

EpMPF ver. 1.0

Uživatelská příručka

Obsah

1	Úvod	3
2	ZÁKLADNÍ TEORERICKÉ PRINCIPY	4
2.1	Metoda přenosových funkcí	4
2.2	Mobilizační křivky a jejich úpravy.....	6
2.2.1	Hyperbolická funkce	6
2.2.2	Kubická funkce.....	7
2.3	Členění aplikace	9
3	UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ APLIKACE	11
4	DEMONSTRAČNÍ PŘÍKLAD	21
5	Literatura	24

1 Úvod

EpMPF (Energopilota Metoda Přenosových Funkcí) je software pro návrh pilot vstrojených teplotním výměníkem tzv. energopilota. Software EpMPF je určen pro silově – deformační analýzu vrtaných velkopřůměrových pilot zatížených jak mechanicky, tak teplotě.

Obsahem této uživatelské příručky je popis základních teoretických principů, na jejichž základě je software vytvořen a dále manuál slouží jako návod pro uživatele tohoto softwaru.

Software využívá grafické rozhraní pro zadávání údajů o analýzu vrtaných velkopřůměrových pilot zatížených jak mechanicky, tak teplotě a poskytuje výsledky výpočtu v zobrazených grafech.

2 ZÁKLADNÍ TEORERICKÉ PRINCIPY

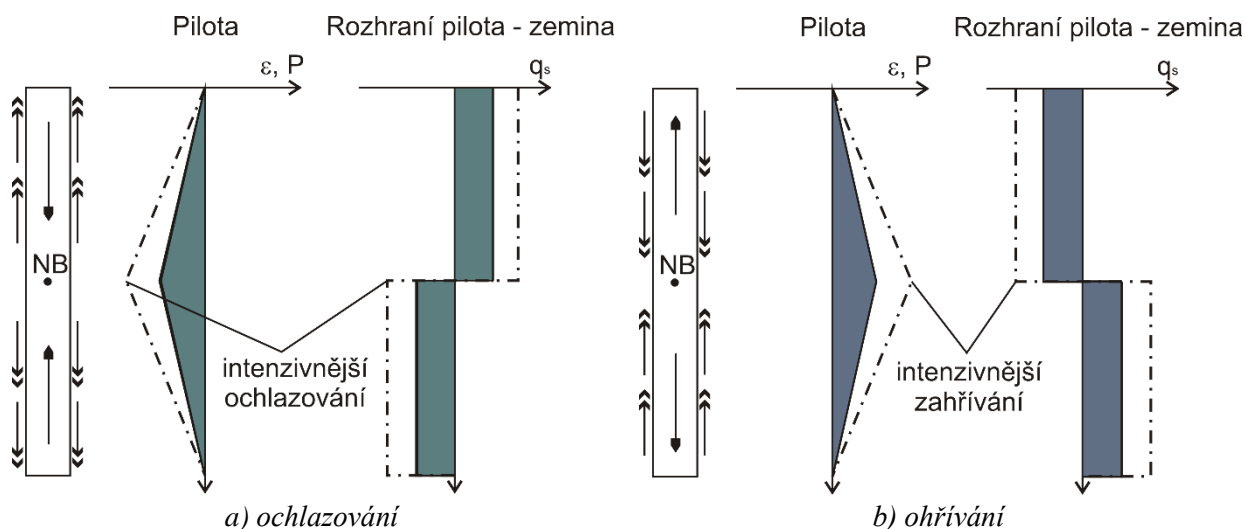
2.1 Metoda přenosových funkcí

Program EpMPF (dále pouze aplikace) vychází z metody přenosových funkcí (MPF), která je dále doplněna a upravena pro účely predikce teplotně zatížených prvků hlubinného zakládání. První formulace metody přenosových funkcí spadá do začátku druhé poloviny 20 století (*Seed, Reese, 1957*). Metoda byla nejdříve používána pro predikci mezních zatěžovacích křivek tahem namáhaných pilot (*např. Reddy et al., 1997* a další) a následně tlakem namáhaných pilot (*Zhang and Zhang, 201; a další*). Podstatou MPF je nahrazení horninového prostředí v okolí hlubinného základu sadou tzv. přenosových funkcí (mobilizačních křivek). Hlubinný základ je rozčleněn na předepsaný počet segmentů a každému segmentu je přiřazena mobilizační funkce pro plášť, která vyjadřuje závislost mezi svislým posunem segment s_s a mobilizovaným plášťovým třením q_s . Spodní hrané posledního segmentu (patě piloty) je pak přiřazena mobilizační funkce paty, která představuje závislost mezi svislým posunem paty s_b a mobilizovaným normálovým napětím na patě q_b . Samotný algoritmus MPF existuje v několika variantách. V případě aplikace EpMPF je zvolen přístup, kdy se postupuje od paty piloty směrem k hlavě. Patě piloty je předepsán malý (jednotkový posun) a algoritmus MPF postupně dohledává hodnotu svislého posunu ve středech jednotlivých segmentů, kdy je zohledněna osová tuhost piloty a délka segmentu. Postup má iterační charakter, jelikož změna hodnoty osového posunu s_s vyvolá změnu mobilizovaného plášťového tření q_s . Iterační cyklus se opakuje pro každý segment. Integrací získaných hodnot plášťových tření podél jednotlivých segmentů a napětí na patě je obdržena síla v hlavě piloty odpovídající zvolenému jednotkovému posunu v patě piloty. Získaná síla a posun v hlavě piloty (vrchní hrana prvního segmentu) tak tvoří bod mezní zatěžovací křivky (MZK). Celý postup je pak opakován pro násobek jednotkového posunu v patě piloty. Podrobný popis algoritmu MPF lze najít v *Chalmovský (2020)*.

Popsaný postup je vhodný pro mechanické (silové) zatížení. Pro teplotní a dále mechanicko-teplotní zatěžování musí být algoritmus MPF rozšířen. Byl zvolen postup dle *Laloui, Donna (2013)*. Postup předpokládá existenci nulového bodu NB , kterého poloha zůstává v průběhu kontrakce (chlazení) nebo expanze (ohřívání) zachována. Tento princip je znázorněn na Obr. 2-1.

Pro nulový bod pak musí platit podmínka rovnováhy sil (2-1), kde i je pořadové číslo segmentu energopiloty, $P_{tp,i}$ je síla v segmentu i v důsledku zatížení teplotou a $P_{h,tp}$ a $P_{p,tp}$ jsou síly (reakce) v hlavě a patě energopiloty. Síly $P_{tp,i}$ jsou ovlivněny třením na plášti, reakce v patě $P_{p,tp}$ normálovým napětím na patě a reakce v hlavě $P_{h,tp}$ tuhostí horní stavby.

$$\sum_{i=1}^{NB} P_{tp,i} + P_{h,tp} = \sum_{i=NB+1}^n P_{tp,i} + P_{p,tp} \quad (2-1)$$



Obr. 2-1 Průběhy osových sil, poměrného přetvoření a plášťového tření při ochlazování (a) a ohřívání energopiloty (upraveno dle Bourne-Webb et al., 2009)

Další postup má formu iteračního cyklu:

1. V nulté iteraci jsou přetvoření každého segmentu $\epsilon_{tp,i}^{it=0}$ stanoveny za předpokladu nulového plášťového tření a nulového napětí na patě dle vztahu (2-2), kde α je součinitel teplotní roztažnosti a Δt je změna teploty.

$$\epsilon_{tp,i}^{it=0} = \alpha \Delta t \quad (2-2)$$

2. Přetvoření je po délce piloty od nulového bodu integrována a jsou stanoveny posuny středu segmentů $s_{ss,i}^0$ a paty s_b^0 . Na základě mobilizačních křivek jsou stanoveny hodnoty plášťových tření ve středech segmentů $q_{s,i}^0$ a napětí na patě q_b^0 .
3. Jsou stanoveny napětí ve středech segmentů $\sigma_{tp,i}^0$, které odpovídají reakci na plášti ($q_{s,i}^0$) a na patě (q_b^0).

$$\sigma_{tp,i}^0 = \left(\pi r^2 q_b^0 + \pi h_i D \sum_{i=1}^n q_{s,i}^0 \right) \left(\frac{1}{A} \right) \quad (2-3)$$

4. Na základě napětí stanovených v předcházejícím kroku jsou dopočteny odpovídající přetvoření $\epsilon_{b,i}^0$:

$$\epsilon_{b,i}^0 = \frac{\sigma_{tp,i}^0}{E} \quad (2-4)$$

5. Přetvoření $\epsilon_{b,i}^0$ jsou „teoretická“ přetvoření vyvolané reakcí zemního prostředí na změnu délky piloty v důsledku teplotního zatížení. Výsledné teplotní přetvoření každého segmentu $\epsilon_{tp,i}^{it=1}$ v nové iteraci se stanoví odečtením $\epsilon_{b,i}^0$ od $\epsilon_{tp,i}^{it=0}$, které bylo stanoveno za předpokladu nulové reakce zemního prostředí.

$$\varepsilon_{tp,i}^{it=1} = \varepsilon_{tp,i}^{it=0} - \varepsilon_{b,i}^0 \quad (2-5)$$

Následně se opakují kroky 2 - 5 až do doby splnění konvergenčního kritéria.

