

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



**Numerické modelování geomechanických jevů
v prostředí krystalinika**

**Numerical modelling of the geomechanics
processes in hard rock environment**

Bakalářská práce

Liberec 2009

Filip Zelinka

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R1011 - Elektronické informační a řídicí systémy

**Numerické modelování geomechanických jevů
v prostředí krystalinika**

**Numerical modelling of the geomechanics
processes in hard rock environment**

Bakalářská práce

Autor: **Filip Zelinka**

Vedoucí BP práce: Ing. Otto Severýn, Ph.D.

Konzultant: Doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.

Liberec 29. 5. 2009

Sem zadání

PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá numerickým modelováním geomechanických jevů v hornině. Veškeré výpočty, simulace a grafická zobrazení jsou provedena pomocí 2D modelovacího programu FLAC.

Úvodní část práce tvoří stručný přehled základních pojmů a vztahů užívaných v geomechanice. Dále je v práci popsán program FLAC a jsou zde prezentovány používané numerické metody. V následující části se práce zabývá způsoby ukládání zemního plynu. Zvláštní důraz je kladen na popis kavernového zásobníku Háje, který byl vybrán jako vzorová geomechanická úloha. Na zjednodušeném modelu byly počítány různé kombinace vnitřních a vnějších tlaků působících na danou oblast. V závěru se práce věnuje vlastnímu modelování, při kterém jsou ve třech konkrétních úlohách sledovány napětí v hornině při určitém tlakovém zatížení.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with numerical modeling of geomechanical phenomena in rocks. All calculations, simulations and graphics rendering is performed using a 2D modeling program FLAC.

The introductory part consists of a brief overview of basic concepts and relationships used in geomechanics. It is described in the work program FLAC are presented in numerical methods used. The following work deals with ways to store natural gas. Particular emphasis is placed on description cavern storage of Háje, which was chosen as a model geomechanická role. In the simplified model were calculated various combinations of internal and external pressures acting on the area. The end of the work deals with its own modeling, which are in three specific tasks monitored tensions in rocks at a pressure load.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	Úloha geomechaniky.....	11
2.1	Metody řešení geomechanických úloh	11
2.2	Definice pojmů, používané výrazy	12
2.2.1	Kontinuum.....	12
2.2.2	Napětí	13
2.2.3	Hookův zákon	15
2.2.4	Deformace	16
2.2.5	Smyk	17
2.2.6	Poissonovo číslo.....	18
2.2.7	Pórovitost	19
2.2.8	Saturace	19
2.2.9	Propustnost.....	20
3	Flac.....	21
3.1	Sít'	21
3.2	Materiál.....	22
3.3	Uživatelské rozhraní	23
3.4	Zadáání dat	24
3.5	Systémové požadavky	24
3.6	Použitá metoda	25
3.6.1	Typy sítí	26
3.6.2	Změna hustoty sítě	26
3.6.3	Zavádění okrajových podmínek.....	27
3.6.4	Odhad chyby	29
3.6.5	Porovnání metod	29

4	Podzemní zásobník zemního plynu Háje	30
4.1	Zemní plyn.....	30
4.2	Podzemní zásobník plynu.....	30
4.3	Podzemní zásobník zemního plynu Háje	31
4.3.1	Historie.....	31
4.3.2	Podzemní část.....	33
4.3.3	Nadzemní část	35
5	Model zásobníku	36
5.1	Úloha první: Dva tunely	37
5.2	Úloha druhá: Část tunelu	41
5.3	Úloha třetí: Maximální tlak	43
5.4	Úloha čtvrtá: Tlaková zátka.....	45
	Přílohy	51
	Příloha A Horizontální složka napětí	51
	Příloha B Ukázka datového souboru.....	54
	Příloha C Obsah CD.....	54
	Použitá Literatura a Zdroje.....	55

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2.1 Síla působící na plochu	13
Obr. 2.2 Řez kontakty zrn	14
Obr. 2.3 Tenzor napětí	15
Obr. 2.4 Čistý smyk	17
Obr. 2.5 Deformace tělesa při působení dvou totožných sil opačným směrem.....	18
Obr. 3. 1 Grafické rozhraní GIIC	22
Obr. 3.2 Konzola programu FLAC	23
Obr. 3.3 Typy pravoúhlých sítí	26
Obr. 3.4 Přenesení okrajové podmínky Collatův postup	27
Obr.3.5 Přenesení okrajové podmínky z bodu 0 do bodu 1	28
Obr. 4.1 Příklad zásobníku v porézní hornině.....	31
Obr. 4.2 Schéma podzemního zásobníku plynu Háje	32
Obr. 4.3 Schéma zobrazující umístění tlakových zátek	33
Obr. 4.4 Schéma tlakové uzávěry.....	34
Obr. 4.5 Řez zásobníkem	34
Obr 5. 1 Model pro úlohu Dva tunely	37
Obr 5. 2 Vertikální složka napětí v hornině při nulovém tlaku v zásobníku	38
Graf 5. 3 Vertikální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při nulovém vnitřním tlaku	38
Obr 5. 4 Vertikální složka napětí v hornině při vnitřním tlaku v zásobníku 7,5 MPa	39
Graf 5. 5 Vertikální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při vnitřním tlaku 7,5MPa	39
Obr 5. 6 Vertikální složka napětí v hornině při vnitřním tlaku v zásobníku 12,5 MPa	40
Graf 5. 7 Vertikální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při vnitřním tlaku 12,5MPa	40
Obr 5. 8 Model pro úlohu Část tunelu s vyznačenou úsečkou.....	41
Obr 5. 9 Napětí v hornině při 7,5 MPa a tlaku půdy 26,3MPa	42

Graf 5. 10 Závislost napětí v hornině (vertikální osa) na vzdálenosti (horizontální osa) při vnějším tlaku 7,5MPa.....	42
Obr 5. 11 Model pro úlohu Maximální tlak s vyznačenou úsečkou, na které se zjišťuje napětí v hornině.....	43
Graf 5.12 Závislost napětí na vzdálenosti od tunelů při nulovém vnitřním tlaku.....	44
Graf 5. 13 Závislost napětí na vzdálenosti od tunelů při vnitřním tlaku 7,5MPa	44
Graf 5. 14 Závislost napětí na vzdálenosti od tunelů při vnitřním tlaku 0,15MPa	45
Obr 5. 15 Model pro úlohu Tlaková zátka	45
Obr 5. 16 Napětí v okolí tlakové zátky na rozhraní voda-plyn.....	46
Graf 5. 17 Závislost napětí na vzdálenosti měřeno na úsečce AB	47
Graf 5. 18 Závislost napětí na vzdálenosti měřeno na úsečce CD	47
Obr 5. 19 Napětí v okolí tlakové zátky na rozhraní vzduch-voda	48
Graf 5. 20 Závislost napětí na vzdálenosti měřeno na úsečce AB	48
Graf 5. 21 Závislost napětí na vzdálenosti měřeno na úsečce CD	49
Zvýšení tlaku na jednom konci tlakové zátky se projeví nárůstem napětí v hornině na jejím druhém konci. Napětí v zátce klesá se zvyšující se vzdáleností od zdroje tlaku.	49
Obr A.1 Horizontální složka napětí v hornině při nulovém vnitřním tlaku v tunelu	51
Graf A. 2 Horizontální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při nulovém vnitřním tlaku.....	51
Obr A. 3 Horizontální napětí v hornině při vnitřním tlaku 7,5 MPa.....	52
Graf A. 4 Horizontální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při vnitřním tlaku 7,5 MPa	52
Obr A. 5 Horizontální napětí v hornině při vnitřním tlaku 12,5 MPa.....	53
Graf A.6 Horizontální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při vnitřním tlaku 12,5 MPa	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vstupní parametry horniny.....	36
--	----

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

σ	normálové napětí
τ	smykové napětí
F	síla
m	hmotnost
g	tíhové zrychlení
\vec{n}	vektor normály
A	plocha řezu
\vec{F}	výsledný vektor síly
\vec{T}	tenzor napětí
E	Youngův modul
ε	poměrné prodloužení
l_0	délka
α	teplotní součinitel roztažnosti
γ	úhel přetvoření
Ω	zkosení
μ	Poissonovo číslo
V_p	objemu pórů horniny
V_o	celkovému objemu vzorku
p	pórovitost
V_V	objem vody v hornině
s	saturace
k_p	součinitel propustnosti
Q	protékané množství za čas
η	dynamická viskozita
Δp	tlakový rozdíl

1 ÚVOD

Zemní plyn je v současné době nepostradatelným zdrojem energie. Převážně se používá pro výrobu tepelné energie a jde o složku palivového mixu, jehož ekologická zátěž na okolní prostředí není tak velká jako u ostatních fosilních paliv. Zároveň se předpokládá, že jeho zásoby jsou výrazně větší nežli stávající zásoby uhlí či ropy. Další výhodou plynu je, na rozdíl od elektřiny, že se dá dobře skladovat.

Na území České republiky se nenachází žádné, významné ložisko zemního plynu a země je zcela závislá na dodávkách tohoto paliva ze zahraničí, což může být značně riskantní. Jako preventivní opatření proti krátkodobým výpadkům vnitrostátních dodávek plynu se na našem území začaly budovat podzemní zásobníky.

Z možných způsobů uchovávání a skladování zemního plynu se nejčastěji využívá princip vtláčení plynu do porézní horniny. Další možností je ukládání plynu do podzemních kaveren vytvořených buď přírodními procesy, nebo lidskou činností. Tato alternativa byla v devadesátých letech zvolena v případě kavernového zásobníku Háje na Příbramsku. Ve hloubce bezmála 1 km zde byla vyražena v granodioritovém masivu soustava tunelů a přístupových chodeb. Po dokončení ražby byl zásobník uzavřen a zahájen jeho zkušební provoz. V současné době je zásobník plně využíván, jeho maximální pracovní tlak tj. tlak v zásobníku při běžném chodu je stanoven na 12,5 MPa. Natlakované tunely působí na okolní horninu a v ní dochází k deformacím a ke změnám vnitřního napětí.

Tato bakalářská práce se po krátkém úvodu do mechaniky pružnosti a geomechaniky hornin blíže zaměřuje na možnosti skladování zemního plynu a na modelu podzemního úložiště zemního plynu jsou zde aplikovány úlohy mechaniky hornin.

2 ÚLOHA GEOMECHANIKY

Vědní obor geomechanika se dělí na mechaniku zemin a mechaniku hornin. Mechanika zemin je nejčastěji využívána pro predikci změny vlastností a následné změny chování zemního masivu (pod pojmem zemní je myšlena vrchní zvětralá vrstva zemské kůry) při zatěžování, ke kterému může dojít například výstavbou nové komunikace či zástavby.

Mechanika hornin zkoumá chování nezvětralých částí zemské kůry a v ní vybudovaných staveb. Jedná se například o ražení tunelů nebo důlní díla vytvořená za účelem těžební činnosti.

Hlavním důvodem měření spojených s geomechanickým výzkumem a simulacemi je v prvé řadě ochrana lidských životů a předcházení nehod, jako jsou například důlní závaly nebo půdní sesuvy vyvolané přetížením svahů či nadměrným množstvím srážek přicházejícím v krátkém časovém úseku. V neposlední řadě je geomechanika zajímavá i z ekonomického hlediska, důkladným měřením lze předejít neočekávaným komplikacím.

2.1 Metody řešení geomechanických úloh

Geomechanické úlohy lze řešit následujícími metodami:

a) Pozorovací metoda

Tato metoda využívá k získání výsledků pozorování a vyhodnocování naměřených hodnot. Dále využívá předchozích zkušeností s danou lokalitou a analogií mezi oblastmi s podobnými vlastnostmi. Do metody se nezahrnuje využití mechanického modelu. Jako nevýhodu pozorovací metody lze uvést nutnost dlouhé praktické zkušenosti s danou problematikou.

b) Semianalytická metoda

Tuto metodu lze definovat jako kombinaci observačního a matematického přístupu. S využitím statistiky dosáhneme požadovaných závěrů. Semianalytickou metodu lze používat bez hlubšího studia fyzikální jevů.

c) Analytická a numerická metoda

Za pomoci matematického modelu se vytvoří idealizovaný model geologického prostředí. A pro uzavřenou oblast se získá numerické řešení. Tato metoda využívá zpětné vazby s naměřenými hodnotami.

V minulosti byly častěji používány metody analytické, ovšem s rozvojem výpočetní techniky se pozornost přesunula hlavně do oblasti numerického modelování.

Při tvorbě numerického modelu v některém ze simulačních nástrojů je důležité si uvědomit, že vytvořený model nebude nikdy přesně odpovídat skutečnému chování v reálné oblasti. Proto je třeba model chápat spíše jako pomůcku pro studium problematiky a zkoumání dalších možností, než k přesnému předpovídání reakcí v dané lokalitě.

Model by měl být co nejjednodušší, ale současně by v něm měly být zahrnuty nejdůležitější parametry řešeného problému. Je tedy považováno za výhodnější vytvořit několik jednodušších modelů nežli jeden komplexní. Důvodem je, že jednoduché modely lze snáze upravovat a vylepšovat. [1]

2.2 Definice pojmů, používané výrazy

2.2.1 Kontinuum

Při modelování se zkoumá oblast z makroskopického hlediska dané oblasti, je proto vhodné těleso považovat za část prostoru, který je spojitě vyplněn látkou o určitých vlastnostech. I přesto, že ve skutečnosti je struktura daného tělesa diskrétní (skládá se z atomů, zrněk písku...). Není možné, ani žádoucí, do modelu zahrnout každou nespojitost materiálu.

Proto zde bude zaveden pojem kontinua, to představuje spojitě prostředí, ve kterém jsou všechny veličiny definovány pro nekonečně malý bod. Oblast, kterou se rozhodneme označit za kontinuum, musí být ve srovnání s velikostí jednotlivých částic dostatečně velká, ale současně dostatečně malá na to, aby nebyla ovlivněna celková nehomogenitami modelované oblasti.

2.2.2 Napětí

Působí-li na těleso vnější síla, dochází k jeho deformaci, kterou jsou v tělese vyvolány vnitřní síly.

Roku 1823 Augustin Louis Cauchy poprvé definoval intenzitu vnitřní síly, napětí σ , jako sílu F působící na plochu A viz obr. 2.1 a. Síla se vypočítá podle vztahu $F = mg$, kde m je hmotnost tělesa působícího na plochu a g je tíhové zrychlení.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

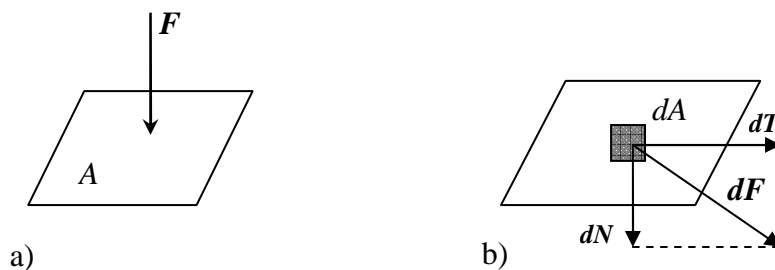
Na obrázku 2.1 b je znázorněn elementární vektor vnitřní síly $d\mathbf{F}$, který se skládá ze dvou na sebe kolmých vektorů. Jde o normálovou složku $d\mathbf{N}$, která má kolmý směr na plochu a o tečnou složku $d\mathbf{T}$, ta je s plochou rovnoběžná. Pomocí těchto vektorů, působících na elementární plochu dA , lze vypočítat

normálové napětí

$$\sigma = \frac{dN}{dA}$$

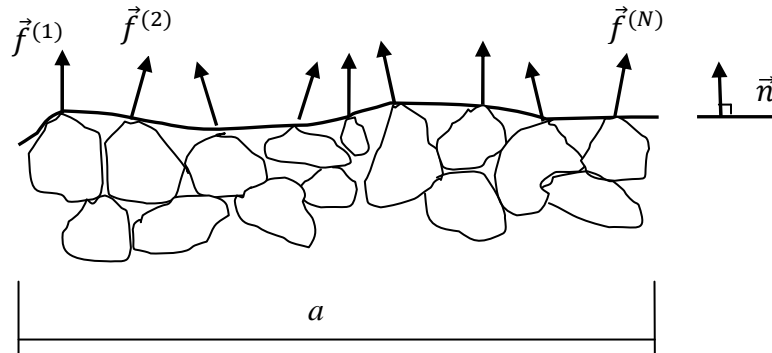
smykové napětí

$$\tau = \frac{dT}{dA}$$



Obr. 2.1 Síla působící na plochu

Velikost vnitřních sil se nejčastěji určuje metodou řezu. Na obrázku 2.2 je znázorněn řez kontakty zrn. Plocha řezu $A = a^2$ musí mít dostatečnou velikost, aby se daná oblast mohla považovat za kontinuum.



