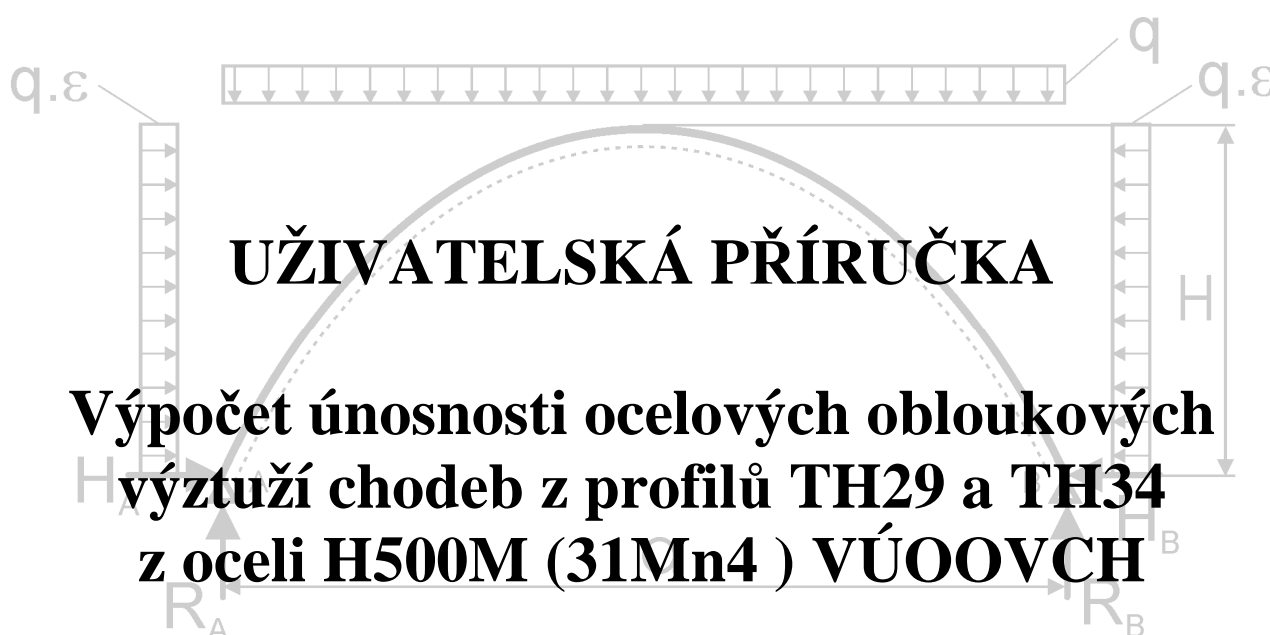


**Vysoká škola báňská – Technická univerzita
Ostrava**

Fakulta stavební

Katedra stavební mechaniky



Zpracováno v rámci řešení projektu TA01010838:

**Výzkum a vývoj technologie výroby důlních ocelových
výztuží vyráběných řízeným válcováním**

Zpracoval: Doc. Ing. Petr Janas, CSc.

Ostrava, prosinec 2013

Obsah

1. Úvod	3
2. Statické řešení ocelové obloukové výztuže dle teorie 1. řádu	4
2.1 Geometrická analýza konstrukce	4
2.2 Statické řešení ocelové obloukové výztuže	7
2.3 Výpočet složek vnitřních sil, únosnosti a přetvoření konstrukce	9
2.4 Mezní hodnoty momentů a normálových sil	13
3. Program Výpočet únosnosti ocelových obloukových výztuží	15
3.1 Zadávání vstupních dat	16
3.2 Výsledky výpočtu	17
3.3 Některé příklady využití programu pro výpočet únosnosti výztuže	24
3.4 Využití archivovaných dat	28
4. Závěr	30
Literatura	31

1. Úvod

Předkládaná příručka je určena pro uživatele programu *Výpočet únosnosti ocelových obloukových výztuží chodeb z profilu TH29 a TH34 z oceli H500M (31Mn4) – VÚOOVCH TH29/H500M a TH34/H500M*.

Program je určen pro výpočet únosnosti nepoddajné a poddajné otevřené ocelové výztuže z profilů TH29 a TH34 a z nově vyvinuté oceli H500M (alternativně 31Mn4) dle teorie 1. řádu za předpokladu, že výztuž je dvojklobově uložena a je zatížena aktivním spojitým zatížením působícím shora a z boků důlního či podzemního díla. Únosnost výztuže lze určit v souladu s ČSN EN 1993-1-1 (Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí), alternativně pro vyšší hodnoty mezních momentů odpovídajících uvedeným profilům a zvolené oceli. Poměr bočního a svislého zatížení lze měnit. Výztuž může být tvořena 3 až 9 díly o různých délkách a o různém poloměru zakřivení. Odpor proti prokluzu spojovaných dílů je uvažován od 100 do 350 kN s krokem 50 kN. Program umožňuje výpočet únosnosti výztuží uvedených profilů jako funkce poměru bočního a svislého zatížení od 0 do 2 s krokem 0,05.

Výztuž může být kromě toho (pro simulování zatížení od závěsné drážky) zatížena kombinovaně jednou silou působící ve zvoleném místě v rovině výztuže a aktivním spojitým zatížením působícím shora a z boků důlního či podzemního díla. Při kombinovaném zatížení se určuje únosnost vždy jen pro zadaný poměr bočního a svislého zatížení.

Uživatelská příručka je rozdělena na dvě části. V první části jsou uvedeny teoretické analýzy, ze kterých vyplývalo vlastní zpracování programu. Pro možnost uživatelského komfortu byla značná pozornost věnována geometrické analýze konstrukcí ocelových obloukových výztuží. Snahou bylo přitom zajistit velmi jednoduché zadávání různých tvarů otevřených obloukových výztuží, které se v zásadě liší počtem, délkou a poloměrem zakřivení jednotlivých dílů. Vlastní statické řešení vychází z klasické silové metody, ve které jsou potřebné integrace řešeny numericky. Složky výslednice vnitřních sil, vypočtené pro zadané zatížení, umožňují určit místa limitující únosnost výztuže při dosažení mezních hodnot normálových sil a plastických ohybových momentů, které byly určeny pro profily TH29 a TH34 z oceli H500M (31Mn4). Vycházelo se přitom z průřezových charakteristik těchto profilů a dále z poznatků o mechanických vlastnostech aplikované oceli, z realizovaných a dostupných poznatků o ohybových zkouškách a v neposlední řadě z modelování profilu TH29 z nově vyvíjené oceli. Uvedené profily byly zařazeny do 1. třídy profilů, což umožňuje realizovat výpočet únosnosti s uvažováním plastických vlastností uvažovaných ocelí.

Při výpočtu únosnosti ocelové obloukové výztuže se postupovalo jednak dle výše uvedené normy pro navrhování ocelových konstrukcí pozemních staveb, jednak pro jiné určení mezních ohybových momentů než z této normy vyplývají. Přísné dodržování normy totiž vede, jak ukazují naše dlouhodobé zkušenosti zejména v důlních podmínkách k nevhodným návrhům. Vyvinutý program proto umožňuje oba postupy. Aplikované profily byly zařazeny do 1. třídy profilů. Pro jejich zatřídění se nepostupovalo přitom dle výpočtů uvedených v citované normě, neboť postupy v ní uvedené těmito členitým profilům korektně neodpovídají. Zatřídění se proto opírá o ohybové zkoušky [8] a o modelové výpočty [7].

Ocelová otevřená oblouková výztuž se chová poddajně i nepoddajně. Toto různé chování výztuže je dáno nejenom její geometrií, hmotnostním stupněm (profilem),

kvalitou oceli, řešením a kvalitou spojovacích prvků a jejich dotažením, ale také způsobem zatížení výztuže. V předloženém řešení se předpokládá znalost odporu proti prokluzu spojovaných dílů výztuží, která by se měla opírat o prokluzové zkoušky na rovných případně i na oblých tyčích.

Druhá část příručky je vlastním návodem práce se SW zpracovaným v prostředí Microsoft Excel pomocí programovacího jazyka Visual Basic. Pozornost je věnována zadávání vstupních dat, získávání a využívání výsledků řešení i ukázkám některých příkladů řešení. V závěru druhé části je vysvětleno využívání archivovaných vstupních dat.

2. Statické řešení ocelové obloukové výztuže dle teorie 1. řádu

Ocelová oblouková výztuž se vyrábí z různých hmotnostních profilů. Je zpravidla tvořena třemi a více kruhovými nebo i rovnými díly, které se vzájemně spojují šroubovými nebo třmenovými spoji. Konstrukce běžně dodávaných ocelových obloukových výztuží jsou v prospektech dodávaných výrobců. Často se však pro konkrétní situace volí konstrukce atypické. Pro všechny je většinou nutno určit únosnost výztuže a to často operativně pro různá zatížení. Každý kruhový díl je určen svou délkou, poloměrem zakřivení a profilem průřezu, který je pro všechny díly obloukové výztuže zpravidla stejný. V některých případech má díl výztuže dva poloměry zakřivení. Často je dokonce část dílu výztuže rovná. Rovný díl je určen svou délkou, jeho poloměr zakřivení je teoreticky nekonečně velký, prakticky pak tak velký, aby chyba z jeho zakřivení byla ve výpočtu zcela nepodstatná.

Výpočet předpokládá spojitě, v této kapitole rovnoměrné svislé a vodorovné zatížení a dvojklobové uložení ocelového oblouku. Poměr vodorovného a svislého zatížení ε může být v závislosti na podmínkách velmi různý. Lze jej proto volit parametricky v rozmezí od $\varepsilon = 0$ do $\varepsilon = \infty$, přičemž $\varepsilon = 0$ odpovídá situaci, kdy výztuž je zatížena pouze svislým spojitým zatížením, $\varepsilon = \infty$ pak odpovídá situaci, kdy výztuž je zatížena pouze z obou boků horizontálním spojitým zatížením.

Výpočet umožňuje současně volit zatížení ocelové obloukovou výztuže svislou silou působící v zadaném místě v rovině oblouku učeném vzdáleností od levé podpory (tj. hodnotou souřadnice x) – viz obr.4.

Výpočet má několik částí a to

- zpracování geometrie ocelové obloukové výztuže,
- numerické řešení staticky neurčité konstrukce silovou metodou pro zadaná zatížení,
- výpočet složek vnitřních sil, únosnosti výztuže a složek přetvoření.

2.1 Geometrická analýza konstrukce

Kvalitní geometrická analýza tvoří základ celého řešení a uživatelského komfortu. Kruhový díl j nechť má délku l_j , poloměr r_j a je překryt s následujícím dílem $j+1$ v délce d_j . Pro popis geometrie konstrukce oblouku je potřebné zvolit vhodný souřadný systém. Předpokládáme-li, že kloubové podpory obloukové výztuže **A** a **B** jsou ve stejné výši, pak je vhodné zvolit počátek kartézského souřadného systému do levé podpory **A** tak, aby osa x procházela oběma kloubovými podporami a osa y byla svislá. Je-li konstrukce definována počtem kruhových dílů, délkou a poloměrem

zakřivení každého z nich a délkou překrytí sousedních dílů, pak spojnice bodů **A B** není definována přímo, lze ji však ze zadaných hodnot jednoznačně určit. Zvolíme-li např. nejdříve souřadný systém x', y' tak, že jeho počátek bude ležet v bodě **A**, tj. v levé podpoře výztuže a směr osy x' bude rovnoběžný s osou 1. oblouku x'' (viz obr. 1), má střed S_1 kružnice prvního kruhového dílu souřadnice

$$x_1' = r_1 \cdot \cos \frac{\varphi_1}{2} = r_1 \cdot \cos \Phi_1 \quad (2.1)$$

$$y_1' = r_1 \cdot \sin \frac{\varphi_1}{2} = r_1 \cdot \sin \Phi_1 \quad (2.2)$$

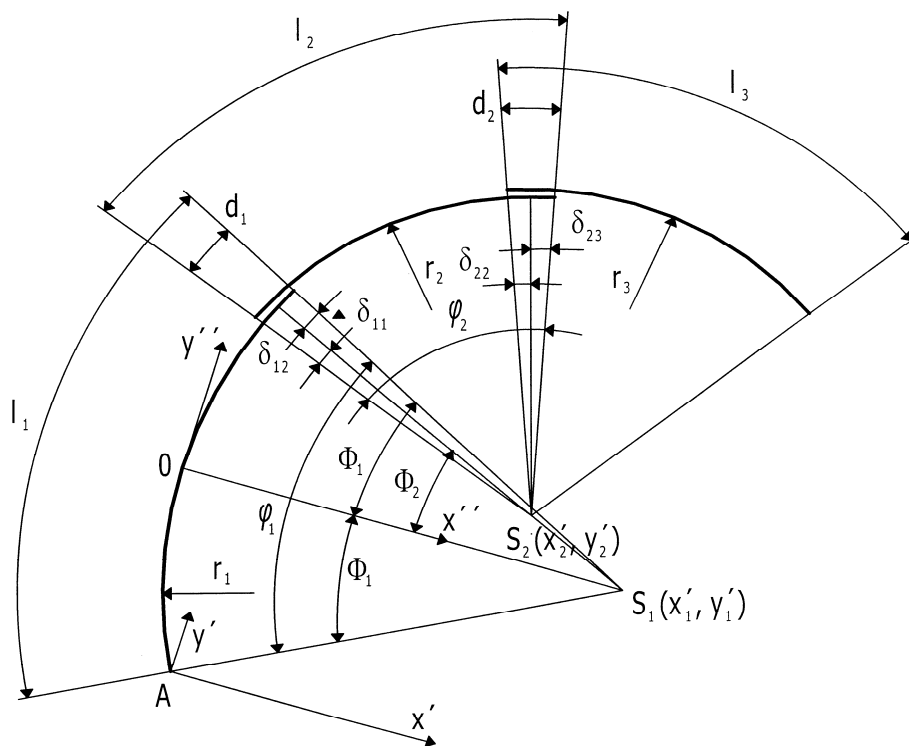
kde $\varphi_1 = l_1 / r_1$ a $\Phi_1 = \varphi_1 / 2$

Střed S_2 kružnice 2. dílu má (viz obr. 1) v souřadném systému x', y' souřadnice:

$$x_2' = x_1' + (r_2 - r_1) \cdot \cos \Phi_{21} \quad (2.3)$$

$$y_2' = y_1' - (r_2 - r_1) \cdot \sin \Phi_{21} \quad (2.4)$$

kde $\Phi_2 = \Phi_1 - \delta_{1,1}$ a $\delta_{1,1} = d_1 / (2 \cdot r_1)$



Obr. 1 Souřadnice 1. a 2. dílu oblouku v souřadném systému x', y' .

