
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3901T025 – Přírodovědné inženýrství

Numerické modelování vodních tlakových zkoušek na vrtech

Numeric modelling of water-press examinations on boreholes

Diplomová práce

Autor:

Jan Linhart

Vedoucí práce:

Ing. Otto Severýn, PhD.

Konzultant:

Ing. Jiřina Královcová, PhD.

V Liberci 8. 5. 2007

Anotace:

V diplomové práci byla vybrána data vodních tlakových zkoušek (dále jen VTZ) vhodná pro simulaci. VTZ byly získány z terénních měření na lokalitě Potůčky-Podlesí, která se nachází na severním svahu vrchu Pískovcová skála v Krušných horách. Je tvořena granitovým pněm Podlesí. Jde o prostředí s velmi nízkou propustností, proto jsou v tomto případě čerpací zkoušky zcela vyloučeny a upřednostněny VTZ.

S vybranými VTZ byly simulovány průběhy pomocí programů a to různými přístupy (ryze puklinový, ekvivalentní porézní médium a kombinovaný) v různých variantách velikosti sítě, hustoty puklin, zadání okrajových podmínek apod. Jednotlivé modely VTZ byly kalibrovány pomocí parametrů propustnosti, koeficientu stlačitelnosti a příp. přestupového koeficientu.

Výpočty proudového pole byly provedeny pomocí programu FLOW123D, ve kterém je implementován model založený na kombinovaných sítích. Výsledky byly vygenerovány v podobě textových souborů, které se dále musely zpracovat do grafické podoby. Jako vizualizační prostředek pro puklinové modely byl použit program GMSH. Tento program je obecný pre- a post- procesor pro matematické modely, které jsou založeny na metodách diskretizujících prostorové oblasti do podoby sítí.

Z výsledků těchto modelů byla navržena metodika simulace VTZ (tj. vhodný přístup, způsob a typ zadání okrajových podmínek, velikost sítě a počáteční volbu kalibračních parametrů). Výsledné hodnoty modelů a navržená metodika bude dále využita pro řešení konkrétních úloh souvisejících s terénními pracemi.

Annotation:

Data of the water-pressure examinations, suitable for simulation, were chosen in the diploma work. The water-pressure examinations were reached from cross-country measurements in the location Potůčky-Podlesí, which is situated on the north downhill of the peak Pískovcová skála in the Krušné hory. It is a milieu with a very low transmission, so in this case the pumping tests are absolutely out of question and the water-pressure examinations are preferred.

With chosen water-pressure examinations processes were simulated with the software of KMO via different accesses (pure splitting, equivalent porous medium and combined) in different sizes of the net, density of the splitting, setting of boundary conditions, etc. The individual water-pressure examinations models were calibrated via transmission parameters, compressibility coefficients and eventually the conversion coefficient.

The calculation of the stream field were made with the program FLOW123D, where a model is implemented, which is build on combined nets. The results were generated in form of text files, which had to be further elaborated into a graphic form. As the visualization instrument for splitting models the program GMSH was used. This program is a universal pre- and postprocessor for mathematic models, which are based on methods of discrete room area into a net form.

As result of these models a procedure of the water-pressure examinations simulation (i.e. a suitable access, way and kind of setting boundary conditions, net size and initial choice of calibration parameters) was designed. This procedure was tested on the simulation and furthers the water-pressure examinations.

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své diplomové 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).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 10.5.2007

Podpis:.....

Rád bych na tomto místě poděkoval školiteli Ing. Ottovi Severýnovi, PhD. za odborné vedení při tvorbě diplomové práce, připomínky a poskytnuté materiály. Dále konzultantce Ing. Jiřině Královcové, PhD. za mnoho cenných rad a zkušeností. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým blízkým, zejména rodičům za materiální a duševní podporu v průběhu celého studia.

Liberec, květen 2007

Autor

Obsah

Seznam obrázků	9
1 Úvod.....	11
2 Základní pojmy	13
2.1 Hydraulika	13
2.2 Hydrogeologické vrty, typy hydrodynamických zkoušek	13
2.3 Vodní tlaková zkouška.....	14
3 Popis měření na vrtech na lokalitě Potůčky-Podlesí.....	16
3.1 Popis prováděných zkoušek.....	19
3.1.1 VTZ s jedním pakrem	19
3.1.2 VTZ se dvěma pakry.....	20
3.1.3 Jednostupňové VTZ	20
3.1.4 Vícestupňové VTZ.....	21
3.2 Vícestupňové VTZ – Potůčky.....	21
3.3 Průběh a realizace VTZ	23
4 Používaný software při simulování.....	26
4.1 Generátor sítí puklin	26
4.2 Konvertor	27
4.3 GMSH.....	27
4.4 FLOW123D	28
5 Kombinovaný model proudění kapaliny.....	29
5.1 Kompatibilní a nekompatibilní propojení elementů různé dimenze... 30	
6 Testování modelu proudění	32
6.1 Test na jednoduché síti 1D a 2D, nekompatibilní propojení	33
6.1.1 Test 1.....	33
6.1.2 Test 2.....	34
6.1.3 Test 3.....	35
6.1.4 Test 4.....	36
6.2 Vliv koeficientu přestupu na puklině, nekompatibilní propojení	38

6.3	Simulace vodních tlakových zkoušek na puklinové síti	45
7	Závěr	50
8	Literatura.....	51

Seznam obrázků

Obrázek 3.1:	Pozice vrtů na lokalitě Potůčky.....	16
Obrázek 3.2:	Schéma testovací soustavy.....	18
Obrázek 3.3:	Jednostupňové VTZ na vrtu PTP4a.....	21
Obrázek 3.4:	Vícestupňové VTZ.....	23
Obrázek 4.1	Příklad diskrétní puklinové sítě.....	26
Obrázek 4.2:	Testovací síť vizualizovaná systémem GMSH.....	28
Obrázek 5.1:	Příklad nekompatibilního (vlevo) a kompatibilního (vpravo) propojení elementů (1D - modře a 2D - žlutě).....	30
Obrázek 5.2:	Síť s 1D a 2D elementy ($h_1 > h_2$).....	31
Obrázek 6.1:	Testovací síť.....	33
Obrázek 6.2:	Výsledky výpočtu testovací sítě.....	34
Obrázek 6.3:	Schématické znázornění naklonění pukliny (vrt + nakloněná puklina).....	35
Obrázek 6.4:	Grafické zobrazení výsledků testovací sítě (vrt + nakloněná puklina).....	36
Obrázek 6.5:	Zobrazení výsledků testovací sítě (dvě pukliny + dva vrty).....	37
Obrázek 6.6:	Testovací síť.....	38
Obrázek 6.7:	Výpočty na testovací síti vizualizované programem GMSH.....	39
Obrázek 6.8:	Schématické znázornění (vrt + puklina).....	39
Obrázek 6.9:	Graf závislosti absolutních hodnot toku puklinou u_3 na koeficientu přestupu σ	40
Obrázek 6.10:	Graf závislosti relativních hodnot toku puklinou u_3/u_1 na koeficientu přestupu σ	41
Obrázek 6.11:	Graf závislostí relativních hodnot toku puklinou u_3/u_1 na koeficientu přestupu σ	42
Obrázek 6.12:	Tabulka s normovanými velikostmi relativních hodnot toku puklinou u_3/u_1	43
Obrázek 6.13:	Tabulka s hodnotami VTZ35.....	45
Obrázek 6.14:	Schéma hlavních puklinových systémů na lokalitě Potůčky-Podlesí dle předpokladu Lenky Rukavičkové.....	46
Obrázek 6.15:	Síť vytvořená podle schématu hlavních puklinových systémů na lokalitě Potůčky v hloubce od 60 do 90m.....	47

Obrázek 6.16: Simulace na testovací síti (snaha o nezatížený stav).....	47
Obrázek 6.17: Simulace při konstantním zatížení části vrtu PTP-5 (pohled ze shora).....	48
Obrázek 6.18: Hodnoty naměřených veličin vybrané VTZ.....	49

1 Úvod

Data vodních tlakových zkoušek byla získána z hydrogeologického výzkumu na lokalitě Potůčky-Podlesí, která se nachází na severním svahu vrchu Pískovcová skála v Krušných horách. V průběhu let (2000-2004) zde byly vyvrtány tři výzkumné vrty vzdálené od sebe přibližně 10m a tvořící vrcholy pravoúhlého trojúhelníku. Tato konfigurace vrtů umožnila studovat strukturní a hydrodynamické vlastnosti granitu. Cílem hydrogeologického výzkumu bylo stanovení hydraulických vlastností puklinového prostředí a sledování jejich časových a prostorových změn v průběhu hydrodynamického testování. Byla ověřována vhodnost různých typů hydrodynamických testů pro rozpukané horniny s velmi nízkou propustností a jejich metodika byla uzpůsobována účelům výzkumu. Pro kvalitní hydrogeologický výzkum v tomto nehomogenním anizotropním prostředí bylo nezbytné specifické technické vybavení a vhodná metodika experimentů.

