

Inž. Antonín H i l s e , VÚHU:

MODELOVÁNÍ NAPĚTÍ KRUHOVÝCH VÝZTUŽNÍCH PRVKŮ POMOCÍ EKVIVALENTNÍHO MATERIÁLU

Při řešení výztuže základního větrního okruhu bývalého Západního pole dolu Kohinoor se naskytla otázka možnosti kombinace dvou výztužních prvků s různou tuhostí.

Tato otázka byla vyvolána úvahou, zda by nebylo možno snížit náklady na výztuž dlouhodobých otvirkových chodeb, budovaných v proplástkovité přechodové části mezi hlavní a spodní slojí kombinací nepoddajných výztužních prvků s vysokou provozní nákladovostí s levnějšími prvky méně tuhými. Konkrétně se jednalo o možnost kombinace celokruhové betonové čtyřdílné panelové výztuže s celokruhovou nepoddajnou výztuží ocelovou.

Z hornické praxe je známo, že při kombinaci tuhých (podpěrných) a méně tuhých výztužních elementů dochází ke koncentraci napětí na tuhé prvky, které jsou tedy namáhány více než prvky méně tuhé.

Průběh napětí v obou skupinách prvků nelze určit početně, protože analytická řešení průběhu napětí na líci důlního díla jsou známa zatím jen ve formě rovinné - jsou vyšetřována v řezech, kolmých k ose chodby, takže vypočtená reakce výztuže - resp. její průběh - nepostihne vliv změny tuhosti výztuže ve směru podélné osy.

Prakticky by byla uvažovaná kombinace reálná tehdy, kdyby došlo k takovému rozdělení napětí, že by koncentrace napětí na podpěrné elementy a očekávané odlehčení pásma chodby v lehčí výztuži zaručovalo dostatečnou provozní bezpečnost obou typů výztužních prvků důlního díla.

K řešení této otázky bylo přistoupeno experimentálně - modelováním prvků výztuže různé tuhosti a jejich zatěžováním ekvivalentním materiálem při současném měření napětí obou typů modelové výztuže.

Princip modelování

Jednotlivé základní alternativní modely výztuže byly navrženy jako kruhový tubus, sestávající z ocelových kroužků různé tuhosti. Při stejné délce úseku, modelujícího tužší výztuž, byla měněna délka úseku méně tuhé výztuže. Poměr délek úseků jednotlivých tuhostí byl modelován v alternativách 1:4, 1:2 a 1:1.

Jednotlivé kroužky, modelující oba typy výztuže, byly zvoleny o vnitřním průměru 80 mm při měřítku modelování 1:50 (odpovídá 4,0 m skutečné chodby) a délce 24 mm (odpovídá 1,2 m).

Rozdíl v tuhosti jednotlivých úseků modelované chodby byl dosažen různou tloušťkou kroužků. Jelikož při modelování nadloží balotinou bylo možno očekávat tlaky řádově okolo kpcm^{-2} , bylo třeba navrhnout tloušťku kroužků při uvedených zvolených ostatních rozměrech tak, aby odpovídala přibližně poměru tuhostí skutečných výztužných pruhů, a aby byla současně modelovým nadložím vzniklá napětí měřitelná odporovými tenzometry s přijatelnou přesností.

Skutečná tuhost uvažovaných výztužných prvků na 1 bm chodby:

a) Při výztuži betonové - panelové:

$$E_B I_B = 2,0 \cdot 10^5 \text{ kpcm}^{-2} \cdot 100 \cdot 14^3 \cdot 12^{-1} \cdot \text{cm}^4 = 4,56 \cdot 10^9 \text{ kpcm}^2$$

b) Při nepoddajné výztuži kruhové ocelové - profilu K 21 - rozteči 1,0 m:

$$E_{01} I_{01} = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kpcm}^{-2} \cdot 318 \text{ cm}^4 = 0,67 \cdot 10^9 \text{ kpcm}^2$$

c) Dtto při rozteči kruhů 0,5 m:

$$E_{02} I_{02} = 2 \cdot E_{01} I_{01} = 2 \cdot 0,67 \cdot 10^9 \text{ kpcm}^2 = 1,34 \cdot 10^9 \text{ kpcm}^2$$

Jestliže pro modelovou podobnost platí vztah:

$$\frac{1}{\alpha n} = \frac{n_m}{n_s}, \text{ kde } \frac{1}{\alpha n} = \text{měřítko veličin } n \text{ na modelu - v našem případě}$$

$$\frac{1}{\alpha n} = \frac{1}{50}$$

(index m = modelový

index s = skutečný)

bude pro momenty setrvačnosti platit:

a) Pro výztuž betonovou:

$$I_{SB} = \frac{b_{SB} h_{SB}^3}{12} \text{ cm}^4$$

kde $b_{SB} = 100 \text{ cm}$, $h_{SB} = 14 \text{ cm}$, tedy:

$$I_{SB} = \frac{100 \cdot 14^3}{12} \text{ cm}^4 = 22\,800 \text{ cm}^4$$

$$I_{mB} = \frac{b_m \cdot h_m^3}{12} \text{ cm}^4$$

kde $b_m = \frac{b_s}{\alpha n}$; $h_m = \frac{h_s}{\alpha n}$, tedy

$$I_{mB} = \frac{b_s}{\alpha n} \cdot \frac{h_s^3}{\alpha n^3} \cdot \frac{1}{12} \text{ cm}^4 = \frac{b_s h_s^3}{12 \alpha n^4} \text{ cm}^4 = \frac{100 \cdot 14^3}{12 \cdot 50^4} \text{ cm}^4 =$$

$$= 3,65 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^4$$

b) Pro výztuž ocelovou (s převedením I_s na obdélník):

$$I_{S01} = 318 \text{ cm}^4$$

$$b_{S01} = 100 \text{ cm}$$

$$h_{S01} = \sqrt[3]{\frac{12 I_{01}}{b_{01}}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 318}{100}} = 3,36 \text{ cm (1 kruh/bm)}$$

$$h_{S02} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 12 \cdot I_{01}}{b_{01}}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 12 \cdot 318}{100}} = 4,23 \text{ cm (2 kruhy/bm)}$$

potom

$$I_{m01} = \frac{b_{S01}}{\alpha_n} \cdot \frac{h_{S01}^2}{\alpha_n^3} \cdot \frac{1}{12} = \frac{100 \cdot 3,36}{12 \cdot 50^4} = 5,07 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^4$$

$$I_{m02} = \frac{b_{S02}}{n} \cdot \frac{h_{S02}^3}{n^3} \cdot \frac{1}{12} = 2 I_{m01} = 1,014 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^4$$

Výsledné momenty setrvačnosti výztuže na 1 bm chodby možno pro přehlednost seřadit do tabulky:

	Betonové panely	Ocel.kruhová K 21 rozteč 1 m	Ocel.kruhová K 21 rozteč 0,5 m
Skutečné momenty výztuže J_s	$2,28 \cdot 10^4 \text{ cm}^4$	$3,18 \cdot 10^2 \text{ cm}^4$	$6,36 \cdot 10^2 \text{ cm}^4$
Modelové momenty I_m	$3,65 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^4$	$5,07 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^4$	$1,014 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^4$

Jak patrně, je nutno v modelu pracovat s velmi malými momenty setrvačnosti, řádově 10^7 krát menšími než u skutečné výztuže. Protože by bylo obtížné modelovat rozdílnost materiálu obou výztuží, byla tloušťka h ocelových kroužků modelu přizpůsobena modelům pružnosti tak, aby poměr tuhostí zůstal zachován.

Modelujeme-li tedy betonovou panelovou výztuž (o větší tuhosti) ocelovými kroužky, nutno modelový moment setrvačnosti této výztuže snížit úměrně poměru modulů pružnosti obou materiálů, tj.

$$\frac{2,1 \cdot 10^6}{2,0 \cdot 10^5} = 10,5 \text{ krát.}$$

Potom bude výsledný moment setrvačnosti modelových elementů výztuže o větší tuhosti (index n):

$$I_n = \frac{I_m}{10,5} = \frac{3,65 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^4}{10,5} = 3,48 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^4$$

Moment setrvačnosti modelových ocelových kroužků menší tuhosti (index p) zůstane zachován:

$$I_{p1} = 5,07 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^4 \text{ (ekvivalent. rozteči kruhů 1,0 m)}$$

$$I_{p2} = 1,014 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^4 \text{ (" " " 0,5 m)}$$

Z takto vypočtených modelových momentů setrvačnosti možno již vyčíslit tloušťku modelových elementů o větší a menší tuhosti - $h_n = h_{p1,2}$

$$h_n = \sqrt[3]{\frac{12 I_n}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 3,48 \cdot 10^{-6}}{2}} = 1,28 \text{ mm}$$

$$\text{kde } b = \frac{100 \text{ cm}}{\alpha} = \frac{100 \text{ cm}}{50} = 2 \text{ cm}$$

$$h_{p1} = \sqrt[3]{\frac{12 I_{p1}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 50,7 \cdot 10^{-6}}{2}} = 0,67 \text{ mm}$$

$$h_{p2} = \sqrt[3]{\frac{12 I_{p2}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 101,4 \cdot 10^{-6}}{2}} = 0,85 \text{ mm}$$

Poměr tuhostí kroužků takto vypočtené tloušťky bude:

$$E_n I_n : E_{p2} I_{p2} : E_{p1} I_{p1} = 3,48 : 1,014 : 0,507 = 6,88 : 2 : 1,$$

což odpovídá i poměru tuhostí skutečných výztuží.

