

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Generování sítí trojrozměrných elementů pro numerické modely

Bakalářská práce

Autor: **David Chvalkovský**

Vedoucí BP práce: Ing. Jiřina Královcová, Ph. D.

Konzultant:

V Liberci 13. 7. 2006

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 BP 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 13. 7. 2006

Podpis

Abstrakt

System GIS (Geografický informační systém) umožňuje uchovávat a zpracovávat data vztahující se k určité oblasti.

Cílem práce bylo na základě povrchové sítě konkrétní oblasti generované systémem GIS vytvořit síť trojrozměrných elementů a ostatní vstupní soubory tak, aby je bylo možno využít pro modelování podzemního proudění v dané oblasti pomocí programů GENFLOW a FLOW123D vyvíjených na katedře modelování procesů.

V rámci práce byla vytvořena počítačová aplikace „Generátor souborů 3D sítí“, která z připravených povrchových dat souborů GIS bude generovat síť trojrozměrných elementů oblasti. Vytvářet soubory elementů, materiálových vlastností a okrajových podmínek vztahujících se k zadané oblasti v závislosti na vstupních požadavcích programů GENFLOW a FLOW123D.

Vlastní text této práce obsahuje informace o modelování podzemního proudění, o geologických datech zkoumané oblasti, dále popis generovaných souborů a seznamuje s tvorbou počítačové aplikace a jejím ovládáním.

Klíčová slova: generování sítí, modelování podzemního proudění

Abstract

System GIS (Geographic informative system) enables us to store and work a data applied to the certain area.

The aim of the work was to create the mesh of treedimensional elements and other entrance files on the base of surface mesh of the certain area generated by the GIS system, so that to by able to use them for modeling underground flows in the given area with use of GENFLOW and FLOW123D programs developed on department of modeling processes.

In the theme of work, there was created computer application „Files generator of 3D mesh“ which will generating a mesh of 3D elements of area from prepared surface data of GIS files. Create files of elements, material charakter and boundary conditions referring to given area in relation to intrance requirements of GENFLOW and FLOW123D programs.

Proper text of these work contains informations about modeling underground flows, about geologic data of the explored area, describe of generated files and introduce us the work of compiuter application and with their useing.

Keywords: Generate mesh, modeling underground flows

Obsah

Úvod	10
1 Problematika FEM	11
1.1 Multielementy	11
1.2 Simplexy	12
2 Popis souborů	14
2.1 Zdroj dat v souborech	14
2.1.1 Soubor bodů sítě	14
2.1.2 Soubor trojúhelníkových elementů	14
2.2 Vytvářené soubory	15
2.2.1 Soubor definic uzlů sítě STU	15
2.2.2 Soubor definic multielementů sítě STE	16
2.2.3 Soubor hodnot materiálových koeficientů STM	17
2.2.4 Soubor typů a číslování okrajových podmínek modelů OKE	18
2.2.5 Soubor materiálů MTR	19
2.2.6 Soubor formátu sítě MSH	22
2.2.7 Soubor okrajových podmínek simplexových elementů BCD	24
2.3 Geologický popis zpracovávaných dat	26
3 Tvorba programu	28
3.1 Databáze	28
3.2 Načtení dat	28
3.2.1 Datový typ T3D	29
3.2.2 Datový typ Trojuhelniky	29
3.3 Vykreslení sítě	30
3.3.1 Vykreslení řezů multielementů při rozdělování na simplexy	31
3.3.2 Vykreslení hranice celé oblasti	31
3.4 Navolení propustností hornin	31
3.5 Rozdělení sítě na multielementy	32
3.6 Rozdělení multielementů na simplexy	34
3.6.1 Zjišťování řezů stěn v multielementech	34
3.6.2 Přiřazení bodů simplexů v šestistěnu podle řezů stěn	34
3.6.3 Generování simplexových elementů do souboru	37
3.7 Vykreslení sítě jen z načtených bodů	38
4 Vzhled a ovládání programu uživatelem	41
4.1 Posloupnost vykonávání funkcí v programu uživatelem	41

4.1.1 Načtení pouze souboru uzlů	41
4.1.2 Načtení souborů	42
4.1.3 Navolení propustností hornin před zpracováním dat	42
4.1.3 Další údaje, které je nutné nastavit	43
4.1.4 Generování souborů uživatelem	43
4.1.5 Vykreslování zpracovávaných dat	43
4.2 Vzhled aplikace	44
Závěr	45
Použitá literatura	46

Slovník termínů

System GIS: Počítačový systém připravující geologická data ke zpracování

GENFLOW: Program pro modelování podzemních procesů

STE: Soubor definic multielementů sítě

STU: Soubor definic uzlů sítě

STM: Soubor hodnot materiálových koeficientů

OKE: Soubor hodnot a číslování okrajových podmínek modelů

FLOW123D: Program pro modelování podzemních procesů

MSH: Soubor formátu sítě

BCD: Soubor okrajových podmínek simplexových elementů

MTR: Soubor materiálů

FEM (Finite Element Method): Metoda konečných prvků

Delphi 7 : Komerční program, vývojové prostředí v jazyce Pascal

Multielementy: Rozdělená povrchová oblast 2D elementu do vrstev

Prizmatický element: Trojboký hranol se skloněnými podstavami

Simplexy: Rozdělená 3D síť oblasti na elementy

Soubor uzlů: Vstupní data generovaná systémem GIS. Uzly zadané oblasti.

Soubor trojúhelníkových elementů: Vstupní data generovaná systémem GIS.

Úvod

Na katedře modelování jsou již dlouhodobě vyvíjeny programy pro modelování podzemních procesů. Mezi nejvíce zkoumané procesy na katedře patří proudění podzemních vod, transport kontaminantů apod.

Pro simulace podzemního proudění byly vyvinuty především dva programy a to program GENFLOW a program FLOW123D. Tyto programy jsou založené na metodě konečných prvků. Pro použití této metody je třeba modelovanou oblast rozložit na síť elementů.

Příslušné programy jsou testovány obvykle na jednoduchých sítích s několika elementy. Výsledky simulací na těchto sítích slouží k ověření funkčnosti.

Oba simulované programy (GENFLOW a FLOW123D) se liší především použitými sítěmi a formátem vstupních souborů. GENFLOW používá síť prizmatických elementů, Flow123D pracuje se sítěmi složenými ze simplexových, trojúhelníkových a liniových elementů.

V případě, že chceme vytvořit model skutečné oblasti je třeba vycházet z reálných dat. Tato data obsahuje systém GIS (Geografický informační systém). Exportováním dat ze systému GIS je možné vytvořit povrchovou síť obsahující geologické, hydrogeologické a další informace o zadané oblasti.

Cílem práce bylo na základě povrchové sítě konkrétní oblasti generovaného systémem GIS vytvořit síť trojrozměrných elementů a ostatní vstupní soubory tak, aby je bylo možno využít pro modelování podzemního proudění v dané oblasti pomocí programů GENFLOW a FLOW123D vyvíjených na katedře modelování procesů.

K dispozici byla jednak síť 2D elementů oblasti „Potůčky-Podlesí“ a jednak dva řezy (navzájem kolmé) zobrazující představu geologů o rozložení jednotlivých hornin.

Vlastní text práce je rozdělen do čtyř základních kapitol. První kapitola se vztahuje k popisu modelování podzemního proudění, které se provádí pomocí programů GENFLOW a FLOW123D.

Druhá kapitola popisuje strukturu souborů bodů a trojúhelníkových elementů generovaných systémem GIS, popisujících povrchovou síť oblasti. Tyto soubory jsou vstupními soubory programu „Generátor souboru 3D sítí“. Program ze zdrojů dat v souborech generuje soubory elementů, uzlů, okrajových podmínek a materiálových vlastností, které popisují vlastní model 3D sítě zadané oblasti sloužících, jako vstupní

soubory programů GENFLOW a FLOW123D. Formáty stupních souborů programu GENFLOW a FLOW123D jsou blíže popsány ve druhé kapitole.

Třetí kapitola popisuje tvorbu programu „Generátor souboru 3D sítí“, který je rozdělen do několika částí. Program umožňuje načítání souborů generovaných systémem GIS, vykreslování 2D sítě načtené oblasti, generování 3D sítě z načtené povrchové sítě. Dále tento program umožňuje pomocí načtené 2D sítě, nastavením parametrů 3D sítě, nastavení materiálových vlastností a okrajových podmínek generovat vstupní soubory programů GENFLOW a FLOW123D. Poslední kapitola je věnována popisu ovládání programu „Generátor souboru 3D sítí“.

1. Modelování podzemního proudění

Na katedře modelování jsou již dlouhodobě vyvíjeny programy pro modelování podzemních procesů. Mezi modelování podzemních procesů patří modelování podzemního proudění. Modelování podzemního proudění 3D sítě modelu oblasti je prováděno pomocí programů GENFLOW a FLOW123D vyvíjených na katedře modelování.

Cílem této práce je připravit vstupní data pro programy GENFLOW a FLOW123D. Tyto programy jsou založeny na metodě konečných prvků.

Při použití metody konečných prvků uvažujeme náhradu spojitého prostoru soustavou izolovaných bodů. Propojováním bodů nebo-li uzlů se vytvářejí hrany, které jsou základem plošných elementů, tvořících stěny prostorových elementů. Elementy jsou základním prvkem 3D sítě. Uzly tvoří vrcholy elementů.

Při výpočtu modelu dochází k náhradě diferenciální rovnice soustavou lineárních rovnic. Počet neznámých v této soustavě je dán počtem elementů. Každý z prostorových elementů si nese informace o svých materiálových vlastnostech a typu materiálu. Pro hranici sítě je nutné určit okrajové podmínky.

1.1 GENFLOW – práce se sítí prizmatických elementů

Simulační program GENFLOW pracuje se sítí prizmatických elementů. Prizmatický element nebo-li trojboký hranol se skloněnými podstavami tvoří uzavřenou prostorovou síť. Základem této sítě je síť multiuzlů tvořících vrcholy prizmatických elementů. Multiuzel je sada uzlů se stejnými x-ovými a y-ovými souřadnicemi, lišící se pouze hodnotou z-ové souřadnice. Sada prizmatických elementů tvořená vrcholy spadajícími do stejných multiuzlů se nazývá multielement.

Multielementy jsou definovány pomocí jejich multiuzlů. Multielementy obsahují informace o fyzikálních vlastnostech elementů, jako jsou materiálové vlastnosti, přítomnost vody a další.

Mezi důležité informace potřebné k řešení úlohy modelování podzemních procesů patří zadávání okrajových podmínek oblasti. Okrajové podmínky jsou řešeny na krajních stěnách elementů hranice trojrozměrné sítě. Řeší se zde Dirichletova a Newmanova okrajová podmínka.

Potřebná data pro vstup programu GENFLOW jsou dodávána sadou souborů. Tato sada souborů se skládá ze souboru definic sítě multielementů *STE*, souboru

definice uzlů sítě *STU*, souboru materiálových koeficientů sítě *MTR* a ze souboru definic okrajových podmínek sítě *OKE*.

1.2 Program FLOW123D

FLOW123D je program založený na použití kombinovaných sítí složených z 3D, 2D a 1D elementů. Konkrétně je složen ze simplexů, trojúhelníků a liniových elementů. 3D simplexové elementy jsou zastoupeny v této práci čtyřstěny, obecně mohou být zastoupeny i dalšími geometrickými útvary, jako jsou například hranol, jehlan a další. 2D elementy tvoří spojnice mezi simplexovými elementy v síti. V této práci jsou zastoupeny trojúhelníky, přesto v některých případech bývají zastoupeny čtyřúhelníky nebo jinými plošnými obrazci v závislosti na tvaru stěn simplexových elementů. 1D Liniové elementy tvořené hranami stěn simplexových elementů, tvoří spojnice dotýkajících se 2D elementů 3D sítě oblasti tvořené simplexovými elementy.

Úlohy modelování podzemních procesů jsou řešeny pomocí programu FLOW123D. Vstupní data programu FLOW123D jsou zadávány pomocí sady souborů. Sadu vstupních souborů programu FLOW123D tvoří soubor definice geometrie sítě *MSH* tvořené simplexovými elementy a jejich vrcholy tedy uzly, soubor obsahující materiálové vlastnosti hornin pro různé hloubky *MTR* a soubor definic okrajových podmínek *BCD*, soubor sousedství *NGH* a soubor definice úlohy *INI*.

2 Popis souborů

Mezi hlavní soubory potřebné pro generování 3D sítí multielementů a simplexových elementů patří datové soubory generované systémem GIS (Geografický informační systém). Jedná se o soubory dvou typů. První z nich obsahuje informace o uzlech elementů. Druhý soubor obsahuje informace o trojúhelníkových elementech.

Dále jsou z dat těchto souborů pomocí programu „Generátor souborů 3D sítí“ generovány soubory. Jako zdroje dat programu GENFLOW slouží sada souborů generována počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“. Mezi soubory generované sady patří, soubor multielementů, souboru uzlů, soubor materiálových vlastností a soubor okrajových podmínek. FLOW123D využívá, jako svá vstupní data podobně jako program GENFLOW sadu souborů, generovanou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“ s odlišnou stavbou sítě, s jinými druhy souborů. Mezi vstupní soubory programu FLOW123D patří soubor definující síť simplexových elementů a uzlů, soubor materiálových vlastností a soubor okrajových podmínek. Program FLOW123D používá další vstupní soubory, které ovšem z pohledu bakalářské práce nejsou důležité a proto nejsou blíže uvedeny.

2.1 Soubory generované systémem GIS

Soubory generované systémem GIS potřebné pro generování 3D sítí multielementů a simplexových elementů, jsou soubory bodů a trojúhelníkových elementů. Tyto soubory jsou přiloženy k zadání bakalářské práce s názvem *Body.dbf* a *Elem.dbf* obsahující 2D síť povrchu a další data vztahující se k oblasti „Potůčky-Podlesí“.

2.1.1 Soubor bodů sítě

Soubor bodů sítě generovaný systémem GIS je databázového typu a obsahuje informace o všech uzlech tvořících síť. Každý řádek v databázi nese informaci o jednom uzlu. Data v řádcích jsou rozdělena do sloupců, které mají svůj název a pořadí. Názvy sloupců v souboru mají následující strukturu *SDEDATA_SD*, *SDEDATA_2*, *ZLOM*, *VRT_ID*, *C_BODU*, *X*, *Y*, *Z*. *C_BODU* je číslo bodu, které zpravidla odpovídá i pořadí bodu v souboru a se nesmí v souboru opakovat. Dále soubor obsahuje prostorové souřadnice bodu *X*, *Y*, *Z*, kde *z-ová* souřadnice odpovídá nadmořské výšce terénu. V souboru je každému bodu přiděleno číslo *SDEDATA_2*, které vyznačuje přítomnost

vodního toku číslem od 0 do 99, pokud je vodní tok nenulový vyskytuje se v takto označeném uzlu řeka, potok nebo jiný zdroj vodního toku. Vodní tok je označen ve sloupci *SDEDATA_SD* popisem „řeka, potok“.