V hydrogeologii jsou často používány čerpací zkoušky pro stanovení hydraulických vlastností puklinového prostředí. V oblastech s nízkou propustností je jejich využití omezené, jelikož přítok podzemní vody je velmi slabý. Na lokalitě Potůčky byly na základě vyhodnocení řady testů popsány metodické poznatky o průběhu vodních tlakových zkoušek. Jednalo se například o závislosti hodnot měřených spotřeb na délce trvání zkoušky, hloubce sledované etáže, počtu a orientaci puklin v etáži. Tyto zkoušky jsou zajímavé z hlediska výzkumu, protože jim byla na rozdíl od jiných testů doposud věnována jen okrajová pozornost.

Průběhy vybraných dat VTZ byly simulovány pomocí programů – používané na katedře modelování na Technické univerzitě v Liberci – a to různými přístupy (ryze puklinový, ekvivalentní porézní médium a kombinovaný) v různých variantách velikosti sítě, hustoty puklin, zadání okrajových podmínek apod. Jednotlivé modely VTZ byly kalibrovány pomocí parametrů propustnosti, koeficientu stlačitelnosti a příp. přestupového koeficientu.

Z výsledků těchto modelů byla navržena metodika simulace vodních tlakových zkoušek (tj. vhodný přístup, způsob a typ zadání okrajových podmínek, velikost sítě a počáteční volbu kalibračních parametrů).

Výpočty proudového pole byly provedeny pomocí programu FLOW123D, ve kterém je implementován model založený na kombinovaných sítích. Výsledky byly vygenerovány v podobě textových souborů, které se dále musely zpracovat do grafické podoby. Jako vizualizační prostředek pro puklinové modely byl použit program GMSH. Je to obecný pre- a post- procesor pro matematické modely, které jsou založeny na metodách diskretizujících prostorové oblasti do podoby sítí. GMSH je volně šířená aplikace pod licencí GNU-GPL, proto může být zdarma používána pro komerční i nekomerční aplikace, pouze při zachování copyrightu původních autorů. Program je možno též upravovat a dále vyvíjet, při zachování původní licence a copyrightu. Domovská stránka GMSH je <http://www.geuz.org/gmsh/>.

2 Základní pojmy

2.1 Hydraulika

Hydraulika je věda, která se zabývá zákony rovnováhy a pohybem kapalin. Je rozdělena na dvě hlavní části:

- hydrostatika - zabývá se zákony rovnováhy kapalin v klidu
- hydrodynamika - zabývá se zákony pohybu kapalin

Hydraulika, její základní zákony rovnováhy a pohyb kapalin, se využívá v hydrogeologické praxi při měření přítoků, při navrhování hydrogeologických vrtů, odpadových potrubí, při stanovení piezometrických výšek a tlaků ve zvodněných vrstvách, jako je při studiu hydrauliky podzemních vod.

2.2 Hydrogeologické vrty, typy hydrodynamických zkoušek

Nejrozšířenější záchytná zařízení na využívání podzemních vod a na testování zvodněného prostředí jsou svislá záchytná zařízení. Mezi ně patří vrtané studně (často nazývané jednoduše vrty), zarážené studně a kopané studně. Do skupiny svislých záchytných zařízení zařazujeme také průzkumné studně. Pokud tyto studně jsou vrtané, obvykle je nazýváme hydrogeologické vrty.

V hydrogeologii je často aplikovaná odběrová (čerpací) zkouška. Jedná se o hydrodynamickou zkoušku, kterou se určuje vydatnost studně, hydraulické parametry zvodněného prostředí a hydraulické vlastnosti studně. Čas, hladina nebo snížení a vydatnost jsou tři základní veličiny měřené při průběhu zkoušky. Existují tři základní způsoby vykonávání odběrových (čerpacích) zkoušek:

- Zkouška s konstantní vydatností
- Zkouška s konstantním snížením
- Zkouška s proměnným čerpaným množstvím nebo snížením

První dvě zkoušky se dají v jednoduchých hydrogeologických podmínkách vyhodnotit analytickými metodami. Třetí zkouška se může interpretovat jen pomocí metod modelování.

Slug testy jsou hydrodynamické zkoušky, které nejsou vhodné pro nehomogenní horninové prostředí s koeficientem propustnosti k menším jak 10^{-9} . V puklinovém prostředí pevných hornin přitom k kolísá zpravidla v rozsahu $10^{-6} - 10^{-14} \text{ m.s}^{-1}$ a realizace slug testů je zejména v takto málo propustných horninách časově náročná. Nevýhodou těchto testů je také jejich malý dosah od osy vrtu. V prostředí s nízkou propustností se slug testy omezují pouze na oblast, která je narušená vlastním vrtným procesem.

Další hydrodynamickou zkouškou je stopovací zkouška, která je založena na vtláčení roztoku (stopovače) do puklinového prostředí a na sledování lokální a časové odezvy. Na lokalitě Potůčky byly tyto testy provedeny na závěr testovací kampaně v roce 2004. Do předem vytipovaných puklin byl vtláčen stopovač – roztok NaCl. Díky těmto zkouškám bylo umožněno přesně identifikovat soustavu komunikujících puklin i míru komunikace při různých tlakových gradientech.

Poslední zmíněnou hydrodynamickou zkouškou je vodní tlaková zkouška (dále jen VTZ), která je podrobněji popsána v následující kapitole.

2.3 Vodní tlaková zkouška

Jedna z hydrodynamických zkoušek pro zjišťování propustnosti hornin je vodní tlaková zkouška. V inženýrsko-geologické praxi je například použita při zakládání vodních nádrží nebo tunelů. Ve srovnání se slug testy je VTZ zahrnuta větší část horninového prostředí a dá se použít i v prostředí s velmi nízkou propustností. Pro dané prostředí na lokalitě Potůčky se VTZ ukázaly v porovnání s ostatními hydrodynamickými zkouškami jako vhodnější pro svoji univerzálnost.

VTZ je možno rozdělit do dvou kategorií podle:

- Charakteru a cíle zkoušky
 - o Zkoušky na jednom vrtu - reakce na sousedních vrtech jsou bez záznamu
 - o Interferenční zkoušky - se záznamem reakce na vrtech sousedních
- Metodiky zkoušky
 - o Zkoušky se standardní metodikou
 - o Zkoušky speciální

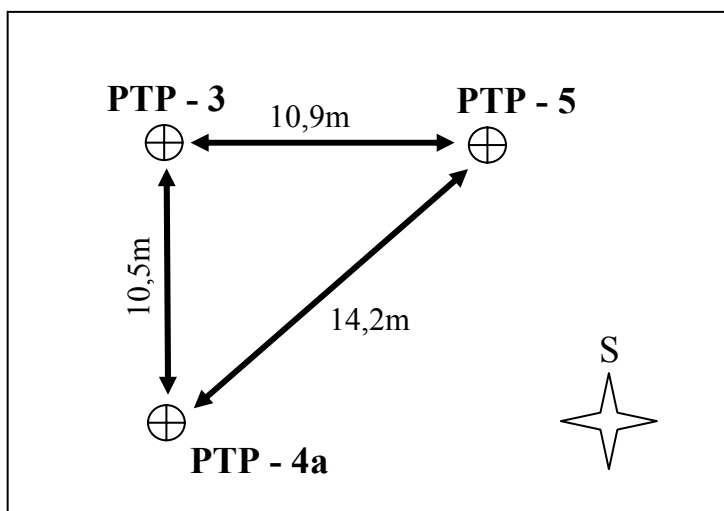
Jednotlivé kategorie zkoušek se samozřejmě prolínají.