Výroba modelových prvků uvedené tloušťky h se ukázala značně náročnou. Jelikož dílna našeho ústavu není vybavena brousícími stroji do kulata, bylo možno jednotlivé kroužky pouze soustružit z ocelové trubky.

Aby nedocházelo k nežádoucím vibracím, byl nejprve přesně obroben vnitřní průměr, potom trubka navlečena na trn a soustružen průměr vnější. Ani při tomto postupu se však nepodařilo dodržet přijatelné tolerance tloušťky kroužku, která byla nestejná i po obvodu.

Při výrobě kroužků o síle 0,67 mm dosahoval rozptyl mikrometrem měřených hodnot až 0,1 mm, čemuž odpovídají změny momentu setrvačnosti až o 50 %. Protože nutno předpokládat, že takovéto rozdíly od jmenovitých hodnot by úplně desorientovaly výsledky měření napětí na jednotlivých modelových prvcích a protože vzhledem k termínu pokusných prací nebylo možno zadat výrobu externě (broušení do kulata v přípravku s použitím přesných měřidel), bylo nutno provést určité úpravy tloušťky kroužků a jejich umístění v modelu provést na základě měření skutečných deformací.

Jelikož účelem pokusů nebylo zjištění absolutních hodnot napětí, ale jen hodnot poměrných, byla z výrobních důvodů zvolena pro méně tuhé prvky (h_{p2}) síla kroužku 0,9 mm - měřeno mikrometrem, což odpovídá skutečné tloušťce $h_p = 0,975$ mm (1,15 mm měřeno mikrometrem). Poměr momentů setrvačnosti a tedy i skutečných tuhostí byl takto snížen na

$$E_n I : E_p I = \frac{h_n^3}{h_p^3} = \frac{0,975^3}{0,725^3} = 2,43 : 1$$

Zmíněná úprava tloušťky kroužků byla provedena jednak kvůli zvýšení tuhosti do té míry, aby pak při výrobě bylo možno dosáhnout přijatelné přesnosti tloušťky (h_p), jednak proto, aby byla zachována dostatečná citlivost měření i u silnějších kroužků (h_n), znázorňujících výztužné elementy větší tuhosti. Snížení poměru tuhostí nemá pro sledovaný záměr - hrubé zjištění relativního průběhu napětí na modelových úsecích chodby s výztužením různé tuhosti - zásadní vliv.

Ani tato úprava však neumožnila za daných výrobních podmínek dostatečně přesné zhotovení modelových prvků (kroužků) tak, aby bylo dosaženo max. odchylek rozměru $h_p \pm 0,015 \text{ mm}$ u všech vyrobených kroužků (odpovídá ještě odchylce tuhosti $o \pm 6,5 \%$).

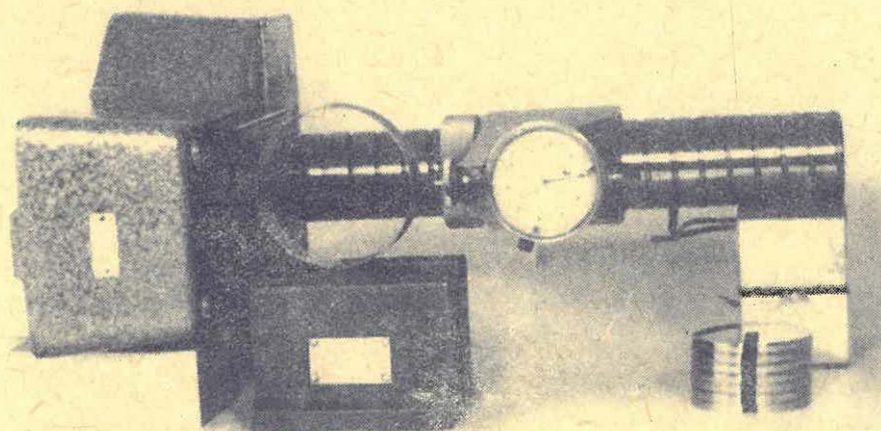
Aby byly eliminovány chyby, které by způsobily nežádoucí změny měřených napětí, bylo dále postupováno takto:

- a) Vyrobené kroužky byly změřeny mikrometrem a zjištěny změny tloušťky po obvodu (po 90°).
- b) Změřené kroužky byly seřazeny tak, aby pro střední část modelu bylo k dispozici 20 ks z vyrobených méně tuhých kroužků s nejmenšími odchylkami od jmenovité tloušťky $h_p = 0,725 \text{ mm}$ a 10 kroužků pro přilehlé úseky tuhé výztuže jmenovité tloušťky $h_n = 0,975 \text{ mm}$. Seřazení bylo provedeno symetricky podle příčné osové roviny modelu, aby tloušťky vzájemně si odpovídajících kroužků byly přibližně stejné.
- c) Ostatní kroužky s většími odchylkami od jmenovité hodnoty tloušťky byly použity pro okrajová pole modelu, kde nebyla měření napětí prováděna, ale která sloužila jen k vytvoření podmínek, odpovídajících průběžnému dlouhému dílu se střídajícími se úseky tužší a a méně tuhé výztuže.
- d) Proměřené kroužky ad b) - s nejmenšími odchylkami byly prověřeny po deformační stránce, tj. měřeny deformace vnitřního obvodu v určitém stabilizovaném místě při zatěžování kroužků sadou závaží. Definitivní výběr a uložení kroužků ve středním měřeném poli modelu byl proveden až na základě výsledků měření deformací, opět podle zásad symetrie modelu.

Proměřování deformací modelových prvků výztuže

Měřicí přípravek je na obr. č. 1. Kroužky byly uloženy do přípravku tak, aby hrot indikátoru ležel v horizontální osové rovině

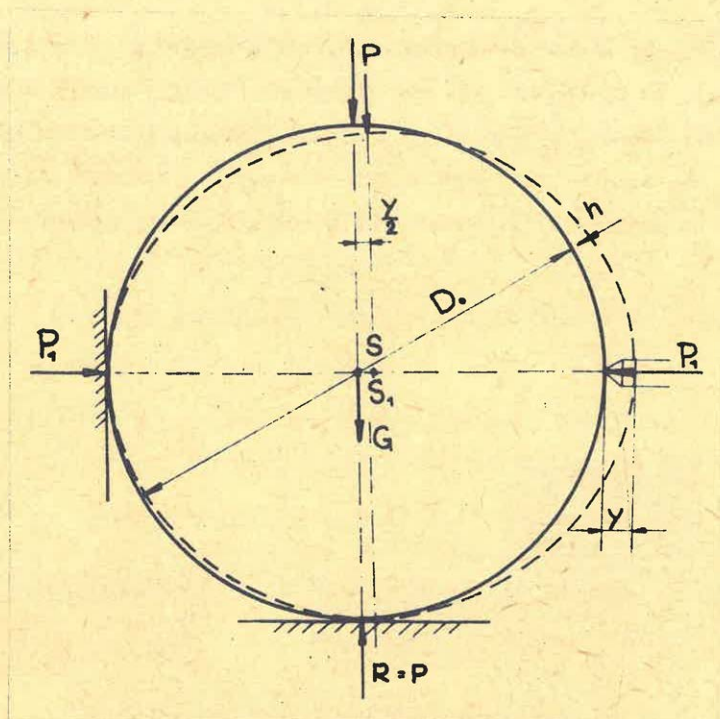
kroužku. Deformace byly vyvolány závažím po 100 g až do 1 000 g. Měření byla 5x opakována, aby byl získán statistický soubor a vypočteny střední hodnoty z jednotlivých měření. Závěrem byly kroužky seřazeny tak, aby střední část modelu byla sestavena z kroužků, jejichž deformace se nejvíce blížily deformacím teoreticky vypočteným.



Obr. č. 1

Pružnostní výpočet deformací

Výpočty deformací obou typů kroužků byly provedeny jako pro křivý prut kruhového tvaru, zatížený dvěma silami a jejich reakcemi, jak vyplývá ze statického náčrtku na obr. č. 2.