VRT_ID slouží jako označení bodu, v kterém se nachází vrt P01 až vrt P15. Dalším údajem je *ZLOM*, označující zlom oblasti. V počítačové aplikaci jsou využity sloupce s označením *C_BODU*, souřadnice bodu *X*, *Y*, *Z* a *SDEDATA_2* a sloupec s označením *SDEDATA_SD*. Soubor bodů sítě je databázového typu s koncovkou **.dbf*. Pro příklad je přiložen k počítačové aplikaci soubor *Body.dbf*. V případě vlastního načítání souborů, musí mít tyto soubory shodné označení sloupců, jejich počet a data musí odpovídat zadanému formátu dat ve sloupcích.

2.1.2 Soubor trojúhelníkových elementů

Soubor trojúhelníkových elementů je soubor generovaný systémem GIS databázového typu a obsahuje informace o trojúhelníkových elementech. Každý řádek v databázi nese informaci o jednom trojúhelníkovém elementu. Data v řádcích jsou rozdělena do sloupců, které mají svůj název a pořadí. Názvy sloupců v souboru mají následující strukturu *SLOPE_PCT*, *ASPECT*, *INDEX*, *FID_2*, *GEOL_HAVIR*, *GEOL_POPIS*, *COUNT*, *BOD0*, *BOD1*, *BOD2*.

Počet vrcholů trojúhelníkového elementu nebo jiného geometrického obrazce, určuje sloupec *COUNT*. V souboru trojúhelníkových elementů nesmí být zadáno číslo bodu vrcholu elementu *BOD0*, *BOD1* nebo *BOD2*, které se nevyskytuje v souboru uzlů.

Další položkou určující trojúhelníkové elementy je *INDEX*. *INDEX* určuje číslo elementu v souboru, toto číslo elementu se nesmí opakovat, protože slouží jako klíčový výraz. Soubor dále obsahuje údaje o sklonu trojúhelníku na povrchu *SLOPE_PCT* a orientaci ke světovým stranám *ASPECT*. Tyto dvě hodnoty nejsou důležité v zadávání souboru pro počítačovou aplikaci „Generátor souborů 3D sítí“.

Posledními položkami jsou informace o typu materiálové vrstvy horniny v daném trojúhelníkovém elementu. *GEOL_POPIS* udává název horniny a *GEOL_HAVIR* a *FID_2* jsou jejími číselnými identifikátory.

Soubor trojúhelníkových elementů je databázového typu s koncovkou **.dbf*. Pro příklad je přiložen k počítačové aplikaci soubor *Elem.dbf*. V případě vlastního načítání souborů, musí mít tyto soubory shodné označení sloupců, jejich počet a data musí odpovídat zadanému formátu dat ve sloupcích.

2.2 Vstupní soubory programu GENFLOW

Program GENFLOW se používá pro výpočet podzemního proudění. Pro výpočet je třeba sady vstupních souborů. Tato sada je generována počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“. Výstup aplikace je tvořen sadou souborů, mezi něž patří soubor s koncovkou *STE*, tvořeným seznamem všech multielementů 3D sítě v zadané oblasti. Do sady souborů generovaných pro program GENFLOW dále patří soubor definic uzlů sítě s koncovkou *STU*, obsahující seznam informací o multiuzlech obsažených v 3D síti zadané oblasti. Dále soubor hodnot materiálových koeficientů *STM* obsahující materiálové vlastnosti pro každou vrstvu multielementu 3D sítě v zadané oblasti. Posledním souborem ze sady souborů je soubor typů a číslování okrajových podmínek modelů s koncovkou *OKE*. Soubor okrajových podmínek obsahuje všechny okrajové podmínky 3D sítě v zadané oblasti.

2.2.1 Soubor definic multielementů sítě STE

Soubor definic multielementů s koncovkou *STU* patří do sady souborů generovaných počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“ sloužících, jako vstupní data pro program GENFLOW. Soubor *STE* obsahuje seznam multielementů 3D sítě v zadané oblasti a příslušná data k těmto elementům. V každém z řádků jsou informace o jednom multielementu. V souboru není důležité pořadí číslování jednotlivých multielementů, proto může být soubor libovolně tříděn. Pro identifikaci multielementu je podstatné pouze jeho označení. V souboru nesmí být dva multielementy se stejným označením.

První řádek souboru slouží, jako identifikace nesoucí označení *GWS_SIT_ELM*. Dále jsou obsaženy řádky popisující multielementy. Jednotlivá data v řádcích jsou oddělena mezerami.

Struktura řádků souboru *STE*, popisujících multielementy

<i>uzel0</i>	<i>uzel1</i>	<i>uzel2</i>	<i>idolní</i>	<i>ihorní</i>	<i>koef0</i>	<i>koef1</i>
--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	--------------	--------------

OZNAC je číselné označení multielementu. Označení multielementu, může být libovolné celé kladné číslo, které se nesmí opakovat. *Uzel0*, *uzel1*, *uzel2* je označení multiuzlů elementu. *Idolní*, *ihorní* jsou čísla krajních vrstev multielementu. *Koef0* a *koef1* jsou koeficienty příslušného multielementu udávající číselný typ materiálu, který

je roven načteným hodnotám ze souboru trojúhelníkových elementů sloupců *GEOL_HAVIR* a *FID_2*.

Příklad souboru STE

```
GWS_SIT_ELM
0 1 15 16 0 2 2 0
1 1 16 5 0 2 2 0
2 5 16 17 0 2 2 0
3 5 17 6 0 2 2 0
4 6 17 18 0 2 2 0
5 6 18 7 0 2 2 0
6 7 18 19 0 2 2 0
7 7 19 8 0 2 5 9
22 15 27 28 0 2 5 9
```

2.2.2 Soubor definic uzlů sítě STU

Soubor definic uzlů s koncovkou *STU* patří do sady souborů generovaných počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“ sloužících, jako vstupní data pro program GENFLOW. Soubor *STU* obsahuje seznam informací o multiuzlech obsažených v 3D síti zadané oblasti. V každém z řádků jsou informace o jednom z multiuzlů. V souboru není důležité pořadí číslování jednotlivých multiuzlů, proto může být soubor libovolně tříděn. Pro identifikaci uzlu je podstatné pouze jeho označení. V souboru nesmí být dva uzly se stejným označením.

První řádek souboru slouží, jako identifikace nesoucí označení *GWS_SIT_UZL*. Dále jsou obsaženy řádky popisující multiuzly. Čísla multiuzlů musí být totožná s čísly uzlů uvedených v souboru definic multielementů s označením *STU*. Jednotlivá data v řádcích jsou oddělena mezerami.

Struktura řádků v souboru *STU*, popisujících multiuzly

OZNAC	X	Y	povrch	idolní	ihorní	vysky
-------	---	---	--------	--------	--------	-------

OZNAC je číselné označení multiuzlu. Označení multiuzlu je libovolné celé kladné číslo, které se nesmí opakovat. *X*, *Y* značí souřadnice uzlu. *Povrch* je nadmořská výška terénu povrchového uzlu. *Idolní* a *ihorní* jsou čísla krajních vrstev multiuzlu. *Vysky* tvoří seznam výšek multiuzlu. Výšky jsou v souboru uvedeny od spodní výšky, až k výšce povrchového uzlu. Hodnoty výšek nesmí klesat a musí odpovídat počtu uzlů v multiuzlu.

Příklad souboru STU

GWS_SIT_UZL

```
1 0 0 220 0 3 150 180 200 220
5 0 181,818 220 0 3 150 180 200 220
6 0 363,636 220 0 3 150 180 200 220
7 0 545,455 240 0 3 150 190 220 240
8 0 727,273 240 0 3 150 190 220 240
15 181,818 0 220 0 3 150 180 200 220
```

2.2.3 Soubor hodnot materiálových koeficientů STM

Soubor hodnot materiálových koeficientů *STM* patří do sady souborů generovaných počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“ sloužících, jako vstupní data pro program GENFLOW. Soubor *STM* obsahuje seznam elementů, které mají definován typ horniny, materiálové vlastnosti a další koeficienty modelovaného prostředí obsažených v 3D síti zadané oblasti. V každém z řádků jsou informace o jednom z elementů. V souboru je důležité, aby označení multielementu odpovídalo číslu multielementu obsaženého v souboru s označením *STE*. Vrstvy multielementů jsou číslovány zdola od nuly. Soubor může být libovolně tříděn.

První řádek souboru slouží, jako identifikace nesoucí označení *GWS_SIT_MAT*. Dále jsou obsaženy řádky popisující materiálové typy a vlastnosti elementů 3D sítě v zadané oblasti. Jednotlivá data v řádcích jsou oddělena mezerami.

Struktura řádků v souboru *STM*, popisujících materiálové vlastnosti elementů

OZNAC	cislo_vrstvy	cislo_mat	k _x	k _y	k _z	n _a	n	#mat_fb
-------	--------------	-----------	----------------	----------------	----------------	----------------	---	---------

OZNAC je celé kladné číslo označující číslo multielementu totožné s označením multielementu v souboru *STE*. *Cislo_vrstvy* je číslo vrstvy multielementu, pro kterou jsou zadávány údaje o číslu materiálu *cislo_mat*, které odpovídá číslu materiálu ve sloupci *GEOL_HAVIR* v souboru trojúhelníkových elementů generovaném systémem GIS. Koeficienty *k_x*, *k_y* a *k_z* obsahují propustnost v x-ových, y-ových a z-ových souřadnicích. Porozita je rozdělena na aktivní *n_a* a na celkovou *n*. *#mat_fb* uvádí číslo materiálu pro volnou hladinu.

Příklad souboru STM

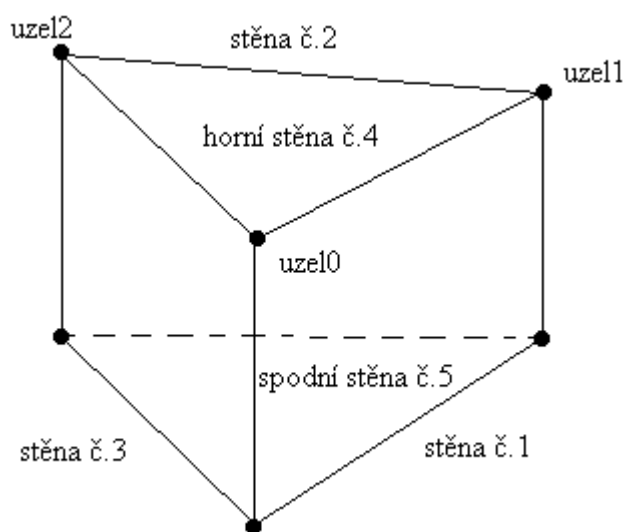
GWS_SIT_MAT

0	0	0	4	4	0,4	0,2	0,3	1
0	1	1	0,4	0,4	0,04	0,05	0,1	1
1	0	0	4	4	0,4	0,2	0,3	1
1	1	1	0,4	0,4	0,04	0,05	0,1	1
2	0	0	4	4	0,4	0,2	0,3	1
2	1	1	0,4	0,4	0,04	0,05	0,1	1
3	0	0	4	4	0,4	0,2	0,3	1
3	1	1	0,4	0,4	0,04	0,05	0,1	1
4	0	0	4	4	0,4	0,2	0,3	1
4	1	1	0,4	0,4	0,04	0,05	0,1	1

2.2.4 Soubor typů a číslování okrajových podmínek modelů OKE

Soubor typů a číslování okrajových podmínek modelů *OKE* patří do sady souborů generovaných počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“ sloužících, jako vstupní data pro program GENFLOW. Soubor *OKE* obsahuje seznam okrajových podmínek krajních stěn 3D sítě zadané oblasti. V každém z řádků je vypsána okrajová podmínka vztažená k vnější stěně okrajového prizmatického elementu. Každý prizmatický element je určen multielementem a vrstvou, ve které leží. V souboru je důležité, aby označení multielementu odpovídalo číslu multielementu obsaženého v souboru s označením *STE*, také počet vrstev multielementu musí odpovídat. Vrstvy multielementů jsou číslovány zdola od nuly.

Stěny trojbokých hranolů se skloněnými podstavami nebo-li prizmatických elementů jsou číslovány, tak jak je uvedeno na obrázku 1.



Obrázek 1 – Číslování stěn prizmatických elementů.

Spodní stěna je označena číslem 5, vrchní stěna číslem 4. Boční stěny jsou označeny podle pořadí uzlů uvedených v souboru *STE* pro každý z elementů. Boční stěny mezi uzly 0 a 1 jsou označeny číslem 1, boční stěny mezi uzly 1 a 2 jsou označeny číslem 2 a boční stěny mezi uzly 2 a 0 jsou označeny číslem 3.

První řádek souboru slouží, jako identifikace nesoucí označení *GWS_OKP_MIXHYBRID*. Dále jsou obsaženy řádky popisující vlastní okrajové podmínky 3D sítě v zadané oblasti. Jednotlivá data v řádcích jsou oddělena mezerami.

Struktura řádků v souboru *OKE*, popisujících okrajové podmínky 3D sítě

<i>TYP_OKE</i>	<i>VODA</i>	<i>OZNACENI</i>	<i>STENA</i>	<i>IVRST_D</i>	<i>IVRST_H</i>	<i>HODNOTA</i>
----------------	-------------	-----------------	--------------	----------------	----------------	----------------

TYP_OKE odpovídá číselnému označení typu okrajové podmínky, po dohodě s vedoucím bakalářské práce bylo použito Dirichletovy a Neumannovy okrajové podmínky. Dirichletova okrajová podmínka má *TYP_OKE* roven 9991. Neumannova okrajová podmínka má *TYP_OKE* roven 9992. *VODA* označuje výskyt vody na povrchu, pokud je rovna nule, nevyskytuje se na povrchu žádná voda. *OZNACENI* je označení čísla multielementu, které je popsáno v souboru *STE*. *STENA* udává číslo krajní stěny elementu. *IVRST_D* a *IVRST_H* jsou čísla dolní a horní vrstvy multielementu. *HODNOTA* je hodnota Dirichletovy nebo Neumannovy okrajové podmínky. Dirichletova okrajová podmínka se uvádí jako piezometrický tlak v metrech. Neumannovy okrajová podmínka uvádí tok (průsak) stěnou ve směru normály.

Příklad souboru *OKE*

GWS_OKP_MIXHYBRID

```

9992 1 0 4 1 2 -100
9992 1 0 5 0 1 0
9991 1 0 2 1 2 593,864
9992 1 0 2 0 1 0
9992 0 1 4 1 2 -100
9992 0 1 5 0 1 0
9992 0 2 4 1 2 -100
9992 0 2 5 0 1 0

```

2.3 Vstupní soubory programu FLOW123D

Program FLOW123D se používá pro výpočet proudění a transportu. Pro výpočet proudění je nutné připravit sadu vstupních souborů. Tato sada je generována počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“. Sada souborů je tvořena souborem koncovkou *MSH*, který obsahuje popis geometrie sítě v zadané oblasti. Do sady souborů generovaných pro program FLOW123D dále patří soubor materiálových vlastností modelovaného prostředí s koncovkou *MTR*. Posledním souborem ze sady souborů je soubor okrajových podmínek modelů s koncovkou *BCD*. Soubor okrajových podmínek obsahuje všechny okrajové podmínky 3D sítě v zadané oblasti.

Program FLOW123D využívá jako svá vstupní data další dva soubory ze sady vstupních souborů. Soubor sousedství *NGH* a soubor definice úlohy *INI*, tyto soubory nejsou z pohledu řešení této bakalářské práce důležité, proto nejsou podrobněji zmíněny.

