

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Informatika a logistika

## **Výpočet řezů puklinových sítí v grafických souborech programu GMSH**

## **The calculation of fracture network cuts in graphic files of GMSH program**

### **Bakalářská práce**

Autor:	<b>Lukáš Cerman</b>
Vedoucí práce:	Ing. Milan Hokr, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jiřina Královcová, Ph.D.

**V Liberci 18. 5. 2007**



## Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) 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(a) toho, že užití 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(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:



## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Milanu Hokrovi, Ph.D. za odborné vedení, důležité připomínky a cenné rady při vypracovávání této bakalářské práce.



## **Abstrakt**

Dnes je často používaným nástrojem pro analýzu a výpočty fyzikálních jevů reálných objektů matematické modelování. Nejběžnějším postupem řešení těchto úloh je tzv. numerické řešení, kdy je původní nekonečně rozměrná úloha nahrazena konečně rozměrnou úlohou. Tento postup nazýváme tzv. diskretizací úlohy. Z důvodu podrobnějšího sledování těchto jevů je nutno provádět řezy objektů. Řezy vznikají buď řezem roviny přímkou – v případě 2D útvaru, nebo řezem objektu rovinou – v případě 3D útvaru.

Řezy puklinových sítí jsou předmětem této bakalářské práce. Protože aplikace GMSH možnost více řezů najednou, ani jeden řez ve více souborech najednou neumožňuje, je cílem takový program vytvořit. V práci je popsán nejen samotný program pro zpracování grafických souborů programu GMSH, ale i principy a metody, na jejichž základě jsou jednotlivé algoritmy programu postaveny.

V závěru je prezentován test vytvořeného softwaru a porovnávání jeho výsledků s výsledky dosaženými v programu GMSH.

## **Abstract**

The mathematical modeling is method which is often used for analysis and calculation of physical phenomenon in real objects. Most common way is numerical solution, which means that the original, infinitely dimension problem is replaced by finite-dimension. This process is called discretization. For better monitoring these effects is necessary to make cuts.

The cuts of fractured network are the subject of this bachelor thesis. The aim is to program the application which will process graphical files of GMSH program. In the thesis there is not only description of the program, but also principles and methods on which the algorithms of the program are based on.

At the end there is a comparison between the results of the program and results made in GMSH.



## **Obsah:**

<b>Prohlášení .....</b>	<b>- 4 -</b>
<b>Poděkování.....</b>	<b>- 5 -</b>
<b>Abstrakt .....</b>	<b>- 6 -</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>1. Puklinové sítě a jejich modelování .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>1.1 Co jsou puklinové sítě? .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>1.2 Modelování puklinových sítí.....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>2. Programy pro modelování a zobrazování .....</b>	<b>- 11 -</b>
<b>2.1 GMSH.....</b>	<b>- 11 -</b>
<b>2.2 Flow123d.....</b>	<b>- 15 -</b>
<b>3. Použité metody analytické geometrie .....</b>	<b>- 18 -</b>
<b>3.1 Základní syntaxe útvarů v prostoru .....</b>	<b>- 18 -</b>
<b>3.2 Vzájemné polohy útvarů v prostoru .....</b>	<b>- 19 -</b>
<b>3.3 Útvary vzniklé průnikem objektů a roviny .....</b>	<b>- 20 -</b>
<b>3.4 Výpočet hodnot v nově vzniklých uzlech .....</b>	<b>- 23 -</b>
<b>4. Vytvořený software .....</b>	<b>- 24 -</b>
<b>4.1 Systémové požadavky .....</b>	<b>- 24 -</b>
<b>4.2 Návod na použití.....</b>	<b>- 24 -</b>
<b>4.3 Popis řešení programu.....</b>	<b>- 29 -</b>
<b>4.4 Test funkčnosti .....</b>	<b>- 32 -</b>
<b>Závěrečné zhodnocení .....</b>	<b>- 37 -</b>
<b>Příloha A Obsah příloženého CD .....</b>	<b>- 38 -</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>- 39 -</b>



## Úvod

Pukliny jsou specifickým rysem určitých typů hornin. Zkoumání puklinových prostředí hornin je v dnešní době spjato zejména s možností využití pro uložení jaderného odpadu, ale i zásob ropy a zemního plynu. Modelování a grafické zobrazování takových prostředí je dnes možno provádět v široké řadě aplikací.

Tato bakalářská práce řeší dávkové zpracování grafických souborů programu GMSH. Z důvodu potřeby podrobnějšího zkoumání chování látek v daném prostředí se provádí řezy zobrazení. Aplikace GMSH má v tomto směru ale jistá omezení. Potřeby zobrazení jsou totiž mnohdy obecnější, než pouze jednorázové provedení jednoho řezu. Proto je mým úkolem sestavit takovou aplikaci, která umožní provést vícenásobné ořezání (ořezání z více stran) a to i pro více souborů najednou.

V první kapitole se seznámíme s pojmem puklinových sítí a jejich modelováním a používáním. Následuje zmínka o programech používaných pro práci s numerickými modely. V kapitole třetí jsou uvedeny principy a vztahy analytické geometrie, která je pro řešení řezů nezbytná. V poslední kapitole je pak dopodrobna rozebrána problematika samotného programu a test jeho funkčnosti.



## 1. Puklinové sítě a jejich modelování

Modelování puklinového prostředí a transportu látek v něm je aktuálním směrem v oblasti výzkumu modelování hydrogeologických jevů. Cílem této kapitoly je nastínit co puklinové sítě jsou a jak se modelují.

### 1.1 Co jsou puklinové sítě?

Puklinové sítě jsou typem sítí, kterými se zobrazuje puklinové prostředí (horniny), které zkoumáme. V souvislosti s ekologickými problémy je modelování puklinových prostředí pevných hornin v dnešní době velice aktuálním tématem. Takové horniny lze totiž využívat jako možná úložiště nebezpečných látek (toxické látky z chemického průmyslu, radioaktivní látky z jaderných elektráren, atd.), nebo je lze použít jako podzemní zásobníky ropy či zemního plynu. Příklad puklinové sítě je uveden na Obr. 1.

### 1.2 Modelování puklinových sítí

Stejně jako všechny modely, které vytváříme, i puklinové sítě by měly co možná nejdříve popisovat existující realitu. Pro správné a co nejdokladnější modelování musíme ze zkoumaného horninového masivu, ve kterém existuje puklinové prostředí získat údaje, které nám pomohou při generování puklinové sítě. Tyto údaje statické povahy se získávají měřeními na průzkumných vrtech a jsou jimi:

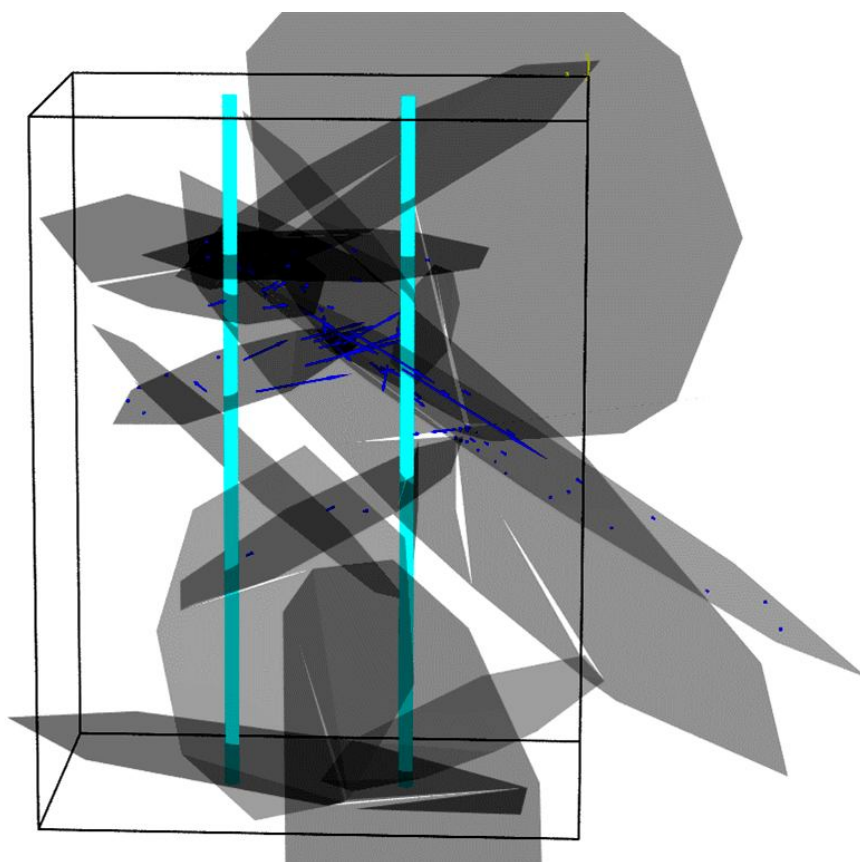
- Prostorová četnost puklin
- Jejich orientace a sklon
- Rozevření a výplň puklin
- Odhad rozměru

Tato vstupní data se následně pomocí různých algoritmů a postupů zpracují a následně se vygeneruje samotná síť. Toto generování je možno rozdělit do šesti fází:

- Zadávání vstupních dat
- Umístování jednotlivých puklin do modelovaného prostoru
- Výpočet průsečnic mezi puklinami



- Úpravy geometrie puklin
- Diskretizace puklin na elementy
- Výstup výsledků



*Obr. 1 –ukázka puklinové sítě*





## 2. Programy pro modelování a zobrazování

Pro práci s numerickými modely se používají různé aplikace. Jelikož moje práce přímo souvisí se soubory programu GMSH, tato kapitola je na tento software zaměřena a doplňuje ji informace o programu 123Flow, který slouží k výpočtu proudění látek v horninách.