Obr. 2.2 Řez kontakty zrn, převzato z [1]

Výsledný vektor vnitřní síly, která působí v rovině s normálou \vec{n} , získáme součtem všech vnějších sil působících na plochu A .

$$\vec{F} = \sum_i \vec{f}^{(i)}$$

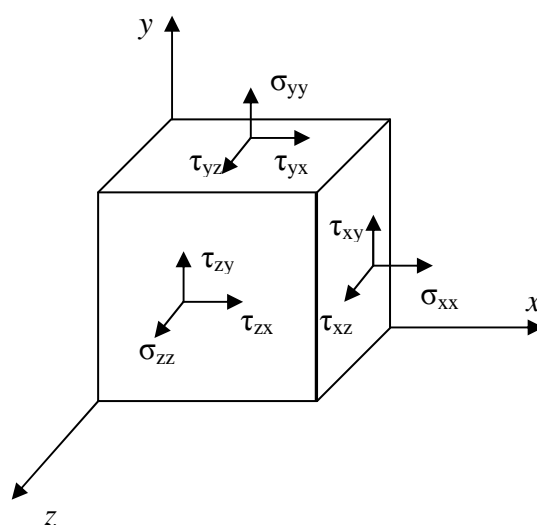
V rovinách působí napětí v_x , v_y , a v_z toto napětí se dále rozdělí na složky popisující normálové a smykové napětí. Rozklad se provede pro všechny stěny hranolu, viz obr. 2.3. Výsledkem je tenzor napětí \vec{T} , který je tvořen devíti složkami. Hlavní diagonálu tvoří normálové napětí σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} a ostatní prvky tenzoru τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} , τ_{xz} , τ_{zy} , τ_{yx} tvoří napětí smykové, kde první index odpovídá normále roviny, v níž leží a druhý index odpovídá směru osy, s níž je smykové napětí rovnoběžné.

Složky smykového napětí se mohou zjednodušit. Smyková napětí ve dvou vzájemně kolmých rovinách jsou co do velikosti stejná a vždy působí buď ke společné hraně, nebo od ní.

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz}$$



Obr. 2.3 Tenzor napětí, převzato z [1]

Napjatost v určitém bodě tělesa je tedy určena 6 složkami z toho třemi složkami normálového napětí a třemi složkami napětí smykového. Zdroj [1],[2]

2.2.3 Hookův zákon

Hookův zákon popisuje pružnou deformaci materiálu při působení síly, za předpokladu, že se jedná o malou sílu a malé deformace, které po odlehčení zmizí.

Slovně:

„Deformace je úměrná napětí materiálu“

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Kde σ [Pa] je napětí materiálu, E [Pa] je modul pružnosti v tahu (Youngův modul), a ε je poměrné prodloužení. Toto prodloužení se získá, vydělením přírůstku materiálu jeho délkou před zatížením $\varepsilon = \Delta l / l_0$; [1 = m/m].

2.2.4 Deformace

Pod pojmem deformace neboli přetvoření si lze představit změnu délky (resp. plochy nebo objemu) v porovnání s původní délkou. Přetvoření také způsobuje změnu napjatosti tělesa.

Pro 1D případ

Vztah $\varepsilon = \Delta l/l_0$ je možné použít jen v případě, je-li poměrné prodloužení ε konstantní po celé délce l_0 . V případě, že $\varepsilon \neq$ konstantě se používá vztah

$$\varepsilon(x) = \frac{\Delta dx}{dx}$$

kde Δdx je prodloužení elementu

$$\Delta dx = \frac{F \cdot dx}{E \cdot A_0}$$

Celkové prodloužení, pokud F , E , A_0 jsou konstantní

$$\Delta l = \int_{(l_0)} \Delta dx = \int_0^{l_0} \frac{F \cdot dx}{E \cdot A_0} = \frac{F \cdot l_0}{E \cdot A_0}$$

Deformace závisí přímo na silovém účinku F [N] a délce l_0 [m], na níž síla působí, a nepřímo na modulu pružnosti E [Pa] a průřezu A_0 [m²].

K deformaci může dojít i změnou teploty Δt [K].

Celková délka tělesa po tepelné deformaci je rovna

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

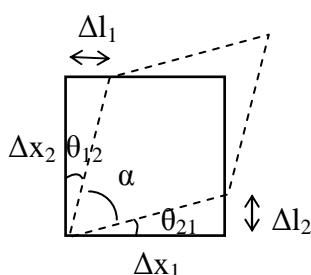
kde l_0 je délka před změnou teploty Δt , a α [K⁻¹] teplotní součinitel roztažnosti.

Přírůstek délky vlivem změny teploty je roven

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

2.2.5 Smyk

Pro případ čistého smyku ve dvojrozměrném prostoru obr. 2.4. V tomto příkladu bude považováno zkosení v obou souřadných osách jako stejné $\theta_{12} = \theta_{21}$.



Obr. 2.4 Čistý smyk

Pro malé hodnoty úhlu θ platí

$$\theta_{21} \approx \tan \theta_{21} = \frac{\Delta l_2}{\Delta x_1} \quad \theta_{12} \approx \tan \theta_{12} = \frac{\Delta l_1}{\Delta x_2}$$

Úhel přetvoření γ neboli zkos je úhel popisující změnu kolmosti dvou na sebe původně kolmých směrů.

$$\gamma_{12} = 90^\circ - \alpha = \theta_{12} + \theta_{21} \approx \frac{\Delta l_1}{\Delta x_2} + \frac{\Delta l_2}{\Delta x_1}$$

Ve vztazích je použito také znaménko přibližné rovnosti \approx , je to z toho důvodu, že přetvoření je definováno pro posuny Δl blízkí se nule.

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial l_1}{\partial x_1} \quad , \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial l_2}{\partial x_2}$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \gamma_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial l_1}{\partial x_2} + \frac{\partial l_2}{\partial x_1} \right)$$

Při pohybu bodů tělesa dochází k jeho přetvoření, ale ne každá změna polohy tělesa vyvolá jeho deformaci. Pokud se jedná o translační nebo rotační posun tuhého tělesa k přetvoření nedochází.

Pro výpočet gradientu posunu je nutné sestavit tenzor posunu, který se dá rozdělit na část popisující přetvoření tělesa a část popisující jeho rotaci.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial x_1} & \frac{\partial l_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial l_2}{\partial x_1} & \frac{\partial l_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \Omega_{12} \\ \Omega_{12} & 0 \end{bmatrix}$$

Obecný vztah pro výpočet jednotlivých prvků matice je pro část způsobující přetvoření

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial l_i}{\partial x_j} + \frac{\partial l_j}{\partial x_i} \right)$$

a část rotační (zkosení)

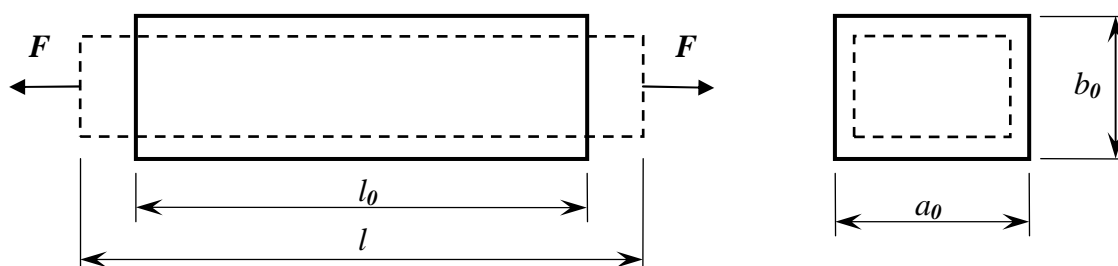
$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial l_i}{\partial x_j} - \frac{\partial l_j}{\partial x_i} \right)$$

kde je pro kartézskou soustavu souřadnic $i, j = 1, 2, 3$. Zdroj [1],[2].

2.2.6 Poissonovo číslo

Při namáhání tělesa silou, viz obr. 2.5, nedochází pouze ke změně jednoho podélného rozměru, ale mění se i rozměry příčné, kde se deformace tělesa v jednotlivých osách rovná

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l_0}; \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta a}{a_0}; \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta b}{b_0}$$



Obr. 2.5 Deformace tělesa při působení dvou totožných sil opačným směrem [2]

Je-li materiál izotropní, pak při jednoosé napjatosti je $\varepsilon_y = \varepsilon_z$ a z experimentů byl zjištěn vztah (1)

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\mu \cdot \varepsilon_x \quad (1)$$

kde μ je součinitel příčného zúžení neboli Poissonovo číslo pro jeho výpočet platí vztah

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right|$$

Záporné znaménko je ve vztahu (1) z důvodu, že se jedná o poměrné zkrácení ve směru os y, z. [2]

Doposud uvedené vlastnosti platí pro všeobecnou pružnost. Následující vlastnosti jsou specifické pro oblast geomechaniky.

2.2.7 Pórovitost

Pórovitost je popsána jako poměr objemu pórů horniny V_p [m³] k celkovému objemu vzorku V_o [m³].

$$p = \frac{V_p}{V_o} \cdot 100 \quad [\%]$$

Pórovitost je závislá na působícím napětí σ . U hornin se pórovitost pohybuje okolo 20 % až 30 %, u zemin mezi 30 % až 45 %. [5]

2.2.8 Saturace

Saturace popisuje stupeň nasycení horniny vodou,

$$s = \frac{V_V}{V_p}$$

kde V_V [m³] je objem vody v hornině a V_p [m³] objem pórů. Hodnoty saturace se pohybují od 0 (pro vysušenou horninu) do 1 (pro plně nasycenou horninu) [5].

2.2.9 Propustnost

Jde o schopnost horniny propouštět kapaliny působením tlakového spádu. Pro laminární proudění lze využít vztah

$$k_p = \frac{Q \cdot \eta \cdot l}{S \cdot \Delta p} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

kde k_p je součinitel propustnosti, Q je protékané množství za jednotku času [m^3/s], η dynamická viskozita [$Pa \cdot s$], l [m] je délka vzorku horniny, S [m^2] plocha průřezu vzorku kolmá na směr toku a Δp [Pa], je tlakový rozdíl na délce l [5].

Hodnoty u součinitele propustnosti

- pro štěrky 10^{-3} až 10^{-1} m/s
- pro písek 10^{-6} až 10^{-3} m/s
- pro jíly 10^{-10} až 10^{-8} m/s

3 FLAC

Produkt společnosti Itasca Group, FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), byl vytvořen jako 2D simulační nástroj geomechanických úloh. S jeho pomocí lze modelovat úlohy týkající se mechaniky zemin a hornin, například jak se bude chovat svah při nadměrném zatěžování nebo jak se budou měnit vlastnosti hráze rybníku, pokud dojde k nárůstu vodní hladiny a tím se změní procentuelní podíl vody v zemině, z níž je hráz vytvořena.

I když byl FLAC původně vyvinut pro geomechanické o důlní inženýrství program v současné době nabízí širokou škálu možností pro řešení mechanických úloh.

Součástí FLACu je i programovací jazyk FISH, kterým je možné definovat vlastní proměnné a funkce. Jazyk FISH byl vyvinut pro uživatele, kterým stávající podoba programu neposkytovala potřebný aparát pro jejich modelování. Každý uživatel si může rozšířit stávající nástrojovou sadu dle vlastních potřeb a tím dochází k rozšiřování možného využití FLACu i v jiných úlohách než pro které byl původně vytvořen. Pro ilustraci lze uvést několik příkladů. Je zde možnost vytvoření speciálního generátoru sítě nebo definování specifických okrajových podmínek, které mění svou velikost v čase a v prostoru anebo vyhodnocování a tisk uživatelem nadefinovaných proměnných.

3.1 Síť

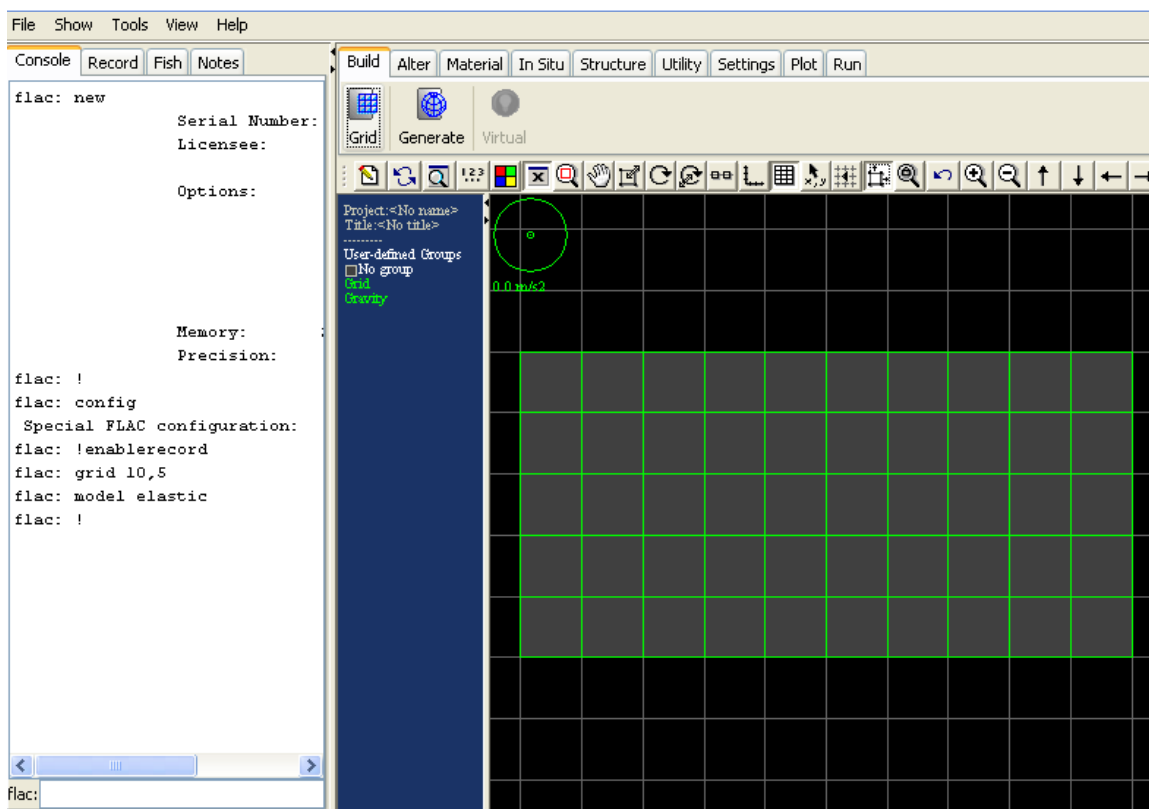
V modelu je materiál reprezentován jako prvek nebo část sítě. Síť neboli mřížka je základní struktura používaná k definování rozměrů, tvaru a vlastností modelované oblasti. Uživatel si jej může upravit dle vlastních požadavků, které bude klást na přesnost a hodnověrnost modelu. Je zde i možnost zředění nebo zhuštění mřížky, což má velký význam pro získání přesnějších informací o dané oblasti. Je důležité nastavit jemnější mřížku pouze v té části modelu, která je něčím zajímavá, ať už se jedná o potřebu přesnějších výsledků či bližšího seznámení se s danou lokalitou. Každý element sítě totiž zvyšuje nároky na matematické zpracování a na dobu za kterou budou výpočty provedeny.

