

**Ing. Lukáš Ďuriš, Prof. Ing. Josef Aldorf, Dr.Sc.**

VŠB-TUO Ostrava, Fakulta stavební, L. Poděště 1758, 708 00 Ostrava-Poruba

tel.: 59 7321 944, fax: 59 7321 943, e-mail:josef.aldorf@vsb.cz

## **VLIV ZMĚN HOMOGENITY A VLASTNOSTÍ HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ NA ZATÍŽENÍ KOTEV NA PŘÍKLADU TUNELU BŘEZNO**

### **Abstract:**

This article presents the results of mathematical modelling (FEC) with impact of both homogeneity and rock massif properties changes on the development of anchor loading by example of tunnel Brezno near the town Chomutov.

### **1. Úvod**

Predikce zatížení kotev podzemního díla je závažným faktorem návrhu díla a jeho spolehlivost determinuje stabilitní stav díla. Pro výpočet změn se využil matematický model tunelu Brezno na přeložce železniční tratě spojující Prahu a Chomutov v severních Čechách. Tuto přeložku je nutno zbudovat vzhledem k postupující těžbě hnědého uhlí v nedalekém povrchovém dole. Předmětem modelování bylo posoudit vliv nehomogenity okolního horninového prostředí na stabilitu díla a zatížení kotev, tvořící součást primárního ostění.

### **2. IG podmínky tunelu**

Pro zjištění vývoje zatížení kotev bylo vybráno geotechnicky zajímavé prostředí, charakterizované jílovitými horninami. Stavba tunelu v těchto podmínkách byla zařazena do třetí geotechnické kategorie (náročná stavba v náročných podmínkách). Náročnost stavby byla umocněna také tím že v minulosti v místě stavby probíhala hornická činnost, což zanechalo následky v podobě poddolování území. Geologické poměry jsou dány stavbou neogenní teplicko – mostecko – chomutovské pánve a vlivem technické seizmicity z postupně se přibližujícího dolu. Horninové prostředí je tvořeno horninami jemnozrnými, tlačivými zatříděnými dle ČSN 73 1001 do tříd F6 a F8 pevné a tvrdé konzistence. Stabilita hornin v otevíraném výlomu je rozhodujícím způsobem ovlivněna uspořádáním ploch nespojitosti, jejich hladkostí, hustotou a všesměrnou rozpukaností. Geotechnický průzkum byl prováděn pomocí průzkumných vrtů a průzkumné štoly.

### **3. Matematický model tunelu**

Matematický model byl vytvářen v programovém systému Plaxis, kterým jsme schopni vyhodnocovat napěťo-deformační stav v horninovém masívu i ostění. Tento systém pracuje na základě metody konečných prvků (MKP). Postup modelování se skládá ze tří kroků, které na sebe postupně navazují. V prvním kroku se vytváří geometrie tunelu a horninové prostředí, podzemní dílo je umístěno do daného horninového prostředí které je charakterizováno svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi (pro standartní model). Geologický profil (viz obrázek č.1 a 2) vzchází z daného geologického řezu. Nadloží tvořily dvě pokryvné vrstvy kvartérní hlíny, oxidované jílovce a dále dvě vrstvy jílu ve kterých byla prováděna ražba. Kalota díla zasahovala zhruba 2 m do první vrstvy jílu (označováno jako JIL1) a zbytek profilu byl, v druhé vrstvě jílu (označováno jako JIL2). Pod těmito vrstvami se nacházela uhelná sloj o mocnosti 3 m, dále geologický profil pokračoval vrstvou dalších jílu (označovaných jako JIL3). Pro modelování těchto třech vrstev jílu byl použit konstitutivní model SSC (soft soil creep). Popis tohoto modelu je uveden níže. Nadloží modelu bylo dáno

