

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ



BABAN 1.0 – Buried Arch Bridge Analysis

MANUÁL PROGRAMU PRO ANALÝZU PŘESYPANÝCH
KLENBOVÝCH MOSTŮ

ING. VOJTĚCH KOLÍNSKÝ

KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

PRAHA 2013

Obsah

1	Obecná charakteristika programu	3
2	Ovládání programu	4
2.1	Vstupní okno	4
2.2	Vstupní soubor v aplikaci MS Excel	4
2.3	Pracovní výstupy během výpočtu	4
2.4	Výsledky	5
3	Metodika výpočtu	10
3.1	Výpočetní model konstrukce	10
3.2	Generování jednotlivých kombinací	10
3.3	Zatížení	11
3.3.1	Zatížení od vlastní tíhy konstrukce a nadnásypu zeminy . .	11
3.3.2	Přítížení od hutnění a dopravy	11
3.4	Iterační algoritmus metody závislých tlaků	13
3.4.1	Výpočet zemních tlaků	13
3.4.2	Vlastní algoritmus	14
	Reference	15

Seznam obrázků

1	Vstupní okno programu	4
2	Náhled vstupního souboru	5
3	Schéma podélného řezu s označením vstupních parametrů	6
4	Pracovní výstup na konci výpočtu každé kombinace	6
5	Kontrolní hodnoty výpočtu pro všechny kombinace	7
6	Schéma výpočetního modelu	7
7	Obálka deformace v MSP ve vodorovném směru	8
8	Obálka deformace v MSP ve svislém směru	8
9	Obálka ohybových momentů po délce střednice v MSP	9
10	Obálka ohybových momentů po délce střednice v MSÚ + porov- nání s výpočtem uvažujícím pouze zemní tlak v klidu	9
11	Schéma zatížení od dopravy	12
12	Schéma průběhu hodnoty zemního tlaku v závislosti na přemístění konstrukce (ČNI, 1990)	13

1 Obecná charakteristika programu

Přesypané železobetonové obloukové mosty jsou při správném návrhu a provedení velmi hospodárné, bezpečné, trvanlivé a elegantní konstrukce. Program BABAN byl vytvořen za účelem zjednodušení jejich návrhu a posouzení.

Pro chování přesypaných konstrukcí je zásadní efekt spolupůsobení konstrukce se zeminou nadnásypu a z toho vyplývající komplikace při statické analýze. Správné provedení výpočetní analýzy ve stávajících komerčních programech, které modelují zemní těleso pomocí plošných MKP prvků (např. program PLAXIS), je velmi komplikované a časově náročné. Proto byl vytvořen software, který na základě jednoduchých vstupních parametrů automaticky analyzuje vnitřní síly na přesypané konstrukci v různých fázích výstavby a různých sestavách normových zatížení (dle Eurokódu). Spolupůsobení železobetonové konstrukce se zemním tělesem program modeluje pomocí metody závislých tlaků, pro kterou byl vytvořen vlastní algoritmus. Základním prvkem výpočetního modelu je 2D prutový prvek.

Zásadní výhodou programu je rychlost a s jakou je možné, bez dalšího složitého modelování, provádět komplexní analýzu vnitřních sil konstrukce během celé její výstavby i provozního stádia. Díky tomu je možné uspořit velké množství času při modelování mostu, rychle reagovat na případné změny v zadání okrajových podmínek (změny v prostorovém uspořádání, aktualizace geologického průzkumu. . .) a hlavně konstrukci snadno a efektivně optimalizovat.

Program byl vytvořen s podporou grantu TA03031099 ve spolupráci s řešitelem grantu Ing. Markem Foglarem Ph.D., kterému bych dále rád poděkoval za poskytnutí výpočetních dat z článku (Foglar and Křístek, 2012), které jsem použil jako jeden ze zdrojů pro verifikaci programu.

2 Ovládání programu

2.1 Vstupní okno

Program se spouští souborem *baban.exe*, kterým je otevřeno vstupní okno (viz obrázek 1), obsahující obecné informace o programu a dvě funkční tlačítka (Start – spustí výpočet; Help – vyvolá manuál). Pro správný výpočet je potřeba mít v adresáři *vstupni hodnoty* minimálně jeden vyplněný vstupní soubor (aplikace MS Excel).



Obrázek 1: Vstupní okno programu

2.2 Vstupní soubor v aplikaci MS Excel

Ukázka vstupního souboru je na obrázku 2. Je třeba vyplnit nebo nechat vyplněné všechny modré hodnoty až do řádku č. 45. Dále je třeba zadat údaje o tvaru střednice v jednotlivých uzlech (od řádku č. 49 dál). Zadání výšky konstrukce v jednotlivých uzlech je volitelné. Jednotlivé vstupní parametry jsou v souboru detailně popsány, přehledné zobrazení základních parametrů je dále na obrázku 3.

