



Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Miroslav Pecník

Autoreferát dizertačnej práce

Redukcia pasívneho zemného tlaku integrovaných mostných opôr

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

V doktorandskom študijnom programe:

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

V študijnom odbore:

Stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum: Bratislava, máj 2020

Dizertačná práca bola vypracovaná na

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov

Predkladateľ:

Ing. Miroslav Pecník

Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava

Školiteľ:

doc. Ing. Viktor Borzovič, PhD.

Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava

Oponenti:

prof. Ing. Peter Turček, PhD.

Externý spolupracovník
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava

doc. Ing. Roman Šafář, Ph.D.

Katedra betonových a zděných konstrukcí
ČVUT v Praze, Fakulta stavební
Thákurova 7
166 29 Praha 6 – Dejvice, Česká Republika

doc. Ing. Peter Paulík, PhD.

Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný: 29. júla 2020

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 25. augusta 2020 o 9:00 h.

na Katedre betónových konštrukcií a mostov, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, v zasadacej miestnosti

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan Stavebnej fakulty

Obsah

1. Úvod	2
2. Ciele práce	3
3. Metodika práce	3
4. Experimentálny program	4
5. Výsledky experimentálneho programu – vybraná časť	8
6. Numerická analýza	14
7. Pomôcka pre navrhovanie kompresných vrstiev z polystyrénu	16
8. Závery	19
9. Vybraný zoznam použitej literatúry	20

1. Úvod

Integrované mosty predstavujú progresívny typ mostných konštrukcií. Presná definícia integrovaných mostov sa v jednotlivých dokumentoch líši, avšak najjednoduchšie je možné charakterizovať tieto mosty ako také, ktoré nemajú žiadne ložiská ani mostné závery.

Táto zmena v porovnaní s tradičnými mostnými konštrukciami prináša viaceré výhody. Odstránenie najporuchovejších detailov vytvára podmienky nielen pre lepšiu kvalitu jazdy a nižšiu hlučnosť, ale rovnako znižuje finančné náklady spojené s údržbou ložísk a záverov a tiež eliminuje potrebu častých dopravných obmedzení pri údržbe.

Medzi hlavné nevýhody patrí cyklické namáhanie vozovky, ktoré spôsobuje trhliny a vypukliny na vozovke, spolu s náročnejším návrhom mostnej konštrukcie. Keďže mostné ložiská a závery pri tomto type mosta nie sú použité, všetky vodorovné posuny mostovky sa prenášajú do opôr, ktoré sú následne tlačené smerom do a od zásypu. Výsledkom je nutný návrh opôr na účinky pasívneho zemného odporu, pričom sa do mostovky tiež vnáša osová sila zo zemného tlaku (čo však väčšinou predstavuje pozitívny efekt).

Súčasný stav poznania je vysoký predovšetkým v USA, pričom jednotlivé štáty federácie majú svoje vlastné predpisy, ktoré upravujú návrh. Medzi jednotlivými predpismi sú však v určitých otázkach značné odlišnosti, ako napríklad v povolených hodnotách horizontálnych posunov pripadajúcich na jednu oporu. V Európe možno badať najväčší rozvoj konceptu integrovaných mostov vo Veľkej Británii a v Nemecku. Paradoxne, v oboch týchto krajinách sú predpisy týkajúce sa návrhu integrovaných mostov obsahovo pomerne krátke, avšak úroveň poznania problematiky je na vysokej úrovni. V Slovenskej republike je koncept integrovaných mostov pomerne málo využívaný. Len malé množstvo mostov je postavených ako integrované.

Zemné tlaky predstavujú dôležitý faktor pri návrhu integrovaných mostov a ich opôr, pričom rozhodujúci je pre návrh pasívny zemný odpor. Jeho samotná veľkosť nie je pre mostovku obvykle problematická, obzvlášť pri betónových mostoch kde je tento účinok pozitívny. Negatívny vplyv však má na možnú výšku navrhovaných opôr. Zníženie zemného odporu by teda mohlo priniesť možnosť navrhovať vyššie mostné opory, čo by mohlo napomôcť k rozšíreniu konceptu integrovaných mostov, rozšírením možností jeho aplikácie.

Zníženie zemných tlakov v pokoji a aktívnych zemných tlakov je pomerne jednoduchou záležitosťou. Princíp spočíva v tom, aby samotný zásyp bol schopný aspoň čiastočne udržiavať svoj tvar, aj bez opornej konštrukcie. Prakticky je to možné zabezpečiť zlepšovaním zemín, napr. injektážou, alebo ich vystužovaním napr. geotextíliami. Znižovanie pasívnych zemných odporov predstavuje zložitejší problém, pričom jednotlivé riešenia tohto problému nemajú v praxi tak širokú akceptáciu ako znižovanie aktívnych zemných tlakov. Jedným z možných riešení je napr. nahradenie zemného telesa blokmi polystyrénu.

Jednoduchšie riešenie predstavuje vytvorenie tenkej vrstvy z poddajného materiálu priamo za oporou. Na túto vrstvu je možné použiť rôzny materiál, napr. sklenú vatú, expandovaný polystyrén. Samotné zníženie zemného tlaku takouto vrstvou spočíva v absorbovaní časti deformácie a vytvorení určitého sklonu zemného zásypu pomocou deformácie rastúcej po výške tejto vrstvy. Aplikácia týchto vrstiev je pomerne široko rozšírená v USA. Obvykle sa

na ich vytvorenie používajú produkty označované ako GeoFoam, pričom najčastejšie sú tieto produkty tvorené z expandovaného polystyrénu (EPS). Materiál použitý na vytvorenie takejto vrstvy musí spĺňať viaceré kritériá a musí byť relatívne málo tuhý, aby pohltil vzniknuté deformácie zapríčinené dĺžkovými zmenami mostovky.

Z konštrukčného hľadiska je pre použitie takejto vrstvy vhodné využiť poznatok že zemný tlak stúpa s rastúcou hĺbkou. V hornej časti opory je teda možné vynechať na určitom úseku túto vrstvu z dôvodu jednoduchšieho riešenia napojenia mosta na zemné teleso, pričom na efekt zníženia pasívneho odporu to bude mať minimálny dopad. V takomto prípade je možné použiť riešenia napojenia mosta na zemné teleso ako pri konštrukciách integrovaných mostov ktoré takúto vrstvu neobsahujú.

Dizertačná práca je členená na tri časti. Prvá časť obsahuje zhrnutie poznatkov z národných predpisov v oblasti integrovaných mostov, respektíve v prípadoch ak národné predpisy nie sú dostupné, zastupujúcich dokumentov. Ďalej obsahuje zhrnutie vedeckých prác, s dôrazom na práce blízke konkrétnym cieľom navrhovaného výskumu. Prvá časť končí uvedením teoretických poznatkov z oblasti zemných tlakov aplikovateľných na skúmanú problematiku. V druhej časti sú uvedené ciele práce, metodika na ich dosiahnutie spolu s opisom a výsledkami experimentálnej časti výskumu. V tretej časti sú prezentované výsledky z numerickej analýzy. Záver práce pozostáva zo zhrnutia dosiahnutých výsledkov, záverov a odporúčaní pre ďalší výskum a pre prax.

2. Ciele práce

Cieľom práce je priniesť príspevok v oblasti poznania problematiky integrovaných mostov a redukcie zemných tlakov. Prvým čiastkovým cieľom je overiť a kvantifikovať efekt zníženia zemných tlakov na opory integrovaných mostov pomocou kompresných vrstiev umiestnených za oporou. Táto problematika je v súčasnosti vysoko aktuálna (ako integrované mosty, tak využitie kompresných vrstiev), avšak u nás je len na okraji pozornosti. Druhým cieľom práce je získať dáta o vplyve cyklického zaťaženia na kompresnú vrstvu. V súčasnej dobe existuje len veľmi málo informácií o vplyve týchto javov, čo zdôrazňuje aktuálnosť práce. Celkovo má práca za cieľ:

- verifikovať výsledky analytických výpočtov podľa Rankinovej teórie a STN 73 0037 s experimentálne nameranými zemnými tlakmi
- kvantifikovať efekt zníženia zemných tlakov pomocou kompresných vrstiev
- získať dáta o veľkosti a priebehu zemných tlakov v závislosti od vnášanej vodorovnej deformácie na opornú konštrukciu
- získať dáta o veľkosti a priebehu zvislých a vodorovných deformácií na povrchu zemného telesa
- získať dáta o vplyve cyklického zaťaženia na deformácie zemného telesa a kompresnú vrstvu

3. Metodika práce

Metodika práce pre dosiahnutie cieľov práce je rozdelená na dve časti.

Prvú časť tvorí experimentálny program na veľkorozmernom fyzikálnom modeli, realizovaný v Centrálnych laboratóriách SvF STU. Každá séria skúšok bola tvorená určitým počtom cyklov. Meranie snímačmi deformácií, zemných tlakov a síl tvorí hlavnú časť experimentálneho programu. Ako doplnkové meranie bolo realizované meranie deformácií fotogrametrickou metódou s pomocou pracovníkov Katedry geodézie.

Výsledky z experimentálneho merania tvoria najdôležitejší prínos práce a zároveň sa predpokladá, že sa stanú pokladmi pre ďalší výskum problematiky.

Druhú časť tvorí numerická analýza, zameraná na verifikáciu experimentálne nameraných údajov pri použití rovnakých okrajových podmienok fyzikálneho a matematického modelu a získanie ďalších poznatkov o pevnostno-deformačnom stave zemného telesa a kompresnej vrstvy.

