

**Slovenská technická univerzita v Bratislave**  
**Stavebná fakulta**

**Ing. Peter Pollák**

Autoreferát dizertačnej práce  
**Interakcia „horná stavba – základová  
konštrukcia – podložie“**

**na získanie**  
akademického titulu **doktor** (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:  
Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb (TKeIS)

Bratislava 2017

## AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

---

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre geotechniky Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

**Predkladateľ:**                   **Ing. Peter Pollák**  
Katedra geotechniky  
Stavebná fakulta STU Bratislava  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

**Školiteľ:**                         **doc. Ing. Ľuboš Hruštinec, PhD.**  
Katedra geotechniky  
Stavebná fakulta STU Bratislava  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

**Oponenti:**                       **prof. Mgr. RNDr. Ing. Jozef Sumec, DrSc.**  
emeritný profesor,  
Katedra stavebnej mechaniky  
Stavebná fakulta STU Bratislava

**doc. Dr. Ing. Jan Pruška**  
Fakulta stavební, ČVUT Praha

**Ing. Miroslav Černý, PhD.**  
autorizovaný stavebný inžinier  
Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný.....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa .....o.....hod.  
na Katedre geotechniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave,  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

.....  
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.  
dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

## Obsah

1	ÚVOD .....	4
2	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE .....	5
3	ZVOLENÉ METÓDY SPRACOVANIA .....	8
3.1	Analýza nespojitej deformácie základu a podložia .....	8
3.2	Kalibrácia numerických modelov s experimentmi .....	9
3.3	Analýza interakcie stavebnej konštrukcie s podložími .....	12
4	ZÁVERY PRE PRAX A ĎALŠÍ ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY .....	18
4.1	Závery z analýzy kontaktných prvkov .....	18
4.2	Závery z analýzy fyzikálnych experimentov a stavieb .....	19
4.3	Závery z analýzy interakcie stavebnej konštrukcie s podložími .....	20
	SUMMARY .....	22
	PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA .....	23
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....	24

## 1 Úvod

Návrh základových konštrukcií je náročný interdisciplinárny problém interakcie stavebnej konštrukcie s horninovým prostredím. Počas výstavby a životnosti stavebného diela dochádza k vzájomnému ovplyvňovaniu, t.j. interakcii troch celkov:

- podložia,
- základovej konštrukcie,
- nosnej konštrukcie hornej stavby.

Výsledný stav po deformácii závisí okrem iného aj od relatívnej tuhosti všetkých troch celkov. Pre analýzu interakčných problémov je dôležité vytvorenie reprezentatívneho výpočtového modelu a zvoliť vhodnú výpočtovú metódu. Dovedáva v inžinierskej praxi prevažovali analytické metódy, ktoré zahŕňali vzájomné spolupôsobenie samostatnej základovej konštrukcie s podložíom. Tieto postupy majú však značné obmedzenia a dajú sa aplikovať len pre špecifické, značne zjednodušené prípady interakčných problémov.

S rozvojom výpočtovej techniky sa čoraz viac začínajú v inžinierskej praxi presadzovať numerické výpočtové metódy, z ktorých najrozšírenejšia je Metóda konečných prvkov (ďalej MKP). Táto metóda predstavuje veľmi silný nástroj, ktorý umožňuje riešenie oveľa komplexnejších a náročnejších úloh v oblasti geotechnického inžinierstva. Prostredníctvom numerických metód možno do výpočtových modelov zahrnúť aj okrajové podmienky, ktoré by si v prípade analytických riešení vyžadovali samostatný výpočtový model, resp. by museli byť výrazne zjednodušené.

Samostatná analýza nosnej konštrukcie hornej stavby zjednodušuje správanie sa horninového masívu a naopak, pri skúmaní správania sa podložia sú výrazne zjednodušené okrajové podmienky v podobe zaťaženia hornou stavbou. Skĺbenie týchto dvoch systémov do jedného celku vytvára jednotný interakčný systém stavebnej konštrukcie s podložíom, z ang. *SSI (Soil-Structure Interaction)*. V praxi sa vyskytuje množstvo fyzikálne odlišných systémov, ktoré sú vo vzájomnej interakcii, pričom analýza správania sa jedného systému je nereálna bez posúdenia jeho interakcie s ostatnými. Takéto systémy sú klasifikované ako „združené systémy“ (Zienkiewicz a Taylor, 1991).

Stavebná konštrukcia svojim zaťažením vyvoláva napätostné zmeny v podloží, ktoré sa deformuje a ako dôsledok vyvoláva prídavné sily a deformácie v nosnej konštrukcii hornej stavby. Tento proces pokračuje až do dosiahnutia rovnováhy v interakčnom systéme „stavebná konštrukcia – podložie“, v horšom prípade však môže dôjsť k prekročeniu únosnosti podložia alebo hornej stavby vplyvom nadmerného zaťaženia, resp. deformácie.

Dizertačná práca je zameraná na problematiku numerického modelovania interakcie stavebnej konštrukcie s podlozím. Formou parametrickej štúdie je analyzovaný vplyv tuhosti nosnej konštrukcie hornej stavby na správanie sa interakčného systému „horná stavba – základová konštrukcia – podložie“ pri účinkoch zvislého zaťaženia. Zmena tuhosti hornej stavby je reprezentovaná rôznymi, v súčasnosti často používanými monolitickými železobetónovými nosnými systémami s rôznym počtom podlaží. V závislosti od zvoleného konštrukčného systému je v numerických modeloch možné sledovať vplyv deformačného zaťaženia na zmenu vnútorných síl v nosnej konštrukcii hornej stavby. Podložie je modelované s rešpektovaním teórie lineárne pružného polpriestoru a dvojparametrického modelu podložia.

## 2 Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je inovácia a doplnenie poznatkov z oblasti numerického modelovania plošných základových konštrukcií zohľadnením interakcie celého systému „horná stavba – základová konštrukcia – podložie“. Hlavná časť práce je členená na 3 kapitoly (kap. 4 až 6), ktoré sú zamerané na:

- 1) **optimalizáciu vstupných údajov do numerických výpočtov.** Spracovaná je podrobná analýza vplyvu nespojitej základovej škáry (aplikácia kontaktných prvkov) na výsledky kontaktnej úlohy.
- 2) **kalibráciu numerických interakčných modelov** typu „základ – podložie“, resp. „horná stavba – základ – podložie“ s fyzikálnymi experimentmi a údajmi z geotechnického monitoringu reálnych stavieb.
- 3) realizáciu rozsiahleho súboru numerických výpočtov, pomocou ktorých je **analyzovaná interakcia stavebnej konštrukcie s podlozím** na modeloch, ktoré sa líšia konštrukčným systémom objektu, počtom podlaží, použitým modelom podložia a zohľadnením nespojitej deformácie podložia a základu.

### **1) Optimalizácia vstupov a okrajových podmienok numerických výpočtov**

Predpoklad pevného spojenia uzlov konečných prvkov (spojitý model) základovej konštrukcie a podložia nie je celkom v súlade so skutočnosťou. Pri flexibilných základových konštrukciách, resp. pri vytlačaní základovej pôdy v miestach s veľkou koncentráciou napätí dochádza na kontaktnej ploche základu a podložia k nerovnomernému posunu a mobilizácii šmykového odporu. Pre vytvorenie reprezentatívneho výpočtového modelu je potrebné túto skutočnosť zohľadniť a využiť tzv. **kontaktné prvky**, pomocou ktorých je možné definovať vzťah medzi napätím a nespojitou deformáciou základu a podložia.