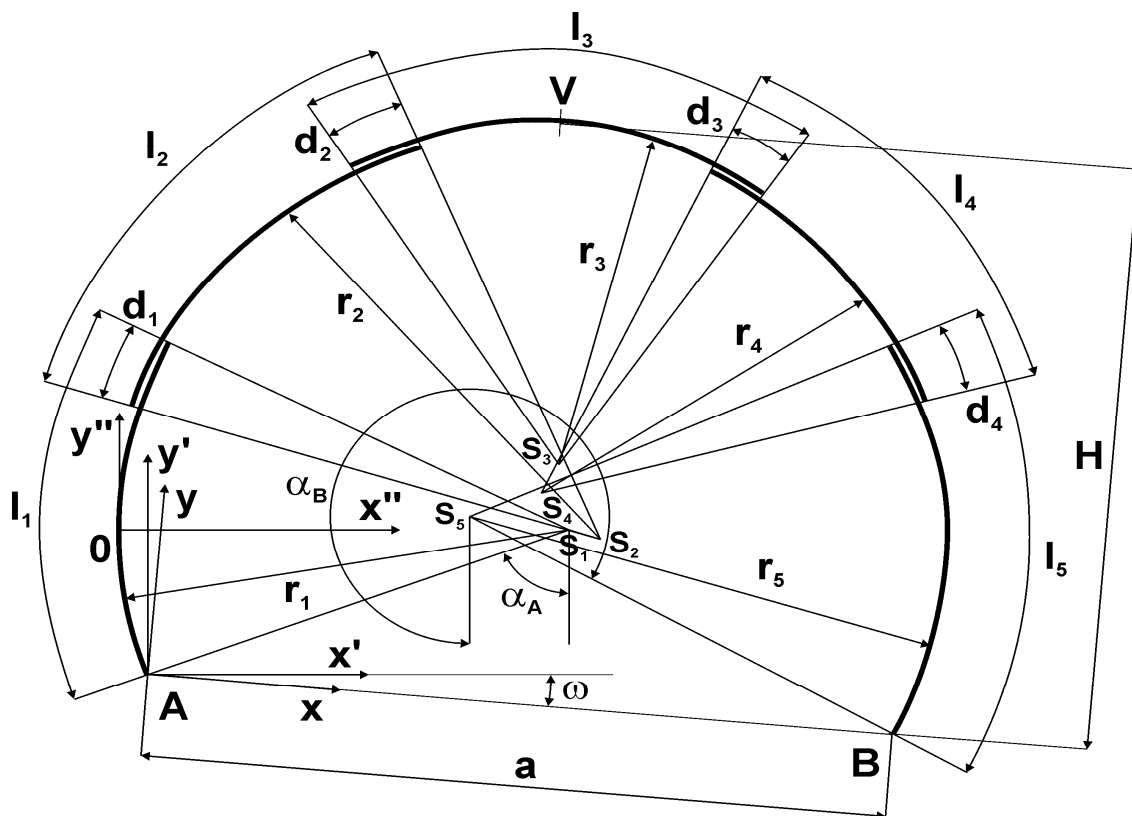
Obecně pro střed kružnice **j-tého** dílu (pro $j > 2$) v souřadném systému x', y' platí:

$$x_j' = x_{j-1}' + (r_{j+1} - r_j) \cdot \cos \Phi_j \quad (2.5)$$

$$y_j' = y_{j-1}' - (r_{j+1} - r_j) \cdot \sin \Phi_j \quad (2.6)$$

kde, $\Phi_j = \Phi_{j-1} + \varphi_{j-1} - (\delta_{j-2,j-1} + \delta_{j-1,j-1})$,

$$\delta_{j-2,j-1} = \frac{d_{j-2}}{(2 * r_{j-1})}, \quad \delta_{j-1,j-1} = \frac{d_{j-1}}{(2 * r_{j-1})}, \quad \varphi_{j-1} = \frac{l_{j-1}}{r_{j-1}}.$$



Obr.2 Geometrické schéma soustavy kruhových oblouků.

Souřadnice x_B' a y_B' bodu **B**, tj. druhé kloubové podpory výztuže (viz obr.2) jsou:

$$x_B' = x_m' - r_m * \sin \alpha_B \quad (2.7)$$

$$y_B' = y_m' - r_m * \cos \alpha_B, \quad (2.8)$$

kde $\alpha_B = \Phi_n + \varphi_n - \delta_{n-1,n} + \frac{\pi}{2}$, přičemž **m** je celkový počet kruhových dílů výztuže (na obr. 2 je $m = 5$).

Souřadné systémy x', y' a x, y jsou vzájemně natočeny o úhel ω , jehož hodnota vyplývá ze vztahu

$$\omega = \arctg \frac{y_B'}{x_B'} \quad (2.9)$$

Transformace souřadnic středů kružnic S_j jednotlivých kruhových dílů obloukové výztuže do souřadného systému x, y lze pak provést pomocí známých vztahů :

$$x_j = x'_j * \cos \omega + y'_j * \sin \omega \quad (2.10)$$

$$y_j = y'_j * \cos \omega - x'_j * \sin \omega \quad (2.11)$$

Znalost souřadnic středů kružnic jednotlivých dílů obloukové výztuže umožňuje jednoznačně popsat geometrii konstrukce, což je nezbytný podklad pro vlastní statické řešení.

Vstupními hodnotami pro zpracování geometrie oblouku složeného z několika kruhových dílů je, jak vyplývá z výše uvedeného, počet dílů n a u každého dílu j pak jeho délka l_j , poloměr zakřivení r_j a délka překrytí sousedních dílů d_j . Z podmínky, že podpory jsou ve stejné výši, je pak geometrie oblouku jednoznačně definována.

2.2 Statické řešení ocelové obloukové výztuže

Metod statického řešení ocelových obloukových výztuží je v současné době k dispozici celá řada. Stupeň statické neurčitosti konstrukce může být různý dle vazeb ocelové obloukové výztuže v patkách, počtu použitých středních stojek či jiných zesilujících prvků a podobně. V daném případě jsme zvolili klasickou silovou metodu zejména pro uvažovaný nízký stupeň statické neurčitosti a jednoduchost výpočtu pro daný případ. Případný uživatel nemusí mít navíc k dispozici žádný nákladně pořízený SW. Stačí tabulkový procesor EXCEL, kterým je vybaven dnes každý stolní počítač.

Při výpočtu staticky neurčité veličiny, kterou může být při dvojkolbovém uložení např. některá z horizontálních reakcí v místě uvolněné kloubové podpory, je vhodné výpočet přetvoření provést numerickou integrací po rozdělení každého kruhového dílu včetně vzájemně se překrývajících dílů na dostatečně malé dílky. Každý dílek má svou délku, může mít i různé statické i fyzikální parametry. Má také svou geometrickou polohu definovanou v každém dílku souřadnicemi svého středu x_i, y_i a směrnici tečny ke střednici α_i . Souřadnice středu každého dílku i v souřadném systému x, y lze vypočítat po rozdělení každého dílu výztuže a překrytí na volený počet dílku, když známe souřadnice středu každého kruhového dílu oblouku a délku dílku Δs_i . Totéž platí o směrnici střednice v tomto bodě.

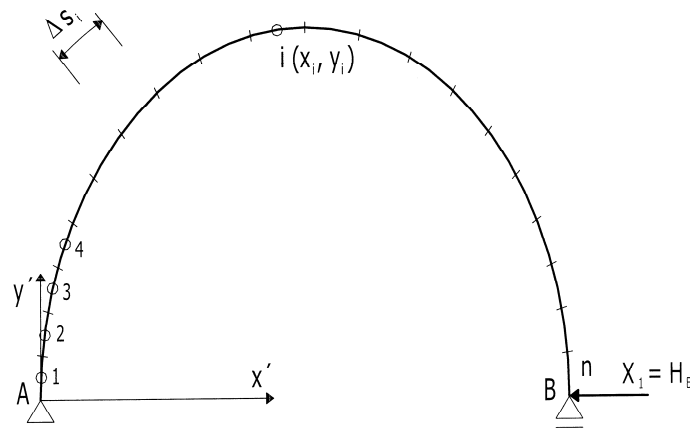
Po výpočtu přetvoření s využitím principu virtuálních prací, lze staticky neurčitou sílu $X_1 = H_B$ určit z výrazu

$$X_1 = - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{M_{0i} * M_{1i} * \Delta s_i}{E * J_i} + \sum_{i=1}^n \frac{N_{0i} * N_{1i} * \Delta s_i}{E * A_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{M_{1i} * M_{1i} * \Delta s_i}{E * J_i} + \sum_{i=1}^n \frac{N_{1i} * N_{1i} * \Delta s_i}{E * A_i}} \quad (2.12)$$

kde n je počet všech dílků ocelové obloukové výztuže,
 J_i je moment setrvačnosti **i-tého** dílku výztuže,
 A_i je plocha průřezu **i-tého** dílku výztuže,
 E je modul pružnosti výztuže,

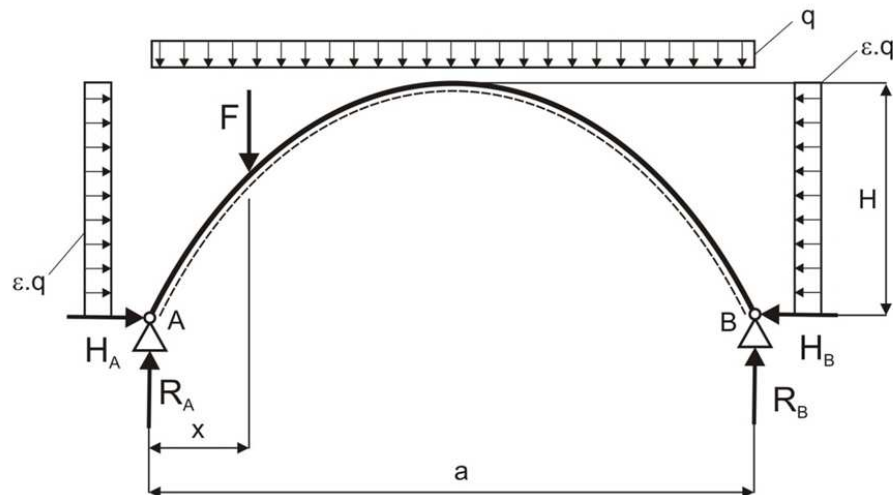
- M_{0i} je ohybový moment v bodě i způsobený daným zatížením základní staticky určité sestavy výztuže,
- N_{0i} je normálová síla v bodě i způsobená daným zatížením základní staticky určité sestavy výztuže,
- M_{1i} je ohybový moment v bodě i způsobený jednotkovou silou $X_1=1$ základní staticky určité sestavy výztuže,
- N_{1i} je normálová síla v bodě i způsobená jednotkovou silou $X_1=1$ základní staticky určité sestavy výztuže,
- Δs_i je délka i -tého dílku výztuže.

Schéma rozdělení výztuže na dílky je zřejmé z obr. 3. Počet dílků n by měl být v zásadě takový, aby jeho zvětšování prakticky neovlivňovalo výsledek. Takto je dále volen. Pro střed každého dílku jsou vypočteny ohybové momenty a normálové síly potřebné pro výpočet staticky neurčité síly X_1 při zvoleném zatížení $q = 1$.



Obr. 3 Schéma rozdělení oblouku na dílky.

Zatížení konstrukce může být jistě velmi různé. V dalším vycházíme z předpokladu, že na výztuž působí ve svislém směru spojitě zatížení q , v horizontálním směru pak spojitě zatížení $q_h = \epsilon \cdot q$, dle obr. 4. Poměr bočního a svislého zatížení lze měnit v širokých mezích a lze tak volit velmi různá schémata zatížení. V tomto SW jsou zatížení pouze aktivní, což umožňuje výztuž řešit pouze jako 1x staticky neurčitou, přičemž za neznámou staticky neurčitou veličinu lze výhodně volit horizontální reakci v podpoře $B - X_1 = H_B$. Z bývající reakce R_A , R_B a H_A , lze pak snadno určit např. z podmínek rovnováhy.



Obr.4 Zatěžovací schéma obloukové výztuže.

Z obr. 4 vyplývá, že výztuž je zatížena rovněž silou F . Ta působí na ocelovou obloukovou v rovině oblouku kolmo na spojnici podpor AB ve vzdálenosti x od podpory A .