2.3 Pracovní výstupy během výpočtu

Na konci výpočtu každé iterace je zobrazeno pracovní okno (viz obrázek 4), které shrnuje informace o právě vypočtené kombinaci. Okno je zobrazeno jen do dokončení výpočtu další kombinace. V levém horním rohu najdeme červeně číslo

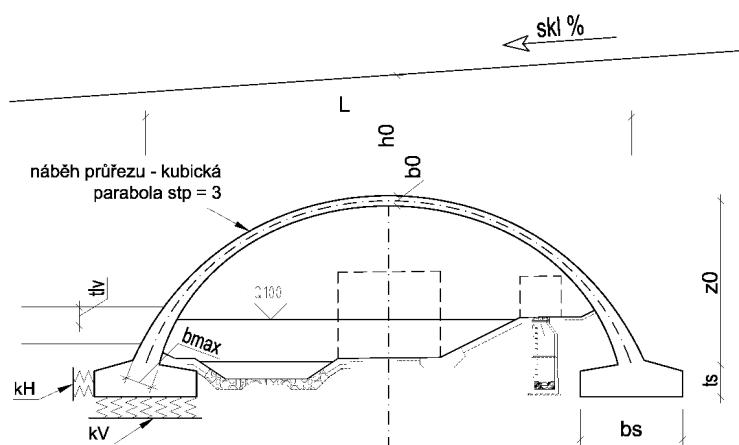
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Vstupní hodnoty pro výpočet konstrukce programem BABAN:														
2															
3	Konstrukce:														
4	h0	2	m	nadvýška nad vrcholem konstrukce [min 0,5 m]											
5	L	42	m	rozpětí											
6	z0	8.6925	m	vzepětí											
7	bmax	2	m	tloušťka oblouku v patě											
8	b0	0.45	m	tloušťka oblouku ve vrcholu											
9	stp	1		stupeň polynomu, který určuje průběh náběhu od paty do vrcholu [1 - lineární, 2 - kvadratický...atd.]											
10	bs	6	m	šířka základu											
11	ts	2	m	tloušťka základu											
12	tlv	1.0	m	tloušťka hutné vrstvy při vyšetřování postupu výstavby, pokud je "tlv" > vzepětí "z0" není postup výstavby vůbec uvažován											
13	skl	0.00	%	podélný sklon terénu nad mostem											
14															
15	Materiály:														
16	gammaM	12.5	kN/m3	tíha betonu											
17	gammaZ	19	kN/m3	tíha zeminy											
18	nu	0.35		poissonovo číslo zeminy pro optimalizaci střednice											
19	f	0.3		součinitel tření konstrukce/zemina pro optimalizaci střednice											
20	kV	2000	MN/m3	vertikální modul reakce podloží pod ZS											
21	kH	3500	MN/m3	horizontální modul reakce podloží v úrovni základu											
22	fi	35	°	úhel vnitřního tření zeminy											
23	OCR	1		stupeň prekonsolidace											
24	Ec	30	GPa	modul pružnosti betonu											
25															
26	Výpočet:														
27	nPK	400		počet prutů klenby [sudé číslo]											
28	nPrZ	10		počet prutů základu [sudé číslo]											
29	nfc	100		maximální počet kroků iterace											
30	dstop	0.01	mm	kritérium zastavení iterace - max rozdíl deformace v kroku n a n+1											
31															
32	Přetížení:														
33	doprava	0		kritérium uvažování přetížení od dopravy [1 - je uvažováno, 0 - není uvažováno]											
34	kolsil	135	kN	velikost kolové síly od LM1											
35	UDL	8.1	kN/m2	velikost rovnoměrného zatížení											
36	podvzd	1.2	m	vzdálenost náprav											
37	ssil	0.45	m	šířka kola											
38	spruhu	3	m	šířka pruhu											
39															
40	hutnění	0		kritérium uvažování přetížení od hutnění [1 - je uvažováno, 0 - není uvažováno]											
41	parametry	10	1.5	0.5	lehké hutnění: velikost [kN], šířka [m], vzdálenost počátku zatížení od střednice [m]										
42		30	2		těžké hutnění: velikost [kN], šířka [m]										
43															
44	Výsledky:														
45	nrez	11		počet řezů pro posudek konstrukce [min 2]											
46															
47	Souřadnice střednice oblouku:														
48		X [m]	Z [m]	h [m]	je třeba zadat souřadnice pravého ramena oblouku (1. bod vrchol [0,0], poslední bod pata vpravo [X>0, Z<0]), do třetíh pokud není dále vyplněno, je vypočtena optimální střednice pomocí programu pro hledání bezmomentové střednice a										
49		0	0	0.45											
50		0.2625	-0.00288	0.45											
51		0.525	-0.00575	0.45											
52		0.7875	-0.00863	0.45											
53		1.05	-0.0115	0.45											
54		1.05	-0.0115	0.45											
55		1.28625	-0.0195	0.45											
56		1.5225	-0.0275	0.45											
57		1.75875	-0.0355	0.45											