3.2 Materiál

Každý prvek mřížky musí mít definované materiálové vlastnosti, aby bylo možné doplnit neznámé do matematicko-fyzikálních vzorců, které FLAC využívá pro své výpočty.

Některé materiály jsou v programu již předdefinovány, jedná se o prvky v geomechanice používané nejčastěji. Tyto materiály jsou rozděleny do dvou základních skupin a to na zeminy a horniny. Ve skupině zemin se nalézají různé kombinace štěrku, písku, jílu a bahna. U hornin je uveden například granit, pískovec, břidlice nebo vápenec.

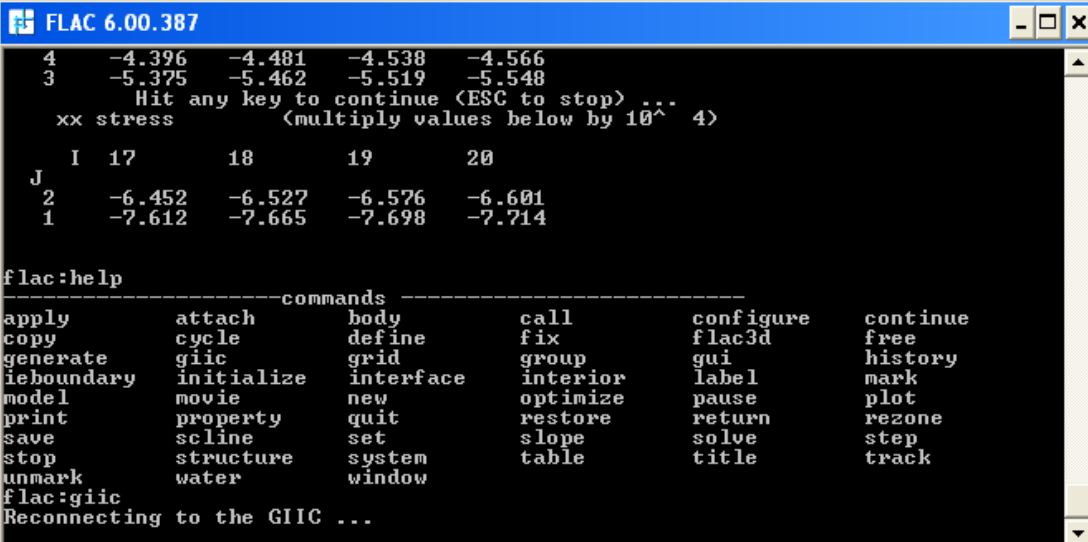
Jednotlivé materiálové vlastnosti se dají upravovat, anebo je možné vytvořit i nový prvek, který si uživatel nastaví podle vlastních požadavků. Mezi parametry jež je nutné vyplnit, patří například hustota prvku (mass density), modul pružnosti (elastic modulus), Poissonovo číslo (Poisson's ratio) či třecí úhel (fiction angle). Po vyplnění těchto údajů je možné s nově vytvořeným materiálem plně pracovat.



Obr. 3. 1 Grafické rozhraní GIIC

3.3 Uživatelské rozhraní

S programem lze pracovat pomocí příkazů a klíčových slov zadávaných do příkazového řádku, který je buď přímo součástí grafického uživatelského rozhraní GIIC (vlevo je záložka Console), viz obr. 3.1. nebo po spuštění programu se přepnou do typické konzolové aplikace, viz obr. 3.2. V grafickém rozhraní je k dispozici celá nástrojová paleta sloužící pro změnu náhledu, tvaru, nastavení vlastností okolí nebo okrajových podmínek působících na model atd. Toto rozhraní je výhodné především pro začínající uživatele, kteří se nemusí učit příkazy a přímo za pomoci myši mohou program ovládat.



```
FLAC 6.00.387
4  -4.396  -4.481  -4.538  -4.566
3  -5.375  -5.462  -5.519  -5.548
Hit any key to continue (ESC to stop) ...
xx stress      (multiply values below by 10^ 4)

J  I  17      18      19      20
2  -6.452  -6.527  -6.576  -6.601
1  -7.612  -7.665  -7.698  -7.714

flac:help
-----commands-----
apply      attach     body       call       configure  continue
copy       cycle     define     fix        flac3d    free
generate   giic     grid       group     gui        history
ieboundary initialize interface interior  label      mark
model      movie    new        optimize  pause     plot
print      property quit       restore   return    rezone
save       scline  set        slope     solve     step
stop       structure system     table     title     track
unmark     water   window

flac:giic
Reconnecting to the GIIC ...
```

Obr. 3.2 Konzola programu FLAC

Zkušenější uživatelé však převážně používají příkazového řádku. Mají-li osvojena základní klíčová slova používaná v modelovacím programu, jedná se o mnohem rychlejší způsob programování. Pomocí příkazů lze dosáhnou přesnější geometrie, například při zadávání neceločíselných rozměrů modelovaného objektu. A v neposlední řadě je posloupnost zadávaných příkazů nenahraditelným pomocníkem při pozdější opakování simulace.

3.4 Zadávání dat

Data lze do programu zadávat, jak již bylo výše uvedeno, buď ručně pomocí konzole, nebo pomocí grafického rozhraní, kde se nastaví požadované parametry a přímo se určí část modelu, ve které budou dané fyzikální veličiny působit. Při založení nového projektu se vytvoří soubor s příponou ***.prj**, je to základní nositel veškerých informací o vytvořeném modelu. V průběhu vytváření modelu a při vlastní simulaci se průběžné kroky ukládají do souboru s koncovkou ***.sav** ta zajišťuje přehledné členění složek a dělení jednotlivých fází simulace např. vlastní grid→zatížení tlakem→působení podzemní vody.

Je zde i možnost importovat nebo exportovat data. Tato data se ukládají do souboru spustitelného v běžném textovém editoru a obsahují seznam všech uživatelem provedených instrukcí.

3.5 Systémové požadavky

Pro zpuštění instalace a provoz programu FLAC jsou na výpočetní stanici kladeny určité hardwarové a softwarové nároky. Mezi minimální požadavky, které musí počítač splňovat, patří:

procesor: minimálně 1 GHz frekvence procesoru

pevný disk: nejméně 35 MB volného místa pro instalaci programu a zároveň dalších 100 MB volného místa pro ukládání souborů

operační paměť: v základním nastavení vyžaduje FLAC pro svou činnost 60 MB volné operační paměti. Pro rychlé operace typické pro geo-inženýrské modely je doporučováno alespoň 128 MB RAM paměti.

nastavení monitoru: pro nejlepší výkon je udáváno rozlišení 1024×768 pixelu a 16 B paleta barev.

operační systém: současná verze FLAC 6.0 je 32-bitovou aplikací. Výrobce zaručuje její funkčnost pod operačním systémem Windows 2000 a vyšší.

Zdroj [6]

3.6 Použitá metoda

FLAC k výpočtu diferenciálních rovnic používá metodu konečných diferencí (MKD) anglicky Finite Difference Method (FDM).

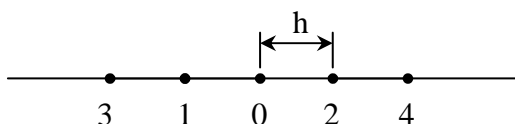
Základní princip

Základní princip metody konečných diferencí (tzv. metody sítí), spočívá v tom, že v oblasti, ve které se hledá řešení dané diferenciální rovnice, je zvolena konečná množina bodů, ta se nazývá síť a příslušné body jsou označeny jako její uzly.

Derivace funkce v dané diferenciální rovnici a v okrajových podmínkách jsou nahrazeny podmínkami diferenčními v daných uzlech. Diferenční podíl je lineární kombinací funkčních hodnot v určitém bodě a v bodech které ho obklopují. Ty pak aproximují danou derivaci.

Lineární kombinace je vytvořena tak, že se hodnotami hledané funkce v několika uzlech proloží interpolační polynom a vypočte se jeho derivace.

Naznačeno na příkladu:



Při proložení bodů 0, 1, 2 polynomem druhého stupně, který má v těchto bodech stejnou hodnotu jako vyšetřovaná funkce u . Pak lze vypočítat jeho druhou derivaci v bodě 0

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_2 - 2u_0 + u_1}{h^2} - R_0$$
$$R_0 = \frac{2h^2}{4!} \frac{\partial^4 u(\theta h)}{\partial x^4}, \quad -1 < \theta < 1$$

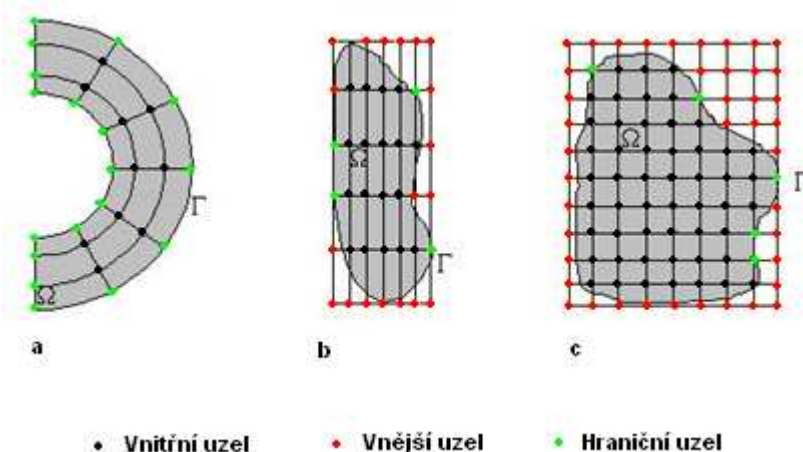
Derivace je vyjádřena pomocí diferenčního podílu a zbytku, ten se však v dalších úvahách zanedbává. [3]

3.6.1 Typy sítí

Metoda sítí se nejčastěji používá pro rovinné případy, proto je zde popis omezen pouze na dvojrozměrný prostor a pravoúhlé sítě viz obr.3.3

Pravoúhlé sítě se dají dále rozdělit na:

- nepravidelné sítě: dají se použít k usnadnění formulace okrajových podmínek a ke změně hustoty (zředění nebo zhuštění) sítě podle toho jak přesných hodnot je v dané oblasti zapotřebí.
- obdélníkové sítě
- čtvercové sítě: jedná se o nejčastěji používaný typ sítí, jejich výhoda spočívá v jednoduchosti diferenčních vzorců.



Obr. 3.3 Typy pravoúhlých sítí

3.6.2 Změna hustoty sítě

Přesnost aproximace k dané funkci závisí na hustotě sítě. Pokud je síť zhuštěna, zvýší se sice přesnost daných výpočtů, ale také se několikanásobně zvětší objem numerických výpočtů, které bude muset numerický model vyřešit. Proto je důležité zhušťovat síť pouze v oblasti, která je pro uživatele zajímavá. Nejlépe se mění hustota použitím nepravidelné sítě. [3]

3.6.3 Zavádění okrajových podmínek

Okrajové podmínky se dají rozdělit do dvou skupin.

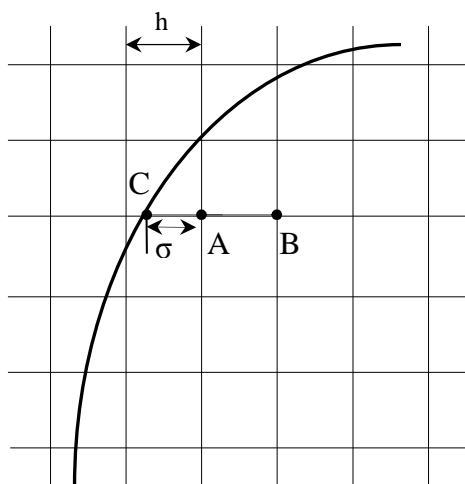
Okrajové podmínky neobsahující derivace

Jedná se o předepsané hodnoty na okraji uvažované oblasti. Používají se dva způsoby:

a) Interpolační postup Collatzův: okrajová podmínka se přenesse do uzlu, který je nejbližší hranici použitím lineární interpolace respektive extrapolace viz obr.3.4):

$$u_A = \frac{\sigma}{1 + \sigma} u_B + \frac{1}{1 + \sigma} \varphi(C)$$

Kde $\varphi(C)$ je hodnota dané hraniční funkce v bodě C.



Obr. 3.4 Přenesení okrajové podmínky Collatzův postup

b) Použití nepravidelné sítě v okolí hranice: získáme síť, jejíž uzly jsou na hranici uvažované oblasti

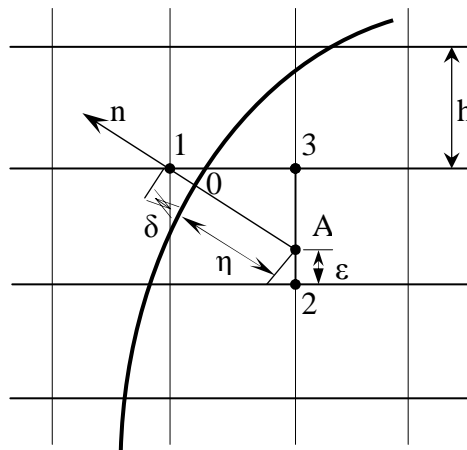
Okrajové podmínky obsahující derivace

Derivace, které jsou v okrajových podmínkách, se lineárně integrují a vyjadřují se pomocí diferencí.

Například: hranice uvažované oblasti je lineární kombinací funkční hodnoty a derivace

$$\text{podle normály} \quad \frac{\partial u}{\partial n} = -k(u - \varphi) \quad (1)$$

kde n je označení pro vnější normálu, φ je daná funkce, k je kladná konstanta.



Obr.3.5 Přenesení okrajové podmínky z bodu 0 do bodu 1

Derivaci funkce u podle normály n lze vyjádřit pomocí difference dvěma způsoby

$$\frac{u_1 - u_0}{\delta} \approx \frac{\partial u}{\partial n} \quad (2) ; \quad \frac{u_0 - u_A}{\eta} \approx \frac{\partial u}{\partial n} \quad (3)$$

a do vztahů 2 a 3 je dosazena okrajová podmínka (1)

$$\frac{u_1 - u_0}{\delta} = -k(u_0 - \varphi_0) \quad (4) ; \quad \frac{u_0 - u_A}{\eta} = -k(u_0 - \varphi_0) \quad (5)$$

u_A lze pomocí nepravidelné sítě vypočítat lineární interpolací z hodnot u_2 a u_3

$$u_A = \frac{(h - \varepsilon)u_2 + \varepsilon u_3}{h} \quad (6)$$

z rovnic 4, 5 a 6 jsou vyloučeny prvky u_0 a u_A

$$u_1 = \frac{(1 - k\delta)(h - \varepsilon)}{(1 + k\eta)h} u_2 + \frac{(1 - k\delta)\varepsilon}{(1 + k\eta)h} u_3 + k \frac{\delta + \eta}{1 + k\eta} \varphi_0 \quad (7)$$

tímto je vytvořena rovnice pro bod 1, který je v dané síti nejbližší uvažované oblasti. [3]

3.6.4 Odhad chyby

Orientační představu o hodnotě celkové chyby při řešení parciálních diferenciálních rovnic metodou sítí může poskytovat velikost lokální chyby, což je chyba, která vznikne nahrazením diferenciálních operátorů diferenčními.

V mnoha případech lze pro odhad chyby použít Rungovu metodu polovičního kroku: Necht' řád chyby je n a necht' existuje funkce $\alpha(x, y)$, jenž je nezávislá na h tak, že platí

$$\varepsilon_h(x, y) = u(x, y) - u_h(x, y) = \alpha(x, y)h^n + o(h^n) \quad (8)$$

kde u vyjadřuje přesné řešení a u_h je přibližné řešení při kroku h .