### 2.1 GMSH

GMSH je freewarový program, určený pro grafické zpracování výsledků numerických modelů. Jedná se o dvoucestnou aplikaci a můžeme tedy tvořit jak přímo v grafickém editoru, tak přímým psaním kódu. Program je díky svým širokým možnostem v nastavení zobrazení naprosto postačující a může konkurovat celé řadě komerčních softwarů. Práci v prostředí GMSH lze obecně rozdělit na dvě části.

#### 2.1.1 Preprocessing

Preprocessing je část řešení úlohy, ve které geometricky vytváříme konkrétní prostředí (plochu, objem) pro daný numerický model. Dílčí fáze preprocessingu jsou tvorba bodu, ploch, objemů a generace sítí. Jednotlivé procesy na sebe navazují (hierarchické uspořádání) a následný by bez předchozího nemohl být vytvořen. Soubory, používané v geometrii, mají příponu \*.geo, pro vygenerované sítě jsou to soubory s příponou \*.msh.

#### 2.1.2 Postprocessing

Pojmem postprocessing označujeme prezentaci výsledků numerických modelů srozumitelnou pro člověka. Soubory postprocessingu mají příponu \*.pos. V těchto souborech jsou použity body vzniklé generováním sítě (**nody**). Jim je přidělena určitá hodnota, která odpovídá velikosti dané fyzikální veličiny, kterou hodláme modelovat.

Pro realizaci souboru \*.pos je potřeba vědět co chceme zobrazit (skalární, vektorovou nebo tenzorovou veličinu). Dále je nutné vědět na jakém principu chci vybranou veličinu zobrazit.

Zdrojový kód je psán jako zobrazení funkce po jednotlivých elementech. Jejich rozměr(dimenze) je dána počtem zadaných bodových hodnot. Jaký element bude muset



být definován, záleží na geometrii a na výběru elementu při vytváření sítě. GMSH nabízí hned několik variant, jaké elementy je možno zobrazit. V Tab.1 je ucelený přehled těch nejpoužívanějších (shodný pro zobrazování v ploše i v objemu):

1.pozice		2.pozice	
S	skalár	P	bod
V	vektor	L	čára
T	tenzor	T	trojúhelník
		Q	čtyřúhelník
		S	pětiúhelník
		H	šestiúhelník
		I	hranol

Tab.1 – přehled nejpoužívanějších elementů v GMSH

První pozicí se rozhoduje bude-li se jednat o skalární, vektorovou nebo tenzorovou hodnotu pro daný bod v elementu, který určuje druhé písmeno. Podle toho, jaký typ elementu zvolíme, musíme zapisovat příslušný počet souřadnic. Příkladem zobrazení hodnot v ploše může být lineární funkce na trojúhelníku, příkladem zobrazení hodnot v objemu pak lineární funkce na čtyřstěnu. Jejich zápis v souboru \*.pos vypadá následovně:

```
View „vysec“ {
```

```
ST ( 10, 0, 0, 10, 0, 0, 10, 2, 0 ) { 30, 23, 32 };}
```

```
View "ctyrsten" {
```

```
SS ( 0, 0, 0, 10, 0, 0, 5, 10, -5, 5, 10, 5 ) { 32, 23, 32, 32 };}
```

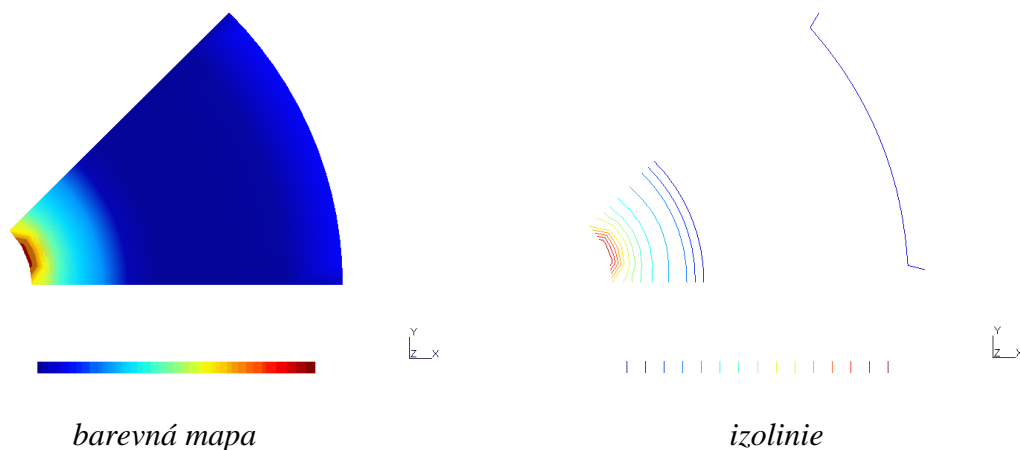
Označení ST (Scalar Triangle) definuje o jaké tvarové elementy se jedná. Devět prvních čísel v kulatých závorkách jsou souřadnice bodů elementu (trojúhelníku), čísla ve složených závorkách udávají „hodnotu“ v právě navolených bodech. U druhého příkladu mají čísla stejný význam jako v předešlém případě (jen jde o o dimenzi vyšší element).



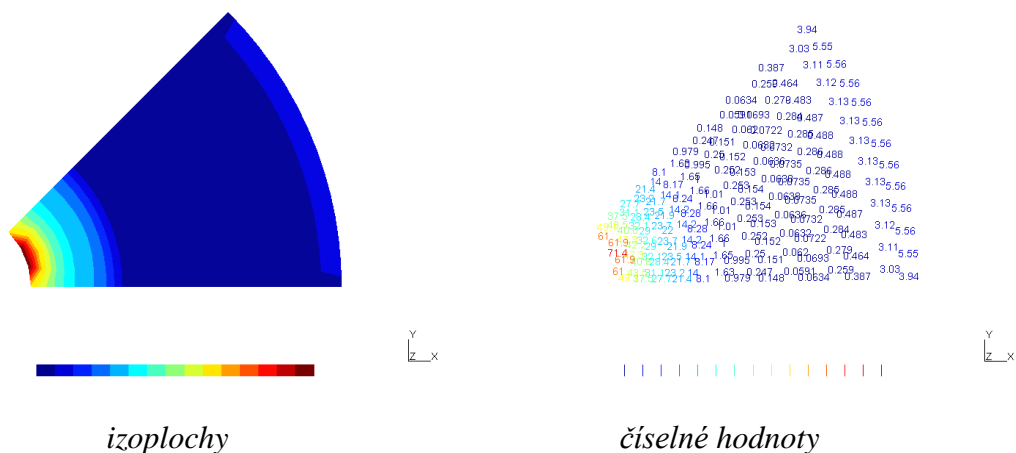
### 2.1.3 Možnosti zobrazení dat

Pro grafické zobrazení dat \*.pos souborů se v GMSH dá vybrat ze čtyřech variant (rozdíly mezi nimi jsou patrné z Obr.2). Jsou jimi:

- **Barevná mapa** – (Continuous map) zobrazení plného rozsahu hodnot (barev) s plynulým přechodem mezi nimi.
- **Izolinie** – (Iso-values) zobrazeny jsou pouze linie, v nichž dochází ke změnám hodnot. Jejich počet lze měnit podle potřeb uživatele.
- **Izoplocha** – (Filled iso-values) zobrazeny jsou hodnoty, které jsou na ploše téměř konstantní. Přechody mezi jednotlivými barvami tak nejsou plynulé, ale mají mezi sebou ostrou hranici.
- **Číselné hodnoty** – (Numeric values) zobrazeny jsou pouze hodnoty, které jsou pro jednotlivé elementy definovány. Čísla jsou prezentována pro lepší přehlednost v barvě zobrazené hodnoty.



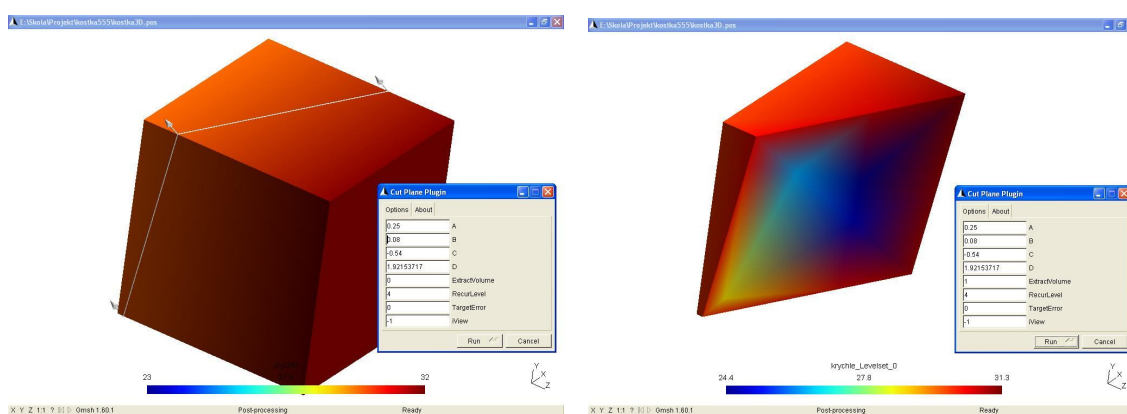
Obr.2 – Ukázky jak lze zobrazovat číselná data



Obr.2 – Ukázky jak lze zobrazovat číselná data

### 2.1.4 Řezy

Kvůli nutnosti zobrazovat hodnoty i uvnitř objemu je nutné mít možnost podívat se tam. Z toho důvodu je v aplikaci GMSH možno řezat objekty (nabídka **Cut Plane**). Ta nám umožňuje definovat „řeznou“ rovinu pomocí obecné rovnice roviny  $\rho: ax + by + cz + d = 0$ , kde  $a, b, c$  udávají směrnici normály k rovině. Řezání objektů je stejné jak pro preprocessing tak pro postprocessing. Na Obr.3 je znázorněná krychle oříznutá rovinou o rovnici  $0.25x + 0.08y - 0.54z + 1.92 = 0$ .