V aplikaci jsou dodržovány následující konvence:

- Svislý posun směrem dolů má kladnou hodnotu. Stejná konvence je dodržována i pro plášťové tření.
- Tlaková síla má zápornou hodnotu, tahová má kladnou.
- Zvýšení teploty je kladné, snížení teploty záporné

2.2 Mobilizační křivky a jejich úpravy

Vstup do algoritmu MPF představují mobilizační křivky paty a pláště. Existuje velké množství formulací těchto křivek. Jejich základní přehled a kritickou analýz spolu s odkazy na relevantní zdroje lze nalézt ve zprávě *Chalmovský (2020)*. Jako výchozí byly v aplikaci MPF zvoleny dvě nelineární přenosové funkce dle *Bohn et al. (2016)*. Matematické formulace těchto mobilizačních křivek byly stanoveny na základě rozsáhlé zpětné analýzy zatěžovacích zkoušek ražených a vrtaných pilot. Jelikož v důsledku teplotního zatěžování dochází podél části pilot k odtížení, byla původní formulace mobilizačních křivek doplněna o lineární segment odtížení – opětovného přitížení. Oba typy přenosových funkcí jsou blíže popsány v následujícím textu.

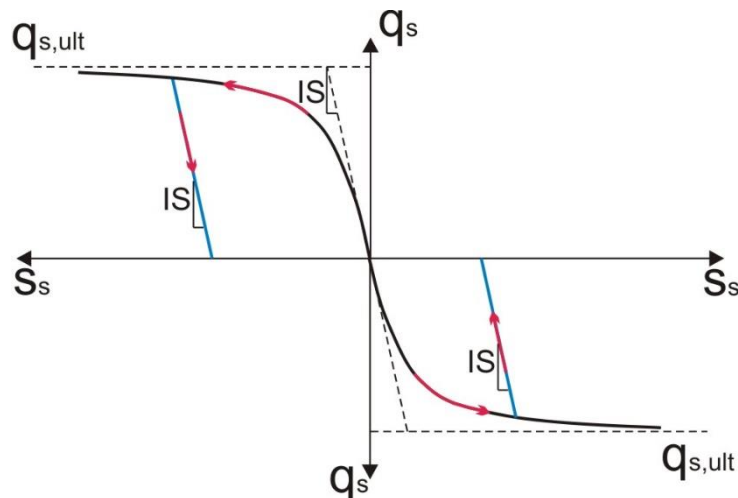
2.2.1 Hyperbolická funkce

Pro kladné svislé posunutí ($s_s > 0$) má přenosová funkce pro plášť tvar (2-6), kde $q_{s,ult}$ je mezní plášťové tření, s_s je aktuální hodnota svislého posunutí, $\max(s_s)$ je maximální dosažená hodnota svislého posunutí před odtížením. M_s je deformační parametr přenosové funkce řídící počáteční tuhost (IS_s) přenosové funkce pláště dle vztahu (2-7), kde D_p je průměr piloty. Pro lineární segment odtížení je uvažováno s počáteční tuhostí IS_s . Přenosová funkce paty piloty má pro kladný posun ($s_b > 0$) tvar (2-8), kde $q_{b,ult}$ je mezní napětí na patě, s_b je aktuální hodnota svislého posunutí paty, $\max(s_b)$ je maximální dosažená hodnota svislého posunutí paty před odtížením. M_b je deformační parametr řídící počáteční tuhost (IS_b) přenosové funkce paty dle vztahu (2-9), kde D_b je průměr paty piloty. Modifikované hyperbolické přenosové funkce jsou znázorněny na Obr. 2-2 (plášť) a Obr. 2-3 (pata).

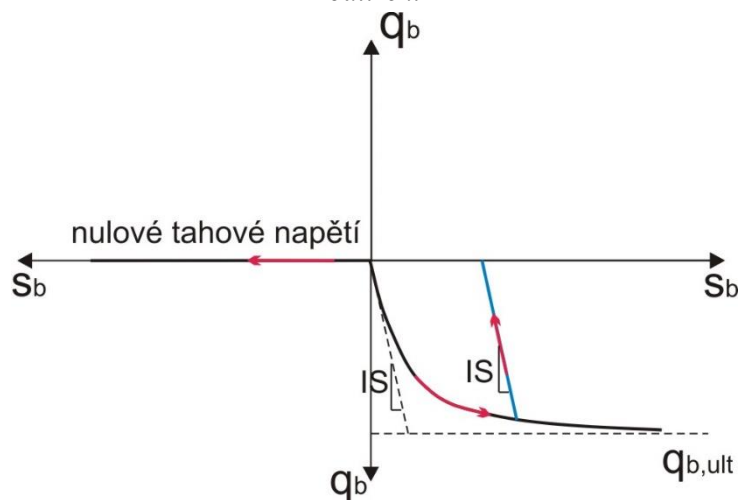
Každá přenosová funkce je tedy definována dvěma vstupními parametry: deformační (M_s – plášť/ M_b – pata) a pevnostní ($q_{s,ult}$ – plášť/ $q_{b,ult}$ – pata).

Primární (prvotní zatížení)	$q_s = -\frac{q_{s,ult}s_s}{M_s D_p + s_s}$	(2-6)
Odtížení	$q_s = -\frac{q_{s,ult} \max(s_s)}{M_s D_p + \max(s_s)} + IS (\max(s_s) - s_s)$	
	$IS_s = \frac{q_{s,ult}}{M_s D_p}$	(2-7)

Primární (prvotní zatížení)	$q_b = -\frac{q_{b,ult} s_b}{M_b D_b + s_b}$	(2-8)
Odtížení	$q_s = -\frac{q_{b,ult} \max(s_b)}{M_b D_b + \max(s_b)} + IS (\max(s_b) - s_b)$	
	$IS_b = \frac{q_{b,ult}}{M_b D_b}$	(2-9)



Obr. 2-2 Hyperbolická přenosové funkce pro plášť dle Bohn et al. (2016) doplněna o lineární větev odtížení



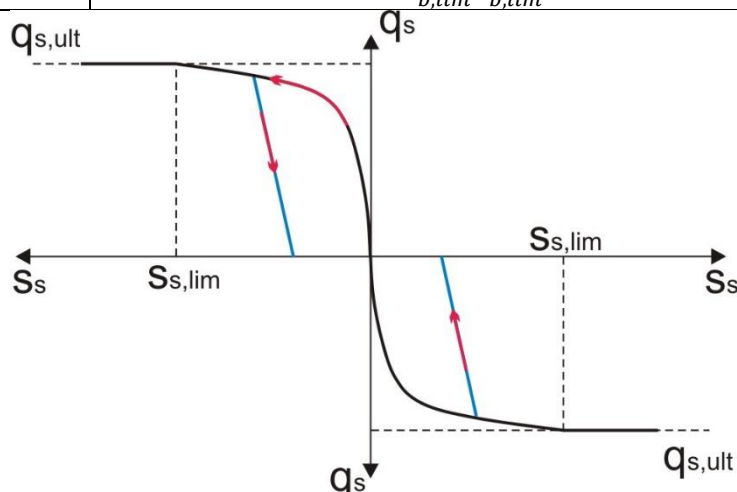
Obr. 2-3 Hyperbolická přenosové funkce pro patu dle Bohn et al. (2016) doplněna o lineární větev odtížení

2.2.2 Kubická funkce

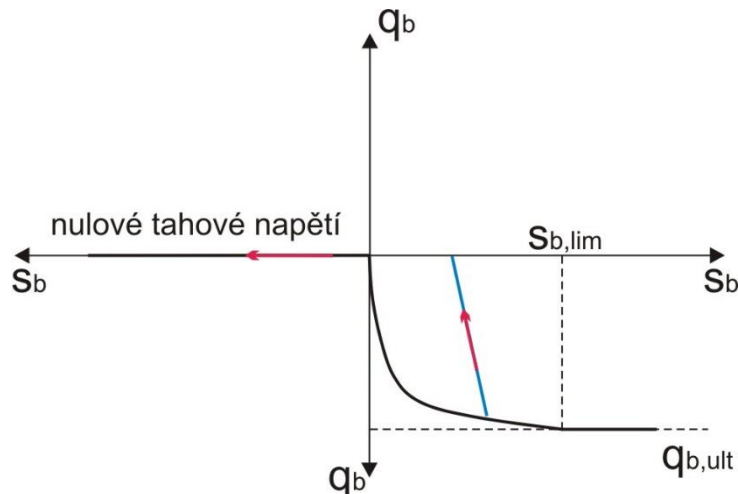
Pro kladné svislé posunutí ($s_s > 0$) má přenosová funkce pro plášť tvar (2-10), kde $s_{s,lim}$ je hodnota posunu, při kterém je mobilizováno mezní plášťové tření $q_{s,ult}$. Charakteristickým znakem (a určitou nevýhodou) tohoto typu přenosové funkce je, že její počáteční (tečnová) tuhost je nekonečná. Nelze tedy využít předcházející postup, kdy je tuhost při odtížení dána počáteční

tuhostí. V aplikaci EpMPF je proto tuhost při odtížení rovna tečnové tuhosti v primárním zatěžování při dosažení 25 % $s_{s,lim}$. Naopak, výhodou této funkce, je že deformační parametr přímo limitní posunutí $s_{s,lim}$. Přenosová funkce pro patu je formulována obdobně (2-11), kde $s_{b,lim}$ je hodnota posunu, při kterém je mobilizováno mezní napětí na patě $q_{b,ult}$. Schematicky je kubická přenosová funkce znázorněna na Obr. 2-4 (plášť) a Obr. 2-5 (pata).