Obrázek 2: Náhled vstupního souboru

právě vypočtené kombinace a celkový počet vygenerovaných kombinací, dále okno obsahuje graf ukazující postup iterace (úspěšnost konvergence) a tři grafy porovnávací situaci na začátku a na konci iterace: graf ohybového momentu a grafy deformací střednice ve vodorovném a svislém směru.

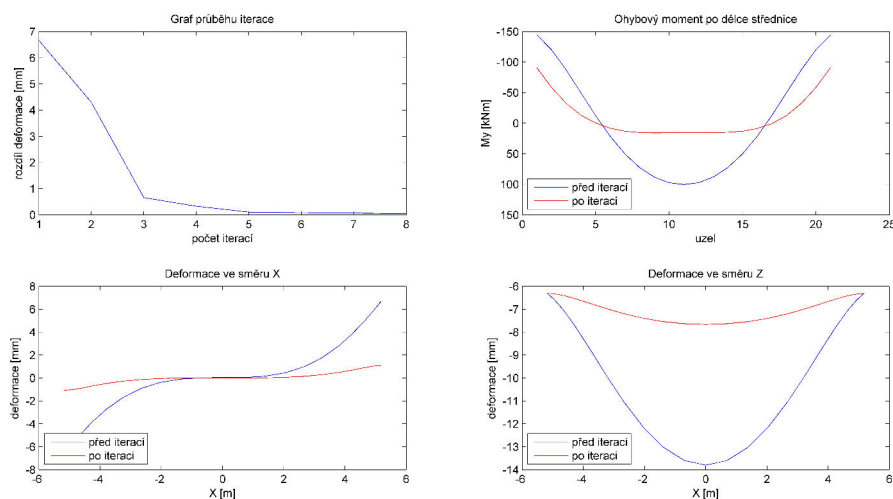
2.4 Výsledky

Všechny výsledky jsou uloženy do automaticky vytvořeného adresáře, jehož jméno odpovídá názvu vstupního souboru. Jedná se o obrázky ve formátu *.png* v adresáři