-nastavení parametrů oříznutí

-výsledek oříznutí

Obr.3 – ukázky použití možnosti řezů



V elementech, kterými prochází řezná rovina dochází ke změnám, které se týkají nejen přepočtu nových souřadnic hraničních bodů popř. změn celých elementů, ale zejména změn hodnot v jejich uzlech. Této problematice se podrobněji věnují kapitoly 3.3 a 3.4, ale v kontextu s programem GMSH je vhodné uvést jednoduchý příklad:

Čtyřstěn, jehož zápis v souboru \*.pos je:

```
View "ctyrsten" {
```

```
SS ( 0, 0, 0, 10, 0, 0, 5,10,-5,5,10,5 ) { 10, 20, 30, 40 };};
```

je oříznut rovinou o obecné rovnici  $0.81x - 0.24y - 0.51z - 1.5$ . Zápis v souboru \*.pos takto upraveného čtyřstěnu je:

```
View "ctyrsten_Levelset_0" {
```

```
SI(0.2706329375000001,0.5412658750000001,0.2706329375000001,6.1465132272727  
27,7.706973545454546,3.853486772727273,5,10,0.1180727096774206,0,0,0,10,0,0,5,1  
0,-5){11.623797625,35.41394709090909,35.11807270967742,10,20,30};};
```

Ze zápisu je patrné, že se ze čtyřstěnu (SS) řezem stal hranol (SI) o šesti vrcholech, jehož souřadnice musely být přepočteny. Přepočteny ale museli být právě i hodnoty v daných uzlech. S ohledem na zvýšení počtu vrcholů, se zvedl i počet těchto hodnot.

## 2.2 Flow123d

Flow123d je program pro výpočet proudění látek v horninách. Celý program je tvořen jedním \*.exe souborem, který se spouští s parametry a několika dalšími vstupními soubory (bcd, msh, mtr, a ini). Ty definují námi navrženou úlohu. Soubory, které jsou programem vytvořeny mají s ohledem na parametr (viz, níže) přípony \*.ngh, nebo \*.pos. Pro nás je samozřejmě nejdůležitějším souborem soubor \*.pos, tedy ten, který dále zpracováváme v programu GMSH. Více o problematice programu 123 Flow naleznete v práci [6]. Jednotlivé soubory obsahují:



### 2.2.1 MSH soubor

Tento soubor definuje vlastnosti sítě. V první části jeho obsahu jsou zapsány souřadnice uzlů (nody), v druhé části jsou popsány vlastnosti jednotlivých elementů (tvar, typ materiálu elementu příslušející). Stejně soubory používá i program GMSH.

### 2.2.2 MTR soubor

V tomto souboru je definována skupina elementů se stejnými fyzikálními vlastnostmi. Tyto vlastnosti lze zadat dle nastavení ve formě propustnosti nebo hydraulického odporu. Pokud je vlastnosti přiřazené kladné číslo, jedná se o propustnost, v opačném případě se jedná o hydraulický odpor.

### 2.2.3 BCD soubor

Soubor \*.bcd je souborem, do něhož se zadávají okrajové podmínky úlohy. Okrajových podmínek může být více typů a každý typ vyžaduje jiné vstupní parametry.

### 2.2.4 INI soubor

V tomto souboru se nachází deklarace vstupů, výstupů, běhu programu, globálních vlastností, překladače a několika dalších věcí, které však nejsou nutné. Název tohoto souboru slouží jako parametr, obsahem souboru jsou jednotlivé odkazy na části navrženého testu a další nutné definice pro výpočet.

### 2.2.5 NGH soubor

Zde je uložena tzv. „sousednost“, která určuje vlastnosti mezi elementy ležícími bezprostředně vedle sebe (mají společné body). Soubor \*.ngh vygeneruje program 123 Flow použitím parametru -n, za kterým následuje jméno testovaného \*.ini souboru.

### 2.2.6 POS soubor

Soubor \*.pos je výsledkem výpočtu a jde o hlavní výstupní soubor vygenerovaný programem, ve kterém se nachází hodnoty pro grafické zobrazení výsledných tlaků  $p$  a rychlosti proudění  $u$ . 123 Flow tento soubor vygeneruje použitím parametru -s, za kterým následuje jméno testovaného \*.ini souboru. Pro zobrazení těchto souborů se používá program GMSH (viz kapitola 2.1.2).



### **2.2.7 LOG soubor**

Průběh výpočtů, případné chyby, potvrzení postupného bezchybného čtení pomocných souborů, výsledný průtok sítí a další informace o probíhajícím procesu jsou uloženy právě v tomto souboru.



### 3. Použité metody analytické geometrie

Protože se obecně uvažuje, že modelování se provádí ve třech dimenzích, budou se veškeré následující úvahy týkat útvarů v trojrozměrném prostoru. Nejdříve je potřeba objasnit základní syntaxi útvarů (bod, úsečka, rovina) a poté s ohledem na požadavky aplikace objasnit jednotlivé vztahy mezi nimi a také útvary vzniklé jejich průnikem.

#### 3.1 Základní syntaxe útvarů v prostoru

##### 3.1.1 Bod v prostoru

Bod je prvkem prostoru a je určen třemi souřadnicemi. Zápis má tvar:  $M[m_1; m_2; m_3]$ .

##### 3.1.2 Úsečka v prostoru

Úsečka je podmnožinou prostoru a je dána dvěma body. Jsou-li body  $A[a_1; a_2; a_3]$  a  $B[b_1; b_2; b_3]$  krajními body úsečky, pak se její délka, kterou značíme  $|AB|$  vypočítá podle vztahu:

$$|AB| = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2}$$

a její parametrická rovnice (obecná v prostoru neexistuje) v symbolickém tvaru je:

$$AB : X = A + t(B - A), t \in \langle 0, 1 \rangle$$

Rozepsáno do jednotlivých souřadnic:

$$AB : x = x_A + t(x_B - x_A), t \in \langle 0, 1 \rangle$$

$$AB : y = y_A + t(y_B - y_A), t \in \langle 0, 1 \rangle$$

$$AB : z = z_A + t(z_B - z_A), t \in \langle 0, 1 \rangle$$

##### 3.1.3 Vektor v prostoru

Vektorem v geometrickém významu rozumíme orientovanou úsečku, tedy úsečku, jejíž krajní body mají určené pořadí, tj. jeden krajní bod je označen jako počáteční, druhý





jako koncový. Souřadnice vektoru se spočítají jako rozdíl souřadnic jednotlivých bodů, tedy:  $\overline{AB} = (b_1 - a_1; b_2 - a_2; b_3 - a_3)$ .

### 3.1.4 Rovina v prostoru

Rovina  $\rho$  je podmnožinou prostoru a je v něm dána obecnou rovnicí (může být vyjádřena i parametricky). Obecná rovnice má zápis:  $\rho: ax + by + cz + d = 0$  a rovina zadaná takovou obecnou rovnicí je množina všech bodů  $x; y; z$ , které ji splňují pro dané parametry  $a; b; c; d$ .

### 3.1.5 Normálový vektor

Koeficienty  $a, b, c$  v obecné rovnici roviny  $\rho$  jsou souřadnicemi normálového vektoru  $\eta$  k rovině  $\rho$ . Normálový vektor se zapisuje způsobem:  $\eta = (a, b, c)$  a je kolmý k rovině  $\rho$ . Z toho vyplývá, že rovina  $\rho$  je mimo jiné určena normálovým vektorem  $\eta$  a jedním bodem  $M [m_1; m_2; m_3]$ , který v rovině leží.

## 3.2 Vzájemné polohy útvarů v prostoru

Jak již bylo řečeno výše, veškeré úvahy se týkají trojrozměrného prostoru. Před samotným zaměřením se na jednotlivé vzájemné polohy útvarů v prostoru je třeba objasnit některé pojmy.

Máme-li rovinu  $\rho$  o nějaké obecné rovnici, pak tato rovina dělí trojrozměrný prostor na dva poloprostory. Rovina samotná je pak hraniční rovinou obou poloprostorů. Ze vztahů uvedených výše je zřejmé, že v jednom z poloprostorů leží normálový vektor roviny (ten který je specifikován koeficienty  $a, b, c$ ). Toho je využito v dalším postupu v této práci.

### 3.2.1 Vzdálenost bodu a roviny

Vzdálenost bodu od roviny bude důležitým faktorem při rozhodování vzájemné polohy rezné roviny a bodů sítě. Samotná vzdálenost se vypočítá podle vzorce:

$$|\rho M| = \frac{|am_1 + bm_2 + cm_3 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$



Odstraněním absolutní hodnoty lze určit, ve kterém poloprostoru se daný bod nachází. Bude-li výsledek záporný, bod se nachází v opačném poloprostoru vzhledem k danému normálovému vektoru roviny, při kladném výsledku se bod nachází ve stejném poloprostoru jako daný normálový vektor roviny.

### 3.2.2 Vzájemná poloha úsečky a roviny

Při vzájemném porovnávání polohy úsečky a roviny mohou nastat tři případy:

- Úsečka je rovnoběžná s rovinou
- Úsečka leží přímo v rovině
- Úsečka je různoběžná s rovinou

Všechny nastalé situace se řeší způsobem hledání společného bodu obou útvarů. Vezmeme-li v úvahu jednotlivé případy vzájemných poloh, zjistíme že řešení nebude žádné, nebo jich bude nekonečně mnoho, nebo bude právě jedno.

V problematice výpočtů těchto skutečností budeme brát v úvahu pouze třetí případ, tedy situaci kdy řezná rovina bude úsečku mezi dvěma body dělit. Bude-li totiž řezná rovina protínat úsečku mezi dvěma krajními body, pak tato bude muset být transformována na úsečku mezi bodem a řeznou rovinou. Bod vzniklý průnikem řezné roviny a původní úsečky pak bude vystupovat v souborech jako hraniční bod řezu a jeho souřadnice získáme dosazením hodnot z parametrických rovnic úsečky (viz kapitola 3.1.2) za hodnoty  $x, y, z$  obecné rovnice roviny. Řešení nám pak dá hodnotu parametru  $t$ , který po zpětném dosazení do parametrických rovnic úsečky, již určí přímo souřadnice průsečíku.