2.3.1 Soubor s popisem geometrie sítě MSH

Soubor s popisem geometrie sítě *MSH* popisuje geometrii 3D sítě oblasti generovanou počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“ sloužící, jako vstup programu FLOW123D modelující podzemní procesy, jako je transport a proudění kapalin.

Soubor geometrie sítě *MSH* se skládá ze třech částí. První část souboru označená, jako formát sítě začíná na řádku označeném *\$MeshFormat* a končí na řádku označeném *\$EndMeshFormat*. Mezi těmito dvěma řádky je umístěn řádek obsahující informace o formátu dat souboru. Druhá část souboru označená, jako uzly, do které jsou zapsány všechny uzly sítě se svými souřadnicemi začíná na řádku s označením *\$Nodes* a končí na řádku *\$EndNodes*. Poslední část souboru nazývaná elementy začíná na řádku s označením *\$Elements* a končí na řádku označeném *\$EndElements*.

Struktura řádků v souboru MSH

\$MeshFormat

2.0 typ_souboru velikost_dat

\$EndMeshFormat

\$Nodes

počet_uzlů

```

číslo_uzlu x-ová_souřadnice y-ová_souřadnice z-ová_souřadnice
...
$EndNodes
$Elements
počet_elementů
číslo_elementu typ_elementu počet_tagů <pole_tagů> <pole_uzlů>
...
$EndElements

```

První část souboru označená, jako formát sítě obsahuje řádek s informací o verzi programu GMSH (2.0), o typu formátu dat v souboru (0 pro ASCII formát dat) a o velikosti dat celočíselných proměnných v bytech.

Druhá část souboru označená, jako uzly obsahuje řádek, který udává počet uzlů obsažených v této části souboru, následující řádky obsahující seznam těchto uzlů. Na každém z řádků jsou informace o jednom uzlu. Řádky obsahují číslo uzlu, které nesmí být stejné s jiným číslem uzlu v souboru. Dále následují x-ová, y-ová, z-ová souřadnice uzlu, kde z-ová souřadnice značí nadmořskou výšku v uzlu.

V poslední části souboru nazvané elementy, je vypsán pro každý řádek jeden simplexový element. První řádek udává počet simplexových elementů obsažených v této části souboru. Každý ze simplexových elementů je označen číslem, které se nesmí opakovat. Typ elementu značí číslo geometrického tvaru, podle níže uvedeného přiřazení čísla v tabulce 1. V této práci se pracuje se simplexy, které mají tvar čtyřstěnu.

Typ elementu	Geometrický tvar	Počet uzlů
1	Hrana	2
2	Trojúhelník	3
3	Čtyřúhelník	4
4	Čtyřstěn	4
5	Šestistěn	8
6	Pětistěn	6
7	Jehlan	5
15	Bod	1

Tabulka 1 – Přiřazení čísla geometrickému tvaru

Počet tagů udává počet tagů elementu v jednom řádku. Program FLOW123D vyžaduje tagy tři. První tag udává materiál, z kterého se element skládá, tento tag odpovídá číslu materiálu obsaženého v souboru materiálových vlastností *MTR*. Druhý tag je číslo vrstvy, ve které element leží (číslované odspodu). Třetí tag je číslo multielementu podle indexu s jakým je uložen v souboru trojúhelníkových elementů. Pole uzlů je pole čísel uzlů, které tvoří vrcholy simplexových elementů. Tyto čísla uzlů musí souhlasit s čísli uzlů generovanými v druhé části uzlů souboru.

2.3.2 Soubor materiálových vlastností modelovaného prostředí *MTR*

Soubor materiálových vlastností modelovaného prostředí *MTR* popisuje materiálové vlastnosti, do nichž patří propustnost materiálu. Soubor *MTR* obsahuje všechny materiálové vlastnosti obsažené v 3D síti oblasti generovanou počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“ sloužící, jako vstup programu FLOW123D.

Soubor *MTR* se skládá ze dvou částí. První část pojmenovaná formát materiálu je zapsána do části souboru začínající řádkem *\$MaterialFormat* a končící na řádku *\$EndMaterialFormat*. Mezi těmito dvěma řádky je umístěn řádek obsahující informace o formátu dat souboru.

Druhá část souboru označená, jako materiály začíná na řádku souboru označeném *\$Materials* a končí na řádku označeném *\$EndMaterials*. Tato část souboru se skládá z informací o jednotlivých materiálových vlastnostech pro různé typy materiálů vyskytujících se v 3D síti modelu. Více informací na jednom řádku je odděleno mezerami. Čísla materiálů musí odpovídat číslům materiálů simplexových elementů obsažených v souboru *MSH*.

Struktura řádků v souboru *MTR*

\$MaterialFormat

1.0 *typ_souboru velikost_dat*

\$EndMaterialFormat

\$Materials

počet_materiálů

číslo_materiálu typ propustx propusty propustz [popis]

...

\$EndMaterials

První část souboru označená, jako formát materiálu obsahuje řádek s informací o verzi souboru *MTR* (1.0), o typu formátu dat v souboru (0 pro ASCII formát dat) a o velikosti dat s plovoucí řadovou čárkou proměnných v bytech.

Druhá část souboru označená, jako materiály obsahuje údaj o počtu materiálových vlastností obsažených v souboru, dále soubor obsahuje řádky obsahující materiálové vlastnosti. Na každém z řádků je uveden typ materiálových vlastností hornin, obsahující číslo, které se nesmí opakovat. Dále následuje *typ* mající hodnotu 33 podle tabulky uvedené v dokumentaci programu FLOW123D (interní materiály katedry KMO). Číslo *typ* určuje jaké koeficienty budou použity pro určení materiálových vlastností. V případě, že *typ* je roven 33, je zapotřebí třech koeficientů propustností *propustx*, *propusty*, *propustz* v x-ovém, y-ovém a v z-ovém směru. Jako poslední je umístěn do řádků volný popis, který je vyplněn informacemi o hloubkách a typu materiálu hornin.

2.3.3 Soubor okrajových podmínek simplexových elementů BCD

Soubor okrajových podmínek simplexových elementů *BCD* popisuje okrajové podmínky 3D sítě oblasti generovanou počítačovou aplikací „Generátor souborů 3D sítí“ sloužící, jako vstup programu FLOW123D.

Soubor *BCD* se skládá ze dvou částí. První část pojmenovaná formát okraje je zapsána do části souboru začínající řádkem \$BoundaryFormat a končící na řádku \$EndBoundaryFormat. Mezi těmito dvěma řádky je umístěn řádek obsahující informace o formátu dat souboru. Druhá část souboru označená, jako okrajové podmínky začíná na řádku souboru s označením \$BoundaryConditions a končí na řádku označeném \$EndBoundaryConditions. Tato část souboru se skládá z informací o jednotlivých okrajových podmínkách 3D sítě zadané oblasti. Více informací na jednom řádku je odděleno mezerami. Číslo okrajové podmínky se nesmí opakovat. Soubor může být libovolně tříděn.

Struktura řádků souboru BCD

\$BoundaryFormat

1.0 *typ_souboru velikost_dat*

\$EndBoundaryFormat

\$BoundaryConditions

počet_okrajových_podmínek

číslo_podmínky typ hodnota přístup číslo_elm číslo_stěny počet_tagů
<pole_tagů> [popis]
 ...
 \$EndBoundaryConditions

První část souboru označená, jako formát okraje obsahuje řádek s informací o verzi souboru *BCD* (1.0), o typu formátu dat v souboru (0 pro ASCII formát dat) a o velikosti dat s plovoucí řadovou čárkou proměnných v bytech.

Druhá část souboru označená, jako okrajové podmínky obsahující řádek udávající počet okrajových podmínek obsažených v souboru. Další řádky obsahují okrajové podmínky 3D síť modelované oblasti. Číslo podmínky je pro každou okrajovou podmínku jedinečné. Číselný typ odpovídá hodnotám uvedených v tabulce 2 pro různé typy okrajových podmínek.

<i>Typ</i>	<i>Okrajová podmínka</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Popis hodnot okrajové podmínky</i>
1	Dirichletova	<i>skalár</i>	hodnota tlaku vodního sloupce v metrech
2	Neumannova	<i>tok</i>	tok okrajem - průsak horninou elementu
3	Newtonova	<i>skalár, sigma</i>	skalární hodnota a σ koeficient

Tabulka 2 – Typy okrajových podmínek a jejich hodnoty

Definování přístupu k okrajové podmínce může mít několik podob uvedených v dokumentaci programu FLOW123D (interní materiály katedry KMO). V této bakalářské práci se pracuje s typem přístupu s označením 2. Přístup s číslem 2 ukazuje na element a stěnu patřícího do souboru *MSH*. Číslo stěny u simplexových elementů (čtyřstěnů) je dáno pořadovým číslem protějších vrcholů (uzlů) pole uzlů elementu v souboru *MSH* (stěny jsou číslovány od 0 do 3). Počet tagů uvádí velikost pole tagů, v této práci je pole tagů rovno nule. Tagy mohou definovat skupinu okrajových podmínek, například typ vody atd. Popis je libovolný text, obsahující volitelné údaje.

2.4 Geologická data

Systém GIS (geografický informační systém) umožňuje na základě DMR (digitálního modelu reliéfu) vytvořit povrchovou síť zadané oblasti. K jednotlivým bodům respektive elementům lze potom přiřadit další údaje, které jsou v GIS pro

příslušnou oblast obsaženy. Konkrétní podoba povrchové sítě může být výrazně závislá na vybrané oblasti.

Pro realizaci zadání bakalářské práce byly k dispozici:

- 2D síť povrchu oblasti „Potůčky-Podlesí“ generována systémem GIS
- Výsledky vodních tlakových zkoušek prováděných na vrtech v oblasti „Potůčky-Podlesí“
- Dva navzájem kolmé geologické řezy oblasti „Potůčky-Podlesí“ (viz obrázek 2 této kapitoly)

2D síť povrchu oblasti „Potůčky-Podlesí“ generována systémem GIS je zapsána do dvou souborů formátu *DBF*, do souboru bodů a souboru trojúhelníkových elementů. Struktura těchto souborů je vypsána v kapitole 2.1 *Soubory generované systémem GIS*. Soubory obsahují nejen informace o povrchu 2D sítě oblasti, ale také informace o typech materiálů hornin, o výskytu vodních toků, o zlomu oblasti a o poloze vrtů. Vyskytují se zde tři typy hornin, které jsou obsaženy v souboru trojúhelníkových elementů. Do těchto tří typů patří žuly typu Luhy, žuly typu Podlesk. a fylity. Na obrázku 2 lze vidět, jak jsou tyto typy hornin rozvrstvené v řezu povrchu. Nejvíce je tu zastoupená žula. Fylity se vyskytují ve většině pouze 150 metrů pod povrchem. Dále jsou zde vykresleny vrty a některé vodní toky, tyto informace jsou zapsány i do souboru bodů generovaných systémem GIS.

Výsledky vodních tlakových zkoušek prováděných na vrtech v oblasti „Potůčky-Podlesí“ umístěné v souboru *VTZ_propust*, lze použít jako hodnoty propustností podloží naměřené pro materiál žuly. Vzhledem k tomu, že v příloženém souboru jsou uvedeny hodnoty propustností po šesti metrech a některé tyto hodnoty značně vybočují, bylo zapotřebí některé z těchto hodnot zanedbat a zbytek zprůměrovat pro hodnoty po padesáti metrech. Hodnoty těchto propustností v souboru jsou uvedeny pouze pro žuly. Podle odhadů geologa mají fylity desetkrát větší propustnost vody než žuly a hodnoty propustností povrchové vrstvy jsou přibližně stokrát větší než hodnoty propustností pod ní. Fylity se v oblasti „Potůčky-Podlesí“ vyskytují pouze do hloubky 150m, pod touto hladinou se vyskytují pouze žuly.

Výsledkem jsou tabulky 3, 4 propustností hornin pro různé hladiny pro x-ové, y-ové a z-ové směry. V obecných případech platí, že propustnost v z-ovém směru je daleko menší než propustnost v x-ovém a y-ovém směru.

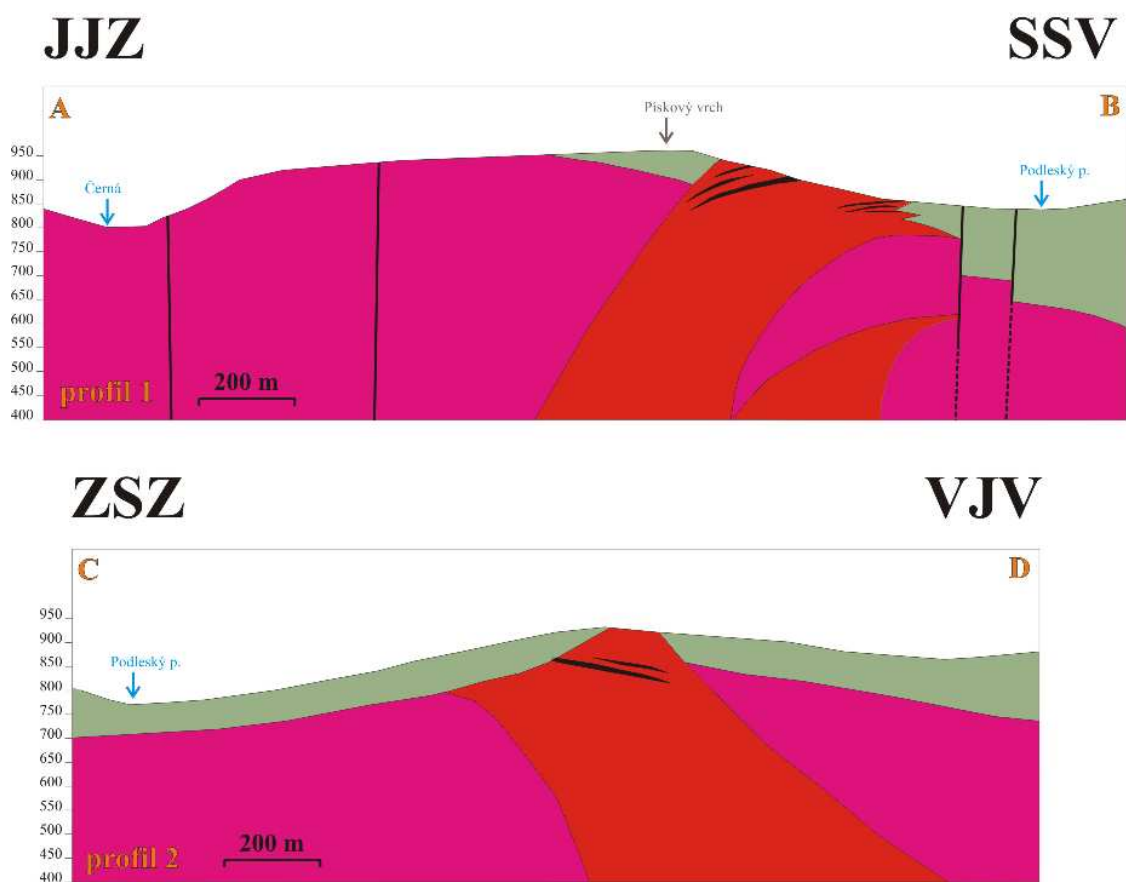
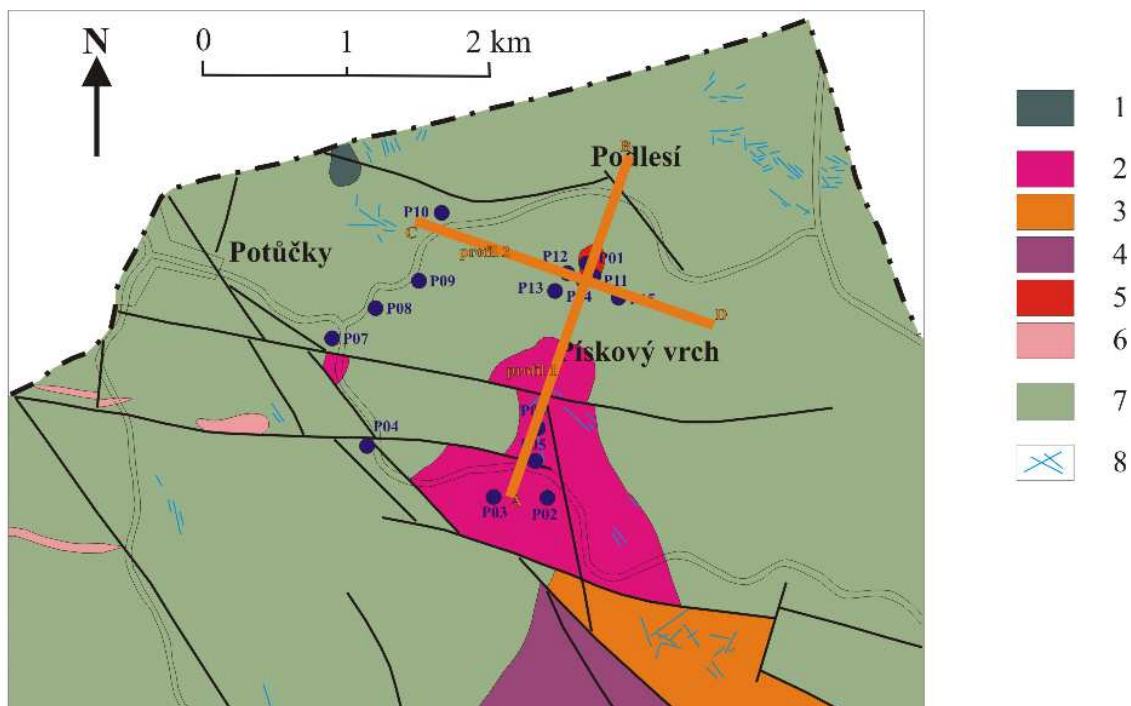
Rozvrstvení do hladin	Propustnost v jednotkách $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$		
	v x-ovém směru	v y-ovém směru	v z-ovém směru
Povrchová vrstva	50000	50000	50000
Hladina do 50m	500	500	500
Hladina do 100m	390	390	390
Hladina do 150m	77	77	77
Hladina do 200m	10	10	10
Hladina do 250m	3	3	3
Hladina do 300m	2	2	2