Obrázek 3: Schéma podélného řezu s označením vstupních parametrů

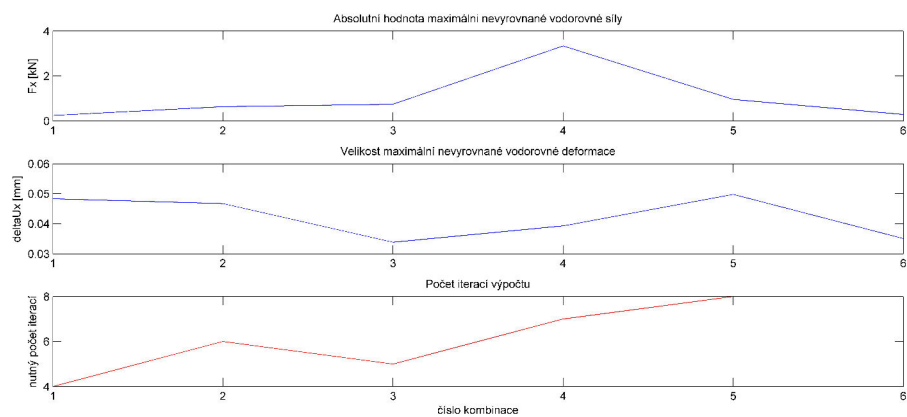
5 / 6



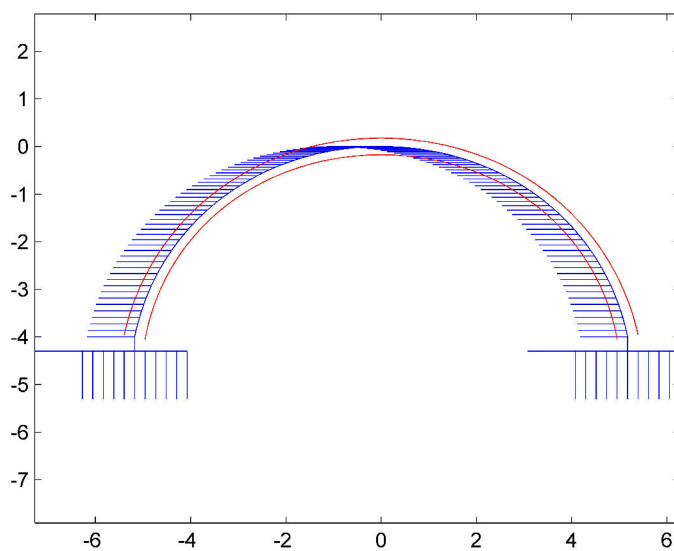
Obrázek 4: Pracovní výstup na konci výpočtu každé kombinace

grafy (ukázky příkladů výstupů viz obrázky 5 až 10).

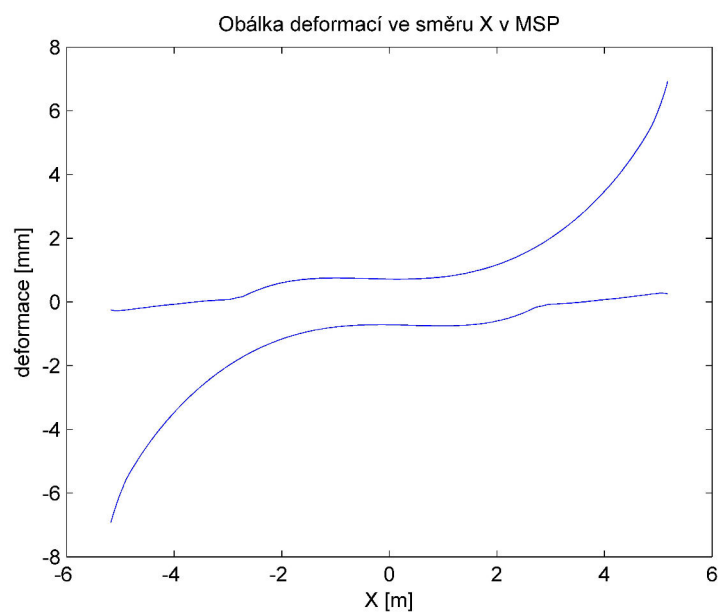
Na obrázku 5 jsou tři grafy, které shrnují postup výpočtu jednotlivých kombinací. Detailní popis významu grafů je v kapitole 3.4.



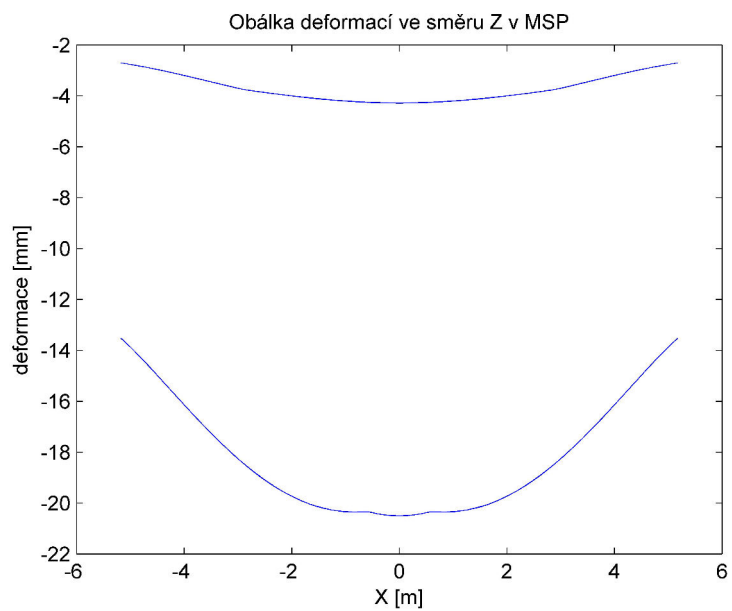
Obrázek 5: Kontrolní hodnoty výpočtu pro všechny kombinace