Speciální vodní tlakové zkoušky se od standardních VTZ liší délkou testované etáže, délkou trvání vtlačecí fáze, hodnotou a počtem aplikovaných vstupních tlaků.

3 Popis měření na vrtech na lokalitě Potůčky-Podlesí

Vodní tlakové zkoušky se v současné době stále více uplatňují při hydrogeologickém výzkumu kompaktních rozpukanych hornin. VTZ je možné použít i v prostředí s velmi nízkou propustností, kde čerpací zkoušky jsou v tomto případě zcela vyloučeny. Takovéto prostředí se nachází v Krušných horách na lokalitě Potůčky – Podlesí.

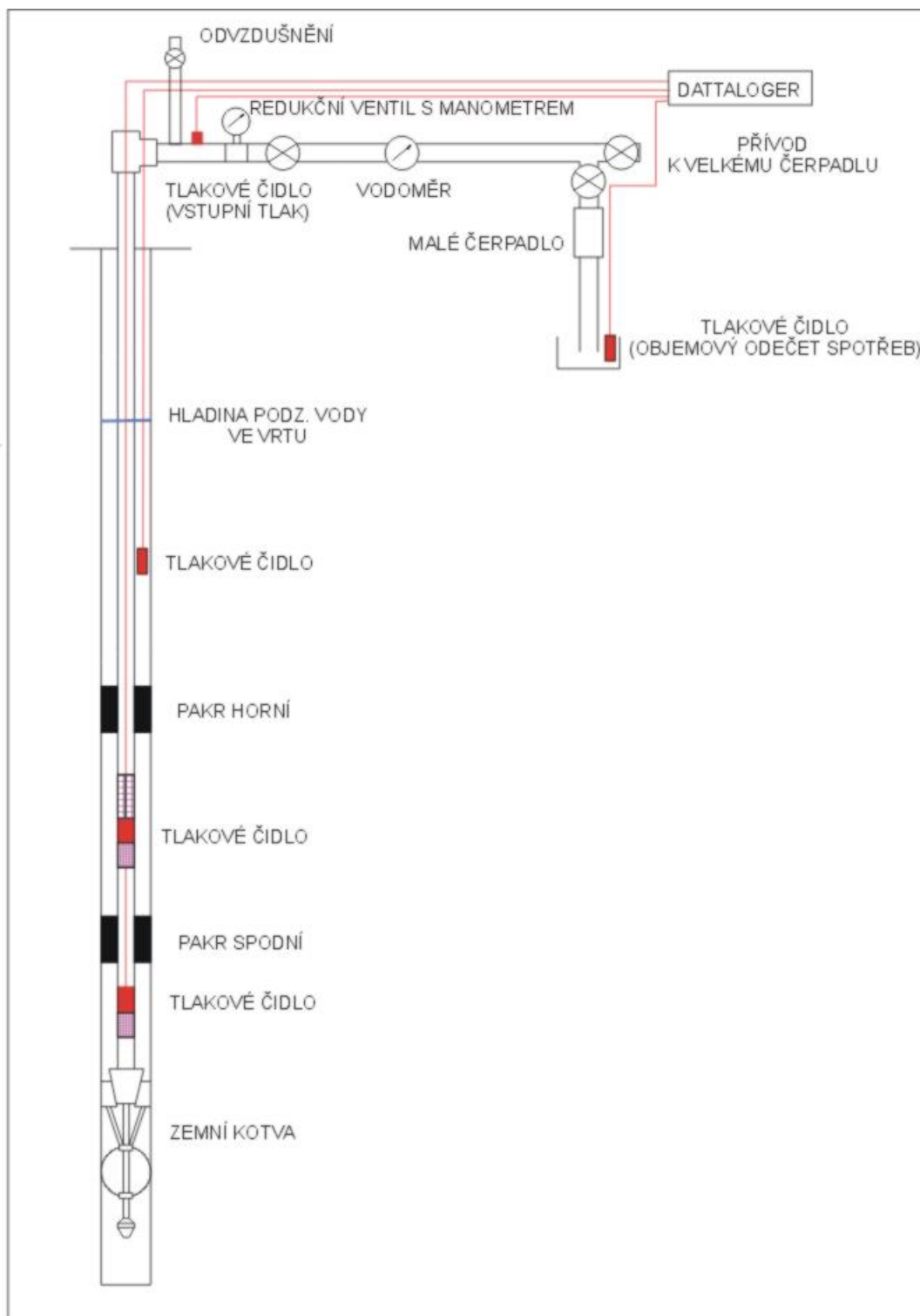
V puklinovém prostředí granitových masivů na lokalitě Potůčky byly v letech 2000-2001 vyvrtány dva výzkumné vrty PTP3 a PTP4a do hloubek 349m a 300m. Vzdálenost těchto vrtů je 10,5m. V roce 2004 byl vyvrtán nový vrt PTP5 do hloubky 296m, který leží kolmo ke spojnici dvou předešlých vrtů ve vzdálenosti 10,9m od vrtu PTP3. Vrty jsou tudíž tvořeny vrcholy pravoúhlého trojúhelníku (přehledně zobrazeno na Obrázku 3.1).



Obrázek 3.1: Pozice vrtů na lokalitě Potůčky

Podzemní voda se v tomto puklinovém prostředí pohybuje po preferenčních cestách. Buď proudí po jednotlivých otevřených puklinách, nebo po puklinových zónách (systém puklin), které jsou obklopeny horninami s velmi malou propustností. Puklinové systémy mají různou piezometrickou úroveň a různou propustnost. V tomto nehomogenním anizotropním prostředí je pro kvalitní hydrogeologický výzkum nezbytná vhodná metodika experimentů a k tomu patřičné technické vybavení.

Hydrodynamické testy byly provedeny etážově na částech vrtů. Jednotlivé úseky byly izolovány pomocí pakrů vytvořené z pryže. Komunikace mezi manipulačními tyčemi o různých délkách a těmito pakry umožňovala testování libovolné části vrtu o délce jednoho metru a více. Dále sestava pro VTZ (Obrázek 3.2) obsahovala vysokotlaké čerpadlo a zařízení pro odečet množství vtlačené vody do vrtu. V průběhu testů byl pomocí čidel monitorován tlak pod spodním pakrem, v etáži mezi pakry, ve vrtu nad pakry. Přesnost tlakových čidel pro záznam objemové změny spotřeb vtlačené vody je $10^{-4} \text{ l.min}^{-1}$.



Obrázek 3.2: Schéma testovací soustavy

Začátkem roku 2004 firma Karotáž a Cementace (K+C) Hodonín dokončila vývoj a výrobu speciálního multipakrového systému. Skládá se ze soustavy šesti mechanických pakrů a tlakových čidel. Pomocí multipakrového systému byly monitorovány

piezometrické úrovně hladiny podzemní vody v různých hloubkách, odezvy na vrtání (při průběhu vrtání vrtu PTP5) a na hydrodynamické zkoušky ve vrtech.

Signály z měřících jednotek (tlaková čidla) byly přenášeny kabely a zaznamenány do datové jednotky. Datová jednotka zahrnovala systém dataloggeru a přenosných počítačů. Díky tomuto vybavení mohl být průběh zkoušek operativně přizpůsoben reálným situacím.

3.1 Popis prováděných zkoušek

Při hydrodynamických testech se vodní tlakové zkoušky dělí:

- Podle počtu použitých pakrů
 - o VTZ s jedním pakrem (sestupné)
 - o VTZ se dvěma pakry (vzestupné)
- Podle počtu tlakových stupňů
 - o Jednostupňové
 - o Vícestupňové

3.1.1 VTZ s jedním pakrem

Průběh jednotlivých VTZ s jedním pakrem se provádí od svrchní části vrtů až po spodní. Proto se tyto zkoušky také nazývají sestupné. Tento typ testů upřednostňují inženýrství geologové, kteří kladou velký důraz na postupné ucpávání puklin vrtným kalem v průběhu vrtného procesu. Otevřeným systémem výplachu s čistou vodou je možné výrazné omezení zanášení puklin.