2.3 Výpočet složek vnitřních sil, únosnosti a přetvoření konstrukce

Složky vnitřních sil i přetvoření při zvoleném zatížení jsou dále počítány pro středy jednotlivých dílků. Výpočet složek vnitřních sil v bodech i (M_{1i} , N_{1i} , V_{1i}) způsobených pouze svislým zatížením $q_1 = 1$, pouze vodorovným zatížením $q_{h1} = 1$ (M_{2i} , N_{2i} , V_{2i}) případně pouze silou F (M_{Fi} , N_{Fi} , V_{Fi}) ve staticky neurčitém dvojklobovém oblouku lze snadno numericky realizovat běžnými postupy známými ze statiky. Pro dané ε , jsou pak složky vnitřních sil dány superpozicí:

$$\begin{aligned}
 M_{ci} &= M_{Fi} + \kappa \cdot (M_{1i} + \varepsilon \cdot M_{2i}) = M_{Fi} + \kappa \cdot M_i \\
 N_{ci} &= N_{Fi} + \kappa \cdot (N_{1i} + \varepsilon \cdot N_{2i}) = N_{Fi} + \kappa \cdot N_i \\
 V_{ci} &= V_{Fi} + \kappa \cdot (V_{1i} + \varepsilon \cdot V_{2i}) = V_{Fi} + \kappa \cdot V_i
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Výše uvedené řešení vychází ze základních předpokladů platných pro pružnostní řešení, tj.

- geometrická linearita, kdy se počítá pouze s návrhovou geometrií konstrukce a pro přetvoření se předpokládá, že jsou natolik malá, že neovlivňují velikost vnitřních sil a momentů v ocelové obloukové výztuži,
- fyzikální linearita, kdy se předpokládá lineární závislost mezi napětím a přetvořením.

Pokud se týká výpočtu únosnosti výztuže, pak lze aplikovat klasické pružné řešení, dle kterého musí být splněna v každém uvažovaném bodu ocelové výztuže podmínka:

$$\frac{|N_{ci}| \cdot \gamma_{M0}}{A \cdot f_y} + \frac{|M_{ci}| \cdot \gamma_{M0}}{W_x \cdot f_y} \leq 1 \quad (2.14)$$

kde

N_{ci}	je normálová síla v posuzovaném průřezu i od zatížení ve svislém směru F a $q = \kappa \cdot q_1$ a ve vodorovném směru $q_h = \varepsilon \cdot q = \varepsilon \cdot \kappa \cdot q_1$,
M_{ci}	je ohybový moment v posuzovaném průřezu i od zatížení ve svislém směru F a $q = \kappa \cdot q_1$ a ve vodorovném směru $q_h = \varepsilon \cdot q = \varepsilon \cdot \kappa \cdot q_1$,
$\varepsilon = q_h / q$,	je součinitel vyjadřující poměr horizontálního a svislého zatížení,
κ	je součinitel vyjadřující poměr svislého zatížení charakterizující únosnost q a zvoleného zatížení $q_1 = 1$, platí tedy $q = \kappa \cdot q_1$
A	je plocha průřezu,
W_x	je průřezový modul
f_y	je mez kluzu oceli,
γ_{M0}	je dílčí součinitel únosnosti průřezu kterékoliv třídy, $\gamma_{M0}=1$ dle čl.1 ČSN EN 1993-1-1.

Při takovémto postupu by byla únosnost výztuže velmi malá, výztuž by byla navrhována velmi neekonomicky, a proto je v dalším postupováno při využití dlouhodobých zkušeností jinak.

Vztah (2.14) se nicméně používá pro posouzení zatížení výztuže silou F při jinak nulovém zatížení výztuže. Vychází se přitom z podmínky, že výztuž musí přenést tuto sílu, i kdyby nebyla jinak zatížená. K tomuto stavu může dojít v podmínkách, kdy výztuž není zatížená horninovým masivem ani aktivně, ani pasivně. (Pasivní i aktivní zatížení zejména z boků díla totiž výztuže stabilizují.) Nepřipouští se přitom současně, aby síla F vyvolala ve výztuži trvalé deformace. Pokud tedy není podmínka (2.14) se zatížením silou F při nulovém spojitém zatížení q a q_h splněna, pak se musí zvážit snížení zatížení silou F , změna místa zatížení x a volba jiné výztuže. V úvahu přichází rovněž vytvoření podmínek, které zabezpečí stabilnější podmínky pro výztuž. Tento postup však vyžaduje individuální posouzení daných podmínek a jejich ověření.

Při posuzování únosnosti ocelové obloukové výztuže důlních a podzemních děl lze do značné míry vycházet z ČSN EN 1993-1-1, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1:Obecná pravidla pro pozemní stavby.

Pro posuzování únosnosti výztuže dle této normy je důležité zařazení profilu TH29 z vyvíjené oceli H500M. Dle výsledků Dílčí cíl 11 etapy E002: Modelování vlastností profilu TH29 z nové oceli, dle výsledků experimentů a vyhodnocení ohybových zkoušek lze uvedený profil zařadit do 1 třídy, protože umožňuje vytvořit plastické klouby s rotační kapacitou požadovanou při plasticitám výpočtu, bez redukce jejich únosnosti.

Podmínku spolehlivosti pro průřezy namáhané momenty, posouvajícími silami a tahem nebo tlakem lze v daném případě v souladu ČSN EN 1993-1-1 aplikovat ve tvaru:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}\right)^2 + \frac{M_{N,Rd}}{M_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (2.15)$$

ve kterém je

$N_{pl,Rd}$ je návrhová plastická únosnost neoslabeného průřezu v tahu,
 $M_{pl,Rd}$ je návrhová únosnost v ohybu k některé hlavní ose průřezu,
 N_{Ed} je návrhová hodnota osová síly, v dalším $N_{Ed} = N_{ic}$,
 $M_{N,Rd}$ je redukovaná návrhová hodnota únosnosti v ohybu v důsledku osových sil, v dalším $M_{NRd} = M_{ic}$.

Je přitom nezbytné, aby hodnota návrhové smykové síly V_{Ed} dle čl. 6.2.10 citované normy byla menší než 50% návrhové plastické smykové únosnosti $V_{pl,Rd}$, což je, jak ukazují parametrické výpočty, při dále uvažovaných zatíženích prakticky vždy splněno. Do rovnice (2.15) lze dosadit:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = W_{pl} \cdot f_y$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = A \cdot f_y \quad (2.15a)$$

Ve výrazech (2.15a) je kromě výše uvedeného:
 W_{pl} plastický modul průřezu.

Nerovnost (2.15) lze dále upravit na tvar:

$$\left(\frac{\kappa_i \cdot N_i + N_{Fi}}{N_{pl,Rd}}\right)^2 + \frac{\kappa_i \cdot M_{ci} + M_{Fi}}{M_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (2.16)$$

respektive:

$$a_i \cdot \kappa_i^2 + b_i \cdot \kappa_i + c_i \leq 0 \quad (2.17)$$

kde je

$$a_i = N_i^2 \cdot M_{pl,Rd}$$

$$b_i = 2 \cdot N_i \cdot N_{Fi} \cdot M_{pl,Rd} + M_i \cdot N_{pl,Rd}^2$$

$$c_i = N_{Fi}^2 \cdot M_{pl,Rd} + N_{pl,Rd}^2 (M_{Fi} - M_{pl,Rd})$$

Z (2.17) lze explicitně přímo určit hodnotu κ_i , charakterizující únosnost výztuže pro přenášení horkého tlaku.

Mezní stav z hlediska únosnosti se hodnotí ve všech průřezích i ocelového oblouku a hodnota κ je minimální hodnotou ze souboru všech hodnot κ_i v hodnocených průřezích ocelového oblouku. Únosnost výztuže je pak, jak již bylo uvedeno:

$$q = \kappa \cdot q_1 = \kappa$$

Takto stanovena únosnost q platí pro nepoddajnou ocelovou výztuž zatíženou dle obr.4 při dané hodnotě ε .

Únosnosti q odpovídají složky vnitřních sil v bodě i ocelového oblouku:

$$\begin{aligned} M_i &= \kappa \cdot (M_{1i} + \varepsilon \cdot M_{2i}) \\ N_i &= \kappa \cdot (N_{1i} + \varepsilon \cdot N_{2i}) \\ V_i &= \kappa \cdot (V_{1i} + \varepsilon \cdot V_{2i}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Celkové hodnoty vnitřních sil jsou dány (2.13). Pro únosnost ocelové obloukové výztuže lze zjistit následně přetvoření nejlépe při využití principu virtuálních prací (metoda jednotkových sil), když do každého místa výztuže i klademe postupně jednotkovou sílu v daném směru určovaného posunu nebo jednotkový moment pro určení pootočení. Výztuž je přitom zatěžována jako staticky určitá s reakcemi odpovídajícími stanovené únosnosti výztuže.

Posunutí u_k v bodě k ve směru osy x je dáno vztahem:

$$u_k = \sum_{i=1}^m \frac{M_{ci} * M_{ki} * \Delta s_i}{E * J_i} + \sum_{i=1}^m \frac{N_{ci} * N_{ki} * \Delta s_i}{E * A_i} \quad (2.19)$$

kde M_{ki} je ohybový moment v místě i , vyvolaný jednotkovou virtuální silou $F_{xk} = 1$ působící ve směru osy x v bodě k ,

N_{ki} je normálová síla v místě i , vyvolaná jednotkovou virtuální silou $F_{xk} = 1$ působící ve směru osy x v bodě k .

Obdobně lze vypočíst posunutí v_k v bodě k ve směru osy y , které je dáno vztahem:

$$v_k = \sum_{i=1}^m \frac{M_{ci} * M_{ki} * \Delta s_i}{E * J_i} + \sum_{i=1}^m \frac{N_{ci} * N_{ki} * \Delta s_i}{E * A_i} \quad (2.20)$$

kde v daném případě:

M_{ki} je ohybový moment v místě i , vyvolaný jednotkovou virtuální silou $F_{yk} = 1$ působící ve směru osy y v bodě k ,

N_{ki} je normálová síla v místě i , vyvolaná jednotkovou virtuální silou $F_{yk} = 1$ působící ve směru osy y v bodě k .

Celkové posunutí δ_i v bodě i je dáno vztahem:

$$\delta_i = \sqrt{(u_{ik}^2 + v_k^2)} \quad (2.21)$$

Pootočení φ_k v bodě k lze určit ze vztahu (2.22)

$$\varphi_k = \sum_{i=1}^m \frac{M_{ci} * M_{ki} * \Delta s_i}{E * J_i} + \sum_{i=1}^m \frac{N_{ci} * N_{ki} * \Delta s_i}{E * A_i} \quad (2.22)$$

kde je M_{ki} je ohybový moment v místě i, vyvolaný zatěžujícím virtuálním momentem $M_k = 1$ působícím v bodě k,

N_{ki} je normálová síla v místě i, vyvolaná zatěžujícím virtuálním momentem $M_k = 1$ působícím v bodě k.

Takto stanovená přetvoření platí pro hodnotu odpovídající únosnosti výztuže.

2.4 Mezní hodnoty momentů a normálových sil

Profily TH29 a TH34 v ArcelorMittal, a.s. Ostrava vyrábějí z oceli 31Mn4 dle DIN 21544 a nově z vyvinuté oceli H500M.

Základní statické parametry těchto profilů jsou uvedeny v tabulce č.2. Hodnoty byly převzaty z podkladů výrobce, hodnoty plastického průřezového modulu W_{xpl} řady TH byly vypočteny. Základní mechanické vlastnosti oceli 31Mn4 a oceli H500M jsou v tabulce č.1.

Zn. oceli	ČSN	DIN	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_5
31Mn4		21544	min. 350	min.550	18
H500M			min. 480	min.650	18

Tabulka č. 1 (R_e mez kluzu, R_m mez pevnosti v tahu, A_5 tažnost).

Označení	A [cm ²]	G [kg/m]	W_x [cm ³]	W_y [cm ³]	I_x [cm ⁴]	I_y [cm ⁴]	W_{xpl} [cm ³]
TH- 29	37,00	29,00	93,00	106,00	598,00	799,00	132,38
TH - 34	43,10	33,90	128,00	141,00	892,00	1205,00	177,83

Tabulka č. 2

Určení únosnosti průřezu v tlaku nebo plastického momentu únosnosti průřezu nutných pro výpočet dle (2.18) vyplývá ze vztahů:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = A \cdot f_y \quad M_{pl,Rd} = \frac{W_{xpl} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} = W_{xpl} \cdot f_y \quad (2.23)$$

Uvažovaným profilům a příslušné jakosti oceli pak odpovídají hodnoty v tabulce č. 3:

Profil	f_y [MPa]	A [cm ²]	W_{xpl} [cm ³]	$N_{pl,Rd}$ [kN]	$M_{pl,Rd}$ [kNm]
TH29/31Mn4	350	37,00	132,38	1295,0	46,33
TH34/31Mn4	350	43,10	177,83	1508,5	62,24
TH29/H500M	480	37,00	132,38	1776,0	63,54
TH34/H500M	480	43,10	177,83	2068,8	85,36

Tabulka č.3

Tyto hodnoty jsou podstatně nižší, než byly uvažovány ve výpočtech dle [2], kde se mezní hodnoty pro ohybové momenty M_{pl} určovaly poněkud jiným způsobem. Vycházely v zásadě z normy ČSN 44 4410-1 Zkoušení důlní ocelové výztuže, Část 1: Zkoušení tvarových tyčí. V této normě jsou uvedeny hodnoty minimální zatěžovací síly pro tvarové tyče K21, K24 a P28 z oceli 11500 při ohybové zkoušce na rovných tyčích při vzdálenosti podpor 1 m zatěžovaných uprostřed rozpětí a to jednak na vnitřní stranu kořene příčného řezu, jednak na vnější stranu kořene příčného řezu. Hodnoty převzaté z uvedené normy pro profily K21, K24 a P28 musel výrobce zaručovat a byly podkladem pro stanovení mezních momentů. Únosnost v tlaku byla pak určena ze zaručené meze kluzu oceli a plochy průřezu příslušného profilu dle vztahu $N_{pl} = A \cdot f_y$. Tento postup byl aplikován řadu let v OKD a lze říci, že se osvědčil. Respektuje skutečnost, že únosnost otevřených profilů používaných k vyztužování zejména dlouhých důlních děl je rozdílná dle směru zatěžování, což normy zpravidla nepostihují.

