napětím se rozdíl mezi jednotlivými přístupy podstatně zmenšuje.**

## 7 ZÁVĚR

Dizertační práce se zabývá zjištěním, jak veliký podíl napětí je přenášen z horní stavby prostřednictvím sloupů do hlubinného zakládání v podobě pilot, a to na konkrétním případě – objektu 1.B003 Obchodní a zábavní centrum, který je součástí komplexu FÓRUM NOVÁ KAROLINA.

Spolupůsobení základové desky s pilotou bylo zkoumáno celkem na 51 monitorovaných sloupech, pod kterými jsou umístěny piloty průměru 630, 900 a 1 200 mm, délky 8 až 25 m, přičemž průměr a délka pilot narůstá se vzrůstajícím zatížením. Sedání těchto sloupů bylo v průběhu výstavby zjišťováno metodou přesné nivelace. Na základě hodnoty sedání bylo pro každou pilotu v jednotlivých zatěžovacích stavech stanoveno příslušné skutečné zatížení. Zatížení bylo odečteno z mezní zatěžovací křivky, která byla pro každou sledovanou pilotu sestavena na základě výsledků statické zatěžovací zkoušky provedené na lokalitě na nesystémové pilotě. Odvozené skutečné zatížení pilot pak bylo porovnáno s celkovou silou přenášenou sloupem do základových konstrukcí a byl stanoven poměr, jakým se na přenosu zatížení podílí pilota a jakým základová deska. Zjištěné hodnoty osového



zatížení piloty byly, pro určitý zatěžovací stav, porovnány i s výsledky matematického modelu.

*Výše uvedeným postupem bylo pro tento konkrétní případ zjištěno:*

- Průměrná hodnota podílu síly ze sloupu, který přenáší pilota je 73%, základová deska tedy přenáší průměrně 27%.
- Pro geotechnicky zajímavý obor sedání mezi 8 až 12 mm, je průměrná hodnota podílu síly ze sloupu, který přenáší pilota 77%, základová deska tedy přenáší průměrně 23%.
- Velikost podílu zatížení, které přenáší pilota, je takřka nezávislá na velikosti sedání.
- Velikost podílu přenosu zatížení do piloty nezávisí na velikosti působícího zatížení ani na velikosti únosnosti piloty.

*Matematickým modelem bylo určeno:*

- Průměrná hodnota podílu síly ze sloupu, který přenáší pilota, stanovená matematickým modelem je:
  - 36% v případě zatěžovacího stavu 3.
  - 42% v případě finálního zatížení (bez vlivu vztlaku).
  - základová deska tedy dle modelu přenáší průměrně 64%, respektive 58% zatížení.
  - V numerickém modelu lze sledovat závislost podílu zatížení přenášeného pilotou na velikosti působícího zatížení, sedání a tuhosti piloty. S rostoucím působícím zatížením, tedy i sednutím a tuhostí piloty, roste i velikost podílu zatížení přenášeného pilotou a snižuje se zatížení přenášené základovou deskou.

Z provedeného rozboru vyplývá, že při běžném sedání, na které se hlubinné základy navrhují, ještě nedochází k plné aktivaci základové půdy a kontaktní napětí nedosahuje hodnot únosnosti. Základová spára je tedy plně využita až při mnohem větším sedání konstrukce. Z tohoto důvodu nebyl pozorován výraznější rozdíl mezi přenosem zatížení do pilot v místech, kde tvoří základovou spáru jílovitá zemina a kde únosnější štěrk.