Obr. č. 2

Základní parametry výpočtu jsou:

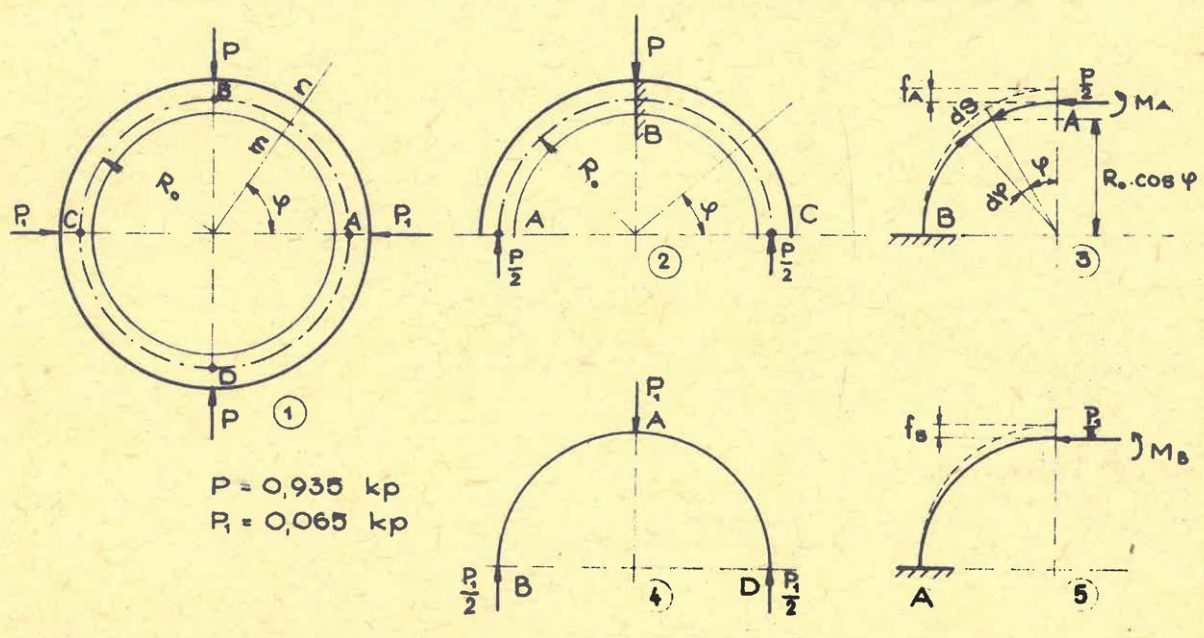
D_o	= vnitřní $\varnothing$ kroužku	= 78,3 mm
b	= šířka kroužku	= 24,0 mm
h_n	= síla nepoddajného kroužku	= 0,975 mm
h_p	= síla poddajného kroužku	= 0,725 mm
$P=R$	= svislá zatěž. síla a její reakce	= 0,1 až 1,0 kp
$P_1=R_1$	= horiz. síla zpružiny indikátoru a její reakce	= 0,065 kp

Momenty setrvačnosti

$$J_n = \frac{bh_n^3}{12} = \frac{2,4 \cdot 0,0975^3}{12} = 1,852 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^4$$

$$J_p = \frac{bh^3}{12} = \frac{2,4 \cdot 0,0725^3}{12} = 0,762 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^4$$

Výpočet deformace v měřeném místě je pro zjednodušení proveden superpozicí pro sílu $P = 1,0 \text{ kp}$ a $P_1 = 0,065 \text{ kp}$. Pomocná schémata jsou na obr. č. 3, poz. 1-5.



Obr. č. 3

1. Zatížení pouze silou $P = 1,0 \text{ kp}$

Podle schématu poz. 2 se pro souměrnost síly v průřezu $A-C = \frac{P}{2}$. Průřez $C-A$ se nenatočí. Čtvrtekruh $\widehat{AB}$ možno tedy považovat za křivý prut, vetknutý v bodě B, zatížený na volném konci silou $\frac{P}{2}$ a momentem M_A (obr. 3, poz. 3). Moment v bodě A - M_{A1} z podmínky, že úhel natočení $\phi_A = 0$:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{M M^0}{EJ} \cdot ds = 0 ; \quad M^0 = 1 \quad /1/$$

Moment M v libovolném bodě čtvrtkruhu:

$$M = M_{A1} + \frac{P R_0}{2} - \frac{P}{2} R_0 \cos \varphi = M_{A1} + \frac{P}{2} (1 - \cos \varphi) R_0 \quad /2/$$

$$ds = R_0 \cdot d\varphi \quad /3/$$

dosadíme do /1/:

$$\frac{1}{EJ} \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_{A1} R_0 d\varphi + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{P}{2} (1 - \cos \varphi) R_0^2 \cdot d\varphi = 0$$

po integraci:

$$M_{A1} \cdot R_0 \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{P}{2} R_0^2 \frac{\pi}{2} - \frac{P}{2} R_0^2 = 0$$

$$M_{A1} = \frac{\frac{P R_0^2}{2} - \pi \cdot \frac{P R_0^2}{4}}{\frac{\pi R_0}{2}} = -0,182 P R_0$$

Moment v bodě B při $\varphi = \frac{\pi}{2}$:

$$M_{B1} = M_{A1} + \frac{P}{2} R_0 (1 - \cos \varphi) = -0,182 P R_0 + 0,5 P R_0 = +0,318 P R_0$$

2. Zatížení pouze silou $P_1 = 0,065 \text{ kp}$

Analogicky bude podle obr. 3 poz. 4: normální síly v průřezu $B-0 = \frac{P_1}{2}$; průřez $B-0$ se nenatočí. Čtvrtkruh $\widehat{AB}$ = křivý prut, vetknutý v bodě A, zatížený na volném konci silou $\frac{P_1}{2}$ a momentem M_{B2} (obr. 3 - poz. 5).

Moment M_{B2} z podmínky, že úhel natočení $\varphi_B = 0$:

$$\int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{M M^0}{EJ} \cdot ds = 0; \quad M^0 = 1$$

$$M = M_{B2} + \frac{P_1 R_0}{2} - \frac{P_1 R_0}{2} \cos \varphi = M_{B2} + \frac{P_1}{2} (1 - \cos \varphi) R_0$$

a jako ad 1):

$$M_{B2} = - 0,182 P_1 R_0 \quad /4/$$

M_{A2} při $\varphi = \frac{\pi}{2}$:

$$M_{A2} = M_{B2} + \frac{P_1}{2} R_0 (1 - \cos \varphi) = + 0,318 P_1 R_0 \quad /5/$$

Celkový moment v bodě A:

$$M_A = M_{A1} + M_{A2} = - 0,182 P R_0 + 0,318 P_1 R_0 \quad /6/$$

Celkový moment v bodě B:

$$M_B = M_{B1} + M_{B2} = + 0,318 P R_0 - 0,182 P_1 R_0 \quad /7/$$

Poloměr neutrální osy:

$$R_{on} = \frac{D_o + 0,0975}{2} = \frac{7,83 + 0,0975}{2} = 3,9647 \text{ cm}$$

$$R_{op} = \frac{D_o + 0,0725}{2} = \frac{7,83 + 0,0725}{2} = 3,9512 \text{ cm}$$

Deformace v bodě B:

$$f_B = \int_S \frac{M_B M^0}{EJ} ds + \int_S \frac{N_B N^0}{EF} ds \quad (\text{Castiglian}) \quad /8/$$

druhý integrál výrazu /8/ výsledek prakticky neovlivní, takže jej nemusíme uvažovat ($EF \gg EJ$)

přibližně bude tedy:

$$\begin{aligned} f_{B_1} &= \int_S \frac{M_{B1} \cdot M_1^0}{EJ} ds = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{0,318 PR_o \cdot 0,318 R_o \cdot R_o d\varphi}{EJ} = \\ &= \frac{0,4987 PR_o^3}{EJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{B_2} &= \int_S \frac{M_{B2} \cdot M_2^0}{EJ} ds = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{-0,182 P_1 R_o - 0,182 R_o \cdot R_o d\varphi}{EJ} = \\ &= \frac{0,0520 P_1 R_o^3}{EJ} \quad /9/ \end{aligned}$$

$$f_B = f_{B1} - f_{B2} = \frac{R_o^3}{EJ} (0,4987 P - 0,052 P_1) \quad /10/$$

Deformace tužšího kroužku (R_{on})

$$\begin{aligned} f_{Bn} &= \frac{R_{on}^3}{EJ_n} \cdot (0,4987 P - 0,052 P_1) = \\ &= \frac{3,964^3}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 1,852 \cdot 10^{-4}} \cdot (0,4987 \cdot 1,0 - 0,052 \cdot 0,065) = \\ &= 0,792 \text{ mm} \end{aligned}$$

Deformace méně tuhého kroužku (R_{op})

$$f_{Bp} = \frac{R_{op}^3}{EJ_p} \cdot (0,4987 P - 0,052 P_1) = 1,91 \text{ mm}$$

Podobně lze vyčíslit deformace v bodě A:

$$\begin{aligned} f_A &= f_{A1} - f_{A2} = \int_S \frac{M_{A1} M_{A1}^0}{EJ} ds + \int_S \frac{M_{A2} M_{A2}^0}{EJ} \cdot ds = \\ &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{-0,182 P R_o - 0,182 R_o \cdot R_o d\varphi}{EJ} - \\ &\quad - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{0,318 P_1 R_o \cdot 0,318 R_o \cdot R_o d\varphi}{EJ} = \\ &= \frac{\pi R_o^3}{2 EJ} (0,182^2 P - 0,318^2 P_1) \quad /11/ \end{aligned}$$