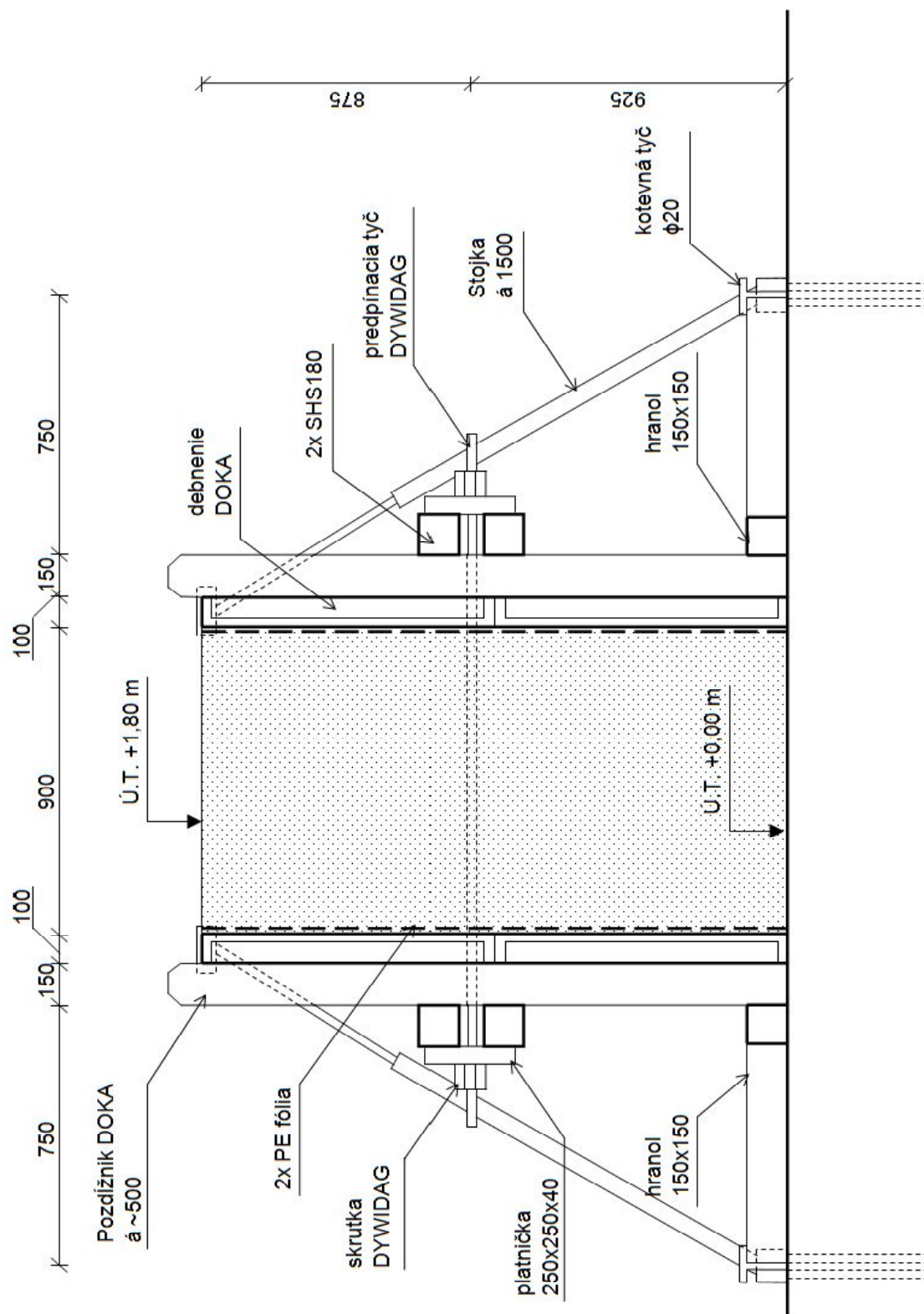
4. Experimentálny program

Samotný fyzikálny model je možné rozdeliť na dve časti. Prvú časť tvorí diagonálne stužený rám, ktorý slúži na vnesenie zaťaženia pomocou horizontálne uloženého lisu. Druhú časť tvorí zemné teleso, ktoré je ohraničené debnením. Jeho dĺžka je 8 m, šírka 0,9 m a výška 1,8 m. Medzi týmito dvomi časťami sa nachádza železobetónová opora, ktorá má vo svojej päte kĺbové uloženie. Rozmery opory sú 2,35 m x 0,4 m x 0,9 m. Jej polohu počas času kedy do nej nie je prenášané zaťaženie lisom zabezpečuje pomocná konštrukcia (pre prehľadnosť nie je zobrazená na obr. č. 4.1) . Schematicky je zostava znázornená na obr. č. 4.1 a 4.2. Dôležité detaily sú znázornené na obr. č. 4.3 a 4.4.

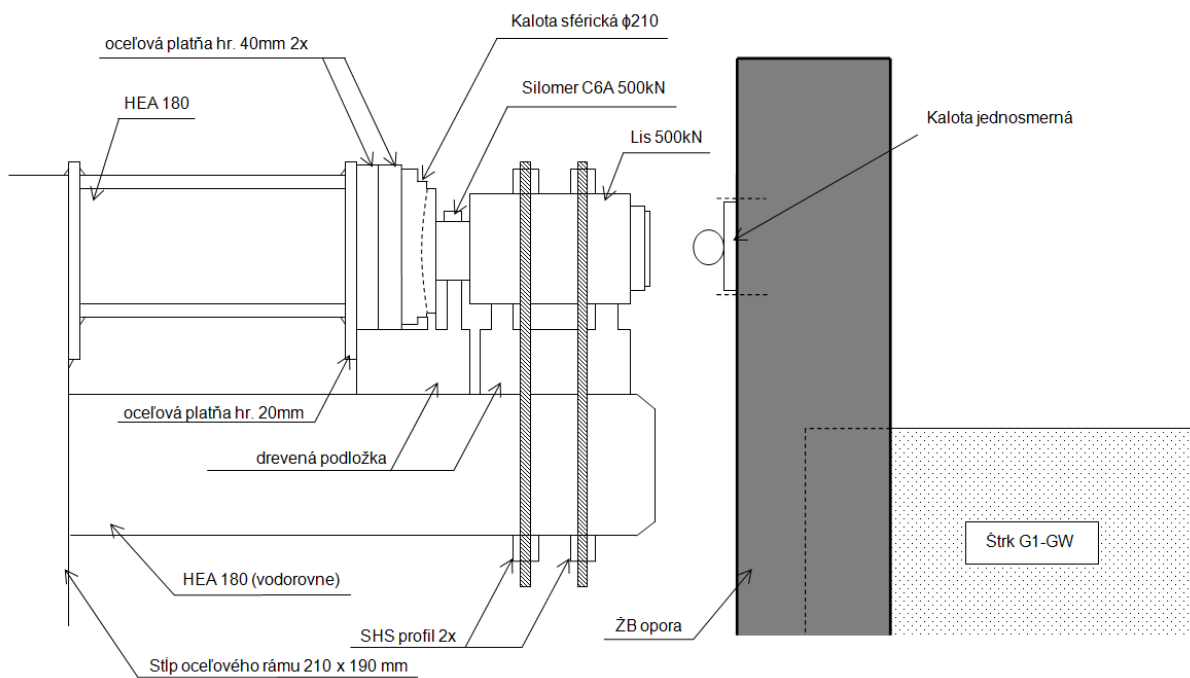
Experimentálny program zahŕňal 3 série skúšok. Každá séria predstavovala určitý počet cyklov zatlačania železobetónovej opory do zemného telesa. Jednotlivé cykly predstavovali postupné zatlačanie opory hydraulickým lisom do zemného telesa. Počiatok každého cyklu tvorí zvislá poloha opory. Následne sa opora postupne zatláča do zemného telesa tak, že sa natáča okolo kĺbu vo svojej päte. Cyklus končí opätovným pritiahnutím opory do zvislej polohy.

Série experimentálneho programu:

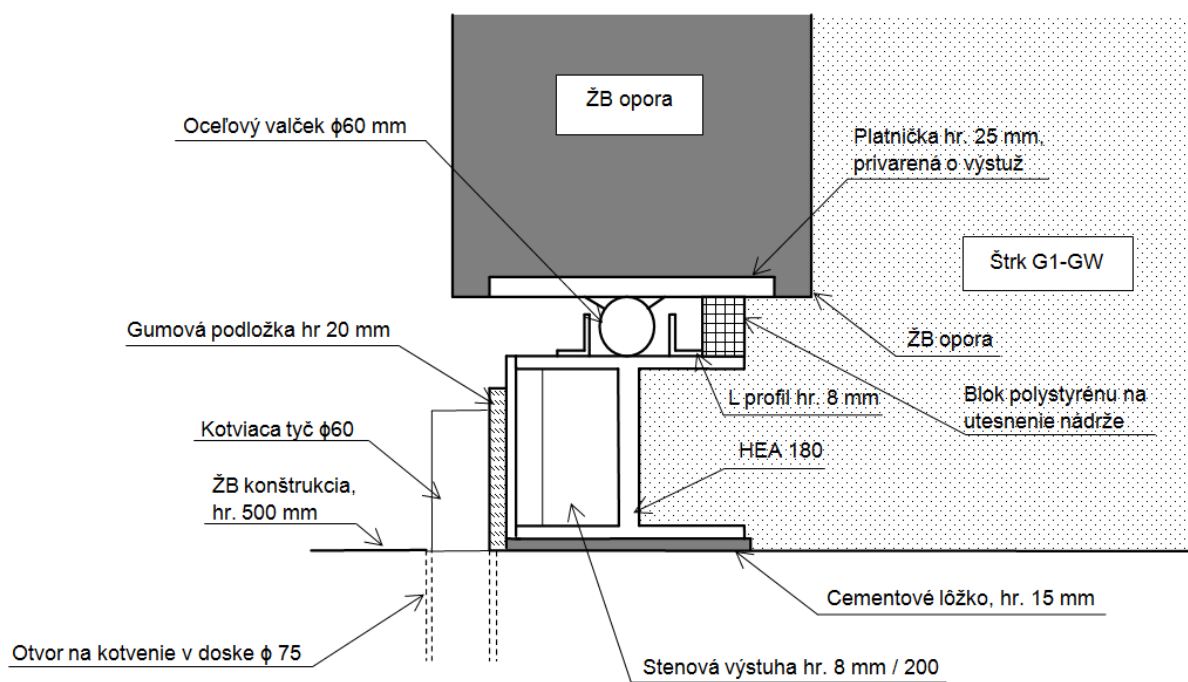
1. séria - predstavovala skúšky bez kompresnej vrstvy tvorenej polystyrénom – 10 cyklov
2. séria - predstavovala skúšku s kompresnou hrúbkou vrstvy 100 mm tvorenou polystyrénom C (tuhší) – 7 cyklov
3. séria - predstavovala skúšku s kompresnou hrúbkou vrstvy 100 mm tvorenou polystyrénom A (poddajnejší) – 8 cyklov



