



Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Modelování v geotechnice – Modelování zatížení tunelů
(prezentace pro výuku předmětu Modelování v geotechnice)

doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Inovace studijního oboru Geotechnika CZ.1.07/2.2.00/28.0009.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem ČR.

Přehled metod pro stanovení zatížení výztuže tunelu

Základní odlišnost od klasické stavební mechaniky: zatížení výztuže podzemních konstrukcí není explicitně známo, ale vyplývá až ze vzájemné spolupráce celého systému „horninový masív- konstrukce“.

Základní členění metod pro výpočet zatížení:

- klasické metody :

klenbové metody – zatížení výztuže je dáno tíhou horniny pod klenbou přirozené rovnováhy (Protodjakonov, Mostkov, ...)

metody zohledňující snížení tíhy sloupce zeminy nad stropem tunelu v důsledku třecích sil od bočního tlaku, vycházejí z rovnováhy sil

- metody založené na rovnicích teorie mechaniky kontinua (silové, deformační, analytické, numerické)

Klasické metody stanovení zatížení výztuže

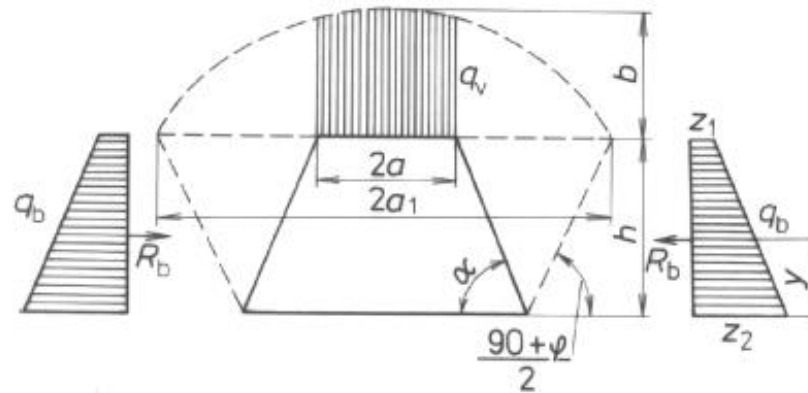
Základní obecná charakteristika

- metody silové, nezohledňují deformační chování výztuže, výztuž je pouze pasivním prvkem
- základní vztahy jsou formulovány pro homogenní , izotropní, nesoudržné prostředí
- nezohledňují tvar díla, pouze jeho velikost

Metody klenbové

- **předpoklad:** zatížení výztuže je dáno tíhou rozvolněných hornin pod klenbou přirozené rovnováhy (výška klenby se stanovuje v různých metodách různě)
- nejstarší metody
- nezohledňují spolupráci výztuže s horninovým prostředím, tedy ani vlastnosti výztuže
- není zohledněn vliv hloubky díla, dle zkušeností je vyšší shoda s naměřenými hodnotami zatížení v menších hloubkách a méně pevných horninách či zeminách
- výsledkem je pouze hodnota zatížení výztuže, nezískáme informaci o přetvárném chování ani horninového prostředí, ani výztuže

Klenbová Protodjakonova metoda



Polovina šířky klenby:

$$a_1 = a + h(\cot g\alpha + \cot g(45 + \varphi/2)) \text{ pro } f < 40$$

$$a_1 = a \text{ pro } f \geq 40$$

$$\varphi = \arctg f$$

Výška klenby:

$$b = \frac{a_1}{f}$$

Svislé zatížení:

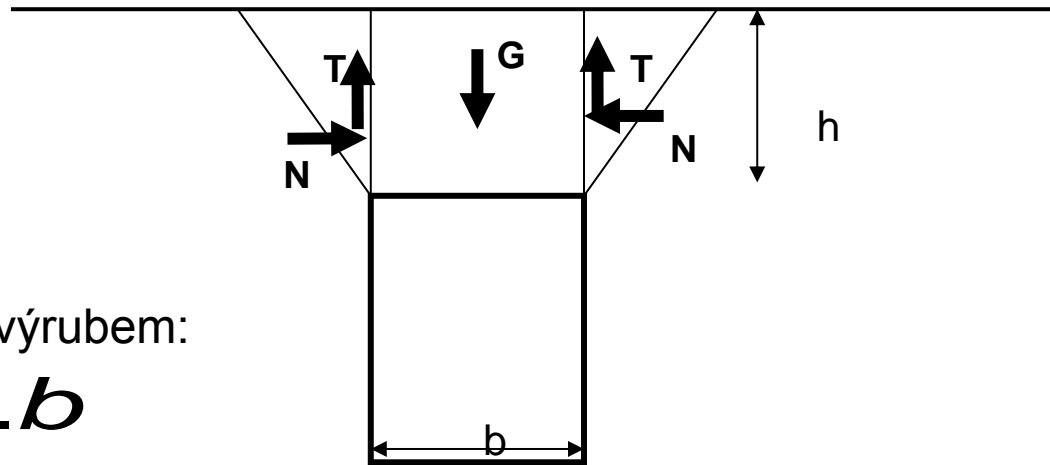
$$q_v = b \gamma$$

γ - objemová tíha prostředí

(výšku nadloží metoda nezohledňuje !)

Metoda dle Bierbäumera

Snižuje účinek celé tíhy nadloží G o účinek tření T , které vzniká podél sloupce horniny nad klenbou díla



Tíha sloupce nad výrubem:

$$G = \gamma \cdot h \cdot b$$

Aktivní tlak od klínu zeminy

$$N = \frac{1}{2} \gamma \cdot h^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

Tření:

$$T = N \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Rovnováha sil:

$$Q = G - 2 \cdot T$$

Zatížení stropu:

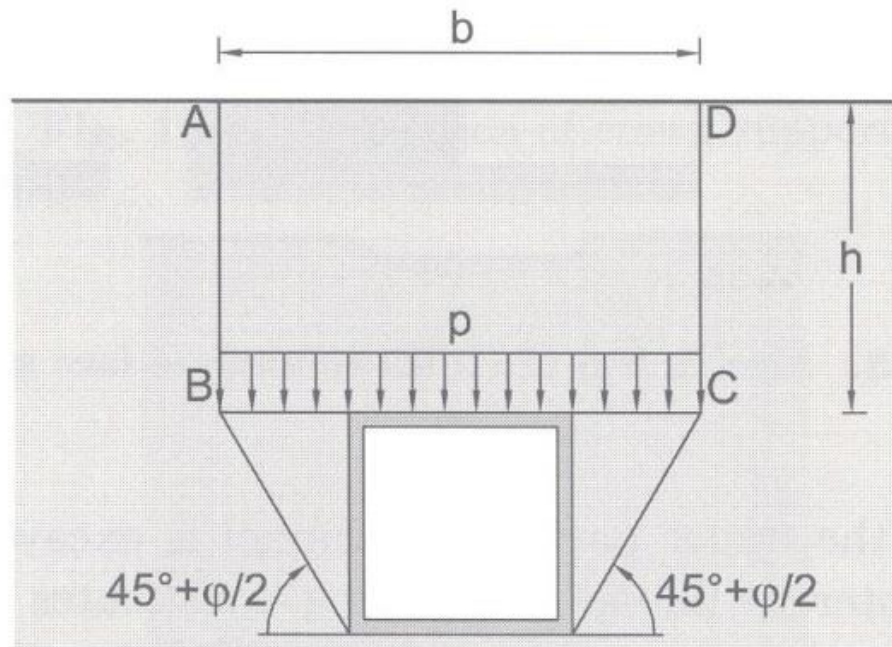
$$p_v = \frac{Q}{b}$$

Metody vycházející z teorie mechaniky kontinua

- vycházejí ze základních rovnic mechaniky kontinua (diferenciální rovnice rovnováhy, rovnice kompatibility, ...)-silové nebo deformační metody
- analytické (přímé řešení diferenciálních rovnic) nebo numerické (přibližná řešení, převádějí řešení diferenciálních rovnic na řešení soustav lineárních algebraických rovnic)
- silové metody – nezohledňují spolupráci s výztuží
- deformační metody - zohledňují spolupráci s výztuží