Primární (prvotní zatížení)	$q_s(s_s) = -\min\left(\left(\frac{s_s}{s_{s,lim}}\right)^{\frac{1}{3}} q_{s,ult}; q_{s,ult}\right)$	(2-10)
Odtížení	$q_s(s_s) = -\min\left(\left(\frac{s_s}{s_{s,lim}}\right)^{\frac{1}{3}} q_{s,ult}; q_{s,ult}\right) + \frac{1}{3} \frac{1}{0.25 s_{s,lim}^{2/3}} \frac{1}{s_{s,lim}^{1/3}} q_{b,ult} (\max(s_s) - s_s)$	
Primární (prvotní zatížení)	$q_b(s_b) = -\min\left(\left(\frac{s_b}{s_{b,lim}}\right)^{\frac{1}{3}} q_{b,ult}; q_{b,ult}\right)$	(2-11)
Odtížení	$q_b(s_b) = -\min\left(\left(\frac{s_b}{s_{b,lim}}\right)^{\frac{1}{3}} q_{b,ult}; q_{b,ult}\right) + \frac{1}{3} \frac{1}{0.25 s_{b,lim}^{2/3}} \frac{1}{s_{b,lim}^{1/3}} q_{b,ult} (\max(s_b) - s_b)$	



Obr. 2-4 Kubická přenosové funkce pro plášť dle Bohn et al. (2016) doplněna o lineární větev odtížení



Obr. 2-5 Kubická přenosové funkce pro patu dle Bohn et al. (2016) doplněna o lineární větev odtížení

2.3 Členění aplikace

Software EpMPF 1.0 umožňuje analyzovat osově zatíženou velkopřůměrovou pilotu v těchto modulech:

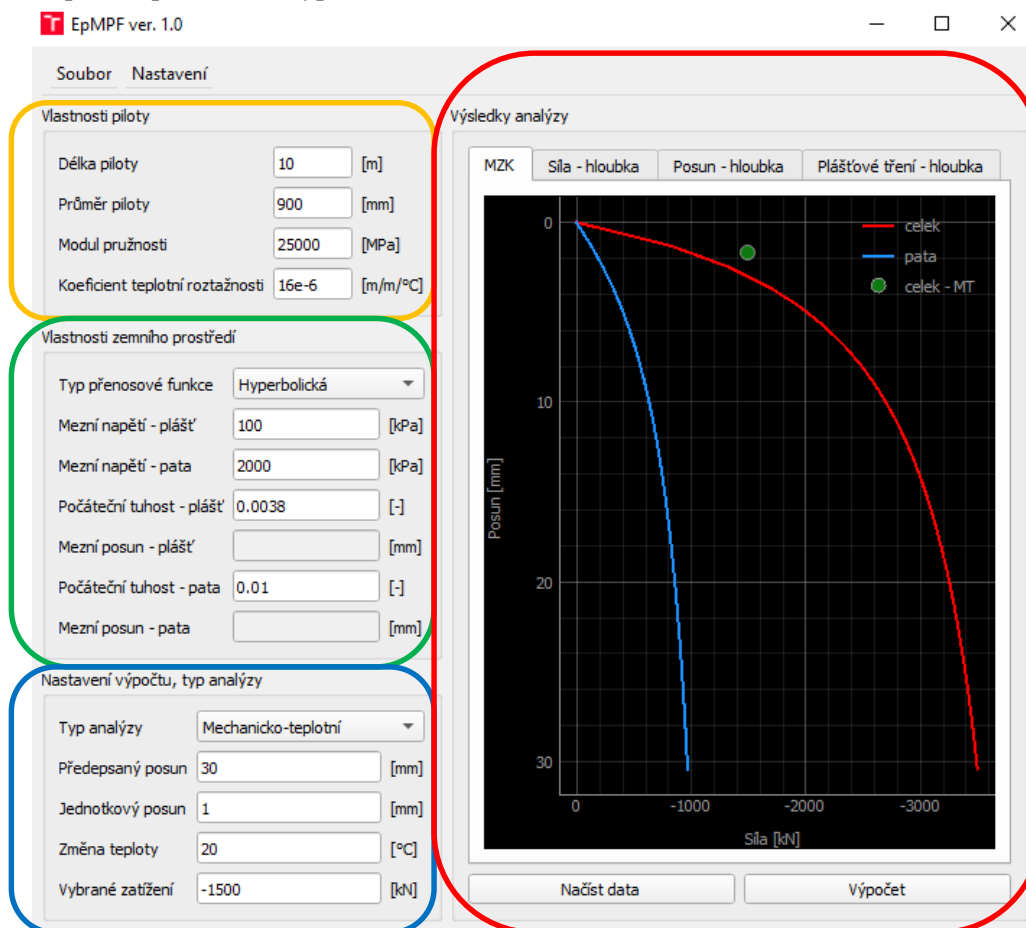
1. Modul Mechanické zatěžování (*MZ*) – pilota je zatěžována silově v hlavě piloty. Na základě metody přenosových funkcí je sestrojena mezní zatěžovací křivka (dále jen MZK) pro pilotu jako celek (pata + plášť) a samostatně pro patu.
2. Modul Teplotní zatěžování (*TZ*) – zde je pilota zatěžována pouze změnou teploty ΔT (zahřívání nebo ochlazování). Předpokládá se volná hlava piloty. Algoritmus dohledává formou iteračního cyklu pozici nulového bodu (dále jen *NB*), ve kterém jsou svislý posun piloty a tudíž mobilizované plášťové tření nulové. Finální poloha *NB* je determinována silovou podmínkou rovnováhy segmentů nacházejících se nad a pod *NB*. V startovacím kroku iteračního cyklu pro nalezení *NB* je průběh sil symetrický a pozice *NB* v polovině délky piloty, jelikož se zde nepředpokládá mobilizace napětí na patě. V dalších krocích je již stanovováno napětí na patě, což vede k postupnému posunu nulového bodu a tím k úpravě mobilizovaného plášťového tření, a tedy postupné redukci nevyrovnané síly (chyby výpočtu). Výstupem tohoto modulu je průběh osové síly, osového posunu a mobilizovaného plášťového tření podél piloty pro definovanou změny teploty ΔT .
3. Modul Mechanicko-teplotní zatěžování s předepsaným zatížením v hlavě piloty (*MTZ*) – zde je řešen stav, kdy je pilota zatížena kombinací mechanického zatížení (síly) v hlavě piloty a monotónní změnou teploty piloty. Při zvýšení teploty dochází v úseku nad *NB* v důsledku teplotní roztažnosti piloty k opačnému posunu než při mechanickém zatížení. Zemní prostředí na rozhraní pilota – zemina je tedy v režimu odtížení – poklesu plášťového tření. Naopak, při snížení teploty je v tomto režimu úsek piloty pod *NB*. Pro zahrnutí tohoto jevu byly původní nelineární přenosové funkce (Bohn et al., 2016) doplněny o lineární segment odtížení. Pro vybrané zatížení v hlavě piloty je výstupem tohoto modulu aktualizované posunutí v hlavě piloty vlivem dodatečného teplotního zatížení, průběh osové síly, svislého posunu a mobilizovaného plášťového tření podél piloty. Všechny výstupy jsou sestavovány ve dvou variantách: bez a s vlivem změny teploty z důvodu lepší analýzy odezvy analyzované konstrukce zatížené dodatečným teplotním zatížením.
4. Modul Mechanicko-Teplotní zatěžování s předepsaným posunem v hlavě piloty (*MTZ, NB = 0*) . Použití předcházejícího modulu je vhodné v případech, kdy je zatížení v hlavě piloty konstantní a

v důsledku teplotního zatížení není bráněno posunu v hlavě piloty. Příkladem takovéto situace je silově řízená statická zatěžovací zkouška, kdy hydraulický agregát kompenzuje změnu posunu v hlavě piloty a udržuje konstantní zatížení. V případě systémových pilot je však dodatečnému posunu v hlavě piloty bráněno horní stavbou. Aplikace byla proto doplněna o čtvrtý modul, ve kterém je pozice nulového bodu fixována v hlavě piloty. Pro vybrané mechanické zatížení je stanoven posun v hlavě piloty, při zatížení změnou teploty zůstává hodnota posunu v hlavě konstantní (*NB* v hlavě piloty) a mění se síla/reakce. Pro vybrané mechanické zatížení je výstupem tohoto modulu aktualizovaná síla/reakce v hlavě piloty vlivem dodatečného teplotního zatížení, průběh osové síly, svislého posunu a mobilizovaného plášťového tření podél piloty. Všechny výstupy jsou sestavovány ve dvou variantách: bez a s vlivem změny teploty z důvodu lepší analýzy odezvy analyzované konstrukce zatížené dodatečným teplotním zatížením.

Uvedený postup je algoritmizován pomocí programovacího jazyka Python.