výškou nadložních vrstev cca 25m. Podzemní voda byla umístěna jako pás zvodně do oxidovaných jílovců a částečně do kvartérních hlín. Ostění podzemního díla bylo zadáno z tuhých prvků (prutů). Geometrie přesně kopírovala tvar tunelu (podkova bez protiklenby). Z hlediska použité razicí metody (metoda obvodového vrubu) bylo nutno rozdělit ostění na pět lamel, které byly vzájemně spojeny klouby, což by ze statického hlediska odpovídalo čtyřkloubovému oblouku. Volba spojení jednotlivých lamel pomocí kloubu vycházela opět z reality razicí metody, která neumožňovala vytvoření monolitického celku primární výztuže a při technologickém vytváření jednotlivých lamel nebylo možno zajistit dokonalý spoj mezi jednotlivými lamelami. Tloušťka primární výztuže je 200 mm z prostého stříkaného betonu. Do spodních lamel byly umístěny dvě řady radiálních ocelových SN kotev  $\varnothing$  22mm proměnlivé délky 4 až 6 m instalované s mírným úklonem dle projektu tunelu.

V dalších krocích řešení je modelováno fázování postupu výstavby. V tomto případě se model skládá z tzv. iniciační fáze ve které se vytváří primární napěťo-deformační stav. V následující fázi byla vytvořena předkelnba a v následné fázi bylo vybráno jádro tunelu a byly instalovány kotvy. Vzhledem k časovému charakteru výpočtu bylo použito dalších 8 fází s časovým krokem 2 dny. První dvě fáze byly rozděleny do jednoho dne a následující fáze odpovídaly celkem 19 dnům existence tunelu. Časový faktor byl velice důležitý z hlediska vývoje napěťo-deformačního stavu.

#### 4. Model SSC

Tento model byl vyvinut speciálně pro modelování chování stlačitelných a bobtnavých měkkých zemin (např. jílu). Základní rysy SSC modelu:

- tuhost závislá na dráze napětí,
- možnost zohlednění chování zeminy při primárním zatížení, následném odlehčení a opětovném zatížení (vliv překonsolidace) a sekundární (časově závislé) stlačení (creep).

Základní parametry modelu:

$\lambda^*$  ... modifikovaný index stlačování

$\kappa^*$  ... modifikovaný index bobtnání

$\mu^*$  ... modifikovaný creepový index

Uvedené parametry lze stanovit z výsledků oedometrické zkoušky provedené ve speciálním režimu. Oedometrický modul přetvoření při zatěžování  $E_{oed}$ . Lze vyjádřit vztahem (1)

$$E_{oed} = \frac{\sigma}{\lambda^*} ; \lambda^* = \frac{p_{ref.}}{E_{oed.}^{ref.}}, \quad (1)$$

kde  $p_{ref.}$  je referenční zatížení při oedometrické zkoušce. Pro výpočet platí že  $p_{ref}$  odpovídá svislému geostatickému tlaku.

Do výpočtu byl dále zaveden koeficient překonsolidace OCR, určující poměr maximálních vertikálních napětí  $\sigma_p$ , kterým byla zemina vystavena v minulosti, a aktuálních vertikálních napětí  $\sigma_{yy}$ . Posledním faktorem zaváděný do modelu je koeficient bočního tlaku  $K_\sigma$ , který je odvozen z poměru svislého a vodorovného napětí v horninovém prostředí.

Pro vlastní výpočet byly vytvořeny dva základní modely, které se navzájem lišili modulem přetvárnosti. V prvním základním modelu bylo použito stejné hodnoty modulu přetvárnosti pro všechny jílovité vrstvy (homogenní model). V druhém základním modelu bylo použito rozdílných modulů jak v nadložních tak i podložních vrstvách. Modul přetvárnosti se nezadáva přímo do výpočtu, ale podle něj se odvíjejí jednotlivé indexy stlačení, bobtnání a creepu. Modely SSC jsou poměrně dost citlivé na zadávání hodnot OCR a  $K_\sigma$ , samotné stanovení těchto parametrů bylo dosti obtížné. Jediným možným vodítkem jak stanovit tyto hodnoty blízko skutečnosti in situ byla metoda pokusů a omylů. Zkoušením jednotlivých variant a jejich porovnáváním s výsledky monitoringu jsme dospěli k hodnotám,