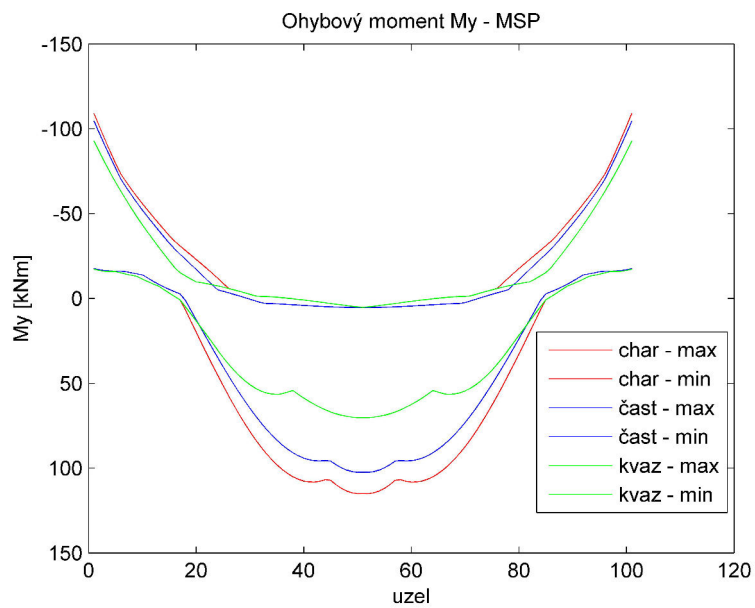
Obrázek 6: Schéma výpočetního modelu



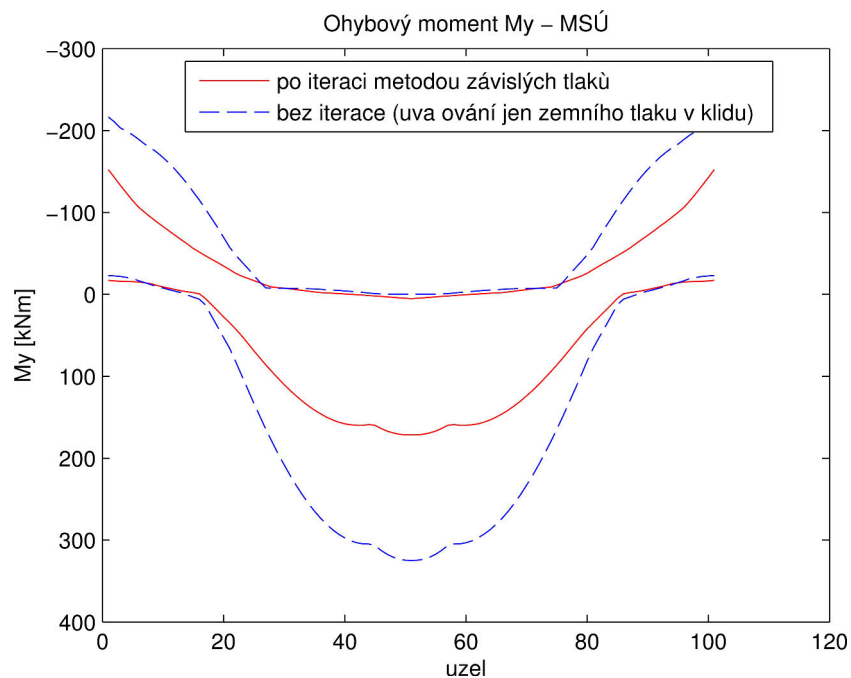
Obrázek 7: Obálka deformace v MSP ve vodorovném směru



Obrázek 8: Obálka deformace v MSP ve svislém směru



Obrázek 9: Obálka ohybových momentů po délce střednice v MSP



Obrázek 10: Obálka ohybových momentů po délce střednice v MSÚ + porovnání s výpočtem uvažujícím pouze zemní tlak v klidu

3 Metodika výpočtu

3.1 Výpočetní model konstrukce

Výpočetní model konstrukce je automaticky vygenerován na základě vyplněných vstupních parametrů. Jedná se o rovinný 2D model (viz obrázek 6), který představuje výsek konstrukce šířky 1 m a je složený z následujících typů prutových prvků:

- ohybově tuhé pruty modelující oblouk a základy (tuhost a vlastní tíha odpovídá použitému materiálu a výšce průřezu)
- dvojice nehmotných „dokonale“ tuhých ramen (spojení pat oblouku a středu základů)
- ohybově netuhé pruty simulující svislé a vodorovné podepření základu (jejich plocha je vypočtena na základě zadaných modulů reakce podloží, hmotnost je nulová)
- ohybově netuhé „zemní“ pruty vedené vodorovně z každého uzlu konstrukce oblouku (jejich plocha se mění během iterace výpočtu, hmotnost je také nulová)

3.2 Generování jednotlivých kombinací

Vnitřní síly jsou vypočteny v automaticky stanoveném počtu kombinací tak, aby bylo možné získat výsledky ve všech potenciálně nebezpečných stavech a od všech důležitých kombinací zatížení dle Eurokódu (mezní stav únosnosti, mezní stav použitelnosti – charakteristická kombinace, častá...). Vstupní parametry, které ovlivňují výsledný počet vygenerovaných kombinací jsou: $z0$, tlv , $doprava$ a $hutneni$.