Silová metoda vycházející z mechaniky kontinua metoda dle Terzaghiho

Využívá Janssenovu rovnici pro zatížení v silu, nezohledňuje spolupráci s výztuží.



Vertikální zatížení výztuže díla:

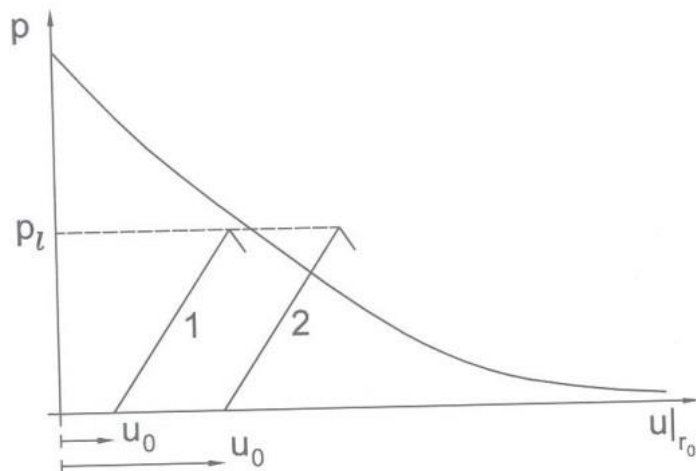
$$q_v = \frac{\gamma b}{2 \tan \varphi K_b} \left(1 - e^{-K_b \tan \varphi \frac{2h}{b}} \right)$$

K_b - koeficient bočního tlaku

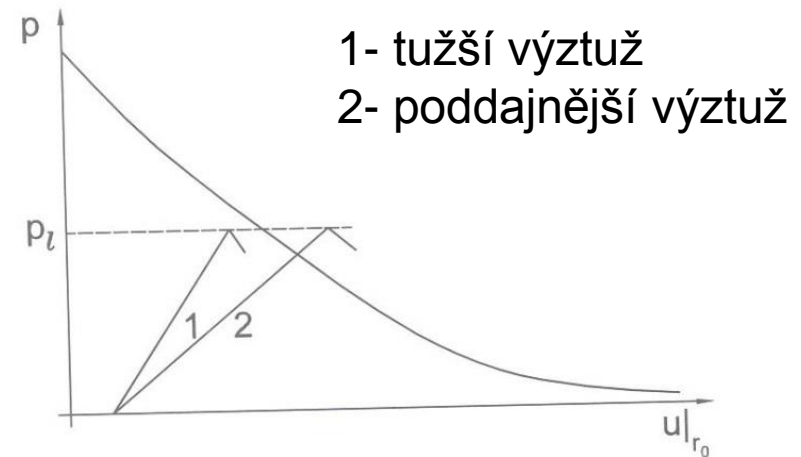
Deformační metody mechaniky kontinua pro stanovení zatížení

zatížení výztuže je dáno průsečíkem Fenner-Pacherovy křivky horniny a pracovně-deformační charakteristiky výztuže – bod rovnováhy systému

závislost zatížení na deformacích proběhlých před instalací výztuže



závislost zatížení na tuhosti výztuže



Analytická deformační metoda dle Bulyčeva

- řeší rovnice mechaniky kontinua analytickými prostředky – využívá teorie analytických funkcí komplexní proměnné, vztahů Kolosova-Muschelišviliho a komplexních potenciálů
- metoda vychází z rovnosti posunů na kontaktu horninového prostředí a výztuže
- řešení předpokládá pružné, izotropní, homogenní horninové prostředí
- výztuž je uzavřená, má konstantní tloušťku a konstantní materiál po celém obvodu
- metoda předpokládá střed díla v hloubce rovné minimálně 5-ti násobku poloměru d díla (v této hloubce lze již zanedbat vliv okrajové podmínky na povrchu) – převod úlohy z pružné poloroviny na řešení úlohy v pružné rovině, primární napětí je v modelu konstantní a odpovídá hloubce díla pod povrchem