Pro profily řady TH z oceli 31Mn4 nejsou hodnoty minimálních zatěžovacích sil již nikde uvedeny. Jejich hodnoty byly odvozeny teoreticky z průřezových charakteristik profilů, vlastností ocelí a z ohybových zkoušek, z nichž byly profily řady TH nově a v minulosti vyrobeny [5].

Totéž platí o profilech TH29 a TH34 z nově vyvíjené oceli. Zde se vycházelo také z modelování vlastností profilu TH29 z vyvíjené oceli a z ohybových zkoušek rovných tyčí z profilů TH29 a TH34, které byly realizovány v rámci řešení projektu TA ČR TA01010838 [7], [8].

Dle [9] ČSN EN 1993-1-1, Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby, jsou hodnoty $M_{pl,Rd}$, návrhové únosnosti v ohybu k hlavní ose průřezu při obou směrech zatěžování shodné (viz tabulka č.3). Z ohybových zkoušek i z citované normy ČSN 44 4410-1 Zkoušení důlní ocelové výztuže vyplývá, že otevřené profily řady K nebo TH mají rozdílnou únosnost pro zatížení „dovnitř profilu“ a na „kořen profilu“. Je to dáno především různou stabilitou profilu při těchto způsobech zatěžování.

Hodnoty momentů mezních plastických momentů M_{pl1} a M_{pl2} pro všechny uvažované profily a odpovídající vlastnosti oceli stanovené popsáním postupem jsou uvedeny v tabulce č. 4. Opírají se o modelová ověření [7] a o ohybové zkoušky [8], které byly realizovány v průběhu řešení projektu. Hodnoty a únosnosti v tlaku N_{pl} jsou uvedeny v tabulce č.3.

Profil	Zatěžovací síla na vnitřní stranu kořene příčného řezu [kN]	Zatěžovací síla na vnější stranu kořene příčného řezu [kN]	M_{pl1} [kNm]	M_{pl2} [kNm]
TH29/31Mn4			50,85	-64,73
TH34/31Mn4			68,47	-87,13
TH29/H500M			63,54	-76,25
TH34/H500M			85,36	-102,43

Tabulka č. 4

U poddajné ocelové výztuže je únosnosti dosaženo, je-li odpor proti prokluzu v místech překrytých dílů menší než normálová síla, která je zde vyvolána vnějším zatížením. Únosnost ocelové obloukové výztuže je v tomto případě vedle dosažení mezního stavu limitována odporem proti prokluzu.

Určení odporu proti prokluzu teoreticky je nejen obtížné, ale také nepřesné. Je totiž závislý na celé řadě faktorů, které lze jen velmi obtížně nejen modelovat, ale často i zjistit. Odpor proti prokluzu je dán zejména:

- 1) konstrukčním řešením spojovacích elementů,
- 2) počtem spojovacích elementů,
- 3) dotažením šroubů spojovacích elementů, případně třmenů,
- 4) kvalitou oceli spojovacích elementů,
- 5) konstrukčním řešením spojovaných profilových tyčí,
- 6) kvalitou oceli spojovaných profilových tyčí,
- 7) nepřesnostmi spojovaných profilových tyčí,
- 8) kontaktem spojovaných profilových tyčí a samotnými spoji s pažením, rozpínkami případně i s horninou.

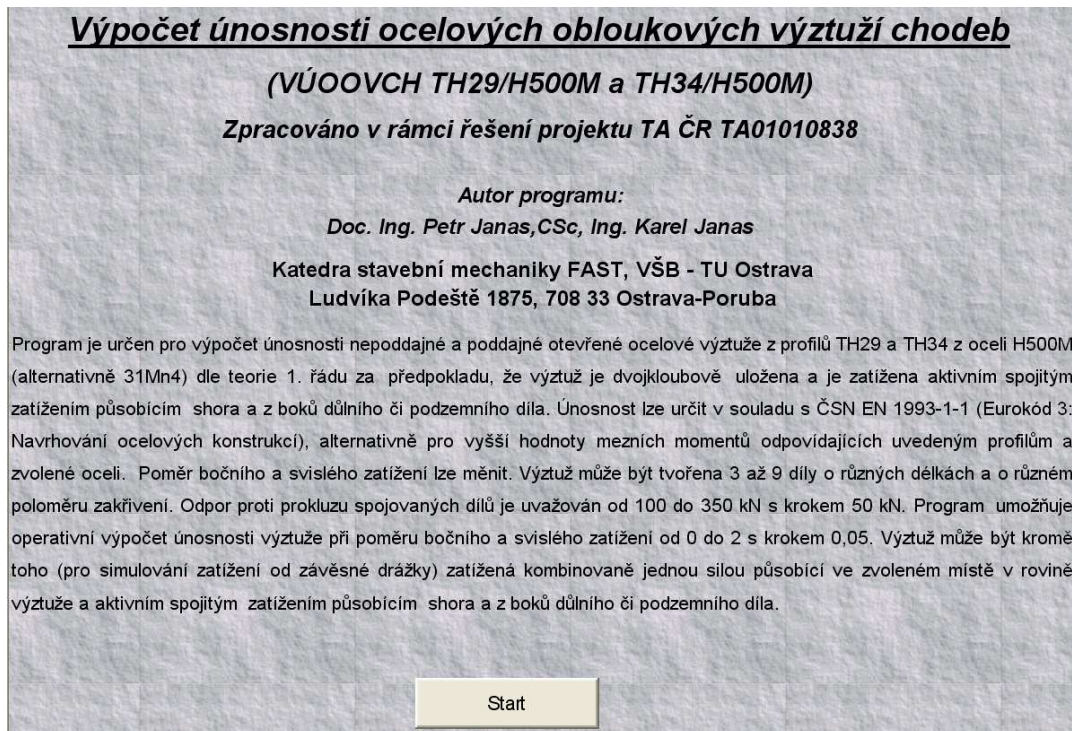
Nejvhodnější je proto jej určovat experimentálně. V dalším je proto únosnost poddajné výztuže vztažena na konkrétní hodnoty odporu proti prokluzu, které jsou uváděny od 100 kN do 350 kN s krokem 50 kN.

3. Program Výpočet únosnosti ocelových obloukových výztuží

Z výše uvedených teoretických základů byl zpracován program v prostředí Microsoft Excelu pomocí programovacího jazyka Visual Basic. Titulní stránka programu je na obr. 5.

Program je určen pro výpočet únosnosti nepoddajné a poddajné ocelové otevřené obloukové výztuže z profilů TH29 a TH34 z nově vyvíjené oceli H500M dle teorie 1. řádu za předpokladu, že výztuž je dvojklobově uložena a je zatížena aktivním spojitým zatížením působícím shora a boků důlního či podzemního díla a jednou osovou silou působící shora v rovině výztuže. Poměr bočního a svislého zatížení lze libovolně měnit.

Výztuž může být tvořena 3 až 9 kruhovými díly o různých délkách a různém poloměru zakřivení. Volbou dostatečně velkého poloměru zakřivení lze simulovat rovné díly výztuže.



Obr. č. 5 Titulní stránka s charakteristikou programu.

3.1 Zadávání vstupních dat

Po kliknutí na tlačítko **Start** na titulní stránce programu se objeví vstupní formulář, viz obr. 6. Před zadáváním vstupních dat se klikne na tlačítko **Další výpočet** (je na místě tlačítka, které se později změní na **Výpočet**) a následně na tlačítko **Poslední vstup** a na monitoru se uvedou vstupní data posledního výpočtu. Ta lze pochopitelně změnit. Pro výpočet se zadávají následující vstupní údaje (viz. obr. 6):

- Počet kruhových oblouků, ze kterých je ocelová oblouková výztuž tvořena. Alternativně lze volit 3 až 9 kruhových dílů.
- Délka L_j každého kruhového dílu, jeho poloměr zakřivení R_j a délka přeplátování (překrytí) s následujícím dílem.
- Profil, ze kterého je ocelová oblouková výztuž složena. Alternativně může být volen profil TH29 a TH34
- Norma oceli, volí se nová ocel H500M, alternativně ocel 31Mn4.
- Výpočet únosnosti probíhá s využitím hodnot mezních momentů uvedených v tabulce č.4 a mezní normálové síly uvedené v tabulce č. 3. V případě označení políčka EuroCode3 probíhá výpočet pro hodnoty mezních momentů a normálové síly uvedených v tabulce č. 3.
- Síla F [kN] působící v rovině výztuže a vzdálenost x [m] (měří se horizontální vzdálenost od podpory A dle obr. 4).
- Poměr ϵ vodorovného a svislého spojitého zatížení. Lze jej volit od 0,0 prakticky bez omezení shora.
- Alternativně lze provádět současně výpočet pro hodnoty ϵ od 0,0 do 2,00 s krokem 0,1, tj. celkem 40 výpočtů najednou; volba tohoto výpočtu je zajištěna předáním instrukce **Graf ϵ/q** v pravé části vstupního formuláře.

- Alternativně může být kromě zadaného profilu označen i druhý profil. Výpočet pak probíhá pro oba profily pro uvedené ε , pro zvolenou jakost oceli a pro mezní momenty uvedené v tabulce č.4, případně pro mezní hodnoty momentů uvedené v tabulce č.3, je-li označení EuroCode3, ovšem bez zatížení silou F.
- Pro případnou archivaci lze zadat také číslo výpočtu a poznámku. Datum výpočtu se zadává automaticky.
- Označením políčka **Uložit vstup** se zadaná data včetně případného textu v poznámce ukládají do archivu.
- Vstupní data lze také vyvolat z archivu, jsou-li v něm uložena, kliknutím na tlačítko **Archiv**. Následně je lze pak upřesnit.

The screenshot shows a software interface for calculating the load capacity of a beam. The title bar reads 'VÝPOVCH TH29/H500M a TH34/H500M'. The form includes the following fields and controls:

- Výpočet číslo:** 4
- Počet oblouků:** 5
- Profil:** TH-29
- Norma oceli:** H500M
- ε:** 2
- Výpočet** button
- Délka oblouku L1 [mm]:** 2590
- Délka oblouku L2 [mm]:** 2400
- Délka oblouku L3 [mm]:** 4660
- Délka oblouku L4 [mm]:** 2400
- Délka oblouku L5 [mm]:** 2590
- Poloměr R1 [mm]:** 6359
- Poloměr R2 [mm]:** 4239
- Poloměr R3 [mm]:** 2659
- Poloměr R4 [mm]:** 4239
- Poloměr R5 [mm]:** 6359
- Přeplátování 1-2 [mm]:** 500
- Přeplátování 2-3 [mm]:** 500
- Přeplátování 3-4 [mm]:** 500
- Přeplátování 4-5 [mm]:** 500
- EuroCode 3
- Graf ε/q
- TH-29
- TH-34
- Osobá síla:**
 - F:** 0 [kN]
 - X:** 2 [m]
- Uložit vstup** button
- Archiv** button
- Datum:** [empty field]
- Poznámka:** [empty field]
- Poslední vstup** button
- Detail výsledků** button

Obr. č.6 Vstupní formulář pro výpočet únosnosti výztuže.

Výpočet se spustí po označení pole **Výpočet**

3.2 Výsledky výpočtu

Po ukončení výpočtu se vstupní formulář změní o výsledky. Na obr.7 jsou výsledky výpočtu únosnosti výztuže SP19/5 z profilu TH29, který obsahuje následující hodnoty:

- Výšku **H** označenou v souladu s obr. 4 a šířku **a**, která je maximální šířkou oblouku. S délkou úsečky AB dle obr. 4 je hodnota **a** shodná pouze v případě, kdy je délka této úsečky největší šířkou výztuže. Poznámka: Uvedené délky se vztahují ke střednici obloukové výztuže.
- Tabulku s výsledky únosnosti výztuže **q**, celkového svislého zatížení **Q**, velikosti horizontálních reakcí **H_a**, **H_b** a svislých reakcí **R_a** a **R_b** pro zadanou hodnotu ε .
- Hodnotu **T_{min}**, představující hodnotu minimálního odporu proti prokluzu v místě překrytí dílů výztuže, při které se ocelová výztuž chová nepoddajně. Hodnoty **q**, **Q**, **H_a**, **H_b**, **R_a** a **R_b** jsou pro nepoddajnou výztuž uvedeny ve sloupci pod T_{min}. Je-li odpor proti prokluzu menší než tato hodnota, pak únosnost výztuže limituje odpor proti prokluzu. Je-li naopak odpor proti prokluzu větší než hodnota T_{min}, pak se výztuž chová nepoddajně a její únosnost limituje dosažení mezního stavu dle vztahu (2.16) respektive (2.18). Pro hodnoty odporu proti prokluzu **T = 100 kN, 150 kN, T = 200 kN, 250 kN, 300 kN a 350 kN** jsou s uvedeným odporem proti prokluzu v příslušném sloupci vždy uvedeny hodnoty únosnosti výztuže a reakcí.

Hodnoty uvedené v tabulce výstupního formuláře se týkají vždy výztuže se zadanou geometrií a profilu uvedenému na formuláři (v daném případě TH29 z oceli H500M), pro zadaný poměr horizontálního a svislého zatížení ε , (v daném případě $\varepsilon = 0,65$) a při působící síle F ve vzdálenosti x, které byly pro výpočet zadány, viz obr. 7.

Z formuláře lze na konci výpočtu také odečíst, že výpočet byl ukončen a dobu výpočtu **Průběh: "Konec výpočtu" [45 sec.]**.

Na formuláři lze označit tlačítko **Uložit vstup** a následně stvrdit dle obr. 8. Vstupní data, včetně data výpočtu a případné poznámky se pak uloží do archivu, který lze otevřít označením tlačítka **Archiv**.

Po označení tlačítka **Další výpočet** lze přistoupit k novému výpočtu. Před zadáváním nových nebo pozměněných vstupů je nutno ale označit tlačítko **Poslední vstup**. Pokud se vstupy upřesňují před označením tlačítek **Další výpočet** a **Poslední vstup**, pak při volbě **Další výpočet** se počítá s původními vstupy. Po označení tlačítka **Tisk výsledků** lze vytisknout formulář s daty uvedenými na výstupním formuláři.

