

Ing. Milan V r b í č e k , VÚHU

Metodika pro výpočet vlivů přetížení povrchu vnějšími převýše-
nými výsypkami na důlní díla

Úvod

Vlivem nedostatku výsypných prostorů v SHR dochází v posledních letech ke střetům zájmů povrchové a hlubinné činnosti. Přetížením povrchu nad hlubinnými důlními díly vnějšími převýšenými výsypkami dochází ke zvýšení napětí v horninovém masívu i v okolí těchto děl. Zvýšení napětí pak způsobuje deformaci důlní výztuže, což se projevuje ve zvýšených nákladech na důlní údržbu. Je tedy snahou vyhnout se střetům nebo jejich účinky minimalizovat.

Minimalizace vlivů přetížení na důlní díla se v současné době provádí dvojím způsobem:

1. Koordinuje se postup výsypek s postupem porubních front.
2. V postižených úsecích se preventivně zesiluje výztuž důlních chodeb.

Koordinace výsypkového hospodářství s těžební činností hlubinných dolů spočívá v tom, že se stanoví minimální vzdálenost paty výsypky od hrany rubání, kdy jsou ještě vlivy výsypky únosné pro hlubinný provoz.

Zesilování důlní výztuže se provádí pouze v krajních případech, kdy není možná koordinace. Zesílení důlní výztuže se vždy promítne ve zvýšení nákladů na důlní údržbu a v konečné fázi také ve zvýšení celkových nákladů.

Stěžejní podmínkou koordinační činnosti je však znalost působení a šíření vlivů přetížení, vyvolaných výsypkou v horském masívu. Jedině na základě těchto znalostí je možné stanovit míru ovlivnění důlních děl a určit ještě bezpečnou vzdále-

nost paty výsypky od hrany porubní fronty.

Výpočty vlivů přetížení a šíření těchto vlivů se zabývala řada autorů. Je však nutné si uvědomit, že tito autoři řešili vlivy přetížení vyvolané stavebními objekty. Výpočetní metodiky jsou navíc úzce specializované podle způsobu a druhu zakládání.

Ještě v šedesátých letech panoval v SHR názor, že vliv výsypky se v hloubkách větších než 150 m, nemůže projevit. Teprve devastace chodeb na dolech Centrum, Vítězný únor a Pluto, která vznikla prokazatelně vlivem sypání převýšené výsypky si vynutila změnu názoru a zahájit koordinaci výsypkového hospodářství s těžebním postupem hlubinných dolů.

S rozvojem koordinační činnosti rostly i požadavky na řešení dané problematiky ve Výzkumném ústavu pro hnědé uhlí (VÚHU) v Mostě.

Pracovníci VÚHU byli postaveni před nelehký úkol, vyřešit metodiku výpočtu vlivů přetížení vyvolaných sypáním vnějších převýšených výsypek na důlní díla. Problém byl komplikován tím, že přetížení vyvolané výsypkou působí v kumulaci s horskými tlaky vyvolanými těžební činností. Bylo tedy nutné citlivě oddělit vlivy vyvolané výsypkami od vlivů vyvolaných těžební činností.

Tento záměr při absenci exaktního měření se ukázal jako neřešitelný.

Byl tedy zvolen opačný postup. Zpětným vyhodnocením postupů výsypek a porubních front bylo zjišťováno vzájemné situování.

1. Vzdálenost paty výsypky od hrany porubní fronty
2. Výška výsypky
3. Mocnost nadloží
4. Způsob a míra poškození různých typů výztuže

Údaje uvedené pod body 1 - 3 lze považovat za dostatečně přesné. Údaje, uvedené pod bodem 4, jsou zatížené značnou mírou nepřesnosti.

Dalším krokem řešení byl výběr a aplikace vhodné nebo vhodných metodik pro výpočet přetížení důlních objektů, které je vyvolané sypáním vnější převýšené výsypky.

Pro výpočet napětí v horském masívu je užito vztahů, které byly odvozeny pro pružný poloprostor. Jako nejvhodnější pro dané podmínky se jevíly vztahy odvozené prof. Westergaardem, prof. Fröhlichem a dr. Hrubanem.