Podrobná parametrická štúdia zameraná na vplyv rôznych parametrov kontaktných prvkov na výsledky kontaktnej úlohy je realizovaná na jednoduchom numerickom modeli s využitím teoretických predpokladov lineárne pružného polpriestoru. Premennými veličinami sú:

- analyzovaný parameter kontaktného prvku,
- relatívna tuhosť systému „základ – podložie“.

## **2) Kalibrácia numerických výpočtov na základe fyzikálnych experimentov**

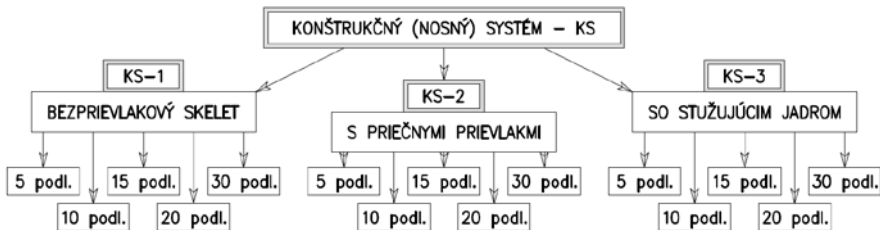
Pri tvorbe numerických modelov je dôležité vystihnúť všetky dôležité faktory ovplyvňujúce presnosť výpočtu. Často je potrebné aplikovať rôzne zjednodušenia v prospech efektivity numerických výpočtov. Nemali by však mať zásadný vplyv na presnosť výsledkov ovplyvňujúcich spoľahlivosť návrhu geotechnickej konštrukcie. Z tohto dôvodu je vhodné pred realizáciou hlavnej časti dizertačnej práce (kap. 6) realizovať súbor kalibračných numerických výpočtov a porovnať výsledky s hodnotami z fyzikálneho experimentu, resp. z geotechnického monitoringu reálnych stavebných objektov. Poznatky získané z kalibračných výpočtov sú využité pri tvorbe komplexných interakčných modelov v záverečnej časti. Porovnávacie výpočty sú realizované na štyroch objektoch:

- Model kruhovej pätky s priemerom 1,1 m (Lazebnik, 1998).
- Model pravouhlej pätky s pôdorysnými rozmermi 3 x 1 m (Lazebnik, 1998).
- Model veľkoformátového experimentu (Czesarskij a Murzenko, 1990). Základová doska rozmerov 2,75 x 2,75 m prifašená 16 stĺpmi vo viacerých zaťažovacích stupňoch.
- Model skutočného objektu 16-podlažnej budovy Technologického informačného inštitútu v Kyjeve (Lazebnik, 1998). Počas výstavby boli monitorované kontaktné napätia v podloží pod základovou doskou.

## **3) Analýza interakcie stavebnej konštrukcie s horninovým prostredím**

Hlavná časť dizertačnej práce predstavuje rozsiahlu parametrickú štúdiu zameranú na komplexnú interakčnú analýzu so zohľadnením tuhosti nosnej konštrukcie hornej stavby. Analyzované modely sú členené podľa typu konštrukčného systému a počtu podlaží stavebného objektu. Vybrané konštrukčné systémy reprezentujú súčasne najpoužívanejšie monolitické železobetónové nosné systémy vo výstavbe viacpodlažných objektov pozemných stavieb. Klasifikačná schéma výpočtových modelov sa nachádza na obr. 2-1.

Všetky analyzované výpočtové modely sú pre porovnanie riešené komplexnou interakciou typu „horná stavba – základ – podložie“ a samostatnou interakciou typu „základ – podložie“, do ktorej je silové zaťaženie základovej dosky z hornej stavby vypočítané za predpokladu tuhého podoprenia.



Obr. 2-1: Klasifikácia výpočtových modelov analyzovaných v práci.

**Tuhosť hornej stavby** je parametrizovaná v závislosti od zvoleného konštrukčného systému a od počtu podlaží. Vplyv typu konštrukčného systému na výsledný deformačno-napätostný stav v interakčnom systéme je sledovaný na 5 a 30-podlažnom objekte. Ostatné modely sú volené s ohľadom na sledovanie vplyvu počtu podlaží na tuhosť a správanie sa systému „horná stavba – základová konštrukcia – podlažie“. Klasifikácia konštrukčných systémov podľa ich tuhosti, resp. flexibility je náročná úloha. V dizertačnej práci je vyhodnotená tzv. flexibilita stavebnej konštrukcie, ktorá je určená z vypočítaného priebehu sadnutia základovej dosky s uvažovaním vplyvu hornej stavby.

**Nerovnomerné sadnutie** základovej konštrukcie môže v istých prípadoch vyvolať v nosných prvkoch hornej stavby väčšie vnútorné sily ako zaťaženie od prevádzky a vlastnej tiaže konštrukcie. Realizované parametrické výpočty analyzujú a vyhodnocujú vplyv nerovnomerného sadnutia na namáhanie nosných prvkov v konštrukcii hornej stavby pre všetky zvolené typy konštrukčných systémov.

Vo väčšine praktických úloh je v súčasnosti využívaný **elastický materiálový model**, ktorý je oproti sofistikovanejším konštitučným vzťahom značne zjednodušený. Zaručuje však spoľahlivý a rýchly výpočet numerického modelu. V oblastiach s veľkou koncentráciou napätí v skutočnosti dochádza v podlaží k prekročeniu šmykovej pevnosti zeminy. Tento jav nie je možné elastickým materiálovým modelom zahrnúť, preto je parametrická štúdia rozšírená o aplikáciu jednoduchých elasto-plastických materiálových modelov podlažia (Mohr-Coulomb). Na základe poznatkov a záverov získaných z analýzy **kontaktných prvkov** (kap. 4) sú kontaktné prvky aplikované aj do komplexných interakčných modelov „horná stavba – základ – podlažie“.

Numerické modely sú riešené ako trojrozmerné so zohľadnením priestorového pôsobenia nosnej a základovej konštrukcie v geotechnickom softvéri Midas GTS®. Podlažie rešpektuje teoretické predpoklady pružného, resp. pružno-plastického polpriestoru. Pre porovnanie dvoch rozdielnych výpočtových metód je v závere práce vyhodnotený súbor interakčných výpočtov **na dvojparametrickom modeli**

podložia s využitím iteračného výpočtového algoritmu Soil-in<sup>®</sup> (softvér ESA Scia Engineer<sup>®</sup>).

Výsledky a závery dizertačnej práce poskytnú doplňujúce informácie k problematike spoľahlivého návrhu plošných základov objektov pozemných stavieb zohľadňujúcich komplexnú interakciu „horná stavba – základová konštrukcia – podložie“. Napomôžu k optimálnemu návrhu základovej konštrukcie s ohľadom na možné poruchy v nosnej konštrukcii spôsobené nerovnomerným sadaním najmä pri staticky náročných objektoch (výškových objektoch).