### 3.3 Útvary vzniklé průnikem objektů a roviny

Průnikem objektu (obecně přímky, roviny nebo 3D útvaru) a roviny dochází k rozdělení původního objektu na dva objekty, ležící v opačných poloprostorech (hraniční rovinou je rovina, která objekt rozdělila). Výsledkem zobrazení takového rozdělení může být:

- objekt v jednom z poloprostorů
- samotná hraniční (řezná) rovina



V dalším textu budeme tyto možnosti rozlišovat, protože i samotné výsledky ořezání objektů program GMSH z tohoto hlediska odlišuje. Je zřejmé, že po rozdělení je potřeba přepočítat souřadnice nových hraničních bodů, které vzniknou průnikem roviny a útvaru.

Při tomto přepočítávání je třeba vzít v úvahu skutečnost, že se veškeré složitější objekty skládají z úseček, takže jejich průniky s rovinou lze transformovat na základní úlohu průniku úsečky a roviny.

### **3.3.1 Pro jednorozměrné situace**

Za jednorozměrnou situaci řezů objektů považujeme dělení čar (přímek, úseček). V našem případě se jedná právě o úsečky, u nichž výsledkem řezu, budeme-li brát jeden z poloprostorů, vznikne opět úsečka. Je-li jako výsledek brána samotná plocha řezu (řezná rovina), pak je vzniklým útvarem bod.

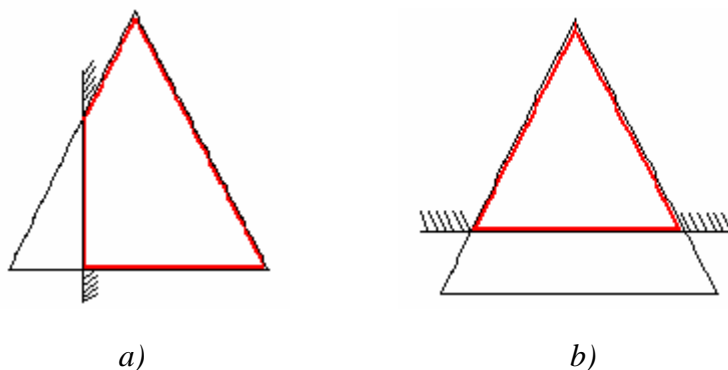
### **3.3.2 Pro 2D situace**

Dvojezměrné objekty v prostoru jsou jakékoliv rovinné útvary, jako trojúhelník, čtyřúhelník, atd. Uvedeno je pouze ořezávání trojúhelníku, neboť pro ostatní útvary je situace obdobná.

#### **Řez trojúhelníku**

Při řezu trojúhelníku, bereme-li v úvahu pouze možnost řezu jednou rovinou a předpokládáme-li výsledek řezu jeden z poloprostorů, může vzniknout buď trojúhelník, nebo čtyřúhelník. To který z případů nastane, záleží na vzájemné poloze řezné roviny a daného trojúhelníku. Bude-li řezná rovina dělit trojúhelník tak, že odřízne dva vrcholy, výsledným obrazcem bude znovu trojúhelník (Obr.4a). V případě odříznutí pouze jednoho vrcholu, vznikne řezem čtyřúhelník (Obr.4b).

Pokud budeme brát jako výsledek samotnou plochu řezu, bude výsledným zobrazením ve všech případech úsečka (jedná se totiž o rovinný útvar - tedy dvojdimenzionální).



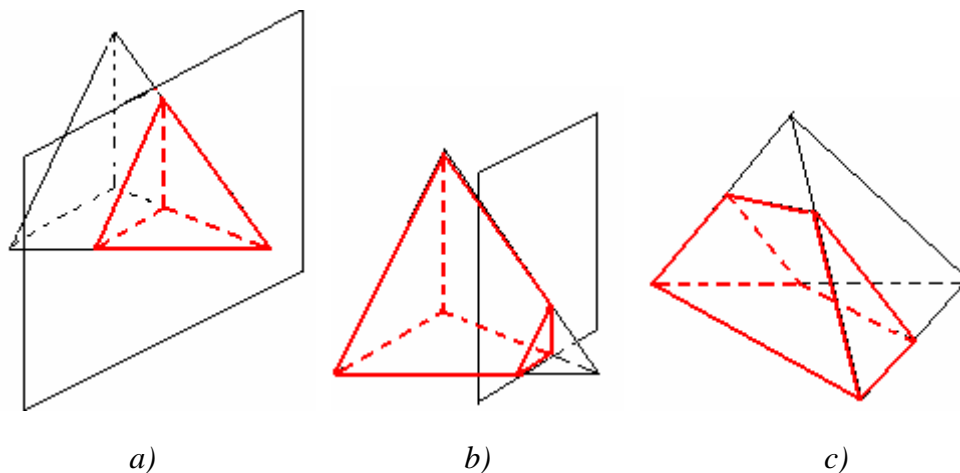
Obr.4 – možné útvary vzniklé řezem trojúhelníku (červeně jsou zobrazeny výsledné útvary) – při pohledu zhora se řezná rovina jeví jako přímka

### 3.3.3 Pro 3D situace

V prostoru už je situace o něco komplikovanější. Uvedeny jsou tedy pouze možnosti, které vzniknou řezem čtyřstěnu.

#### Řez čtyřstěnu

Při řezu třídimenzionálních útvarů je třeba mít alespoň trochu prostorové představivosti, nutné pro správné určení vzniklého objektu. Výsledkem řezu, je-li brán jeden z poloprostorů bude čtyřstěn, a to v případě, že řezná rovina oddělí tři krajní body objektu (Obr.5-a). Při oddělení jednoho nebo dvou vrcholů z původního objektu bude výsledkem pětistěn (Obr.5-b,c). Z hlediska zobrazení plochy řezu je výsledným obrazcem plošný útvar a to trojúhelník (Obr.5-a,b) nebo čtyřúhelník (Obr.5-c).



Obr.5 – útvary vzniklé ořezáním čtyřstěnu (výsledné útvary jsou opět červeně)



### 3.4 Výpočet hodnot v nově vzniklých uzlech

S výpočtem průniku roviny a úsečky  $a$  v kontextu s aplikací GMSH, ve které se změnou souřadnic hraničních bodů nutně souvisí i přepočítání hodnot v daných bodech (viz kapitola 2.1.4) je potřeba uvést, jak se tyto hodnoty přepočítají. Opět se budeme zabývat pouze problematikou přepočítání hodnot na úsečce, protože právě z úseček se všechny objekty skládají.

Vlastnostmi zobrazení v GMSH je dáno, že jsou hodnoty na úsečce rozloženy lineárně. Zároveň je třeba aby byly známy hodnoty v krajních bodech úsečky (to v GMSH jsou). Pak stačí spočítat dle vzorce

$$r = \frac{h_B - h_A}{|AB|},$$

kde  $h_B, h_A$  jsou hodnoty v krajních bodech úsečky a  $|AB|$  je velikost úsečky, o kolik se hodnota zvýší na jednotkové délce. Tuto hodnotu následně dosadíme do dalšího vzorce

$$h_X = r * |AX| + h_A,$$

kde  $h_X$  je hodnota v nově vzniklém bodě a  $|AX|$  je velikost úsečky vzniklé řezem (X je bod vzniklý řezem úsečky), jehož výsledkem už bude hodnota v nově vzniklém bodě.



## 4. Vytvořený software

Program pro výpočet řezů puklinových sítí grafických souborů programu GMSH, s názvem Rezsit, je uživatelská aplikace vytvořená ve vývojovém prostředí BORLAND DELPHI 7. Aplikace slouží ke zpracování a modifikaci obsahů souborů \*.pos (grafické soubory programu GMSH). Hlavním důvodem, proč byla aplikace vytvořena, byla potřeba zpracování více souborů najednou, což program GMSH neumožňoval.

Soubory generované aplikací jsou plně kompatibilní s GMSH v. 1.65.0 (na příloženém CD). Ve starších verzích by nemusela správně fungovat některá nastavení zobrazení - zejména se jedná o nastavení barvy pozadí.

### 4.1 Systémové požadavky

Jak již bylo řečeno, program byl vytvořen v programovacím jazyce Borland Delphi 7 a byl testován v OS Windows XP. Neobsahuje však žádné speciální funkce, takže by měl být funkční i v ostatních verzích. Co se hardwarových nároků týče, byl program testován na počítači s procesorem pracujícím na frekvenci 800MHz a 256MB operační paměti.