V případě, že zadaná síla **F** překračuje mezní hodnotu ve výztuži, objeví se na výstupním formuláři informace na obr. 9. V daném případě se výpočet zastaví. Nelze tedy určit únosnost výztuže odpovídající spojitému zatížení ze stropu a z boku díla. V tomto případě se musí změnit zadání po kliknutí **OK**. V úvahu přichází změna síly **F**, místo **x** kde tato síla působí, změna geometrie výztuže nebo změna hmotnostního stupně profilu výztuže.

Výpočet číslo: 4 **Počet oblouků:** 5 **Profil:** TH-29 **Norma oceli:** H500M **c:** 0,65

Délka oblouku L1 [mm]: 2590 Poloměr R1 [mm]: 6359
Délka oblouku L2 [mm]: 2400 Poloměr R2 [mm]: 4239
Délka oblouku L3 [mm]: 4660 Poloměr R3 [mm]: 2659
Délka oblouku L4 [mm]: 2400 Poloměr R4 [mm]: 4239
Délka oblouku L5 [mm]: 2590 Poloměr R5 [mm]: 6359

Přepletování 1-2 [mm]: 500 EuroCode 3
Přepletování 2-3 [mm]: 500 Graf ϵ/q
Přepletování 3-4 [mm]: 500 Pro profily
Přepletování 4-5 [mm]: 500 TH-29
 TH-34

Osová síla
F 40 [kN]
X 2 [m]

Datum: 12/14/2013 Poznámka: Průběh: *** Konec výpočtu *** [45 sec.]

Výsledky

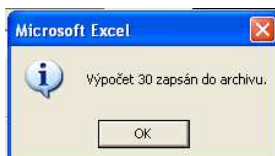
a: 6.493774 [m] H: 4.663104 [m]

	Tmin = 776.46 kN	T = 100 kN	T = 150 kN	T = 200 kN	T = 250 kN	T = 300 kN	T = 350 kN
q [kN/m]	239,914	22,911	38,951	54,99	71,029	87,069	103,108
Q [kN]	1557,948	148,781	252,937	357,093	461,249	565,405	669,561
Ha = Hb [kN]	-78,255	-0,897	-6,615	-12,333	-18,05	-23,768	-29,486
Ra [kN]	806,645	102,062	154,14	206,218	258,296	310,374	362,452
Rb [kN]	791,303	86,719	138,797	190,875	242,953	295,031	347,109

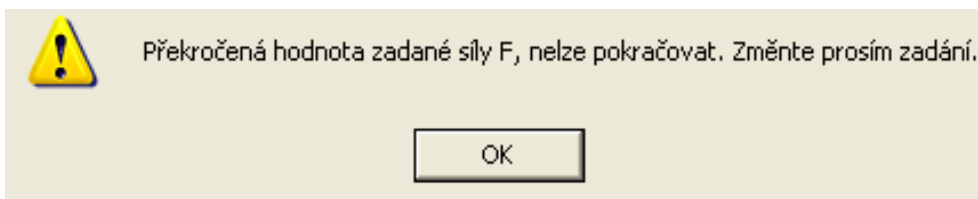
Legenda: T ... odpor proti prokluzu
Tmin ... minimální únosnost nepoddajného spoje



Obr. č. 7 Výstupní formulář pro výpočet únosnosti výztuže SP19/5 z profilu TH29 s výsledky a s lištou.



Obr.č.8 Potvrzení zápisu do archivu.



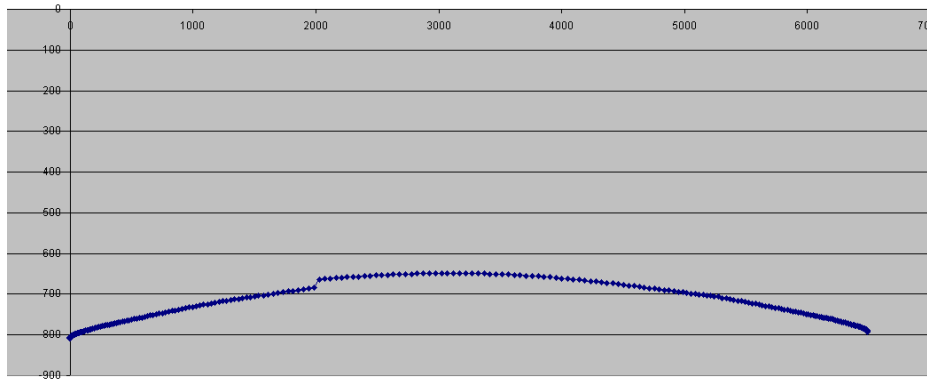
Obr. č. 9 Informace o překročení zadané síly F.

Po kliknutí na tlačítko **Detail výsledků**, lze dle možností uvedených na liště pod výstupním formulářem (viz obr. 7) vyvolat:

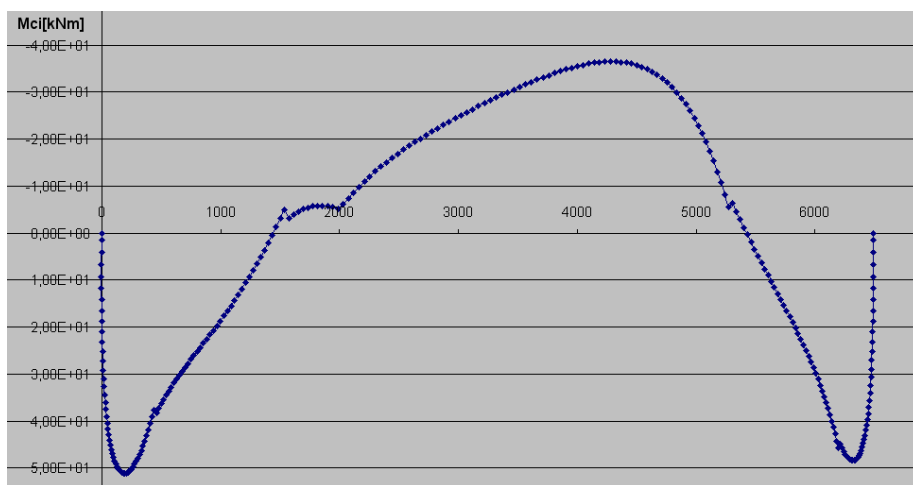
- **Start** Titulní stránku s charakteristikou programu a s tlačítkem **Start**, které po kliknutí zajistí návrat na vstupní formulář s posledními vstupy (obr. 6).
- **Graf NCi** Průběh normálové síly podél střednice oblouku promítnutý na osu **x** spojující podpory A a B a mající počátek v bodě A, viz obr. 10.
- **Graf MCi** Průběh ohybového momentu podél střednice oblouku promítnutý na osu **x**, viz obr. 11.
- **Graf VCi** Průběh posouvající síly podél střednice promítnutý na osu **x**, viz obr. 12.
- **Graf tvaru** Viz schéma tvaru výztuže na obr.11 s vyznačením místa , kde síla **F** působí. Při označení libovolného bodu na střednici oblouku lze odečíst jeho souřadnice **x** a **y** v mm, viz obr. 13.
- **Graf ObIMi** Průběh ohybového momentu podél střednice oblouku, viz obr. 14.
- **Graf ObINci** Průběh normálové síly podél střednice oblouku.
- **Graf ObIVci** Průběh posouvající síly podél střednice oblouku.
- **Graf ObIPohyb** Schéma průběhu posunutí střednice oblouku δ , viz obr. 15. Pokud myší označíme bod na střednici oblouku, lze odečíst hodnotu posunutí v mm. Posunutí je vypočteno pro hodnotu daného zatížení odpovídající únosnosti výztuže. Obdobně lze odečíst příslušnou hodnotu **i** u jiných znázorňovaných grafů.
- **Výsledná data** Tabulka s dílčími výsledky postupu výpočtu.

Výše uvedené výsledky vyvolané po označení lišty se vztahují (kromě tvaru výztuže) na zadaný profil pro zatížení odpovídající únosnosti výztuže při zadané konkrétní hodnotě poměru bočního a svislého zatížení ϵ . Dále uvedené grafy, které lze vyvolat opět označením na liště, se vztahují na průběh únosnosti při měnícím se poměru ϵ od 0 do 2 s krokem 0,05 pro sílu **F=0**.

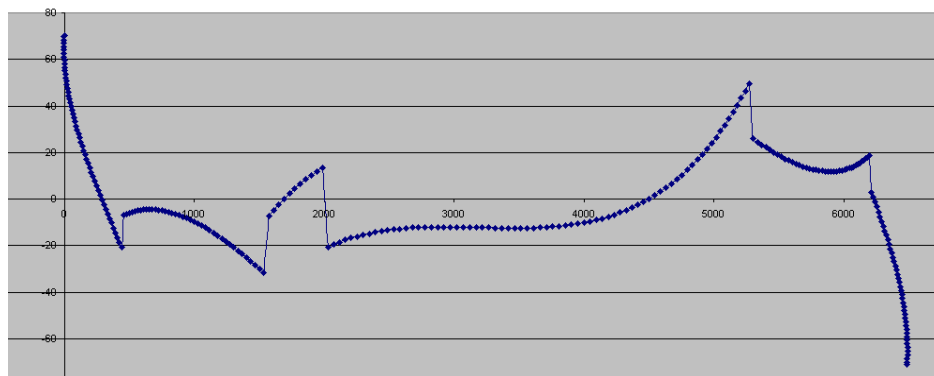
- **Graf eps-q** Schéma závislosti únosnosti výztuže na poměru zatížení ϵ —viz obr. 16.
- **Graf eps-Epsq** Schéma závislosti únosnosti výztuže v horizontálním směru tj. $q_h = q \cdot \epsilon$ na ϵ —viz obr. 17.
- **Graf eps-Q** Schéma závislosti celkové svislé únosnosti výztuže **Q** na ϵ .
- **Graf eps-H** Schéma závislosti vodorovných reakcí **H** na ϵ včetně tabulkových hodnot, viz obr. 18.
- **Graf eps-R** Schéma závislosti svislých reakcí **R** na ϵ včetně tabulkových hodnot, viz obr. 19.



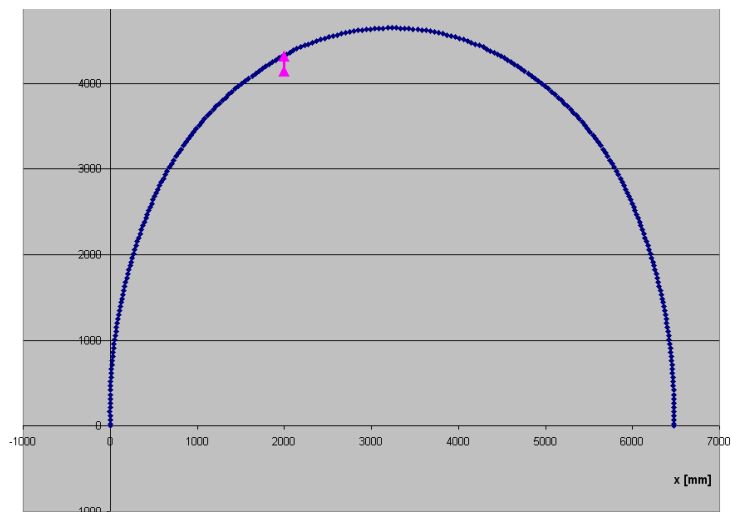
Obr. č.10 Průběh normálové síly N_{ci} [kN] podél střednice oblouku promítнутý na osu x.



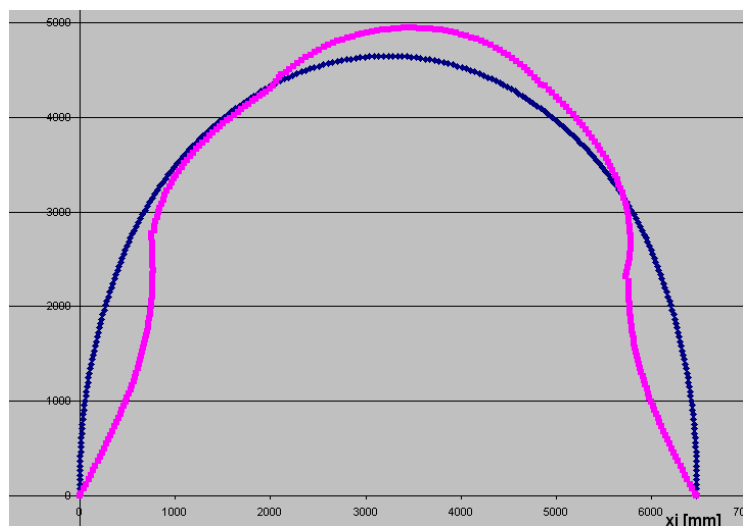
Obr. č.11 Průběh ohybového momentu M_{ci} [kNm] podél střednice oblouku promítнутý na osu x.



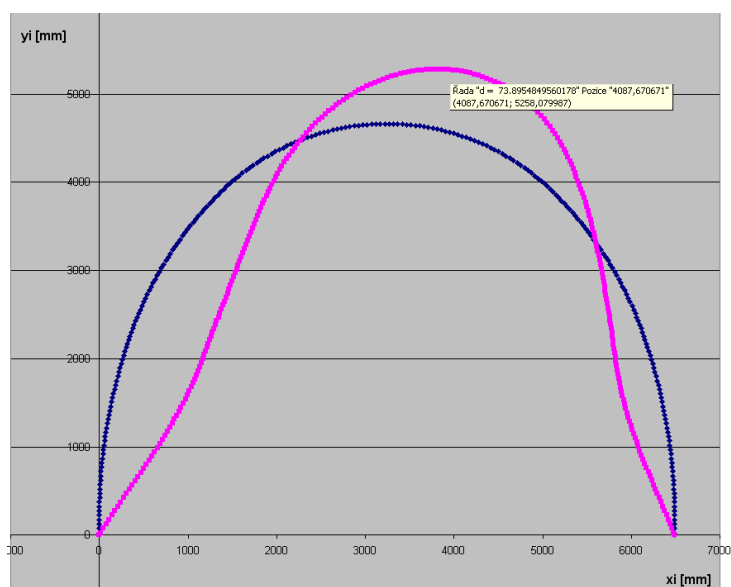
Obr. č.12 Průběh posouvající síly V_{ci} [kN] podél střednice oblouku promítнутý na osu x.