Bylo zjištěno, že matematický model přisuzuje pilotě mnohem menší podíl zatížení, než bylo stanoveno z reálného chování konstrukce. Průměrně vychází osová síla stanovená matematickým modelem přibližně o polovinu menší, než zpětným výpočtem na základě monitoringu. Vlivem nižší osové síly vykazují piloty v matematickém modelu samozřejmě i nižší sedání. Se vzrůstajícím působícím napětím se rozdíl mezi jednotlivými přístupy podstatně zmenšuje. Důvodem, proč matematický model přisuzuje pilotě menší podíl na přenosu napětí, než v reálném případě, může být ten, že základové půdě nástroj SOILIN přisuzuje při malé deformaci vyšší tuhost, než je tomu ve skutečnosti. Dá se usuzovat na to, že v případě menších deformací (přibližně do 20 mm), by měla být tuhost podloží

redukována. Navíc se výsledky matematického modelu samozřejmě odvíjí od vstupních hodnot parametrů zemin, zadaných uživatelem. Nejzásadnější vliv na výpočet má velikost deformačního modulu přetvárnosti  $E_{def}$ , který se stanovuje ze zkoušek in situ, a to buď ze zatěžovacích zkoušek, nebo nepřímými metodami jako jsou presiometrické či penetrační zkoušky. Protože se však tyto zkoušky provádí jen v omezené míře, nebývají tyto hodnoty zcela přesné a většinou se užívá průměrná hodnota směrných normových charakteristik, které však mají značný rozptyl. Tato nejistota ve vstupních parametrech zásadně ovlivňuje i výsledky numerického modelu. **V tomto případě snížení  $E_{def}$  zemin o 20% způsobí zvýšení reakcí do pilot zhruba o 10%.**

Protože se dizertační práce zabývá pouze jediným konkrétním případem, nelze na jejím základě stanovit definitivní závěr, který by vymezoval, jaký podíl zatížení vstupující do piloty má být při návrhu základových konstrukcí uvažován. Práce je však důležitým vstupním krokem k této problematice a lze doufat, že bude následována i na dalších stavbách, tak aby bylo možné vysledovat závislost podílu zatížení vstupujícího do pilot vzhledem ke geologickým podmínkám, velikosti napětí, poměru tuhosti základových konstrukcí apod. Ideálně by měl být stanoven koeficient redukce tuhosti podloží, pro nástroj SOILIN pro různé obory deformace základové desky.

Nesporně však práce dokazuje, že je mylné se domnívat, že základová deska se na přenosu zatížení může podílet až padesátiprocentní či dokonce větší mírou.

Významným zjištěným poznatkem dizertační práce je dále to, že **provedená zatěžovací zkouška vykazuje vyšší únosnost piloty, než je tomu v případě systémových pilot. To je dáno s nejvyšší pravděpodobností technologickým provedením.** Únosnost pilot je významně ovlivněna právě způsobem provedení a dá se předpokládat, že při realizaci zkušební piloty, která bude zatěžována a monitorována, je na správnou technologii provádění dbáno podstatně více, než v případě realizace vlastních pilot, kdy je již prováděcí firma často tlačena krátkými termíny doby výstavby. Realizace zatěžovacích zkoušek na nesystémových pilotách v předstihu před návrhem pilotových konstrukcí je jistě velice vhodná. Může přinést jak ekonomické úspory, bude-li zjištěno podloží únosnější, než bylo uvažováno, ale také v opačném případě předejít případným problémům s nadměrnou deformací konstrukce. Výsledky by však měly být z výše uvedeného důvodu brány s rezervou a částečně redukovány.

## **7.1 DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝVOJ OVĚŘOVÁNÍ SPOLUPŮSOBENÍ ZÁKLADOVÝCH KONSTRUKCÍ**

Provedení obdobného průzkumu, jaký byl realizován na objektu 1.B003 „Obchodní a zábavní centrum FÓRUM NOVÁ KAROLINA“, je záležitostí velice finančně náročnou a v praxi se tudíž běžně neprovádí. Pro přesnější zjištění spolupůsobení základové desky a piloty je však nezbytné a projektanti by měli mít



snahu je u investorů prosazovat. Pro vyšší efektivitu by bylo vhodné u případných dalších průzkumů dodržovat následující doporučení:

- Aby mohlo být zatížení v pilotě stanoveno co nejpřesněji, měl by být průzkum proveden na podstatně jednodušší konstrukci, aby nevstupovalo do výpočtu tolik vlivů (jakým byl v tomto případě vztlak) a bylo by tedy jednodušší určit zatížení od horní stavby i v jednotlivých fázích výstavby.
- Měl by být proveden nivelační monitoring sloupů i při celkovém zatížení objektu, tj. při jejím užívání, aby bylo možné sledovat chování konstrukce i při vyšší deformaci.
- Je přínosné doplnit monitoring pilot o tenzometrické měření napětí ve vybraných sloupech, který by pomohl přesněji stanovit skutečné zatížení vstupující do základových konstrukcí. V každém sloupu by měla být osazena minimálně trojice či čtveřice strunových tenzometrů a to těsně nad základovou deskou.
- Taktéž je vhodné provést na lokalitě vždy minimálně dvě průkazné zatěžovací zkoušky, aby mohla být spolehlivěji určena únosnost pilot.

Do té doby, by rozhodně neměl být podíl základové desky na přenosu zatížení přeceňován a výsledky matematického modelování by měli být úměrně redukovány, tj. zvyšovány reakce v podporách (tzn. zatížení v pilotách).

**Přiměřené se jeví zatím prisuzovat pilotám okolo 80 až 90% celkového zatížení z horní stavby a na tyto hodnoty potom hlubinné základy navrhovat.**

## 8 LITERATURA

- [1] MASOPUST, J.: *Vrtané piloty*, Čeněk a Ježek s.r.o., Praha, 1994
- [2] MASOPUST, J.: *Speciální zakládání staveb, 1. díl*, Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 2004
- [3] MASOPUST, J.: *Speciální zakládání staveb, 2. díl*, Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 2006
- [4] WEIGLOVÁ, K.: *Mechanika zemin*, Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno, 1998
- [5] ŠTĚPÁNEK, Z.: *Zakládání staveb 10, Výpočty 1*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997
- [6] KOLÁŘ, V., NĚMEC, I.: *Modelling of Soil-Structure Interaction*, ELSEVIER, New York, Oxford, London, Amsterdam, Tokyo, 1989
- [7] KOLÁŘ, V.: *Matematické modelování geomechanických úloh*, Skriptum pro postgraduální studium FAST VUT Brno, 1990
- [8] KOLÁŘ, V., NĚMEC, I.: *Contact Stress and Settlement in the Structure – Soil Interface*, Studie ČSAV 16.91, Academia, Praha, 1991
- [9] KOLÁŘ, V.: *FEM Z, Teoretický manuál k programům pro výpočty základů a zemních těles*, FEM consulting s.r.o., Brno, 1993
- [10] NEMETSCHKE SCIA, *Teoretický manuál NEXIS 32 rel. 3.40, SILIN Iterační výpočet konstrukce – podloží, Výpočet sedání a interakce plošných základů a podloží*, SCIA CZ s.r.o.,
- [11] NEMETSCHKE SCIA, *Teoretický manuál Scia Engineer, Soil-In (výpočet parametrů C)*, SCIA CZ s.r.o.,
- [12] BUČEK, J., NĚMEC, I., RUSINA, R., MÍČA, L., NOVÁK, D., TEPLÝ, B.: *Řešení interakce plošných konstrukcí s podloží*, Odborný internetový článek, Konstrukce Media s.r.o., 2009 (zdroj: <http://www.konstrukce.cz/clanek/reseni-interakce-plosnych-konstrukci-s-podlozim>)
- [13] ČSN 731001, *Základová půda pod plošnými základy*
- [14] ČSN 731002, *Pilotové základy*
- [15] ČSN 731201 *Navrhování betonových konstrukcí*
- [16] ČSN EN 1536, *Provádění speciálních geotechnických prací – Vrtané piloty*
- [17] ČSN EN 206-1, *Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti a shoda*
- [18] ČSN EN 1997-1, *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla*
- [19] ČSN EN 1997-2, *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*
- [20] VUIS – Zakladanie stavieb s.r.o.: *Sprava zaťažovacie skúšky pilót, Ostrava – Nová Karolína*, zodpovedný řešitel Ing. Peter Mišove, CSc., Bratislava, 2008
- [21] TOPGEO Brno s.r.o.: *Realizační projektová dokumentace – Návrh monitoringu sedání, Nová Karolína, fáze I, 1.B.003 Obchodní a zábavní centrum*, zodpovedný projektant Ing. Tomáš Komárek, Brno, 2010