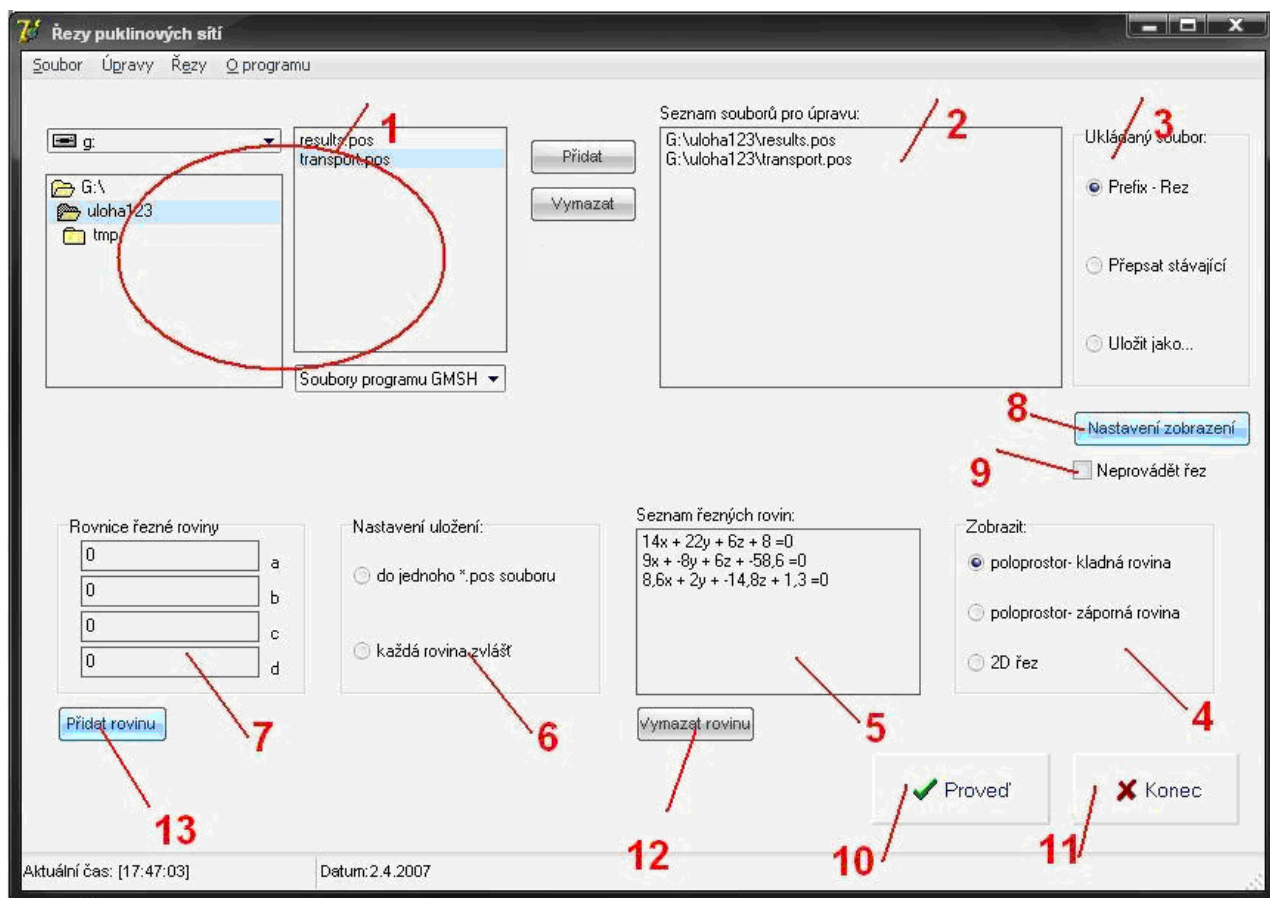
Nutno upozornit, že pro správnou funkčnost aplikace je nutno mít nastaven desetinný oddělovač tečku, nikoliv čárku.

### 4.2 Návod na použití

Spuštěním souboru 'rezsit.exe' se otevře hlavní okno aplikace (Obr. 6). Následně je třeba načíst grafické soubory aplikace GMSH (\*.pos), které chceme modifikovat a stanovit kritéria (řezné roviny), podle nichž budou výstupní soubory upraveny. Modifikované soubory jsou po úpravě automaticky uloženy podle požadavků uživatele (viz níže). Doplnkovou funkcí, která zpříjemní a hlavně zjednoduší další nastavení je volba zobrazení. Řezy i volby zobrazení grafických souborů programu GMSH jsou podrobněji rozvedeny v kapitole 2.1.3 a 2.1.4. Popis jednotlivých funkcí i samotné práce s aplikací jsou uvedeny v následujících podkapitolách.



#### 4.2.1 Popis aplikace



Obr.6 – Grafické zpracování aplikace

Grafické zpracování aplikace je patrné z Obr.6. Popisky k jednotlivým číslům jsou uvedeny níže, některé pak podrobněji v kapitole 4.2.2.

- 1) Standardní dialogová okna (DriveComboBox, DirectoryListBox, FileListBox a FilterComboBox) pro nalezení potřebného souboru. Konkrétní soubor bude přidán do seznamu po kliknutí na tlačítko "Přidat".
- 2) Seznam všech souborů (v ListBoxu), které budou upraveny.
- 3) Výběr, jakým způsobem budou modifikované soubory uloženy. Na výběr je ze čtyřech možností- viz níže.
- 4) Volba, jež rozhodne o tom, který poloprostor od řezné roviny, popř. pouhá rovina řezu bude do výsledného souboru zapsána- viz níže.
- 5) Seznam řezných rovin (v ListBoxu), které budou na načtené soubory aplikovány.



- 6) Volba rozhodující, budou-li řezy zadanými rovinami zapsány do jednoho \*.pos souboru, nebo každý sám do zvláštního souboru- viz níže.
- 7) Deklarace řezných rovin. Do jednotlivých editačních polí se zadávají koeficienty  $a; b; c; d$ , které určují obecnou rovnici roviny- viz níže.
- 8) Pod tlačítkem “Nastavení zobrazení“ se objeví dialogové okno s možností změny zobrazení dat a změny barvy pozadí (viz. kapitola 2.1.3). Pokud tato volba nebude nastavena, data budou zobrazena podle nastavení v programu GMSH.
- 9) Pokud bude potřeba pouze změnit parametry zobrazení (kapitola 2.1.3) a neprovádět řez, je třeba zaškrtnout možnost “Neprovádět řez“.
- 10) Kliknutí na tlačítko “Proved“ bude spuštěno samotné zpracování souborů potvrzené informační zprávou o úspěšném provedení změn.
- 11) Kliknutím na tlačítko “Konec“ celou aplikaci ukončíte
- 12) Při stisku tlačítka “Vymazat roviny“ budou smazány veškeré doposud zadané rovnice rovin a mohou být zadány nové pro další zpracování
- 13) Při stisku “Přidat rovinu“ se do seznamu rovin (5) přidá rovina zadaná v editačních polích (7).

#### 4.2.2 Konkrétní popis některých funkčních bloků programu

Čísla uvedená v závorce za nadpisem odpovídají číslům uvedeným v grafickém náhledu zpracování aplikace (Obr. 6).

##### **Ukládání souborů (3)**

Soubory, které jsou programem generovány lze ukládat třemi způsoby:

- 1) Prefix-Rez - v případě zvolení této možnosti bude před jméno upravovaného souboru vloženo slovo “Rez“ do nějž bude následně uložena modifikovaná verze původního souboru. To má výhodu zejména při organizaci takto vzniklých souborů.
- 2) Přepsat stávající – načtený soubor bude nahrazen modifikovaným. Možnost znovuobnovení původního souborů tím pádem zaniká!





- 3) Uložit jako – po upravení každého souboru se objeví dialogové okno pro uložení souboru, kam uživatel napíše požadované jméno, pod kterým bude modifikovaný soubor uložen. Maska ukládaného souboru je implicitně nastavena na \*.pos.

#### Požadované zobrazení (4)

Při ořezávání grafických objektů může být zobrazeno (viz kapitola 3.3):

- 1) Poloprostor-kladná rovina – zobrazen bude pouze objekt v poloprostoru, ve kterém se nachází daný normálový vektor řezné roviny.
- 2) Poloprostor-záporná rovina – opačná situace k situaci předchozí. Zobrazen bude objekt v poloprostoru nacházejícím se v opačném směru daného normálového vektoru řezné roviny.
- 3) 2D řez – zobrazeným objektem bude objekt, který má stejnou obecnou rovnici jako rovina řezná.

#### Nastavení uložení (6)

Teoreticky jsou možné dva režimy průniku jednotlivých řezů a to:

- Každý následující řez je tvořen z objektu vzniklého řezem předešlým. Matematicky se dají tyto průniky vyjádřit vzorcem:

$$P \cap (R_1 \cap R_2 \cap \dots \cap R_n),$$

kde  $P$  je původní síť a  $R_1 \dots R_n$  jsou řezné poloprostory

Tento styl průníků je dobrý při uplatnění ořezávání objektu pomocí poloprostorů z více stran.

- Každý následující řez je tvořen z původního souboru. Matematicky se dají tyto průniky vyjádřit vzorcem:

$$P \cap (R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n) = (P \cap R_1) \cup (P \cap R_2) \cup \dots \cup (P \cap R_n),$$

kde  $P$  je původní síť a  $R_1 \dots R_n$  jsou řezné roviny

Tento způsob je výhodný zejména při zobrazování samotných ploch řezů (popř. je-li jich i více paralelních).



V aplikaci je implementován pouze druhý režim průniků, tedy ten, který každý řez vytváří z původního souboru a pokud jsou soubory ořezávány více rovinami najednou, můžeme vybrat, jak se pro jednotlivé řezy budou soubory ukládat:

- 1) Do jednoho \*.pos souboru – tuto volbu zaškrtneme pokud chceme provést nejdřív všechny řezy a teprve potom soubor uložit. Soubor bude obsahovat tolik jednotlivých “View“, kolika rovinami bude zpracován a při jeho otevření v programu GMSH budou k dispozici všechny provedené řezy najednou.
- 2) Každá rovina zvlášť – při této volbě se pro jednotlivé řezné roviny uloží do každého souboru zvlášť. K názvům souborů budou pro přehlednost přidány čísla.

#### **Rovnice řezné roviny (7)**

V této oblasti uživatel zadává obecné rovnice řezné roviny, které mají soubor modifikovat. Jednotlivé koeficienty  $a, b, c, d$  jsou koeficienty obecné rovnice roviny (viz. kapitola 3.1.4). Zadávat lze jakákoliv reálná čísla a pokud některý koeficient nebude vyplněn, automaticky ze něj bude doplněno číslo nula. Správnost zadané rovnice si můžete ověřit v přehledu seznamu rovin (5).

#### **4.2.3 Důležité zásady pro práci s aplikací**

Pro úspěšné dosažení výsledků při práci s aplikací je nutno dodržovat jistá pravidla. Z přehledu uvedeného výše je patrné, co aplikace při různých nastaveních provede, nebo jak se jednotlivé volby ve výstupních souborech projeví. V následujících bodech jsou shrnuty nejdůležitější zásady pro správnou funkčnost a požadovaný výsledek práce aplikace.