Podle Westergaarda aktivní oblast, v níž působí síly přetížení, se z povrchu šíří do hloubky pod úhlem 45° . Za touto hranicí jsou vlivy zanedbatelné. Aktivní oblast má tedy tvar rotačního kužele s vrcholem ve sledovaném bodě s vrcholovým úhlem 90° . Svislou složku přetížení (σ_z) vyjadřuje vztahem

$$\sigma_z = A \cdot q, \quad /1/$$

kde

σ_z - napětí v ose z

q - rovnoměrné zatížení povrchu

A - sumární koeficient vlivu uváděný tabulárně pro různé poměry $\frac{r}{H}$, kde

r - poloměr kružnice vlivu

H - hloubka šetřeného bodu pod povrchem.

Pro případ, kdy je zatížení na celé ploše kružnice vlivu, se $A = 0,423$, tudíž

$$\sigma_z = q \cdot 0,423 = \gamma \cdot h \cdot 0,423 \cdot 10^{-2} \text{ (MPa)} \quad /2/$$

Aby bylo možné řešit případy, kdy nedochází k přesypání celé plochy vlivové kružnice a zatížení není rovnoměrné, byla vlivová kružnice rozdělena na 5 pásem a každému pásu byl přiřazen sumární koeficient vlivu. Celkové přetížení se pak rovná součtu přetížení v jednotlivých pásmech.

$$\delta_z = \sum_1^n \delta_{z(1-n)} \quad /3/$$

$$\delta_z = \sum_1^n \gamma \cdot h_{1-n} \cdot \sum_1^n A_{1-n}, \quad /4/$$

kde

γ - objemová hmotnost sypaniny

h - výška výsyvky

Sumární koeficient A pro pásma 1 - 5 jsou v tabulce 1.

Tabulka 1

Pásma	1	2	3	4	5	Σ
A	0,038	0,092	0,107	0,101	0,085	0,423

Rozdělení vlivové kružnice na mezikruží využijeme k výpočtu velikosti plochy v jednotlivých mezikruzích změříme-li od zvolené osy úhly φ_1 a φ_2 , viz obr. 1, vymezuující vrcholový úhel zatížení výseče mezikruží, pak poměr (k) zatížení a nezatížené plochy lze vyjádřit vztahem /5/

$$k = \frac{1}{360} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \quad /5/$$

Zavedením koeficientu (k) do vztahu /4/ nabývá tvaru

$$\delta_z = \sum_1^n A_{1-n} \cdot \sum_1^n \gamma \cdot h_{1-n} \cdot \sum_1^n k_{1-n} \quad /6/$$

Profesor Fröhlich udává pro svislou složku přetížení (δ_z) vztah

$$\sigma_z = \frac{\kappa \cdot P \cdot \cos \beta}{2 \pi R^2}, \quad /7/$$

kde

κ - koncentrační faktor, vyjadřující anizotropii prostředí a vlastností podloží

$\kappa = 2 - 5$ pro jíly $\kappa = 3$

P - celková zatěžující síla

R - délka průvodiče, spojující působíště síly se šetřeným bodem

β - úhel sevřený svislicí, procházející působíštěm síly a průvodičem R

Vztah /7/ dle autora dává dostatečně přesné výsledky v případech, že delší strana zatěžované plochy je třikrát menší než půdorysná vzdálenost šetřeného bodu od působíště síly. Je tedy možné při výpočtu zatížení s výhodou použít vlivové kružnice, rozdělené na jednotlivá pásma, které umožní rozdělit zatíženou plochu a umožní snadný výpočet zatížení těchto malých plošek.