V provozních podmínkách se otevřený systém výplachu nedá vždy použít, protože zpomaluje vrtný proces. Zkoušená etáž je někdy při inženýrsko-geologickém průzkumu po ukončení VTZ zacementována jílovocementovou suspenzí. Při dalším VTZ sice tento postup zamezí obtékání kolem pakrů, ale vrt je pro jiné testování znehodnocen. Není možné vrt využít k monitoringu, interferenčním zkouškám, odběrům vzorků podzemních vod a není ani možné opakovat zkoušky na sporných nebo zajímavých úsecích. Při hydrogeologickém výzkumu se proto nepoužívá.

3.1.2 VTZ se dvěma pakry

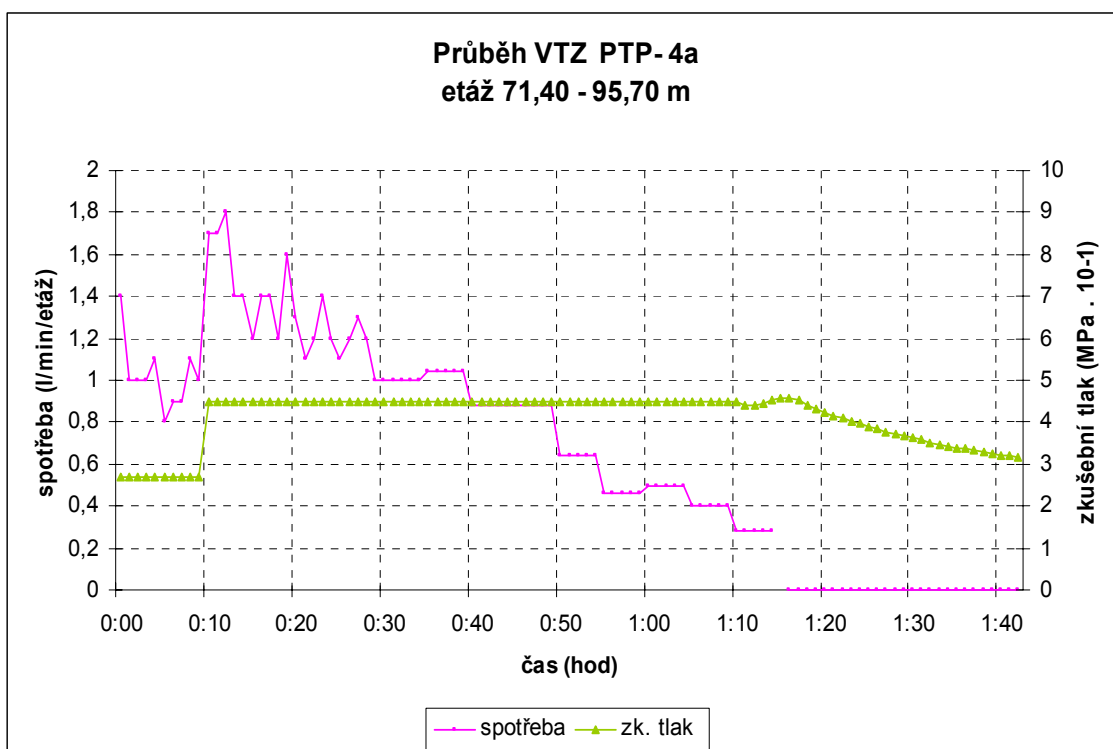
Tento typ testů se také nazývá vzestupný, poněvadž VTZ s neměnnou vzdáleností pakrů bývají obvykle zahájeny u dna vrtu a postupuje se směrem nahoru. Jsou široce využívány v různých etapách hydrogeologického výzkumu horninového prostředí. Nevýhodou VTZ se dvěma pakry je obtížné zjišťování obtékání spodního pakru. Proto se zde umísťuje tlakové čidlo, které zaznamená zvýšení tlaku v případě, že se pakr porouchá.

V praxi je obvykle vlivem manipulace s nářadím, usazováním pakru a neustálenými podmínkami v úseku pod spodním pakrem zvýšen tlak. V průběhu VTZ, kdy v testované etáži tlak klesá, často obtékání spodního pakru pouze zpomalí pokles tlaku a proto se dá těžko identifikovat. V etáži se může také díky obtékání pakrů indikovat náhlé zvýšení spotřeby a snížení tlaku. Pakry mohou být obtékány i přirozenou cestou. Jedná se o síť navzájem propojených puklin. Projevuje se pozvolným zvyšováním tlaku v úsecích nad svrchním a pod spodním pakrem a nelze mu nijak zabránit.

3.1.3 Jednostupňové VTZ

U jednostupňových VTZ je na jedné etáži aplikován pouze jeden zkušební tlak. Tento typ umožňuje delší dobu záznamu vývoje spotřeb s časem a lépe se přiblížit ustálenému proudění. Hodnoty propustnosti lépe odpovídají skutečnosti.

Výsledek jednostupňové VTZ se vkládá do grafu (viz. Obrázek 3.3). Jedná se o závislost spotřeb na čase při zvoleném zkušebním tlaku.



Obrázek 3.3: Jednostupňové VTZ na vrtu PTP4a

3.1.4 Vícetupňové VTZ

Na jedné etáži je u vícetupňových VTZ vyzkoušeno několik různých tlakových stupňů. Tlaky se zpravidla postupně zvyšují a pak se opět snižují na původní hodnotu. Výsledkem je jako u jednostupňových VTZ graf průběhu spotřeby na zkušební tlaku.

Zkoušky se používají v prvních fázích hydrogeologického výzkumu (většinou při VTZ v průběhu vrtných prací) a běžně i u inženýrsko-geologickém výzkumu.

3.2 Vícetupňové VTZ – Potůčky

Běžným průběhem zkoušek je aplikace tří tlakových stupňů A,B,C (kombinace A₁-B₁-C-B₂-A₂). Měří se spotřeba pro každý tlakový stupeň. Doba měření se často liší mezi vzestupnou větví VTZ (postupné zvyšování tlaku) a větví sestupnou (postupné snižování tlaku). Při sestupné větvi je délka měření kratší. Měření pro každý tlakový stupeň ve větvi vzestupné je například 20 minut a jen 5 minut měření ve větvi sestupné.

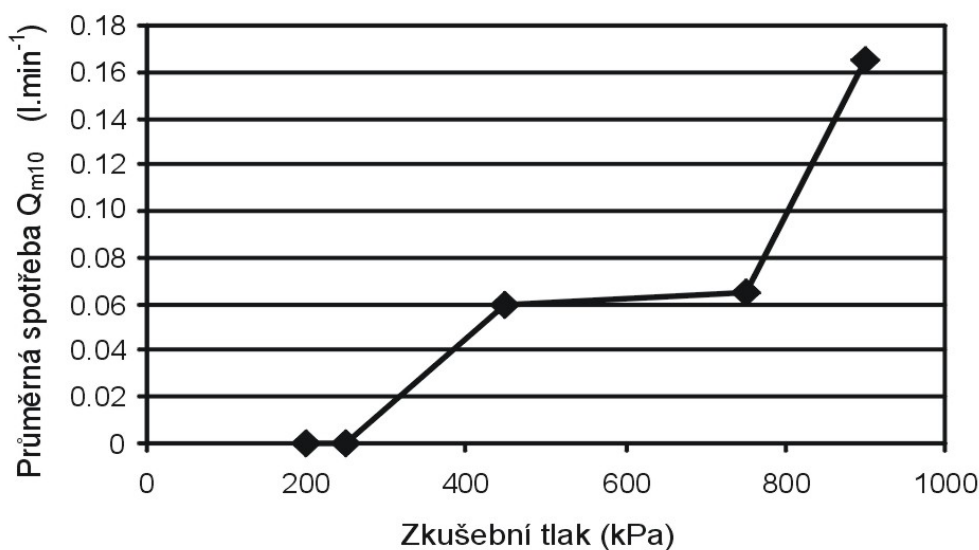
Další možností je aplikace více tlakových stupňů a dvou tlakových cyklů na jedné etáži. Příklad: Etáž je zkoušena při tlaku 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1 MPa (Verfel 1983). Když se dosáhne

ustáleného proudění (ustálené spotřeby) při tlakovém stupni A, pak zkouška pokračuje buď poklesem tlaku na výchozí přirozenou úroveň a opětovným zvýšením na tlakový stupeň B nebo okamžitým zvýšením tlaku na tlakový stupeň B. V praxi není skoro nikdy dosaženo ustáleného proudění kvůli krátké době měření při jednom tlakovém stupni (5-20 min).