- Jiné, než grafické soubory programu GMSH (\*.pos) aplikace neumí zpracovávat a při pokusu je odmítne
- Jako desetinný oddělovač **musí** být ve Windows nastavena tečka
- Pokud není zadána žádná řezná rovina, musí být zaškrtnuta možnost “Neprovádět řez“ a zároveň nastaven styl zobrazení (tlačítko “Nastavení zobrazení“)

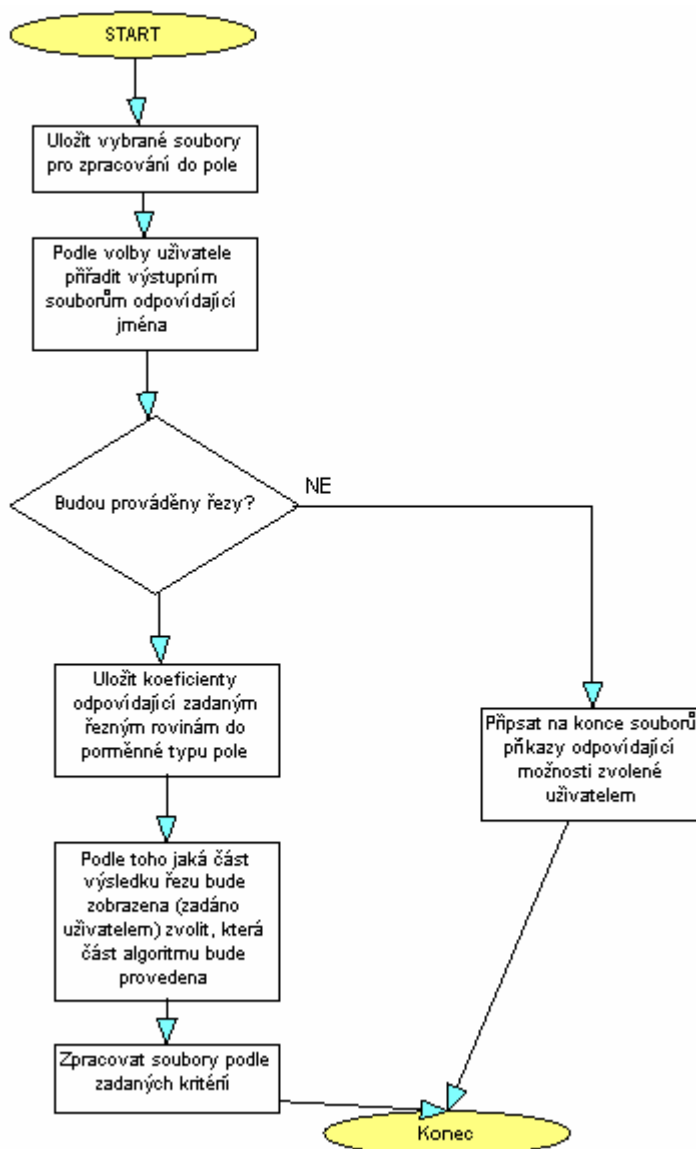


- Při zaškrtnutí možnosti uložení souboru “Přepsat stávající“ není zobrazeno dotazovací okno s požadavkem na potvrzení přepsání a původní soubor tak bude bez varování přepsán – jedná se o vědomou volbu uživatele

### 4.3 Popis řešení programu

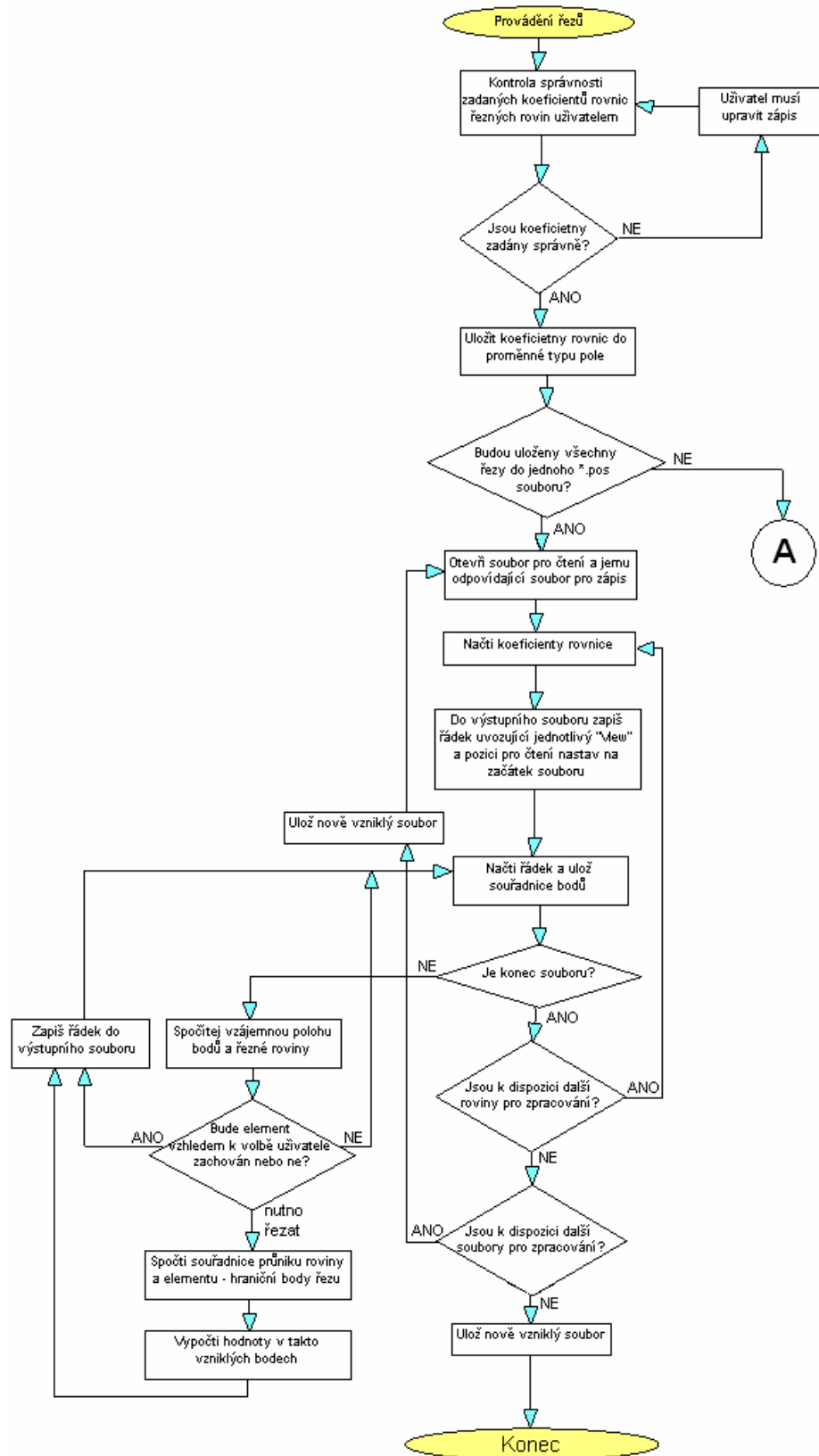
Samotný program je složen z jednotlivých podprogramů (procedur), které řeší jednotlivé postupy výpočtů. V programu jsou použity základní typy proměnných a také základní stavební prvky algoritmů jako jsou cykly nebo podmíněné příkazy. Celý zdrojový kód programu je na přiloženém CD, jak program funguje naznačují nejlépe vývojové diagramy na obrázcích Obr.7 a Obr.8.

Jelikož je však problematika řezů objektů, které lze v GMSH zobrazovat velice rozsáhlá, je zřejmé že program nepostihuje vše. Otevírá se tak možnost pro další rozvoj aplikace, které by spočívalo zejména ve zpracování \*.pos souborů, které mají více kroků (stepů) v zobrazení, nebo také v rozšíření možností nastavení zobrazení.

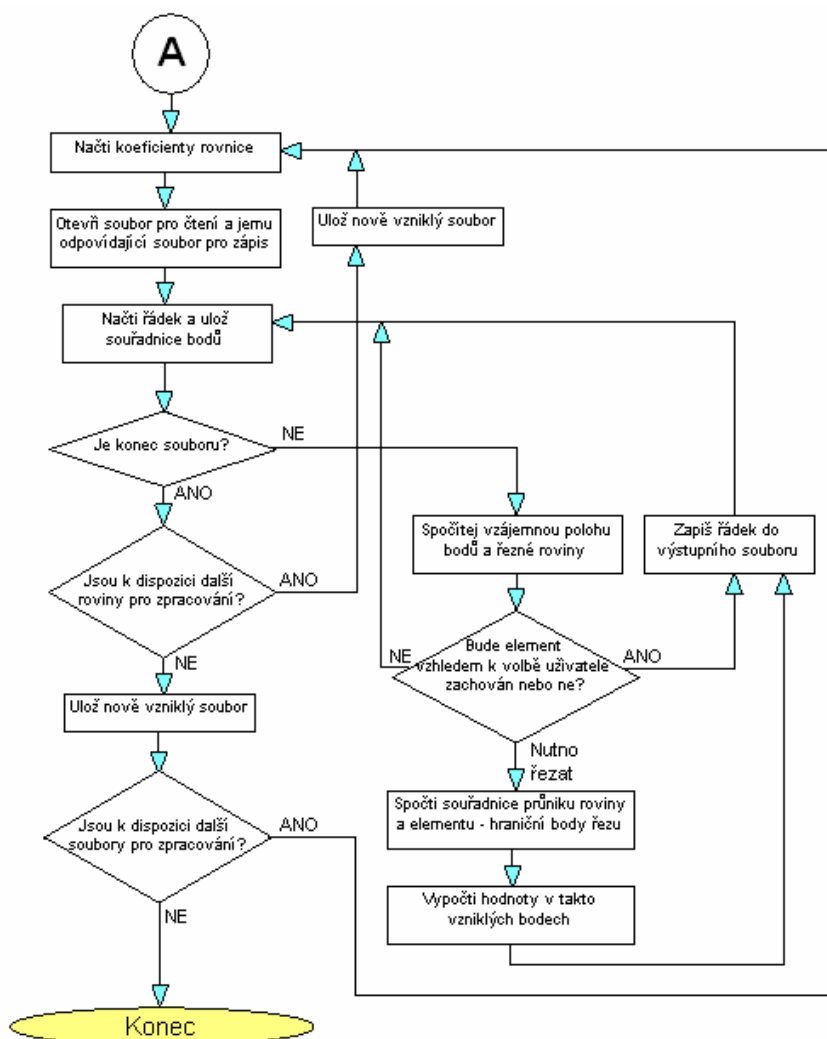


Obr. 7 – vývojový diagram programu

Ve větvi programu, kde se neprovádí řezy, se neřeší žádné složité algoritmy, ale pouze připsání některých příkazů na konec souboru a není jí tedy třeba podrobněji zkoumat. V druhé větvi se ale provádí velké množství výpočtů, tudíž je vhodné ji podrobněji rozebrat – viz Obr.8a.