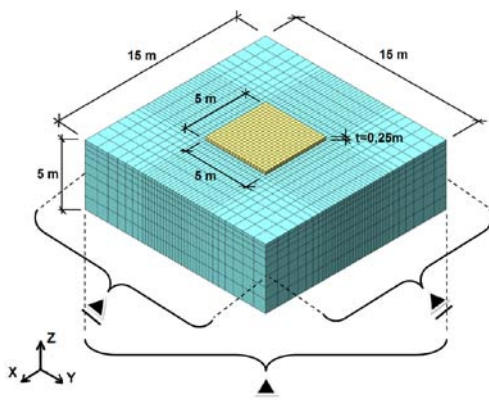
### 3 Zvolené metódy spracovania

#### 3.1 Analýza nespojitej deformácie základu a podložia

Vplyv jednotlivých vstupných údajov definujúcich použitý **kontaktný prvok** na výsledky analýzy kontaktnej úlohy je skúmaný na jednoduchom numerickom modeli s využitím výpočtového softvéru, ktorý je určený na riešenie náročných geotechnických úloh (Midas GTS<sup>®</sup>). Kontaktnú úlohu predstavuje priestorový model základovej dosky a podložia (obr. 3-1).

Numerické výpočty vo všeobecnosti analyzujú vplyv dvoch **hlavných** faktorov na sledované výstupné veličiny (kontaktné napätia a deformácie). Hlavnými dvoma faktormi sú:

- 1) relatívna tuhosť systému „základ – podložie“ (relatívna tuhosť je vypočítaná podľa vzťahu 1 v norme STN 73 1001),
- 2) volené parametre kontaktných prvkov.



Obr. 3-1: Geometrické a statické okrajové podmienky riešenej kontaktnej úlohy. Veľkosť a delenie modelu na konečné prvky.



## 3.2 Kalibrácia numerických modelov s experimentmi

### a) *Kruhová základová päťka*

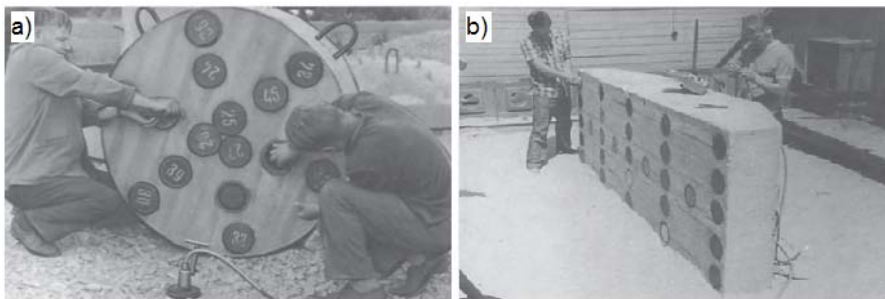
Lazebnik (1998) uvádza vo svojej publikácii experiment, ktorý monitoruje zvislé normálové kontaktné napätia v podloží pod tuhou betónovou kruhovou pätkou s priemerom 1,1 m a výškou 0,5 m. Snímače na meranie kontaktných napätí boli umiestnené na spodnú stenu pätky vo vzdialenosti 275 a 470 mm od stredu pätky (obr. 3-2a). Základová päťka bola priťažovaná osovo hydraulickým piestom **v dvoch zaťažovacích cykloch**. Prvý cyklus prebiehal do hodnoty priťaženia 300 kPa, päťka bola následne odľahčená na 0 kPa a opätovne priťažovaná v druhom cykle po úroveň priťaženia 400 kPa. Spomínané priťažovanie a odľahčovanie bolo realizované **v dvoch samostatných experimentoch**.

Experiment je simulovaný v prostredí softvéru Midas GTS<sup>®</sup> ako tuhý razník na podloží s rešpektovaním teoretických predpokladov lineárne pružného, resp. pružno-plastického polpriestoru. Numerické výpočty sú realizované na spojitých a nespojitých modeloch. V dizertačnej práci sú vyhodnotenia vypočítaných a experimentálne nameraných hodnôt zvislých normálových kontaktných napätí pre 1. a 2. zaťažovací cyklus (pri 2. cykle je uvažované so zlepšenými deformačnými vlastnosťami základovej pôdy) pri priťaženiach 50, 200 a 400 kPa. Porovnané sú aj namerané a vypočítané sadenia pätky.

### b) *Pravouhlá základová päťka*

Experimentálne merania kontaktných napätí boli realizované aj na pravouhlejšej betónovej pätky s pôdorysnými rozmermi 3,0 x 1,0 m a výškou 0,6 m. Snímače merajúce kontaktné napätia boli umiestnené v piatich radoch (obr. 3-2b). Priťažovanie pätky prebiehalo podobne ako pri predošlom fyzikálnom experimente **v dvoch zaťažovacích cykloch**. V prvom cykle bola dosiahnutá maximálna úroveň priťaženia 300 kPa, následne bola päťka úplne odľahčená a opätovne priťažovaná na rovnakú hodnotu 300 kPa. Celý postup bol opakovaný na **troch samostatných experimentoch**, pričom v literatúre sú vyhodnotené aritmetické priemery z nameraných hodnôt zvislých normálových kontaktných napätí.

V práci sa nachádza vyhodnotenie priebehov experimentálne nameraných a vypočítaných kontaktných napätí v krajnom a osovom priečnom reze a v pozdĺžnom osovom reze pätky. Vyhodnotené sú kontaktné napätia z 1. a 2. zaťažovacieho cyklu. Merania sadnutí neboli v literatúre uvedené. V práci sú vyhodnotené vypočítané sadnutia tuhej základovej pätky v závislosti od priťaženia.

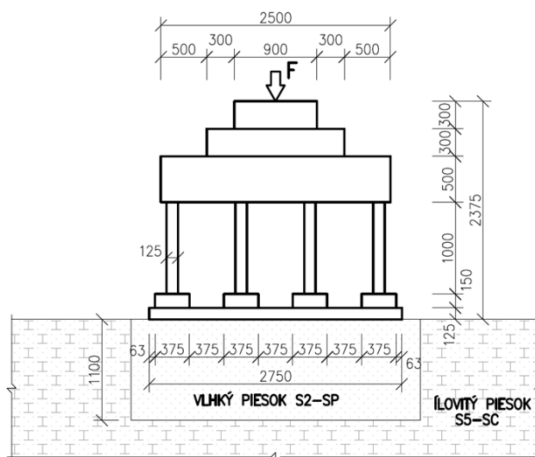


Obr. 3-2: Inštalácia snímačov na meranie kontaktných napätí.

a) kruhová pätká s priemerom 1,1 m, b) pravouhlá pätká s pôdorysnými rozmermi 3 x 1 m

### c) Veľkoformátový experiment (Czesarskij a Murzenko, 1990)

Experiment predstavuje vystuženú železobetónovú dosku s pôdorysnými rozmermi 2,75 x 2,75 m a hrúbkou 0,125 m (obr. 3-3). Zaťaženie je roznášané pomocou troch betónových blokov, ktoré sú umiestnené na skupine 16 stĺpov. Kvôli lepšiemu roznosu zaťaženia boli pod stĺpmi realizované betónové pätky. Zaťažovanie modelu prebiehalo v 6 zaťažovacích stupňoch. Hodnoty priemerných zvislých normálových napätí  $\sigma_m$  sú uvádzané iba od prítiaženia v zaťažovacích stupňoch (na snímačoch boli vynulované napätia od vlastnej tiaže konštrukcie). Na verifikáciu modelových výpočtov použili tento experiment aj Kolář a Němec (1991).