Pro chybu ε_h platí vztah

$$\varepsilon_h(x, y) = \frac{2^n}{2^n - 1} \left(u_{h/2}(x, y) - u_h(x, y) \right) + o(h^n) \quad (9)$$

kde $u_{h/2}$ je přibližné řešení při polovičním kroku. K získání tohoto odhadu chyby je třeba řešit daný problém dvakrát. [3]

3.6.5 Porovnání metod

Výsledkem porovnání metody konečných diferencí (MKD) s dnes častěji používanou metodou konečných prvků (MKP) je zjištění, že obě metody převádějí diferenciální rovnice na matice, které popisují každý prvek v síti.

FLAC, respektive MKD, se od MKP liší například při lineární simulaci. Doba výpočtu je delší, než u programů, které používají metodu konečných prvků. FLAC je neúčinnější při nelineárních výpočtech nebo v situacích, kde může dojít k nestabilitám.

Mezi výhody MKD patří jednoduchost při programování a numerické realizaci modelu. Nevýhodou je však problém s aproximací okrajových podmínek.

MKP umožňuje dokonale aproximovat vyšetřované těleso a zároveň nabízí možnost nalézt řešení parciálních diferenciálních rovnic v libovolné uzavřené oblasti.

4 PODZEMNÍ ZÁSOBNÍK ZEMNÍHO PLYNU HÁJE

4.1 Zemní plyn

Hlavní složku zemního plynu tvoří plyn metan (přes 90 %), zbytek objemu je vyplněn etanem (1 až 6 %). Zemní plyn patří mezi plynná fosilní paliva a jeho podíl na palivovém mixu v České republice se pohybuje okolo 20 %. V porovnání s ostatními fosilními palivy (uhlí, ropa) má nejmenší podíl oxidu uhličitého na jednotku uvolněné energie a je tedy považován za ekologické palivo.

Zemní plyn se v podzemí vyskytuje buď samostatně, společně s ropou nebo černým uhlím. V České republice nebyla nalezena žádná významná ložiska zemního plynu, proto je za pomoci plynovodů dopravován z Ruska a Norska.

Aby byla distribuční síť odběrateli rovnoměrně zatěžována po celý rok a také aby se vytvořili určité rezervy zemního plynu pro případ závady na plynovodu či jiné komplikace, investují plynárenské společnosti nemalé prostředky do výstavby podzemních zásobníků plynu. [9],[10]

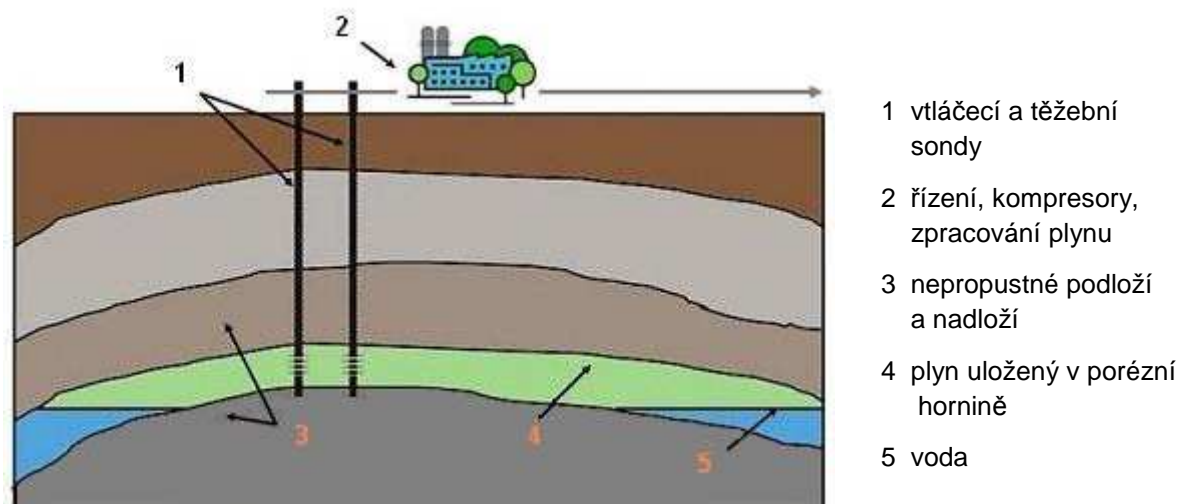
4.2 Podzemní zásobník plynu

Podzemní zásobník může mít dvojitý využití. Buď jako sezónní úložiště plynu, kdy se v letních měsících do zásobníku vtlačuje zemní plyn a s příchodem topné sezóny se začne ze zásobníku čerpat, nebo v podobě zásobníků špičkových, které se stavějí poblíž velkých metropolí a průmyslových oblastí a mají za úkol vyrovnávat rozdíly v denní spotřebě zemního plynu.

Zásobníky zemního plynu se dělí na dva typy

Porézní zásobníky: jedná se převážně o vytěžená ložiska ropy nebo zemního plynu. Jejich princip je založen na vtlačení plynu do porézní horniny a využívání vlastností okolního prostředí, většinou jílových vrstev, které danou oblast utěsní. Další možností je ukládání plynu do takzvaných aquifer. Jedná se o oblast, kde je v hornině přírodní, vodní rezervoár a vtlačení plynu klesá vodní hladina do nižších vrstev viz obr. 4.1

Kavernové zásobníky: jde o zásobníky, v nichž je plyn vtlačěn do kaveren (dutin), které byly vytvořeny lidskou činností. Může se jednat například o solné kaverny nebo o opuštěné uhelné doly, a nebo jsou to stavby vytvořené přímo za účelem uskladňování zemního plynu například podzemní zásobník Háje. [7]



Obr. 4.1 Příklad zásobníku v porézní hornině

4.3 Podzemní zásobník zemního plynu Háje

Nedaleko Příbrami byl vytvořen zásobník zemního plynu, jehož strukturu a velikost lze považovat za unikátní. V hloubce bezmála jednoho kilometru byla vyražena soustava přístupových chodeb a kavernových zásobníků. Zásobník Háje je určen především pro krytí částečných nebo úplných výpadků dodávek zemního plynu ze zahraničí nebo pro vyrovnávání tzv. superšpiček, což je krátkodobý nárůst spotřeby plynu v oblasti Středočeského kraje a hlavního města Prahy.

4.3.1 Historie

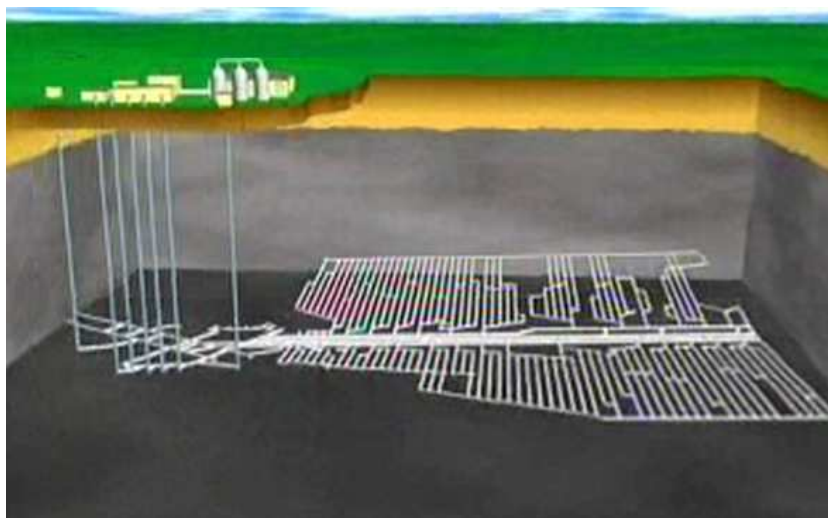
Na konci osmdesátých let se začaly hledat možnosti jak vykrývat superšpičky ve spotřebě zemního plynu v Praze a okolí. V této oblasti se však nevyskytují žádné lokality vhodné pro tvorbu porézního zásobníku. I Proto bylo rozhodnuto o ražbě nového podzemního systému kaveren.

Za nejvhodnější lokalitu byla zvolena oblast středočeského plutonu nacházejícího se asi 70 km jihozápadně od Prahy. V této oblasti byly vyraženy dvě pokusné kaverny Bohutín a Milín, na kterých se testovalo možné tlakové zatížení horniny, a byly zde také odzkoušeny tlakové zátky, kterými se hermeticky uzavřeli vstupy do zásobníku.

V roce 1980 byla v hloubce 760 m vyražena kaverna Bohutín o objemu 100 m³ a bylo započato cyklické tlakování vodou do tlaku 7,6 MPa. V přilehlých vrtech byla hornina testována na tlak vzduchu do 15 MPa.

V roce 1984 byla v hloubce 511 m cyklicky tlakově testována kaverna Milín o objemu 5000 m³ vzduchovým médiem do 7,5 MPa.

Informace z těchto zkušebních kaveren byly vyhodnoceny a následně byla v roce 1991, po podrobných geologických, geotechnických a hydrogeologických průzkumech, zahájena stavba kavernového zásobníku Háje obr. 4.2. [7] [8]



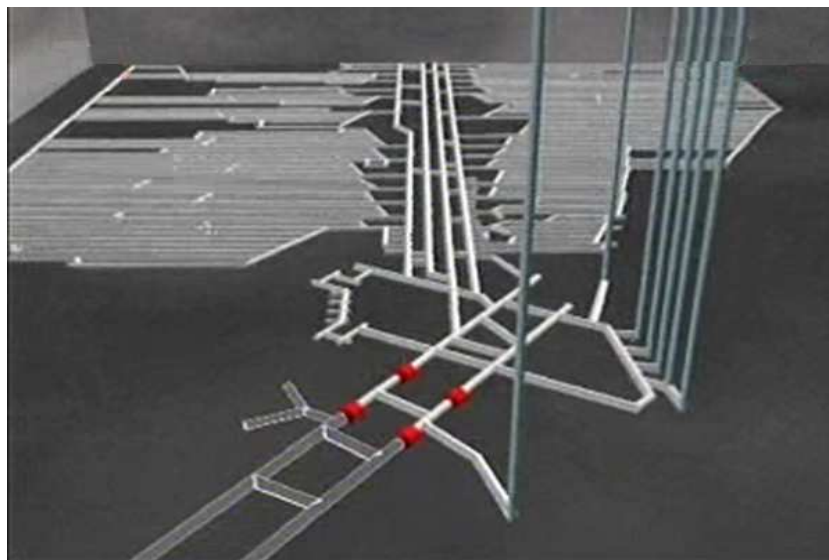
Obr. 4.2 Schéma podzemního zásobníku plynu Háje [11]

4.3.2 Podzemní část

V podzemí nedaleko Příbrami byla v granitovém masivu střežského plutonu vyražena soustava chodeb o profilu 12 až 15 m² a celkové délce přesahující 45 km. Jde o komplex 65 vzájemně propojených paralelních zásobníků a dopravních chodeb. Tunely byly raženy v jednom horizontu se spádem 5 ‰, v hloubce od 955 m na jednom konci až po hloubku 961 m na druhém konci zásobníku, kde je umístěno i pět těžebních sond. Vzdálenost mezi těmito body je asi 1350 m. Chodby byly ponechány bez povrchové úpravy, pouze v místech kde byl masiv silně narušen, došlo ke zpevnění. V místech, kde docházelo k průsakům vody, byla hornina dotěsněna injektáží.

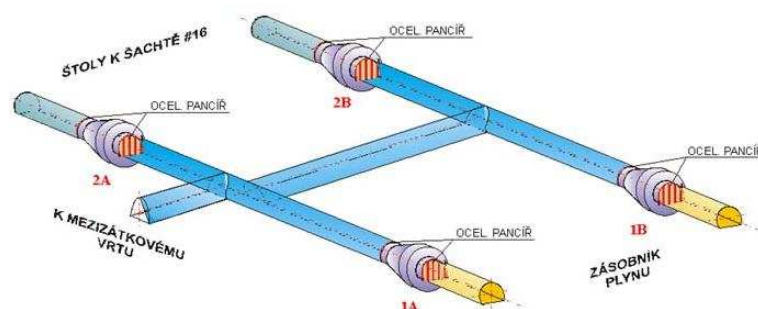
Významnou částí zásobníku jsou čtyři tlakové zátky na dvou dopravních tunelech viz obr. 4.3, jimiž horníci a důlní technika vstupovali do prostoru zásobníku. Po dokončení stavby bylo nutné tyto chodby utěsnit a zamezit tak úniku plynu na zemský povrch.

Tlaková zátka je betonové těleso o celkové délce 10 m vytvořené technologií stříkaného drátkobetonu. Zátka vznikala tak, že se vždy nastříkal jeden metr a teprve po vychladnutí a kontrole se pokračovalo dál. Betonové těleso je z obou stran ohraničeno ocelovými pancíři a jeho střední část je po celém obvodu zapuštěna 1,2 m do horniny.



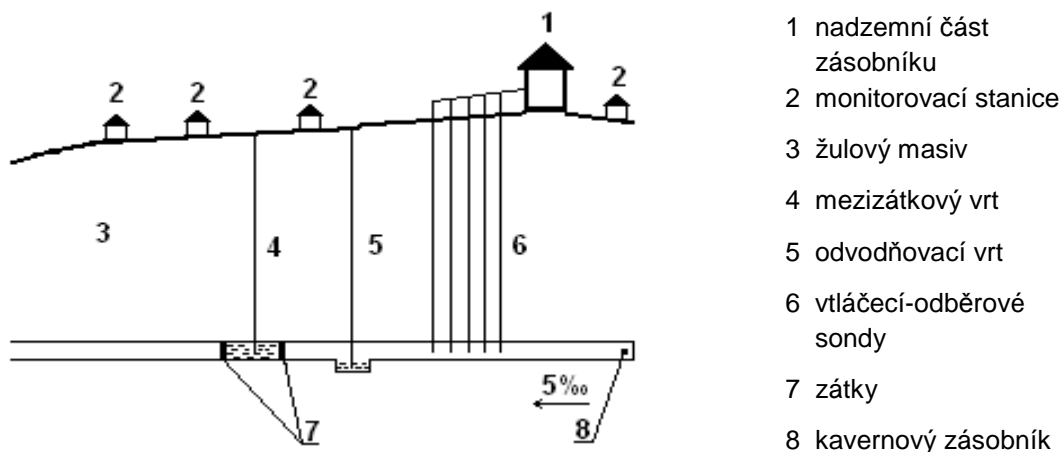
Obr. 4.3 Schéma zobrazující umístění tlakových zátek. [11]

Pro utěsnění skladovacího prostoru je použit princip vodní clony kolem zátek viz obr. 4.4. Voda ze zavodňovacích vrtů a z mezizátkového prostoru, vyplňuje pukliny v okolí granitového masivu a působí proti tlaku plynu. Pokud dojde k poklesu vodní hladiny v mezizátkovém vrtu pod 250 m, je voda automaticky doplněna.



Obr. 4.4 Schéma tlakové uzávěry

Mezi další důležité prvky úložiště patří odvodňovací vrt. Ten je zaveden do jámky v nejnižším místě zásobníku a má za úkol pomocí čerpadla odvádět nahromaděnou vodu ze zásobníku.



Obr. 4.5 Řez zásobníkem [13]

4.3.3 Nadzemní část

V lednu roku 1996 byla zahájena stavba vrchní části zásobníku a o dva roky později byl zahájen zkušební provoz příbramského úložiště. Po vyhodnocení pokusných měření ze zkušebních kaveren Bohutín a Milín bylo navrženo tlakové zatížení kaverny 9,5 MPa a při ukončení zkušebního provozu a provedení další analýzy byl tlak navýšen na konečných 12,5 MPa.

V prostoru nadzemní části jsou umístěna zařízení na úpravu a transport plynu. Zemní plyn, který je do areálu dopraven plynovodem Zvěstov-Háje nejprve prochází přes separátory, kde dochází k oddělení mechanických a kapalných nečistot. A takto upravený plyn je možné buď dále distribuovat, nebo v případě nastavení režimu vtlačení ukládat do zásobníku. Než se tak stane je nutné plyn nejprve předeřhát a poté upravit jeho tlak na tlak v kaverně.

Celkový objem zásobníkového prostoru je 620 000 m³. Do tohoto objemu je při maximální kompresi možné vtlačit 82 000 000 m³ zemního plynu, což je množství odpovídající tříměsíční letní spotřebě hlavního města Prahy.