Obr. č. 4.2 - Priečny rez konštrukciou debnenia na štrk



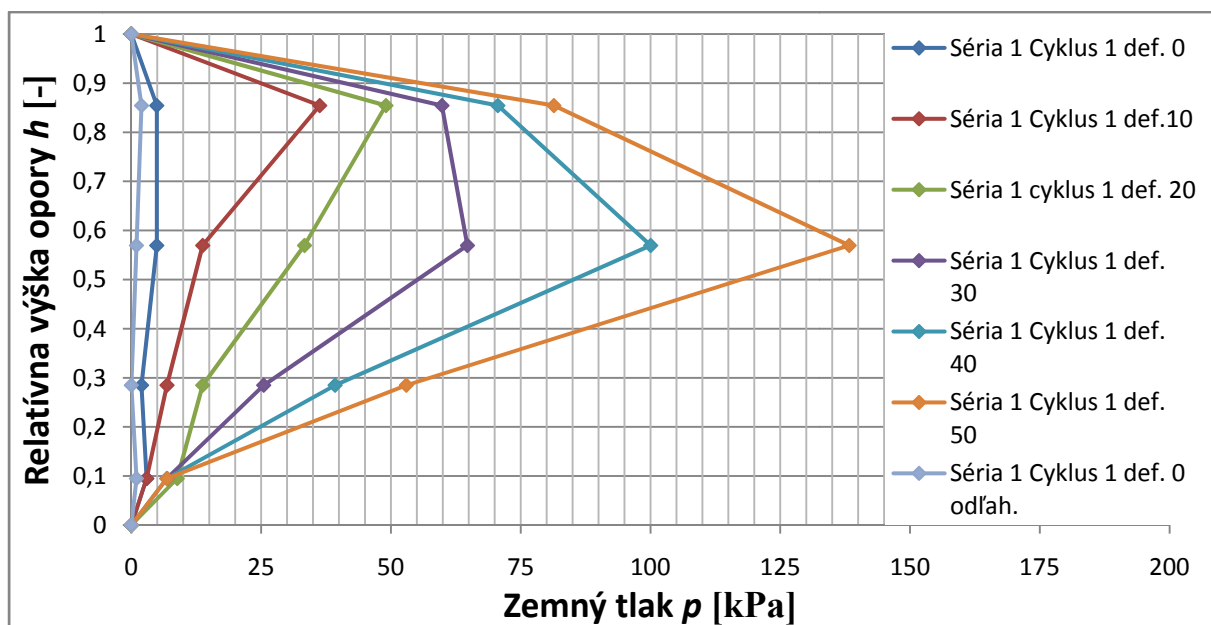
Obr. č. 4.3 - Detail A - uloženie lisu (rez)



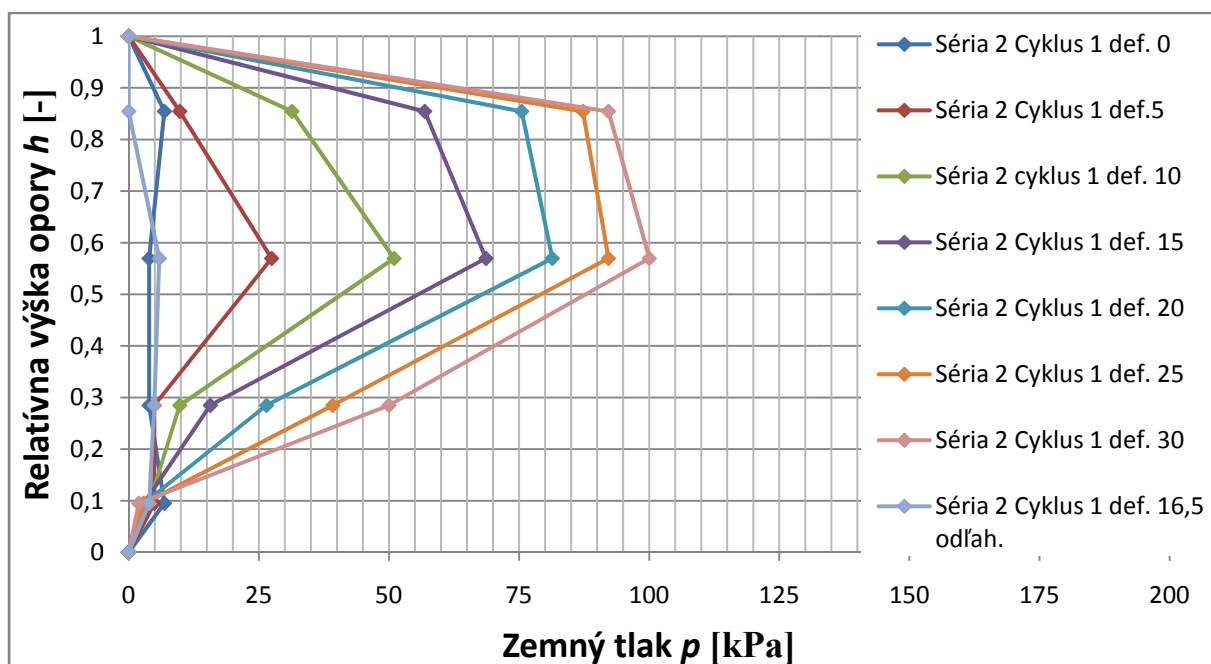
Obr. č. 4.4 - Detail B - úložný prah (rez)

5. Výsledky experimentálneho programu – vybraná časť

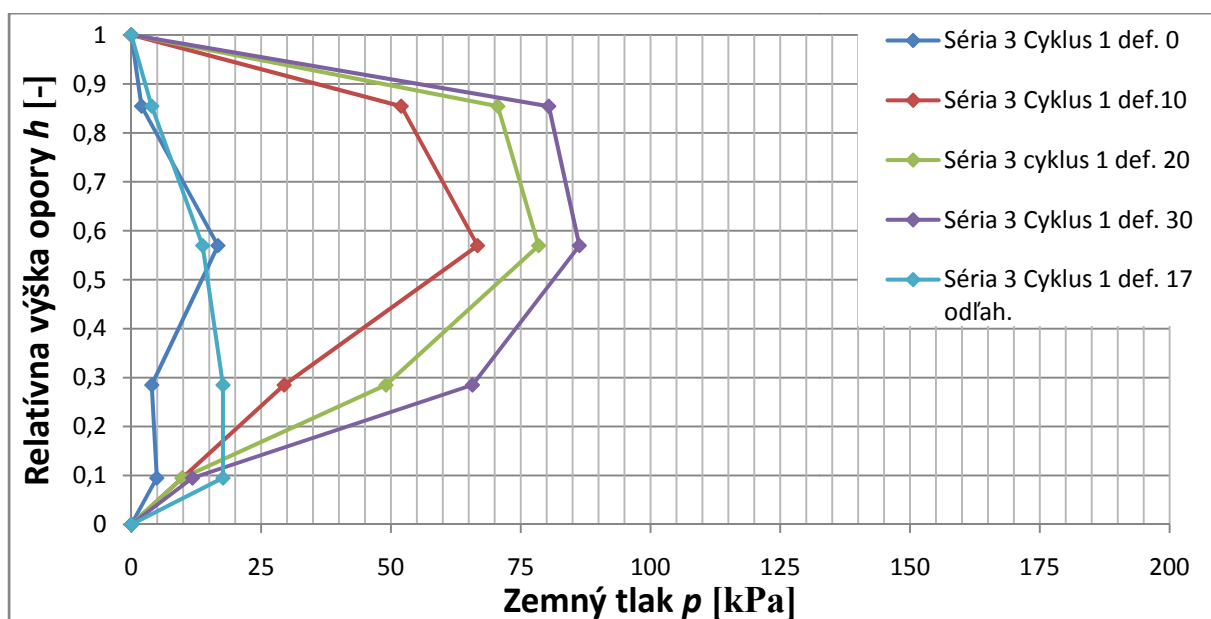
Na obr. č. 5.1, 5.2 a 5.3 sú znázornené priebehy zemných tlakov po výške opory v prvých cykloch jednotlivých sérií. Tieto priebehy sú vykreslené pomocou hodnôt zo snímačov zemných tlakov A, B, C a D, znázornených kosoštvorcovými značkami (pozn. snímače sú označené v poradí od max. výšky k najväčšej hĺbke, t.j. snímač A najbližšie k povrchu terénu, snímač D najďalej).



Obr. č. 5.1 - Priebeh zemných tlakov počas cyklu č.1, série č.1

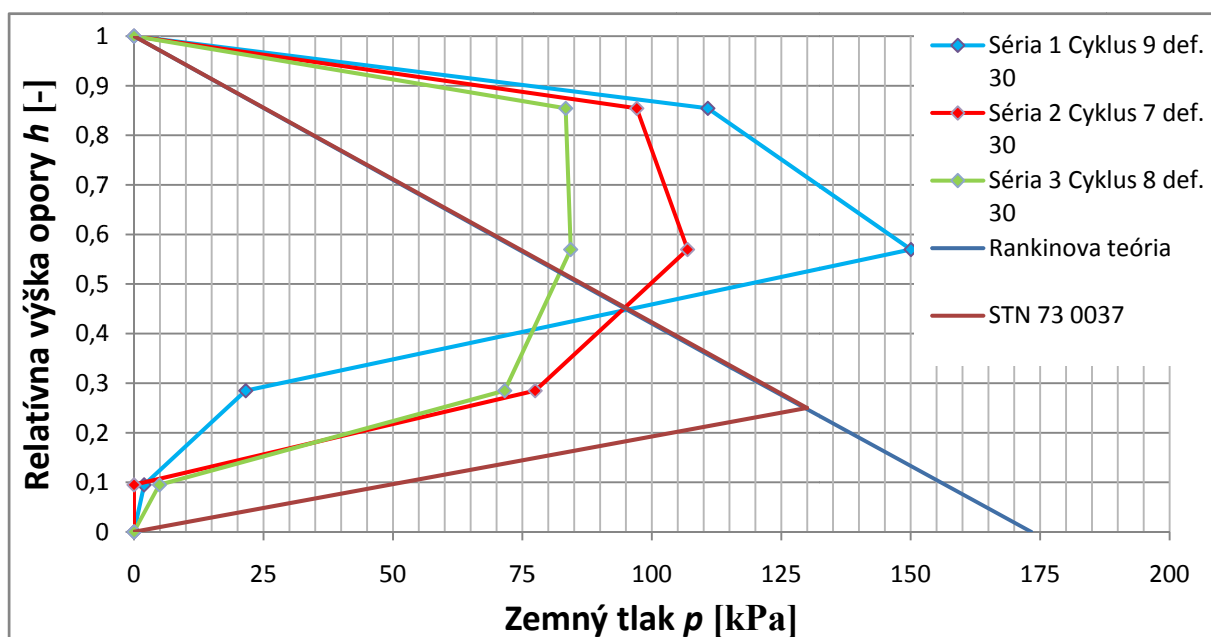


Obr. č. 5.2 - Priebeh zemných tlakov počas cyklu č.1, série č.2



Obr. č. 5.3 - Priebeh zemných tlakov počas cyklu č.1, série č.3

Priebehy zemných tlakov ukazujú, že už pri prvých cykloch jednotlivých sérií bol dosiahnutý usporiadaný stav - hodnoty namerané snímačmi zemných tlakov stúpajú úmerne so zatláčaním opory do zemného telesa. Treba však poukázať na mierne odlišný tvar priebehu zemných tlakov v porovnaní s Rankinovou teóriou a priebehom podľa STN 73 0037. Porovnanie experimentálne nameraných priebehov zemných tlakov s priebehmi získanými týmito výpočtovými postupmi je znázornené na obr. č. 5.4. Porovnané boli priebehy z tých cyklov, v ktorých boli namerané najvyššie hodnoty zemných tlakov. V prípadoch série č. 2 a č. 3 sú to posledné cykly, v prípade série č. 1 predposledný cyklus.