kteře relativně dobře odpovídaly skutečnosti. Při vyhodnocování byly sledovány hlavně vertikální a horizontální deformace na primární výztuži. Při tvorbě modelů byly k dispozici výsledky konvergenčního měření na primárním ostění tunelu. Vývoj konvergenčí v tunelu byl závislý na čase proto bylo nutno zavést obdobné časové období i do modelu. Modelovaná situace se proto musela přizpůsobit naměřeným konvergencím a zpětně takto stanovit přibližné hodnoty OCR a  $K_{\sigma}$  (viz tabulky). Tohoto stavu se podařilo dosáhnout a přiblížit tak matematický model skutečnosti. Takto zjištěné hodnoty bylo možno dále použít pro další extrapolace.

Hodnoty pro základní výpočet jsou uvedeny v tabulce – HOMOGENNÍ MODEL

Typ zeminy	E [MPa]	$\lambda^*$ [-]	$\kappa^*$ [-]	$\mu^*$ [-]	OCR [-]	$K_{\sigma}$ [-]
JIL1	56	0,0095	0,0013	0,0005	1,7	0,8
JIL2	56	0,0162	0,0022	0,0008	1,7	0,8
JIL3	56	0,0229	0,0031	0,0011	1,7	0,8

– NEHOMOGENNÍ MODEL

Typ zeminy	E [MPa]	$\lambda^*$ [-]	$\kappa^*$ [-]	$\mu^*$ [-]	OCR [-]	$K_{\sigma}$ [-]
JIL1	<b>30</b>	0,0178	0,0024	0,0009	1,7	0,8
JIL2	56	0,0162	0,0022	0,0005	1,7	0,8
JIL3	56	0,0229	0,0031	0,0011	1,7	0,8

## 5. Interpretace výsledků

Na dvou základních modelech se zkoušely různé varianty a různé možnosti zatížení celého podzemního díla a tím také zatížení kotev. Kotvy ve spodních lamelách plní prakticky funkci protiklenby, která v tomto případě v projektu chyběla. Zatížení tunelového ostění vedlo k zvýšení napětí v okolí díla zejména ve spodní části, kde bylo koncentrováno největší napětí v primární výztuži. Tyto změny se projevovaly po zadání upravených parametrů některých nadložních hornin a snížení soudržnosti jílovitých hornin (JIL2) v počvě, kterým byl simulován degradační účinek tlakové vody v uhelné sloji. Vliv těchto změn byl zaveden vždy po 13 dnech (vyplývalo z výsledků monitoringu) a po zavedení těchto změn došlo vždy k výraznému nárůstu deformací a napětí. Mezi zatěžovací varianty patřily jednak změny vlastností hornin, dále se postupně snižovalo tření mezi výztuží a horninou, vliv vody z nadloží, což mělo další vliv na vývoj napětí v kotvách. Byly zkoušeny varianty bez kotev, byl sledován vliv imperfekce napojení lamel a nahrazení kloubových spojů lamel za tuhé spoje. Ve všech těchto variantách byly sledovány deformace, napětí v okolí díla, napětí pod lamelami, vnitřní síly ve výztuži a také napětí v kotvách. Jak již bylo uvedeno byly použity dvě řady kotev ve spodních lamelách. Vliv kotev nahazující funkci protiklenby se projevil ve srovnání zatížení obou řad kotev, kde spodní řada je více namáhána než horní řada (viz graf č.2), kde nárůst zatížení spodní řady je zhruba o 15% větší. Na uvedeném grafu můžeme také sledovat jaké následky na zatížení kotev měly změny okolního prostředí. Do doby 13 dnů je nárůst pozvolný, je ale patrné že pro nehomogenní prostředí je zatížení kotev větší v obou řadách. Po vložení degradovaných parametrů horniny dochází k nárůstu zatížení až o 100% a kotvy vyčerpávají svou projektovanou únosnost. V nehomogenním prostředí dochází k většímu nárůstu zatížení zejména ve spodních kotvách.