V okolí podzemního zásobníku jsou rozmístěny měřicí stanice, které mají za úkol sledovat seizmickou činnost a měření podílu metanu v okolních horninách. [13]

5 MODEL ZÁSObNÍKU

Zásobník zemního plynu Háje je situován v granodioritovém masivu. Jedná se o hlubinnou vyvřelinu, která se svými vlastnostmi podobá žule. Viz tab.1 převzato z [4].

V tabulce 1 jsou uvedeny hlavní parametry, sloužící pro definici vlastností a chování horniny. Parametry zde jsou rozděleny do dvou sloupců. V prvním sloupci jsou uvedeny hodnoty popisující vlastnosti neporušené části granodioritového masivu (ang. fresh). Ve druhém sloupci jsou hodnoty pro porušenou horninu (ang. altered). K narušení horniny a tím i ke změně jejich vlastností došlo při ražbě tunelu a je třeba tuto skutečnost v modelu zohlednit.

parametr	neporušený granodiorit	porušený granodiorit
Permeabilita, k (mD)	0,00012	1,22
Porosity, (-)	0,008	0,025
Hustota horniny, (kg/m ³)	2650	2650
Youngův modul, E (MPa)	44688	10630
Poissonovo číslo, (-)	0,25	0,25
Přilnavost, (MPa)	5,4	0,65
Třecí úhel, (°)	50	43

Tabulka 1 Vstupní parametry

Tuto kapitolu respektive vlastní modelování hlubinného úložiště lze rozdělit na čtyři dílčí úlohy. V každé z níže uvedených částí je hlavním předmětem modelovací činnosti monitorovat napětí v masivu.

V první úloze je sledováno napětí horniny v okolí dvou rovnoběžných tunelů, ve kterých je měněn vnitřní tlak představující tlak plynu v zásobníku.

Ve druhé úloze je úkolem vytvořit model části tunelu a sledovat změnu napětí horniny v závislosti na vzdálenosti zdroje tlaku.

Výsledkem třetí simulace je zjištění maximálního tlaku, při němž se tunely ještě nebudou vzájemně ovlivňovat.

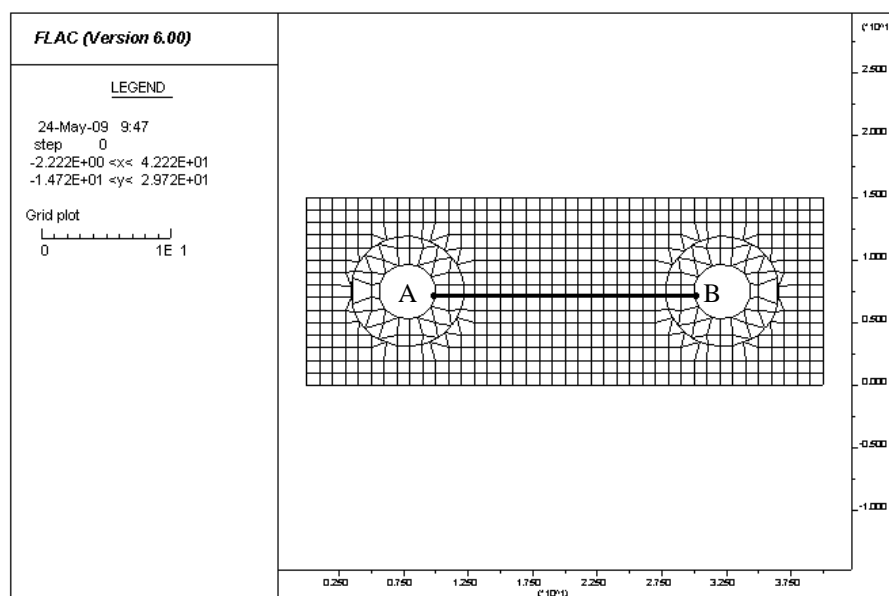
Ve čtvrté úloze je úkolem vytvořit model tlakové zátky, jež je součástí tlakové uzávěry zásobníku viz obr. 4.4

5.1 Úloha první: Dva tunely

Úkolem je vytvořit model situovaný do granodioritového masivu, ve kterém budou dvě zásobníkové šachty zatěžovány nejprve tlakem 7,5 MPa a poté 12,5 MPa

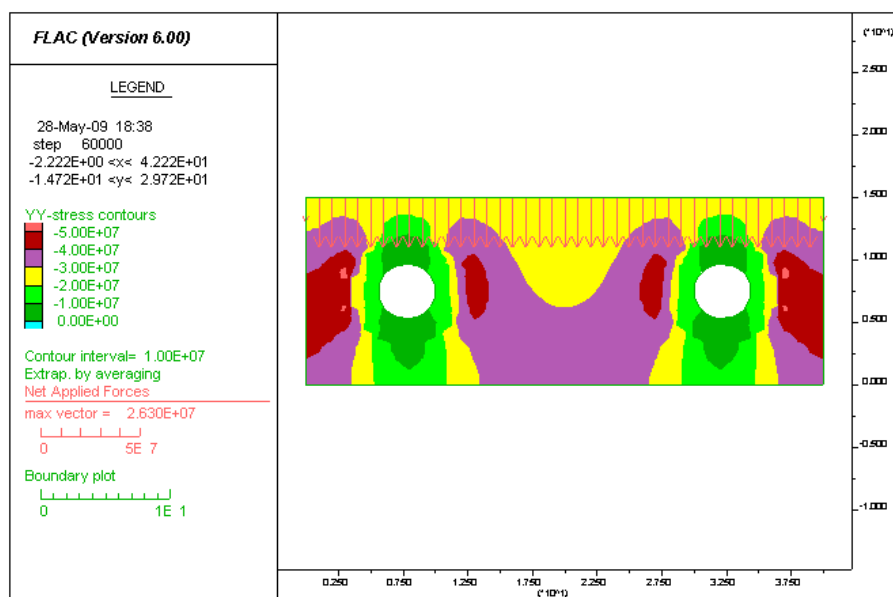
Geometrie modelu

Vlastní model viz obr 5.1 je 40 m široký a 15 m vysoký. Na vrchní část modelu působí tlak 26,3 MPa. Tento tlak je ekvivalentem tíhy horniny v hloubce 950 m, kam je zásobník situován. Vnitřní prstenec má poloměr 2,2 m a představuje vlastní úložný prostor zásobníku. Vnější kruh reprezentuje oblast narušené horniny, jejíž poloměr je 4,4 m. Vzdálenost mezi tunely je 20 m.

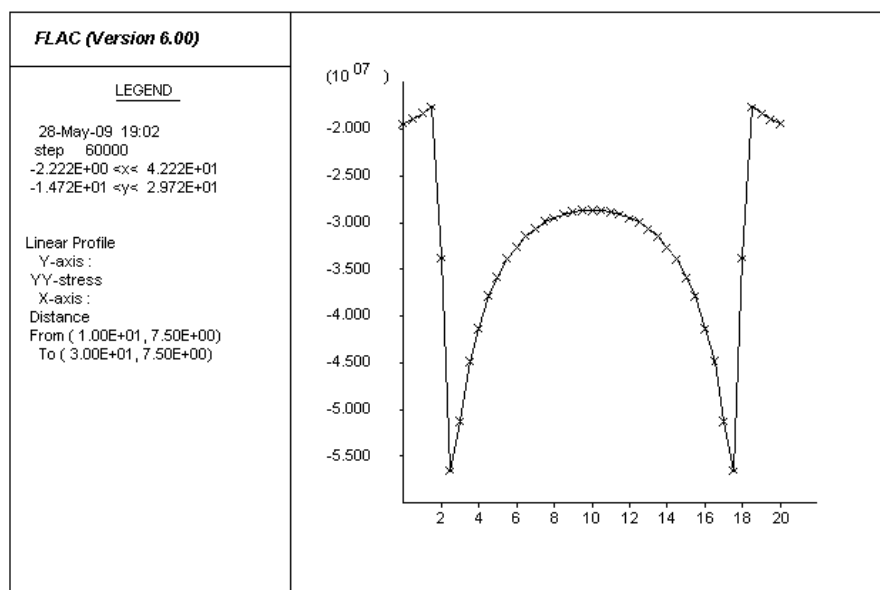


Obr 5. 1 Model pro úlohu Dva tunely

Materiálové vlastnosti byly zadány dle tabulky 1. Grafický výstup programu FLAC, zobrazuje působení napětí v okolí zásobníku. První model byl počítán pro případ, kdy na vnitřek tunelu nepůsobí žádné síly (zásobník je prázdný) a úloha je zatížena pouze pro tlak horniny 26,3 MPa viz obr. 5.2 a graf 5.3. V grafu je znázorněna závislost velikosti napětí (vertikální osa) na vzdálenosti (horizontální osa). Hodnoty jsou získány proložení úsečky z bodu A, jeho souřadnice v modelu jsou [10; 7,5], do bodu B [10; 7,5] viz obr 5.1.



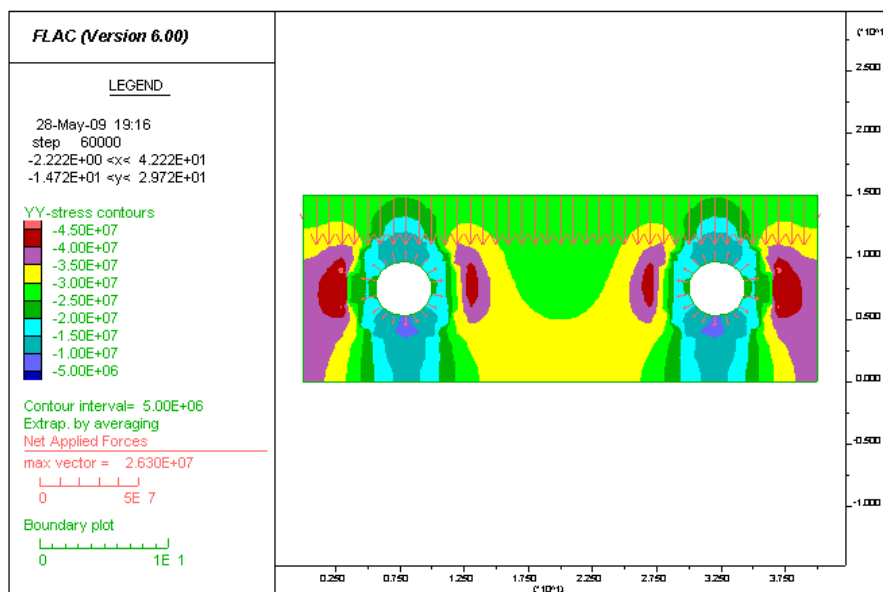
Obr 5. 2 Vertikální složka napětí v hornině při nulovém tlaku v zásobníku a tlaku pŕdy 26,3MPa



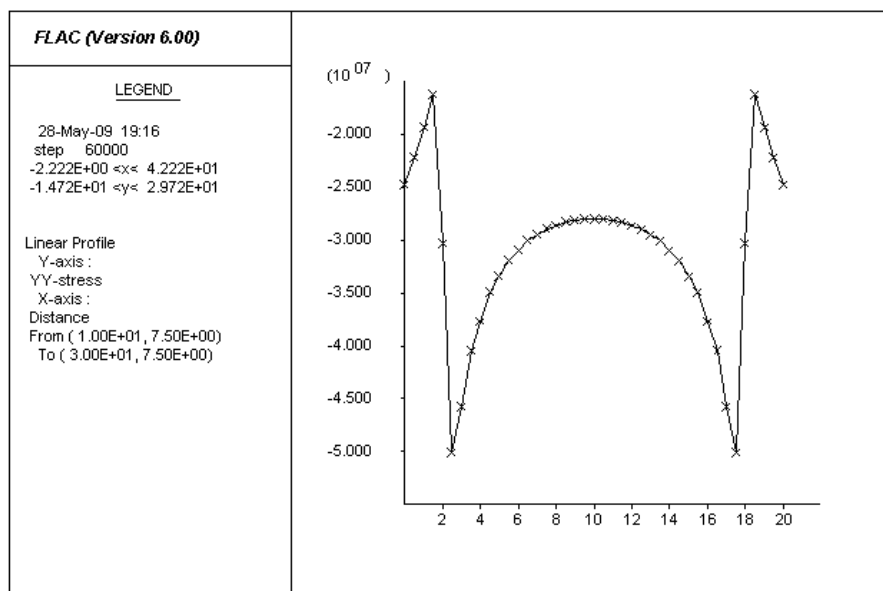
Graf 5. 3 Vertikální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při nulovém vnitřním tlaku

V příloze A jsou uvedeny zobrazení pro horizontální složku napětí, při identických vstupních parametrech viz obr A.1 a graf A.2.

V další fázi byl do modelu zadán vnitřními tlaky 7,5 MPa viz obr. 5.4 a hodnoty v grafu 5.5 byly získány stejně jako v předchozím případě pro napětí ležící na úsečce AB.



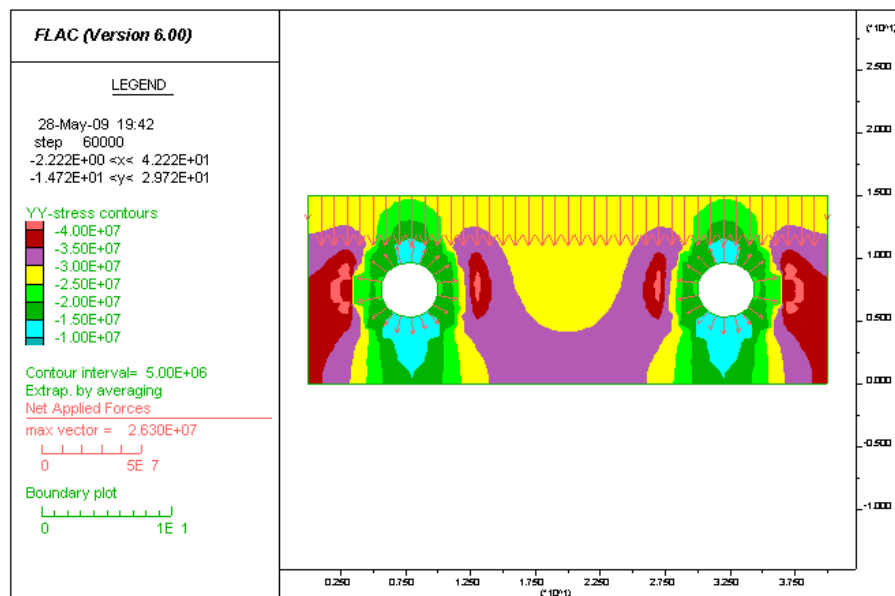
Obr 5. 4 Vertikální složka napětí v hornině při vnitřním tlaku v zásobníku 7,5 MPa a tlaku půdy 26,3MPa



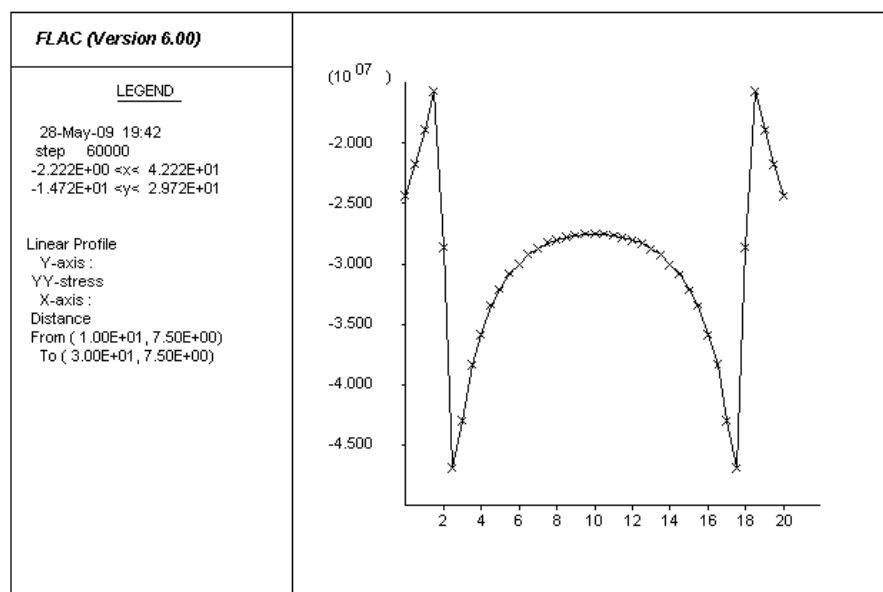
Graf 5. 5 Vertikální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při vnitřním tlaku 7,5MPa