3 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ APLIKACE

Pracovní prostředí aplikace (Obr. 3-1) je rozčleněno na 4 základní části: a) **Vlastnosti piloty**; b) **Vlastnosti zemního prostředí**; c) Nastavení výpočtu a typ analýza; d) **Výsledky**. Příkaz „Načíst data..“ aktualizuje hodnoty vstupních parametrů uvažované ve výpočtu. Samotný výpočet a následné zobrazení výsledku se spouští příkazem „Výpočet“.



Obr. 3-1 Software EpMPF 1.0 – pracovní prostředí aplikace

Vlastnosti piloty

Pilota je definována následujícími geometrickými a materiálovými parametry:

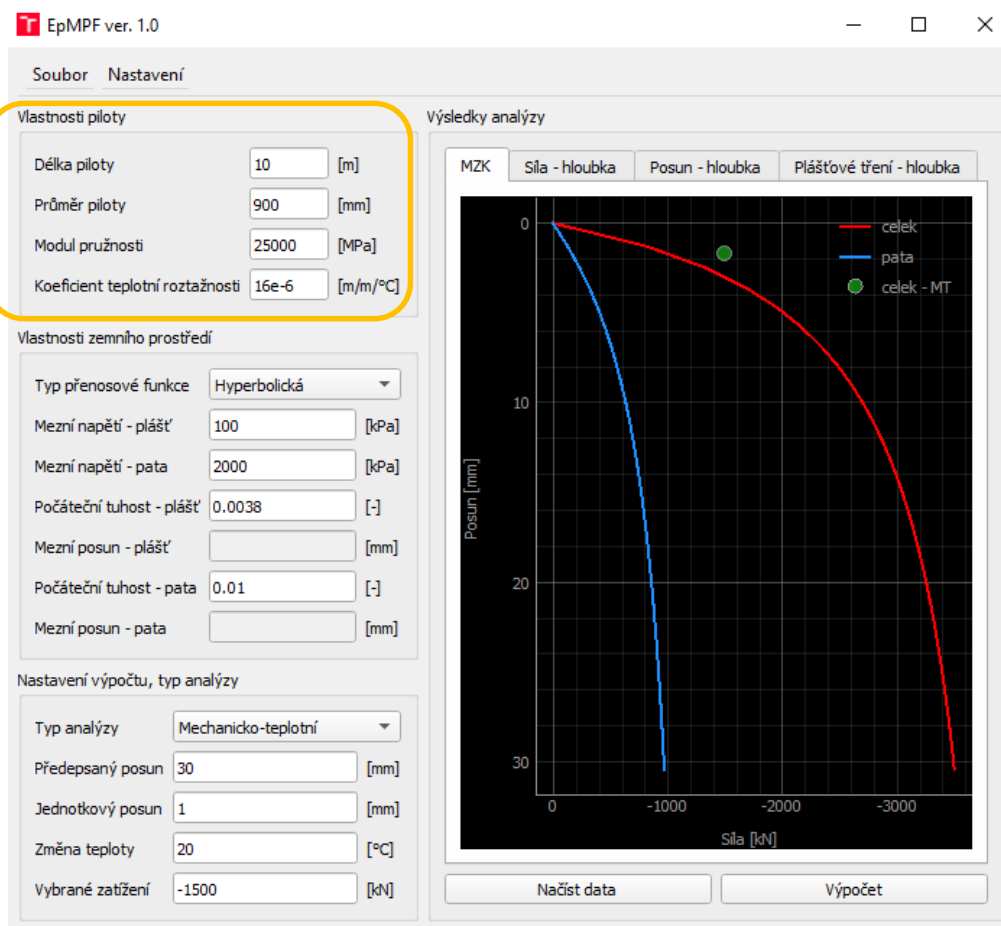
- Délka piloty L_p [m]
- Průměr piloty D_p [mm]
- Modul pružnosti betonu E_b [MPa]
- Koefficient teplotní délkové roztažnosti α [m/m/°C]

Délka piloty se volí dle návrhu projektu. Průměr piloty se řídí pravidly dle technologie vrtaných pilot a doporučené průměry jsou uvedeny v Tab. 3-1. Modul pružnosti se zadává dle třídy betonu.

Tabulkové hodnoty lze nalézt Třídě a mechanické vlastnosti betonu. Koeficient teplotní délkové roztažnosti pro beton je defaultně brán hodnotou $\alpha_1 = 1,0e-5$ [m/m/°C].

Tab. 3-1 Průměry vrtného nářadí a spojovatelných pažnic

Průměr vrtného nářadí	570	630	770	870	920	1070	1220	1350	1500	1700
Průměr spojovatelné pažnice	630	750	880	-	1080 (1020)	1180 (1220)	-	1500	-	1800



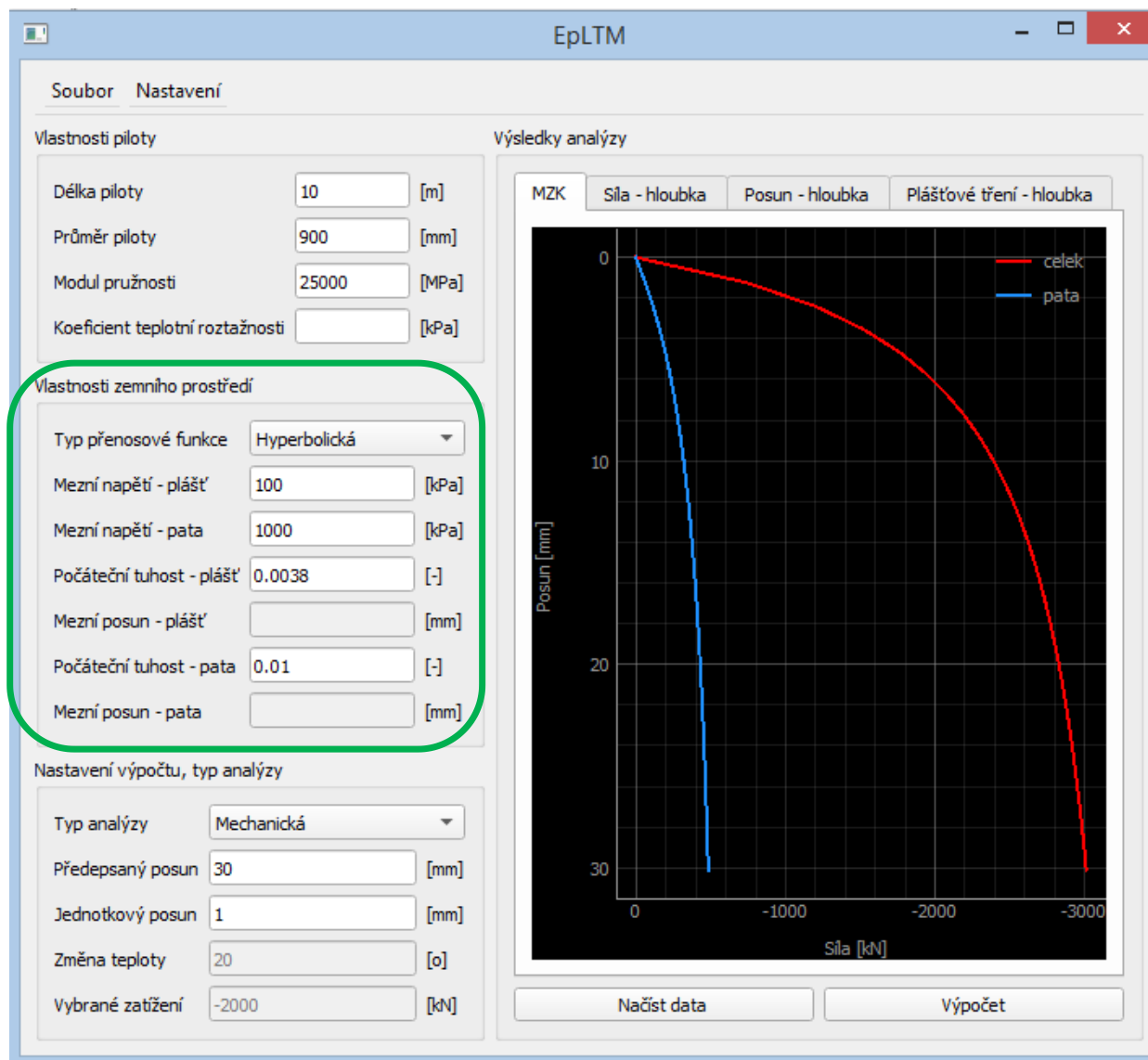
Obr. 3-2 Vlastnosti piloty

Vlastnosti zemního prostředí

Zemní prostředí je definováno těmito parametry (Obr. 3-3):