Tabulka 3 - Propustnosti žuly pro různé hladiny pod povrchem.

Rozvrstvení do hladin	Propustnost v jednotkách $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$		
	v x-ovém směru	v y-ovém směru	v z-ovém směru
Povrchová vrstva	500000	500000	500000
Hladina do 50m	5000	5000	5000
Hladina do 100m	3900	3900	3900
Hladina do 150m	770	770	770

Tabulka 4 - Propustnosti fylitů pro různé hladiny pod povrchem.

Tato tabulky obsahují data, která se pomocí počítačové aplikace „Generátor souborů 3D sítí“ převádí, jako vstupy do souborů *STM* a *MTR* programů GENFLOW a FLOW123D. Nejsou zde uvedeny údaje potřebné ke generování souboru *STM*, který dále obsahuje údaje o aktivní a celkové porositě materiálu a uvádí číslo materiálu pro volnou hladinu, tyto údaje jsou pouze orientační a jsou získány ze zdroje příkladu souboru dokumentace programu GENFLOW (interní materiály katedry KMO).



Obrázek 2 - Dva navzájem kolmé geologické řezy oblasti „Potůčky-Podlesí“.
S číselným označením 2 jsou žuly typu Luhy, 5 žuly typu Podlesk. a 7 jsou fylity.

3 Tvorba programu

V rámci bakalářské práce byl vytvořen počítačový program „Generátor souborů 3D sítí“, který z připravených povrchových dat souborů GIS bude generovat síť trojrozměrných elementů oblasti. Vytvářet soubory elementů, materiálových vlastností a okrajových podmínek vztahujících se k zadané oblasti v závislosti na vstupních požadavcích programů GENFLOW a FLOW123D. Program byl vytvořen ve vývojovém prostředí Delphi 7.

Program „Generátor souborů 3D sítí“ se skládá ze čtyř částí. První částí programu je hlavní okno programu umožňující načítání souborů, generování souborů a vykreslování 2D sítí. Druhá část programu nazvaná „Generování a prohlížení dat v souborech“ umožňuje uživateli zobrazit okno, ve kterém lze načíst soubory, generovat soubory a prohlížet si obsah souborů. Třetí část programu je určena k nastavení materiálových vlastností, okrajových podmínek a parametrů 3D sítě oblasti. Poslední částí programu je nápověda a popis souborů.

3.1 Načtení souborů

Vzhledem k formátu poskytnutých souborů (DBF) bylo pro jejich načtení použito databázových komponent, které nabízí vývojové prostředí Delphi 7. V oblasti načítání souborů se volba databází ukázala jako nejvhodnější způsob.

Pro práci s databázemi byli použity komponenty *Table*, *DataSource*, *DBGrid*, tyto komponenty jsou součástí vývojového prostředí Delphi 7. Načtením databázového souboru do komponenty *Table*, bylo nutné zjistit, jestli načtený soubor odpovídá požadovanému formátu (bodů, trojúhelníkových elementů) souboru. Pokud formát dat v souboru odpovídá požadavkům programu (kapitola 2.1 Soubory generované systémem GIS) je umožněno načítání dat do datových struktur programu. Pro ukládání souboru bodů slouží datový typ T3D a pro ukládání souboru trojúhelníkových elementů slouží datový typ TTrojuhelniky.

Jako vizuální kontrola správnosti načtených dat, je možné v hlavním okně programu vykreslit načtené soubory bodů a trojúhelníkových elementů 2D sítě načtené oblasti.

3.1.1 Datový typ T3D

Pro uchovávání informací o jednotlivých bodech načtené sítě je vytvořen datový typ *T3D*. Jedná se o záznam obsahující následující datové položky:

- C_bodu – číslo bodu
- X – x-ová souřadnice bodu
- Y – y-ová souřadnice bodu
- Z – nadmořská výška bodu
- SDEDATA_SD – popis, informace o vodním toku
- SDEDATA_2 – číselný popis informace o vodním toku
- ZLOM – zlom v bodu
- VRT_ID – název vrtu v bodu

Obsahující další pomocné datové položky:

- Vysky – pole výšek multiuzlů
- X1, Y1 – pomocné x-ové a y-ové souřadnice bodu

Popis načtených datových položek je shodný s označením sloupců databáze. Další datové položky jsou nazývány podle potřeby. Proměnné *X1*, *Y1* slouží k jednoduššímu vykreslování bodů na plátno komponenty *image*. Při výpočtu multiuzlů bylo zapotřebí uložit jejich nadmořské výšky. K tomu účelu slouží pole *Vysky*, které má velikost rovnu počtu vrstev multielementů.

3.1.2 Datový typ TTrojuhelniky

Pro uchovávání informací o jednotlivých trojúhelníkových elementech načtené sítě je vytvořen datový typ *TTrojuhelniky*. Jedná se o záznam obsahující následující datové položky:

- SLOPE_PCT – sklon trojúhelníku
- ASPECT – orientace ke světovým stranám
- INDEX – číslo trojúhelníkového elementu
- FID_2 – typ materiálu
- GEOL_HAVIR - typ materiálu
- GEOL_POPIS – popis typu materiálu
- COUNT – počet bodů elementu
- BOD0, BOD1, BOD2 – čísla bodů vrcholů trojúhelníka

Obsahující další pomocné datové položky:

- Hrana0, Hrana1, Hrana2 – směry řezů stěn příslušných hran
- Hhrana0, Hhrana1, Hhrana2 – označení hraničních hran 2D sítě oblasti
- VyskaT – výška těžiště povrchové vrstvy
- Multielement – pole záznamů sloužící k uchovávání dat o nadmořských výškách, těžištích a materiálových vlastnostech elementů multielementu
- Simplex – pole záznamů sloužících k uchovávání informací o bodech vrcholů simplexových elementů

Popis načtených datových položek je shodný s označením sloupců databáze. Další datové položky jsou nazývány podle potřeby.

Vytvářením multielementů z trojúhelníkových elementů vznikla potřeba dalších proměnných. *VýškaT* udává z-ovou souřadnici těžiště vrchní plochy multielementu, potřebnou k určení hloubky vrstev daného multielementu a k následnému přiřazení příslušných materiálových vlastností, jako je propustnost v dané vrstvě a typ materiálu.

Při vytváření simplexových elementů je potřeba zajistit správné rozdělení simplexových elementů v jednotlivých vrstvách multielementů a návaznost řezů mezi sousedními multielementy. Určením dělení prizmatického elementu (trojboký hranol se skloněnými podstavami) pro jednu vrstvu, je získán obraz dělení v celém multielementu. Ostatní vrstvy multielementu budou rozděleny stejným způsobem. *Hrana0*, *hrana1* a *hrana2* označují směr řezu prizmatickým elementem u jeho krajních stěn.

Do pole *Simplex* se zapisují čtveřice bodů, které tvoří vrcholy čtyřstěnu podle modelu prizmatického elementu. V tomto modelu jsou spodní body ve vrstvě multielementu označeny čísli 0, 1, 2 a vrchní 3, 4, 5. Do pole *simplex* se zapisují pro každý *Ttrojuhelnik* tři simplexové elementy.

3.2 Generování 3D sítě

Na základě načtené povrchové sítě oblasti generované systémem GIS se vytváří pomocí programu „Generátor souborů 3D sítí“ síť trojrozměrných elementů a ostatní vstupní soubory tak, aby je bylo možno využít pro modelování podzemního proudění v dané oblasti pomocí programů GENFLOW a FLOW123D vyvíjených na katedře modelování procesů.

Program „Generátor souborů 3D sítí“ generuje síť prizmatických elementů do souboru definic multielementů sítě *STE* a multiuzly do souboru definic uzlů sítě *STU*. Tyto soubory slouží, jako vstup pro program GENFLOW. Program „Generátor souborů 3D sítí“ generuje také síť uzlů a simplexových elementů do souboru s popisem geometrie sítě *MSH* sloužící, jako vstup pro program FLOW123D.

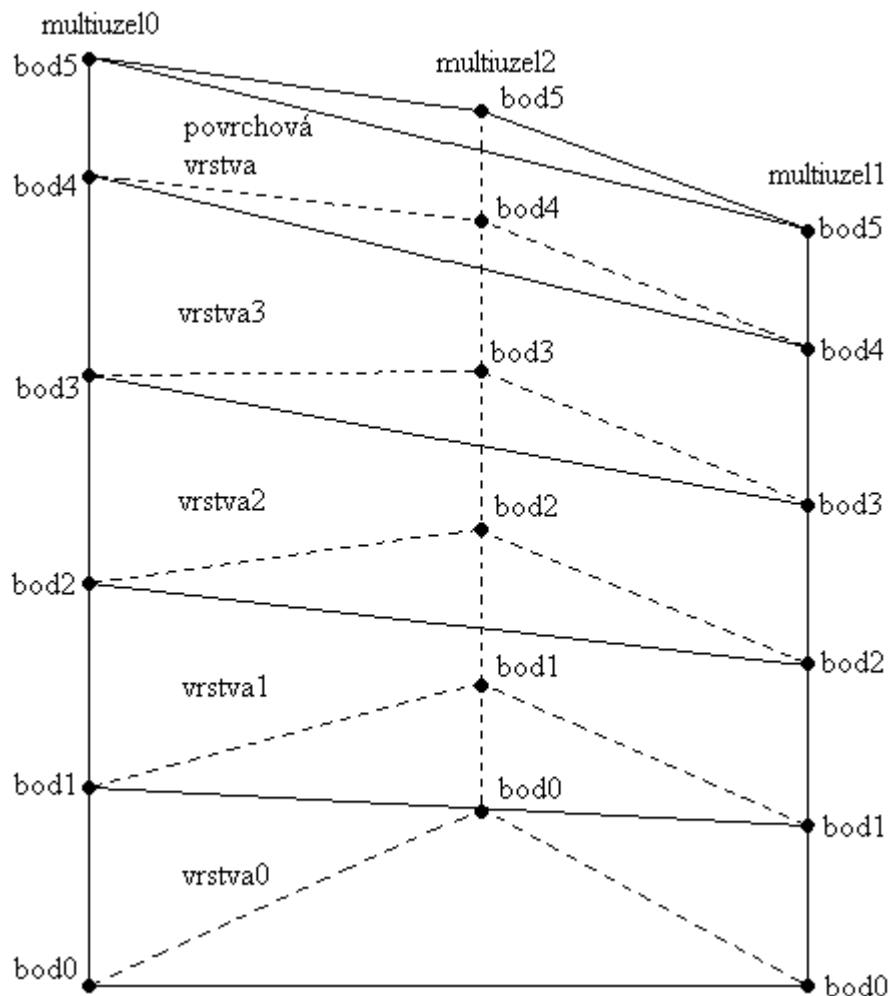
3.2.1 Tvorba prizmatických elementů

Prizmatické elementy (trojboký hranol se skloněnými podstavami) tvoří základní prvek multielementů. Multielement je sada prizmatických elementů mající prizmatické elementy poskládaný do vrstev. Prizmatické elementy v multielementu mají uzly ze společných sad uzlů, tyto sady se nazývají multiuzly. Uzly v multiuzlech mají stejné x-ové a y-ové souřadnice, liší se pouze hodnotami z-ové souřadnice.

Rozdělení sítě na multielementy probíhá v závislosti na zadaných hodnotách uživatelem. V programu lze nastavit nadmořskou výšku spodní vrstvy (dolní podstava modelovaného bloku), počet vrstev multielementů a maximální hloubku povrchové vrstvy.

Po načtení dat ze souborů bodů a trojúhelníkových elementů do datových typů proměnných *uzly* a *trojuhelniky*, je možné přistoupit na výpočet 3D sítě prizmatických elementů a generování této sítě do souboru definic multielementů sítě *STE* a multiuzly do souboru definic uzlů sítě *STU*.

Výpočet multielementů je rozdělen do několika částí. V první části výpočtu multielementů programem se vytvoří z uzlů multiuzly. Zachováním původního uzlu 2D sítě a vytvořením nové sady uzlů je vytvořen nový multiuzel. Sada nových uzlů multiuzlu je rovna počtu vrstev multielementu. Každému novému multiuzlu je přidělena nová z-ová souřadnice. Výpočet výšek multiuzlů se provádí od minimální výšky (dolní podstava modelovaného bloku). Multiuzel s nejmenší z-ovou souřadnicí má hodnotu zadané minimální výšky multielementů a nese označení nula. Uzel multiuzlu, který leží nejbližší pod povrchem, má hodnotu uzlu na povrchu zmenšenou o tloušťku povrchové vrstvy a nese označení, které je rovno počtu vrstev multielementu mínus jedna. Multiuzly, které mají označení jedna až počet vrstev mínus dvě se rovnoměrně rozprostírají mezi vrstvy nula až počet vrstev mínus jedna viz obrázek 3.