- lze řešit i jiná než kruhová podzemní díla, jedinou podmínkou pro aplikaci metody je alespoň jedna osa symetrie (podmínka je u většiny standardních podzemních děl splněna)
- relativně složitý matematický aparát, ale konečné řešení je získáno v uzavřeném tvaru, dobře algoritmizovatelné a programovatelné, časově nenáročný výpočet ve srovnání s numerickými metodami

Numerické metody vycházející z teorie mechaniky kontinua

- metoda konečných prvků, hraničních prvků, konečných diferencí
- univerzální metody
- umožňují zohlednit širokou geometrickou i materiálovou variabilitu, různé konstitutivní modely chování materiálu
- umožňují implementovat do modelu různé typy výztužních prvků
- umožňují zohlednit časové fáze výstavby díla

Prezentované srovnávací výpočty provedeny softwarem PLAXIS 2D

(předpoklad: výztuž instalována ihned po vyražení, nebyla aplikována β –metoda pro zohlednění časového odstupu mezi vyražením díla a jeho vyztužením)

Řešená úloha pro srovnání výsledků metod pro stanovení zatížení výztuže

Tvar díla : kruh o poloměru 5 m

Výška nadloží: variantní 5-30 m

Tloušťka výztuže: variantně 5 cm, 20 cm

Materiál výztuže: $E_b=20\,000$ MPa, $m=0.2$, $\gamma=24$ kN/m³

Zeminové prostředí: homogenní, izotropní, jílovité prostředí

Objemová tíha zemin v okolí tunelu: 20 kN/m³

Modul pružnosti prostředí: 10 MPa

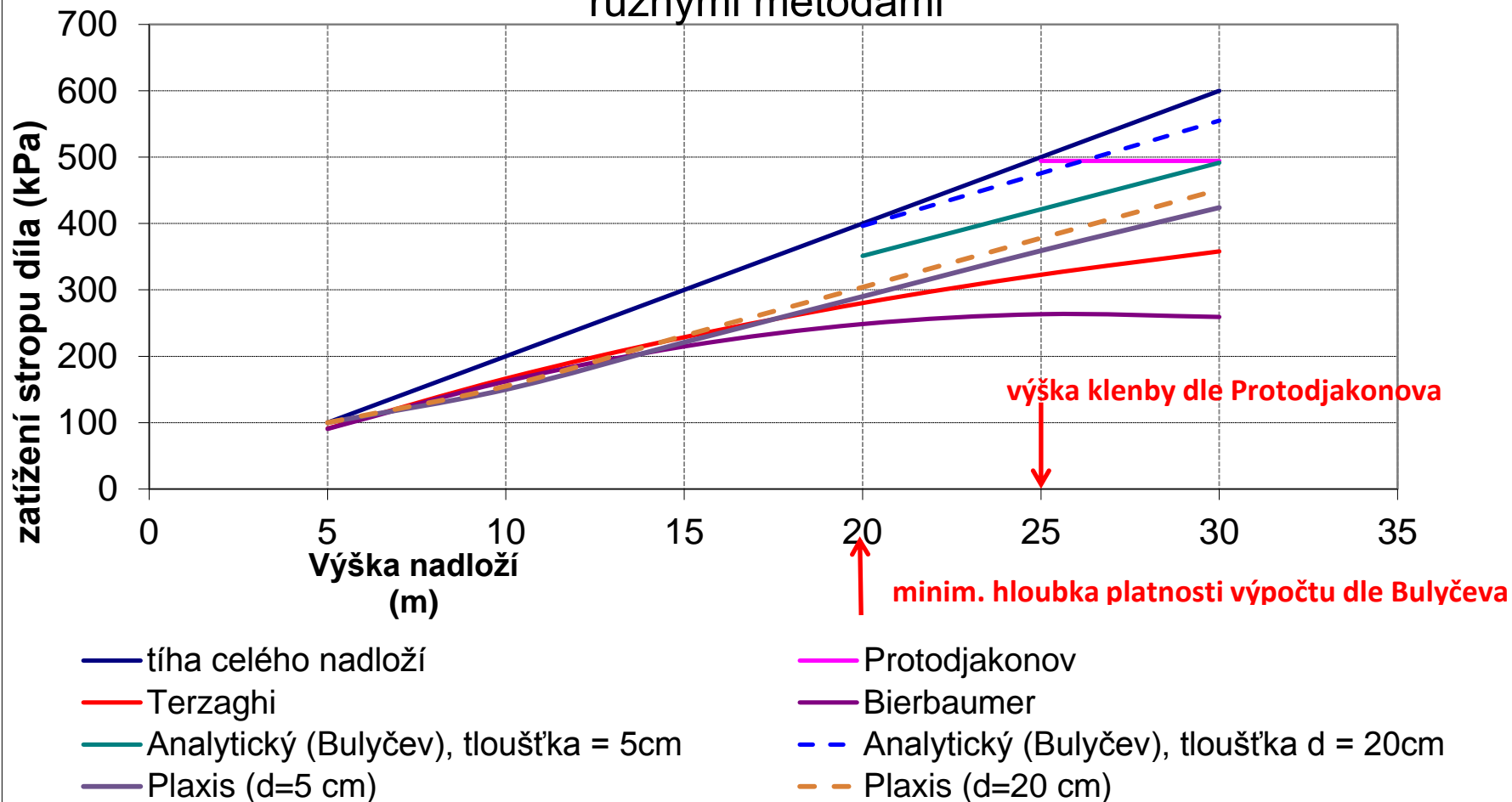
Poissonovo číslo: 0.4

Úhel vnitřního tření zeminového prostředí: 25 °

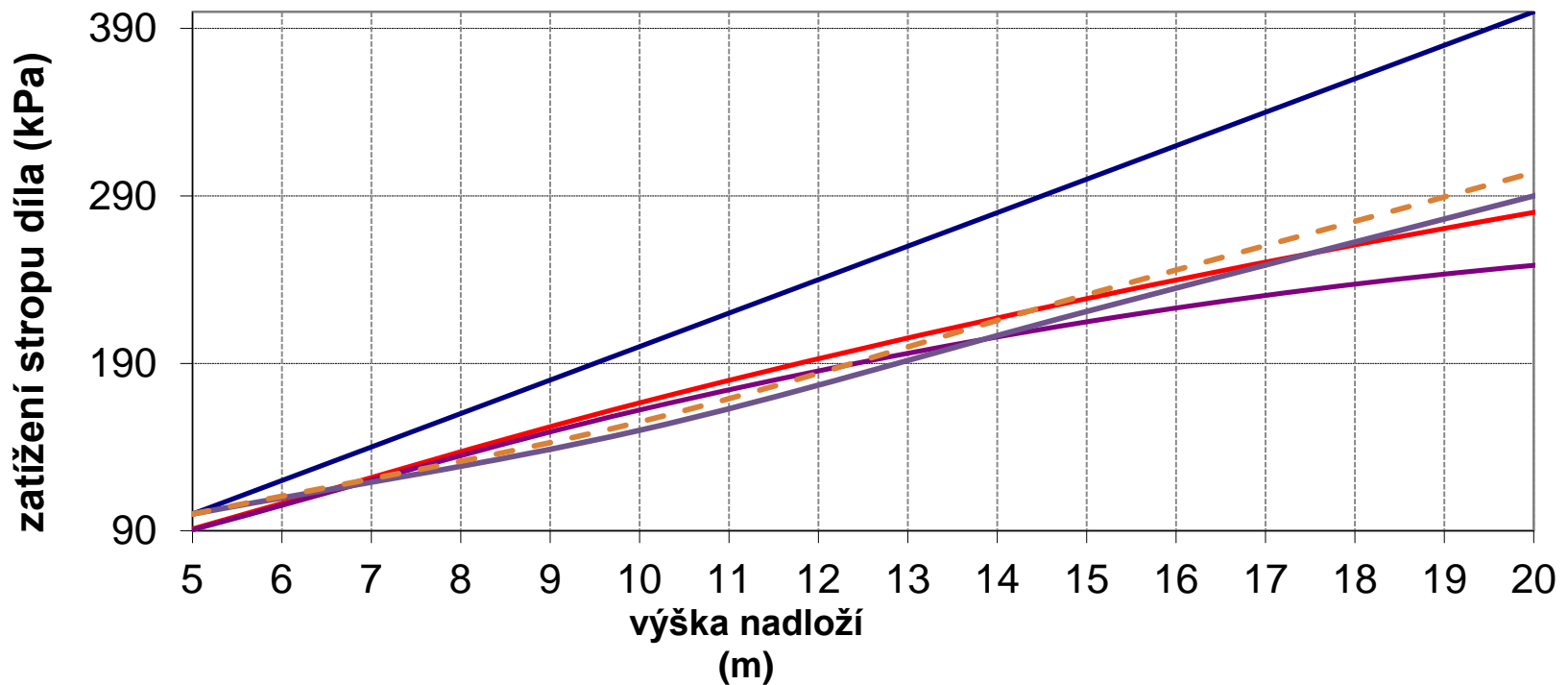
Soudržnost: 20 kPa

? zatížení stropu díla

Srovnání hodnot zatížení výztuže díla ve stropě stanoveného různými metodami



Srovnání hodnot zatížení výztuže díla ve stropě stanoveného
různými metodami
(detail pro hloubky 5-20 m)