V příloze A jsou uvedeny zobrazení pro horizontální složku napětí, při identických vstupních parametrech viz obr A.3 a graf A.4

Při poslední simulaci byl model zatížen vnitřními tlaky v tunelech zásobníku 12,5 MPa viz obr. 5.6 a graf 5.7



Obr 5. 6 Vertikální složka napětí v hornině při vnitřním tlaku v zásobníku 12,5 MPa a tlaku půdy 26,3MPa

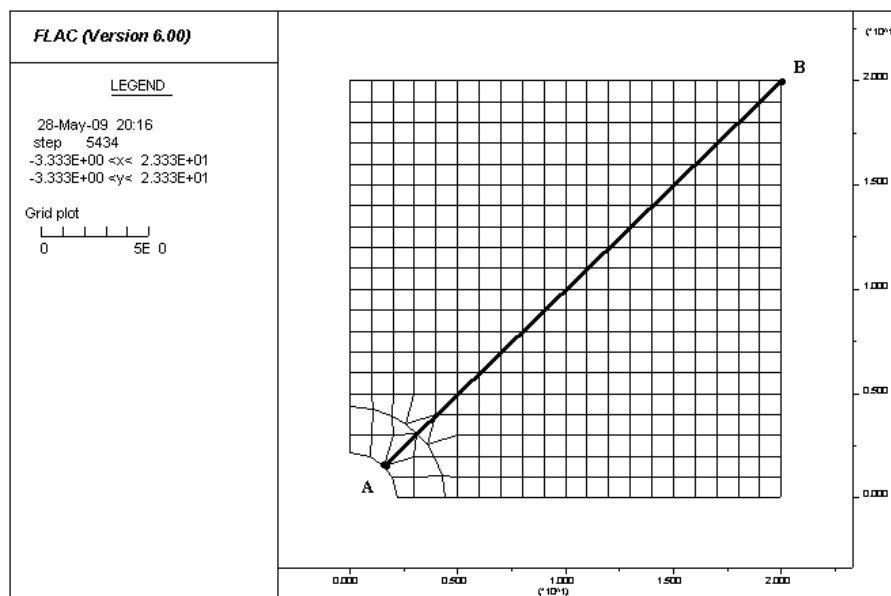


Graf 5. 7 Vertikální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při vnitřním tlaku 12,5MPa

V příloze A jsou uvedeny zobrazení pro horizontální složku napětí, při identických vstupních parametrech viz obr A.5 a graf A.6.

5.2 Úloha druhá: Část tunelu

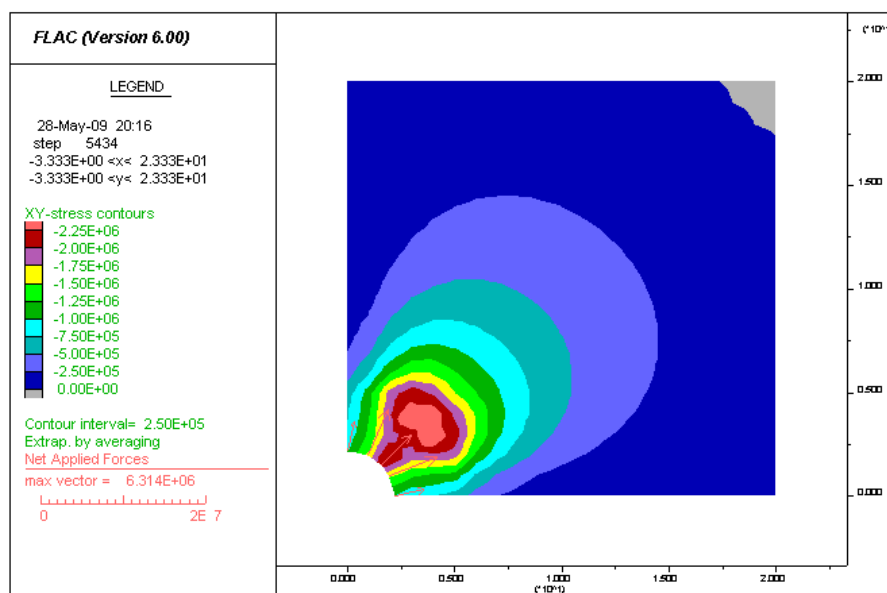
Úkolem je vytvořit model části tunelu a na této oblasti sledovat závislost změny napětí na vzdálenosti od zásobníku.



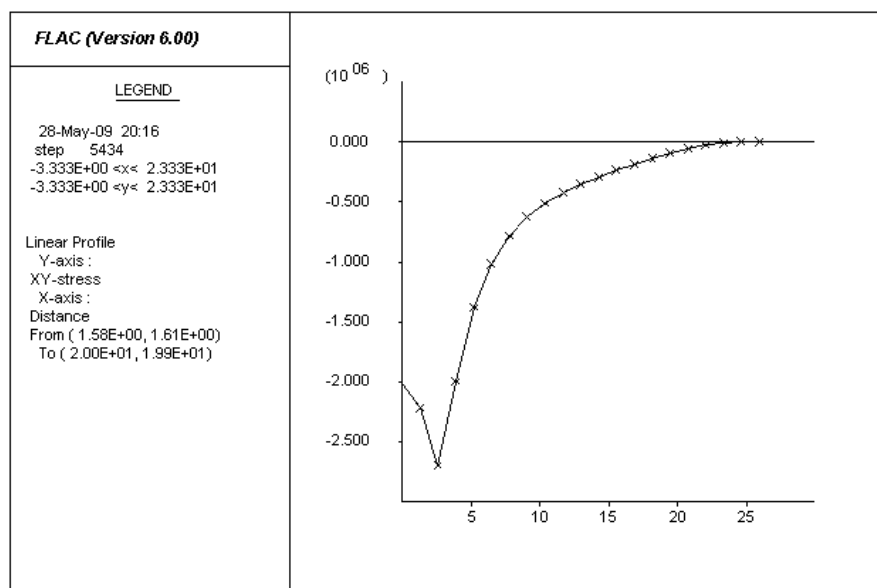
Obr 5. 8 Model pro úlohu Část tunelu s vyznačenou úsečkou, na které se zjišťuje napětí v hornině

Geometrie modelu

Model na obr. 5.8 představuje oblast 20 m širokou a 20 m vysokou. V jeho levém dolním rohu je vytvořen tunel realizovaný prostřednictvím čtvrtiny kulové výseče, jejíž geometrie je shodná s předchozí úlohou tj. vnitřní část kružnice, představující poloměr tunelu, má rádius 2,2 m a vnější, představující narušenou zeminu, má poloměr 4,4 m. Ze shora model není zatížen tlakem. Tlak zemního plynu v zásobníku, působící na okolí je nastaven na 7,5 MPa viz obr 5.9 a graf 5.10 Graf byly vytvořeny pro vyobrazení závislosti napětí horniny na vzdálenosti. Vstupní hodnoty odpovídají bodům na úsečce AB vyznačené v obr 5.8.



Obr 5. 9 Napětí v hornině při 7,5 MPa a tlaku půdy 26,3MPa

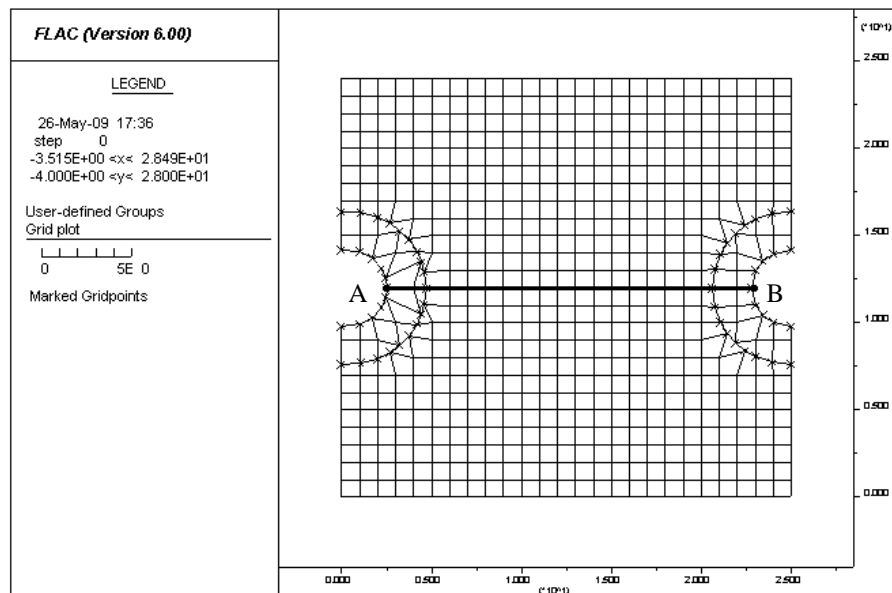


Graf 5. 10 Závislost napětí v hornině (vertikální osa) na vzdálenosti (horizontální osa) při vnějším tlaku 7,5MPa

Na grafu 5.10 je v první fázi tj. v přibližné vzdálenosti 0 až 2,5 m patrný nárůst napětí v poškozené hornině, ve druhé fázi tj. vzdálenost od 2,5 do 25 m, napětí v hornině klesá až k nulové hodnotě.

5.3 Úloha třetí: Maximální tlak

Úkolem je zjistit přibližnou velikost tlaku v tunelu, ten by měl mít takovou intenzitu, aby nedocházelo k interakcím mezi tunely.

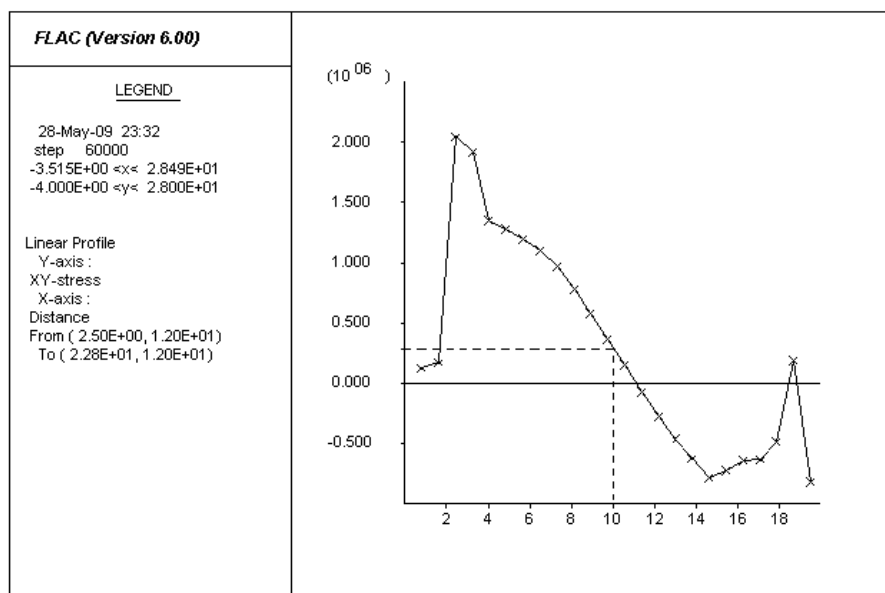


Obr. 5. 11 Model pro úlohu Maximální tlak s vyznačenou úsečkou, na které se zjišťuje napětí v hornině

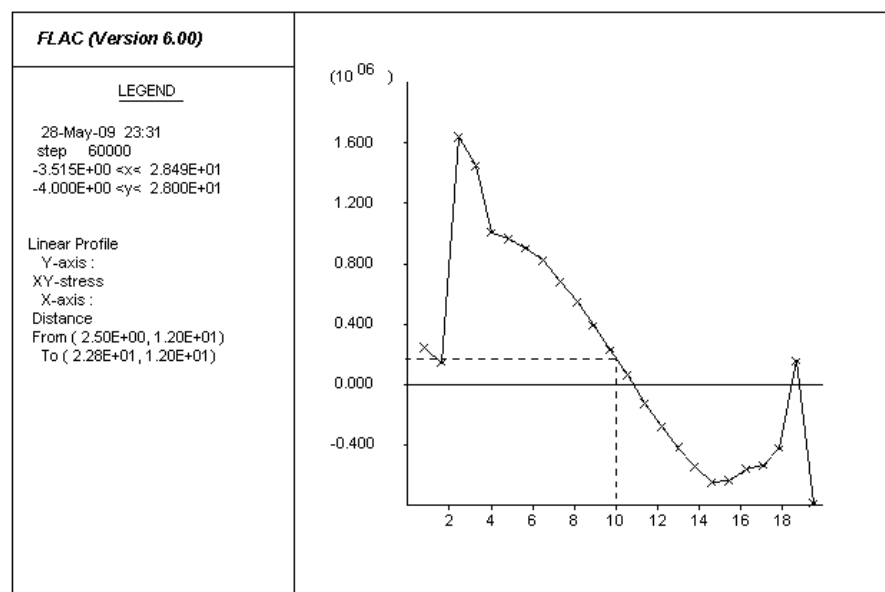
Geometrie modelu

Model představuje oblast 25 m širokou a 24 m vysokou. Tunely jsou umístěny na bocích modelu tak, aby jejich vzájemná vzdálenost byla 20 m. Vnitřní poloměr tunelu je 2,2 m a je obklopen narušenou vrstvou horniny o poloměru 4,4 m. Napětí horniny se měří v horizontálním směru mezi oběma tunely, viz obr. 5.11.

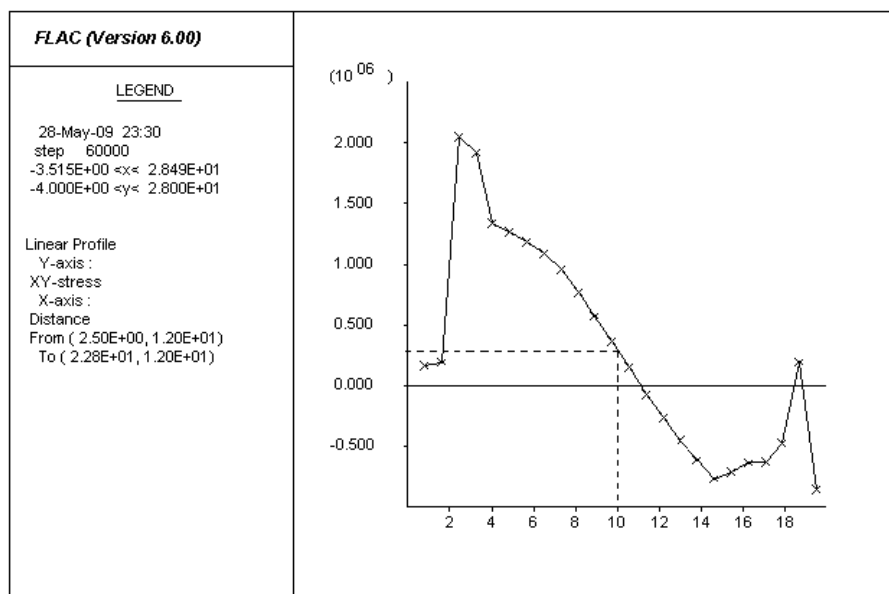
Úkolem této úlohy bylo zjistit maximální možné natlakování úložiště, aby nedocházelo ke vzájemným interakcím mezi tunely. Nejprve byl vytvořen model pro nulový tlak uvnitř tunelů a poté bylo provedeno několik dalších simulací. Porovnáváním výsledných grafů závislosti napětí na vzdálenosti od zdroje tlaku v různých osách modelu, se dospělo k závěru, že při tlaku pohybujícím se okolo hodnoty 0,15 MPa se tunely mezi nimiž je vzdálenost 20 m nebudou vzájemně ovlivňovat.