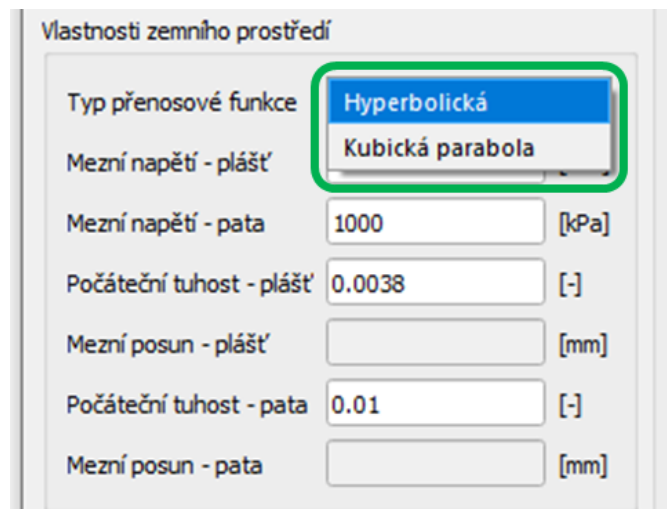
- Přenosová funkce
- Mezní plášťové tření $q_{s,ult}$ [kPa]
- Mezní napětí na patě $q_{b,ult}$ [kPa]
- Parametr počáteční tuhost – plášť M_s [-]

- Limitní posun – plášť $s_{s,lim}$ [mm]
- Parametr počáteční tuhosti – pata M_b [-]
- Limitní posun – pata $s_{b,lim}$ [mm]



Obr.-3-3 Zadávací oblast zemní prostředí

U typu přenosové funkce (Obr. 3-4) si uživatel volí buď hyperbolickou (kap. 2.2.1) nebo kubickou funkci (kap. 2.2.2). Parametry $q_{s,ult}$ a $q_{b,ult}$ se zadávají bez ohledu na zvolený typ přenosové funkce. Deformační parametry M_s (plášť) a M_b (pata) jsou relevantní pro hyperbolickou přenosovou funkci a parametry $s_{s,lim}$ (plášť) a $s_{b,lim}$ (pata) pro kubickou přenosovou funkci.



Obr. 3-4 Volba přenosové funkce

Mezní napětí na plášti „ $q_{s,ult}$ “ udává maximální hodnotu plášťového tření (viz Obr. 1a). Lze jej stanovit pomocí β metody, která vychází z toho, že odpor na plášti piloty je funkcí efektivního napětí po délce piloty.

$$q_{s,ult} = \beta \sigma'_{v,0} \quad (3-1)$$

kde

$\sigma'_{v,0}$... je průměrné efektivní vertikální napětí ve středu délky piloty

β ... je součinitel, který je dán rovnicí:

$$\beta = K_s \tan \delta, \quad (3-2)$$

kde

K_s ... součinitel zemního tlaku na pilotu (závisí na typu zeminy, stavu zeminy, technologii provádění piloty)

δ je třecí úhel na rozhraní pilota – zemina.

Pro normálně konsolidované zeminy dle Tomlinsona (1971) dochází k porušení v zemině povrchu piloty, a že tedy úhel δ odpovídá úhlu vnitřní zeminy při porušení zeminy. V případě normálně konsolidovaných zemin lze tento úhel brát tedy jako kritický φ_{cv} . Burland (1973) předpokládá, že součinitel zemního tlaku je za klidového stavu a proto pro normálně konsolidované zeminy odvodil vztah (3-3) pro součinitel β . Tento vztah lze použít i pro písky.

$\delta = \varphi_{cv}, K_s = K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi_{cv}$	(3-3)
$\beta = (1 - \sin \varphi_{cv}) \tan \varphi_{cv}$	

Pro překonolidované zeminy dle *Brown et al. (2010)* lze stanovit součinitel zemního tlaku na pilotu K_s z následujícího vztahu:

$$K_s = K_0^{oc} = (1 - \sin \varphi_{cv}) OCR^{\sin \varphi_{cv}} \quad (3-4)$$

Mezní napětí na patě „ $q_{b,ult}$ “ udává maximální hodnotu napětí zeminy pod patou piloty. Pro stanovení hodnoty „ $q_{b,ult}$ “ lze postupovat dle článku (*Wrana, 2015*), a to dle rovnice (3-5).

$$q_{b,ult} = N_q \sigma'_{v,0} + c'_b N_c, \quad (3-5)$$

kde

$\sigma'_{v,0}$... je efektivní vertikální napětí v patě piloty

N_q ... je součinitel únosnosti, který je odvislý od tvaru smykové plochy pod patou piloty. Např. dle NAVFAC DM 7.2 (*Wrana, 2015*) je tabelárně vyjádřen pro ražené a vrtané piloty v tabulce na Obr. 3-4.

Table 5. Friction angle ϕ' vs. N_q

ϕ' [°]	26	28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
N_q for driven piles	10	15	21	24	29	35	42	50	62	77	86	120	145
N_q for bored piles	5	8	10	12	14	17	21	25	30	38	43	60	72

Obr. 3-4 Stanovení N_q v závislosti na úhlu vnitřního tření zeminy provedení piloty (převzato z Wrana, 2015)

c'_b ... je efektivní soudržnost pod patou piloty

N_c ... je součinitel únosnosti, který se určí z rovnice (3-6) (*Wrana, 2015*).

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi', \quad (3-6)$$

Počáteční tuhost – plášť. V tomto editovacím okně se zadává deformační parametr M_s ovlivňující počáteční tuhost (směrnici) mobilizační křivky pro plášť u hyperbolické přenosové funkce. U kubické funkce není relevantní. Rozmezí parametru je v intervalu 0,001 až 0,004 (*Flemming, 1992*). Dle práce *Bohn et al. (2017)* lze tento parametr uvažovat pro jemnozrnné zeminy 0,0028; pro hrubozrnné zeminy 0,0032 a měkké skalní horniny 0,0026.

Mezní posun – plášť. V tomto editovacím okně se zadává hodnota limitního sedání pro plášť $s_{s,lim}$ u kubické přenosové funkce. U hyperbolické přenosové funkce není relevantní. Dle práce *Bohn et al. (2017)* lze tento parametr uvažovat pro jemnozrnné zeminy 0,019; pro hrubozrnné zeminy 0,0135 a měkké skalní horniny 0,0155.

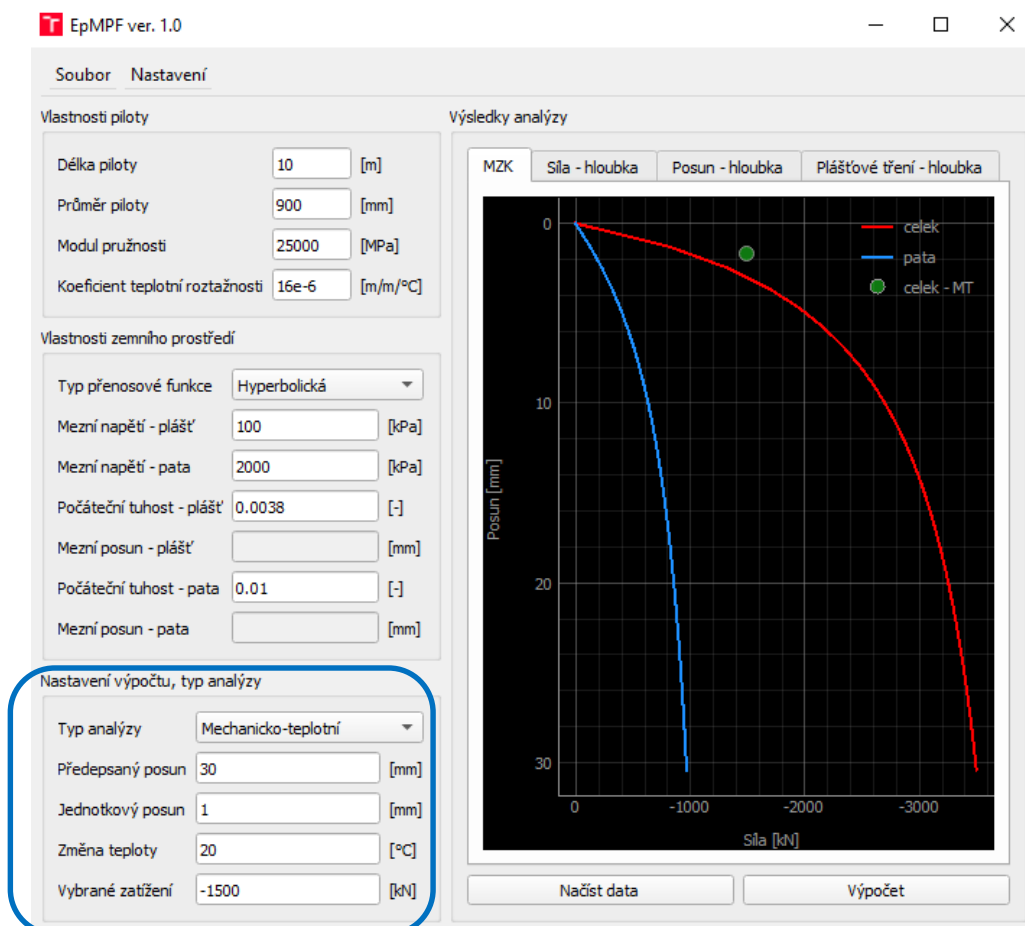
Počáteční tuhost – pata. „ M_b “. V tomto editovacím okně se zadává deformační parametr M_b ovlivňující počáteční tuhost (směrnici) mobilizační křivky pro patu u hyperbolické přenosové funkce. U kubické funkce není relevantní. Dle práce Bohn et al. (2017) lze tento parametr uvažovat pro jemnozrnné zeminy 0,0086; pro hrubozrnné zeminy 0,01 a měkké skalní horniny 0,0157.