Obrázek 3 Rozvrstvení prizmatických elementů podle vrstev
do multielementů a uzlů do multiuzlů

Poté co jsou vypočteny všechny z-ové souřadnice multiuzlů, je zahájena druhá část výpočtu. Každý z prizmatických elementů je určen šesti uzly se známými z-ovými souřadnicemi, které patří do multiuzlů. Zprůměrováním souřadnic jednotlivých uzlů v každém z elementů je získána souřadnice těžiště elementu. Těžiště je důležité ke stanovení materiálových vlastností horniny v prizmatickém elementu.

Další fází je ukládání 3D sítě prizmatických elementů do souboru definic multielementů sítě *STE* a multiuzly do souboru definic uzlů sítě *STU*. Všechna potřebná data pro uložení souborů jsou uložena v datových proměnných *uzly* a *trojuhelniky* typu *T3D* a *TTrojuhelniky*.

3.2.1 Tvorba simplexových elementů

Simplexy jsou tvořeny prostorovými útvary. V této bakalářské práci se generují simplexy, které mají tvar čtyřstěnu. Podobně jako je tomu u multielementů se po načtení dat ze souborů bodů a trojúhelníkových elementů do datových typů proměnných *uzly* a *trojuhelniky*, je možné přistoupit na výpočet 3D sítě simplexových elementů a generování této sítě do souboru s popisem geometrie sítě *MSH*.

Jedním z řešení, jak vytvořit z 2D sítě oblasti 3D síť simplexových elementů je rozdělit tuto síť podobně, jako je tomu u sítě multielementů do vrstev a využít již vzniklé multiuzly, jako samostatné uzly vrcholů simplexových elementů.

Při vytváření simplexových elementů je potřeba zajistit správné rozdělení simplexových elementů v jednotlivých vrstvách multielementů a návaznost řezů mezi sousedními multielementy. Určením dělení prizmatického elementu (trojboký hranol se skloněnými podstavami) pro jednu vrstvu, je získán obraz dělení v celém multielementu. Ostatní vrstvy multielementu budou rozděleny stejným způsobem. *Hrana0*, *hrana1* a *hrana2* označují směr řezu prizmatickým elementem u jeho krajních stěn, pro zjednodušení jsou boční stěny prizmatických elementů brány jako hrany se směrem řezu od jednoho bodu k druhému a prizmatické elementy jako trojúhelníkové elementy.

Zjišťování řezů bočních stěn prizmatických elementů je zajištěno tak, aby bylo možné prizmatické elementy rozdělit na simplexové elementy. Podmínkou je, aby boční stěna sousedních prizmatických elementů byla rozdělena stejně (vznikla tak návaznost nově vzniklých simplexových elementů) a bylo možné provést rozdělení prizmatických elementů na simplexové elementy. Hledá se nejlepší možné řešení výpočtu řezů bočních stěn sousedících multielementů.

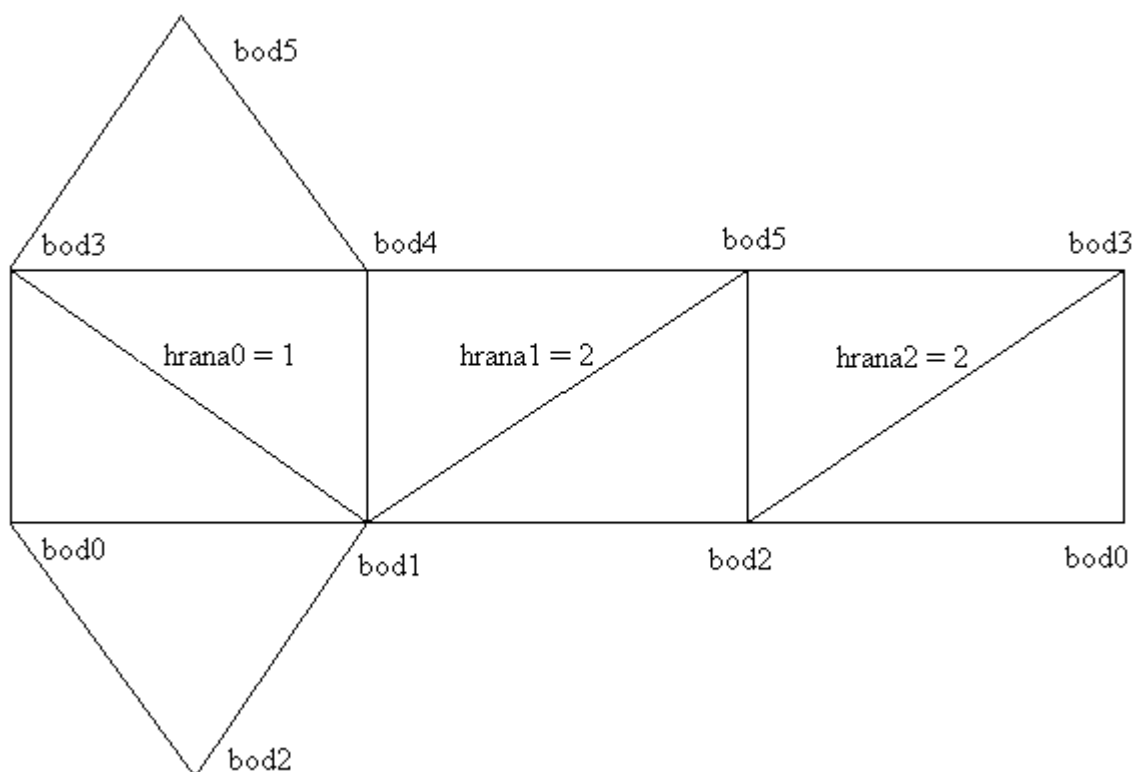
Výběr trojúhelníkových elementů podle jejich sousedství, může napomoci takovému řešení, u kterého nebude potřeba složitého dělení prizmatických elementů na více jak tři simplexové elementy. Výběr probíhá od prvního bodu v souboru a to tak, že se vždy zjišťují řezy následujících elementů v sousedství již rozdělených multielementů na simplexové elementy. Pro každý jednotlivý prizmatický element je zajištěno, že alespoň jedna z jeho stěn bude volná pro zvolení směru řezu boční stěnou.

Pro výpočet řezů stěn prizmatických elementů bylo zapotřebí tří polí celočíselného typu. Pole nazvané *soused0* zahrnuje všechny multielementy, které leží na hranici mezi již rozdělenými řezy stěn a nerozdělenými řezy stěn multielementů. Indexy trojúhelníkových elementů již rozdělených multielementů jsou zapsány v číselném poli

soused1 a zbývající body za hranicí *soused0* jsou označeny *soused2*. Postupně jak postupuje výpočet se přesouvají indexy z jednoho pole do druhého a to ze *soused2* do *soused0*, až do *soused1*. Výpočet je ukončen jestliže pole *soused0* je prázdné.

Na začátku výpočtu je nastaven první prvek trojúhelníkových elementů na první pozici pole *soused0* a jsou mu přiděleny směry řezů stěnami. Dále jsou všechny indexy trojúhelníkových elementů zařazeny kromě prvního do pole *soused2*. Dále probíhá standardní výpočet rozdělení stěn trojúhelníkových elementů.

Číslování 0, 1, 2 u hran trojúhelníku značí směr řezu. Pokud jsou hrany očíslovány nulou znamená to, že zde nebyl proveden řez. *Hrana0* spojuje body 0 a 1, *hrana1* spojuje body 1 a 2 a *hrana2* spojuje body 2 a 0, podle umístění v souboru trojúhelníkových elementů. Jestliže jedna z hran má hodnotu jedna, řez stěnou pětistěnou se spodní a vrchní trojúhelníkovou základnou povede od prvního bodu stěny ze shora ke druhému v pořadí 0, 1, 2, 0 bodů směrem dolů. Pokud bude mít hrana hodnotu dvě bude řez opačný a to směrem od spodního bodu pětistěny k vrchnímu bodu pětistěny viz. obrázek 4.



Obrázek 4 - Číselné vyjádření řezů pětistěnou s ohledem na zjednodušení pro výpočet pomocí trojúhelníkových elementů.

V hlavním cyklu programu se vyhledávají trojúhelníkové elementy sousedící s prvním prvkem ležícím v poli *soused0*. Program v této fázi testuje všechny prvky pole *soused2*, jestli nesdílí jeden z těchto trojúhelníkových elementů jednu hranu se *sousedem0* ležícím na první pozici pole. Pokud se najdou sousední multielementy v poli *soused2*, jsou těmito trojúhelníkovým elementům přiřazeny směry řezů stěnami a automaticky se přesunují z pole *soused2* do pole *soused0*.

Přiřazování směrů řezů stěn je dáno podle toho z kolika *sousedy0* daný trojúhelníkový element sousedí. Pokud sousedí s jedním nebo dvěma, jsou zbylé hrany navoleny libovolně nebo podle potřeby. Jestliže trojúhelníkový element má tři stěny společné se třemi *sousedy0* nastává situace, kdy je nutné zjistit, zdali jsou stěny výhodně rozděleny. Pokud rozdělení stěn vyhovuje rozdělení pětistěnu multielementu na tři čtyřstěny, pokračuje se v dalším průběhu programu. Pokud toto není splněno nahlíží se k sousedním multielementům, jestli je možné změnit řez společnou stěnou bez toho, aby se měnili další stěny sousedních multielementů. Pokud ani toto nelze změnit vyhledá se jeden ze sousedních multielementů, který nehraničí se žádným ze *sousedu0*, u této stěny se změní směr řezu a opačný směr řezu se aplikuje na společnou stěnu aktuálního trojúhelníkového elementu.

Na konci této části programu zabývající se řezy stěn je *soused0* ležící na první pozici přesunut do pole *soused1* a zbývající prvky jsou posunuty o jedno místo dopředu. Pokud je pole *soused0* prázdné je ukončen výpočet dělení stěn prizmatických elementů na simplexu.

Dalším postupem je určení bodů vrcholů simplexových elementů v prizmatickém elementu. Pomocí pole *Simplex* datové proměnné *trojuhelniky* typu *TTrojuhelniky* se zapisují čtveřice bodů, které tvoří vrcholy čtyřstěnu podle modelu prizmatického elementu. V tomto modelu jsou spodní body ve vrstvě multielementu označeny čísly 0, 1, 2 a vrchní 3, 4, 5. Do pole *simplex* se zapisují pro každý z trojúhelníkových elementů tři simplexové elementy.

Číselné vyjádření bodů simplexů je provedeno pomocí přiřazování hodnot v tabulce 4.

Směry řezů bočních stěn pětistěnu			Čísla uzlů pětistěnu rozděleného na simplexu		
hrana0	hrana1	hrana2	simplex1	simplex2	simplex3

1	2	1	1, 3, 4, 5	0, 1, 3, 5	0, 1, 2, 5
1	1	2	2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4	0, 1, 2, 3
2	1	1	0, 3, 4, 5	0, 2, 4, 5	0, 1, 2, 4
1	2	2	1, 3, 4, 5	1, 2, 3, 5	0, 1, 2, 3
2	1	2	2, 3, 4, 5	0, 2, 3, 4	0, 1, 2, 4
2	2	1	0, 3, 4, 5	0, 1, 4, 5	0, 1, 2, 5

Tabulka 4- Rozdělení modelu prizmatického elementu na tři simplexové elementy pomocí určení čísel bodů vrcholů simplexových elementů

Poslední částí je uložení 3D sítě simplexových elementů do souboru s popisem geometrie sítě *MSH*. Všechna potřebná data pro uložení souboru jsou uložena v datových proměnných *uzly* a *trojuheltniky* typu *T3D* a *TTrojuheltniky*, tyto data se převádí z vypočtených modelu simplexových elementů pro jednu vrstvu do 3D sítě simplexových elementů modelu zadané oblasti.

3.3 Generování souborů materiálů

Na základě výsledků vodních tlakových zkoušek prováděných na vrtech oblasti „Potůčky-Podlesí“ byla sestavena tabulka materiálových vlastností žuly, tato tabulka je znázorněná v kapitole 2.3 Geologická data. Jsou zde vypsány i podmínky pro sestavení tabulky pro fility (fility mají desetkrát větší propustnost než žuly a vyskytují se pouze do 150m pod povrchem).

Tabulky materiálových vlastností byly uplatněny při tvorbě konstant, které slouží v programu „Generátor souborů 3D sítí“, jako počáteční data při vytváření proměnné *propustnost* datového typu *TPropustnost* sloužícím k ukládání materiálových vlastností pro různé typy hornin. Hodnoty v proměnné *propustnost* datového typu *TPropustnost* si uživatel může v průběhu programu měnit pomocí okna v programu sloužícím pro zadávání materiálových vlastností a okrajových podmínek.

Poté co jsou nastaveny hodnoty materiálových vlastností v proměnné *propustnost* datového typu *Tpropustnost*, může být zahájen výpočet. Výpočtem jsou přiřazeny hodnoty v proměnné *propustnost* datového typu *Tpropustnost* ke každému z elementů multielementu podle jeho výšky těžiště hodnoty do proměnné *trojuheltniky* datového typu *TTrojuheltniky*, který dále obsahuje pole *Multielement* datového typu *TMultielement*, mající proměnné pro uložení materiálových vlastností.

Po výpočtu nastává ukládání dat z proměnných obsahujících materiálové vlastnosti příslušných vrstev multielementů do souboru hodnot materiálových

koeficientů *STM* sloužícím, jako vstup pro program GENFLOW pro modelování podzemních procesů. Stejně jako je tomu u souboru *STM* ukládají se data do souboru s popisem geometrie sítě *MSH* pro stejné hodnoty simplexových elementů uložených v jedné vrstvě daného multielementu, s tím rozdílem, že se zde uloží číslo materiálové vlastnosti související s tabulkou v souboru materiálových vlastností *MTR*. Soubory *MSH* a *MTR* jsou vstupními soubory programu FLOW123D.

3.3.1 Datový typ TPropustnost

Pro uchovávání informací o tabulkách materiálových vlastností všech hornin vyskytujících se v 3D síti zadané oblasti. Jedná se o záznam obsahující tyto položky:

- Cislo – číslo materiálu uvedeného v souboru trojúhelníkových elementů
- Cislo2 – pořadové číslo materiálu, uvádějící druh materiálu pod povrchovým materiálem
- Material – název materiálu
- Hladiny – pole mezí do, jakých hloubek se příslušná vlastnost materiálu uvádí
- PropustX, PropustY, PropustZ – jsou pole propustností v x-ovém, y-ovém a z-ovém směru souvisejících hloubek, pro daný typ materiálu
- Porozita_aktivni, Porozita_celkova, C_mat_pro_volnou_hladinu – pole důležitá pro zadávání dat pro soubor materiálových vlastností *STM*

Tento datový typ umožňuje uložení všech dat potřebných materiálových vlastností pro generování souboru *MTR*. První dvě čísla slouží, jako určení hornin vyskytujících se v daném elementu. První číslo, je číslo základní horniny například filitů, druhé číslo udává číslo indexu tabulky uložené do proměnné typu TPropust, materiálu horniny pod základní horninou například žuly.