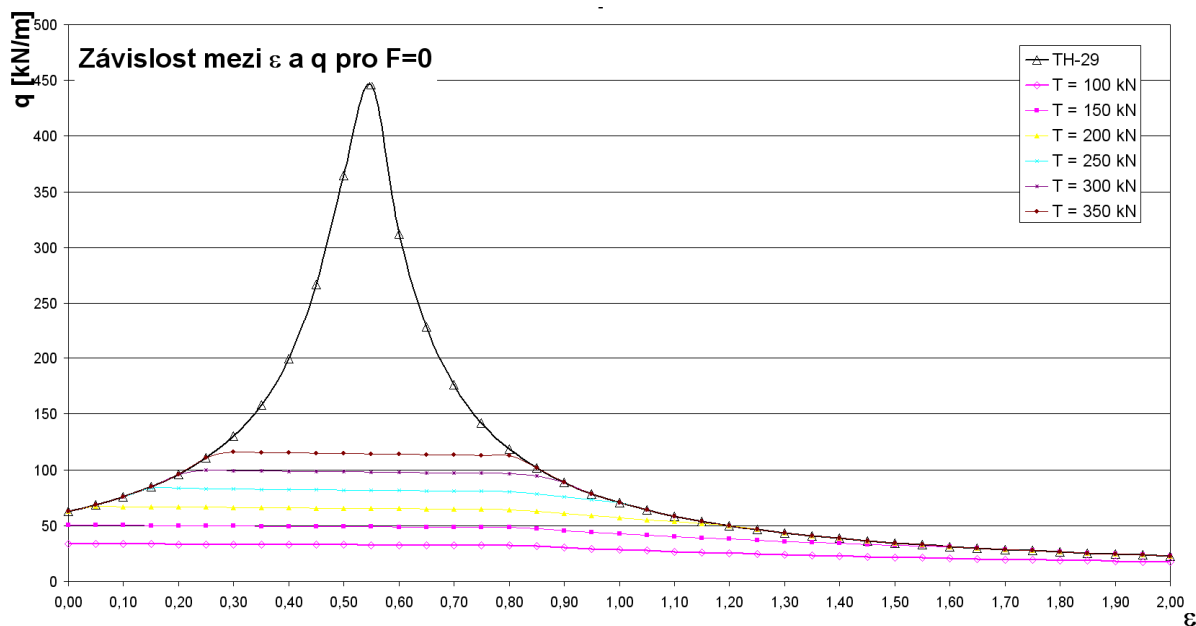
Obr. č. 13 Schéma tvaru výztuže s místem, kde působí síla F.



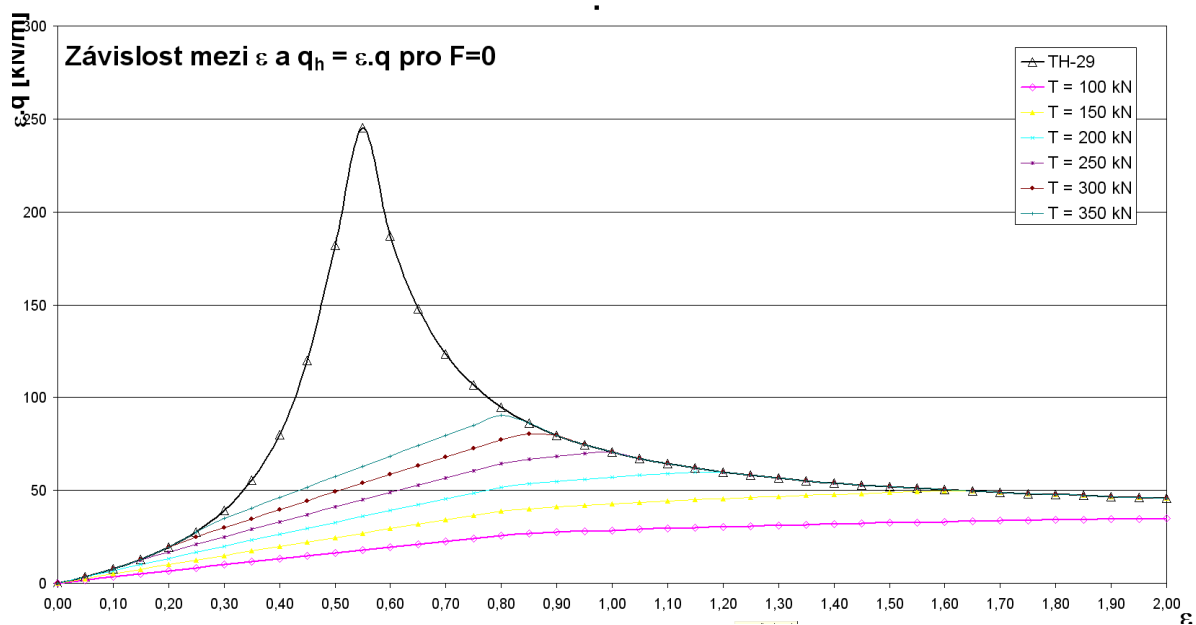
Obr. č.14 Průběh ohybového momentu M_{ci} [kNm] podél střednice oblouku.



Obr.č.15 Schéma průběhu posunutí δ [mm] střednice oblouku.

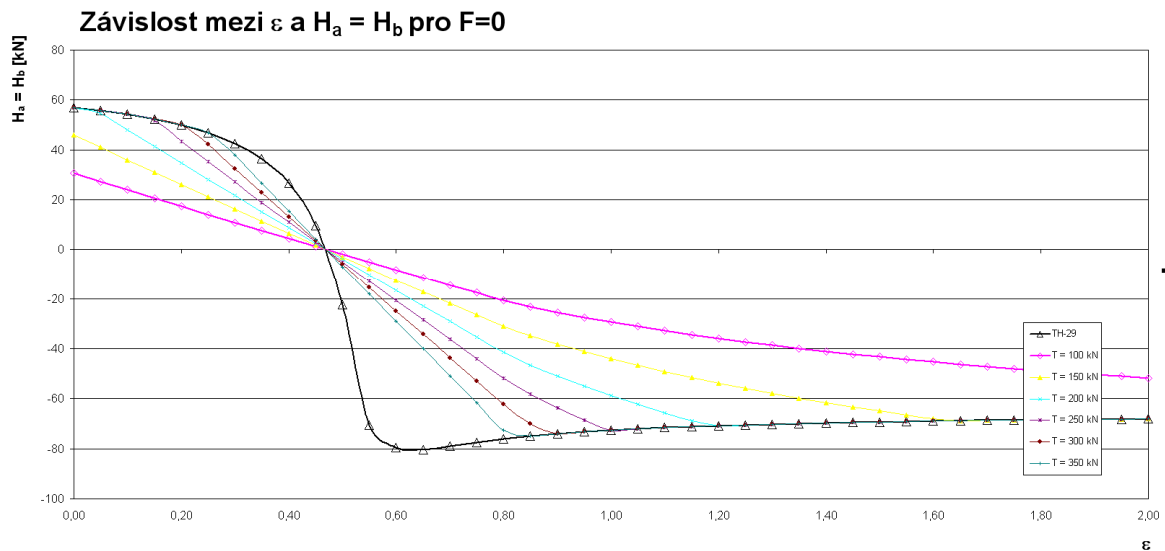


Obr.č.16 Graf únosnosti výztuže $q = f(\varepsilon)$ pro profil SP19/5/TH29/H500M.



Obr.č.17 Graf únosnosti výztuže $q_h = f(\varepsilon)$ pro profil SP19/5/TH29/H500M.

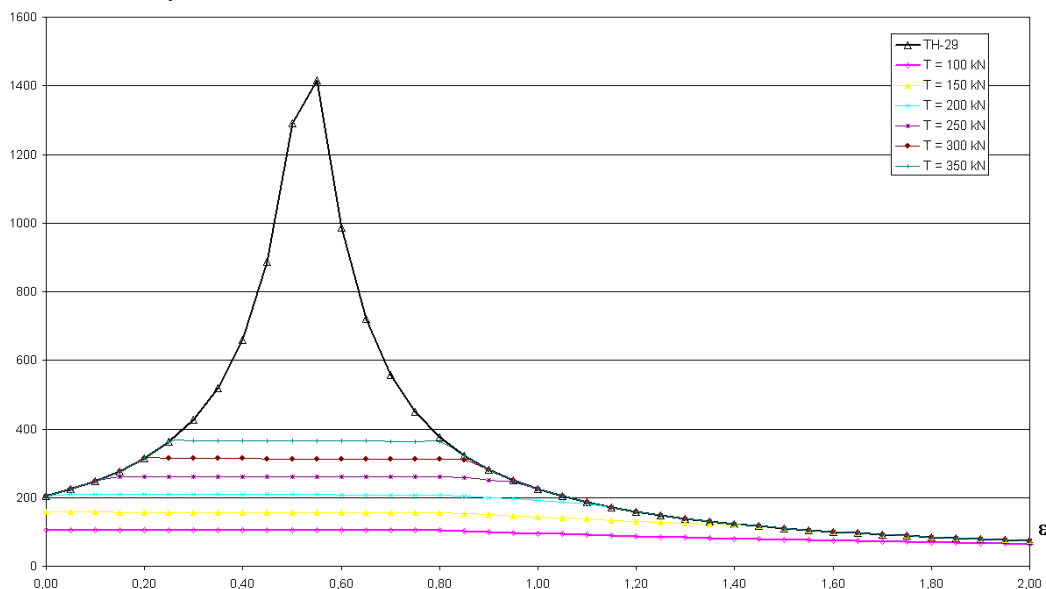
Z obr. 16 a 17 je zřejmé, že únosnost výztuže q a q_h se mění v širokých mezích a je kromě tvaru výztuže, hmotnostního stupně (a kvality oceli) závislá významně na zatížení charakterizované poměrem ε a dále na odporu proti prokluzu. Při malém odporu proti prokluzu ($T = 100\text{kN}$ na obr.16), se např. výztuž SP19/5/TH29 bude chovat prakticky vždy poddajně. Při odporu proti prokluzu $T = 350\text{kN}$ je tomu jinak, přičemž oblast poddajného chování výztuže je omezena na $0,25 \leq \varepsilon \leq 0,8$. Pro jiné hodnoty ε se výztuž chová nepoddajně. Je nutno připomenout, že obr. 16 platí pro $F=0$, tj. výztuž je zatížena pouze spojitě shora a z boků.



Obr.č. 18 Horizontální reakce $H_a=H_b$ [kN] výztuží SP19/5/TH29/H500M jako funkce ϵ .

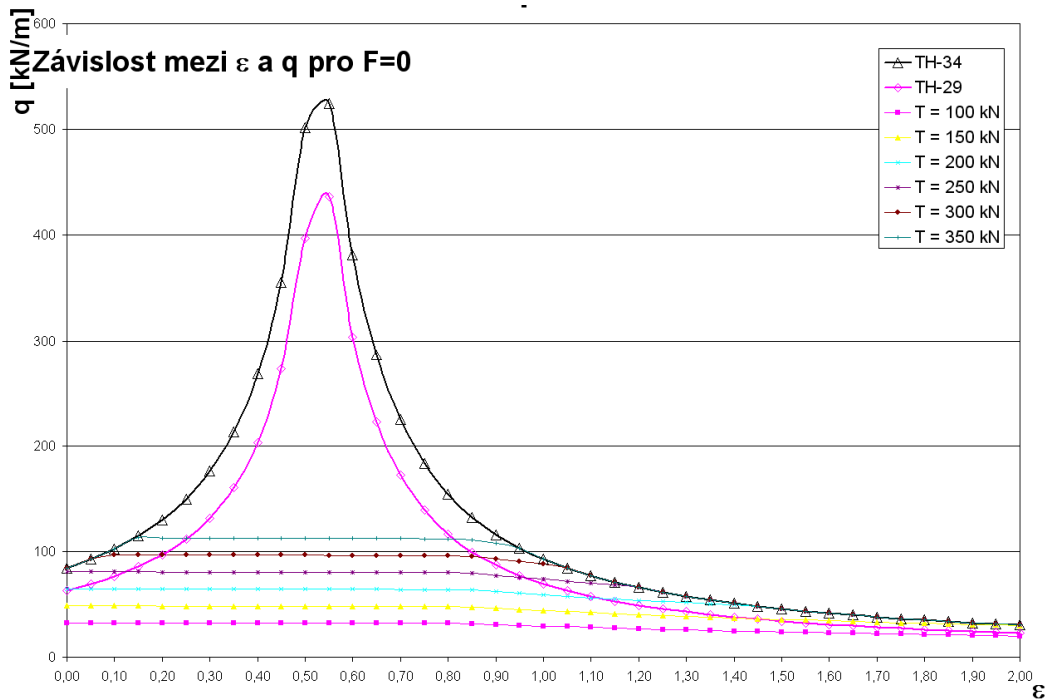
Na obr. 18 jsou uvedeny hodnoty horizontální reakce jako funkce hodnoty ϵ . Je-li hodnota H záporná, pak je směr horizontální reakce opačný než je označení na obr. 4, je-li kladná pak její směr odpovídá směru na tomto obrázku. Zajištění odpovídající horizontální síly je přitom podmínkou, aby se výztuž chovala v souladu se schématem zatížení na obr.4. Pokud tomu tak není, pak je únosnost jiná.