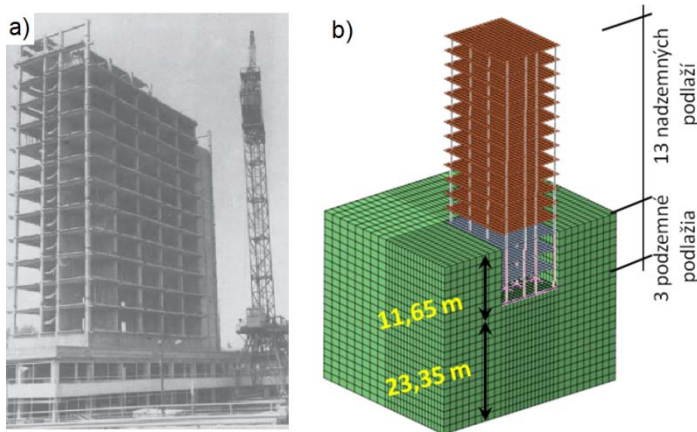
Obr. 3-3: Schéma fyzikálneho experimentu (Czesarskij a Murzenko, 1990)

Numerická simulácia experimentu bola realizovaná vo výpočtovom softvéri Midas GTS<sup>®</sup>. Hĺbka deformačnej zóny je pre každý zaťažovací stupeň určená pomocou softvéru S-CALC<sup>®</sup> (Pollák, 2016) v závislosti od deformačných vlastností podlažia, veľkosti priemerného kontaktného napätia a rozmeru základovej dosky. V textovej časti dizertačnej práce sú vyhodnotené porovnania zvislých normálových kontaktných napätí v podlaží a sadania základovej dosky pre zaťažovacie stupne ZS-1, ZS-3 a ZS-6. Vyhodnotenie výsledkov výpočtov a meraní z ostatných zaťažovacích stupňov (ZS-2, ZS-4, ZS-5) sa nachádza v prílohovej časti práce (príloha B.1).

#### ***d) Model 16-podlažnej skeletovej budovy Technologicko-informačného inštitútu***

Lazebník (1998) publikoval výsledky meraní kontaktných napätí v podlaží pod základovou doskou 16-podlažného objektu (obr. 3-4a). Monolitická železobetónová základová doska má pôdorysný rozmer 38,0 x 15,5 m a hrúbku 0,8 m. V mieste pripojenia zvislých nosných konštrukcií je vystužená rebrami, ktorých horná hrana je 1,1 m nad hornou hranou dosky. Základová škára sa nachádza v hĺbke 11,65 m pod povrchom okolitého terénu.

V dizertačnej práci je spracovaná numerická analýza komplexnej interakcie „horná stavba – základová konštrukcia – podlažie“ (obr. 3-4b) s vyhodnotením a porovnaním priebehov zvislých normálových kontaktných napätí vo finálnej fáze výstavby. Vyhodnotené sú tiež vypočítané sadania základovej dosky a porovnávací numerický výpočet za predpokladu hlboko, resp. povrchovo založeného objektu.



Obr. 3-4: Technologicko-informačný inštitút – 16-podlažný skeletový objekt.  
a) pohľad na hrubú stavbu, b) priečný rez numerickým modelom

### 3.3 Analýza interakcie stavebnej konštrukcie s podložíím

Súbor numerických výpočtov na modeloch stavebnej konštrukcie a podložía porovnáva (kvalitatívne a kvantitatívne) dva základné prístupy k riešeniu interakčných problémov:

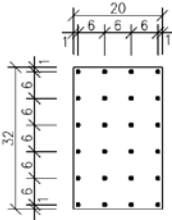
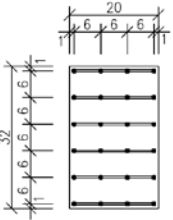
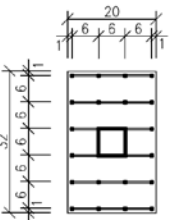
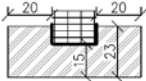
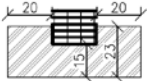
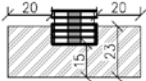
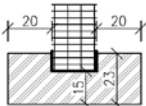
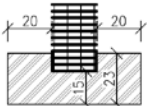
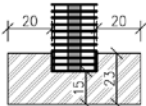
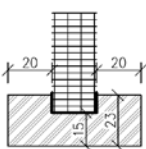
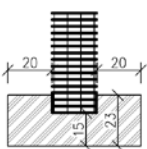
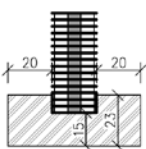
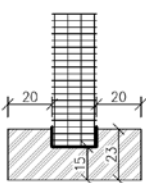
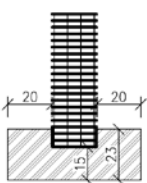
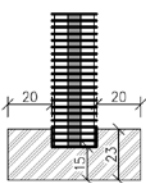
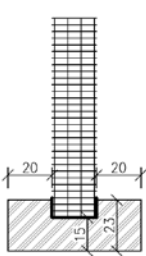
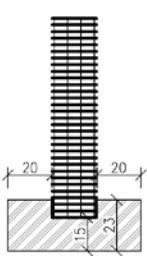
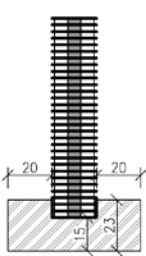
- 1) Analýza pomocou **komplexných** interakčných modelov, t.j. v jednom výpočtovom modeli je zahrnutý celý interakčný systém „**horná stavba – základ – podložie**“. V ďalšom texte je tento interakčný systém označený skratkou „**HZP**“.
- 2) Analýza pomocou **samostatných** modelov, t.j. na prvom modeli (predpoklad tuhého podopretia) sú určené reakcie zo zvislých nosných prvkov hornej stavby, ktoré sú uvážené ako zaťaženie na druhý model interakcie systému „**základ – podložie**“. V ďalšom texte je tento interakčný systém označený skratkou „**ZP**“.

Základné porovnanie interakčných prístupov **HZP** a **ZP** je analyzované na modeloch so spojitou základovou škárou s lineárne pružným materiálovým modelom podložía. Okrem spojitých, lineárne pružných modelov je realizovaný súbor výpočtov, ktorý analyzuje vplyv aplikácie kontaktných prvkov medzi základovou dosku a podložie a aplikáciu pružno-plastického (Mohr-Coulomb) modelu podložía.

Na analýzu sú vytvorené reprezentatívne modely troch v súčasnosti bežne používaných skeletových železobetónových monolitických konštrukčných systémov. Jedná sa o systémy:

- **KS-1:** skeletový s **bezprievlakovými** stropnými doskami,
- **KS-2:** skeletový s **prievlakmi** v priečnom smere (tuhé rámy),
- **KS-3:** skeletový s **prievlakmi** v priečnom smere a **stužujúcim jadrom**.

Pre každý konštrukčný systém je vytvorených 5 výpočtových modelov, ktoré sa líšia počtom podlaží. Všetky objekty majú zhodne 3 podzemné podlažia, celkový počet podlaží objektov v analyzovaných modeloch je 5, 10, 15, 20 a 30. Klasifikácia interakčných modelov „horná stavba – základ – podložie“ sa nachádza na obr. 3-1. Zostavený numerický model 15-podlažného objektu s delením na konečné prvky je na obr. 3-6.