Pokles tlaku mezi jednotlivými stupni je časově náročný. Přesto se snižování tlaku provádí pro vyrovnaní tlakových poměrů v puklinách, aby výchozí podmínky byly stejné pro každý tlakový stupeň. Obvykle se tlak v etáži snižuje po dobu 5 minut. V puklinovém prostředí s nízkou propustností by odlehčení, aby splnilo svůj účel, muselo trvat několik hodin. Na lokalitě Potůčky u VTZ granitového masivu dokonce při odlehčení mezi tlakovými stupni vytékala voda u některých tlaků testované etáže (Rukavičková 2002). Vytečení bylo způsobeno elasticitou (zásobností) horninového prostředí a náradí. Nastávají pak komplikace se záznamy a s vyhodnocením zkoušek. Při hydrogeologickém průzkumu se dává přednost plynulému nástupu a snižování tlakových stupňů. Zásobnost horninového prostředí také komplikuje přechod na nižší tlakový stupeň při sestupné větvi VTZ. Během testu se pod vysokým tlakem pukliny naplní vodou a při přechodu na nižší stupeň způsobí zpětný tlak, kterým zkresluje reálnou hodnotu tlaku testované etáže.

Výsledky vícestupňových VTZ se vynášejí do grafu závislosti spotřeb ($\text{l. min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ nebo na etáž) na zkušební tlaku (MPa nebo kPa). Tato závislost by měla mít lineární průběh a sklon vynesené přímky by měl odpovídat propustnosti. Ve skutečnosti tomu tak není. V praxi je závislost nepravidelná a linie (vzestupné a sestupné) VTZ mají různý průběh. Tato odlišnost je způsobena deformací a pohybem vrtného kalu a puklinové výplně v puklinách. Drobné částice (úlomky) se vlivem zvýšeného tlaku a toku vody pohybují puklinovou sítí. Užší místa puklin se částicemi zneprůchodní a měřená spotřeba je pak zkreslená, menší než reálná. Při vyšším tlakovém stupni může dojít k průchodu zatarasených částí puklin. Částice se posunou dále a současně může docházet k deformaci puklinové výplně a vytvoření nových cest proudění. Turbulentní proudění v puklinách může být dalším důvodem nelineární závislosti.

Pomocí vícestupňových VTZ bylo možné v počátečních fázích výzkumu lokality stanovit vhodný zkušební tlak pro jednostupňové VTZ, které proběhly v následujících etapách výzkumu. Na následujícím grafu je vynesena závislost vícestupňové VTZ z hloubky 60-130 m na lokalitě Potůčky v Krušných horách (Rukavičková 2002).



Obrázek 3.4: Vícestupňové VTZ

Při hodnotě zkušebního tlaku nad 450 kPa došlo ke stagnaci průměrné spotřeby. Byla nejspíše způsobena postupem vrtného kalu v puklinách. K propláchnutí puklin došlo při tlakovém stupni nad 750 kPa. Dochází k zvýšení průměrné spotřeby (viz. Obrázek 3.4).

Jako optimální tlakový stupeň pro jednostupňové VTZ byl po analýze křivek spotřeb vybrán tlak o hodnotě 450 kPa. Vyšší tlaky způsobovaly deformaci puklinové výplně a při nižších tlacích měřená spotřeba byla příliš malá (hodnoty se blížily často k nule).

3.3 Průběh a realizace VTZ

Granitový masiv na lokalitě Potůčky v Krušných horách je puklinové prostředí rozpukaných, pevných (stabilních) hornin. Zkušební vrty v tomto prostředí není nutné kromě svrchních částí vystrojovat.

Při provádění zkoušek hraje důležitou roli kvalita vody, která se používá k testování. Voda musí být bez nečistot a bez kalu. Při zkouškách musí být voda bez vzduchových bublin. K odstranění těchto bublin se doporučuje používat vodu teplejší než je teplota podzemní vody.

VTZ můžeme rozdělit do pěti základních etap:

- Propláchnutí vrtu
- Usazení pakrů

- Zvýšení tlaku v etáži
- Vlastní VTZ
- Pokles nebo další zvýšení tlaku v etáži

Všechny typy VTZ probíhají podle podobného schématu.

1. Proplachování vrtu se provádí před usazením pakrů. Odstraní se tak vzduch a nečistoty, které se do vrtu dostaly při manipulaci s nářadím. Proplachování se provádí do doby, až se přestanou objevovat vzduchové bubliny. Vysoká stlačitelnost vzduchových bublin zkresluje výsledky VTZ. Proto je velmi důležité, aby se všechny bubliny z vrtu před zahájením VTZ odstranily.

2. Pakry se usazují buď po ukončení proplachu, nebo se zatlačí a nafouknou ještě v při proplachování vrtu.

3. V naplněné etáži je vtlačena voda vysokotlakým čerpadlem. Tlak se v etáži zvyšuje až na předem určenou hodnotu zkušební tlaku (obvykle se hodnoty dosáhne během několika málo minut). Stejnou rychlost nástupu tlaku je nutné dodržet při sérii VTZ u všech etáží. Když je zkoušená etáž vystavena po delší čas kolísání tlaku a nedaří se ustálit zkušební tlak, pak je lépe tuto etáž přestat dál testovat a vrátit se k ní až po ustálení tlakových poměrů. Je možné, že by jinak došlo ke zkreslení průběhu křivky spotřeb v počáteční fázi VTZ.

4. Voda je po ustálení zkušební tlaku vtlačena do etáže. Zároveň je měřena spotřeba, sleduje se zkušební tlak v etáži nebo na ústí vrtu (popřípadě tlak pod a nad zkoušenou etáž). VTZ by měla trvat při jednom tlakovém stupni do té doby, dokud nebude spotřeba ustálená. V literatuře se uvádějí různé optimální délky měření spotřeb. Například délka trvání VTZ v Ground Water Manuálu (USDI 1985) je doporučena 20 minut.

Na lokalitě Potůčky v puklinovém prostředí s nízkou a slabou propustností se naměřily právě v prvních 20 minutách největší poklesy spotřeb. K relativnímu ustálení došlo až ke konci první hodiny měření u slabě propustných hornin a okolo dvou hodin u hornin s nízkou propustností. Spotřeba ale i po druhé hodině stále pomalu klesala. Doba trvání VZT je tedy nutné přizpůsobit horninovému prostředí a výzkumným cílům.

5. Pokles nebo další zvýšení tlaku v etáži se liší podle typu zkoušky:

- a. U jednostupňových VTZ se po ukončení vlastního měření etáž uzavře a je zaznamenáván pokles tlaku v měřené etáži.

- b. U vícestupňových VTZ je v etáži snížen tlak a etáž je otevřena. Tlakové poměry v horninovém prostředí se ustálí před dalším tlakovým stupněm.
- c. Druhou možností pro vícestupňové VTZ je přímé zvýšení tlaku na vyšší tlakový stupeň.

Po ukončení vrtání bylo vhodné pro kontrolu souboru etážových VTZ s pomocí jednoho pakru realizovat VTZ na celé délce vrtu.