Jako srovnávací model souží varianta bez změny vlastností hornin, (viz graf č. 1). Nárůst zatížení je pozvolný a v době zhruba 13 dnů od instalace kotev se projevuje změna homogenního prostředí na nehomogenní. Dochází k nárůstu zatížení v nehomogenním prostředí a zejména ve spodní řadě kotev. Zajímavý vliv na vývoj zatížení kotev má i varianta postupného zmenšování tření mezi horninou a výztuží. Tření bylo zmenšováno postupně již

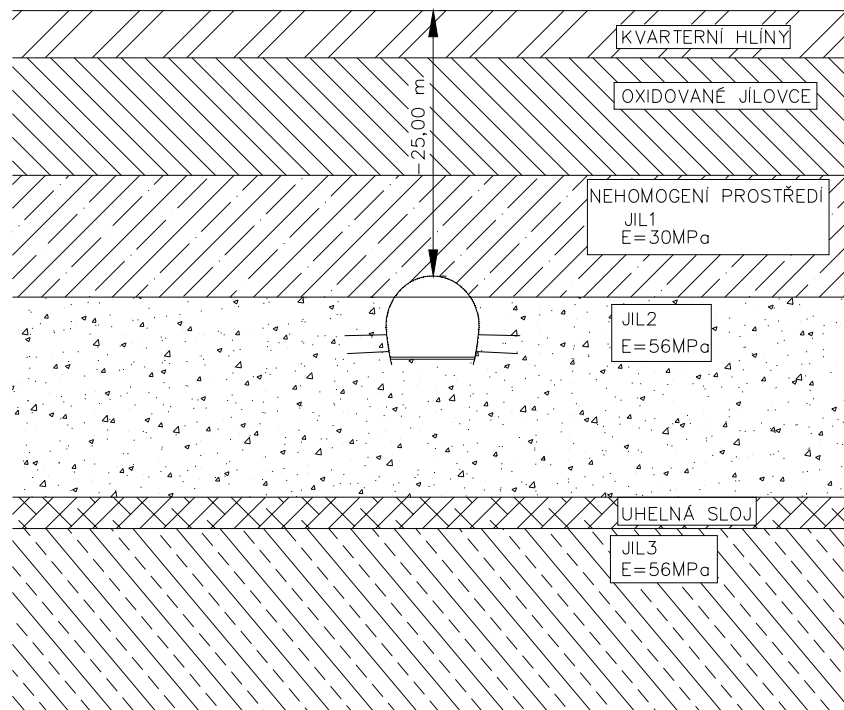
od prvních dnů a po 13 dnech bylo tření sníženo zhruba na hodnotu 60% (viz graf č.3). Kotvy jsou více zatíženy než kotvy obou předchozích variant. Po 13 dnech byly opět uplatněny změněné parametry hornin a došlo k očekávanému nárůstu zatížení více než dvojnásobně. Ve spodní řadě bylo zjištěno zatížení až na 670 kN při zhruba 50%-tním snížení tření. Oproti předchozím stavům, kdy byly nejvíce namáhány kotvy v nehomogenním prostředí, tentokrát byly nejvíce zatíženy kotvy ve spodní řadě v homogenním prostředí.