Mezní posun – plášť. V tomto editovacím okně se zadává hodnota limitního sedání pro patu $s_{b,lim}$ u kubické přenosové funkce. U hyperbolické přenosové funkce není relevantní. Dle práce Bohn et al. (2017) lze tento parametr stanovit jako 10% z průměru piloty v patě ($s_{b,lim} = 0,1d_p$).

Nastavení výpočtu, typ analýzy

V této části programu jsou k dispozici následující položky (Obr. 3-5):

- Typ analýzy
- Předepsaný posun $s_{b,total}$ [mm]
- Jednotkový posun $s_{b,unit}$ [mm]
- Změna teploty ΔT [°C]
- Vybrané zatížení F_{sel} [kN]



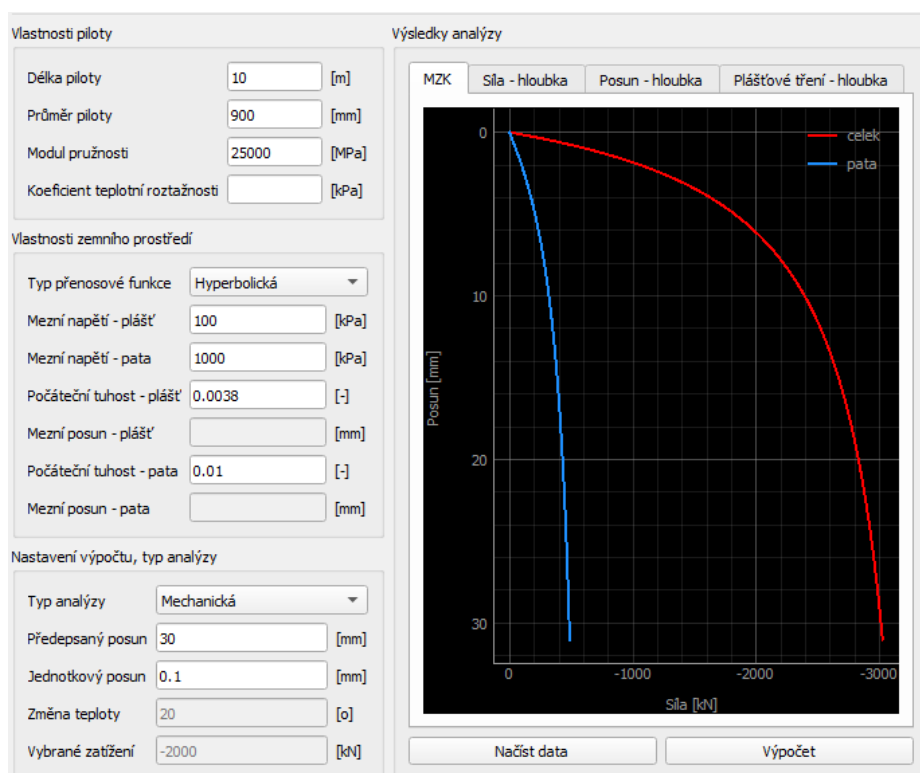
Obr. 3-5 Software EpMPF 1.0 – Nastavení výpočtu, typ analýzy

V proměnné *Typ analýzy* je možné vybrat jednu z variant popsanych v kap. 2.3. Předepsaný posun $s_{b,total}$ je maximální hodnota posunu v patě piloty, $s_{b,unit}$ je jednotkový posun, tedy rozdíl v předepsaném posunu paty piloty ve dvou po sobě jdoucích zatěžovacích krocích. Počet zatěžovacích kroků je pak definován jako $s_{b,total}/s_{b,unit}$. Při použití kubické přenosové funkce doporučujeme používat menší hodnotu jednotkového posunu $s_{b,unit}$ z důvodu vysoké tuhosti přenosové funkce při malých zatíženích. Pro hodnotu parametru *Vybrané zatížení* F_{sel} (záporná hodnota značí tlakovou sílu) je prováděna kombinovaná mechanicko-teplotní analýza v modulech č. 3 a 4 (viz. kap. 2.3).

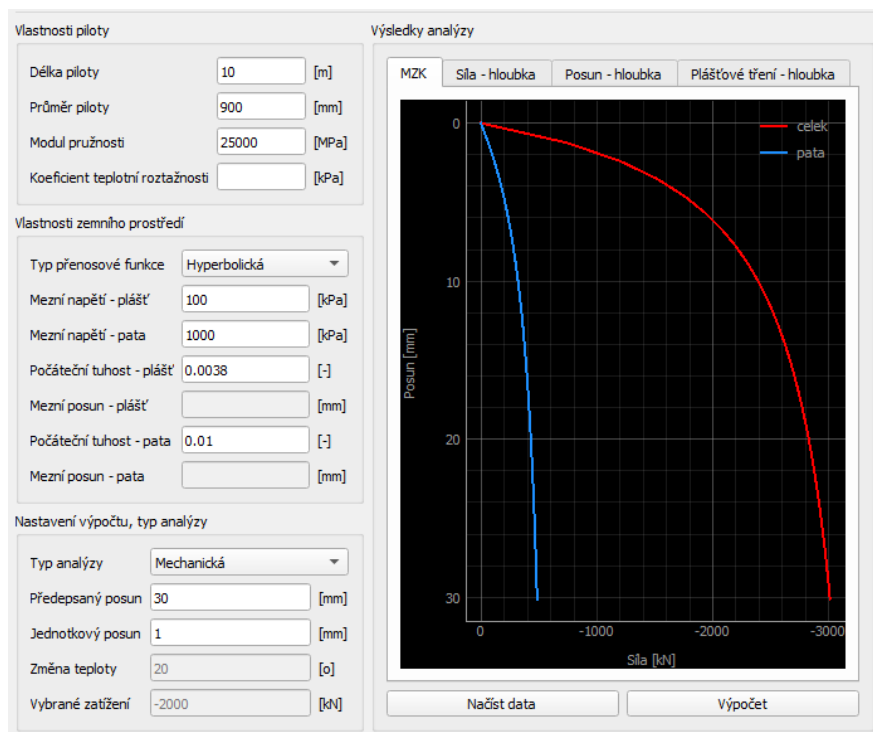
Typ analýzy. Uživatel v rozbalovacím okně si volí ze čtyř typů modulů popsanych v kap. „Základní teoretický popis“.

Předepsaný posun. V tomto editovacím okně uživatel definuje maximální posun, pro který bude vykreslena mezní zatěžovací křivka.

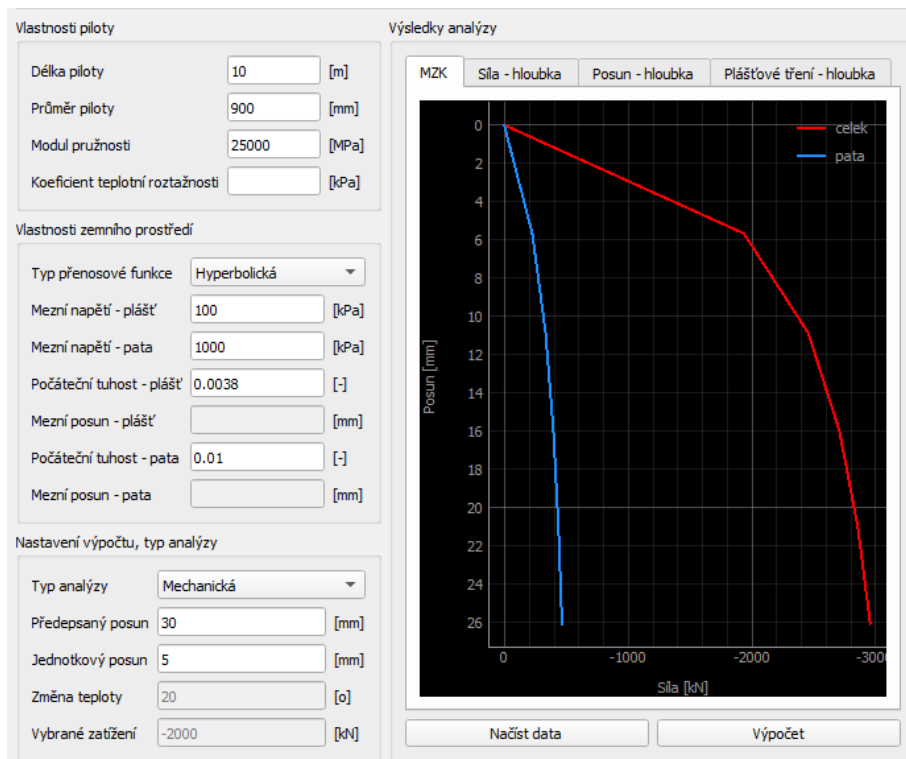
Předepsaný posun. V tomto editovacím okně uživatel zadává posunutí v patě posledního segmentu. Doporučená hodnota je 1,0 mm. Tento parametr řídí výsledný průběh mezní zatěžovací křivky (Obr. 3-6).