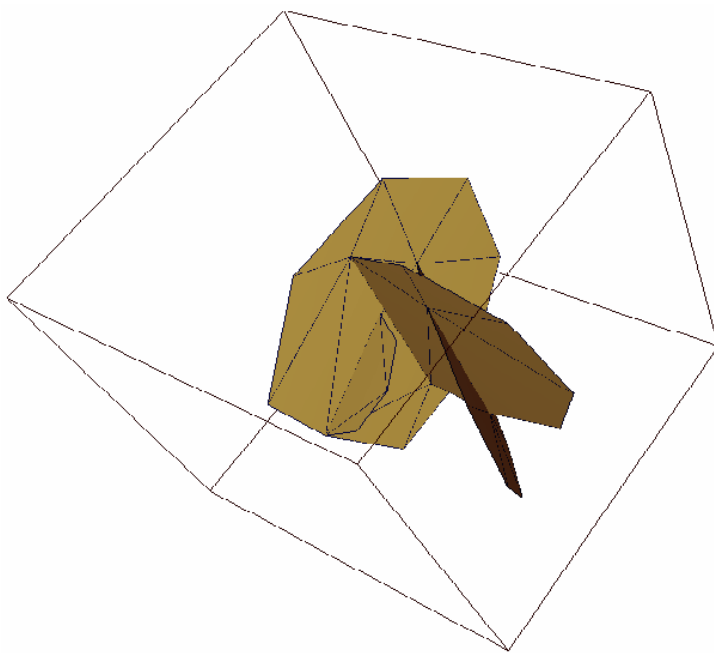
4 Používaný software při simulování

V průběhu prací jsem byl seznámen s několika simulačními programy používanými a vyvíjenými na katedře modelování. Jsou to:

- Generátor sítí puklin
- Konvertor
- GMSH
- FLOW123D

4.1 Generátor sítí puklin

Pro vytvoření sítě, která reprezentuje puklinovou strukturu daného skalního masivu, byl vytvořen Generátor sítí puklin. Tento program generuje síť plošných kruhových disků podle zadaných statistických charakteristik. Kruhové disky jsou dále aproximovány systémem polygonů ve 3-D euklidovském prostoru. Generátor sítí puklin dokáže následně diskretizovat puklinový systém na prostorovou trojúhelníkovou síť. Na obrázku (Obrázek 4.1) je zobrazen příklad puklinového systému tvořený ze čtyř puklin, které byly diskretizovány pomocí Generátoru na trojúhelníkovou síť.



Obrázek 4.1 Příklad diskrétní puklinové sítě

Nevýhodou Generátoru sítí puklin se jeví v případě generování puklinového systému redukovaného pouze na několik málo puklin prokázaných experimentálními testy. Výsledná síť těchto puklin obsahuje malé množství větších elementů. Toto je dáno chováním generátoru, který pukliny pokryje trojúhelníkovými elementy na základě vyhledaných průsečnic puklin. Výsledkem je řídká síť a přesnost použité numerické metody je mimo jiné dána i velikostí elementů sítě.

4.2 Konvertor

Konvertor je pomocný program vytvořený na katedře modelování (KMO), který z výstupních souborů Generátoru sítí puklin transformuje data sítě a výsledky výpočtů, a vytvoří nový soubor v daném formátu. Takto upravený soubor je čitelný programem GMSH.

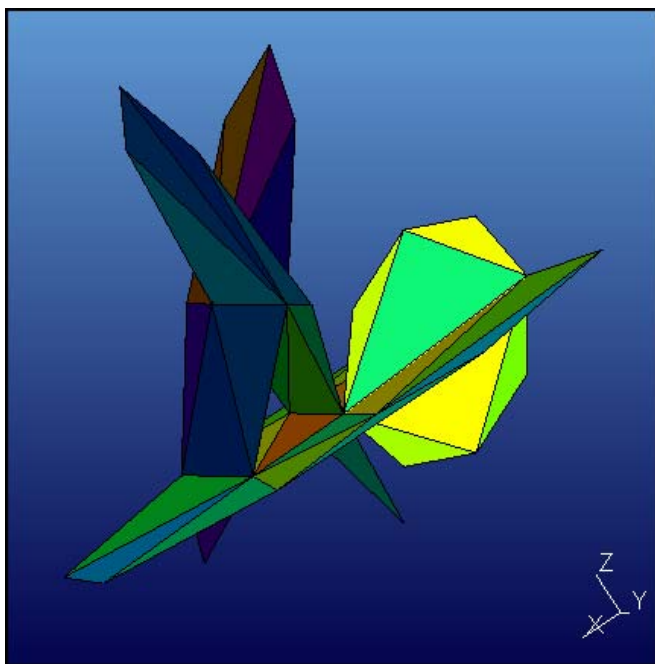
Co se týká sítí, jednalo se pouze o přeformátování dat do požadovaného tvaru, jelikož soubory popisující puklinové síť obsahují více informací než je potřebné pro vstupní soubor programu GMSH. Výsledky výpočtů veličin vztažených ke stěnám sítí byly potřeba přepočítat na veličiny vztažené k uzlům nebo elementům.

4.3 GMSH

Dřívějším problémem na KMO byla nedostatečná vizualizace a grafická prezentace výsledků výpočtů simulačního systému. Byl hledán prostředek, který by tento problém pomohl vyřešit. Vlastní vývoj tohoto prostředku na KMO byl pro finanční, časovou a personální náročnost odmítnut. Do simulačního systému bylo nakonec rozhodnuto začlenění programu GMSH. Program umožňuje zobrazovat síť tvořené plošnými útvary umístěnými v prostoru a poskytuje zobrazení rozložení skalárních a vektorových veličin na těchto sítích. Dále má program schopnost snadné interaktivní kontroly vygenerovaných sítí (tzn. umožňuje posun, rotaci, přiblížení nebo oddálení pohledu), formát vstupních dat je jednoduchý a dobře dokumentovatelný.

GMSH je obecný pre- a post- procesor pro matematické modely, které jsou založeny na metodách diskretizujících prostorové oblasti do podoby sítí. Na KMO je hlavně využíván jako vizualizační prostředek pro puklinové modely. Tento program je volně šířená aplikace pod licencí GNU-GPL (program může být zdarma používán pro komerční i nekomerční aplikace, lze ho také upravovat a dále vyvíjet, ale pouze při

zachování původní licence a autorských práv). Domovská stránka GMSH je <http://www.geuz.org/gmsh/> a autory programu jsou Christophe Geuzaine a Jean-Francois Remacle. Na obrázku (Obrázek 4.2) je dána ukázka puklinové sítě zobrazená pomocí programu GMSH.



Obrázek 4.2: Testovací síť vizualizovaná systémem GMSH

4.4 FLOW123D

Pomocí programu FLOW123D lze získat výpočty proudového pole. V tomto programu je implementován numerický model založený na kombinovaných sítích, který spojuje metody náhrady porézním médiem a stochastických diskrétních puklinových sítí. Model současně vychází ze znalostí hydrogeologů a geologů o proudění v puklinovém prostředí a charakteru tohoto prostředí.

Model proudění pracuje s externím řešičem soustavy lineárních rovnic. Prostřednictvím souborů je řešena komunikace a výměna dat. V diplomové práci byl využit obecný iterační řešič GM6 a také MATLAB, který je vhodný spíše pro malé testovací úlohy.

5 Kombinovaný model proudění kapaliny

Pro simulaci hydraulických procesů v puklinovém prostředí je model proudění kapaliny, který je založen na principu diskrétních stochastických puklinových sítí, nejlepším prostředkem. U těchto puklinových modelů se prostředí skalního masivu charakterizuje sítí puklin aproximovaných plošnými eliptickými disky, jejichž frekvence, velikost, orientace a rozevření jsou statisticky popsány z geologických výzkumů.

Problém u většiny modelů nastal při diskretizaci puklinové sítě, kde automatické vygenerování vede na síť s velmi malou regularitou. V případě 2D elementů trojúhelníkového tvaru se jedná o elementy, ve kterých se nacházejí úhly větší než 170° nebo menší jak 5° . Výše uvedený problém byl vyřešen přístupem založeném na kombinovaných sítích.