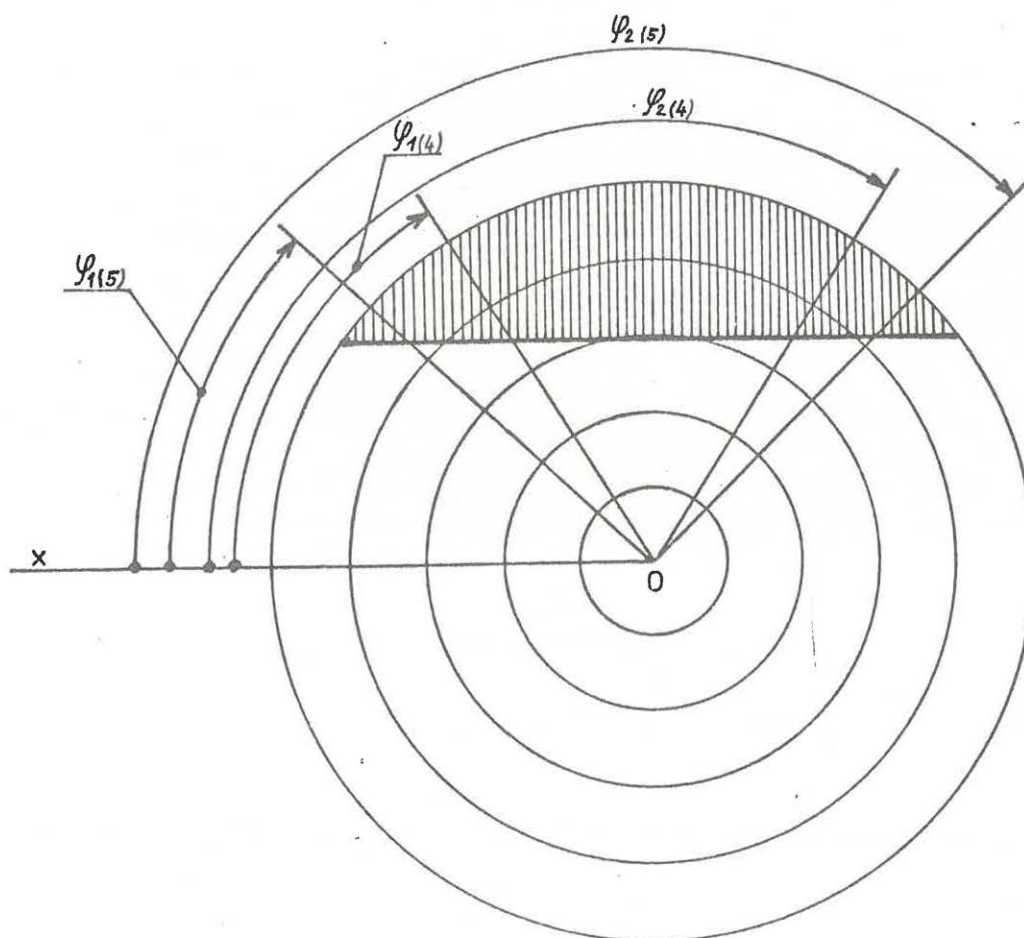
Z obrázku 2 je patrné, že pro OT , R , β , P platí vztahy

$$P_n = \frac{\pi (r_n^2 - r_{n-1}^2) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \gamma \cdot h}{360} \quad /8/$$

$$OT_n = 38,197 \frac{(r_n^3 - r_{n-1}^3) \sin \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right)}{(r_n^2 - r_{n-1}^2) \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right)} \quad /9/$$