<b>KS-1</b> Konštrukčný systém s bezprievlakovými stropnými doskami	<b>KS-2</b> Konštrukčný systém s priečnymi prievlakmi s prierezom 0,4 x 0,6 m	<b>KS-3</b> Konštrukčný systém s priečnymi prievlakmi a stužujúcim jadrom	
<b>PÓDORYSY TYPICKEHO PODLAŽIA</b>			M 1:1000
			
<b>PRIEČNE REZY MODELMI S MODELOVANOU OBLASTŮ PODLAŽIA</b>			M 1:2000
			<b>HZP(5)</b>
			<b>HZP(10)</b>
			<b>HZP(15)</b>
			<b>HZP(20)</b>
			<b>HZP(30)</b>

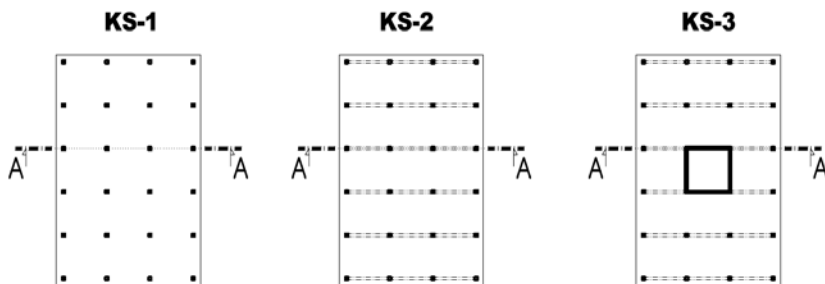
Obr. 3-5: Klasifikácia a označenie komplexných výpočtových modelov typu HZP



Analýza vplyvu **nespojitej základovej škáry**, resp. **nelineárneho materiálového modelu** podložia na výsledky geotechnickej analýzy založenia objektu (kontaktné napätia a sadanie) je realizovaná na komplexných výpočtových modeloch na pružnom polpriestore. Modely analyzované a porovnané v dizertačnej práci sú označené nasledovne:

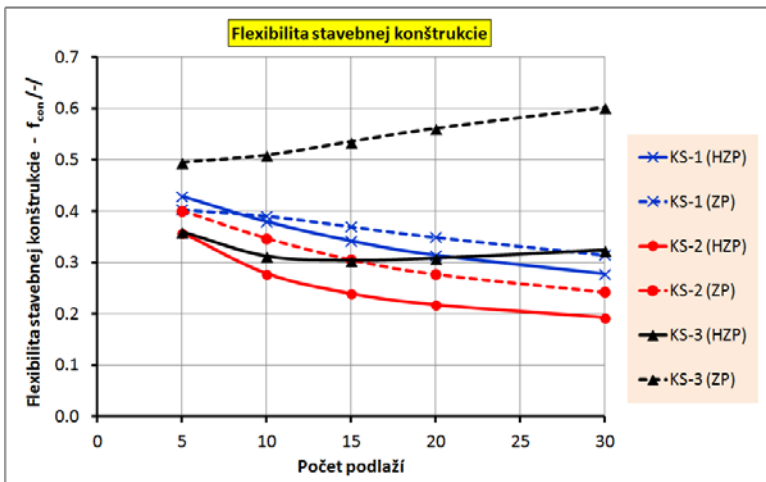
- **Model „A“ (spojitý – elastický):** model so spojitou základovou škárou s lineárne pružným materiálovým modelom podložia.
- **Model „B“ (spojitý – pružnoplastický):** model so spojitou základovou škárou s pružnoplastickým (Mohr-Coulomb) materiálovým modelom podložia,
- **Model „C-10“ (nespojité – elastický):** nespojitý model s kontaktnými prvkami s modulom normálovej tuhosti kontaktu  $k_n = 10 \text{ MN/m}^3$  s lineárne pružným materiálovým modelom podložia,
- **Model „C-100“ (nespojité – elastický):** nespojitý model s kontaktnými prvkami s modulom normálovej tuhosti kontaktu  $k_n = 100 \text{ MN/m}^3$  s lineárne pružným materiálovým modelom podložia.

Vypočítané zvislé normálove kontaktné napätia, sadanie základovej dosky a merné ohybové momenty v základovej doske sú v práci vyhodnocované v priečnom reze dosky A-A prechádzajúcom osou stĺpov (obr. 3-7).

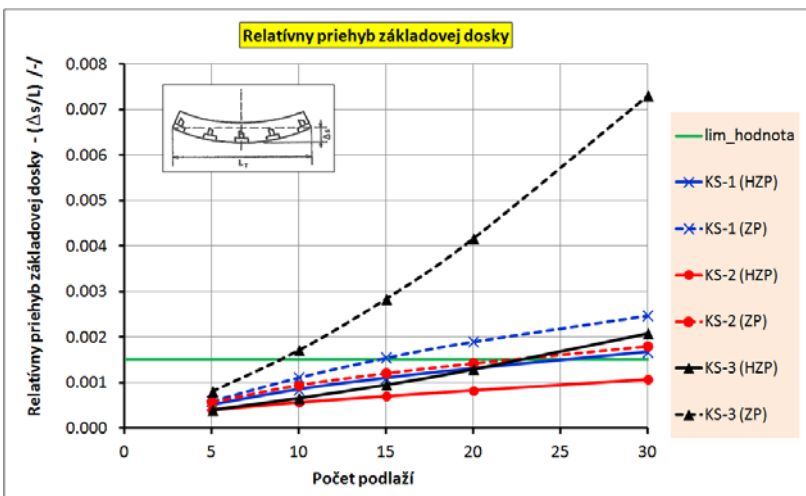


Obr. 3-7: Poloha rezu A-A, v ktorom sú analyzované kontaktné napätia v podloží, sadnutie a ohybové momenty v základovej doske.

Na obr. 3-8 sa nachádza vyhodnotenie flexibility (tuhosti) stavebnej konštrukcie, ktoré je definované pomocou maximálneho a minimálneho sadnutia základovej dosky v reze A-A. Vyhodnotenie relatívneho priehybu základovej dosky z interakčného výpočtu HZP, resp. ZP a porovnanie s limitnou hodnotou nerovnomerného sadania je na obr. 3-9.



Obr. 3-8: Flexibilita  $f_{con}$  stavebnej konštrukcie v závislosti od typu konštrukčného systému a počtu podlaží modelovaného objektu.

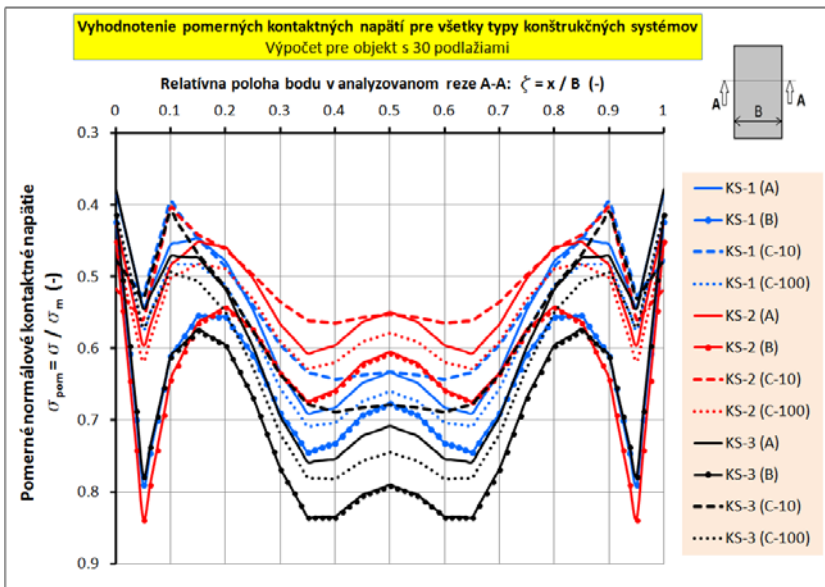


Obr. 3-9: **Relatívny priehyb** základovej dosky v smere šírky  $\Delta s/L_T$  v závislosti od typu konštrukčného systému a počtu podlaží stavebného objektu.