3.3.2 Datový typ TMultielement

Pro ukládání materiálových vlastností, nadmořské výšky těžiště a druhu materiálu vyskytující se v každém z prizmatických elementů multielementu slouží záznam, který má tyto položky:

- Propustnostx, Propustnosty, Propustnostz - propustnosti v x-ovém, y-ovém a z-ovém směru
- Material – číslo materiálu uvedeného v souboru trojúhelníků elementů

- Materialc – číslo materiálu odpovídající tabulce v souboru *MTR*
- ZT – z-ová souřadnice těžiště
- Porozita_aktivni, Porozita_celkova, C_mat_pro_volnou_hladinu – data důležitá pro zadávání dat pro soubor materiálových vlastností *STM*

Tento datový typ umožňuje uložení všech dat potřebných materiálových vlastností pro generování souboru *STM* a *MSH*. Pro generování souboru *MSH* je podstatné číslo Materialc, které poukazuje na číslo v tabulce souboru *MTR*.

3.4 Generování souborů okrajových podmínek

Na základě načtených dat ze souboru bodů a trojúhelníkových elementů je sestavena 3D síť oblasti, na které se vyskytují vodní toky. Spolu s informacemi, které uvádí tok nebo-li průsak horninou na povrchu zadávané uživatelem, tvoří okraj 3D sítě oblasti ucelená data o okrajových podmínkách oblasti. Tyto informace jsou jen přibližné a k reálným se pouze blíží. Jsou vyvíjeny metody, které generují okrajové podmínky do souboru tak, aby se při modelování podzemních procesů výsledky blížili co nejvíce realitě. Například přesnější zadávání toku (průsaku) povrchu 3D sítě, přesnější výpočet tlaků vodních toků v podloží, to vše závisí na zdrojích dat, která jsou poskytnutá k dané oblasti.

3.4.1 Generování souboru okrajových podmínek 3D sítě prizmatických elementů

Před vlastním generováním souboru okrajových podmínek je zapotřebí zjistit pomocí výpočtu, které ze stěn prizmatických elementů jsou součástí okraje 3D sítě oblasti. V případě povrchové vrstvy a spodní vrstvy modelu není potřeba složitých výpočtů. Spodní stěny modelu mají nastavenou Neumannovu okrajovou podmínku rovnu nule, protože tok (průsak) těmito stěnami je téměř nulový. Tok stěn, které jsou na vrchu povrchu 3D modelu sítě je nastaven uživatelem. Tento tok je záporný, protože vede směrem dolů do povrchu. Zadává se stejný pro celou povrchovou oblast.

Další částí jsou okrajové stěny 3D sítě. Nejprve jsou pomocí 2D povrchové sítě oblasti nalezeny hrany krajních trojúhelníkových elementů tím, že tyto hrany elementů nemají sousední elementy. Prostřednictvím krajních hran trojúhelníkových elementů 2D sítě jsou určeny krajní stěny prizmatických elementů okraje 3D sítě oblasti. Stěny prizmatických elementů jsou označeny podle modelu uvedeného v kapitole 2.2.4 souboru definic okrajových podmínek *OKE*.

Nastavování Dirichletovy okrajové podmínky v případech, kdy se na okraji povrchové oblasti vyskytuje řeka, potok nebo jiný zdroj vody. V případě, kdy na prizmatickém elementu leží vodní tok a tento element leží na povrchu i na hranici oblasti, je pro jeho krajní stěnu zapsána Dirichletova okrajová podmínka, která udává piezometrickou výšku vodní hladiny, která má hodnotu nejnižší nadmořské výšky uzlu elementu. Ostatní stěny prizmatických elementů v multielementu mají nastavenou Neumannovu okrajovou podmínku, protože je zde zdroj vody nad těmito elementy je tok těmito stěnami nulový.

Nulovou Neumannovu okrajovou podmínku mají také ostatní boční stěny okraje modelu. Tento tok stěnami by se dal v některých případech odvodit z propustností v daných elementech nebo jinými způsoby, které nejvíce odpovídali realitě.

3.4.2 Generování souboru okrajových podmínek 3D sítě simplexových elementů

Podobně jako je tomu u okrajových podmínek stěn prizmatických elementů, jsou sestaveny tyto podmínky pro stěny simplexových elementů. Prizmatické elementy jsou rozděleny na simplexové elementy, které se vyznačují společnými stěnami, které však mohou patřit jednomu ze simplexových elementů nebo dvěma v případě bočních stěn 3D sítě modelu oblasti. Proto je nutné zjistit, který ze simplexových elementů, vzniklý z dělení prizmatického elementu leží na hranici oblasti a jaká z jeho stěn je ta okrajová. Dělení modelu prizmatického elementu je popsáno v kapitole 3.2.1 Tvorba simplexových elementů. Dále jsou stěny číslovány od 0 do 3 podle pořadí, v kterém leží protější vrchol simplexového elementu (čtyřstěnu) v poli uzlů simplexového elementu v souboru *MSH*.

Pro takto zjištěnou hranici oblasti jsou generována data do souboru okrajových podmínek simplexových elementů *BCD*. V případě vrchních povrchových stěn je nastavena Neumannova okrajová podmínka uživatelem a uvádí záporný tok touto stěnou. Spodní stěny modelu mají Neumannovu okrajovou podmínku rovnu nule, protože je zde zanedbatelný tok stěnou modelu.

Pro boční stěny 3D sítě modelu platí, pokud je v některém z bodů trojúhelníkového elementu zjištěna řeka, potok nebo jiný zdroj vody, mají boční stěny okraje vrchní vrstvy Dirichletovu okrajovou podmínku rovnu vodnímu sloupci vody v metrech mezi povrchovým bodem s nejnižší nadmořskou výškou elementu a těžištěm z-ové souřadnice vrcholů krajní stěny modelu. V případě vrstev ležících pod

povrchovou vrstvou s vodním zdrojem je hodnota Neumannovy okrajové podmínky rovna nule, protože zde nedochází ve směru normálového vektoru stěn žádný tok.

Nulovou Neumannovu okrajovou podmínku mají také ostatní boční stěny okraje modelu. Tento tok stěnami by se dal v některých případech odvodit z propustností v daných elementech nebo jinými způsoby, které nejvíce odpovídali realitě.

3.5 Export dat do souborů

Soubory jsou generovány podle určitých formátů, které jsou uvedeny v kapitolách 2.2 Vstupní soubory programu GENFLOW a 2.3 Vstupní soubory programu FLOW123D. Generování těchto souborů probíhá z již načtených a připravených dat výpočtem. Pro generování některých souborů je potřeba dopočítat některé z hodnot, pro jiné není potřeba žádného z výpočtů, proto zde vzniká rozdíl v tom, že po vygenerování některých ze souborů a následné změně některých z údajů může dojít k neslučitelnosti dat generovaných souborů pro další zpracování dat.

3.6 Vykreslení sítě

Vykreslení sítě je prováděno v hlavním okně programu „Generátor souborů 3D sítě“ na plátno komponenty *image*, která je součástí vývojového prostředí Delphi 7. Pro vykreslení 2D sítě oblasti je potřeba získat nové souřadnice bodů z původních. Pro další vykreslení je potřeba vyčistit plátno komponenty *image*. Poté co je plátno čisté vykreslují se body, které se posléze propojují v trojúhelníkové elementy.

3.6.1 Vykreslení směrů řezů stěn při vytváření simplexových elementů

Vykreslení řezů stěn prizmatických elementů při rozdělování na simplexové elementy se podobá celkovému vykreslení sítě jen s tím rozdílem, že je zde znázorněn směr řezu bočními stěnami multielementů. Pokud vede řez od vrchní vrstvy ke spodní vrstvě prizmatického elementu v multielementu je polovina hrany, začínající v bodě kde je řez nahoře, vykreslena a druhá polovina je vynechána. Aby bylo realizovatelné vykreslit jen půlku hrany, byl vytvořen bod v polovině hrany. Výsledkem je síť trojúhelníků, kde u každé trojúhelníkové hrany chybí polovina úsečky, znázorňující takto řez. U složitějších sítí, které mají velkou hustotu elementů zobrazovaných na velikosti přibližně jednoho monitoru je možné, že řezy stěn nebudou viditelné.

Vykreslení řezů stěn multielementů slouží také jako kontrola. Pokud bude jedna z hran trojúhelníku vykreslena celá, znamená to, že se řezy v sousedních multielementech neshodují, tím nastává závažná chyba.

3.6.2 Vykreslení hranice celé oblasti

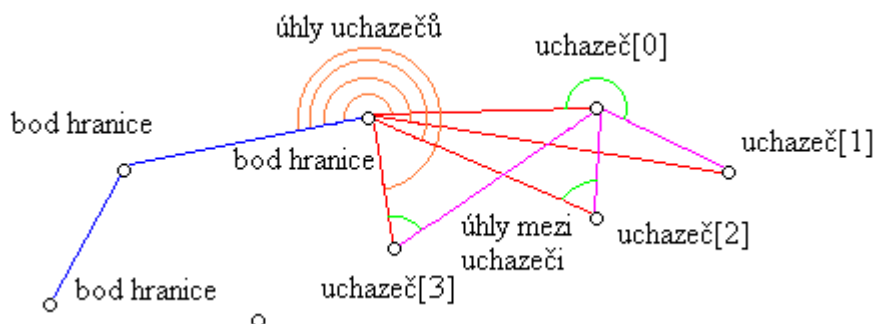
U vykreslení hranice celé oblasti lze porovnat hranici vygenerovanou tímto programem a hranici zadanou v souboru. Někdy se tyto hranice mohou lišit a to zejména pokud krajní body částečně zasahují do vnitřní oblasti. Program v této části zjišťuje, zda-li každý z trojúhelníků má svého souseda, porovnáním všech hran, pokud nemají souseda, jsou tyto hrany a dvojice bodů spojující tyto hrany částí hranice.

3.7 Generování 2D elementů z načtených bodů

Tato část programu přímo nespadá do zadání, ale slouží uživateli jako pomůcka, jestliže si chce sám z navržených bodů sestavit vlastní síť nebo porovnat zadanou síť v souboru trojúhelníkových elementů s vygenerovanou sítí tohoto podprogramu. Srovnáním sítě vygenerované tímto programem a sítě zadané v souboru, je patrná menší odlišnost a to v navrhování hranice oblasti. Při vyhledávání hranice oblasti ze zadaných bodů je klíčové, aby vytvořené trojúhelníkové elementy měli co nejméně ostrých úhlů. To je zajištěno pokud dvojice hran tvořící hranici svírají vnější úhel směrem od zadané oblasti minimálně 90° .

Většina takto navržených programů vytváří síť od středu sítě, ale tento podprogram si nejdříve vytvoří hranici oblasti a poté spojuje uzly trojúhelníků od vnější oblasti směrem ke středu.

Vytváření hranice oblasti začíná nalezením prvního bodu okraje. Počáteční bod okraje je bod s největší hodnotou x-ové souřadnice. Dále se hledá první hrana okraje. První hrana okraje má dva body, počáteční a neznámí. Protože na začátku je jen jeden bod a je zapotřebí celé hrany je virtuální bod umístěn do rohového kraje oblasti. Potom co je vytvořena pomocná hrana jsou body s nejlepší polohou nazývaní uchazeči, seřazeni podle velikosti úhlů uchazečů (označeny oranžovou barvou) znázorněných na obrázku 5. Poté co jsou vybráni uchazeči, testují se úhly mezi uchazeči. Pokud je úhel mezi uchazeči větší než devadesát stupňů (označeny zelenou barvou) je přesunut uchazeč, který leží uprostřed tohoto úhlu na první pozici pole uchazečů. Úhel pro posuzování uchazečů se dá zvětšit, tím se zajistí hladší hranice oblasti.

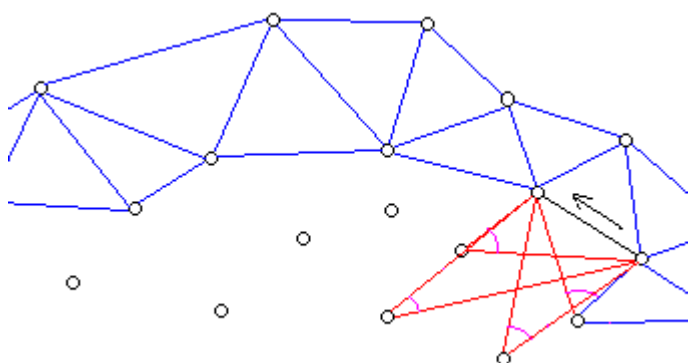


Obrázek 5 – Znázornění úhlů podle kterých se vybírají body hranice.

Následné vyhledávání hran a uzlů hranice zadané oblasti je vykonáváno obdobným způsobem jako je vyhledávání první hrany hranice jen s tím rozdílem, že pomocný bod je nahrazen předposledním bodem nalezeným na hranici. Následné vyhledávání bodů hranice nekončí do té doby než je celá oblast obalená hranicí.

Po tom co je zjištěna hranice oblasti, přechází se na druhou část podprogramu. V této části programu se vyhledávají trojúhelníkové elementy pomocí, již zmíněné jedné hrany. Hrany které tvoří hranici jsou uloženy do pole s názvem *Hrany*. Z tohoto pole *Hrany* se vybírají hrany, které tvoří další trojúhelníky.

Princip vyhledávání uzlů trojúhelníků je dán podobně jako u vyhledávání hran pomocí úhlu uchazečů. Úhel těchto uchazečů je dán směrem do středu pole volných bodů, aby nedošlo k výběru již vytvořených trojúhelníků, to je dáno pořadím bodů tvořící hranici. Vyhledávání je prováděno ve spirálách v jednom směru (proti směru hodinových ručiček) a berou se vždy jen body, které leží ve směru do středu (vlevo) od hrany.



Obrázek 6 - Program rozhoduje, kterému z bodů dá přednost v sestavení nového trojúhelníka

Na obrázku 6 je vidět, jak se program rozhoduje, kterému z bodů dá přednost v sestavování nového trojúhelníku. Je zde několik uchazečů, kteří leží v příhodné vzdálenosti od hrany. Úhel, podle kterého se rozhoduje, svírají nově vyhledávané hrany označené červeně. O novém uchazeči, který bude tvořit nový trojúhelník rozhoduje velikost úhlu. Je zde také vykreslen směr hrany, pro kterou se vyhledává trojúhelník. Uzly, které leží vpravo od hrany, pro kterou je vyhledáván nejvhodnější uchazeč, patří také do skupiny uchazečů, ale jejich úhel je větší než 180° .

3.8 Shrnutí

Jako výsledek práce vznikl počítačový program „Generátor souborů 3D sítí“, který z připravených povrchových dat souborů GIS generuje síť trojrozměrných elementů oblasti. Vytváří soubory elementů, materiálových vlastností a okrajových podmínek vztahujících se k zadané oblasti v závislosti na vstupních požadavcích programů GENFLOW a FLOW123D.

Program byl přizpůsoben dostupným vstupním datům souborů bodů a trojúhelníkových elementů, které byli k dispozici pro konkrétní lokalitu „Potůčky-Podlesí“.

V mnoha směrech je program konfigurovatelný uživatelem a to zejména ve stavbě modelu 3D sítě, zadáváním materiálových vlastností elementů podle nastavených vrstev a podle typu materiálu hornin.