## 6. Závěr

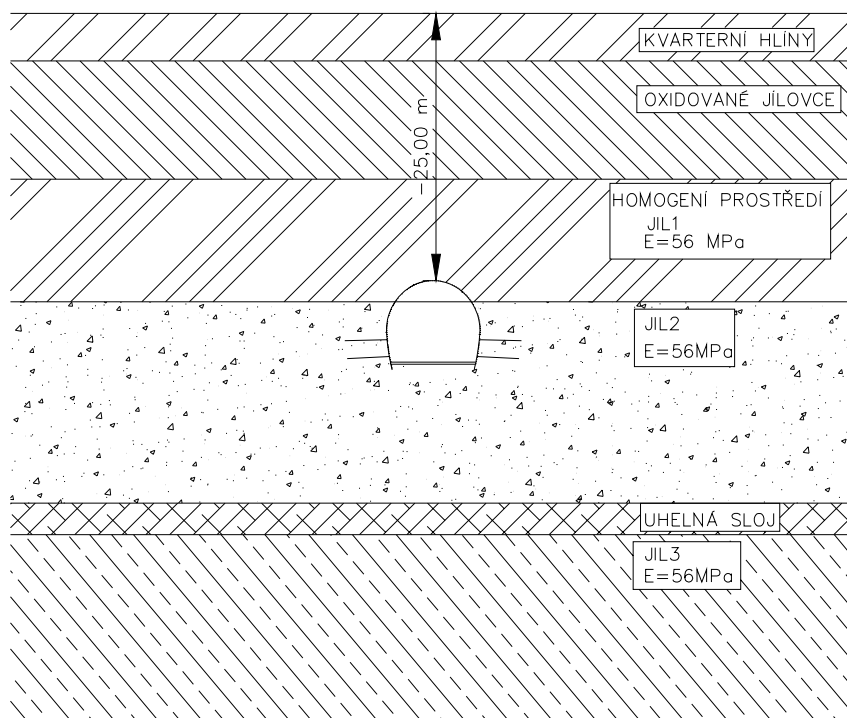
Pro modelování byl zvolen příklad Březenského tunelu, protože je realizován v jílovitých horninách, charakterizovaných bobtnavostí a plouživostí což se projevilo i na práci s modelem. Ukázalo se, že konstitutivní vztahy SSC modelu horniny dobře odpovídaly reálnému chování masívu. Výsledky srovnání ukazují na velmi významný vliv změn v homogenitě masívu a dopad změn vlastností hornin (degradující účinek vody) na vývoj zatížení kotev. Tomuto faktoru je tedy nutno při projektování kotvení výztuže věnovat příslušnou pozornost, protože může být i příčinou celkové nestability ostění.

Literatura:

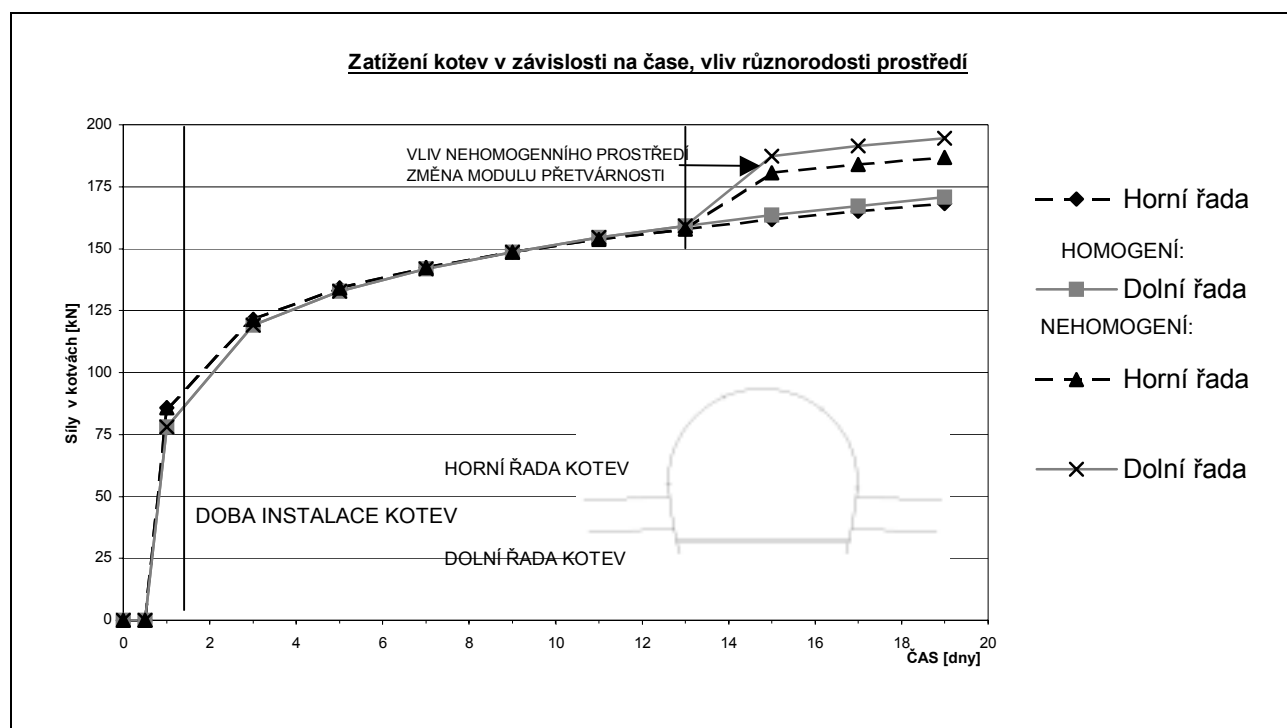
- [1] Sborník příspěvků 8. mezinárodního semináře zpevnování, těsnění a kotvení horninového masívu a stavebních konstrukcí 2003, Ostrava 2003
- [2] Manuál programového systému PLAXIS