Graf 5.12 Závislost napětí na vzdálenosti od tunelů při nulovém vnitřním tlaku



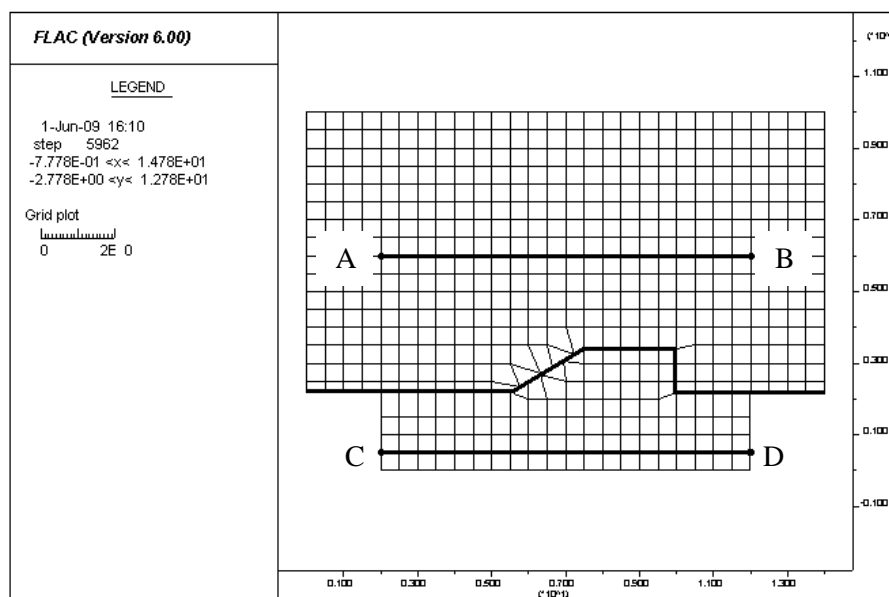
Graf 5. 13 Závislost napětí na vzdálenosti od tunelů při vnitřním tlaku 7,5MPa



Graf 5. 14 Závislost napětí na vzdálenosti od tunelů při vnitřním tlaku 0,15MPa

5.4 Úloha čtvrtá: Tlaková zátka

Úkolem je vytvořit dva modely tlakové zátky. V prvním případě na zátku působí z pravé strany uložený plyn a z levé strany vodní clona. V druhém případě zátka z pravé strany ovlivňuje vodní clona a na levou stranu působí atmosférická tlak.



Obr 5. 15 Model pro úlohu Tlaková zátka

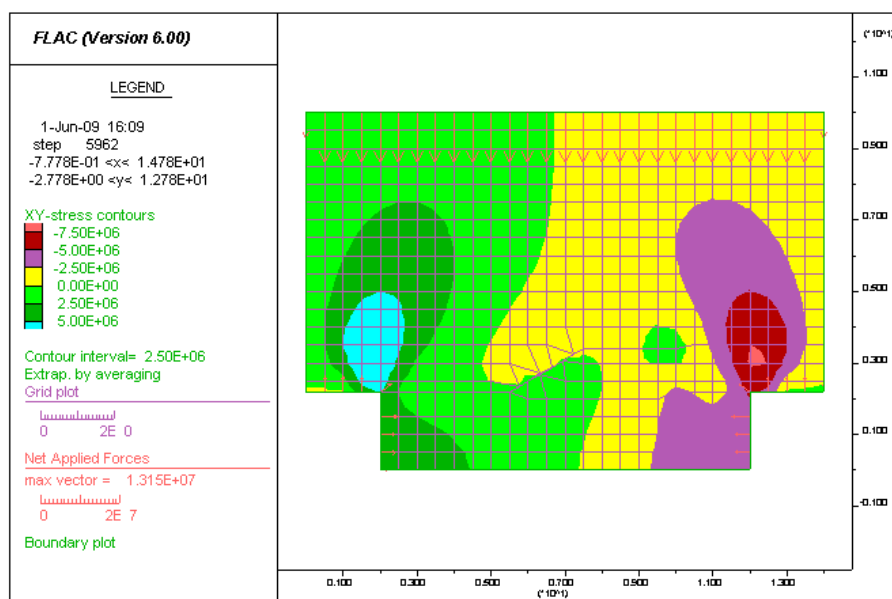
Geometrie modelu

Model představuje oblast 12 m širokou a 10 m vysokou. Ve spodní části je vytvořena betonová zátka o šířce 10 m. Zátka je ve své střední části zapuštěna 1,2 m do granodioritového masivu. Poloměr tunelu, který zátka uzavírá je 2,2 m.

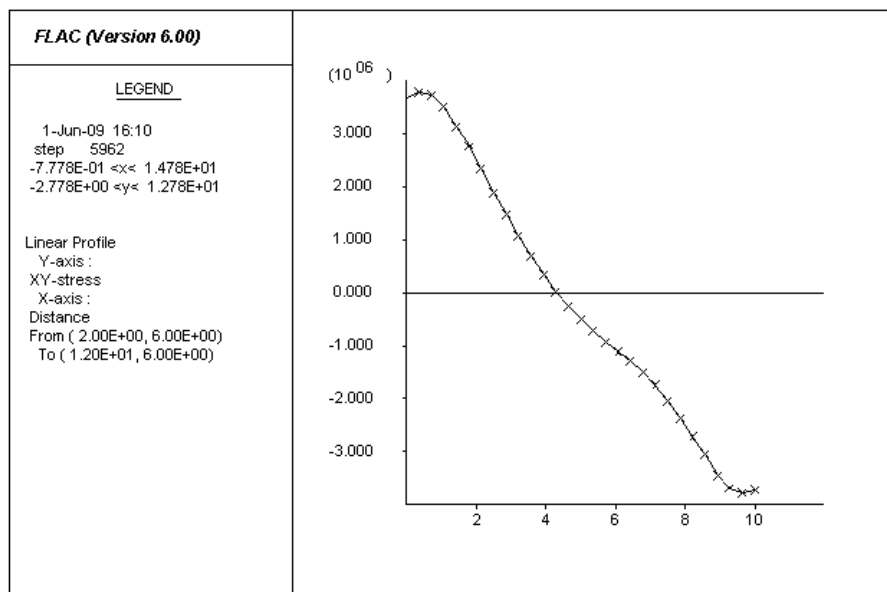
Napětí v hornině je měřeno na úsečce AB a napětí v betonovém uzávěru je měřeno na úsečce CD viz obr. 5.15. Na vrchní část modelu působí tlak 26,3 MPa.

Materiálové vlastnosti drátkobetonu: hustota 2400 kg/m³, Youngův modul 30 GPa, Poissonovo číslo 0,1. V mezizátkovém prostoru je tlak vodní clony udržován o 0,5 MPa vyšší nežli tlak plynu v zásobníku.

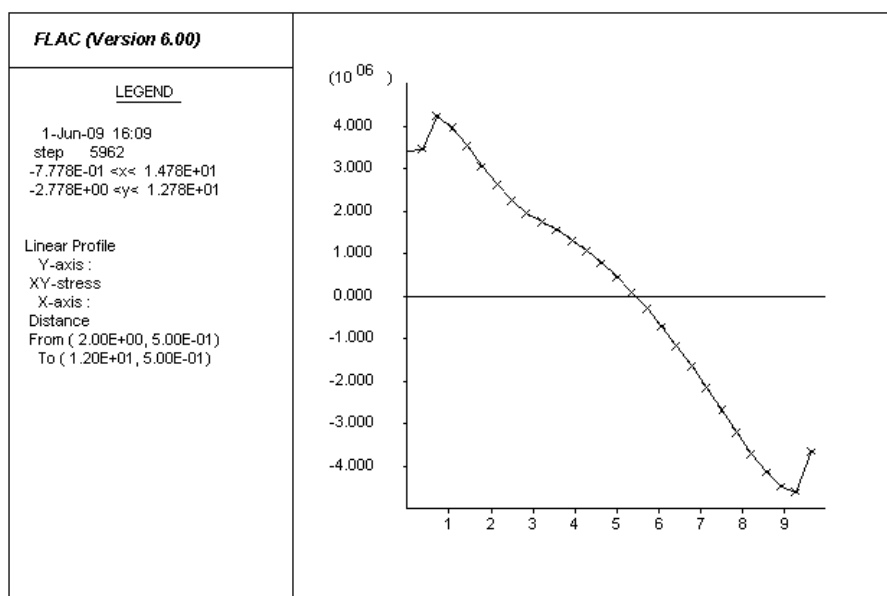
V prvním případě působí na pravou stranu zátky zemní plyn tlakem 7,5 MPa a na druhou stranu působí vodní clona tlakem 8 MPa viz obr 5.16.



Obr 5. 16 Napětí v okolí tlakové zátky na rozhraní voda-plyn

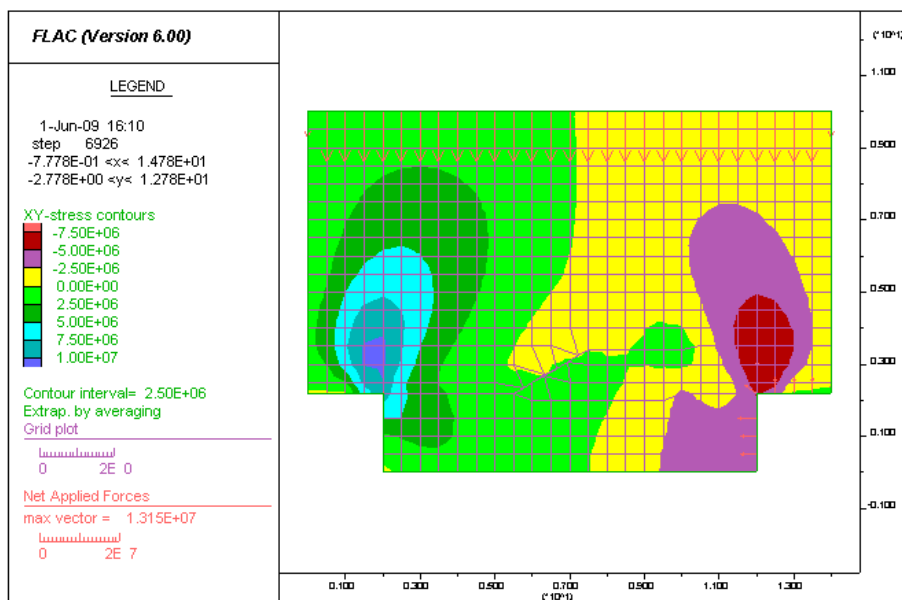


Graf 5. 17 Závislost napětí na vzdálenosti měřeno na úsečce AB

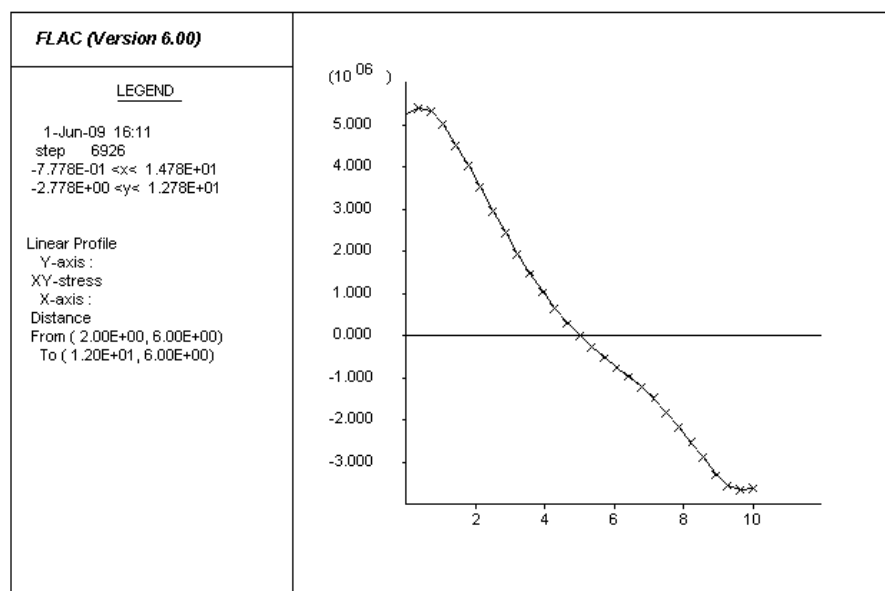


Graf 5. 18 Závislost napětí na vzdálenosti měřeno na úsečce CD

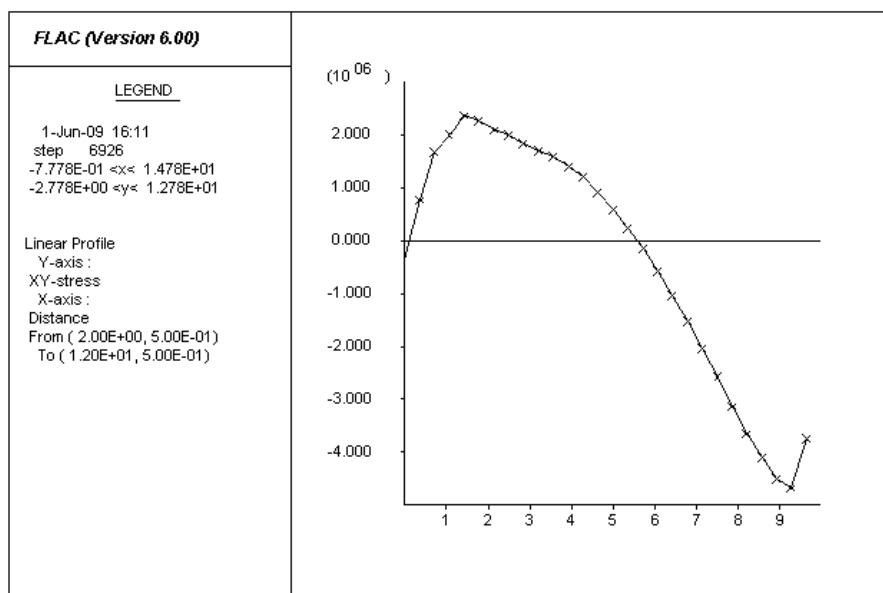
V druhém případě působí na pravou stranu zátky vodní clona tlakem 8 MPa a na opačnou stranu působí atmosférický tlak 0,1 MPa viz obr 5.19.



Obr 5. 19 Napětí v okolí tlakové zátky na rozhraní vzduch-voda



Graf 5. 20 Závislost napětí na vzdálenosti měřeno na úsečce AB



Graf 5. 21 Závislost napětí na vzdálenosti měřeno na úsečce CD

Zvýšení tlaku na jednom konci tlakové zátky se projeví nárůstem napětí v hornině na jejím druhém konci. Napětí v zátce klesá se zvyšující se vzdáleností od zdroje tlaku.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce vznikla za účelem numerické modelování geomechanických jevů v prostředí krystalinika. Pro samotné modelování byl vybrán podzemní zásobník zemního plynu Háje nacházející se nedaleko Příbrami.

Pro modelování chování granodioritového masivu, v němž byl zásobník vyražen, byly v programu FLAC vytvořeny čtyři numerické modely. Ve všech úlohách je největší důraz kladen na monitorování napětí vznikajících uvnitř horniny.

V prvním modelu bylo požadovaným výstupem zobrazení změny napětí v závislosti na tlaku uvnitř tunelu. Nejprve byl počítán model bez působení vnitřního tlaku a poté s vnitřními tlaky.

Ve druhé úloze byla modelována část tunelu zatěžována zadanými tlaky. Příslušné grafy poté zobrazují závislost napětí horniny na vzdálenosti od zdroje tlaku. Na grafech je dobře patrná narušená vrstva horniny okolo tunelu, jež vzniká při jeho ražbě. Napětí v této vrstvě má strmější průběh nežli v neporušené části úložiště.