Kombinovaný model byl založen na poznatcích puklinového prostředí pevných horninových masivů. V modelu se samotná hornina považuje za zcela nepropustnou, tedy propustnost horniny od propustnosti puklin je zcela zanedbatelná. Avšak i v nejkompaktnějších horninových tělesech se nacházejí pukliny, které vytvářejí puklinovou síť. Jedná se o tzv. malé pukliny, kterými podzemní voda proudí značně pomalu a jejich délka většinou nepřesahuje jeden metr. Tyto pukliny nelze však zanedbat pro jejich kapacitu – mají významnou storativitu, která je důležitá v transportních procesech. Nynějšími prostředky je možné změřit jen omezenou množinu dat získaných pomocí vrtů. V dané oblasti se proto malé pukliny určují v modelech proudění a transportu pouze statisticky.

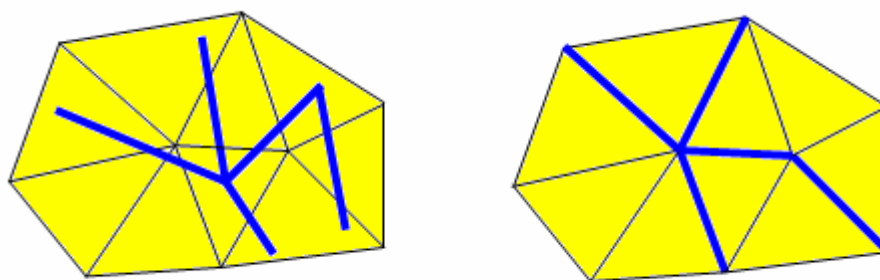
Hydraulicky významnými puklinami proudí většina podzemní vody, mají velké rozměry, velkou propustnost a jejich počet je v dané oblasti relativně malý. Pukliny je možné obvykle dobře určit a potřebné informace jsou dostačující pro účely matematického modelování. Posledním hlavním typem jsou průsečnice hydraulicky významných puklin, ve kterých je možné sledovat nejrychlejší tok kapaliny. Rychlost toku na průsečnicích je většinou o řád vyšší než tok v protínajících se puklinách.

Jak již bylo napsáno, v kompaktním horninovém masivu se nacházejí tři různé typy objektů, které se podílejí na proudění kapaliny. Jsou to:

- Malé pukliny
- Hydraulicky významné pukliny
- Průsečnice hydraulicky významných puklin

5.1 Kompatibilní a nekompatibilní propojení elementů různé dimenze

V kombinovaném modelu je umožněno vytvoření dvou typů spojení elementů různé dimenze. Jedná se o kompatibilní a nekompatibilní propojení – tím se liší od jiných modelů, které nekompatibilní spojení neumožňují.

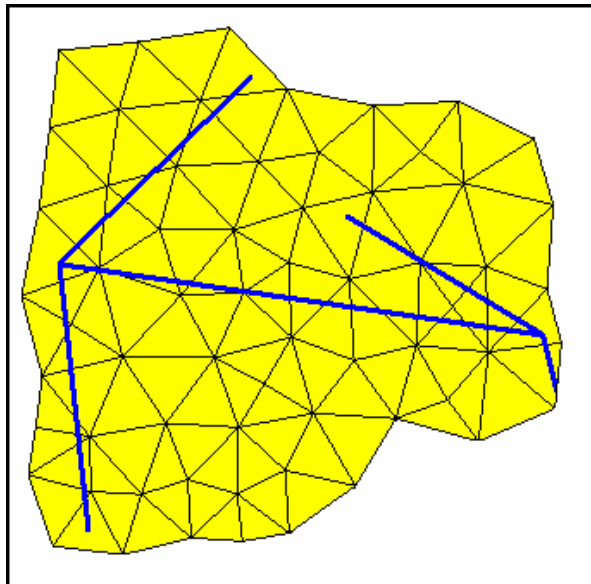


Obrázek 5.1: Příklad nekompatibilního (vlevo) a kompatibilního (vpravo) propojení elementů (1D - modře a 2D - žlutě)

Pojmenování kompatibilní a nekompatibilní spojení je převzato z teorie MKP (Metoda konečných prvků). Jedná se o tzv. podmínku kompatibility, která je však určena pouze pro spojení elementů stejné prostorové dimenze. Logickým rozšířením této podmínky bylo zahrnuto i kompatibilní propojení různé dimenze. O kompatibilním propojení se může hovořit, pokud element nižší dimenze tvoří stěnu (případně hranu) sousedního elementu vyšší dimenze. Slabím místem tohoto propojení je diskretizace oblastí se složitou topologií, jako jsou právě rozpukané horninové masivy.

Nekompatibilní propojení elementů je po stránce generování sítě jednodušší, ale o to z formulačního hlediska obtížnější. Podmínkou pro spojování dvou elementů různé dimenze je zachování zhruba stejné hodnoty diskretizačního parametru h_i pro všechny

typy elementů v daném bodu sítě. Nedodržení této podmínky by směřovalo k výraznému snížení přesnosti modelu. Pokud nastane situace, kdy $h_1 \gg h_2$, docházelo by k přímé výměně hmoty mezi elementy, které by byly od sebe prostorově hodně vzdáleny (viz. Obrázek 5.2).



Obrázek 5.2: Sít' s 1D a 2D elementy ($h_1 \gg h_2$)

6 Testování modelu proudění

Typy dřívějších testovacích úloh byly následující:

- Úloha se známým analytickým řešením – lineární.
- Úloha se známým analytickým řešením – nelineární.
- Test nezávislosti na volbě souřadného systému.
- Testy vlivu propustnosti prostředí.
- Test chování okrajových podmínek Dirichletovského typu.
- Test chování okrajových podmínek Neumannovského typu.
- Test chování okrajových podmínek Newtonovského typu.
- Test chování zdrojů kapaliny.
- Test gravitačního působení.
- Test nízké regularity sítě.

A typy sítí použitých pro testy:

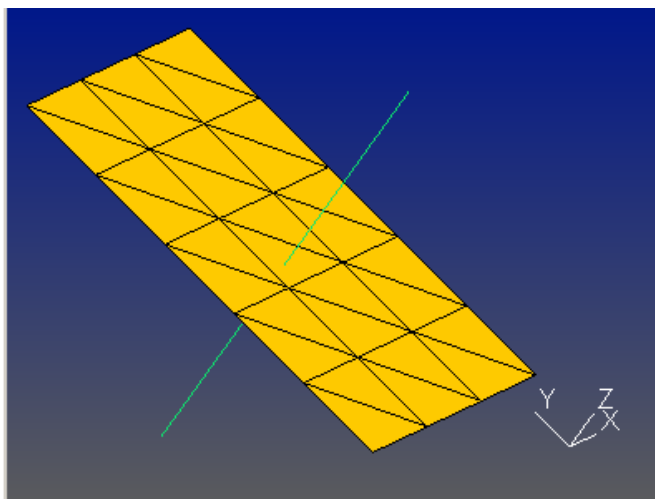
- Sít' 1D prvků.
- Sít' 2D prvků
- Sít' 1D a 2D prvků, kompatibilní propojení.
- Sít' 3D prvků
- Sít' 2D a 3D prvků, kompatibilní propojení.

Co se týká kompatibilního propojení, bylo ověřeno i použito při implementaci několika modelů, ale nekompatibilní propojení nikoliv.

V diplomové práci jsou podrobněji provedeny testy se sítí 1D a 2D prvků, nekompatibilní propojení. Tato konfigurace je potřebná při simulaci vodních tlakových zkoušek prováděných na vrtech v rozpukaném skalním masivu.

6.1 Test na jednoduché síti 1D a 2D, nekompatibilní propojení

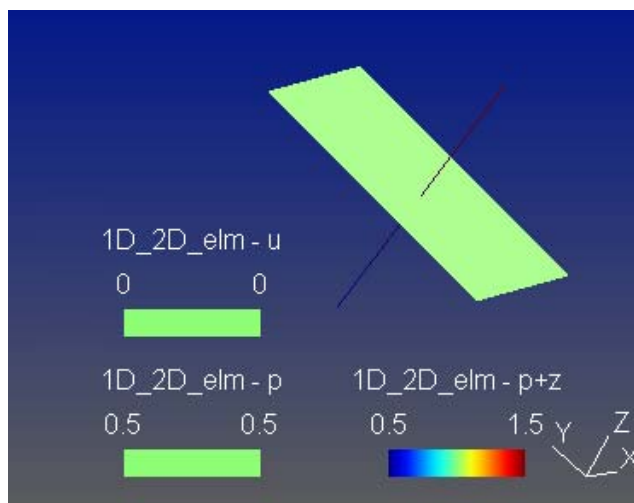
6.1.1 Test 1



Obrázek 6.1: Testovací síť

Síť se skládá z 26 uzlů a z 31 elementů, z toho je 30 elementů trojúhelníkových a jeden element liniový. 1D element charakterizuje vrt, který protíná puklinu (2D elementy). Puklina dělí vrt přesně v jeho polovině, jsou na sebe kolmé a délka liniového elementu je jedna.