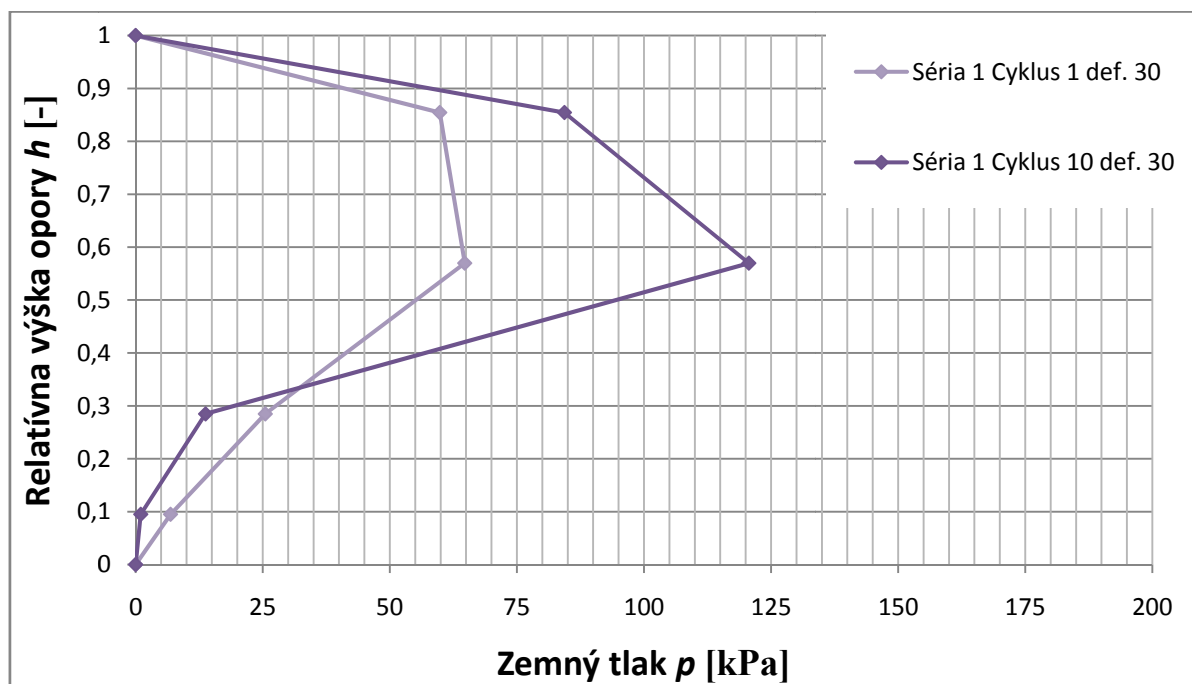
Obr. č. 5.4 - Porovnanie priebehov zemných tlakov s Rankinovou teóriou a STN 73 0037

Porovnanie hodnoty výslednice zemných tlakov zo série č. 1 s Rankinovou teóriou udáva jej hodnotu menšiu o približne 33 percent. Naopak, pri porovnaní s STN 73 0037 je hodnota výslednice so sériou č. 1 takmer zhodná, s odchýlkou menej ako 1%. Výslednica zemných tlakov zo série č. 1 sa teda blíži k hodnotám z výpočtových postupov. Porovnanie je v tab. č 5.1.

Výslednice zemných tlakov - porovnanie maxím [kN]		
Séria č. 1, cyklus č. 9	Rankin	STN 73 0037
102,4	136,9	102,6

Tab. č. 5.1 - Porovnanie výsledníc zemných tlakov pre sériu č. 1

Pri porovnaní priebehov zemných tlakov z výpočtových postupov s priebehom zemných tlakov z experimentálneho merania sa ukazuje, že ich priebeh je odlišný. Maximálna hodnota zo série č. 1 experimentálneho programu je v hĺbke 0,45 násobku výšky opory, zatiaľ čo Rankinova teória uvažuje s maximom v päte opory. STN 73 0037 túto hodnotu udáva v hĺbke 0,75 násobku výšky opory. Pri porovnaní prvého a posledného cyklu tejto série je však vidieť určitú zmenu v distribúcii zemných tlakov. Tou je pokles hodnôt v snímačoch C a D a nárast v snímačoch A a B. Je pravdepodobné že pri vyššom počte cyklov by táto zmena v priebehu zemných tlakov mohla pokračovať ďalej. Konečný priebeh by teda mohol byť iný, pokračujúci v tomto trende znižovania zemných tlakov v spodnej časti opory a ich zvyšovania v hornej časti. Porovnanie prvého a posledného cyklu série č. 1 je znázornené na obr. č. 5.5 a zhrnuté v tab. č. 5.2.

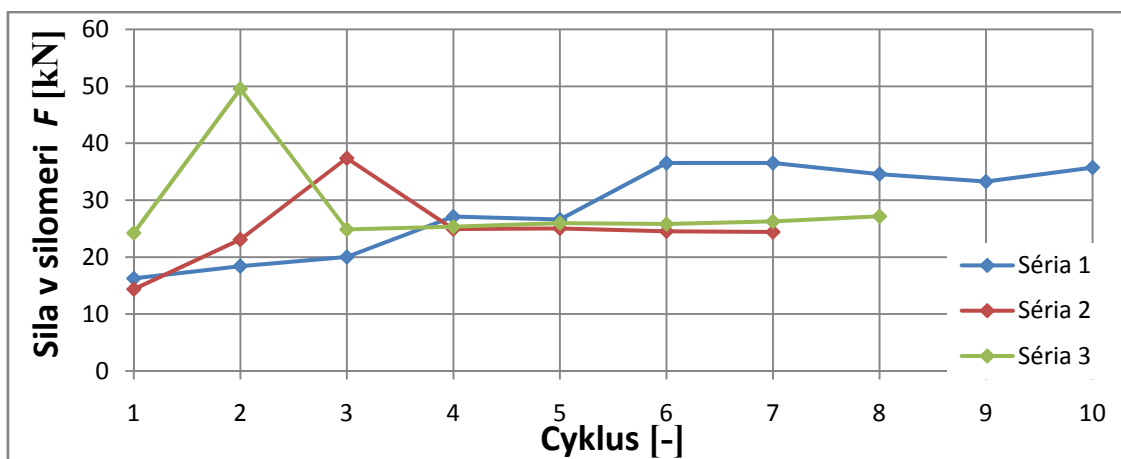


Obr. č. 5.5 – Porovnanie cyklov č.1 a č.10 série č. 1

	Zemný tlak [kPa]		Zmena [%]
	Cyklus č. 1	Cyklus č. 10	
A	59,8	84,3	41
B	64,7	120,6	86
C	25,5	13,7	-86
D	6,9	1,0	-600

Tab. č. 5.2 - Porovnanie cyklov č.1 a č.10 série č. 1

Výsledky zo série č. 2 a č. 3 nie je vhodné porovnávať s výpočtovými postupmi podľa Rankina a STN 73 0037, keďže nezohľadňujú prítomnosť poddajnej vrstvy polystyrénu medzi oporou a zemným telesom. Vhodné je porovnať ich priamo so sériou č. 1. Porovnanie maximálnych nameraných síl zo silomeru, je znázornené na obr. č. 5.6. Ďalší spôsob porovnania predstavuje porovnanie výsledníc zemných tlakov z jednotlivých sérií, tie sú uvedené v tab. č. 5.3 (pozn. hodnoty sú výrazne vyššie v porovnaní so silomerom z dôvodu menšieho ramena výslednice k bodu otáčania opory).



Obr. č. 5.6 - Maximálna sila nameraná silomerom počas jednotlivých cyklov pri zatlačení opory 30 mm

Výslednice zemných tlakov					
[kN]					
Cyklus č.	Séria 1	Séria 2	Séria 3	Rankin	STN 73 0037
1	54,5	86,0	84,1	136,9	102,6
2	68,1	88,9	78,9		
3	68,1	90,1	82,8		
4	79,1	96,1	82,7		
5	100,8	97,3	83,7		
6	87,7	98,3	83,6		
7	96,6	99,1	85,3		
8	96,6	-	84,8		
9	102,4	-	-		
10	79,5	-	-		

Tab. č. 5.3 - Porovnanie výsledníc zemných tlakov medzi sériami

Pri sérii č. 1 vidieť mierne rastúci trend. Priebeh z obr. č. 5.6 pre sériu č. 1 naznačuje, že zemina bola v kyprom stave. To potvrdzuje aj nízky modul deformácie, približne 100 MPa. Podľa obr. č. 5.6 pri sériách č. 2 a č. 3 od ich 4. cyklu nastáva ustálený stav. Podľa tab. 5.3 sú hodnoty ustálené už od cyklu č. 1. Rozdiel medzi sériou č. 1 a sériami č. 2 a č. 3 by sa teda mohol s pribúdajúcim počtom cyklov prehlbovať.