Obdobně je tomu pro zatížení ve svislém směru, viz obr. 19. Požadavky na přenášení svislých sil jsou v daných podmínkách podkladem pro dimenzování patek pod boční oblouky.



Obr. č. 19 Svislé reakce $R_a=R_b$ [kN] výztuže SP19/5/TH29/H500M jako funkce ϵ .

Pokud se na vstupním formuláři dle obr. 7 označí kromě výše uvedeného TH34, pak lze pro $F=0$ odečíst únosnosti q pro profil TH29 i pro profil TH34, viz obr. č. 20. Stejně lze vyvolat pro oba profily hodnoty q_h , $H_a=H_b$ a $R_a=R_b$.



Obr.č.20 Graf únosnosti výztuže $q = f(\epsilon)$ pro profil SP19/5/TH29 a TH34/H500M.

3.3 Některé příklady využití programu pro výpočet únosnosti výztuže

Jestliže výše uvedená oblouková výztuž SP19/5/TH29 byla tvořena pouze z kruhových dílů a byla symetrická, pak lze úplně stejně modelovat a určit únosnost výztuže např. s rovným stropním dílem, případně i výztuž nesymetrickou i výztuž, jejíž boční díly jsou částečně rovné a částečně zaoblené.

VÝPOVCH TH29/H500M a TH34/H500M

Výpočet číslo: 9 Počet oblouků: 5 Profil: TH-29 Norma oceli: H500M ϵ : 0

Délka oblouku L1 [mm]: 2500 Poloměr R1 [mm]: 3500 Přeplátování 1-2 [mm]: 400 EuroCode 3

Délka oblouku L2 [mm]: 927 Poloměr R2 [mm]: 700 Přeplátování 2-3 [mm]: 400 Graf ϵ/q

Délka oblouku L3 [mm]: 3000 Poloměr R3 [mm]: 250000 Přeplátování 3-4 [mm]: 400 Pro profily

Délka oblouku L4 [mm]: 927 Poloměr R4 [mm]: 700 Přeplátování 4-5 [mm]: 400 TH-29

Délka oblouku L5 [mm]: 2500 Poloměr R5 [mm]: 3500 TH-34

Osová síla
F: 0 [kN]
X: 2 [m]

Datum: 12/14/2013 Poznámka: Průběh: *** Konec výpočtu *** [9 sec.]

Výsledky

a: 5.658076 [m] H: 2.194262 [m]

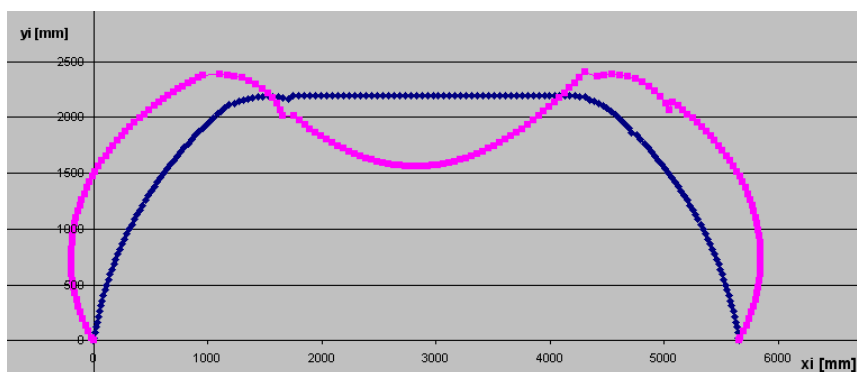
	Tmin = 187.20 kN	T = 100 kN	T = 150 kN	T = 200 kN	T = 250 kN	T = 300 kN	T = 350 kN
q [kN/m]	78,567	41,967	62,951	78,567	78,567	78,567	78,567
Q [kN]	444,536	237,455	356,182	444,536	444,536	444,536	444,536
Ha = Hb [kN]	114,447	61,133	91,7	114,447	114,447	114,447	114,447
Ra [kN]	222,268	118,727	178,091	222,268	222,268	222,268	222,268
Rb [kN]	222,268	118,727	178,091	222,268	222,268	222,268	222,268

Legenda: T ... odpor proti prokluzu
Tmin ... minimální únosnost nepoddajného spoje

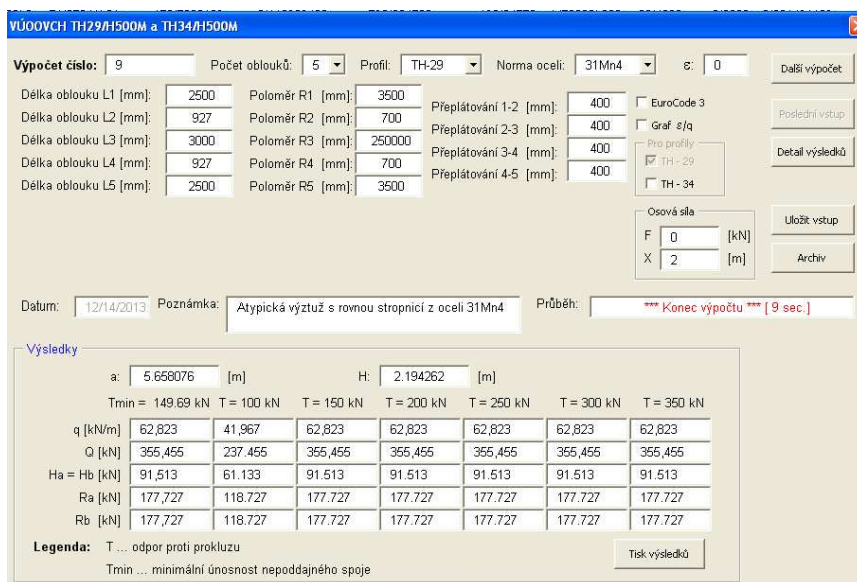
Tisk výsledků

Obr.č.21 Výpočet únosnosti výztuže s rovnou stropní částí z oceli H500/M.

Příklad zadání pro určení únosnosti výztuže s rovnou stropní částí včetně výsledků je na obr. č. 21. Jedná se o výztuž z profilu TH 29 z oceli H500M, jejíž rozměry a únosnost pro $\varepsilon = 0$ jsou zřejmé z obrázku. Byla modelována jako pětídílná. Rovná část stropnice je modelována z jednoho kusu tak, že se volil poloměr zakřivení $R_3=250\text{m}$. Výztuže se bude chovat nepoddajně pro odpor proti prokluzu $T>187\text{ kN}$. Z obr. č. 22 je zřejmý průběh ohybového momentu při tomto zatížení a rozměry výztuže. Z průběhu ohybového momentu lze snadno zjistit, kde jsou při daném zatížení výztuže kritická místa a řešit únosnost výztuže zdvojením některých částí a pod.



Obr. 22 Příklad symetrické výztuže s rovinnou stropní částí – průběh ohybového momentu.



Obr.č.23 Výpočet únosnosti výztuže s rovnou stropní částí z oceli 31Mn4.

Jestliže stejnou výztuž zadanou na obr. 21 zadáme v provedení z oceli 31Mn4, pak její únosnost bude nižší, což je zřejmé z obr. č. 23. Únosnost výztuže klesla z hodnoty 78,6kN/m při provedení z oceli H500M na hodnotu 62,8 kN/m při aplikaci ocele 31Mn4. Tato hodnota by se ještě dále snížila, pokud označíme před výpočtem políčko EuroCode3 (viz obr. č. 24). Hodnota únosnosti dosáhne $q=57,3\text{ kN/m}$. U

výztuže z oceli H500M je i při označení tohoto políčka (Euro Code 3) únosnost stejná, jako bez jeho označení. Toto neplatí u této oceli obecně. Je tomu tak proto, že při daném směru maximálního momentu, který limituje únosnost, je hodnota mezního momentu dle obou výpočtů (tj. dle normy Eurokód 3 a při aplikaci zvýšených mezních momentů) shodná.

VÝPOČTCH TH29/H500M a TH34/H500M

Výpočet číslo: 9 Počet oblouků: 5 Profil: TH-29 Norma oceli: 31Mn4 ϵ : 0

Délka oblouku L1 [mm]: 2500 Poloměr R1 [mm]: 3500
Délka oblouku L2 [mm]: 927 Poloměr R2 [mm]: 700
Délka oblouku L3 [mm]: 3000 Poloměr R3 [mm]: 250000
Délka oblouku L4 [mm]: 927 Poloměr R4 [mm]: 700
Délka oblouku L5 [mm]: 2500 Poloměr R5 [mm]: 3500

Přeplátování 1-2 [mm]: 400
Přeplátování 2-3 [mm]: 400
Přeplátování 3-4 [mm]: 400
Přeplátování 4-5 [mm]: 400

EuroCode 3
 Graf ϵ/q
 TH - 29
 TH - 34

Osová síla
F 0 [kN]
X 2 [m]

Datum: 12/14/2013 Poznámka: Průběh: *** Konec výpočtu *** [9 sec.]

Výsledky

a: 5.658076 [m] H: 2.194262 [m]

Tmin = 136.50 kN T = 100 kN T = 150 kN T = 200 kN T = 250 kN T = 300 kN T = 350 kN

q [kN/m]	57,287	41,967	57,287	57,287	57,287	57,287	57,287
Q [kN]	324,132	237,455	324,132	324,132	324,132	324,132	324,132
Ha = Hb [kN]	83,449	61,133	83,449	83,449	83,449	83,449	83,449
Ra [kN]	162,066	118,727	162,066	162,066	162,066	162,066	162,066
Rb [kN]	162,066	118,727	162,066	162,066	162,066	162,066	162,066

Legenda: T ... odpor proti prokluzu
Tmin ... minimální únosnost nepoddajného spoje

Obr.č.24 Výpočet únosnosti výztuže s rovnou stropní částí z oceli 31Mn4 dle Eurokód 3.

Jestliže u výztuže na obr. č.21 dle zadání na obr. č. 22 zkrátíme její jeden boční díl, např. pátý díl o délce $L_5 = 2,5$ m na 2 m (viz obr. č.25), dostaneme zcela nesymetrickou výztuž, jejíž rozměry a průběh ohybového momentu lze operativně zjistit, viz obr. 25. Je zřejmé, že i tvar výztuže se při daném zatížení podstatně podílí na průběhu ohybového momentu a ostatních vnitřních sil a tedy i na únosnosti výztuže. Obdobně jako průběh ohybového momentu lze vyvolat a graficky zobrazit také průběh ostatních složek vnitřních sil, případně i průhyby respektive deformace konstrukce ocelové výztuže.

Na obr. 27 je příklad zadání výztuže tvořené čtyřmi díly. Boční díly této výztuže jsou částečně rovné a částečně zaoblené. V tomto případě lze výztuž formálně považovat za šestidílnou s tím, že boční díly mají v rovném úseku velký poloměr zakřivení a nulové překrytí a v zaoblené části pak zadaný poloměr zakřivení. Průběh ohybového momentu po střednici výztuže je patrný z obr. 28. Zalomený průběh ohybového momentu pro $x=2,5$ m je dán působící silou $F = 40$ kN.

VÝPOVCH TH29/H500M a TH34/H500M

Výpočet číslo: 10 Počet oblouků: 5 Profil: TH-29 Norma oceli: H500M ε: 0

Délka oblouku L1 [mm]: 2500 Poloměr R1 [mm]: 3500 Přeplátování 1-2 [mm]: 400 EuroCode 3
Délka oblouku L2 [mm]: 927 Poloměr R2 [mm]: 700 Přeplátování 2-3 [mm]: 400 Graf ε/q
Délka oblouku L3 [mm]: 3000 Poloměr R3 [mm]: 250000 Přeplátování 3-4 [mm]: 400 Pro profily
Délka oblouku L4 [mm]: 927 Poloměr R4 [mm]: 700 Přeplátování 4-5 [mm]: 400 TH - 29
Délka oblouku L5 [mm]: 2000 Poloměr R5 [mm]: 3500 TH - 34

Osová síla
F 0 [kN] Uložit vstup
X 2 [m] Archiv

Datum: 12/15/2013 Poznámka: Asymetrická výztuž, příklad zadání a výpočtu Průběh: *** Konec výpočtu *** [8 sec.]

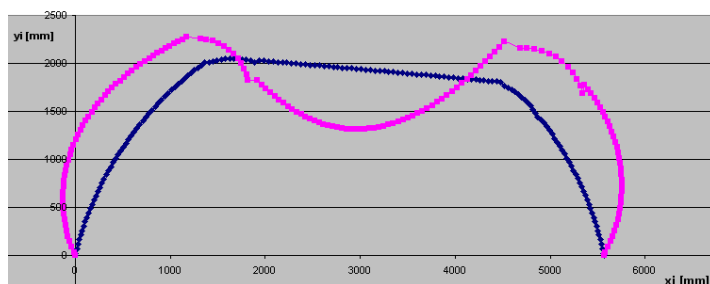
Výsledky
a: 5.566953 [m] H: 2.051045 [m]
Tmin = 226.32 kN T = 100 kN T = 150 kN T = 200 kN T = 250 kN T = 300 kN T = 350 kN

q [kN/m]	87,26	38,554	57,832	77,109	87,26	87,26	87,26
Q [kN]	485,772	214,631	321,946	429,261	485,772	485,772	485,772
Ha = Hb [kN]	140,814	62,216	93,324	124,432	140,814	140,814	140,814
Ra [kN]	242,886	107,315	160,973	214,631	242,886	242,886	242,886
Rb [kN]	242,886	107,315	160,973	214,631	242,886	242,886	242,886

Legenda: T ... odpor proti prokluzu
Tmin ... minimální únosnost nepoddajného spoje

Tisk výsledků

Obr. č. 25 Příklad asymetrické výztuže – zadání a výpočet únosnosti.