Deformace těžšího kroužku v bodě A:

$$f_{An} = \frac{\pi R_{on}^3}{2 E J_n} (0,182^2 \cdot P - 0,318^2 P_1) =$$

$$= \frac{3,15 \cdot 3,964^3 (0,182^2 \cdot 1 - 0,318^2 \cdot 0,065)}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 1,852 \cdot 10^{-4}} = 0,133 \text{ mm}$$

Deformace slabého kroužku v bodě A:

$$f_{Ap} = \frac{R_{op}^3}{2 E J_p} (0,182^2 P - 0,318^2 P_1) = 0,321 \text{ mm}$$

Celkové deformace modelových prvků výztuže jsou potom:

Tužší modelový kroužek

Ve směru svislém -
stlačení:

$$Y_{B,Dn} = - 2f_{Bn} = - 2 \cdot 0,792 = - 1,58 \text{ mm}$$

vodorovném -
roztahení:

$$Y_{A,Cn} = + 2f_{An} = 2 \cdot 0,133 = + 0,266 \text{ mm}$$

Poddajnější modelový kroužek

stlačení:

$$Y_{B,Dp} = - 2f_{Bp} = - 2 \cdot 1,91 = - 3,82 \text{ mm}$$

roztahení:

$$Y_{A,Cp} = 2f_{Ap} = 2 \cdot 0,321 = + 0,622 \text{ mm}$$

V měřícím přípravku byly měřeny (obr. č. 1) deformace ve směru horizontálním, které odpovídají vypočteným hodnotám $Y_n = 0,266 \text{ mm}$ a $Y_p = 0,622 \text{ mm}$.

Maximální odchylka skutečné deformace méně poddajných kroužků byla po provedeném výběru 10 ks nejvíce odpovídajících kroužků cca - 16 % od vypočtené hodnoty, max. odchylka 5 ks poddajnějších kroužků cca - 5 %, což odpovídá průměrné diferenci v tloušťce kroužků cca 0,05 a 0,03 mm.

Popsaným, značně složitým způsobem se tedy podařilo snížit rozdíly tuhostí v jednotlivých skupinách měřených prvků. Přesto byly závěrečné výsledky modelování uvedenými nepřesnostmi do jisté míry ovlivněny, takže bylo možno učinit jen hrubé relativní závěry. Daleko jednodušší a účelnější by byla ovšem výroba co nej přesnějších, dokonale centrovaných kroužků broušením do kulata v přípravku, což však nebylo pro časovou tíseň externě proveditelné.

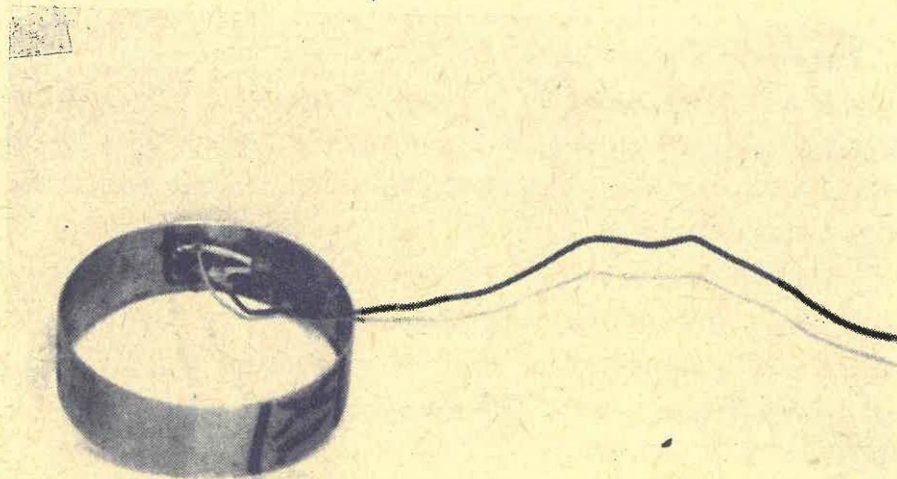
Cejchování modelových prvků výztuže před zabudováním:

Jelikož účelem měření nemohlo být zjišťování absolutních hodnot napětí po délce jednotlivých úseků modelové výztuže, ale jen relativní porovnání průběhu napětí, bylo cejchování modelových prvků provedeno zatěžováním stejným způsobem, jako při předcházejícím měření deformací, tj. závažími à 0,1 kp do celkové zatěžující síly 1,0 kp.

Deformace - tj. protažení vláken - byly měřeny na vnitřním obvodu kroužků odporovými tenzometry - měřícími můstky Phillips a Hottinger. Jednotlivé vybrané kroužky byly na vnitřním obvodě polepeny odporovými tenzometry M 120 a umístěny v přípravku podle obr. č. 1. Volný kroužek s tenzometrem je na obr. č. 4.

Při cejchování byly jednotlivé kroužky pootočený o 90° oproti původní poloze v přípravku tak, aby příčná osa tenzometru procházela pod nejvyšším bodem kroužku (strop modelové chodby). Byla tedy měřena max. deformace vnitřních vláken v závislosti na zatěžující síle.

Vlivy teplotních změn byly vyloučeny kompenzačním tenzometrem. Přesto docházelo na začátku cejchování při nejmenších zatěžovacích silách (0,1 - 0,2 kp) k odchylkám oproti teoreticky lineárnímu průběhu cejchovací křivky.



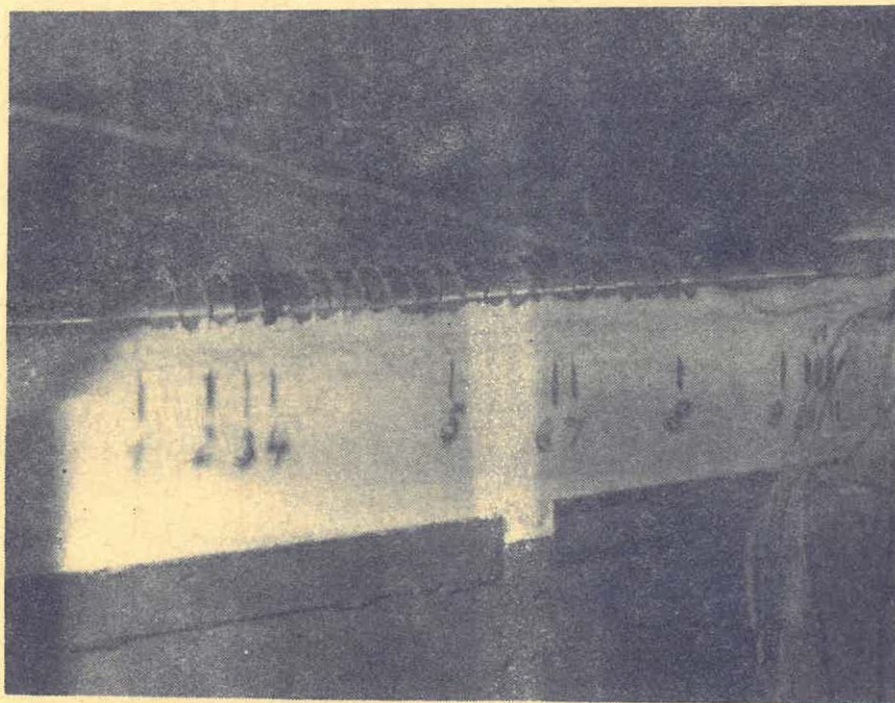
Obr. č. 4

Průběh cejchovacích křivek byl však vcelku velmi přibližně přím-
kový, zvláště v rozsahu vyšších hodnot zatížení, odpovídajících hodno-
tám skutečně v modelu naměřeným.

Cejchováním jednotlivých vybraných kroužků minimálně deformačně
odchylných byla ukončena příprava vlastního modelování.

Jako ekvivalentní materiál byla použita balotina s olejovým po-
jidlem o přibližných parametrech: $c = 15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\varphi = 23^\circ$,
 $\rho = 1,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, která modelově odpovídá hornině pevnostních vlast-
ností mezi terciárním jílem a uhelnou slojí.

Jelikož účelem modelování nebylo zjišťovat absolutní hodnoty na-
pětí, nebyla volba ekvivalentního materiálu blíže přizpůsobena mecha-
nickým vlastnostem sloje.