Vzájomné porovnanie jednotlivých sérii pomocou síl meraných silomerom a výsledníc zemných tlakov, získaných integráciou hodnôt po výške opory, je uvedené v tab. č. 5.4. Z dôvodu iných vzdialeností výslednice zemných tlakov a sily meranej silomerom k bodu otáčania opory sú tieto hodnoty spracované ako percentuálne porovnanie, normalizované k priemernej hodnote série č. 3. Táto séria bola zvolená z dôvodu, že hodnoty namerané silomerom aj snímačmi zemných tlakov majú najnižší rozptyl.

Cyklus č.	Výslednice zemných tlakov [%]			Hodnoty zo silomeru [%]		
	Séria 1	Séria 2	Séria 3	Séria 1	Séria 2	Séria 3
1	65,5	103,3	101,1	56,7	50,1	84,6
2	81,8	106,9	94,8	64,3	80,6	172,9
3	81,8	108,3	99,4	69,9	130,4	86,8
4	95,1	115,5	99,4	94,6	87,0	88,5
5	121,1	116,9	100,5	92,8	87,4	90,6
6	105,4	118,1	100,4	127,5	85,6	90,1
7	116,0	119,1	102,5	127,5	85,2	91,7
8	116,0	-	101,9	120,7	-	94,8
9	123,0	-	-	116,1	-	-
10	95,5	-	-	124,7	-	-
Priemer	100,1	112,6	100,0	99,5	86,6	100,0

Tab. č. 5.4 – Vzájomné porovnanie sérií pomocou hodnôt zo silomeru a hodnôt zo snímačov zemných tlakov

Tab. č. 5.4 ukazuje dva rozdiely v porovnaní medzi výslednicami zemných tlakov a silami zo silomeru. Prvou odchýlkou sú výsledky série č. 1. Pomer výsledníc z tejto série k sériám č. 2 a č. 3 je menší ako pomer síl zo silomeru.

Druhým rozdielom je vzájomný pomer medzi sériami č. 2 a č. 3. Pri hodnotách zo silomeru sú sily pri sérii č. 3 vyššie. Keďže použitý polystyrén mal nižšiu tuhosť ako pri sérii č. 2, pomer nameraných hodnôt by mal byť opačný, tak ako pri hodnotách nameraných snímačmi zemných tlakov. Pre analýzu týchto dvoch rozdielov je potrebné vrátiť sa k obr. č. 5.6 a tab. č. 5.3.

Na obr. č. 5.6 pri sérii č. 1 sú od cyklu č. 4 najvyššie dosahované sily, pričom sa rozdiel v porovnaní s ostatnými sériami v ďalších cykloch zvyšuje. To zodpovedá tomu, že pri tejto sérii nie je použitá vrstva polystyrénu znižujúca zemné tlaky. Tab. č. 5.3 však udáva nižší rast s pribúdajúcimi cyklami. Rozdiel oproti sériám s polystyrénom je tiež nižší. V tomto prípade je vhodné prikloniť sa k hodnotám nameraným silomerom. Priebehy zemných tlakov použité pre integráciu sa totiž skladajú len z 6 hodnôt (4 hodnoty namerané snímačmi a dve nulové hodnoty). Je teda možné, že mimo snímačov zemných tlakov nastal extrém, ktorý nebol zaznamenaný. Z obr. č. 5.5 sa ako možné miesto výskytu tohto extrému javí priestor medzi

snímačmi B a C (vzdialenosť medzi 0,57 až 0,28 relatívnej výšky opory). To by vysvetľovalo rozdiel v porovnaníach z tab. č. 5.4.

Pri sérii č. 2 (tuhší polystyrén) a č. 3 (poddajnejší polystyrén) je v tab. č. 5.3 správny rozdiel medzi výslednicami zemných tlakov - pri tuhšom polystyréne sú výslednice väčšie, pri poddajnejšom menšie. Na obr. 5.6 možno vidieť pri cykloch č. 4 až 7 rozdiel približne 2kN, avšak opačný - nižšia sila pri použití tuhšieho polystyrénu. Keďže je tento rozdiel malý a priebehy zemných tlakov pri sérii č. 2 a č. 3 majú veľmi podobný priebeh (vid'. napr. obr. č. 5.4) v tomto prípade ako správne pôsobia výsledky získané integráciou priebehov zemných tlakov. Rozdiel v meraní silomerom mohlo spôsobiť napr. mierne zvýšenie trenia medzi oporou a debnením. Z obr. č. 5.6 je pri porovnaní so sériou č. 1 možno vidieť prínos vrstvy polystyrénu umiestnenej za oporou na zníženie celkovej sily.

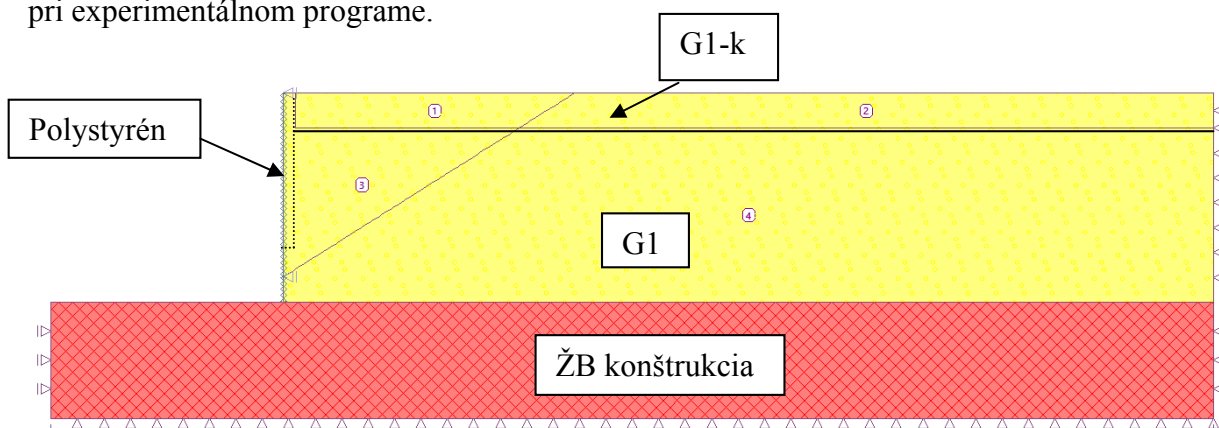
Po odstránení zemného telesa po sériách skúšok č. 2 a č. 3 bola odmeraná hrúbka polystyrénu - obr. č. 5.7. Najnižšia nameraná hodnota predstavovala 98 mm, čo v porovnaní s pôvodnými 100 mm predstavuje len malé zníženie hrúbky. Toto zníženie hrúbky však bolo namerané len v niektorých miestach a teda nie je vylúčené že vzniklo počas aplikácie tlaku na tieto dosky pri lepení na oporu. Možno teda usudzovať, že vrstva polystyrénu bola počas skúšok série č. 2 a č. 3 v pružnej oblasti, nakoľko neboli zaznamenané plastické deformácie.



Obr. č. 5.7 - Vrstva polystyrénu po odstránení zemného telesa - po sérii č. 3

6. Numerická analýza

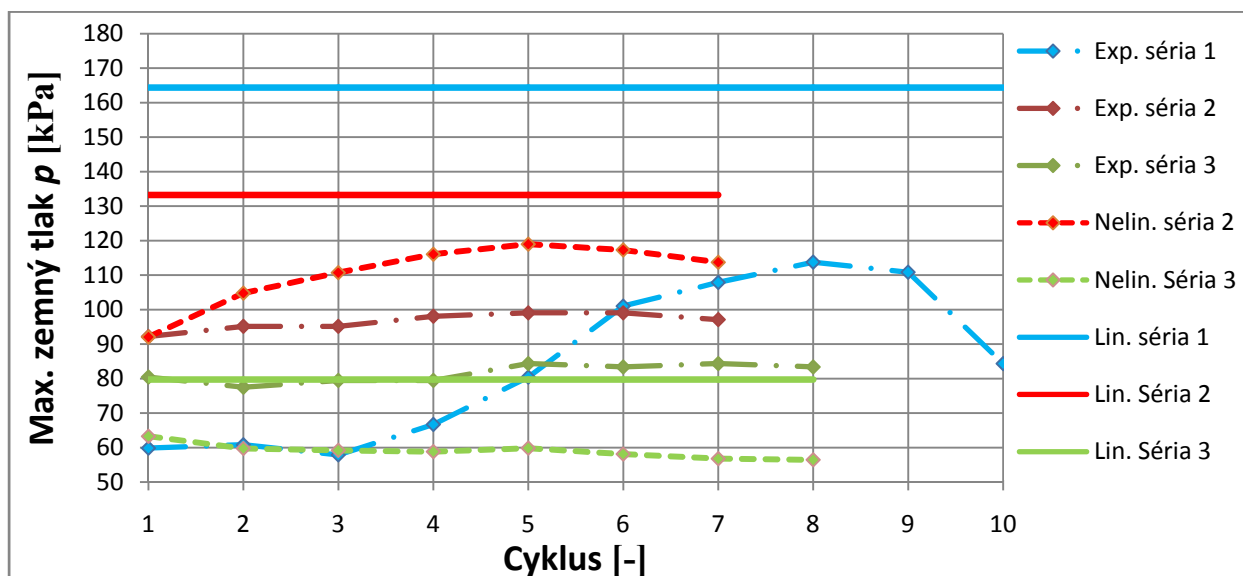
Pre každú sériu skúšok bol vytvorený 2D model. Tieto modely boli následne použité pre materiálovo nelineárnu (modifikovaný materiálový model Mohr-Coulomb) a lineárnu analýzu. Výpočtový model je zobrazený na obr. č. 6.1. Zaťažovanie modelu je rovnaké ako pri experimentálnom programe.