— tíha celého nadloží

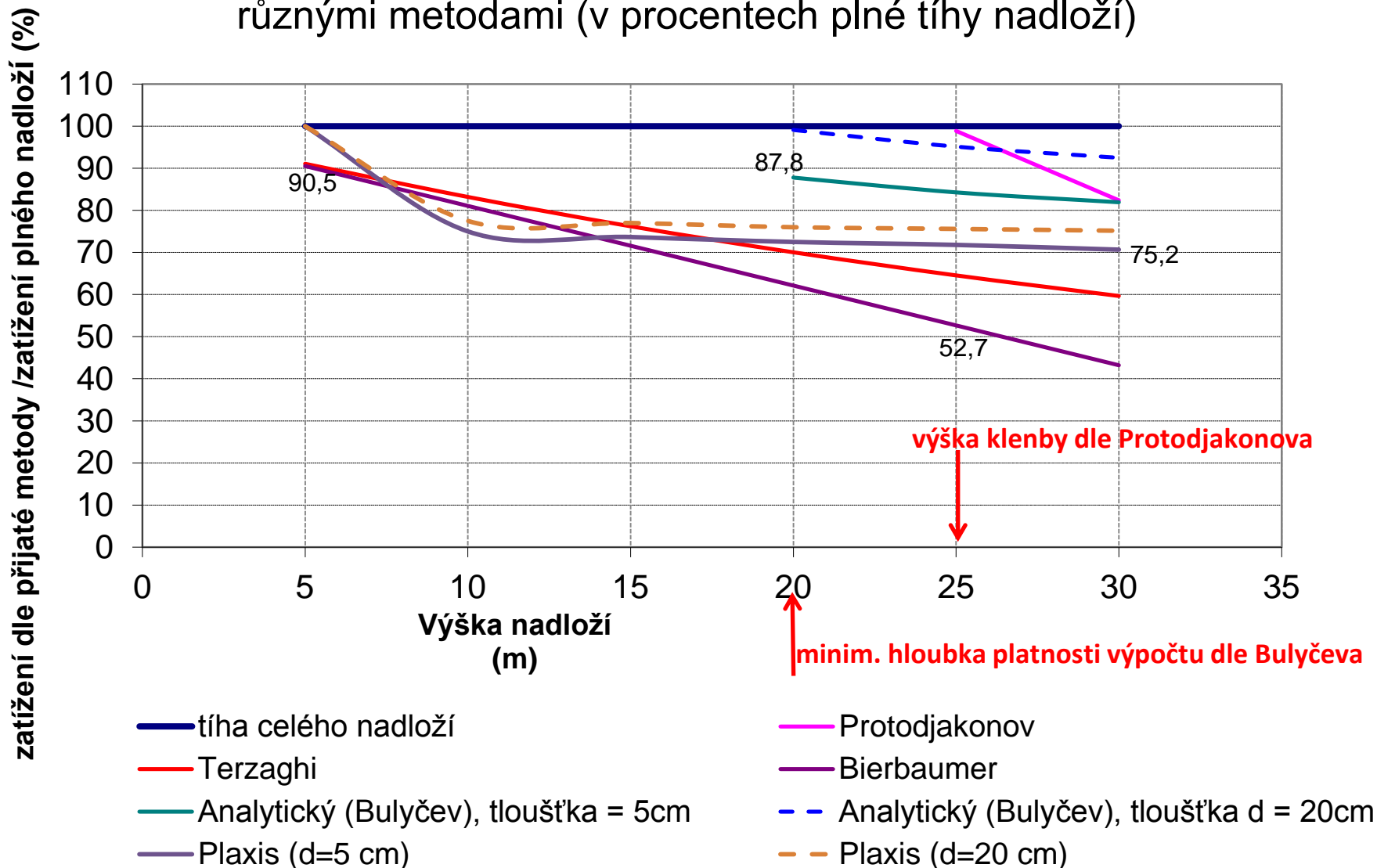
— Terzaghi

— Bierbaumer

— Plaxis (d=5 cm)

- - Plaxis (d=20 cm)

Srovnání hodnot zatížení výztuže díla ve stropě stanoveného různými metodami (v procentech plné tíhy nadloží)



Závěrečné srovnání výsledků aplikovaných metod pro stanovení zatížení

- 1) do výšky nadloží tunelu cca 20 m (tj. 4 násobku poloměru tunelu) se hodnoty zatížení výztuže počítané metodou dle Terzaghi a metodou konečných prvků příliš neliší, výpočet dle Bierbaumera dává pro výšky nadloží (do cca 3 násobku poloměru díla) rovněž srovnatelné hodnoty, pak jsou hodnoty dle této metody nižší o cca 14 %

Závěrečné srovnání výsledků aplikovaných metod pro stanovení zatížení

- 2) pro výšky nadloží větší než 4 násobek poloměru tunelu dává nejvyšší hodnoty zatížení metoda dle Bulyčeva (projevuje se vliv tuhosti výztuže – 20 cm výztuž je zatížena více než 5-ti centimetrová), stejnou závislost na tloušťce výztuže vykazuje i metoda konečných prvků, nižší hodnoty zatížení vykazuje metoda dle Terzaghiho, nejnižší pak dle Bierbaumera, metoda výpočtu dle Protodjakonova dává hodnoty zatížení nejvyšší

Závěrečné srovnání výsledků aplikovaných metod pro stanovení zatížení

- 3) pro výšky nadloží větší než 4 násobek poloměru tunelu jsou hodnoty zatížení stanovené dle Bierbaumera již minimálně závislé na výšce nadloží tunelu