Obr. č. 5

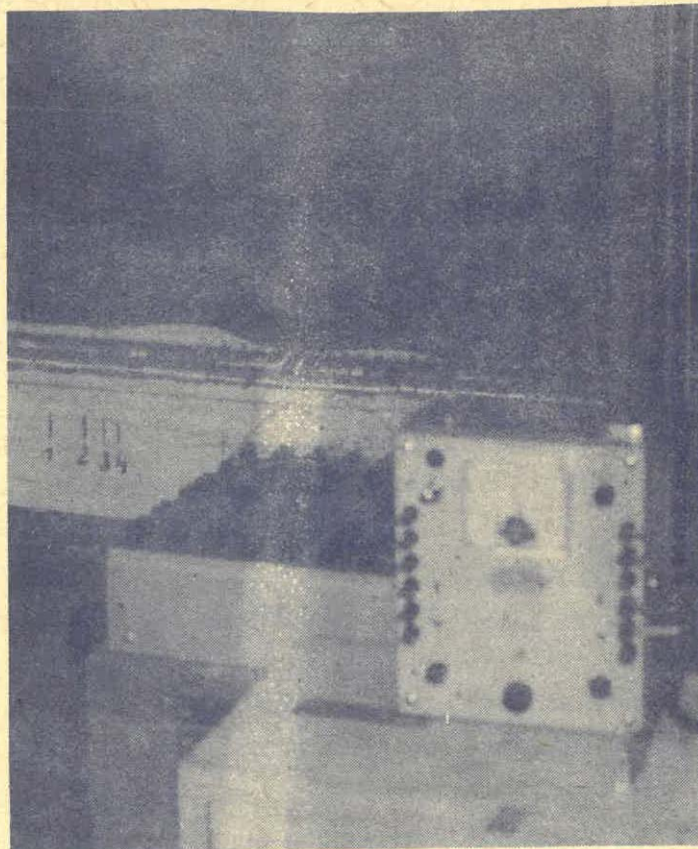
Umístění prvků výztuže v modelovém standu bylo provedeno ve žlábků, vytvořeném ve vrstvě balotiny o síle cca 15 cm (obr. č. 5) pomocí opracované trubky o průměru, shodném s vnějším průměrem kroužků. Do tohoto žlábků byly uloženy jednotlivé kroužky vedle sebe na dotyk, takže vytvořily souvislý tubus. Aby bylo sníženo lícní tření kroužků, event. jejich zachytávání, byly mezi jednotlivé elementy vloženy PVC fólie, nepatrně kroužky přečnívající. Vodiče jednotlivých tenzometrů byly vyvedeny vnitřkem tubusu, jeho bočními otvory a balotinou k měřícím aparaturám.

Zatěžování modelu výztuže bylo prováděno sypáním vrstev balotiny tak, že nejprve byla nasypána vrstva do výše profilu modelované chodby, potom vrstva 2 cm a dále vždy vrstvy po 4 cm až do celkové výšky ekvivalentního nadloží 42 cm, kdy byly přidány 2 vrstvy železných hranolů.

V průběhu měření byla uskutečněna dodávka přepínače a měřícího můstku zn. PEEKEL holandské výroby, který zjednodušil manipulaci a především odečítání hodnot.

Celkové uspořádání modelu výztuže dovovalo měření jen ve střední části modelu, přičemž okrajová pole, stejně obsazená kroužky jako pole střední, měla za účel vytvořit shodné podmínky ve střídání podpěrných (tuhých) a poddajných délkových úseků modelované výztuže po celé délce tubusu (chodby).

Větší část modelovaného tubusu výztuže po výchozím uložení v drážce balotiny je patrna z obr. č. 6.



Obr. č. 6

Jednotlivé alternativní modely:

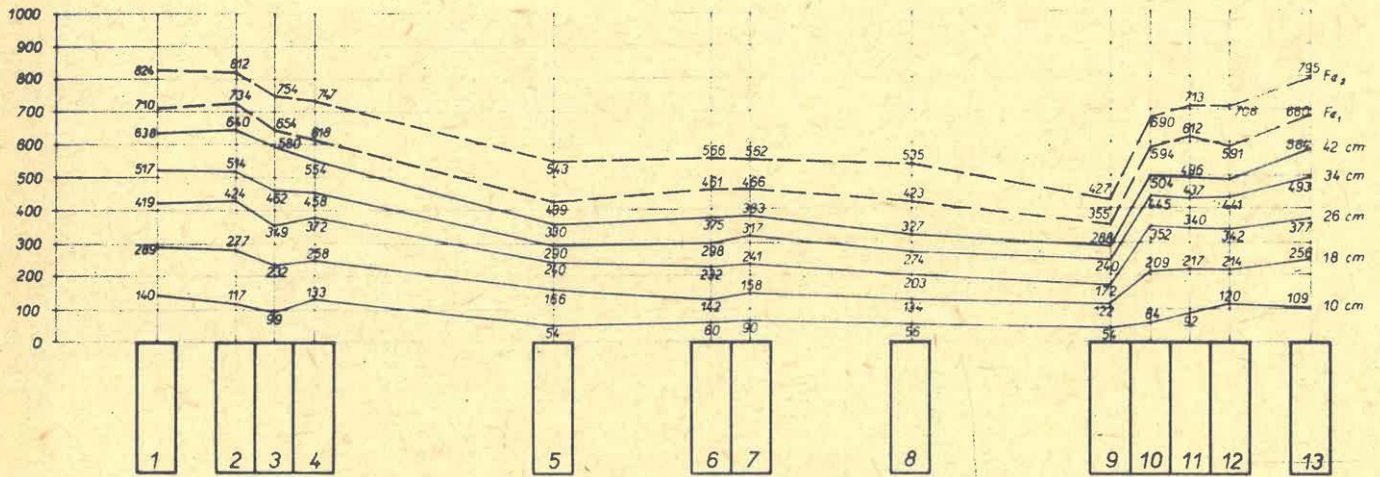
Při stále stejné délce nepoddajných úseků modelované výztuže (počet kroužků 5 odpovídá skutečné délce 6 m) byly provedeny 3 základní modely, lišící se pouze délkou úseků poddajné výztuže (počtem poddajných kroužků). V prvním modelu byl poměr délek poddajné části v každém poli 4:1, ve druhém modelu 2:1, ve třetím 1:1. Mimoto byly provedeny modely tubusu z pouze tuhých a pouze poddajných kroužků.

Všem modelovým pokusům byly vytvořeny stejné časové podmínky do držování stejných časových intervalů sypaní a vždy stejným počtem vrstev ekvivalentních materiálů. Celková doba od započetí každého měření do jeho ukončení byla cca 5 hod. Jednotlivé modely byly minimálně 3x opakovány a výsledky průběžně graficky vyhodnocovány. Protože cejchování jednotlivých kroužků muselo být provedeno nikoliv v ekvivalentním materiálu, ale staticky - zatěžováním řadou závaží, byly všechny výsledky vyjádřeny přepočtem měřených hodnot pomocí cejchovacích přímek. Neobyčejná citlivost na změny teploty při odkrytých modelových prvcích byla vyloučena započtím měření až na druhé vrstvě ekvivalentního materiálu, kdy již došlo z větší části k vyrovnání teplot balotiny a kroužků.

Na obr. č. 7 - 11 jsou vyneseny průběhy zatěžující síly úměrné příslušné deformaci, které byly získány jako průměrné hodnoty z 3 x opakovaných měření tří základních alternativ modelů o různých délkách poddajné a nepoddajné části výztuže i průměry z opakovaných měření tubusů z pouze poddajných nebo pouze nepoddajných prvků.

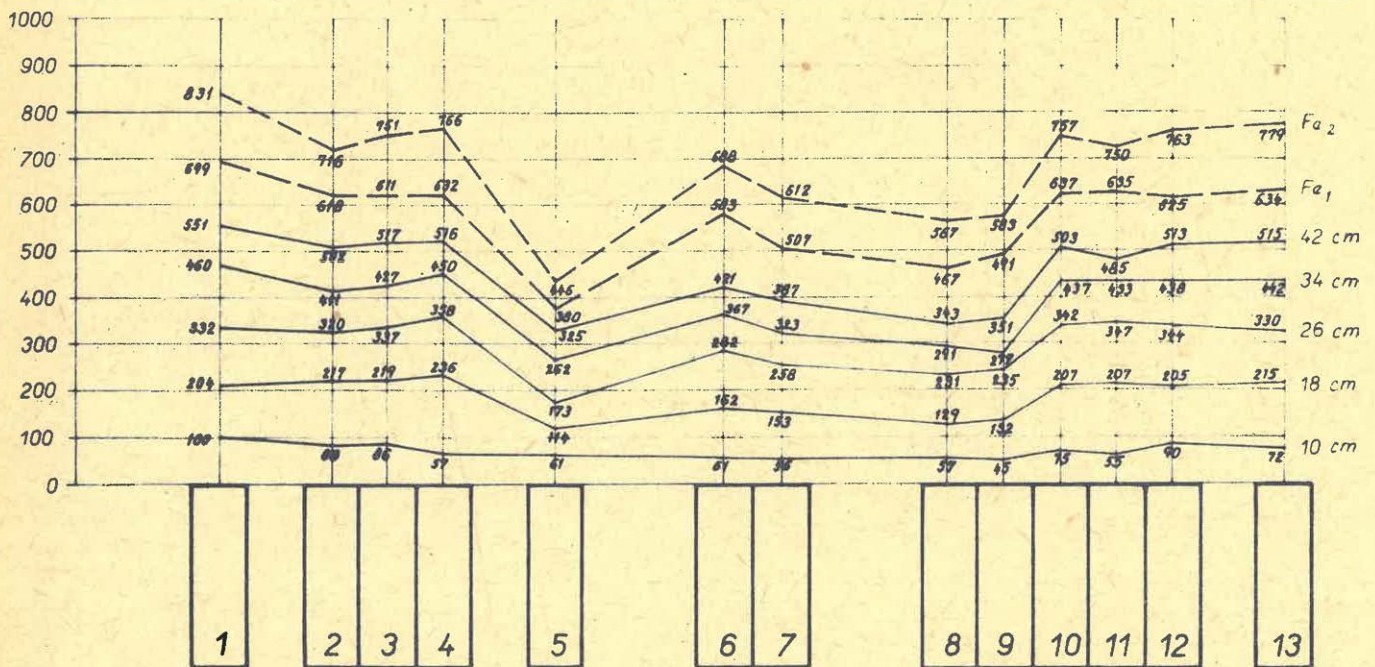
Graf na obr. č. 7 představuje průběh zatěžující síly při jednotlivých vrstvách ekvivalentního nadloží pro model o měřené střední části ve složení 20:5 poddajných k nepoddajným elementům, tj. pro poměr délek 4:1, graf na obr. č. 8 pro poměr 2:1, č. 9 pak 1:1. Grafy na obr. 10 a 11 znázorňují průběh zatěžující síly na tubusu z pouze tuhých a pouze poddajných elementů.