Poměr parametrů $z0$ (vzepětí konstrukce) a tlv (tloušťka hutněné vrstvy) přímo určuje počet fází výstavby – zasypávání oblouku. Pokud je tlv větší než $z0$ nebude postup výstavby vůbec uvažován a konstrukce bude posouzena pouze ve finálním stavu. Parametry $doprava$ a $hutneni$ určují, jestli bude ve výpočtu uvažováno s nesymetrickým přitížením od hutnění a dopravy. Protože každá zatěžovací kombinace musí být vypočtena zvlášť a sestavy dopravního zatížení se generují v několika polohách (aby bylo zachyceno nejnepríznivější působení), tak tyto parametry také ovlivňují výsledný počet kombinací a tím i délku trvání výpočtu. Přesný popis kombinací zahrnující přitížení od hutnění a dopravy je v kapitole 3.3.2.

3.3 Zatížení

3.3.1 Zatížení od vlastní tíhy konstrukce a nadnásypu zeminy

Zatížení vlastní tíhou konstrukce je vypočteno dle tvaru jednotlivých prutů modelu oblouku (průměrná hodnota ve dvou sousedních uzlech) a objemové hmotnosti betonu (parametr γ_M).

Zatížení od zemního nádnásypu působící na jednotlivé elementy modelu je rozděleno na svislou a vodorovnou složku. Svislé zatížení je během výpočtu každé kombinace konstantní a je vypočteno jednoduše jako vlastní tíha sloupce zeminy ležící na horním líci konstrukce v průmětu prutu do osy X. Vodorovná složka zatížení (zemní tlaky) se mění během iterace, viz kapitola 3.4.1.

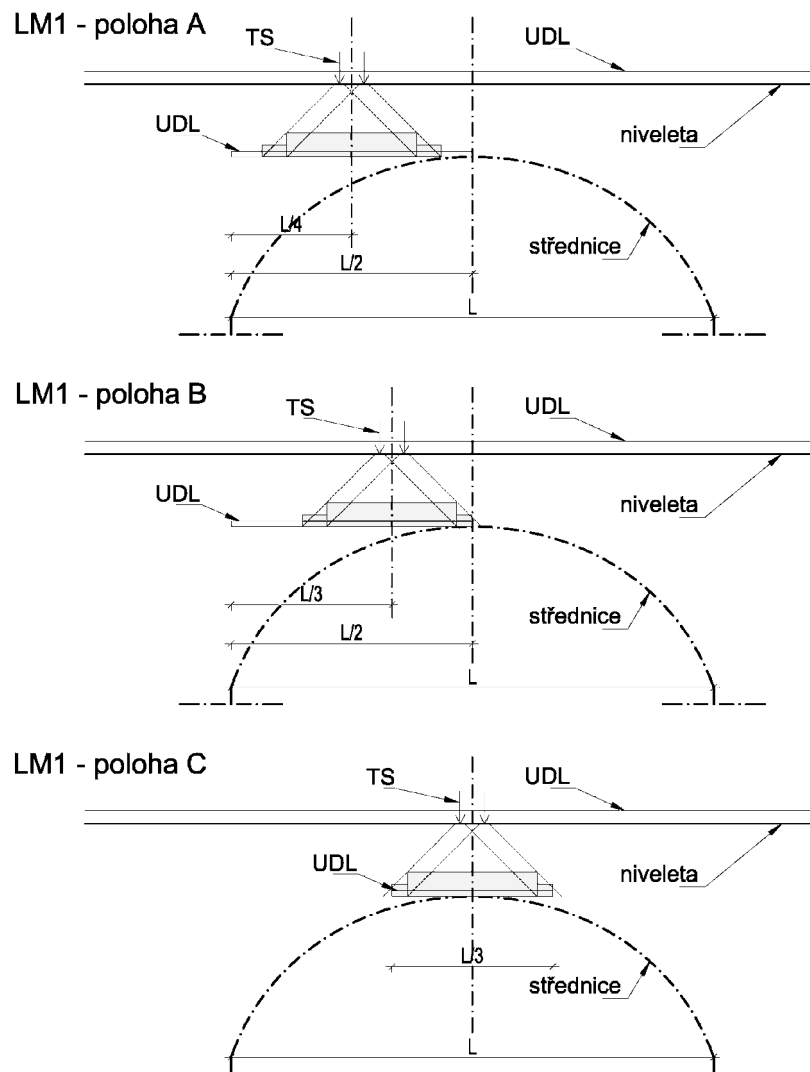
Součinitel zatížení pro stálé zatížení v MSÚ je uvažován hodnotou 1,35.