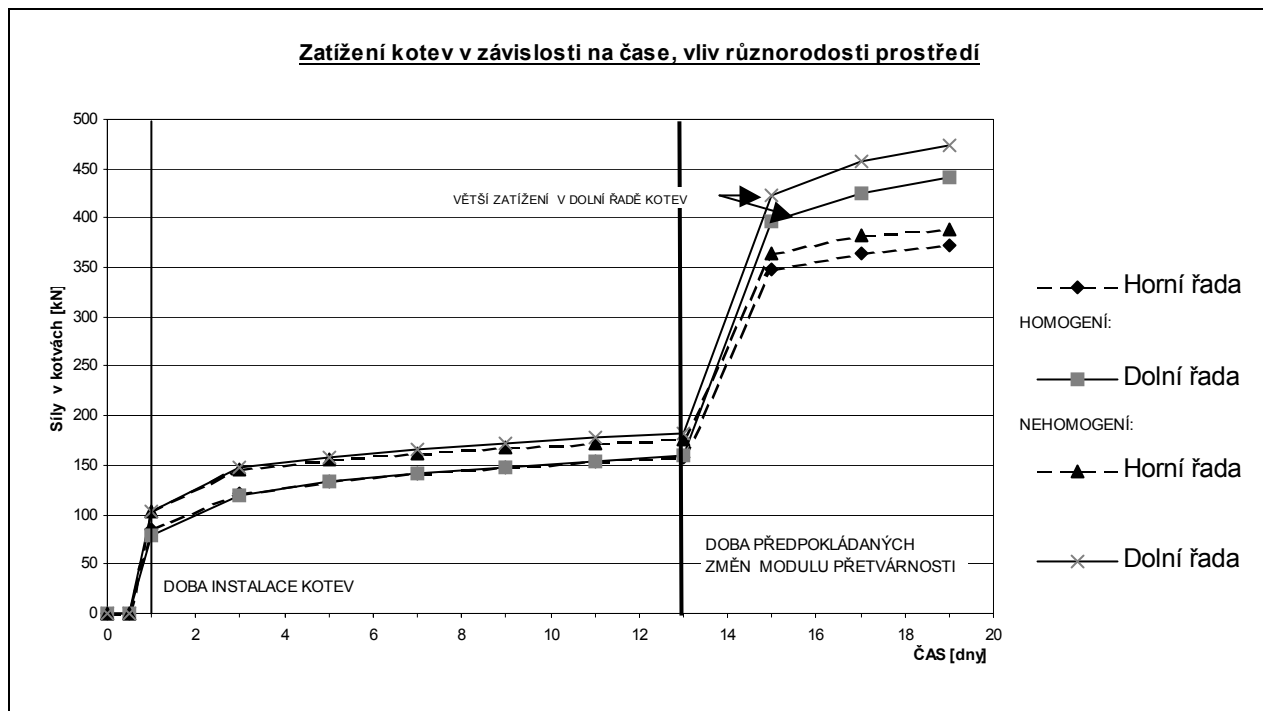
Obrázek č. 1 – Geologický profil nehomogenního modelu.  
Figure. 1. – Geological profile of heterogenous model