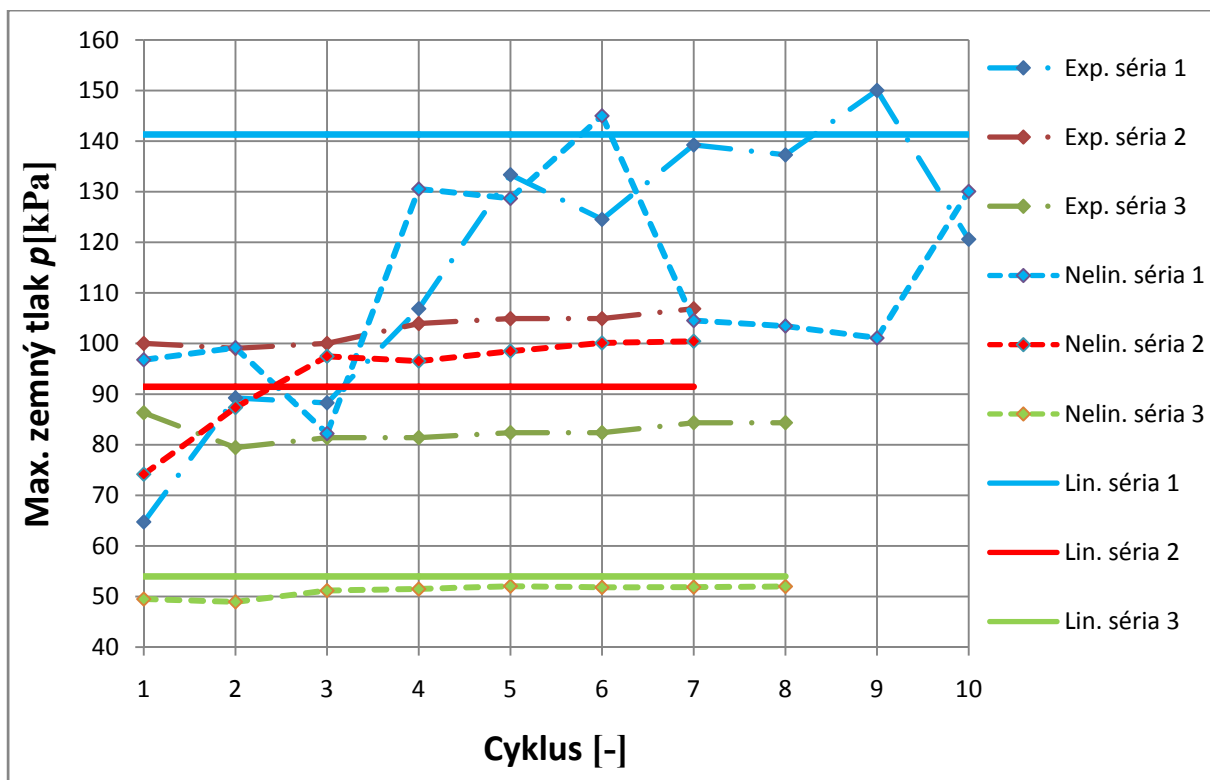
Obr. č. 6.1 – Model pre numerickú analýzu

Pre porovnanie s experimentálne nameranými hodnotami boli v MKP modeli vytvorené body, reprezentujúce fiktívne snímače zemného tlaku A, B, C a D. Z týchto bodov boli následne odčítané exaktné hodnoty napätia.

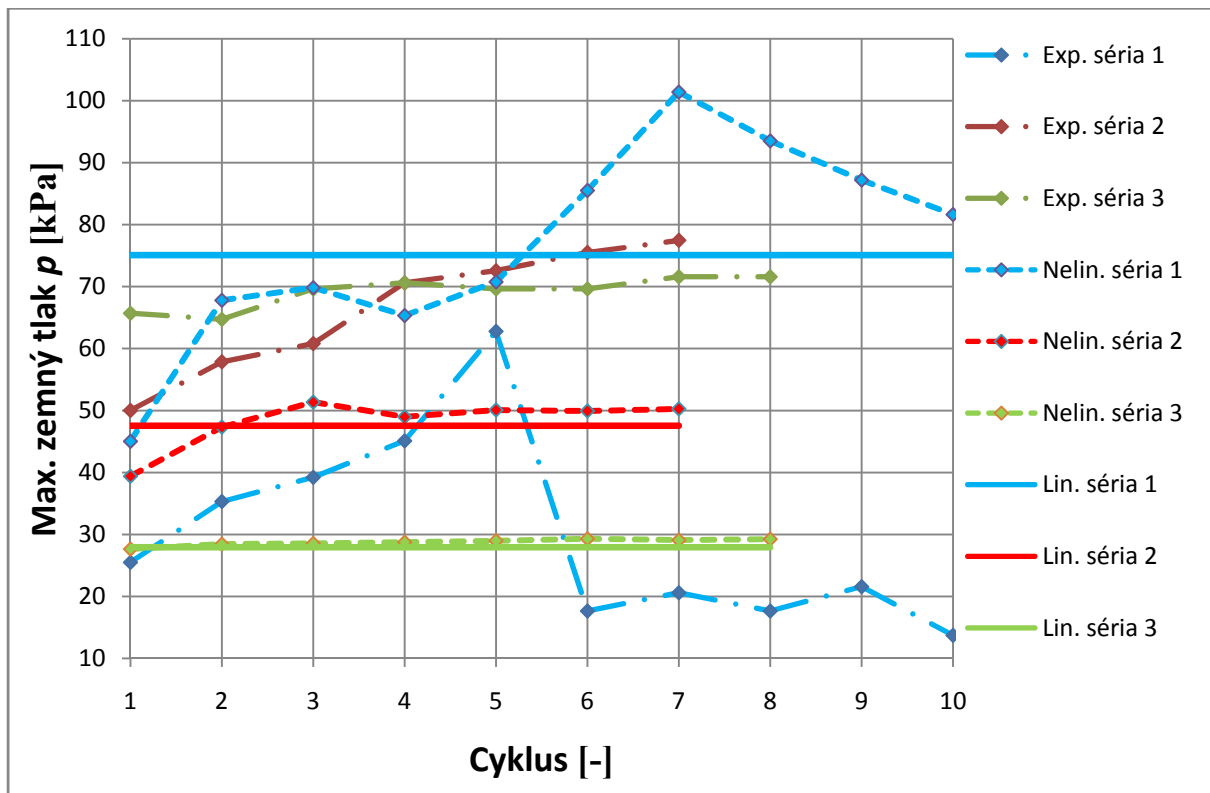
Porovnanie hodnôt napätí z fiktívnych snímačov zemných tlakov v numerickom modeli a hodnôt zo skutočných snímačov v experimentálnom programe je spracované formou grafov, na obr. č. 6.2 až č. 6.5.



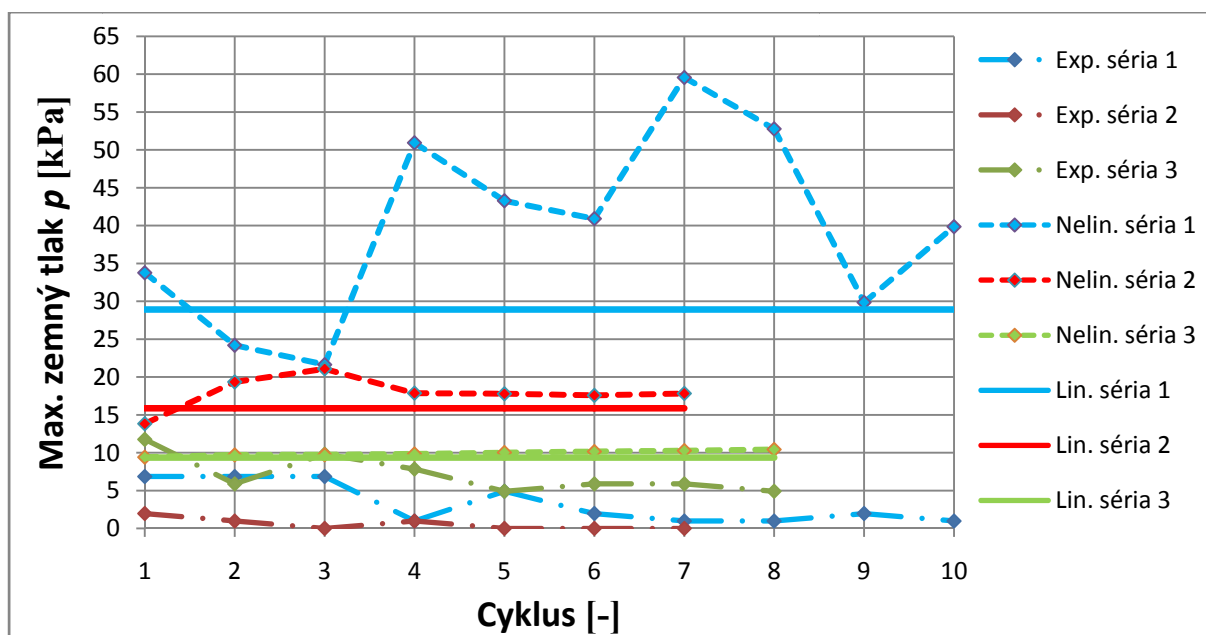
Obr. č. 6.2 – Porovnanie experimentálne nameraných zemných tlakov s napätiami získanými numerickou analýzou, snímač A



Obr. č. 6.3 – Porovnanie experimentálne nameraných zemných tlakov s napätiami získanými numerickou analýzou, snímač B



Obr. č. 6.4 – Porovnanie experimentálne nameraných zemných tlakov s napätiami získanými numerickou analýzou, snímač C



Obr. č. 6.5 – Porovnanie experimentálne nameraných zemných tlakov s napätiami získanými numerickou analýzou, snímač D

Porovnanie zemných tlakov ukazuje najlepšiu zhodu so skutočnosťou pri nelineárnej analýze série č. 2 - odchýlka pri jednotlivých snímačoch sa pohybuje približne na hranici 15 kPa, čo možno označiť za dobrú zhodu. Zároveň je nutné poznamenať, že nelineárna analýza poskytuje takmer totožné výsledky s lineárnou analýzou (max. odchýlka približne 10 kPa), s výnimkou fiktívneho snímača zemného tlaku A.

Z deformačného hľadiska je zaujímavý stav pri sériách č. 2 a č. 3. Vodorovné deformácie (charakteristický priebeh) v rámci cyklu č. 4 série č. 2 sú znázornené na obr. č. 6.6.