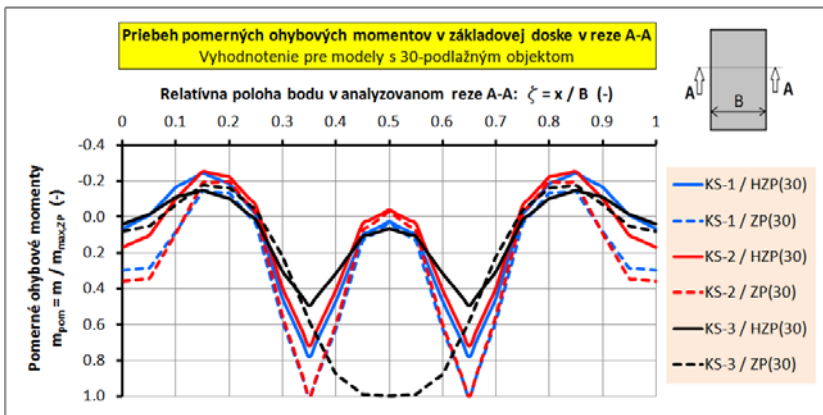
Na obr. 3-10 sú vyhodnotené priebehy pomerných kontaktných napätí v reze A-A pri 30-podlažnom stavebnom objekte s rôznymi konštrukčnými systémami vypočítané na lineárnych, resp. nelineárnych numerických modeloch.



Vyhodnotenie ohybových momentov v základovej doske v reze A-A vypočítaných komplexnou interakciou HZP, resp. interakciou ZP pri 30-podlažných objektoch je na obr. 3-11.



Obr. 3-10: Pomerné kontaktné napätie v reze A-A pre konštrukčné systémy pri 30-podlažnom objekte. Porovnanie spojitého lineárneho pružného modelu s nelineárnymi modelmi.



Obr. 3-11: Priebeh pomerných ohybových momentov v základovej doske v reze A-A pri rôznych konštrukčných systémoch KS-1 až KS-3 a 30-podlažnom stavebnom objekte.

## 4 Závěry pre prax a ďalší rozvoj vednej disciplíny

### 4.1 Závěry z analýzy kontaktných prvkov

Z podrobnej analýzy vplyvu nespojitosti základovej škáry a rôznych hodnôt parametrov kontaktných prvkov na výsledky kontaktnej úlohy typu „plošný základ – podložie“ vyplývajú nasledovné závery a odporúčania:

- ⇒ Zavedenie predpokladu nespojitej základovej škáry má za následok odlišné (spravidla rovnomernejšie) prerozdelenie zvislých **normálových kontaktných napätí** v podloží ako v prípade spojitého modelu. Pod okrajmi a rohmi relatívne tuhých základov nevzniká v porovnaní so spojitým modelom veľká koncentrácia kontaktných napätí. Miera redistribúcie kontaktných napätí závisí najmä od modulu normálovej tuhosti kontaktného prvku  $k_n$ . Redukcia kontaktných napätí pod okrajmi základu môže v in-situ podmienkach nastať v dôsledku vyčerpania únosnosti a vytlačania základovej pôdy.
- ⇒ Zavedením nespojitej základovej škáry vznikajú dve interpretovateľné výstupné veličiny, t.j. **sadanie základu** a **zvislá deformácia podložia**. Pri geotechnickom posúdení základovej konštrukcie na II. medzný stav (používateľnosť) je rozhodujúce sadanie základu, ktoré je po zavedení nespojitej základovej škáry vždy väčšie, ako zvislá deformácia povrchu podložia. S deformáciou podložia priamo súvisí výpočet kontaktných napätí v podloží. Rozdiel medzi sadaním základu a deformáciou podložia závisí od parametrov kontaktných prvkov, v najväčšej miere od modulu normálovej tuhosti kontaktu  $k_n$ .
- ⇒ **Modul normálovej tuhosti kontaktu  $k_n$**  predstavuje parameter kontaktného prvku, ktorý má spomedzi všetkých parametrov **výrazne najväčší vplyv** na výsledky kontaktnej úlohy typu „plošný základ – podložie“. Pri aplikácii kontaktných prvkov v numerickej analýze je preto potrebné voľbe hodnoty  $k_n$  venovať adekvátnu pozornosť.

Vo všeobecnosti možno povedať, že pri analýze rozsiahlych, **relatívne poddajných** plošných základov (základových dosiek)  **nemá**  použitie kontaktných prvkov v numerickej výpočte  **veľké opodstatnenie** . Prenos zaťaženia zo stavebnej konštrukcie do podložia sa deje primárne prostredníctvom zvislých normálových kontaktných napätí. Šmykové kontaktné napätia a teda aj šmykové parametre kontaktného prvku ( $k_t$ ,  $\delta$ ,  $a$ ) majú na výsledky analýzy zanedbateľný vplyv. Pri malých hodnotách normálových tuhostí kontaktu  $k$  nadmernému zatlačaniu dosky do podložia a k postupnému vyrovnávaniu nerovnomerných sadnutí, čo nie je v súlade s fyzikálnou podstatou a môže viesť k nebezpečnému návrhu nosnej konštrukcie hornej stavby (zanedbanie deformačného zaťaženia).

Výnimkou môžu byť relatívne poddajné základové konštrukcie zaťažené tak, že dochádza k nadvihovaniu (vzniku ťahových napätí v základovej škáre) základu (in Hruštinec, 2002). V tom prípade je vhodné použiť kontaktný prvok s vylúčením prenosu ťahových napätí.

## 4.2 Závbery z analýzy fyzikálnych experimentov a stavieb

Každá priama konfrontácia numerických analýz s hodnotami z geotechnického monitoringu reálnych objektov, resp. fyzikálnych experimentov je veľkým prínosom a poukazuje na významné a menej významné nedostatky numerických metód. Preto by bolo veľkým pozitívom zavedenie geotechnického monitoringu, ktorý spĺňa všetky náležitosti spomenuté v úvode kapitoly na čo najviac stavieb (hlavne staticky náročných). Získané údaje môžu významne napomôcť k optimalizácii procesu navrhovania stavebných konštrukcií v interakcii s horninovým prostredím. Z numerických analýz fyzikálnych experimentov **typu „základ – podložie“** (tuhá kruhová betónová pätká a betónový blok) vyplýva, že:

- ⇒ experimentálne namerané hodnoty zvislých normálových kontaktných napätí pod okrajom relatívne tuhého základu na piesčitom podloží ( $c=0$ ) sú veľmi malé (blízke nule), čo je v rozpore s očakávaným priebehom kontaktných napätí v podloží pod tuhým základom (očakávaná veľká koncentrácia napätí). Tento jav najlepšie vystihujú numerické modely **s kontaktnými prvkami** s relatívne malou normálovou tuhosťou kontaktu, pri ktorých nastáva redistribúcia kontaktných napätí spod okraja základu smerom k osi základu. Sadanie základovej dosky však pri týchto modeloch najmenej koreluje s experimentálne nameranými hodnotami (je niekoľkonásobne väčšie).
- ⇒ pre analýzu sadania základu sú najviac v súlade s fyzikálnou podstatou kontaktnej úlohy typu „základ - podložie“ numerické modely so **spojitou základovou škárou** (elastický, resp. Mohr-Coulomb), pri ktorých nedochádza k nerovnomernej deformácii uzlov konečných prvkov základu a podložia. Pri porovnaní s dostupnými experimentálnymi meraniami sadania základu vykazujú spojitý modely najlepšiu zhodu.