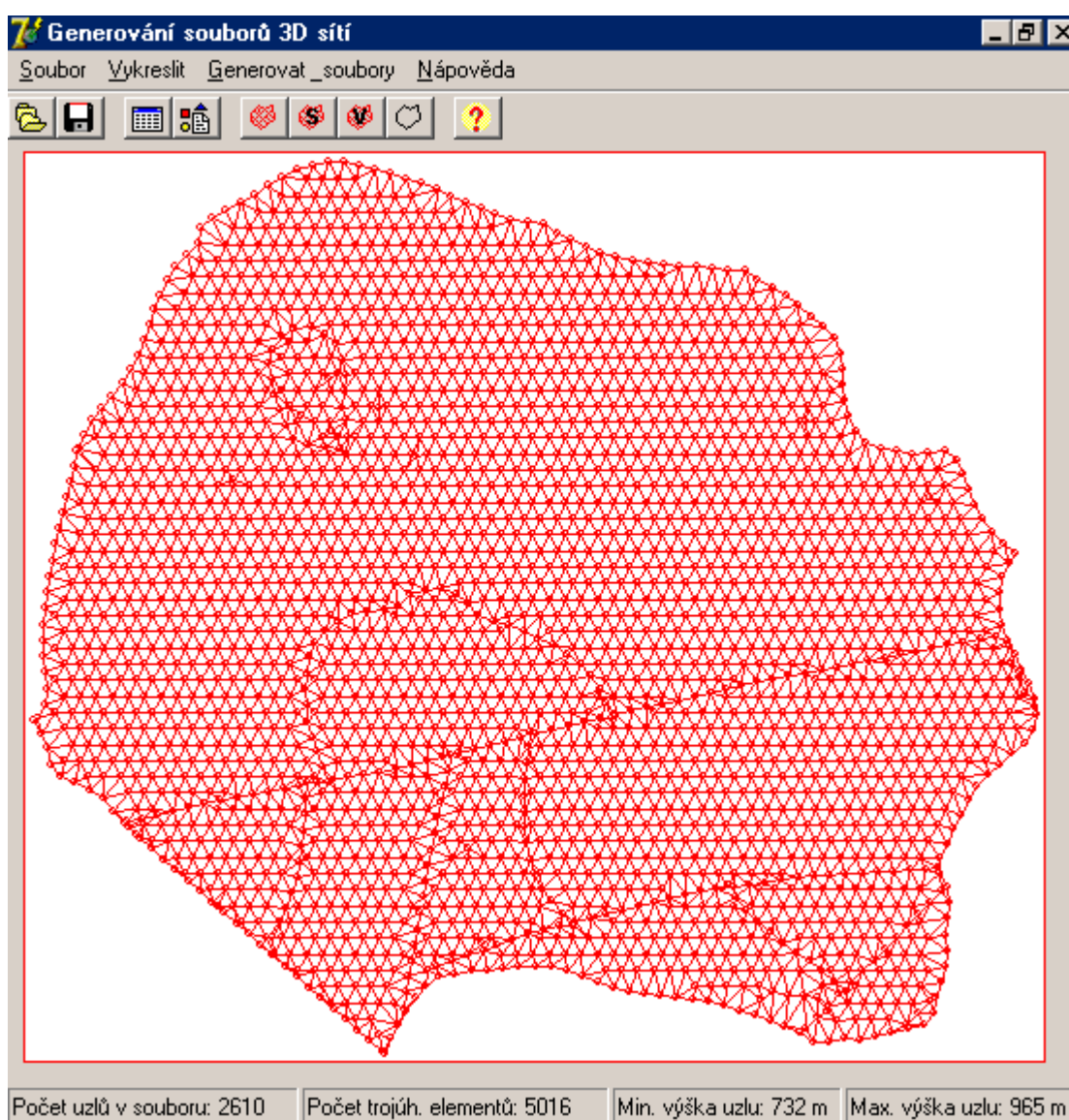
Na druhou stranu byly při implementaci v programu a při generování souborů využity specifické znalosti o modelované lokalitě „Potůčky-Podlesí“, proto při zadávání vstupních souborů generovaných systémem GIS pro jinou lokalitu může nastat odlišnost vstupních dat. Jestliže bude dodržen formát vstupních dat jiné oblasti, nemělo by docházet k žádným potížím v programu. Bude pouze zapotřebí sestavit novou tabulku materiálových vlastností nových typů materiálů za běhu programu nebo upravit konstanty programu, tak aby se nemuseli tyto hodnoty pokaždé zadávat.

4 Ovládání programu

Výsledkem bakalářské práce je program „Generátor souborů 3D sítí“, který umožňuje z připravených povrchových dat souborů GIS generovat síť trojrozměrných elementů oblasti. Vytvářet soubory elementů, materiálových vlastností a okrajových podmínek vztahujících se k zadané oblasti v závislosti na vstupních požadavcích programů GENFLOW a FLOW123D.

4.1 Hlavní okno programu

Po spuštění programu se uživateli zobrazí hlavní okno.



Obrázek 7 – Hlavní okno programu (načtená 2D síť oblasti „Potůčky-Podlesí“)

Hlavní okno programu slouží k načítání a vykreslování povrchových dat souborů 2D sítě oblasti generované systémem GIS.

V menu hlavního okna, v části *Soubor* se nacházejí hlavní položky ovládání programu. Je zde možné načítat vstupní soubory obsahující data povrchové sítě, otevírat další okna programu „Generování a vykreslování dat v souborech“, „Nastavení parametrů, okrajových podmínek a materiálových vlastností 3D sítě“ nebo ukončit tento program.

V další části menu s názvem *Vykreslit* se pracuje s vykreslováním 2D sítě na plochu hlavního okna. Jsou zde různé možnosti vykreslení 2D sítě, jednak vykreslení sítě z načtených souborů bodů a trojúhelníkových elementů, tak i vykreslení 2D sítě jen ze souboru bodů nebo vykreslení hranice oblasti. Zvolením položky *Vykreslit 2D síť simplexových elementů*, se vykreslí směry řezů stěn prizmatických elementů, které jsou pomocí těchto řezů stěn rozděleny na simplexové elementy.

V části menu nazvané *Generovat soubory* lze generovat vstupní soubory programů GENFLOW a FLOW123D. Je možné generovat soubory jednotlivě nebo jen soubory pro program GENFLOW nebo pro program EFLOW123D nebo všechny soubory najednou.

Poslední částí menu je *Nápověda*, ve které je možné si přečíst nápovědu tohoto programu nebo si zjistit popis načtených a generovaných souborů.

Nástrojová lišta obsahuje nejvíce používané funkce programu obsažené v menu. Zleva názvy tlačítek v nástrojové liště:

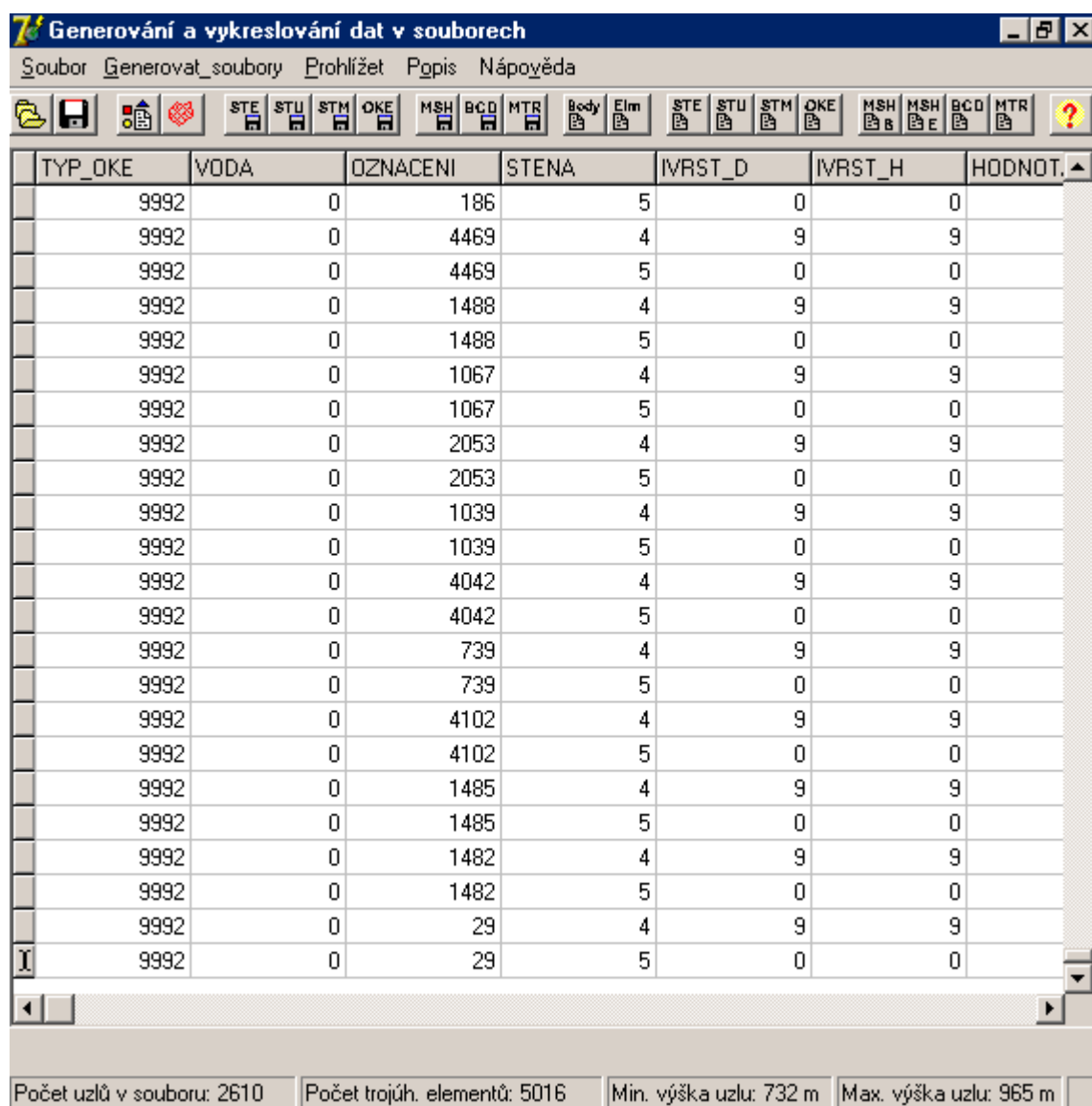
- Načtení souborů 2D sítě povrchu oblasti generované systémem GIS
- Uložit všechny generované soubory
- Otevřít okno obsahující tabulky načtených a generovaných souborů sítě
- Otevřít okno pro nastavení materiálových vlastností a parametrů sítě
- Vykreslit směry řezů stěn modelů prizmatických elementů, při dělení na simplexové elementy
- Vykreslit 2D síť jen ze souboru bodů
- Vykreslit hranici 2D sítě načtené oblasti
- Nápověda

Stavový řádek zobrazuje hlavní údaje o načtených souborech 2D sítě povrchové oblasti generované systémem GIS. Mezi tyto údaje patří minimální a maximální

hodnota nadmořské výšky uzlů, počet načtených uzlů a trojúhelníkových elementů. Jako poslední položku zobrazuje uživateli, co by měl udělat v programu, jako následující krok.

4.2 Okno s názvem „Generování a vykreslování dat v souborech“

Další důležitou částí programu je okno s názvem „Generování a vykreslování dat v souborech“, které se zobrazí při výběru *Tabulky načtených a generovaných souborů sítě* v menu nebo na nástrojové liště.



	TYP_OKE	VODA	OZNACENI	STENA	IVRST_D	IVRST_H	HODNOT.
	9992	0	186	5	0	0	
	9992	0	4469	4	9	9	
	9992	0	4469	5	0	0	
	9992	0	1488	4	9	9	
	9992	0	1488	5	0	0	
	9992	0	1067	4	9	9	
	9992	0	1067	5	0	0	
	9992	0	2053	4	9	9	
	9992	0	2053	5	0	0	
	9992	0	1039	4	9	9	
	9992	0	1039	5	0	0	
	9992	0	4042	4	9	9	
	9992	0	4042	5	0	0	
	9992	0	739	4	9	9	
	9992	0	739	5	0	0	
	9992	0	4102	4	9	9	
	9992	0	4102	5	0	0	
	9992	0	1485	4	9	9	
	9992	0	1485	5	0	0	
	9992	0	1482	4	9	9	
	9992	0	1482	5	0	0	
	9992	0	29	4	9	9	
I	9992	0	29	5	0	0	

Počet uzlů v souboru: 2610 Počet trojúh. elementů: 5016 Min. výška uzlu: 732 m Max. výška uzlu: 965 m

Obrázek 8 – Tabulky načtených a generovaných souborů sítě

Okno s názvem „Generování a vykreslování dat v souborech“ slouží k prohlížení načtených dat 2D sítě povrchové oblasti generované systémem GIS a k prohlížení a

generování souborů sloužících, jako vstupní soubory programů GENFLOW a FLOW123D.

V menu v části *Soubor* se nacházejí hlavní položky ovládání programu. Je zde možné načítat vstupní soubory obsahující data povrchové sítě, otevírat další okna programu, jako je „Hlavní okno – Vykreslit 2D síť“, „Nastavení parametrů, okrajových podmínek a materiálových vlastností 3D sítě“, popřípadě ukončit tento program.

V části menu nazvané *Generovat soubory* lze generovat vstupní soubory programů GENFLOW a FLOW123D. Je možné generovat soubory jednotlivě nebo jen soubory pro program GENFLOW nebo pro program FLOW123D nebo všechny soubory najednou. Po vygenerování souborů je možné tyto soubory prohlížet.

Prohlížet je možné pouze načtené nebo vygenerované soubory v části menu označené *Prohlížet*. Prohlížet se mohou soubory bodů, trojúhelníkových elementů a vstupní soubory programů GENFLOW a FLOW123D. Výjimkou je soubor MSH, který je rozdělen dvou částí, do části uzlů a simplexových elementů, z důvodů zobrazení odlišných sloupců tabulek.

Dalšími položkami v menu jsou *Popis* a *Nápověda*, které slouží pro zobrazení okna s popisem a nápovědou k jednotlivým souborům a k funkci programu.