PRŮMĚRNÝ MODEL Č.3
20 slabých kroužků



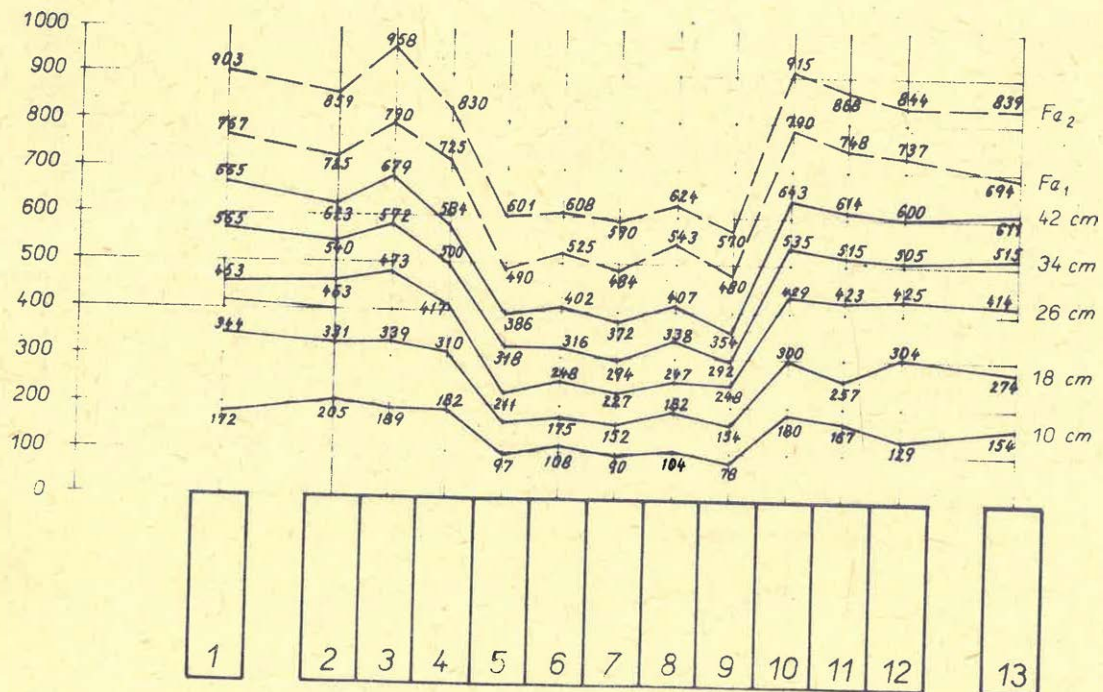
Obr. č. 7

PRŮMĚRNÝ MODEL Č.4
10 slabých kroužků



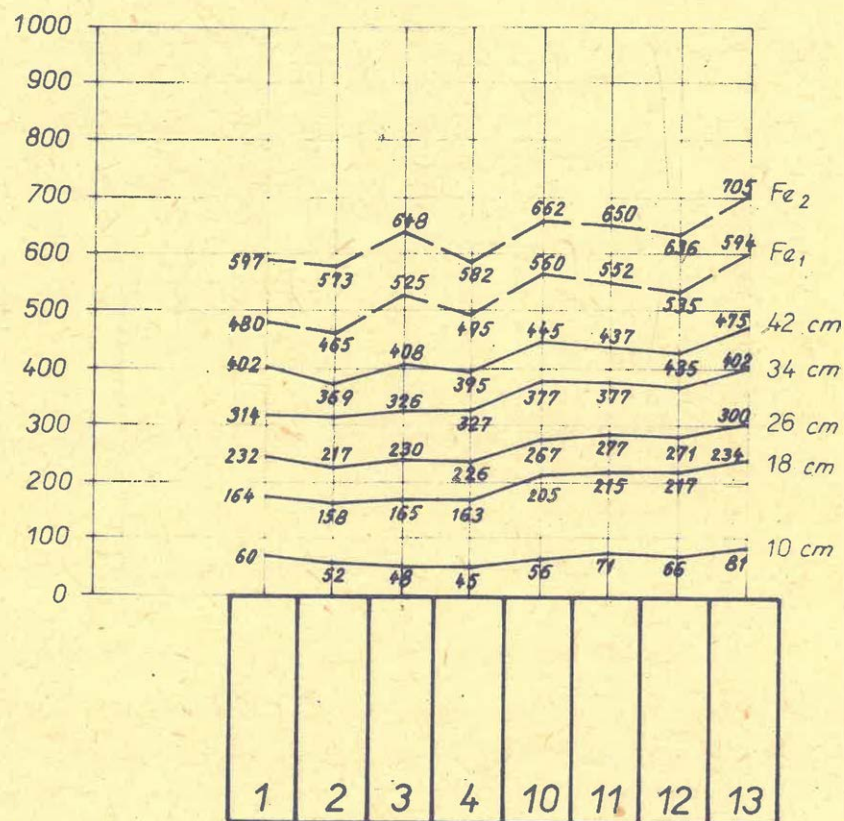
Obr. č. 8

PRŮMĚRNÝ MODEL Č. 5
5 slabých kroužků



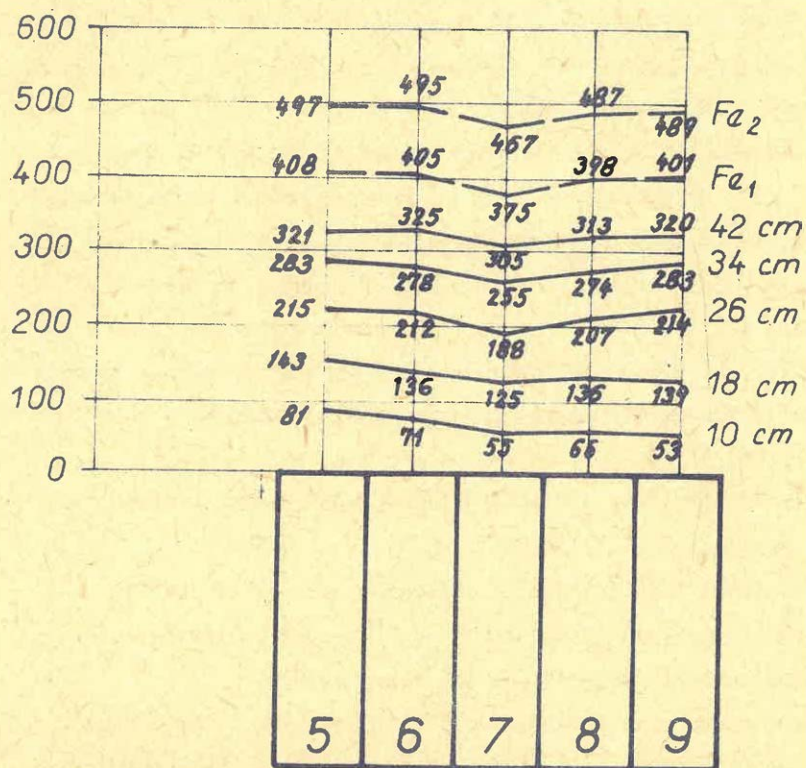
Obr. č. 9

PRŮMĚRNÝ MODEL Č. 7 silné kroužky



Obr. č. 10

PRŮMĚRNÝ MODEL Č. 8 slabé kroužky



Obr. č. 11

Jednotlivé křivky, jak za sebou následují, představují hodnoty zatěžující síly na jednotlivých elementech (kroužcích) pro jednotlivé vrstvy ekvivalentního nadloží. Nejspodnější křivka pro vrstvu balotiny 6 cm a dále po 4 cm až do 42 cm. Poslední dvě čárkované křivky představují dvě vrstvy železných hranolů. Z průběhu jednotlivých průměrných grafů je patrné, že i přes prakticky homogenní ekvivalentní materiál a jeho stejné vrstvení i jinak stejné podmínky všech mo-

delů nejsou hodnoty naměřené na sobě odpovídajících prvcích (podle osy symetrie modelu) úplně stejné, což je v modelovací technice tohoto druhu běžné. Nad okrajovými tuhými elementy (č. 1 - 4 a 10 - 13) nejsou však patrný zásadní tlakové rozdíly, které by dávaly předpoklady k nelineárnímu průběhu. Zato mezi vnitřními tuhými elementy (4, 10) a sousedními poddajnými elementy (9, event. 5 a 9) je u všech modelů zřejmý prudký spád zatěžující síly na značně nižší hodnotu než je hodnota sousedních tuhých elementů. Tento spád odpovídá představě o poklesu napětí na výztuži na rozhraní nepoddajného a poddajného úseku, kdy nepoddajná výztuž na sebe soustřeďuje napětí, když se nad ní vytvoří patky klenby oblasti prosté napětí (klenbová teorie).