Z kalibračných numerických výpočtov **typu „horná stavba – základ – podložie“** (experiment Czesarskij a Murzenko, objekt Technologicko-informačného inštitútu v Kyjeve) vyplýva, že:

- ⇒ pri vyčerpaní šmykovej odolnosti základovej pôdy (porušenie zeminy šmykom) nastáva výrazne nerovnomerné rozloženie zvislých normálových kontaktných napätí v podloží (pod osou základu 177%  $\sigma_m$ , pod okrajom základu napätia blízke nule – experiment Czesarskij a Murzenko, zaťažovací stav ZS-6). Uvedený fenomén nebol spoľahlivo zachytený žiadnym analyzovaným

numerickým modelom. Pri nižších hodnotách parametrov šmykovej pevnosti pri pružno-plastickom (Mohr-Coulomb) modeli boli zaznamenané problémy s konvergenciou približného numerického riešenia. Na spomínanom modeli boli namerané výrazne väčšie sadnutia základu (nekontrolované zatláčanie) ako sadnutia vypočítané numerickými analýzami. **V prípade analýzy interakčného problému**, v ktorom sa očakáva vyčerpanie šmykovej odolnosti základovej pôdy a veľké plastické deformácie zeminy je potrebné zvoliť vhodný materiálový model (ideálne s implementáciou modelu porušenia materiálu).

### 4.3 Závery z analýzy interakcie stavebnej konštrukcie s podložíom

Z rozsiahleho súboru náročných numerických analýz interakcie stavebnej konštrukcie s podložíom vyplýva množstvo poznatkov a záverov, ktoré sú v dizertačnej práci tematicky členené do štyroch častí:

- 1) Porovnanie analýzy interakcie stavebnej konštrukcie prístupom „základ – podložie“ (ZP) a „horná stavba – základ – podložie“ (HZP).
- 2) Význam a vplyv jednotlivých činiteľov na správanie sa stavebnej konštrukcie v interakcii s horninovým prostredím.
- 3) Porovnanie pružného polpriestoru a dvojparametrického modelu podložia.
- 4) Celkové závery z analýzy interakcie stavebnej konštrukcie s podložíom.

Z množstva záverov a poznatkov sú vybrané tie najpodstatnejšie:

- ⇒ **Konštrukčný systém** predstavuje činiteľ, od ktorého **v najväčšej miere** závisí tuhosť, resp. flexibilita nosnej konštrukcie hornej stavby a následne aj správanie sa stavebnej konštrukcie v interakcii s horninovým prostredím. Každý konštrukčný systém má charakteristické rozloženie horizontálnych a vertikálnych nosných prvkov, tuhosť ich vzájomných stykov, dimenzie prierezov a materiály nosných konštrukcií. Prvé dva konštrukčné systémy analyzované v dizertačnej práci (KS-1 a KS-2) sú typologicky príbuzné a vzájomne dobre porovnateľné. Tretí konštrukčný systém KS-3 sa výrazne líši a s predošlými dvoma systémami je kvalitatívne prakticky neporovnateľný. Tento fakt potvrdzuje, že interakčná analýza každého stavebného objektu s jedinečným konštrukčným systémom vyžaduje **vždy osobitý prístup**.
- ⇒ **Deformačné zaťaženie** od nerovnomerného sadania spôsobuje v nosných prvkoch konštrukčného systému značné prídavné vnútorné sily, ktoré sú často rozhodujúce pri dimenzovaní prvkov (napr. prídavné ohybové momenty na stĺpoch, resp. prievlakoch). Pri lineárne pružnej analýze interakcie typu „horná stavba – základ – podložie“ nedochádza v konštrukcii k vzniku tzv. plastických kĺbov v miestach s koncentrovanými ohybovými momentmi (najmä styky

horizontálnych a vertikálnych nosných prvkov), čo nemusí byť v súlade so skutočnosťou. Pri návrhu nosného systému stavebného objektu je potrebné s týmto javom počítať (zohľadniť zmeny v statickej schéme), resp. navrhnuť konštrukčné riešenie dôležitých detailov tak, aby sa vzniku plastických kĺbov zamedzilo. Podrobná kvantifikácia ohybových momentov v nosných prvkoch hornej stavby vyvolaných deformačným zaťažením sa nachádza v dizertačnej práci.

- ⇒ Napriek relatívne veľkej osovej tuhosti zvislých nosných prvkov konštrukčného systému dochádza pri veľkej koncentrácii zaťaženia k ich **osovému stláčaniu**. Význam tohto javu rastie so zväčšujúcim sa počtom podlaží stavebného objektu. Stlačiteľnosť zvislých nosných prvkov zohráva pri interakcii „horná stavba – základ – podlažie“ opačnú úlohu ako podlažie. Poddajnosťou podlažia nastáva väčšia zvislá deformácia pod viac zaťaženými prvkami a horizontálny tok zaťaženia smerom k zvislým prvkom s menším sadnutím. Naopak od prírastku tlakového napätia v zvislom nosnom prvku sa prvok vo väčšej miere osovo pretvára, čo má za následok horizontálny tok zaťaženia opačným (spätným) smerom.
- ⇒ Pri osovo veľmi poddajných zvislých nosných prvkoch môže byť vplyv **osovej stlačiteľnosti** na výsledný deformačno-napätostný stav v interakčnom systéme **väčší ako vplyv podlažia**. Na modeloch riešených v dizertačnej práci začína byť osová stlačiteľnosť významnejšia pri objektoch s 15 a viac podlažiami. Podrobné kvalitatívne a kvantitatívne vyhodnotenie sa nachádza v dizertačnej práci.
- ⇒ **Pružný polpriestor aj dvojparametrický model podlažia** majú z hľadiska fyzikálnej podstaty problému interakcie stavebnej konštrukcie s podlažím nedostatky, ktoré si musí projektant pri návrhu uvedomiť a snažiť sa čo najreálnejšie predikovať deformačno-napätostný stav v budúcej konštrukcii.
- ⇒ **Modely s pružno-plastickým podlažím** (Mohr-Coulomb) dosahujú najmenšie nerovnomerné sadanie základovej dosky. V dôsledku vyčerpania šmykovej odolnosti základovej pôdy po okrajmi dosky dochádza k väčšiemu sadnutiu okraja oproti numerickým modelom s elastickým podlažím.

Komplexné interakčné modely implementujúce nosnú konštrukciu hornej stavby predstavujú nový uhol pohľadu na spolupôsobenie stavebného objektu s podlažím. Príspevok tuhosti hornej stavby k relatívnej tuhosti systému „základ – podlažie“ nie je možné pre každú konštrukciu jednoznačne vopred určiť (kvantifikovať). Neexistuje žiaden objektívny a univerzálny postup na základe ktorého by bolo možné klasifikovať všetky stavebné objekty podľa ich tuhosti.