3.3.2 Přetížení od hutnění a dopravy

V každé základní fázi výstavby (než dojde k zasypání celé konstrukce) je možné uvažovat s nesymetrickým (jednostranným) přetížením od hutnění nadnásypu. Jedná se o tzv. „lehké“ hutnění, je definováno ve vstupním souboru velikostí, šířkou a vodorovnou vzdáleností počátku zatížení od střednice. Dále je doplněna fáze, kdy je konstrukce přesypána do výšky 0,5 nad horní líc jejího vrcholu a nadnásyp je přitěžován „těžkým“ hutněním, definovaným velikostí a šířkou. Toto zatížení je uvažováno ve dvou polohách: se středem v jedné čtvrtině a v polovině rozpětí mostu.

Zatížení od dopravy v provozním stádiu mostu je uvažováno dle Eurokódu – model zatížení LM1 (dvojnáprava – TS + spojitě rovnoměrné zatížení – UDL). Zatížení je nejprve v obou směrech (příčném i podélném) rozneseno do úrovně vrcholu klenby, roznos je proveden pod úhlem 45 stupňů. V příčném směru je uvažován nejvíce zatížený pruh konstrukce š. 1 m, který se nalézá mezi dvojicí kol modelu LM1. V podélném směru je v závislosti na výšce nivelety převáděné komunikace od vrcholu klenby vypočten zatežovací obrazec několika rovnoměrných zatížení pro dvojnápravu (TS) + jedno rovnoměrné zatížení spojitě (UDL). Zatížení od dvojnápravy má obvykle tvar trojice rovnoměrných zatížení (pro výšku nadnásypu ve vrcholu větší než podélnou vzdálenost náprav), kde prostřední má dvojnásobnou velikost (v této oblasti je rozneseno zatížení z obou náprav). Tato sestava je uvažována ve třech polohách s přihlédnutím k prvním vlastním tvarům obloukové konstrukce: A – se středem ve čtvrtině rozpětí, zatížení omezeno na polovinu mostu; B – se středem ve třetině rozpětí, zatížení opět omezeno na polovinu mostu a C – se středem v polovině rozpětí, zatížení omezeno na střední třetinu mostu (viz obrázek 11).

Přetížení od hutnění a dopravy je tedy vždy převedeno na soubor spojitých rovnoměrných zatížení obecné velikostí a polohy. Do statického modelu je potom zavedeno pomocí styčnickového zatížení dotčených uzlů konstrukce. Svisle zatížené jsou pouze uzly, které jsou v průmětu zatěžovacího obrazce (ve skutečnosti dochází v zemině k roznosu do více uzlů, takže tento předpoklad je na straně



Obrázek 11: Schéma zatížení od dopravy

bezpečné). Vodorovná složka zatížení je potom vypočtena jako přírůstek zemního tlaku na základě polohy každého uzlu vůči okrajům zatěžovacího obrazce, analogicky k metodě uvedené v (FINE, 2013).

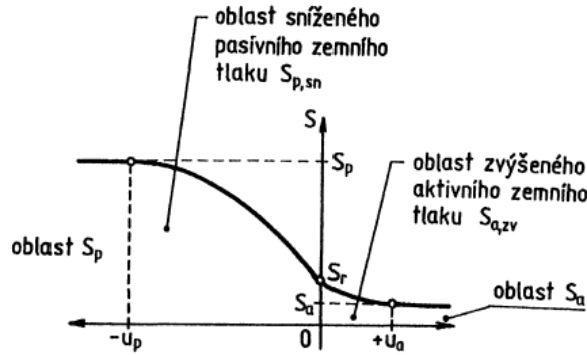
Součinitelé zatížení a kombinace jsou uvažovány dle normy ČSN EN 1990 (ČNI, 2006). Protože norma neuvádí pro staveništní zatížení (hutnění nadnásypu) součinitel ψ_1 , může se výjimečně stát, že vnitřní síly od kvazistálé kombinace dosáhnou větších hodnot než pro kombinaci častou.

3.4 Iterační algoritmus metody závislých tlaků

3.4.1 Výpočet zemních tlaků

Metoda závislých tlaků spočívá ve výpočtu zemního tlaku působícího na konstrukci na základě skutečné deformace konstrukce. Protože je však deformace konstrukce přímo závislá na velikosti vnějšího zatížení a chování zeminy je silně nelineární, je nutné pro nalezení výsledné rovnováhy provádět iterační výpočet.