Obr. č. 6.6 – Vodorovné deformácie – séria č. 2, 4. Cyklus

7. Pomôcka pre navrhovanie kompresných vrstiev z polystyrénu

Numerická analýza preukázala, že vodorovné deformácie spôsobené zatláčaním opory prebiehajú predovšetkým vo vrstve polystyrénu a do okolitého zemného telesa sa prenáša len

malá časť deformácie. Z tohto dôvodu je možné usúdiť, že napätostný stav, pôsobiaci na opornú konštrukciu, je ovplyvnený takmer výhradne materiálovými vlastnosťami polystyrénu. Experimentálny program zároveň preukázal len malé zmeny zemných tlakov s pribúdajúcim počtom cyklov série č. 2 a č. 3. Taktiež sa potvrdilo, že vrstva polystyrénu bola po celý čas v pružnom stave.

Kombináciou týchto poznatkov je možné usúdiť, že pre určenie zemných tlakov pri použití kompresnej vrstvy z polystyrénu by mali postačovať len pevnostno-deformačné vlastnosti tejto vrstvy. Zároveň by mal postačovať len jeden výpočet (pre prvý cyklus). Tieto úvahy viedli k vytvoreniu jednoduchej pomôcky pre návrh kompresnej vrstvy, tvorenej polystyrénom.

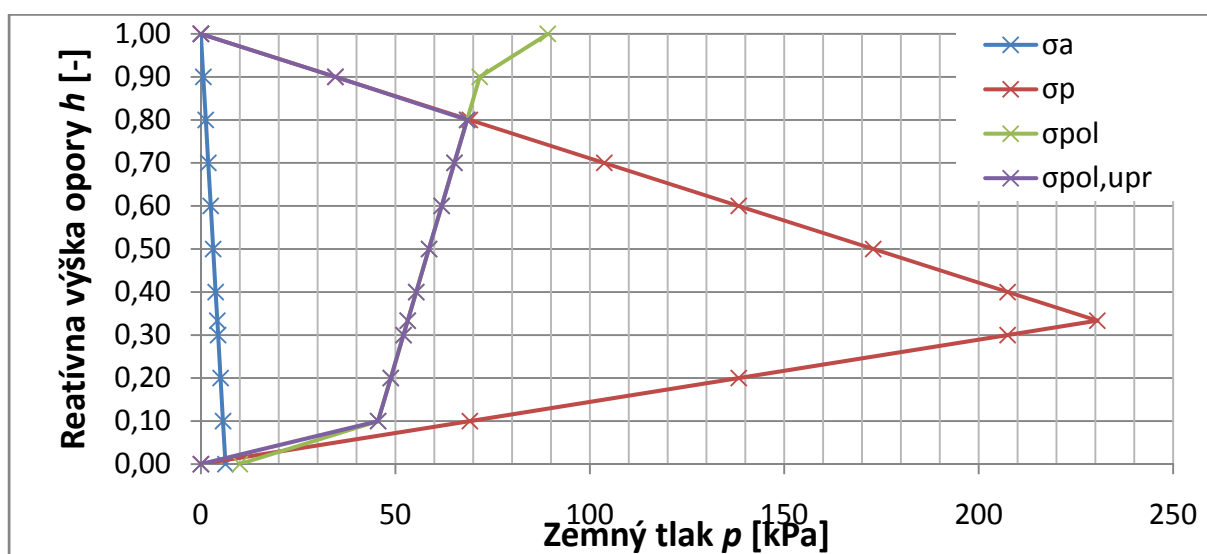
Samotný výpočet je realizovaný v dvoch krokoch. Prvý krok predstavuje výpočet pasívneho zemného odporu pomocou Rankinovej teórie, ktorá neuvažuje s využitím ľahko stlačiteľných materiálov medzi oporou a zemným telesom.

Druhý krok predstavuje určenie teoretického napätia v kompresnej vrstve. To je realizované s uvažovaním stlačenia polystyrénu od aktívneho zemného tlaku, ktoré nastáva pri nulovom pootočení opory. Takto získané stlačenie je pretransformované na pomerné pretvorenie. Pripočítaním pomerného pretvorenia od vnášanej vodorovnej deformácie (uvažuje sa s rovnomerne znižujúcou distribúciou tejto deformácie po výške opory) je získané celkové pomerné pretvorenie vrstvy. Následne je k tomuto celkovému pomernému pretvoreniu vrstvy priradená hodnota napätia pomocou pracovného diagramu.

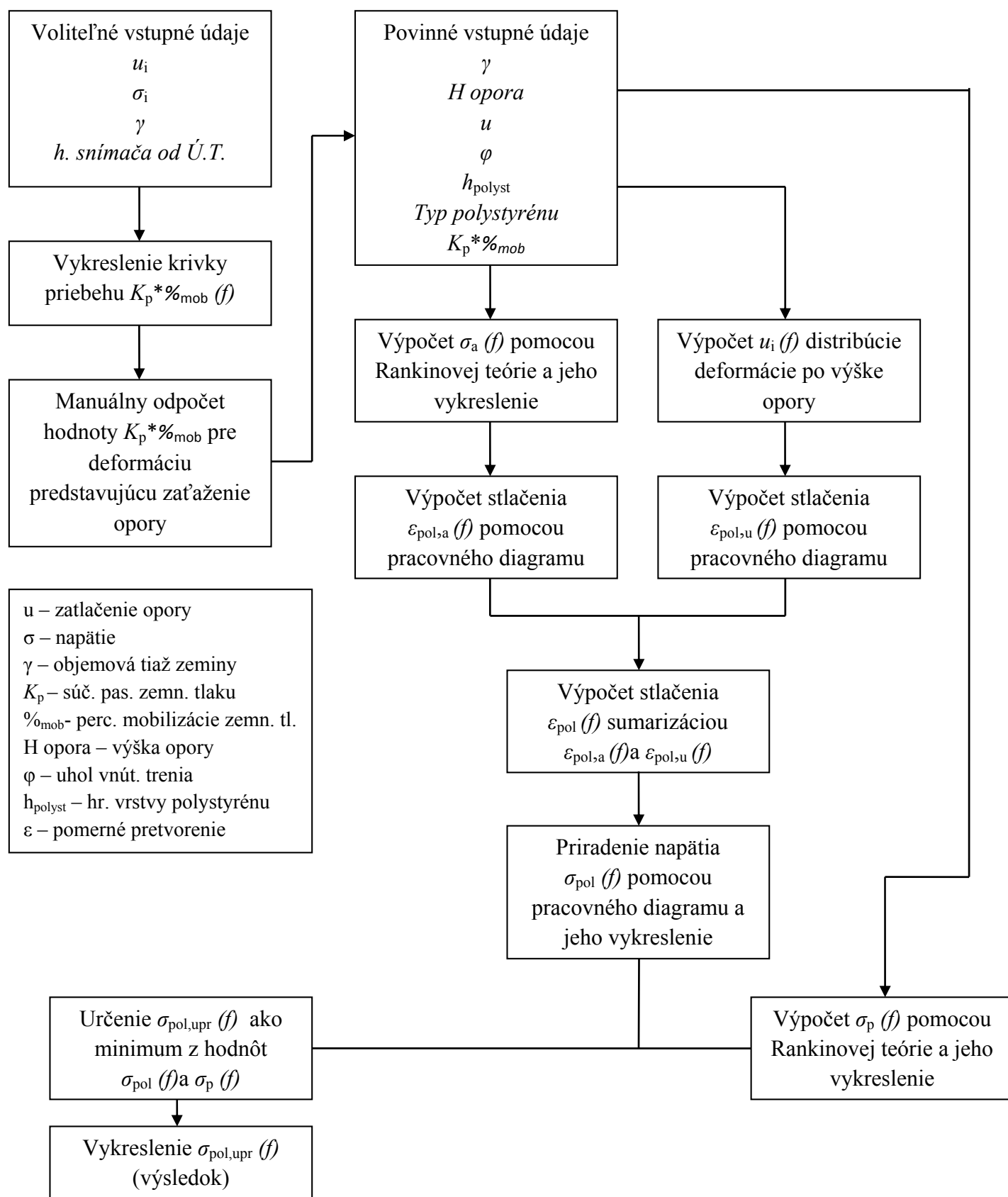
V treťom kroku sa určí výsledné pôsobiace napätie v kompresnej vrstve - predstavuje vždy menšiu hodnotu z napätí získaných v krokoch č. 1 a č. 2.

Vzorový výsledok z pomôcky je uvedený na obr. č. 7.1. Tento výsledok vychádza z rovnakých predpokladov, aké boli pri skúškach v 3. sérii experimentálneho programu. Priebeh vypočítaného napätia je tvarovo pomerne blízky k dátam získaným z experimentálneho programu (viď. obr. č. 5.4).

Schematické znázornenie výpočtu je zobrazené na obr. č. 7.2.

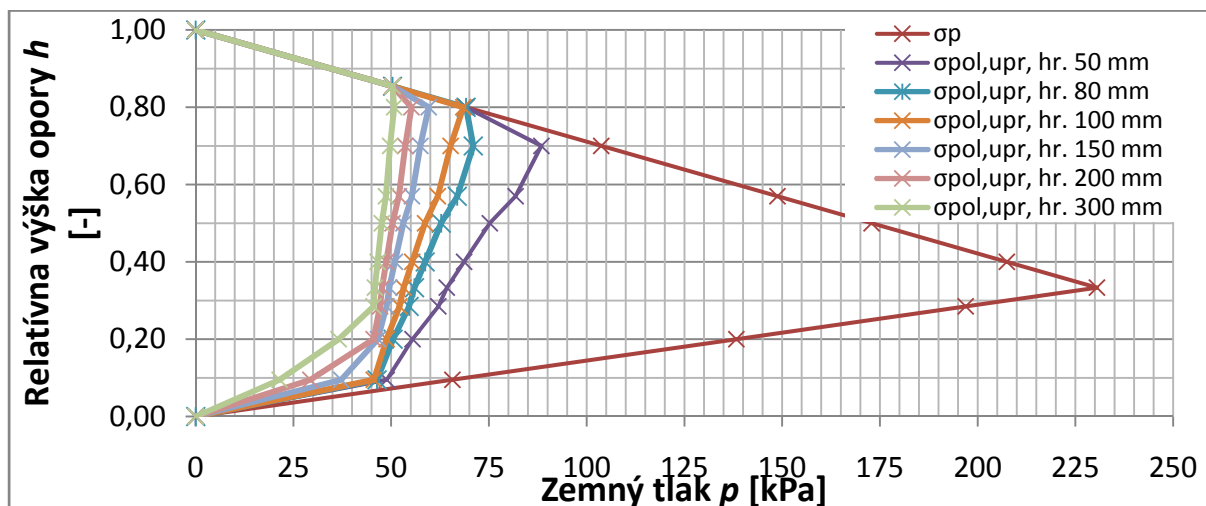


Obr. č. 7.1 - Vzorový výsledok výpočtu napätí z pomôcky



Obr. č. 7.2 – Vývojový diagram navrhovaného výpočtu zemných tlakov vo vrstve polystyrénu

V pomôcke bol vykonaný pre parametre experimentálnej skúšky výpočet vplyvu hrúbky vrstvy polystyrénu typu A (poddajnejší) na zemné tlaky. Ten je prezentovaný na obr. č. 7.3. Z obrázku vidieť, že už malá hrúbka vrstvy postačuje na výrazné zníženie zemných tlakov. Vždy však treba brať do úvahy obmedzenie deformácií v tejto vrstve na pružnú oblasť. Z tohto dôvodu je pre daný príklad vhodná hrúbka 100 mm.