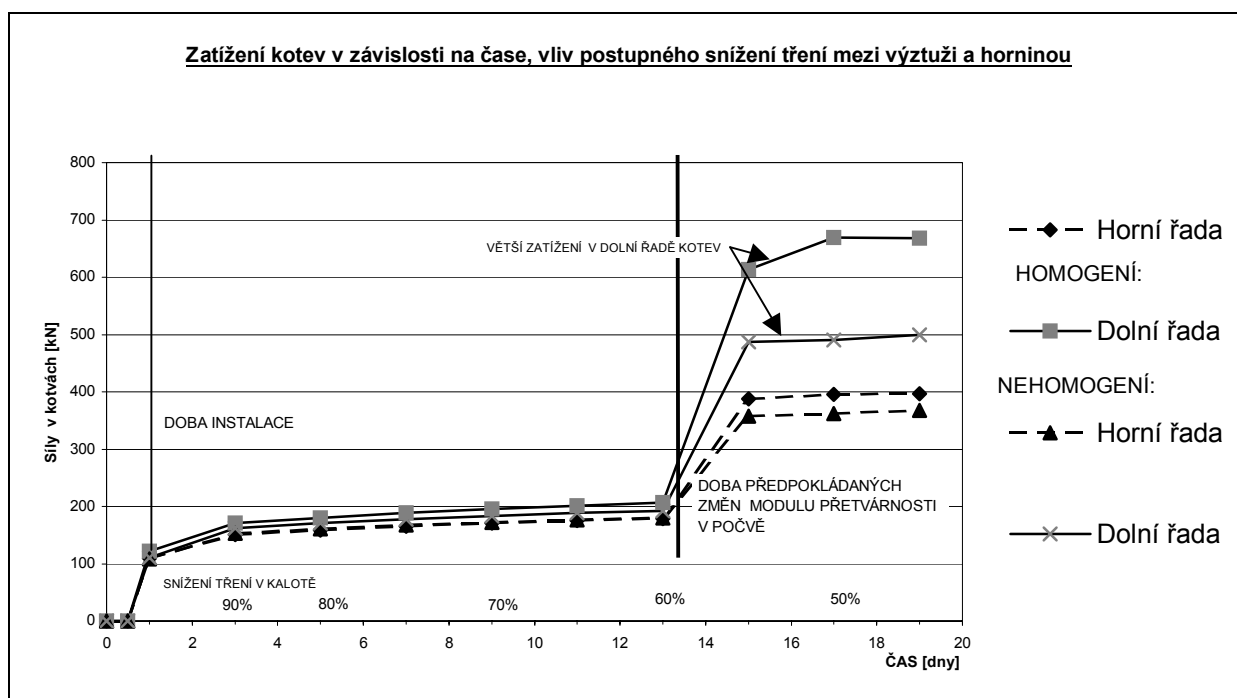
Obrázek č. 2 – Geologický profil homogenního modelu.  
 Figure. 2. – Geological profile of homogenous model



Graf č. 1 – Zatížení kotev bez vlivu změn  
 Graph 1. – Anchor loading without change



Graf č. 2 – Zatížení kotev s vlivem změn  
Graph 2. – Anchor loading with change



Graf č. 3 – Zatížení kotev se snížením tření mezi horninou a výztuží  
Graph 3. – Anchor loading with decrease of friction between rock and tunnel lining