Jednotkový posun 0,1 mm



Jednotkový posun 1 mm



Jednotkový posun 5 mm

Obr. 3-6 Vliv velikosti jednotkového posunu na tvar MZK

Změna teploty. Zadává se změna teploty vliv ohřívání či ochlazování piloty. Toto zadávací okno je aktivní pouze pro typ analýzy *Mechanicko-Teplotní zatěžování (MTZ) a Mechanicko-Teplotní zatěžování, NB = 0 (MTZ, NB=0)*. Znaménková konvence pro teplotu – záporná hodnota změny teploty znamená ochlazování a kladná hodnota znamená zahřívání piloty.

Vybrané zatížení. V tomto editovacím okně uživatel zadává velikost svíslé síly, při které se určuje vliv teploty. Toto zadávací okno je aktivní pouze pro typ analýzy *Mechanicko-Teplotní zatěžování (MTZ) a Mechanicko-Teplotní zatěžování, NB = 0 (MTZ, NB=0)*. Znaménková konvence pro sílu – záporná hodnota síly znamená tlak a kladná hodnota znamená tah. Velikost síly se zadává do maximální hodnoty z mezní zatěžovací křivky pro *zvolený předepsaný posun*.

Výsledky analýzy

V této části programu jsou k dispozici následující položky (Obr. 3-7):

- MZK (Mezní zatěžovací křivka)
- Síla – hloubka
- Posun – hloubka
- Plášťové tření – hloubka

MZK je stanovována pro pilotu jako celek (pata + plášť) a samostatně pro patu. *MZK* je sestavena při volbě analýzy:

- *Mechanické zatěžování (MZ)*
- *Mechanicko-Teplotní zatěžování (MTZ)*
- *Mechanicko-Teplotní zatěžování, NB = 0 (MTZ, NB=0)*.

Síla – hloubka. Výstupem je závislost osově síly v pilotě na hloubce. Průběh je pro vybrané zatížení F_{sel} stanoven variantně pro pouze mechanické zatížení a pro kombinované mechanické a teplotní zatěžování. Tato závislost je k dispozici při volbě analýzy:

- *Mechanicko-Teplotní zatěžování (MTZ)*
- *Mechanicko-Teplotní zatěžování, NB = 0 (MTZ, NB=0)*.

Posun – hloubka. Výstupem je závislost svíslého posunu segmentů piloty na hloubce. Průběh je pro vybrané zatížení F_{sel} stanoven variantně pro pouze mechanické zatížení a pro kombinované mechanické a teplotní zatěžování. Tato závislost je k dispozici při volbě analýzy:

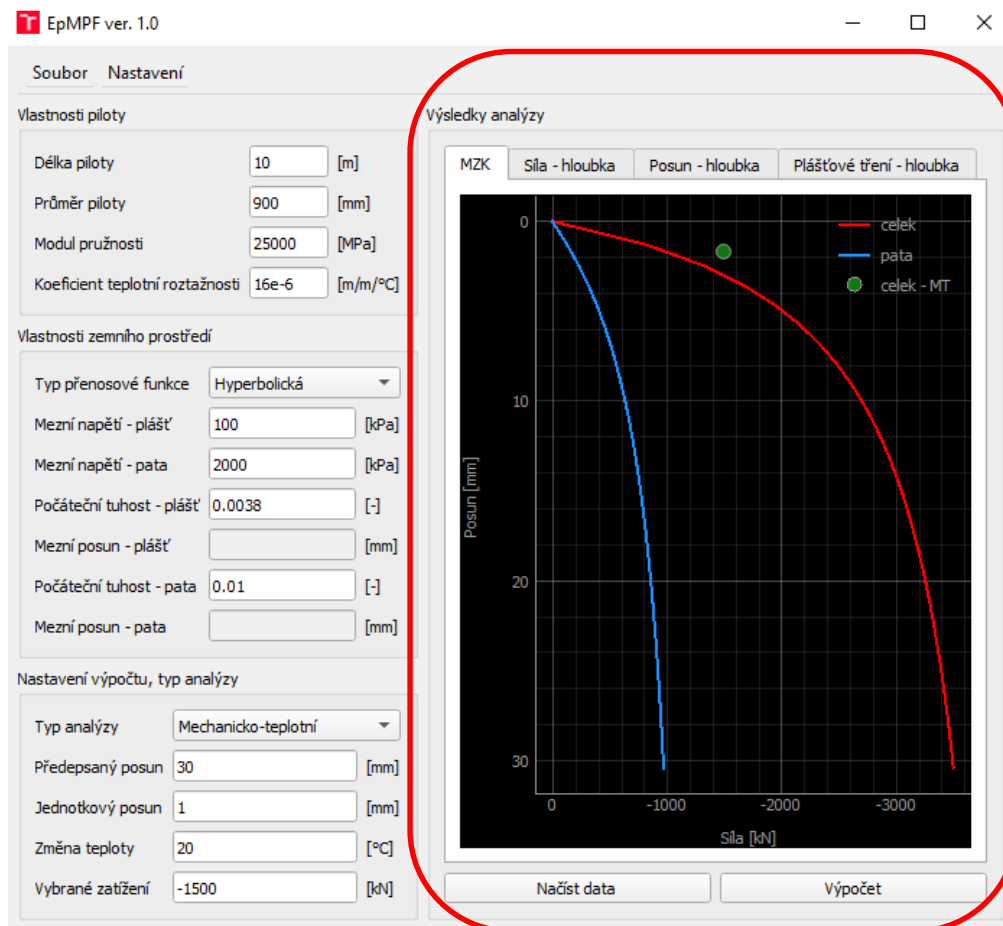
- *Mechanicko-Teplotní zatěžování (MTZ)*
- *Mechanicko-Teplotní zatěžování, NB = 0 (MTZ, NB=0)*.

Plášťové tření – hloubka. Výstupem je závislost mobilizovaného plášťového tření na hloubce. Průběh je pro vybrané zatížení F_{sel} stanoven variantně pro pouze mechanické zatížení a pro kombinované mechanické a teplotní zatěžování. Tato závislost je k dispozici při volbě analýzy:

- *Mechanicko-Teplotní zatěžování (MTZ)*

- *Mechanicko-Teplotní zatěžování, $NB = 0$ (MTZ, $NB=0$).*

Výstupy *Síla – hloubka*, *Posun – hloubka*, *Plášťové tření – hloubka* jsou k dispozici také v modulu *Teplotní zatěžování (TZ)*. Zde jsou průběhy vykresleny vždy pro první a konečnou iteraci cyklu pro nalezení polohy *NB*.



Obr. 3-7 Software EpMPF 1.0 – Výsledky analýzy

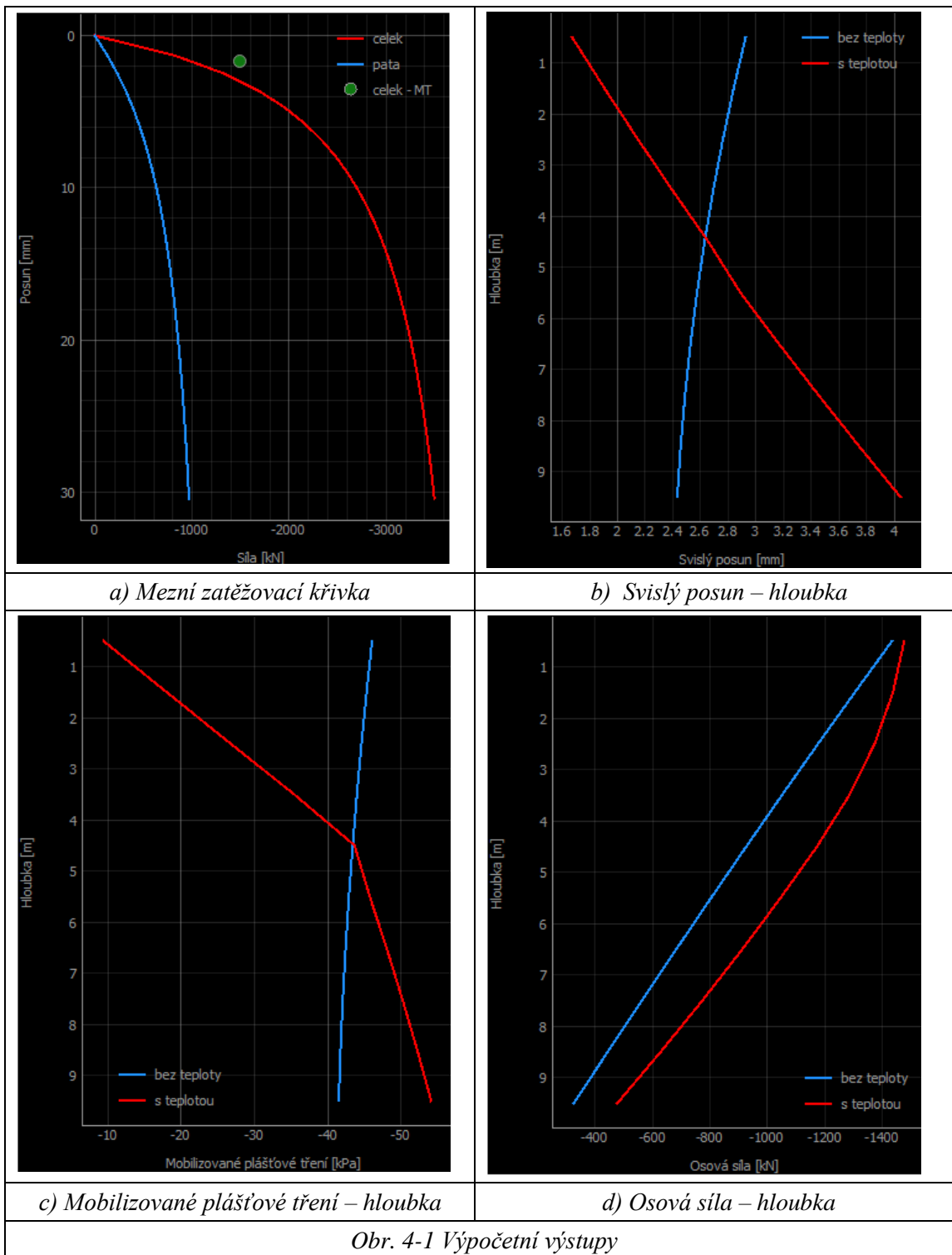
4 DEMONSTRAČNÍ PŘÍKLAD

Hodnoty vstupních parametrů demonstračního příkladu jsou uvedeny v Tab. 4-1.