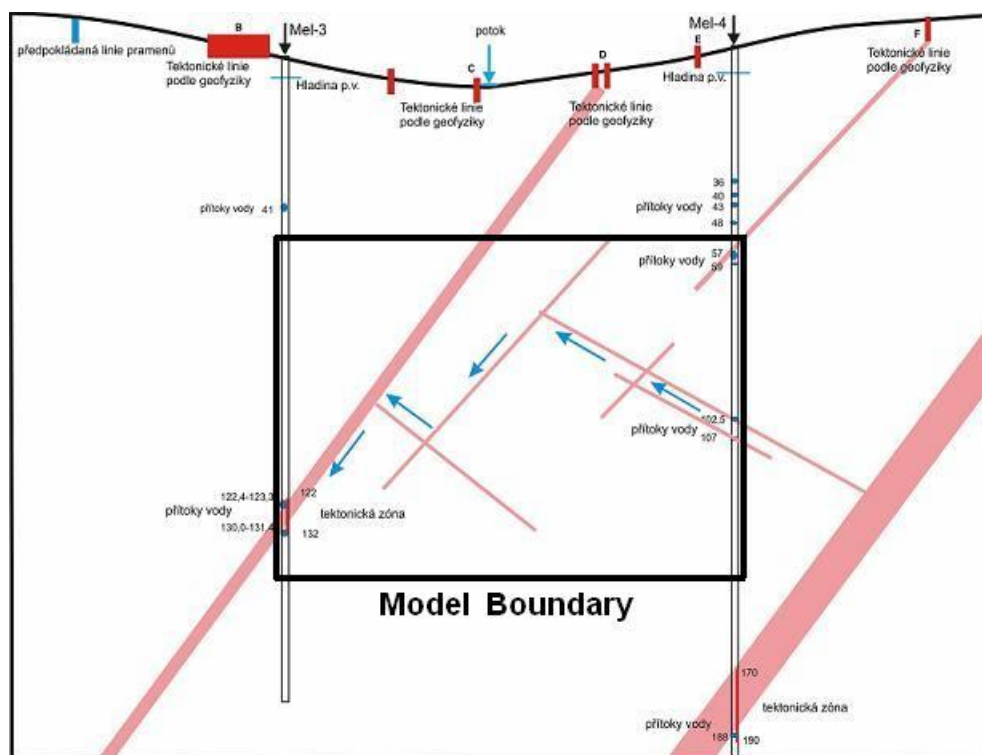
Obr.8-a –detail větve ve které se provádí řezy(1.část)



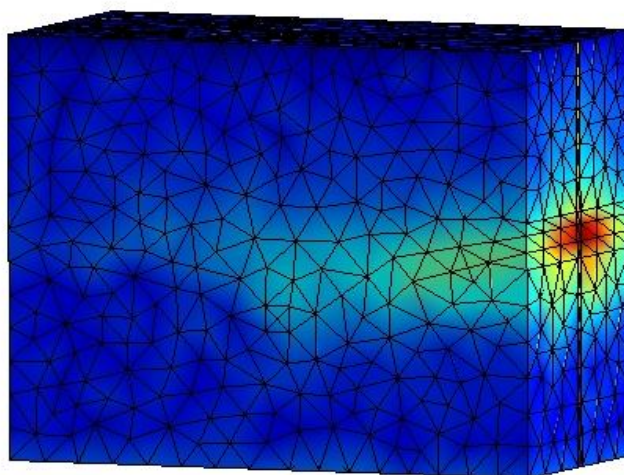
Obr.8-b – detail větve ve které se provádí řezy(2.část)

#### 4.4 Test funkčnosti

Jako vzorová data pro ověření správné funkčnosti aplikace jsou zvolena data použitá pro modelování hydrogeologických jevů v oblasti Melechova. Informace byly čerpány ze zprávy o řešených úlohách v této oblasti [7]. Nákres oblasti je patrný z Obr.9. Jemu odpovídající síť s patrnými puklinami je pak na Obr.10.



Obr.9 – Vertikální řez oblastí Melechova (růžové čáry značí pukliny)



Obr.10 – puklinová síť odpovídající černě orámované oblasti z Obr.9 – hodnoty reprezentované barevnou škálou odpovídají piezometrickým výškám



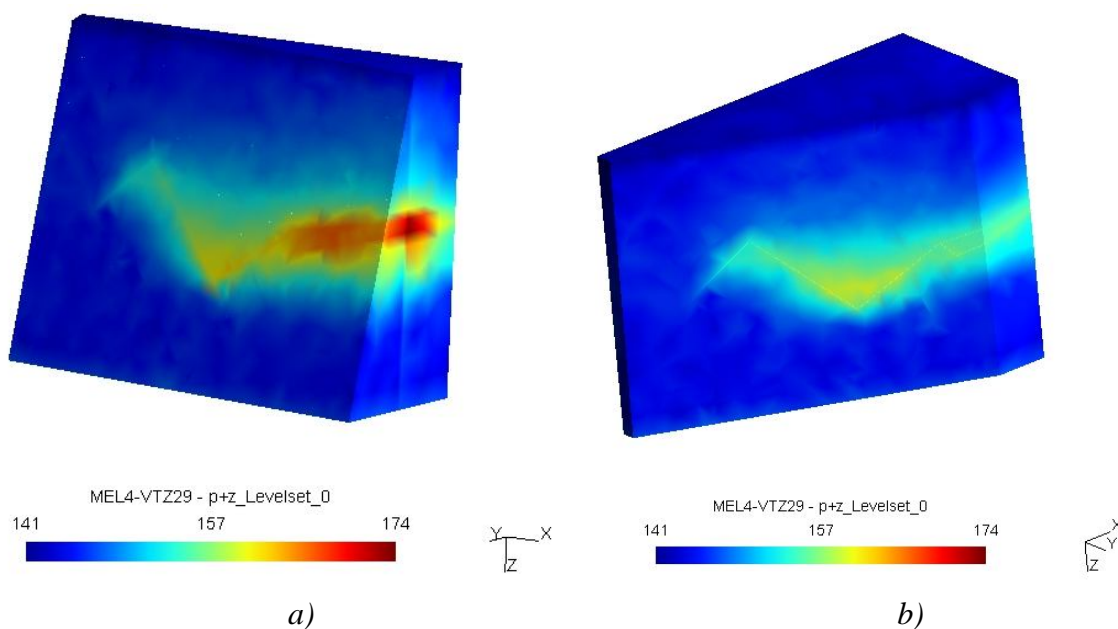
#### 4.4.1 Řezy jejichž výsledkem jsou poloprostory

Jako vzorová data použijeme trojrozměrnou síť odpovídající síti na Obr.10, kterou ořízneme postupně rovinami o rovnicích:

$$a) \rho_1 : 6,8x - 29,6y + 9,2z - 20,9 = 0$$

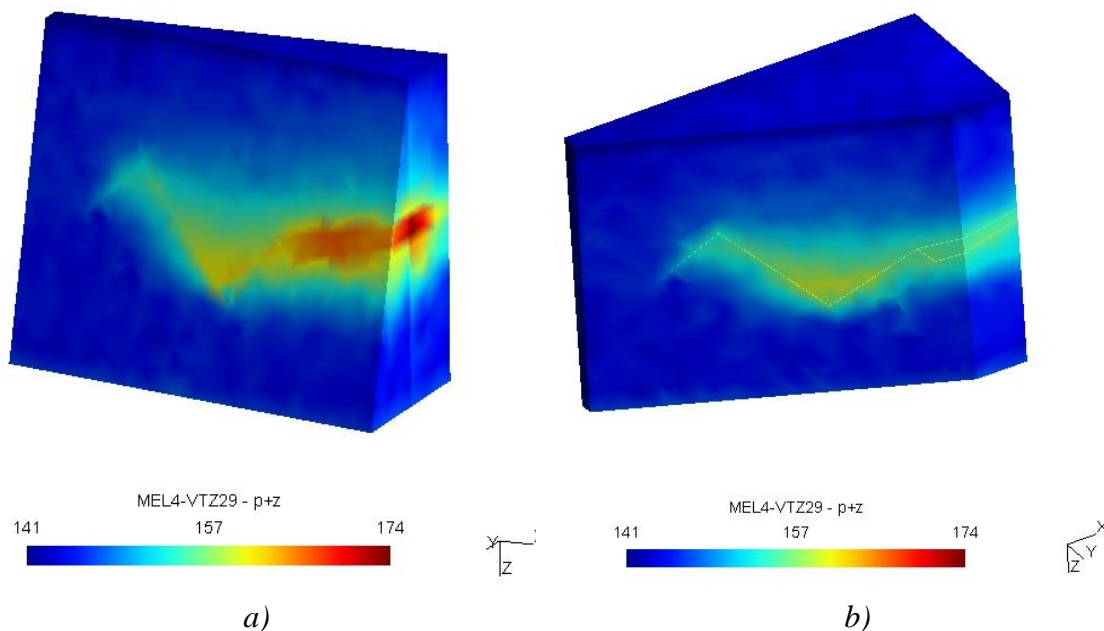
$$b) \rho_2 : 9,6x - 19,4y - 0,3z + 126 = 0$$

Výsledná zobrazení vzniklá oříznutím původního objektu zpracovaná přímo aplikací GMSH jsou na Obr.11, na Obr.12 jsou pak zobrazeny výsledky dosažené pomocí programu Rezsit (zobrazena jsou také pomocí GMSH).