V poddajné části modelu směrem k ose symetrie zatěžující síla mírně vzrůstá, což by zhruba odpovídalo eliptickému průběhu oblasti prosté napětí. Maximální hodnoty poddajné části modelu byly naměřeny na středních kroužcích (č. 6 a 7) u modelu obr. č. 7 a 8 dosti výrazně, u modelu na obr. č. 9 při malé délce střední poddajné části byl průběh zatížení přibližně lineární.

V modelech na obr. č. 10 a 11, které představují tubusy ze stejných kroužků, se patkové tlaky neprojevují, úroveň zatěžující síly je zhruba stejná u všech měřených kroužků téhož modelu.

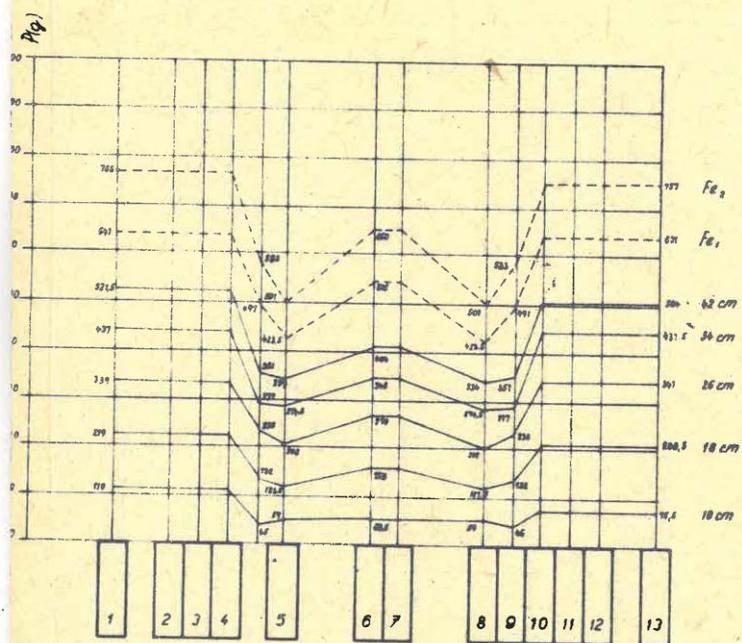
Zjištěné průběhy zatěžujících sil z obr. č. 7 - 11 byly použity ke konstrukci průměrných grafů v obr. č. 12 - 16, kde jsou pro jednotlivé modely graficky znázorněny průměrné hodnoty funkčně si odpovídajících elementů, symetrických podle osy modelu, takže celkový průběh dostává téměř zcela symetrický tvar. Z těchto grafů pak již možno vyčíslit hledanou závislost poměru průměrných zatížení všech poddajných kroužků ($\frac{P_p}{P_n}$) k průměrným zatížením elementů nepoddajných na poměru délek poddajné a nepoddajné části modelu ($\frac{l}{l_1}$).

Tato závislost je znázorněna na obr. č. 17.

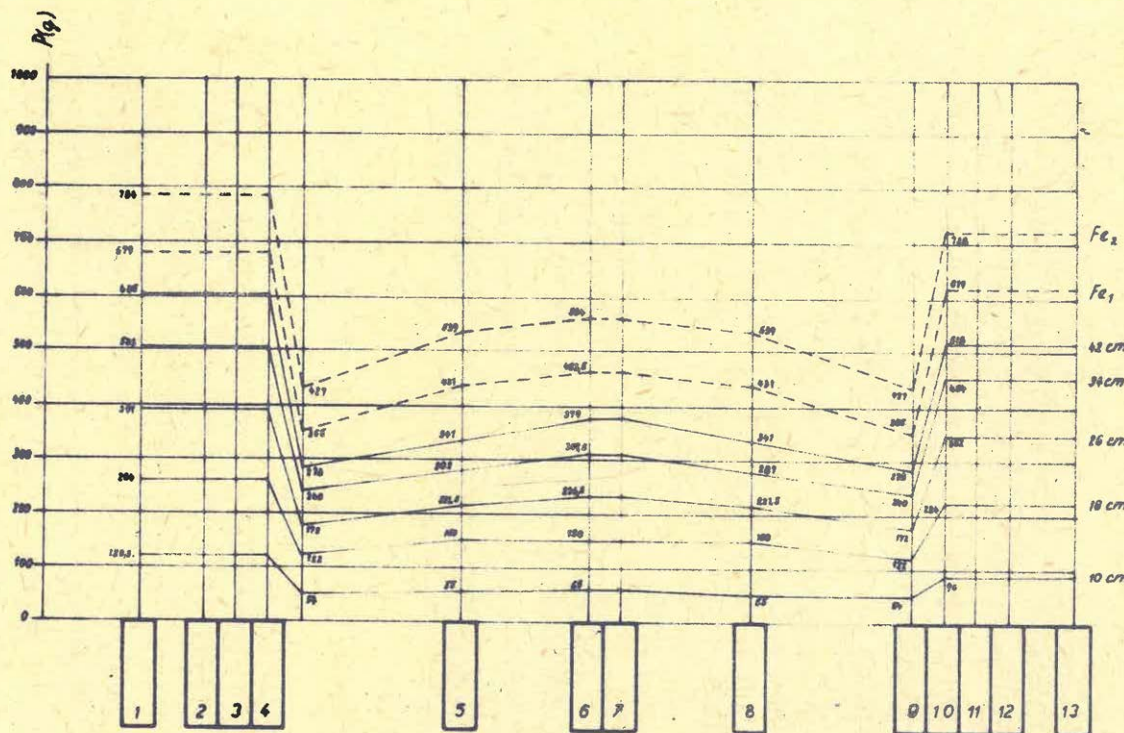
Průběh poměru max. zatěžující síly poddajných a průměrné síly nepoddajných elementů se ukazuje nejvýhodnější při max. poměru délek