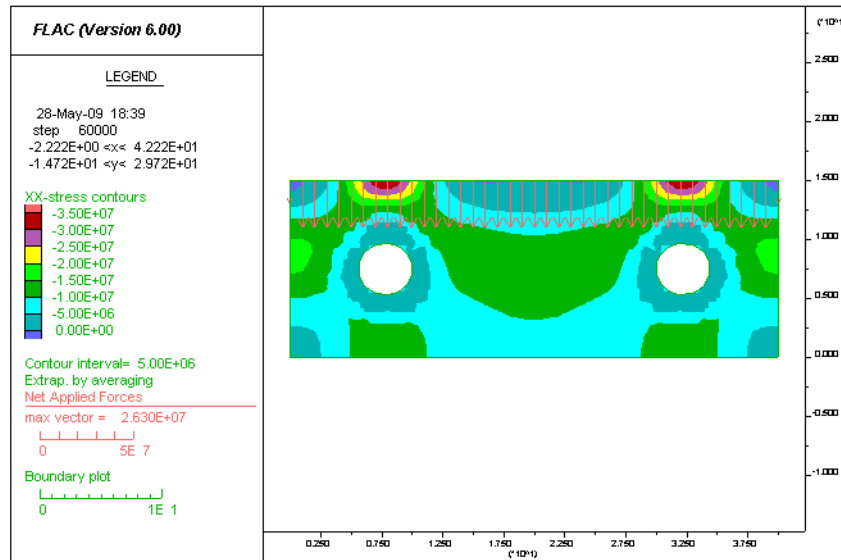
Třetí úloha měla za úkol vytvořit model dvou tunelů a pozorovat jak se budou natlakované tunely vzájemně ovlivňovat. A poté uvést jaký maximální tlak lze do zásobníku přivést, aby nedocházelo k interakcím mezi tunely. Tato úloha byla vyřešena provedením pokusných simulací. Nejprve se provedly výpočty pro určité tlaky a poté byla z grafů, získaných ze závislosti napětí na vzdálenosti, určena přibližná hodnota maximálního tlaku.

Ve čtvrté úloze byl vytvořen model tlakové uzávěry. Ta je tvořena dvěma betonovými zátkami. První zátka tvoří bariéru mezi plynem uloženým v zásobníku a mezizátkovým prostorem, který je vyplněný vodou. Druhá zátka tvoří bariéru mezi vodní clonou a přístupovou štolou. Při zvýšení tlaku působícího na jednu stranu tlakové zátky dojde k nárůstu napětí v hornině na straně druhé. To je způsobeno tlakem betonové zátky.

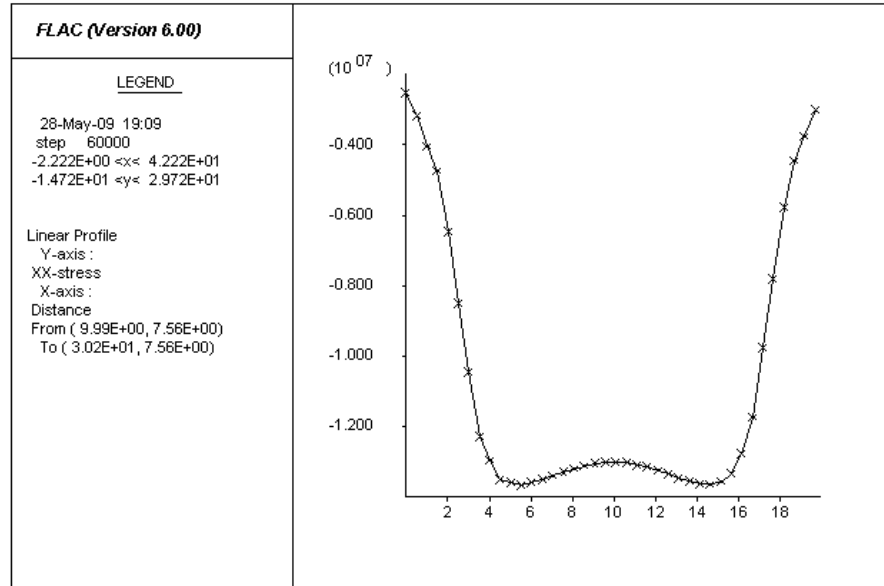
Je nutné uvést, že veškeré simulace byly prováděny v programu FLAC s omezenou licencí. Z tohoto důvodu nebylo možné vytvořit dostatečně velký model a upravit jeho síť tak, aby model nebyl ovlivňován okrajovými body, jak tomu bylo ve výše uvedených úlohách.

PŘÍLOHY

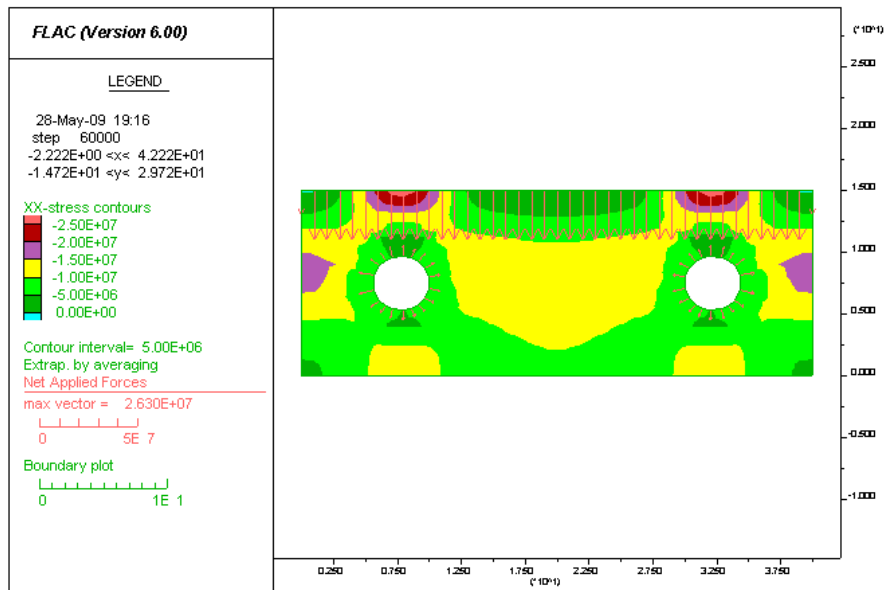
Příloha A Horizontální složka napětí



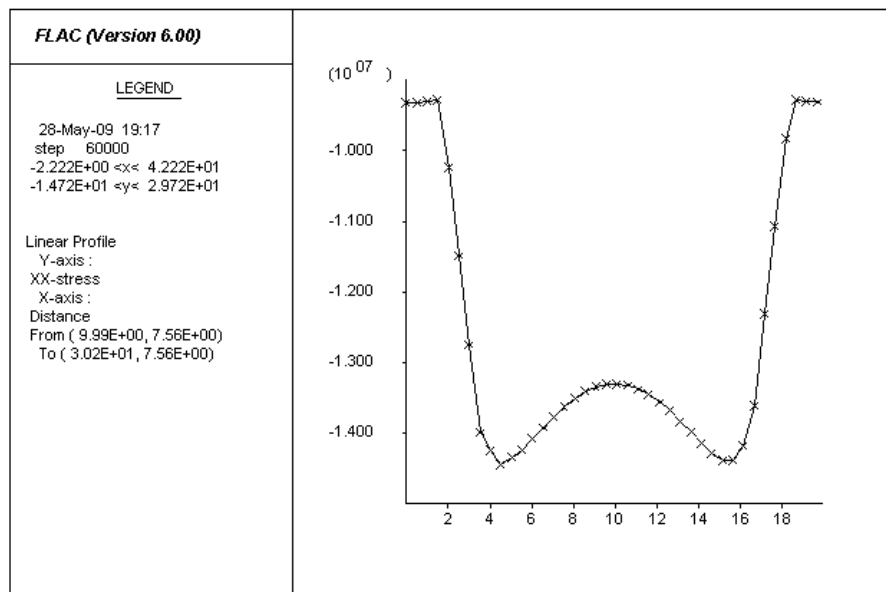
Obr A.1 Horizontální složka napětí v hornině při nulovém vnitřním tlaku v tunelu



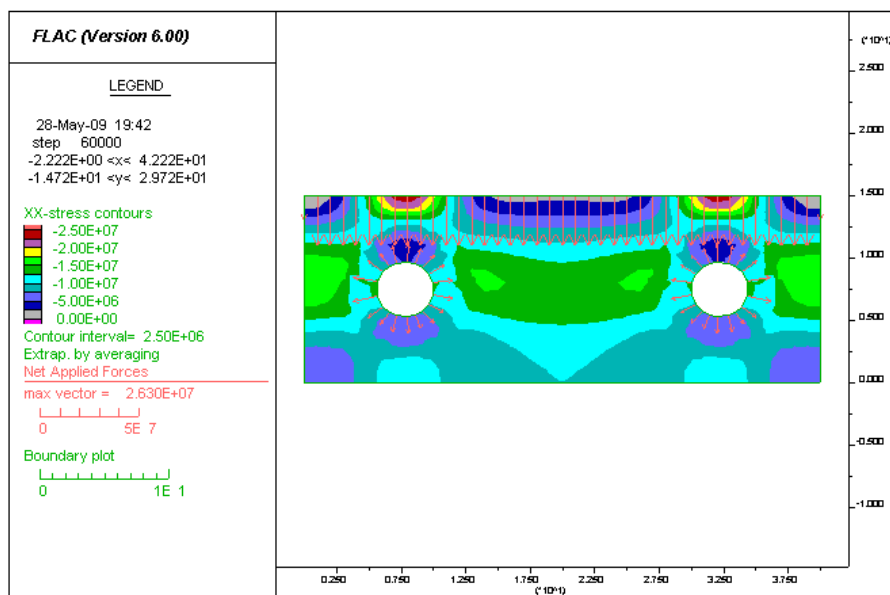
Graf A. 2 Horizontální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při nulovém vnitřním tlaku



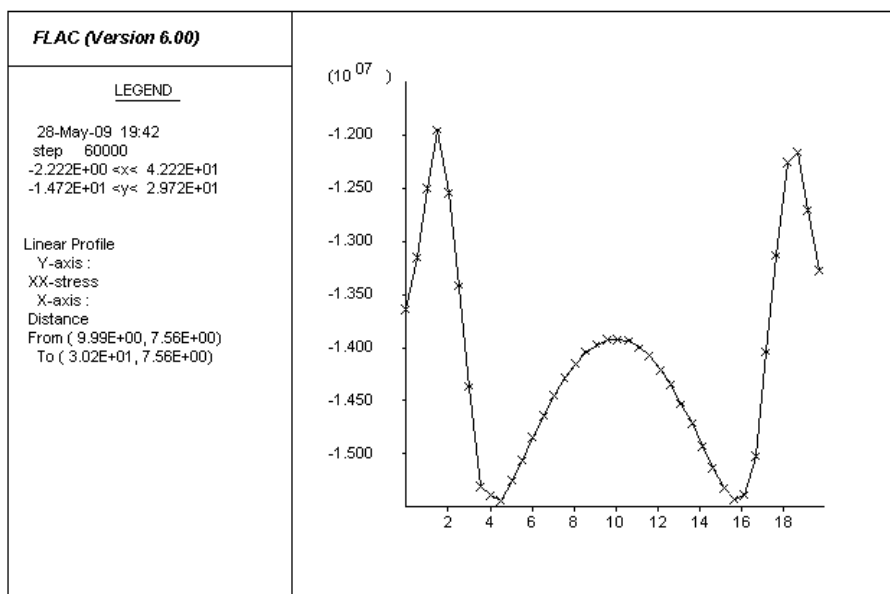
Obr A. 3 Horizontální napětí v hornině při vnitřním tlaku 7,5 MPa



Graf A. 4 Horizontální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při vnitřním tlaku 7,5 MPa



Obr. A. 5 Horizontální napětí v hornině při vnitřním tlaku 12,5 MPa



Graf A.6 Horizontální složka napětí horniny zobrazené pro hodnoty ležící na úsečce AB při vnitřním tlaku 12,5 MPa

Příloha B Ukázka datového souboru *.DATA

```
;Project Record Tree export

;... STATE: GRID40_15 ....
config
grid 40,15
model elastic
gen circle 7.8,7.5, 2.2
gen circle 7.8,7.5, 4.4
group 'Rock:granite_hajeFresh' region 23 10
model mohr group 'Rock:granite_hajeFresh'
prop density=2650.0 bulk=2.9792E10 shear=1.78752E10 cohesion=5400000.0 &
friction=50.0 dilation=0.0 tension=1.17E7 group
'Rock:granite_hajeFresh'
save grid40_15.sav
;... STATE: GRID_FIX ....
free y j 1
fix y j 1
fix x i 1
fix x i 41
;... STATE: TAK26 ....
set gravity=9.81
apply pressure 2.63E7 from 1,16 to 41,16
save tak26.3
;*** plot commands ***
;plot name: xy
plot hold sxy fill abs apply lred bound
;plot name: Profile:syy
plot hold syy line (10,7.5) (30,7.5) 41 both
```

Příloha C Obsah CD

Text bakalářské práce v elektronické verzi

Numerické modely spustitelné v programu FLAC ve složkách

- Dva tunely (2D model pro pozorování dějů mezi tunely)
- Část tunelu (2D model pro analýzu chování napětí v hornině)
- Maximální tlak (2D model pro zjištění oblasti ovlivněné tlakem)
- Tlaková zátka (2D model pro analýzu chování napětí v okolí ucpávky)

POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE

- [1] HERLE, Ivo. *Základy matematického modelování v geomechanice*. Praha : Karolinum, 2003.
- [2] MICHALEC, Jiří, a kolektiv. *Pružnost a pevnost*. 2. vyd. Praha : ČVUT, 2001. 320 s. ISBN 80-01-02359-1.
- [3] Karel Rekrtyš a spolupracovníci. *Přehled užití matematiky II*. 6. přeprac. vyd. Praha : Prometheus s.r.o, 1995. Odborné literatury. ISBN 80-858449-62-3.
- [4] Verga F. a kolektiv: *Geomechanical analysis on the Haje UGS.*, Dream, Polotecnico di Torion.
- [5] Petroš Vladimír: *Vlastnosti hornin a horského masivu*, Vysoká škola Báňská-Technická univerzita Ostrava. vyd. Ostrava, 2002. Dostupný z URL: <<http://homen.vsb.cz/~pet40/texty/VlastI.htm#kap2>>
- [6] *Itasca* [online], 2009 [cit.2009-05-16]. Dostupný z URL: <<http://www.itascacg.com/home.php>>.
- [7] *RWE The energy to lead* [online], 2009 [cit.2009-05-12]. Dostupný z URL: <http://www.rwe-gasstorage.cz/cs/Pro_zakazniky/Zasobniky/haje.html> <http://www.rwe-gasstorage.cz/cs/Pro_zakazniky/Skladovani_plynu/>
- [8] *www.EnviWeb.cz* [online], 2009 [cit.2009-05-12]. Dostupný z URL: <http://www.enviweb.cz/?env=obecne_archiv_heag/Podzemni_zasobnik_plynu_u_Pribrami.html>
- [9] *Zemní plyn* [online], 2009 [cit.2009-05-18]. Dostupný z URL: <<http://www.zemniplyn.cz/doprava/>>.
- [10] *Wikipedia* [online], 2009 [cit.2009-05-18]. Dostupný z URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zemn%C3%AD_plyn>.
- [11] *Port* [online], 2009 [cit.2009-05-19]. Dostupný z URL: <<http://www.ceskatelevize.cz/program/port/134-zasobnik-plynu-v-jeskynich/video/>>.
- [12] ŠKARYDOVÁ, Ilona. *Výpočet termoelastického pole v hornině v okolí hlubinného úložiště*. Liberec, 2006. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing, Milan Hokr, Ph.D.

- [13] Kolektiv autorů. *Encyklopedie plynárenství: Plynárenské údaje*. 1. vyd. Praha : GAS s.r.o, 2006. ISBN 978-80-7328-105-2.
- [14] VERRUIJT, Arnold. *Soil mechanics*. Delft University of Technology 2006. 315 s.
Dostupný z URL: <<http://geo.verruijt.net/>>