- [22] TOPGEO Brno s.r.o.: *Realizační projektová dokumentace – speciální zakládání, Nová Karolina, fáze I, 1.B.003 Obchodní a zábavní centrum, Založení objektu*, zodpovědný projektant Ing. Tomáš Komárek, Brno, 2010
- [23] GHE a.s.: *Projekt geologicko průzkumných prací, Ostrava – Helika, Průzkumy Karolina*, Zodpovědný řešitel Ing. Tomáš Kempa, 2006
- [24] GHE a.s.: *Projekt geologicko průzkumných prací, Ostrava – Helika, Průzkumy Karolina*, Zodpovědný řešitel Ing. Tomáš Kempa, 2007
- [25] K4 a.s.: *Realizační dokumentace stavby, Forum Nová Karolina, fáze I, 1.B.003 Obchodní a zábavní centrum, ZBK Železobetonové kce, 01 - Dilatace K1, S1001910 Monolitická nosná konstrukce, Technická zpráva, Základová deska – Výkres tvaru*, Zodpovědný projektant Ing. M. Mužík, Ing. L. Tluchoř, Ing. M. Šváb, 2010
- [26] K4 a.s.: *Realizační dokumentace stavby, Forum Nová Karolina, fáze I, 1.B.003 Obchodní a zábavní centrum, ZBK Železobetonové kce, 02 - Dilatace K2, S1001910 Monolitická nosná konstrukce, Technická zpráva, Základová deska – Výkres tvaru*, Zodpovědný projektant Ing. M. Mužík, Ing. L. Tluchoř, Ing. M. Šváb, 2010
- [27] K4 a.s.: *Realizační dokumentace stavby, Forum Nová Karolina, fáze I, 1.B.003 Obchodní a zábavní centrum, ZBK Železobetonové kce, 03 - Dilatace K3, S1001910 Monolitická nosná konstrukce, Technická zpráva, Základová deska – Výkres tvaru*, Zodpovědný projektant Ing. M. Mužík, Ing. L. Tluchoř, Ing. M. Šváb, 2010
- [28] K4 a.s.: *Realizační dokumentace stavby, Forum Nová Karolina, fáze I, 1.B.003 Obchodní a zábavní centrum, ZBK Železobetonové kce, 04 - Dilatace K4, S1001910 Monolitická nosná konstrukce, Technická zpráva, Základová deska – Výkres tvaru*, Zodpovědný projektant Ing. M. Mužík, Ing. L. Tluchoř, Ing. M. Šváb, 2010
- [29] K4 a.s.: *Realizační dokumentace stavby, Forum Nová Karolina, fáze I, 1.B.003 Obchodní a zábavní centrum, ZBK Železobetonové kce, 05 - Dilatace K5, S1001910 Monolitická nosná konstrukce, Technická zpráva, Základová deska – Výkres tvaru*, Zodpovědný projektant Ing. M. Mužík, Ing. L. Tluchoř, Ing. M. Šváb, 2010
- [30] TOPGEO Brno s.r.o.: *Soubor dat – Nivelační měření*, formát .xls, Ing. Libor Helán
- [31] PPP s.r.o.: *Soubor dat – zatížení z horní stavby*, formát .xls, Ing. Miroslav Šváb
- [32] PPP s.r.o.: *Model základové desky*, formát .epw, Ing. Miroslav Šváb
- [33] <http://stavbaweb.dumabyt.cz>