MODEL Č.4
10 slabých kroužků

MODEL Č.3
20 slabých kroužků

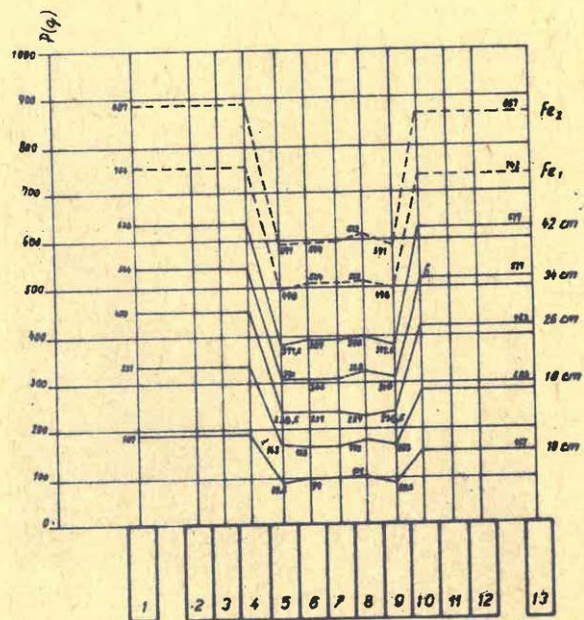


Obr. č. 13



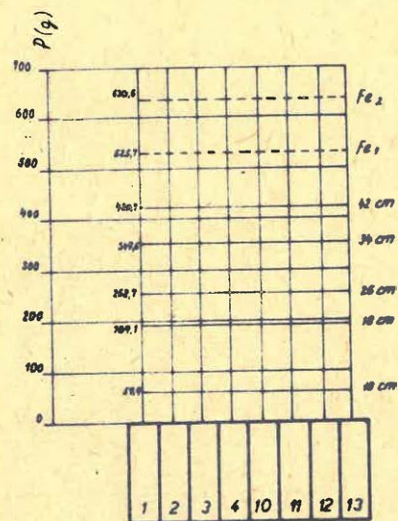
Obr. č. 12

MODEL Č.5
5 slabých kroužků



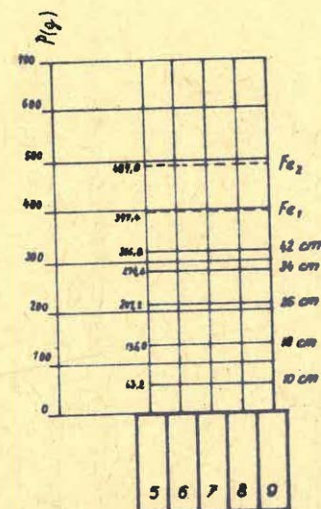
Obr. č. 14

MODEL Č.7



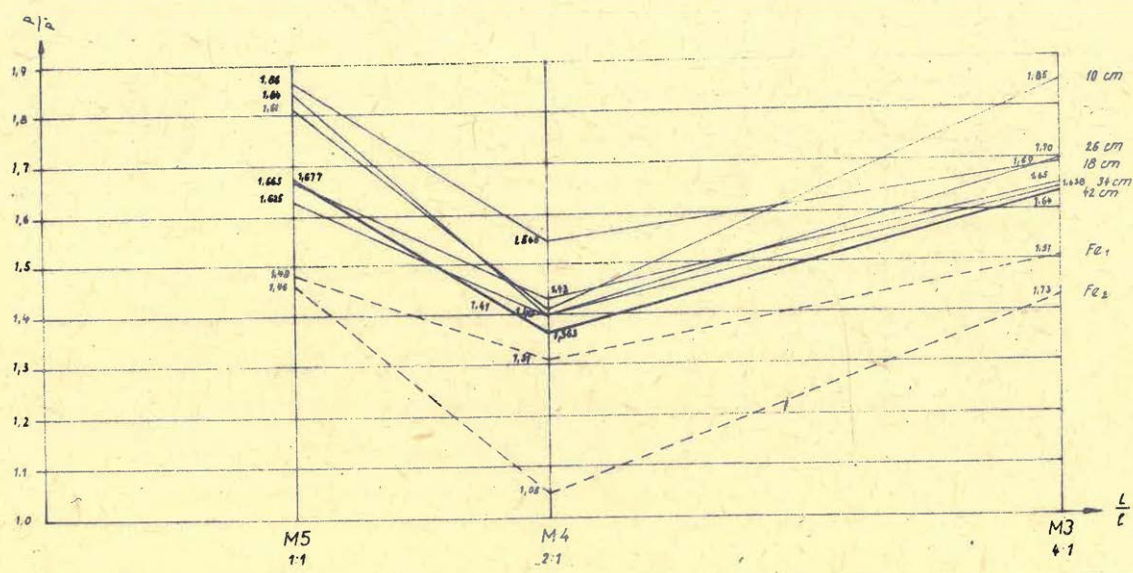
Obr. č. 15

MODEL Č.8



Obr. č. 16

Závislost poměru průměrné hodnoty napětí silných kroužků k průměrné hodnotě napětí slabých kroužků na délce poddajné části modelu

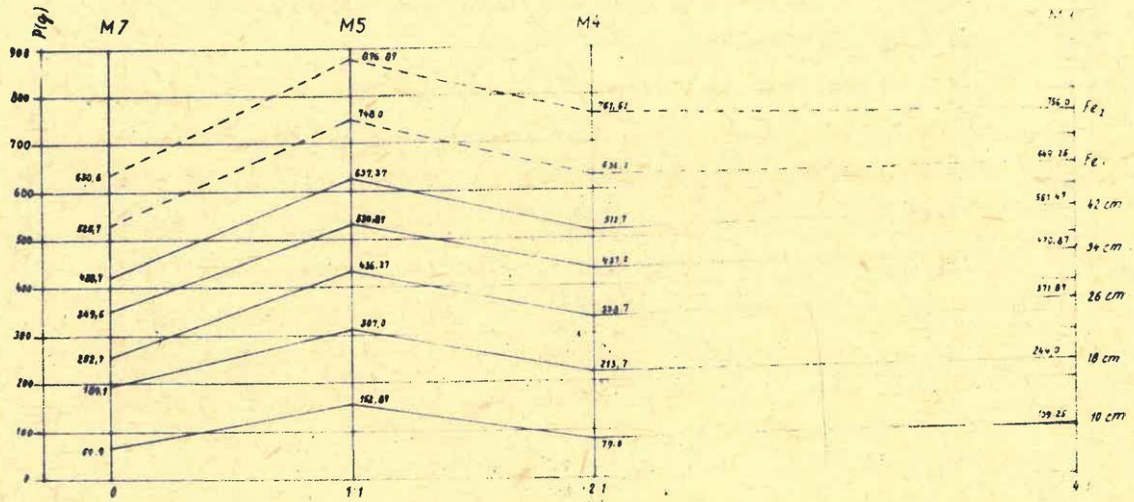


Obr. č. 17

obou typů výztuží, tj. 4:1, kdy činí 1,68:1. Při poměru 2:1 je nejméně výhodný - 1,29:1, při poměru 1:1 je 1,59:1. Jelikož jsou porovnávány síly, vyvolávající u obou typů elementů sice různé deformace, ale síle úměrná napětí, budou napětí obou typů výztužních prvků v obdobné relaci. Z toho rezultuje, že má-li být zachována stejná provozní bezpečnost obou typů výztuže, musí být v nejpříznivějším případě tuhost obou typů výztuže ve stejném poměru, tj. cca 1,7 : 1. Tento výsledek modelových pokusů ovšem není v relaci s praktickou představou, které by spíše odpovídala stále stoupající nebo stále klesající funkce uvedené závislosti.

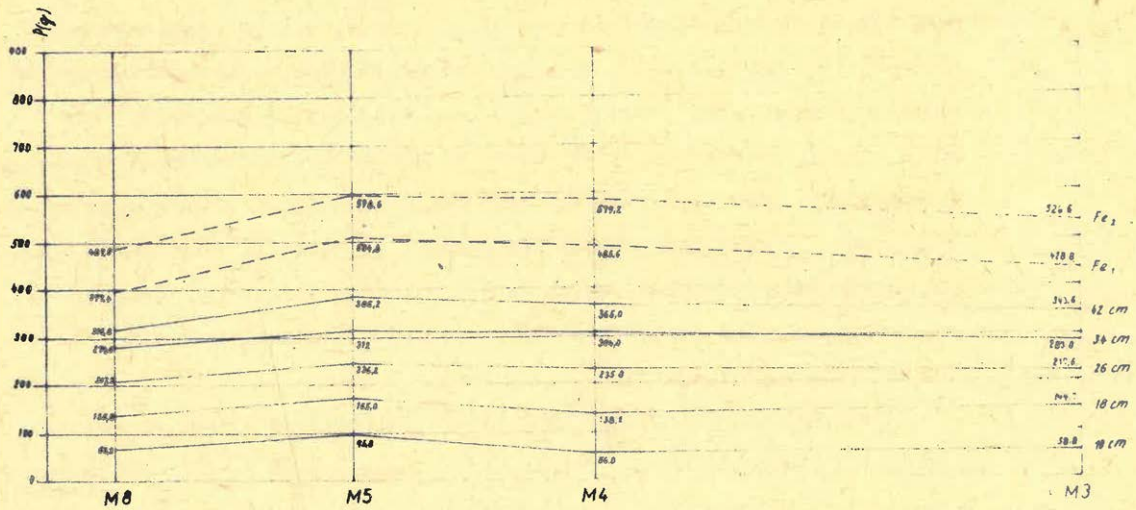
Jednoznačným výsledkem, který mluví zřetelně proti kombinování výztužních elementů, jsou výsledky měření na tubusech z pouze poddajných a pouze nepoddajných prvků (model č. 7 a 8). Jak patrně z hodnot

Absolutní hodnoty silných kroužků



Obr. č. 18 a

Absolutní hodnoty slabých kroužků



Obr. č. 18 b

napětí obr. č. 18 a, b, jsou průměrné i maximální hodnoty zatížení při zabudování pouze jediného typu modelové výztuže, a to jak poddajné, tak nepoddajné, nižší než hodnoty obou těchto typů v jakékoli délkové kombinaci.

I když jsou jistě výsledky provedeného modelování zatíženy chybami, k jejichž vyloučení nebyl dostatek času ani prostředků, možno závěrem konstatovat, že řešení snížení nákladů na výztuž důlních děl cestou kombinace různých výztužních elementů není provozně spolehlivé, protože by při něm došlo k nepříznivému zvyšování napětí obou typů výztuží. Modelové pokusy prokázaly, že nelze předpokládat, že dojde k odlehčení méně tuhých výztužních prvků, které by umožnilo jejich ekonomickou provozní kombinaci s tužšími podpěrnými elementy.

S h r n u t í

V článku jsou shrnuty výsledky modelových pokusů prvků výztuže různé tuhosti při zatěžování ekvivalentním materiálem za měření napětí dvou volených typů modelové výztuže. Modelové pokusy sledovaly možnost kombinace nepoddajných výztužních prvků s vysokou provozní nákladovostí s levnějšími prvky menší tuhosti pro dlouhodobá otvirková díla budovaná ve spodních partiích mezi hlavní a spodní slojí Severočeské hnědouhelné pánve. Článek rozvádí princip modelování, pružnostní výpočet deformací modelových prvků výztuže, celkové uspořádání modelu výztuže a jednotlivé alternativy modelu. Průběh zatěžující síly při jednotlivých vrstvách ekvivalentního nadloží pro volené alternativy modelu je zpracován graficky. Modelové pokusy - i při určitém zjednodušení úlohy - prokázaly, že řešení snížení nákladů na výztuž důlních děl cestou kombinace výztužních prvků různé tuhosti není provozně spolehlivé, neboť by při něm došlo k nepříznivému zvyšování napětí obou typů výztuže.