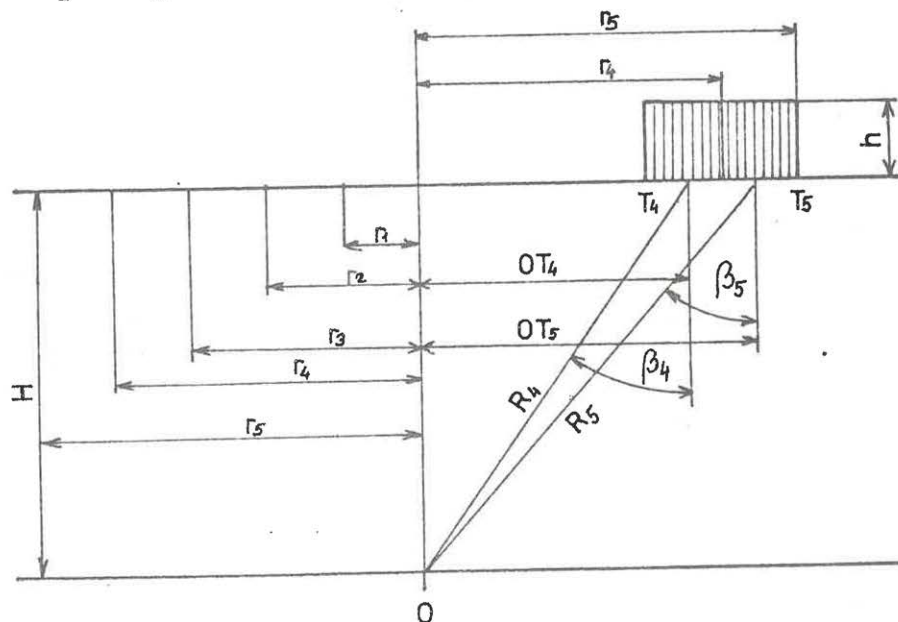
$$R_n = \sqrt{OT_n^2 + H^2}$$

$$\operatorname{tg} \beta_n = \frac{OT_n}{H} \quad /10/$$



Způsob měření úhlů φ_1, φ_2

obr. 1



Schema zatížení povrchu vnější pře-
výšenou výsypkou

obr. 2

Dosazením hodnot $\underline{P}$, $\underline{R}$ a $\underline{B}$ do vztahu /7/, vypočteme σ_z pro jednotlivá pásma kružnice vlivu. Celkové přetížení se pak rovná součtu přetížení v jednotlivých pásmech.

Doktor Hruban uvádí pro σ_z vztah

$$\sigma_z = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{H}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \cdot \frac{P}{H^2}, \quad /11/$$

kde

x - půdorysná vzdálenost působíště síly od stanoveného bodu

H - hloubka bodu pod povrchem

I v tomto případě platí, že přesnější výsledky dostaneme, rozdělíme-li zatěžující plochu na menší části, přičemž jejich delší strana má být 3x menší, než hodnota x . Je tedy možné opět využít vlivové kružnice, rozdělené na jednotlivá pásma.

Pro ilustraci uvádíme výpočet přetížení výše popsanými způsoby.

Vstupní parametry

hloubka bodu

$$H = 100 \text{ m}$$

výška výsypky

$$h = 20 \text{ m}$$

objemová hmotnost sypaniny

$$\gamma = 1,7 \text{ t.m}^{-3}$$

poloměry pásem

$$r_1 = 20 \text{ m}$$

$$r_2 = 40 \text{ m}$$

$$r_3 = 60 \text{ m}$$

$$r_4 = 80 \text{ m}$$

$$r_5 = 100 \text{ m}$$

Úhly φ_1, φ_2 vymezují zasypanou část výseče mezikruží v jednotlivých pásmech. První až třetí pásmo vlivové kružnice není přesypáno.

$$\begin{aligned}\varphi_2(5) &= 138,27^\circ \\ \varphi_2(4) &= 123,69^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi_1(5) &= 39,657^\circ \\ \varphi_1(4) &= 59,697^\circ\end{aligned}$$

Westergaard

$$\begin{aligned}k_5 &= \frac{1}{360} (\varphi_2(5) - \varphi_1(5)) = \frac{1}{360} (138,27 - 39,657) = \\ &= 0,274\end{aligned}$$

$$k_4 = \frac{1}{360} (123,69 - 59,697) = 0,178$$

$$\begin{aligned}\sigma_z &= (A_5 \cdot k_5 \cdot \gamma \cdot h \cdot A_4 \cdot k_4 \cdot \gamma \cdot h) \cdot 10^{-2} = \\ &= (0,085 \cdot 0,274 + 0,101 \cdot 0,178) \cdot 20 \cdot 1,7 \cdot 10^{-2} = \\ &= 1,402 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}\end{aligned}$$