Tab. 4-1 Hodnoty vstupních parametrů – demonstrační příklad

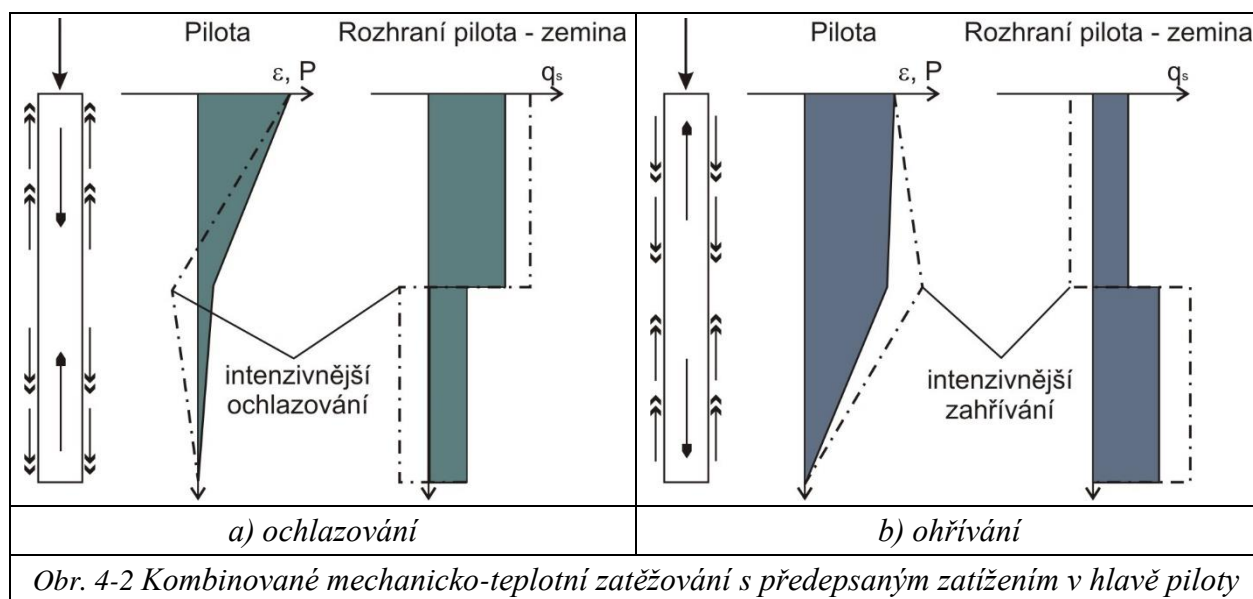
Pilota	Délka piloty	L_p	10	m
	Průměr piloty	d_p	0,9	m
	Modu pružnosti materiálu piloty	E_p	25	GPa
	Koeficient teplotní roztažnosti materiálu piloty	α_p	16e-6	m/m/°C
Zemní prostředí	Typ přenosové funkce	Hyperbolická (Bohn et al., 2016)		
	Mezní plášťové tření	$q_{s,ult}$	100	kPa
	Deformační parametr přenosové funkce – plášť	M_s	0,0038	-
	Mezní napětí na patě	$q_{b,ult}$	2000	kPa
	Deformační parametr přenosové funkce – pata	M_b	0,01	-
Nastavení výpočtu, typ analýzy	Typ analýzy	Mechanicko-teplotní zatěžování s předepsaným zatížením v hlavě piloty (modul 3)		
	Celkový předepsaný posun (pata)	$s_{b,total}$	30	mm
	Jednotkový předepsaný posun (pata)	$s_{b,unit}$	1	mm
	Změna teploty	ΔT	20	°C
	Vybrané zatížení	F_{sel}	-1500	kN

Analýza je tedy provedena s předepsaným zatížením v hlavě piloty – modul č. 3, je uvažováno se zvýšením teploty o 20°C. Odezva piloty je podrobně analyzována pro zatížení $F_{sel} = -1500 \text{ kN}$. Výstupy výpočtu jsou znázorněny v grafech na Obr. 4-1.



Prvním výstupem je standardní mezní zatěžovací křivka při mechanickém zatěžování pro pilotu jako celek (pata + plášť) a samostatně pro patu. Zelený bod v MZK (Obr. 4-1a) je vybraný bod MZK (síla $F_{sel} = -1500kN$) korigovaný o teplotní namáhání. V grafech na Obr. 4-1b Obr. 4-1d

jsou modrou a červenou barvou vyznačeny průběhy jednotlivých veličin bez teplotního, resp. s teplotním namáháním. Vlivem zvýšení teploty (roztažnosti piloty) dochází nad *NB* k negativním svislým posunutím (směrem vzhůru), které snižují hodnotu svislého posunu od mechanického zatížení, pod *NB* je situace opačná. Snížením celkového posunu nad *NB* se tato část piloty dostává do režimu odtížení, ve kterém má přenosová funkce vysokou tuhost a dochází tedy k rychlému poklesu plášťového tření. Naopak, pod *NB* způsobí dodatečný teplotní posun směrem dolů další mobilizaci plášťového tření. Přírůstek plášťového tření je ale výrazně nižší, protože v oblasti pod *NB* se pilota pořád nachází v režimu primárního zatěžování a tuhost nelineární přenosové funkce klesá s rostoucím posunutím. Dodatečná mobilizace plášťového tření pod *NB* může představovat potenciální riziko, protože roste stupeň využití pláště piloty. Změna průběhu plášťového tření se projeví v průběhu osových sil: nad *NB* je pokles osově síly pozvolnější (nižší plášťové tření), naopak pod *NB* je pokles osově síly rychlejší (vyšší plášťové tření). V hlavě piloty je ve variante dosaženo stejné zatížení, jelikož pro výpočet byl využit modul č. 3 s konstantním zatížením v hlavě piloty. Podobné chování zaznamenal např. *Boure-Webb et al. (2009)* během instrumentovaných statických zatěžovacích zkoušek energopilot v Londýně. Schematicky je to chování znázorněno také na Obr. 4-2.



5 Literatura

- Bohn, C., Lopes dos Santos, A. a Frank, R. (2017) Development of axial pile load transfer curves based on instrumented load tests. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE*.
- Bourne-Webb, P.J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., and Payne, P. (2009). Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. *Géotechnique*, Sv. 59, 3.
- Brown, D.A, J.P., Turner a Raymond, J.C. (2010). Drilled shafts: construction procedures and LRFD design methods . místo neznámé : U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2010.
- Burland, J. (1973). Shaft friction of piles in clay - a simple fundamental approach . *Ground Engineering* . Vol. 6(3). 30-42.
- Fellenius, B.H., (2008). Effective stress analysis and set-up for shaft capacity of piles in clay. Honoring John Schmertmann "From research to practice in geotechnical Engineering", The Geoinstitute of the American Society of Civil Engineers, Edited by J.E. Lair, D.K., Crapps, and M.H. Hussein. ASCE Geotechnical Special Publication, GSP 180, pp. 384 - 406.
- Fleming, W.G.K. (1992): A new method for single pile settlement prediction and analysis. *Géotechnique* . 1992, Sv. 42, 3.
- Chalmovský, J., (2021): Využití metody přenosových funkcí pro predikci chování hlubinných základů v ČR, Souhrnná výzkumná zpráva, TJ02000140, TAČR Zéta.
- ARLSRUD K., Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test result, PhD Thesis, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- Laloui, L. a Di Donna, A. Energy geostructures - Innovation in underground engineering. ISTE Ltd, John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- Reddy, E.S.B., O'Reilly, M. a Chapman, D. (1997): A software to predict the behavior of tension piles. *Computers & Structures*. Vol. 62(4), 653-658.
- Seed, H. a Reese, L. (1957): The Action of Clay along Friction Piles . *Journal of Geotechnical Engineering*., Vol. 122 (1), 731-754.
- Tomlinson, M. J. (1971): Some effects of pile driving on skin friction. *Behaviour of piles*. Instn. Civ. Engers., London, 107-11
- Wrana, B. (2015): Pile load capacity – calculation methods, *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 37, No. 4,
- Zhang, Q.Q. a Zhang, Z.M. (2012): A simplified nonlinear approach for single pile settlement analysis. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 49 (11), 1256-1266.