Obr.11- výsledná zobrazení poloprostorů po oříznutí objektu v programu GMSH





Obr.12- výsledná zobrazení poloprostorů po ořznutí objektů získaná programem Rezsit

#### 4.4.2 Řezy jejichž výsledkem je samotná řezná rovina

Pro test funkčnosti aplikace jejíž výsledným zobrazením bude samotná řezná rovina je použito stejné sítě jako v předchozím případě – tedy sítě z Obr.10. Jednotlivé obecné rovnice řezných rovin mají tvary:

$$a) \rho_1 : 5x + 4,7y - 4,5z + 126 = 0$$

$$\rho_2 : 5x + 4,7y - 4,5z - 200 = 0$$

$$\rho_3 : 5x + 4,7y - 4,5z - 536 = 0$$

$$\rho_4 : 5x + 4,7y - 4,5z - 750 = 0$$

$$b) \rho_1 : 15x - 150 = 0$$

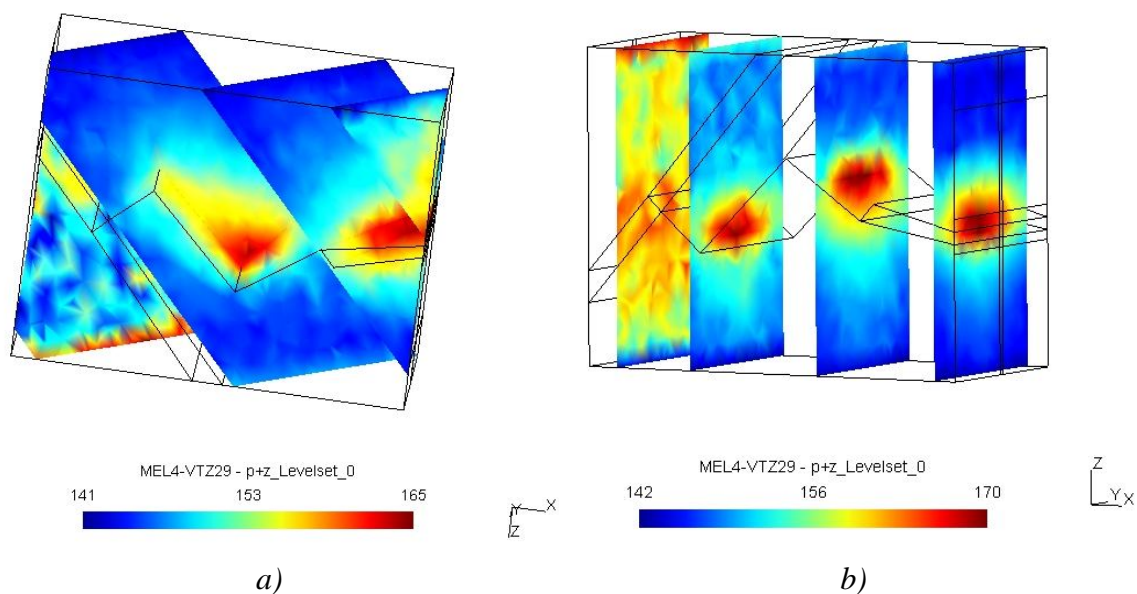
$$\rho_2 : 15x - 540 = 0$$

$$\rho_3 : 15x - 1210 = 0$$

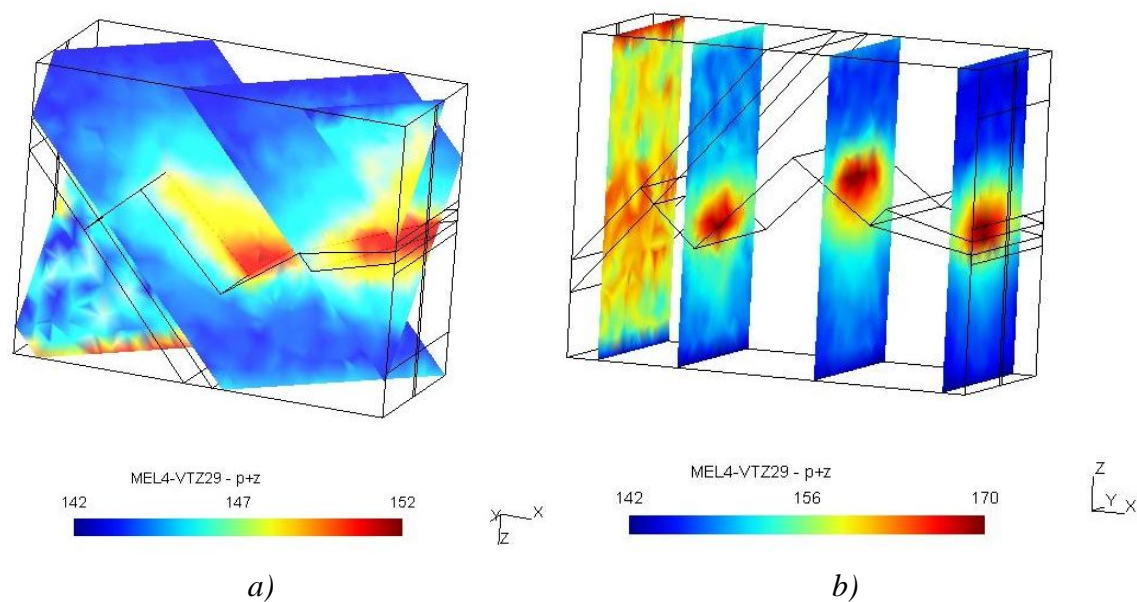
$$\rho_4 : 15x - 1840 = 0$$



Stejně jako v předchozím případě jsou nejprve zobrazeny výsledky dosažené provedením jednotlivých řezů přímo v programu GMSH (Obr.13) a následně výsledky dosažené programem Rezsit, zobrazené v GMSH (Obr.14)



Obr.13 – Zobrazení 2D ploch odpovídající zadaným řezným rovinám – provedeno v programu GMSH



Obr.14 – Zobrazení odpovídající zadaným řezným rovinám – řezy získané aplikací Rezsit



## Závěrečné zhodnocení

V rámci této bakalářské práce byla vytvořena aplikace zpracovávající grafické soubory programu GMSH. Porovná-li se výsledky dosažené samotným GMSH a ty, které byly získány díky aplikaci Rezsit, je zřejmé, že jsou identické. Vysoká přesnost je zaručená vysokým počtem desetinných míst u čísel, která odpovídají hodnotám fyzikálních veličin v daných bodech.

Podářilo se tak úspěšně rozšířit možnosti aplikace GMSH o dávkové zpracování jejich grafických souborů. Protože starší verze GMSH prováděly řezy pouze tak že vylučovaly elementy, které tam nepatřili a neprováděly řezy jich samotných, měla být vyvíjená aplikace nadstavbovým řešením. Bohužel během jejího samotného vývoje došlo i k uvedení verze GMSH, která již toto umožňovala a tak se přínos programu Rezsit zúžil na možnosti dávkového zpracování a zpracování více rovinami najednou.



## **Příloha A    Obsah přiloženého CD**

Data jsou na přiloženém CD rozřazena do následujících adresářů:

- Data/ - vzorová data pro ověření funkčnosti aplikace
- Program/ - program Rezsit včetně zdrojových kódů
- GMSH/ - program GMSH v.1.65.0 ve kterém lze zobrazovat soubory \*.pos generované vytvořenou aplikací (program nutno rozbalit)
- Texty/ - tato bakalářská práce ve formátu .doc a .pdf



## Literatura

- [1] Dokumentace k programu GMSH (na přiloženém CD)
- [2] J. Žara, B. Beneš, P. Felklel ; *Moderní počítačová grafika*; Computer Press, Praha, 1998
- [3] P.M. Adler, J.-F. Thovert; *Fractures and Fracture network (Theory and application of transport in porous media)*; Springer
- [4] Jacob Bear, Chin-Fu Tsang, Ghislain de Marsily ; *Flow and Contaminant transport in fractured rock*; Academic Press, Inc., Kalifornia, 1993
- [5] <http://www.adamira.cz/matematika/>
- [6] Otto Severýn ; *Model proudění a transportu látek v puklinovém prostředí* ; Diplomová práce, Technická universita v Liberci, Liberec, 2002
- [7] Jiří Maryška, Jiřina Královcová a kol.; *MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ POHYBU FLUID V PUKLINOVÉM PROSTŘEDÍ TESTOVACÍ LOKALITY*; Česká geologická služba, 2006
- [8] Jana Tourková; *Hydrogeologie* ; České vysoké učení technické v Praze, Praha, 2004
- [9] Pavel Jiránek ; *Vývoj grafického postprocesoru pro model spalovacího motoru* ; Ročníkový projekt, Technická universita v Liberci, Liberec, 2002
- [10] Lukáš Cerman ; *Grafické zpracování výsledků numerických modelů* ; Ročníkový projekt, Technická universita v Liberci, Liberec, 2006
- [11] Michal Kolář ; *Porovnání kompatibilního a nekompatibilního propojování elementů v kombinovaném modelu filtračního proudění* ; Ročníkový projekt, Technická universita v Liberci, Liberec, 2006
- [12] Pavel Čermák, Petra Červinková ; *Odmaturuj z matematiky 1* ; Didaktik, Brno, 2004
- [13] Slavoj Písek ; *Začínáme programovat v Delphi* ; Grada Publishing , Praha , 2000