Fröhlich

$$\begin{aligned}P_5 &= \frac{\pi \cdot (r_5^2 - r_4^2) (\varphi_2(5) - \varphi_1(5)) \cdot \gamma \cdot h}{360} = \\ &= \frac{(100^2 - 80^2) \cdot (138,27 - 39,657) \cdot 1,7 \cdot 20}{360} = \\ &= 105\,332,638 \text{ t}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_4 &= \frac{(80^2 - 60^2) (123,69 - 59,697) \cdot 20 \cdot 1,7}{360} = \\ &= 53\,163,895 \text{ t}\end{aligned}$$

$$OT_5 = 38,197 \frac{(100^3 - 80^3) \cdot \sin \frac{98,613}{2}}{(100^2 - 80^2) \cdot \frac{98,613}{2}} = 79,622 \text{ m}$$

$$OT_4 = 38,197 \frac{(80^3 - 60^3) \cdot \sin 31,997}{(80^2 - 60^2) \cdot 31,997} = 66,868 \text{ m}$$

$$R_5 = \sqrt{100^2 + 79,622^2} = 127,827 \text{ m}$$

$$R_4 = \sqrt{100^2 + 66,868^2} = 120,297$$

$$\text{tg } \beta_5 = \frac{79,622}{100} = 0,7962 \quad \beta = 38,528^\circ$$

$$\text{tg } \beta_4 = \frac{66,868}{100} = 0,669 \quad \beta = 33,77^\circ$$

$$\sigma_{z(5)} = \frac{3 \cdot 105 \, 332,638 \cdot \cos^3 38,528 \cdot 10^{-2}}{2\pi \cdot 127,827^2} =$$

$$= 1,474 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\sigma_{z(4)} = \frac{3 \cdot 53 \, 163,895 \cdot \cos^3 33,77^\circ \cdot 10^{-2}}{2\pi \cdot 120,297^2} =$$

$$= 1,008 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = \sigma_{z(5)} + \sigma_{z(4)} = 0,01474 + 0,01008 =$$

$$= 2,482 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

Dr. Hruban

$$\sigma_z = \frac{3}{2\pi} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{H}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \cdot \frac{P}{H^2} \cdot 10^{-2} \quad (\text{MPa})$$

Z předcházejícího výpočtu lze použít hodnoty OT_4 , OT_5 , P_4 a P_5 .

$$\sigma_{z(5)} = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{79,622}{100}\right)^2\right]^{2,5}} \cdot \frac{105\,332,638}{100^2} \cdot 10^{-2} =$$

$$= 1,474 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\sigma_{z(4)} = \frac{3 \cdot 53\,163,895}{2\pi \cdot 100^2} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{66,868}{100}\right)^2\right]^{2,5}} \cdot 10^{-2} =$$

$$= 1,008 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = \sigma_{z(5)} + \sigma_{z(4)} = 0,01474 + 0,01008 = 0,02482 \text{ MPa}$$

V předcházejících výpočtech nebyla úmyslně dodržena podmínka

$$x > 3a \qquad OT > 3a, \qquad /12/$$

kde

$x = OT$ = půdorysná vzdálenost šetřeného bodu do působíště síly

a - delší strana zatěžující plochy

Aby bylo možné dodržet podmínku, určenou vztahem /12/, rozdělíme vrcholový úhel, vymežující zatěžující plochu v 5. mezikruží na 6 dílů, ve 4. na 4 díly.

Vrcholový úhel (α_5) plošek v 5. mezikruží

$$\alpha_5 = \frac{\varphi_{2(5)} - \varphi_{1(5)}}{6} = \frac{138,27 - 39,657}{6} = 16,436^\circ$$

ve čtvrtém mezikruží

$$\alpha_4 = \frac{f_2(4) - f_1(4)}{4} = \frac{123,69 - 59,697}{4} = 15,998^\circ$$

Protože vrcholové úhly výseče mezikruží jsou totožné, budou stejné i hodnoty OT.

Fröhlich (upravený výpočet)

$$OT_5 = 38,197 \frac{(100^3 - 80^3) \cdot \sin \frac{16,436}{2}}{(100^2 - 80^2) \cdot \frac{16,436}{2}} = 90,060 \text{ m}$$

$$OT_4 = 38,197 \frac{(80^3 - 60^3) \cdot \sin 7,999}{(80^2 - 60^2) \cdot 7,999} = 70,247 \text{ m}$$

$$\operatorname{tg} \beta_5 = \frac{OT_5}{H} = \frac{90,060}{100} = 0,90060 \quad \beta = 42,006^\circ$$