Obr. č. 26 Příklad asymetrické výztuže – průběh ohybového momentu.

VÝPOVCH TH29/H500M a TH34/H500M

Výpočet číslo: 11 Počet oblouků: 6 Profil: TH-29 Norma oceli: H500M ε: 0

Délka oblouku L1 [mm]: 1300 Poloměr R1 [mm]: 250000 Přeplátování 1-2 [mm]: 0 EuroCode 3
Délka oblouku L2 [mm]: 1075 Poloměr R2 [mm]: 2500 Přeplátování 2-3 [mm]: 450 Graf ε/q
Délka oblouku L3 [mm]: 2900 Poloměr R3 [mm]: 2500 Přeplátování 3-4 [mm]: 450 Pro profily
Délka oblouku L4 [mm]: 2900 Poloměr R4 [mm]: 2500 Přeplátování 4-5 [mm]: 450 TH - 29
Délka oblouku L5 [mm]: 1075 Poloměr R5 [mm]: 2500 Přeplátování 5-6 [mm]: 0 TH - 34

Osová síla
F 40 [kN] Uložit vstup
X 2,5 [m] Archiv

Datum: 16.12.2013 Poznámka: Čtyřdílná oblouková výztuž s část, rovnými boč, díly Průběh: *** Konec výpočtu *** [5 sec.]

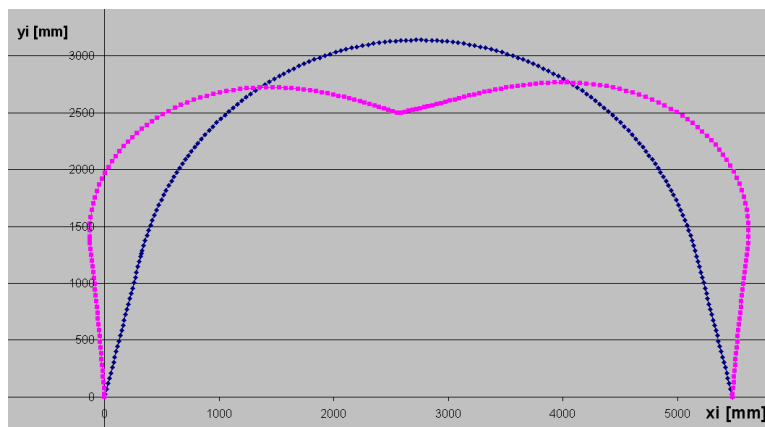
Výsledky
a: 5.482280 [m] H: 3.139622 [m]
Tmin = 242.29 kN T = 100 kN T = 150 kN T = 200 kN T = 250 kN T = 300 kN T = 350 kN

q [kN/m]	84,013	29,3	48,525	67,751	84,013	84,013	84,013
Q [kN]	460,583	160,629	266,029	371,428	460,583	460,583	460,583
Ha = Hb [kN]	97,183	41,034	60,764	80,494	97,183	97,183	97,183
Ra [kN]	252,051	102,074	154,774	207,474	252,051	252,051	252,051
Rb [kN]	248,532	98,555	151,255	203,955	248,532	248,532	248,532

Legenda: T ... odpor proti prokluzu
Tmin ... minimální únosnost nepoddajného spoje

Tisk výsledků

Obr. č. 27 Příklad 4-dílné výztuže s bočními díly částečně rovnými a částečně zaoblenými.



Obr. č. 28 Průběh ohybového momentu po střednici výztuže pro zadání dle obr. 27.

Při označení Tisk výsledků se objeví data, která byla pro dané zadání a vypočtena, viz. obr. 29.

Autoři: Petr Janas, Karel Janas

Katedra stavební mechaniky FAST, VŠB - TU Ostrava

*Výpočet únosnosti ocelových obloukových výztuží
(VÚOOVCH TH29/H500M a TH34/H500M)
Zpracováno v rámci řešení projektu TA ČR TA01010838*

Výpočet: 11

Datum zpracování: 16.12.2013

Vstupní hodnoty:

Počet oblouků: 6 Profil: TH-29 Norma oceli: H500M Epsilon: 0 EuroCode 3: Ne

Výsledky:

Hodnoty pro T_{min} = 242,29 kN

$q=84,013$ [kN/m] $Q=460,583$ [kN] $H_a = H_b: 97,183$ [kN] $R_a=252,051$ [kN] $R_b=248,532$ [kN]

Hodnoty pro $T = 100$ [kN]

$q=29,3$ [kN/m] $Q=160,629$ [kN] $H_a = H_b: 41,034$ [kN] $R_a=102,074$ [kN] $R_b=98,555$ [kN]

Hodnoty pro $T = 150$ [kN]

$q=48,525$ [kN/m] $Q=266,029$ [kN] $H_a = H_b: 60,764$ [kN] $R_a=154,774$ [kN] $R_b=151,255$ [kN]

Hodnoty pro $T = 200$ [kN]

$q=67,751$ [kN/m] $Q=371,428$ [kN] $H_a = H_b: 80,494$ [kN] $R_a=207,474$ [kN] $R_b=203,955$ [kN]

Hodnoty pro $T = 250$ [kN]

$q=84,013$ [kN/m] $Q=460,583$ [kN] $H_a = H_b: 97,183$ [kN] $R_a=252,051$ [kN] $R_b=248,532$ [kN]

Hodnoty pro $T = 300$ [kN]

$q=84,013$ [kN/m] $Q=460,583$ [kN] $H_a = H_b: 97,183$ [kN] $R_a=252,051$ [kN] $R_b=248,532$ [kN]

Hodnoty pro $T = 350$ [kN]

$q=84,013$ [kN/m] $Q=460,583$ [kN] $H_a = H_b: 97,183$ [kN] $R_a=252,051$ [kN] $R_b=248,532$ [kN]

Obr. č. 29 Tisk výsledků.

3.4 Využití archivovaných dat

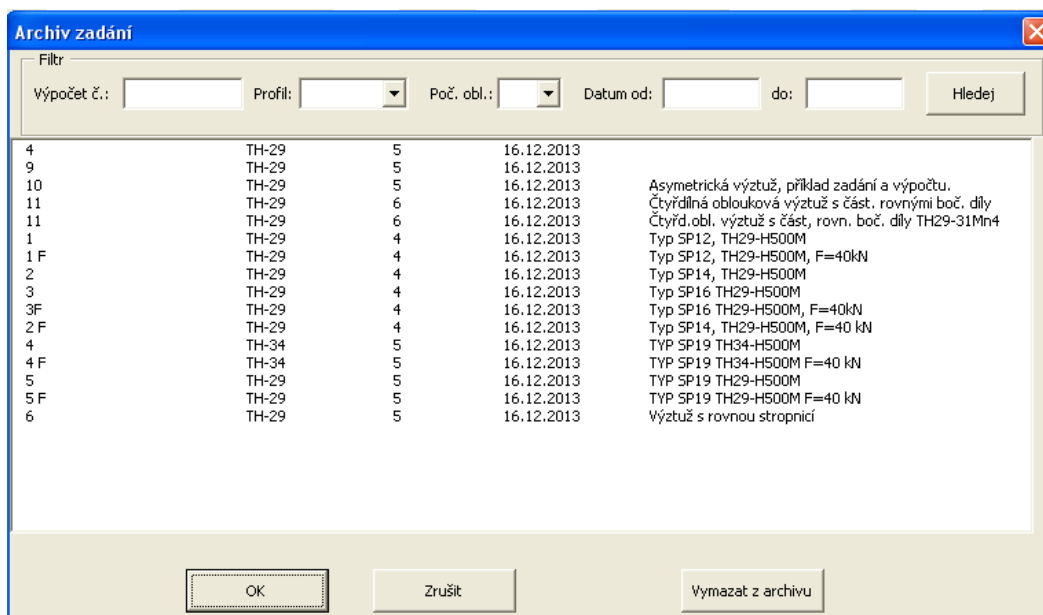
Výpočty únosnosti ocelových výztuží probíhají poměrně velmi rychle a je proto prakticky zbytečné archivovat rozsáhlé soubory výpočtů s výsledky. Podstatně operativnější je ukládat vstupní data, která nás dovedou, pokud neděláme

nepřípustné zásahy do programu, vždy ke stejným výsledkům. Archivace vstupních dat je jednoduchá a byla již objasněna. Jejich vyvolání je možné tlačítkem **Archiv** na vstupním případně i na výstupním formuláři.

Chceme-li výpočet s uloženými vstupními daty opakovat, pak je nezbytné nejdříve kliknout myší na tlačítko **Další výpočet**. Následně vyvoláme uložená vstupní data tlačítkem **Archiv**. Potřebné hodnoty lze vyhledat pomocí několika klíčů a to:

- číslo výpočtu
- profil
- počet oblouků (dílů)
- datum realizace od – do.

po kliknutí na tlačítko **Hledej**. Vstupní data, která chceme zadávat se takto na seznamu podstatně omezí. Vstup, jehož výpočet chceme opakovaně realizovat, se označí myší



Obr. č.30 Vyhledávání vstupních dat v archivu.

Vstupní data, která chceme zadávat se takto na seznamu podstatně omezí. Vstup, jehož výpočet chceme opakovaně realizovat, se označí myší (viz obr.30) a po zmáčknutí tlačítka **OK** se načtou hodnoty pro opakovaný výpočet. Následně se pokračuje jako obvykle, tj. zmáčkne se tlačítko **Výpočet**.

Po kliknutí na tlačítko **Zrušit** se dostaneme zpět na vstupní či výstupní formulář. Označená data v archivu lze vymazat po kliknutí na tlačítko **Vymazat z archivu**.

3. Závěr

Program *Výpočet únosnosti ocelových obloukových výztuží chodeb – VÚOOVCH TH29/H500M a TH34/H500M* je určen pro řešení řady úloh, které vznikají při vyvíjení, navrhování a posuzování otevřených obloukových ocelových výztuží dlouhých důlních a podzemních děl v nejrůznějších podmínkách při aplikaci nové oceli H500M, případně pro srovnání oceli 31Mn4. Program umožňuje do výpočtu zahrnout zatížení výztuže svíslou osovou silou působící v zadaném místě. Její hodnota ovlivňuje únosnost výztuže, která je daná přípustným spojitým zatížením působícím na výztuž shora, případně také z boků důlního či podzemního díla.

U nepoddajných výztuží je pro únosnost limitujícím faktorem dosažení mezního stavu v libovolném místě výztuže charakterizovaným mezními plastickými momenty a mezní normálovou silou. Stanovení jejich hodnot odpovídá poznatkům o vlastnostech používaných ocelí, průřezových charakteristik jednotlivých profilů a výsledkům realizovaných ohybových zkoušek na rovných tyčích získaných především při řešení projektu TA ČR: TA01010838: Výzkum a vývoj technologie výroby důlních ocelových výztuží vyráběných řízeným válcováním .

Každá výztuž, konstruovaná jako poddajná tím, že jednotlivé její díly se spojují třmenovými nebo šroubovými spoji, se může chovat poddajně i nepoddajně. Příčin této skutečnosti je více a byly do značné míry uvedeny. Patří k nim bezesporu i odpor proti prokluzu jednotlivých spojovaných dílů. Ve výpočtech se předpokládá jeho znalost, která by se měla pro jednotlivé profily z různých materiálů a pro různé spojovací prvky a utahování třmenů případně šroubů zjišťovat a ověřovat experimentálně. Použití teoreticky stanovených hodnot odporu proti prokluzu bez experimentů je nevhodné a nelze je doporučit. Otázkou je rozmezí hodnot odporu proti prokluzu, se kterými se má u poddajných výztuží z různých tvarů a velikostí, profilů a oceli počítat. Ty lze jistě dle potřeby upřesnit.

Do programu *Výpočet únosnosti ocelových obloukových výztuží chodeb – VÚOOVCH TH29/H500M a TH34/H500M* je nepřípustné zasahovat bez souhlasu autorů programu. V případě, že se při aplikaci programu objeví nejasnosti nebo problémy, obraťte se, prosím, na autory. Budou vděční rovněž za poznatky, zkušenosti a náměty, které uživatele programu při jeho aplikacích získají.

Literatura

1. Janas,P., Bláha, F., Dimenzování ocelové výztuže dlouhých důlních děl, křížů a odboček v podmínkách ostravsko.karvinského revíru, *časopis Uhlí*, roč. 35/1987, č.9,s.402-409.
2. Janas,P., Bláha, F., Metodika stanovení výpočtového zatížení a dimenzování výztuže odboček a křížů v podmínkách OKD, Vzdělávací středisko OKD, Ostrava, 1981.
3. Janas,P. a kol., Spolehlivost ocelových výztuží dlouhých důlních děl, závěrečná zpráva projektu GA ČR 105/01/0783, FAST VŠB TU Ostrava, leden 2004.
4. VVUÚ Ostrava-Radvanice: Odborné posudky a zkušební protokoly.
5. Zkušební protokoly INH Ostrava, 2001, 2002, 2003, 2004.
6. Janas,P. a kol., Spolehlivost ocelových výztuží dlouhých důlních děl při rázovém zatížení, závěrečná zpráva projektu GA ČR 105/04/0458, FAST VŠB TU Ostrava, leden 2007.
- 7.Janas,P., Koubová,L. Modelové a experimentální ověřování vlastností a únosnosti ocelové obloukové výztuže, 11. mezinárodní konference Modelování v mechanice 2013,FAST VŠB TU Ostrava, sborník str.27-28, plné znění CD-ROM (ISBN 978-80-248-2985-2).
- 8.Janas, P., Kološ, I., Fojtík, R., Zatřídění profilů ocelové důlní výztuže podle klasifikace EC3, Structural and Physical Aspects of Civil Engineering, Stavebná fakulta TU v Košicích 2013.
- 9.ČSN EN 1993-1-1 ed. 2 (731401). Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.