Každá stavebná konštrukcia je jedinečná a analýza jej spolupôsobenia s podlažím môže zahŕňať širokú škálu rôznych problémov (voľba vhodnej metodiky,

nedostatok informácií o horninovom prostredí a pod.). Preto je potrebné k jej riešeniu pristupovať maximálne zodpovedne a nepodceňiť žiadnu okolnosť ohrozujúcu spoľahlivý návrh a fungovanie konštrukcie počas doby jej životnosti.

Všeobecne možno povedať, že stavebná konštrukcia s relatívne veľkou tuhosťou má v porovnaní s poddajnými konštrukciami:

- a) rovnomernejšie a menšie kontaktné napätia (v pomere k priemernému napätiu),
- b) rovnomernejšie sadnutie,
- c) menšie ohybové momenty a priečne sily v základovej doske,
- d) väčšie sily v nosných prvkoch hornej stavby od deformačného zaťaženia.

Na základe výsledkov a vyhodnotenia rozsiahlych súborov numerických analýz v dizertačnej práci je možné formulovať nasledovné tvrdenie:

***Podmienkou pre spoľahlivú analýzu globálnej interakcie systému „horná stavba – základová konštrukcia – podložie“ je dôsledná súbežná koordinácia reprezentatívnosti modelu podložia a stavebnej konštrukcie. Zanedbanie akéhokoľvek dôležitého činiteľa z hľadiska hornej stavby, resp. podložia vedie k nereálnej redistribúcii zaťaženia a vnútorných síl v nosných prvkoch, čo môže mať za následok nespoľahlivý návrh (z geotechnického alebo statického hľadiska).***

## Summary

The dissertation is focused on numerical modeling of soil-structure interaction. Before creating the main calculation models, an extensive parametric study, which analyzes the presumption of discontinuous foundation gap (application of interface elements between foundation and subsoil) was processed. Credibility of numerical calculations is proven on calibration models of three physical experiments and one real administrative building with geotechnical monitoring. Acquired experiences are effectively utilized within making the numerical models in main part of thesis.

The main part of dissertation presents the parametric study, which analyzes the impact of upper structure stiffness of behavior of “upper structure – foundation – subsoil” interaction system within the effect of vertical loading. Variation of upper structure stiffness is represented by various commonly used monolithic reinforced concrete construction systems with different number of storeys. The evaluation of numerical models is realized from geotechnical aspect (normal contact stress and foundation settlement) and static aspect (influence of deformation load on internal forces in load-bearing members). Part of thesis is the comparison of soil-structure interaction calculations on half-space with Winkler-Pasternak subsoil model, which is implemented in the most of commercial static software.

## Publikované práce autora

POLLÁK, P.: *Modelovanie odpruženia dna stavebnej jamy objektu čerpacej stanice Jadrovej elektrárne Jaslovské Bohunice*. In Juniorstav 2015, Brno, ČR, 29. 1. 2015, 1. vyd, ISBN 978-80-214-5091-2.

POLLÁK, P.: *Vplyv nerovnomerného sadania a tuhosti skeletového nosného systému na redistribúciu vnútorných síl v nosnej konštrukcii*. In Zakládání staveb - Brno 2015: 43. konference se zahraniční účastí. Sborník příspěvků, Brno, ČR, 9. - 10. 11. 2015, 1. vyd. Praha: Česká geotechnická společnost ČSSI, 2015, s. 111-116. ISBN 978-80-87920-02-2.

POLLÁK, P.: *Softvér "S-CALC" na výpočet sadania plošných základov*. In Juniorstav 2016. Brno, ČR, 28. 1. 2016. 1. vyd., ISBN 978-80-214-5311-1.

POLLÁK, P.: *Modelovanie interakcie základovej dosky a podložia v Metóde konečných prvkov*. In Advances in architectural, civil and environmental engineering: 1. vyd. Bratislava, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, CD ROM, s. 565-571. ISBN 978-80-227-4301-3.

POLLÁK, P.: *Numerická analýza odpruženia dna stavebnej jamy objektu čerpacej stanice jadrovej elektrárne*. In 55 rokov geotechniky na Slovensku: zborník 12. Slovenskej geotechnickej konferencie. Bratislava, SR, 1. - 2. 6. 2015. 1. vyd., s. 261-270. ISBN 978-80-227-4363-1.

POLLÁK, P.: *Softvér "S-CALC" na analýzu sadania základov*. In Advances in architectural, civil and environmental engineering: 1. vyd., Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015, CD-ROM, s. 517-522. ISBN 978-80-227-4514-7.

POLLÁK, P.: *Analýza kontaktných prvkov pri modelovaní interakcie základovej konštrukcie a podložia*. In Advances in architectural, civil and environmental engineering: 1. vyd., Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016, CD-ROM, s. 390-397. ISBN 978-80-227-4645-8.

POLLÁK, P. - ZLATINSKÁ, L.: *Influence of subsoil quality on design of slab foundation*. In Roczniki inżynierii budowlanej. Zesz. 13 (2013), s. 105-110. ISSN 1505-8425.

POLLÁK, P. – HRUŠTINEC, L.: *Soil-structure interaction of reinforced concrete frame building – verification of measured contact stress with the numerical analysis results*. In Proc. of 17th International Scientific conference S-GEM 2017, Sofia, Bulgaria, ISSN 1314-2704.

HRUŠTINEC, L. – SUMEC, J. – POLLÁK, P.: *Numerical analysis of the storage boxes interaction with subsoil at different loading stages*. In Proc. of 17th Internat. Scientific conference S-GEM 2017, Sofia, Bulgaria, ISSN 1314-2704.

ZLATINSKÁ, L. - POLLÁK, P.: *Numerická analýza deformácií popolového odkaliska pomocou metódy konečných prvkov*. In Nové poznatky v geotechnickom inžinierstve: zborník príspevkov zo seminára. Kočovce, SR, 21. - 22. 1. 2014. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014, CD-ROM, s. 177-181. ISBN 978-80-227-4123-1.

POLLÁK, P.: *KVIZ – Konštitučné vzťahy implementované pre zeminy*. Záverečná správa o riešení projektu v rámci Programu na podporu mladých výskumníkov, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, 2016.

## Zoznam použitej literatúry

CZESARSKI, A. A. – MURZENKO, J. N. (1990): *Measurement of soil – foundation plate – structure interaction*. In: *Isledovaniya i razrabotki*. No. 1439. Tech. Inst. Novoczerkask, 1990. 68-82 s.

HRUŠTINEC, L. (2002): *Analýza spolupôsobenia plošného základu s podložíom*. Dizertačná práca. Bratislava, 2002.

KOLÁŘ, V. – NĚMEC, I. (1991): *Contact stress and settlement in the structure-soil interface*. Studie ČSAV, Zväzky 16-91. Academia Praha 1991, 159 s.

LAZEBNIK, G. E. (1998): *Monitoring of soil-structure interaction. Instruments for measuring soil pressures*. Springer Science and Business Media, Dordrecht 1997, 237 s. ISBN 978-1-4613-7740-5.

POLLÁK, P. (2016): *Software „S-CALC“ for calculation of shallow foundation settlement*. In: Juniorstav 2016 – zborník, Brno, ČR, 2016.

ZIENKIEWICZ, O.C. – TAYLOR, R.L. (1991): *Finite element method in solid and fluid mechanics. Dynamics and nonlinearity*. McGraw Hill, New York 1991.