V první řadě je třeba si stanovit algoritmus pro výpočet součinitele zemního tlaku na základě hloubky uzlu pod terénem a vodorovné deformaci uzlu. V programu BABAN jsem využil pro výpočet zemních tlaků normu ČSN 73 0037 (ČNI, 1990). Zemní tlak se pohybuje v závislosti na přetvoření konstrukce mezi hodnotou tlaku *pasivního* a tlaku *aktivního*, při nulové deformaci dosahuje hodnoty zemního tlaku *v klidu* (viz obrázek 12).



Obrázek 12: Schéma průběhu hodnoty zemního tlaku v závislosti na přemístění konstrukce (ČNI, 1990)

Algoritmus spočívá v tom, že nejprve jsou ze známých vzorců vypočteny velikosti součinitelů tlaku aktivního, pasivního a tlaku v klidu (rovnice 1 až 3).

$$K_a = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right), \quad (1)$$

$$K_p = \operatorname{tg}^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right), \quad (2)$$

$$K_0 = (1 - \sin \phi) OCR^{\sin \phi}, \quad (3)$$

Dále jsou z tabulek na straně 18 (ČNI, 1990) stanoveny na základě hloubky uzlu pod terénem *absolutní* hodnoty deformací, při kterých tyto zemní tlaky působí (v tabulce je navíc ještě doplněna hodnota deformace, při které dochází k aktivaci poloviny pasivního zemního tlaku). Tyto body jsou proloženy křivkou,

jejíž směrnice je v koncových bodech (Sp a Sa) nulová. Z této křivky je již potom možné snadno stanovit součinitel zemního tlaku pro jakoukoliv zadanou velikost deformace.

3.4.2 Vlastní algoritmus

Na začátku každé kombinace je plocha všech „zemních“ prutů simulujících interakci konstrukce a zemního tělesa nastavena na nulu. Je aplikováno veškeré svislé zatížení a případné boční přitížení uzlů od nahodilého zatížení, které je generované pro danou úroveň výšky terénu a zvolené zatížení. Po vypočtení deformace je pro každý uzel vypočten součinitel zemního tlaku, a z vodorovného průmětu polovin dvou sousedních uzlů je stanovena síla, kterou by při dané deformaci mělo zemní těleso na uzel působit. Pokud působí deformace uzlu proti zemnímu tělesu, je vypočtena odpovídající plocha „zemního“ prutu tak, aby síla vzniklá při jeho deformaci odpovídala vypočtené síle od zemního tělesa. Pokud ovšem působí deformace ve směru zemního tlaku, je zachována nulová plocha „zemního“ prutu a v daném uzlu je doplněna vodorovná síla potřebné velikosti. Na takto upravené a zatížené konstrukci je opět aplikováno veškeré vstupní zatížení a výpočet tak pokračuje stále dokola.

Iterace je zastavena buď po proběhnutí zadaného maximálního počtu kroků (parametr *nfc*), dále pokud je maximální nevyrovnaná deformace (rozdíl mezi deformacemi v n a v $n+1$ kroku) menší než vstupní parametr *dstop*, nebo v případě, že se iterace dostane do cyklu (rozdíl mezi některými dvěma hodnotami maximální nevyrovnané deformace je menší než 0,001 mm). Pro sledování úspěšnosti iterace je dále vypočtena maximální nevyrovnaná vodorovná síla. Tato síla je rozdílem mezi předepsanou zemní reakcí z hlediska působícího zemního tlaku v předposledním kroku iterace a mezi skutečnou reakcí v zemním prutu případně zatěžovací silou v posledním kroku, kdy dojde k zastavení výpočtu. Tyto dvě výsledné veličiny (nevyrovnaná síla a deformace) jsou pro všechny počítané kombinace zobrazeny a uloženy (viz grafy na obrázku 5) a slouží pro kontrolu iteračního cyklu.

Původně byl algoritmus založen jen na doplňování a upravování vodorovných sil (bez použití zemních prutů). Toto řešení bylo sice podstatně jednodušší, bohužel se ukázalo, že je pro výrazněji nesymetrické zatížení velmi často nestabilní (iterace probíhala cyklicky při velkých rozdílech deformací) a tudíž nepoužitelné.

Reference

- FINE (2013). Geo 5 – nápověda pro pásové přetížení.
<http://www.fine.cz/geotechnicky-software/napoveda/zemni-tlaky/pasove-pritizeni-01/>. Accessed: 2013-09-05.
- Foglar, M. and Křístek, V. (2012). Centre-line optimisation of buried arch bridges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*, 165(3):159–168.
- ČNI (1990). *ČSN 73 0037*. Zemní tlak na stavební konstrukce.
- ČNI (2006). *ČSN EN 1990*. Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí – Příloha A2: Použití pro mosty.