Na nástrojové liště jsou obsaženy zleva tyto tlačítka:

- Načtení souborů 2D sítě povrchu oblasti generované systémem GIS
- Uložit všechny generované soubory
- Otevřít okno pro nastavení materiálových vlastností a parametrů sítě
- Hlavní okno programu – Vykreslit 2D síť
- Generovat a uložit soubor *STE*, *STU*, *STM*, *OKE*, *MSH*, *BCD* a *MTR*
- Vykreslit soubor bodů, trojúhelníkových elementů, *STE*, *STU*, *STM*, *OKE*, *MSH-body*, *MSH-elementy*, *BCD* a *MTR*
- Nápověda

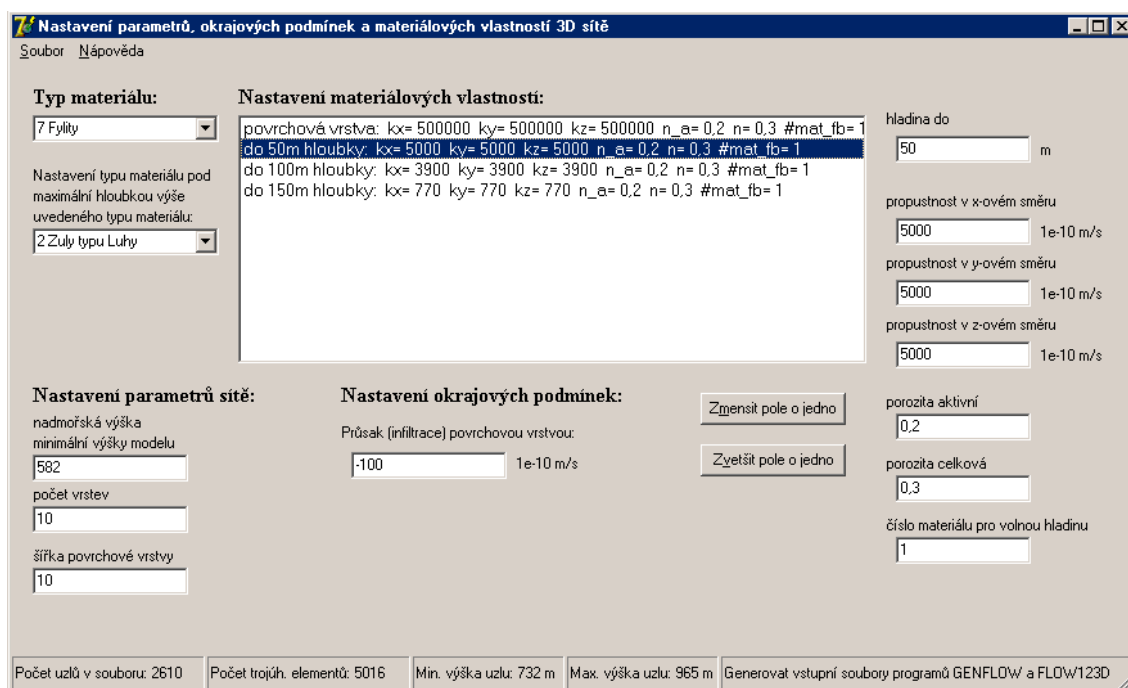
Pracovní plocha okna „Generování a vykreslování dat v souborech“ je vyhrazená vykreslováním tabulek načtených a generovaných souborů.

Stavový řádek zobrazuje hlavní údaje o načtených souborech 2D sítě povrchové oblasti generované systémem GIS. Mezi tyto údaje patří minimální a maximální hodnota nadmořské výšky uzlů, počet načtených uzlů a trojúhelníkových elementů. Jako

poslední položku zobrazuje uživateli, co by měl udělat v programu, jako následující krok.

4.3 Okno s názvem „Nastavení vlastností a parametrů sítě“

Poslední částí programu, která se podílí na vytváření generovaných souborů je okno s celým názvem „Nastavení parametrů, okrajových podmínek a materiálových vlastností 3D sítě“, které se zobrazí při výběru *Nastavení vlastností a parametrů sítě* v menu nebo na nástrojové liště jednoho z předchozích oken.



Obrázek 9 – Okno programu s názvem „Nastavení parametrů, okrajových podmínek a materiálových vlastností 3D sítě“

Okno s názvem „Nastavení parametrů, okrajových podmínek a materiálových vlastností 3D sítě“ slouží k nastavení parametrů (počet vrstev modelu, hloubka povrchové vrstvy a nadmořskou výšku podstavy modelu) 3D sítě, okrajových podmínek (průsak) 3D sítě a materiálových vlastností (propustnost, porozita) 3D sítě pro různé typy materiálů v různých hloubkách pod povrchem. Po nastavení parametrů, okrajových podmínek a materiálových vlastností 3D sítě, je možné přistoupit ke generování a ukládání vstupních souborů programů GENFLOW a FLOW123D.

V první položce menu nazvané *Soubor* se nacházejí hlavní položky ovládání programu. Je zde možné otevírat další okna programu, jako je „Hlavní okno – Vykreslit

2D síť“, „Nastavení parametrů, okrajových podmínek a materiálových vlastností 3D sítě“ nebo zavřít aktuální okno, popřípadě ukončit tento program.

Poslední položkou v menu je *Nápověda*, která slouží pro zobrazení okna s popisem a nápovědou k jednotlivým souborům a k funkci programu.

Pracovní plocha okna je vyhrazena pro nastavování materiálových vlastností pro různé hloubky, různých typů materiálů, dále pro nastavení okrajových podmínek a pro nastavení parametrů sítě.

Nastavení materiálových vlastností pro různé hloubky, různých typů materiálů se nastavuje pomocí „okýnek“ označených názvem *Nastavení materiálových vlastností*. Poté co je nastaveno „okénko“ s názvem *Typ materiálu*, kde jsou obsaženy všechny typy materiálů se svým číselným označením, načtených ze souboru trojúhelníkových elementů, zobrazí se v „největším okénku“ tabulka materiálových vlastností pro různé hladiny označeného typu materiálu. Tyto hodnoty jsou již přednastavené programem. Poté co je zobrazena tabulka materiálových vlastností daného typu materiálu, uživatel si „klikáním“ na řádky v tabulce může zobrazit daný řádek do příslušných „okének“, kde tyto hodnoty může měnit. „Okénko“, v kterém, se zobrazí hladina, je možné měnit v určitých mezích tak, aby byla zachována posloupnost hladin v tabulce. Ostatní „okénka“ materiálových vlastností jsou propustnost v x-ovém, y-ovém a v z-ovém směru potřebných pro generování souborů *STM* a *MTR*, dále jen vlastnosti potřebné pro generování souboru *STM* porozita aktivní, porozita celková a číslo materiálu pro volnou hladinu.

Pro upravování velikosti tabulky příslušného typu materiálu slouží tlačítka, která přidávají nebo ubírají řádky v tabulce. Tabulka může mít minimálně dva řádky.

Pod „okénkem“, kde se zadává *Typ materiálu* je „okénko“, které má stejný obsah typů materiálů. Toto okénko slouží k nastavování typu materiálu, který se vyskytuje pod poslední hladinou vypsanou v tabulce pro typ materiálu v prvním „okénku“. Pokud se nevyskytuje žádný další materiál v 3D síti modelu pod typem materiálu vybraném v prvním „okénku“, zadává se i pro druhé „okénko“ stejný typ materiálu.

Nastavení okrajové podmínky je vypsáno pro povrchovou vrstvu 3D sítě modelu. Zadává se zde Neumannova okrajová podmínka pro infiltraci (průsak) povrchovou stěnou 3D modelu. Hodnota této okrajové podmínky by se měla zadávat záporná, protože průsak stěnou vede ve směru do stěny směrem dolů. Hodnoty ostatních okrajových podmínek jsou vypočteny nebo úplně zanedbány.

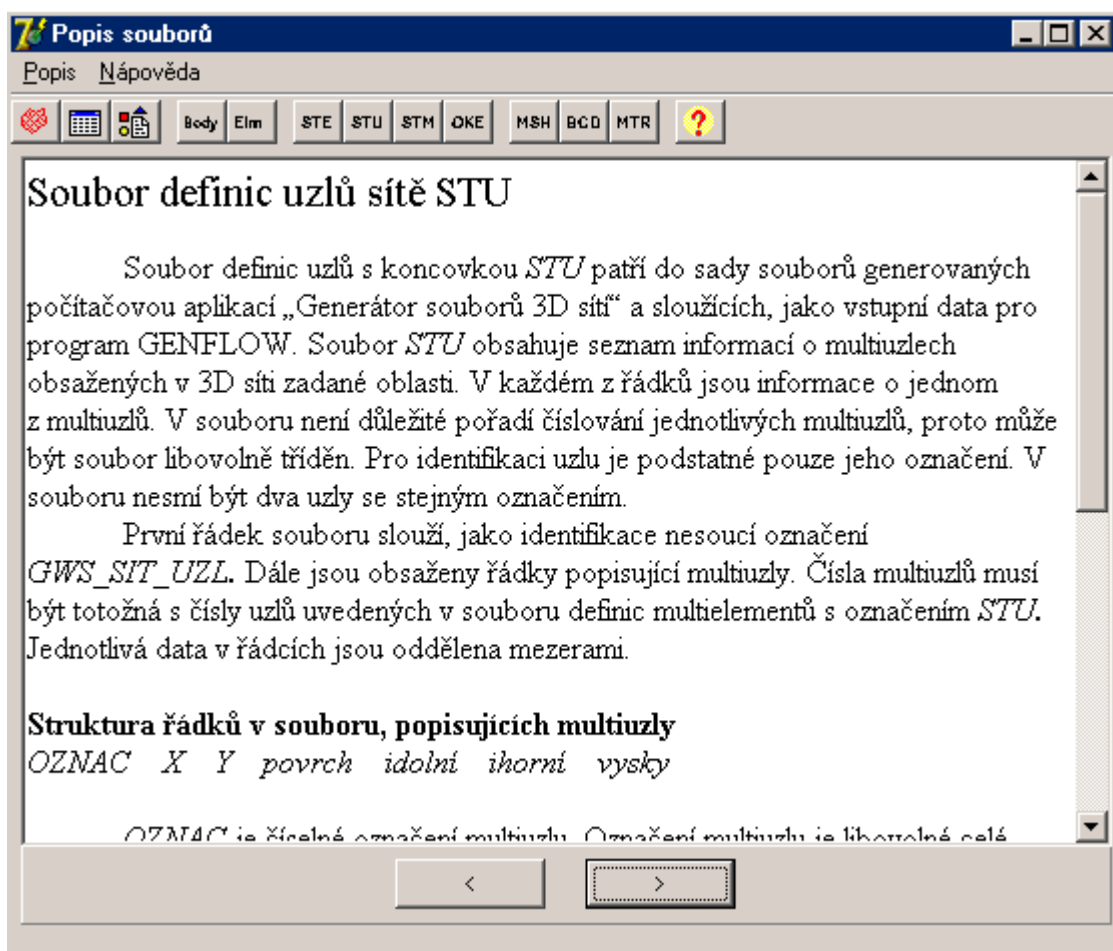
Další položkou je nastavení parametrů sítě. Patří sem nastavení počtu vrstev, hloubka povrchové vrstvy a nadmořská výška minimální výšky 3D sítě modelu. Počet vrstev může být min 2. Hloubka povrchové vrstvy může být od 1m do 49m. Nadmořská výška minimální výšky 3D sítě modelu je přednastavená výpočtem z hodnoty výšky uzlu s nejnižší nadmořskou výškou v souboru bodů, lze ji měnit. Nesmí být vyšší než hodnoty výšky uzlu s nejnižší nadmořskou odečtená o šířku minimálně dvou vrstev.

Všechny nastavené údaje v „okénkách“ jsou změněny stiskem klávesy enter nebo opuštěním „okénka“. Pokud nová hodnota neodpovídá správnému zadání, uživatel je upozorněn na chybu a nová hodnota je přepsána starou hodnotou.

Stavový řádek zobrazuje hlavní údaje o načtených souborech 2D sítě povrchové oblasti generované systémem GIS. Mezi tyto údaje patří minimální a maximální hodnota nadmořské výšky uzlů, počet načtených uzlů a trojúhelníkových elementů. Jako poslední položku zobrazuje uživateli, co by měl udělat v programu, jako následující krok.

4.4 Popis souborů a nápověda programu

Poslední okno programu sloužící uživateli, jako popis souborů a nápověda programu.



Obrázek 10 – Okno s popisem souborů a nápovědou k programu

Toto okno je možné volat z jakékoli části programu, pod názvem *Nápověda* nebo *Popis souborů*. Obsahuje nápovědu ke všem předchozím oknům programu, dále popisuje funkci tohoto programu a popis souborů.

V menu položce s názvem *Popis* se zobrazí popis souboru bodů, trojúhelníkových elementů, souboru *STE*, *STU*, *STM*, *OKE*, *MSH*, *BCD*, *MTR*.

V další položce *Nápověda* se zobrazí nápověda ke všem třem oknům programu a k funkci programu.

Nápověda k těmto oknům je i na nástrojové liště, dále je zde popis souborů a funkce programu. Zleva na nástrojové liště leží tlačítka s nápovědou nebo popisem:

- Hlavní okno programu – Vykreslit 2D síť
- Tabulky načtených a generovaných souborů sítě
- Nastavení materiálových vlastností a parametrů sítě
- Popis souboru bodů a souboru trojúhelníkových elementů
- Popis souboru *STU*, *STE*, *STM*, *OKE*, *MSH*, *BCD* a *MTR*

- Funkce programu

Pracovní plocha okna je vyhrazena textu nápovědy nebo popisu. Na ploše se nacházejí tlačítka, pomocí nichž si může uživatel prohlížet všechny soubory nápovědy. Zdroje dat nápovědy jsou umístěny v adresáři programu s názvem „Data“.

Závěr

Cílem práce bylo na základě povrchové sítě konkrétní oblasti generované systémem GIS vytvořit síť trojrozměrných elementů a ostatní vstupní soubory tak, aby je bylo možno využít pro modelování podzemního proudění v dané oblasti pomocí programů GENFLOW a FLOW123D vyvíjených na katedře modelování procesů.

K dispozici byly vstupní soubory obsahující data o povrchové oblasti „Potůčky-Podlesí“ generované systémem GIS. Dále byly k dispozici dokumentace programů GENFLOW a FLOW123D obsahující údaje o formátu dat vstupních souborů, dále geologická data vztahující se k oblasti „Potůčky-Podlesí“, konkrétně výsledky vodních tlakových zkoušek prováděných na vrtech v oblasti a obrázek dvou navzájem kolmých geologických řezů oblasti.

Výsledkem této práce je program „Generátor souborů 3D sítí“, který umožňuje z připravených povrchových dat souborů GIS generovat síť trojrozměrných elementů oblasti. Vytvářet soubory elementů, materiálových vlastností a okrajových podmínek vztahujících se k zadané oblasti v závislosti na vstupních požadavcích programů GENFLOW a FLOW123D. Tento program dále umožňuje vykreslování 2D sítě oblasti, vykreslit 2D síť trojúhelníků jen z načtených bodů a vypsání obsahů načtených a generovaných souborů.

Tento program by mohl po rozšíření pracovat na dalších úlohách týkajících se modelování podzemních procesů. Je zde navíc aplikace, která vypočítává trojúhelníkové elementy z načteného souboru bodů. Uživatel by si mohl vytvořit vlastní síť tím, že by generoval soubor trojúhelníkových elementů z načteného souboru bodů.

Program načítá soubory pouze v jednom formátu generovaném systémem GIS, protože konkrétní podoba povrchové sítě generovaná systémem GIS může být výrazně závislá na vybrané oblasti. Nelze tedy předpokládat, že bude pracovat se všemi soubory generovanými systémem GIS. Formát těchto souborů by se musel upravovat a nejspíše by se nevyužili všechna data obsažená v souborech.

Hodnoty materiálových vlastností materiálů pro oblast na území „Potůčky-Podlesí“ jsou již v programu přednastaveny, proto pro načtení povrchové sítě jiné oblasti bude za potřebí přepsat tabulky materiálových vlastností pro nové typy materiálů.

Použitá literatura

- [1] CIARLET, P. G. – LIONS, J.L.: Handbook of Numerical Analysis, Volume IV, Finite element method (Part 2). Elsevier, New York, 1996.
- [2] CANTÚ, M.: Myslíme v jazyku Delphi 6, Grada, Praha, 2002.
- [3] Dokumentace programu GENFLOW (interní materiály katedry KMO)
- [4] Dokumentace programu FLOW123D (interní materiály katedry KMO)