Obr. č. 7.3 - Vplyv hrúbky polystyrénu na priebeh vodorovných napätí na opore (def. 30 mm)

8. Závery

Nižšie sú uvedené závery, ktoré predstavujú zhrnutie poznatkov z dizertačnej práce:

- na priebeh horizontálnych deformácií po dĺžke zemného telesa má výrazný vplyv tuhosť tenkej vrstvy pri povrchu zemného telesa,
- pomocou kompresných vrstiev vhodnej tuhosti je možné výrazne znížiť pasívne zemné tlaky pôsobiace na oporu (v rámci diz. práce o 30 až 40%, s potenciálom vyššieho zníženia pri aplikácii tohto princípu, pri oporách väčšej výšky),
- kompresná vrstva sa aj pri veľkom pretvorení (vyše 30%) správa pružne,
- pre tvorbu kompresnej vrstvy je najvhodnejší čo najmenej tuhý materiál, ktorý má ale aspoň takú tuhosť, aby aktívny zemný tlak nespôsobil výraznú deformáciu tejto vrstvy - v prípade dizertačnej práce to predstavuje typ polystyrénu A, ktorý je najpoddajnejší z druhov polystyrénu použitých pre experimentálny program,
- pomocou výpočtov sa preukázalo, že už pri pomerne malej hrúbke vrstvy (napr. 50 mm) nastáva výrazné zníženie pasívneho zemného tlaku, pričom zvyšovanie hrúbky tejto vrstvy prináša ďalšie zníženie zemného tlaku už len v malej miere,
- vo vzdialenosti 0,55 násobku výšky opory výrazne klesajú zvislé deformácie na povrchu zemného telesa,
- vo vzdialenosti 0,85 násobku výšky opory výrazne klesajú vodorovné deformácie na povrchu zemného telesa,
- lineárna analýza je dostatočná pre riešenie napätostno-deformačného stavu zemného telesa a kompresnej vrstvy a v porovnaní s nelineárnou analýzou nemá výrazné odchýlky.

Odporúčania pre prax:

- v prípade vysokých opôr zvážiť možnosť využitia kompresnej vrstvy na zníženie namáhania opory pasívnym zemným tlakom.

Odporúčania pre ďalší výskum:

- vykonať reologické skúšky expandovaných polystyrénov použitých v dizertačnej práci,
- vykonať ďalšie skúšky s poddajnými oporami a rôznou hrúbkou kompresnej vrstvy,
- vykonať ďalšie skúšky rôznych materiálov vhodných pre kompresné vrstvy.

9. Vybraný zoznam použitej literatúry

Scott, E.G., Rollins, K.M., Scott, M.A., and Richards, P.W., *Passive Force on Bridged Abutments and Geofoam Inclusions with Large-Scale Test*, Brigham Young University, Department of Civil Engineering, 2015

Horvath, J. S., *Expanded Polystyrene (EPS) Properties for Geotechnical Engineering Applications.*, International Geotechnical Symposium on Polystyrene Foam in Below-Grade Applications Proceedings, 1994

Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S. and Leshchinsky, D. *Guidelines for Geofoam Applications in Embankment Projects, Final Rpt.* - The National Cooperation. Highway Resource Program Proj. 24-11. (2004)., 2004

Horvath, J.S., *Integral-Abutment Bridges: Problems and Innovative Solutions Using EPS Geofoam and Other Geosynthetics*, Manhattan College Research Report No. CE/GE-00-2, 2000

Rollins, K.M., Scott, E. and Marsh, A., *Geofoam Inclusions for Reducing Passive Force on Bridge Abutments Based on Large-Scale Tests*, Geotechnical Frontiers 2017 GSP 279, 59-68, 2017

Ertugrul, O.L. and Trandafir, A.C., *Reduction of Lateral Earth Forces Acting on Rigid Nonyielding Retaining Walls by EPS Geofoam Inclusions*, Journal of Materials in Civil Engineering 23 (12), 1711-1718, 2011

Azzam, S.A. and AbdelSalam, S.S., *EPS Geofoam to Reduce Lateral Earth Pressure on Rigid Walls*, International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering ICASGE'15, 2015

Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Kon, H. and Masuo, T., *Use of compressible expanded polystyrene blocks and geogrids for retaining wall structures*, Soils and Foundations, Vol. 42, No. 4, 29-41, 2002

Publikačná činnosť autora

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

- ADE01 BORZOVIČ, Viktor - GAJDOŠOVÁ, Katarína - PECNÍK, Miroslav - LACO, Ján. The cracking of two-span girders influenced by decreased bond of prestressing reinforcement. In *Interdisciplinarity in theory and practice [elektronický zdroj]*. No. 11 (2016), online, s. 18-25. ISSN 2344-2409.

ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

- ADM01 PECNÍK, Miroslav - BORZOVIČ, Viktor. Comparison of various FEM approaches in analysis of passive earth pressures. In *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*. Vol. 24, no. 4 (2017), s. 253-258. ISSN 2299-3649. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85064667101.

AEC Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

- AEC01 BORZOVIČ, Viktor - LACO, Ján - PECNÍK, Miroslav - PAŽMA, Peter. The crack development mechanism of prestressed girder influenced by different bond between prestressed tendons and concrete. In *Key Engineering Materials : Reliability Aspects in the Design and Execution of Concrete Structures*. Vol. 691, (2016), s. 309-320. ISSN 1013-9826 (2016: 0.164 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-84959440866 ; DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.691.309.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 PECNÍK, Miroslav - BORZOVIČ, Viktor - LACO, Kamil. Non-linear FEM analysis of integral bridges transition area. In *Solid State Phenomena : 23rd Concrete Days 2016. November 30 and December 1, 2016, Litomyšl, Czech Republic*. Vol. 259, (2017), s. 152-157. ISSN 1012-0394 (2017: 0.156 - SJR, Q4 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85019998419 ; DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.259.152.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- AFD01 BORZOVIČ, Viktor - GAJDOŠOVÁ, Katarína - PECNÍK, Miroslav - LACO, Ján. Crack Width and Crack Spacing of Prestressed Girders Influenced by

Decreased Bond of Tendons. In *ESaT 2016 [elektronický zdroj] : proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. Tatranské Matliare, Slovak Republic, 29th of June - 1st of July 2016*. Košice : Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2016, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-553-2564-4.

- AFD02 BORZOVIČ, Viktor - GAJDOŠOVÁ, Katarína - PECNÍK, Miroslav - LACO, Ján. The cracking of prestressed girders influenced by decreased bond of tendons. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II : proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. High Tatras Mountains, Tatranské Matliare, Slovak Republic, 29 June - 1 July 2016*. 1. vyd. London : Taylor & Francis Group, 2017, S. 51-56. ISBN 978-1-138-03224-8. V databáze: WOS: 000424002600009 ; SCOPUS: 2-s2.0-85016561964.
- AFD03 PECNÍK, Miroslav. Modelovanie vplyvu horninového prostredia na deformácie vodorovne zaťažených pilótových základov. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 26th Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics. 26. October 2016, Bratislava*. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2016, CD-ROM, s. 384-389. ISBN 978-80-227-4645-8.
- AFD04 PECNÍK, Miroslav. Špecifiká navrhovania integrovaných mostov. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 27th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Geodesy and Cartography, Landscaping, Building Technology, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Theory and Environmental Technology of Buildings, Water Resources Engineering. 25. October 2017, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, s. 353-357. ISBN 978-80-227-4751-6.
- AFD05 PECNÍK, Miroslav - PANUŠKA, Jakub - BORZOVIČ, Viktor. Experimental testing of mechanical properties of polystyrene for means of passive earth pressure reduction. In *ESaT 2018 [elektronický zdroj] : proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies*.

Tatranské Matliare, Slovak Republic, 12th - 14th September 2018. 1. vyd. Košice : Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2018, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-553-2982-6.

AFD06 PECNÍK, Miroslav. Pasívny zemný tlak na opory integrovaných mostov. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 28th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 24th 2018, Bratislava.* 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, CD-ROM, s. 297-303. ISBN 978-80-227-4864-3.

AFD07 PECNÍK, Miroslav - PANUŠKA, Jakub - BORZOVIČ, Viktor. Experimental verification of mechanical properties of polystyrene for use in integral bridges design. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III : proceedings of the 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies (ESaT 2018). Tatranské Matliare, Slovak Republic, 12-14 September 2018.* 1. vyd. London : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019, S. 515-520. ISBN 978-0-367-07509-5. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85068371834.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEE01 BORZOVIČ, Viktor - PECNÍK, Miroslav. Cestné mosty - odborný program svetovej cestnej spoločnosti PIARC. In *Mosty/Bridges 2018 : zborník príspevků z 23. mezinárodního sympozia. Brno, ČR, 26. - 27. 4. 2018.* 1. vyd. Ostrava - Zábřeh : Sekurkon, 2018, S. 47-50. ISBN 978-80-86604-74-9.

BEE02 PECNÍK, Miroslav - LACO, Kamil - BORZOVIČ, Viktor. Nelineárna analýza prechodových oblastí integrovaných mostov. In *23. Betonářské dny 2016 [elektronický zdroj] : zborník přednášek. Litomyšl, ČR, 30. 11. - 1. 12. 2016.* 1. vyd. Praha : Česká betonářská společnost ČSSI, 2016, USB klíč, [6] s. ISBN 978-80-906097-6-1.