$$\operatorname{tg} \beta_4 = \frac{OT_4}{H} = \frac{70,247}{100} = 0,70247 \quad \beta = 35,087^\circ$$

$$P_5 = \frac{\pi (100^2 - 80^2) 16,436 \cdot 20 \cdot 1,7}{360} = 17\,555,44 \text{ t}$$

$$P_4 = \frac{\pi (80^2 - 60^2) \cdot 15,999 \cdot 20 \cdot 1,7}{360} = 13\,290,974 \text{ t}$$

$$R_5 = \sqrt{100^2 + 90,06^2} = 134,576 \text{ m}$$

$$R_4 = \sqrt{100^2 + 70,247^2} = 122,223 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{z(5)} &= \frac{3 \cdot 17\,555,44 \cdot \cos^3 42,006}{2\pi \cdot 134,576^2} \cdot 10^{-2} = \\ &= 0,190 \cdot 10^{-2} \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{z(5)} = 6 \cdot \Delta \sigma_{z(5)} = 1,139 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\Delta \sigma_{z(4)} = \frac{3 \cdot 13\,290,974 \cdot \cos^3 35,087}{2\pi \cdot 122,223^2} \cdot 10^{-2} =$$

$$= 0,233 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\sigma_{z(4)} = 0,233 \cdot 10^{-2} \cdot 4 = 0,931 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = (1,139 + 0,931) \cdot 10^{-2} = 2,070 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

Dr. Ing. Hruban

Opět využijeme hodnot P_5 , P_4 , OT_5 , OT_4

$$\Delta \sigma_{z(5)} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{90,06}{100}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \cdot \frac{3 \cdot 17\,555,44}{2\pi \cdot 100^2} \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta \sigma_{z(5)} = 0,190 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\sigma_{z(5)} = 6 \cdot \Delta \sigma_{z(5)} = 6 \cdot 0,190 \cdot 10^{-2} = 1,139 \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta \sigma_{z(4)} = \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{70,247}{100}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \cdot \frac{13\,290,974}{100^2} \cdot 10^{-2}$$

$$= 0,233 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$= 4 \cdot 0,233 \cdot 10^{-2} = 0,932 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = 10^{-2} \cdot (1,139 + 0,932) = 2,071 \cdot 10^{-2} \text{ MPa}$$

Z předcházejících výpočtů je patrné, že dodržením podmínky $x > 3a$ se přibližujeme charakteru rovnoměrného zatížení po-

vrchu a tím se také snižuje zatížení ve sledovaném bodu. Porovnáme-li výsledky výpočtů podle jednotlivých autorů, vidíme, že vztahy autorů Fröhliche a Hrubana dávají shodné výsledky v obou případech, zatímco vztah Westergaardův udává nižší hodnoty přitížení. Srovnání výsledků je uvedené v následující tabulce:

Autor	Orientační výpočet		Upravený výpočet	
	σ_z MPa	rozdíl %	σ_z MPa	Rozdíl %
Westergaard	0,0140	177,143	0,0140	147,857
Fröhlich	0,0248		0,0207	
Hruban	0,0248		0,0207	

Nechceme hodnotit, který ze vztahů lépe odpovídá skutečným hodnotám přitížení. Zůstává však faktem, že všechny vztahy, založené na teorii pružného poloprostoru byly odvozeny a ověřovány jen pro potřeby zakládání staveb, tedy pro podstatně menší hloubky.

Lze však konstatovat, že na základě výše uvedené metodiky se vyhodnocují v současné době vlivy přitížení na důlní díla a výsledky výpočtů řádově odpovídají skutečnosti.

Zůstává však otázkou míra přesnosti pro hloubkový interval 100 - 350 m. Tento problém lze vyřešit pouze konfrontací hodnot vypočítaných s naměřenými.

Protože se předpokládá, že i v budoucnosti bude docházet ke střetům mezi hlubinnou a výsypkovou činností, zajišťuje VÚHU v Mostě vývoj a výrobu automatické měřicí stanice vlivů přitížení na důlní díla. Na základě výsledků měření bude možné upravit výpočetní metodiku tak, aby byla jistota, že vyhovuje daným podmínkám a vypočítané hodnoty odpovídají skutečnosti.