Při správně zvolených okrajových podmínkách by se mělo docílit nulového tlakového spádu. Dirichletova okrajová podmínka byla zadána v liniovém elementu, kde na vrtu pro osu $z = 0$ je $p = 0$ a pro $z = -1$ je $p = 1$. Neumannova okrajová podmínka je zadána implicitně na vnějších hranách sítě nulová.



Obrázek 6.2: Výsledky výpočtu testovací sítě

Vysvětlivky:

u	- tlakový spád
p	- absolutní tlak
$p + z$	- piezometrická výška

Tlakový spád je podle předpokladu nulový. Absolutní tlak vyšel na celé puklině konstantní ($p=0.5$). Podle zadaných podmínek by správná hodnota p měla být v rozsahu od nuly do jedné. Piezometrická výška by měla mít při nulovém tlakovém spádu na celé simulované oblasti stejnou hodnotu. Jak je patrné z obrázku, $p + z$ je v intervalu od 0.5 do 1.5.

Po řadě dalších testů, kdy byly vyzkoušeny simulace s různě zadanými okrajovými podmínkami a hodnotami propustnosti pukliny, byly nalezeny další nepřesnosti a chyby ve výpočtech.

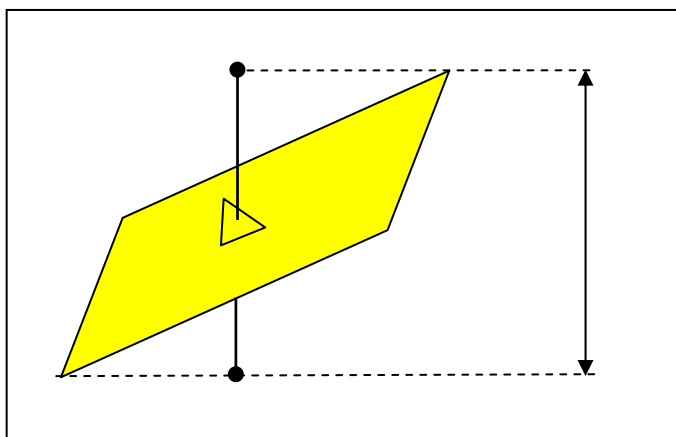
6.1.2 Test 2

Byla provedena úprava testovací sítě. Liniový element byl rozdělen na tři a pět liniových elementů. Při stejně zadaných okrajových podmínkách by tyto dva modely měly dosáhnout stejných výsledků. Odlišných výsledků se dosáhlo pouze u hodnot piezometrické výšky vlivem numerických chyb výpočtů. Chyby byly dostatečně malé a na výsledných modelech by neměly mít podstatný vliv.

Pro další testování byla využita síť, kde liniový element byl rozdělen na tři elementy. Takto vytvořená síť dosahovala porovnáváním se sítí z kapitoly Test 1 lepších – reálnějších výsledků. Závěrem by se dalo předpokládat, že při zadávání více Dirichletových okrajových podmínek na jeden liniový element vede k nesprávným výpočtům.

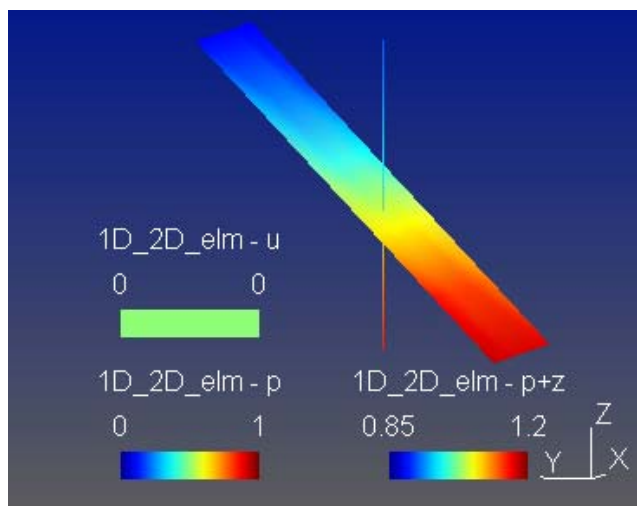
6.1.3 Test 3

Dále byla upravena síť tak, aby puklina na vrt nebyla kolmá a aby horní a spodní hrana pukliny byly ve stejné výšce jako začátek a konec vrtu (viz. Obrázek 6.3).



Obrázek 6.3: Schématické znázornění naklonění pukliny (vrt + nakloněná puklina)

Na výsledném výpočtu by mělo být patrné shodné rozložení absolutního tlaku na vrtu tak i na puklině. Při nulovém tlakovém spádu by piezometrická výška na celé testované síti měla mít stejnou hodnotu. Jak je vidět na obrázku (Obrázek 6.4), piezometrická výška neodpovídá realitě.



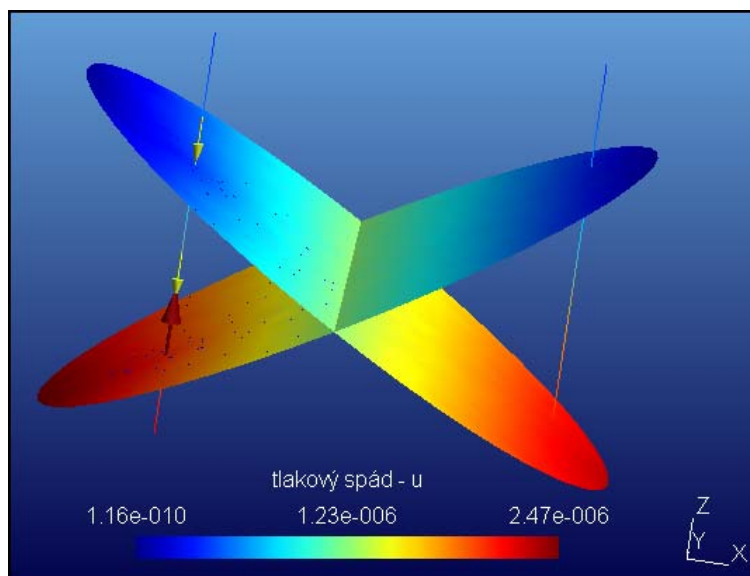
Obrázek 6.4: Grafické zobrazení výsledků testovací sítě (vrt + nakloněná puklina)

6.1.4 Test 4

Byla rozšířena síť na dvě pukliny a jeden vrt, následně na síť o dvou puklinách a dvěma vrty. Na těchto testovacích sítích byly provedeny simulace vtlačení do vrtu.

Nastavení: Na jednom liniovém elementu (vrtu) byla nastavena okrajová podmínka Dirichletova typu, která reprezentuje zkušební tlak. Byla nastavena simulace zapakrovaného vrtu, tzn. na vrtu byly odděleny liniové elementy (vynechána sousednost, aby nedocházelo k přetoku). Toto zadání bylo ozkoušeno s různými hodnotami propustnosti puklin a různými okrajovými podmínkami na puklinách. Vypočítané výsledky na testovacích sítích se ale s předpokládanými hodnotami rozcházely.

Při nastavení simulace testovací sítě do stavu, kdy zkoumaná oblast má být v nezátíženém stavu, vycházely hodnoty tlakového spádu nenulové – řádově nezanedbatelné (viz. Obrázek 6.5).



Obrázek 6.5: Zobrazení výsledků testovací sítě (dvě pukliny + dva vrty)

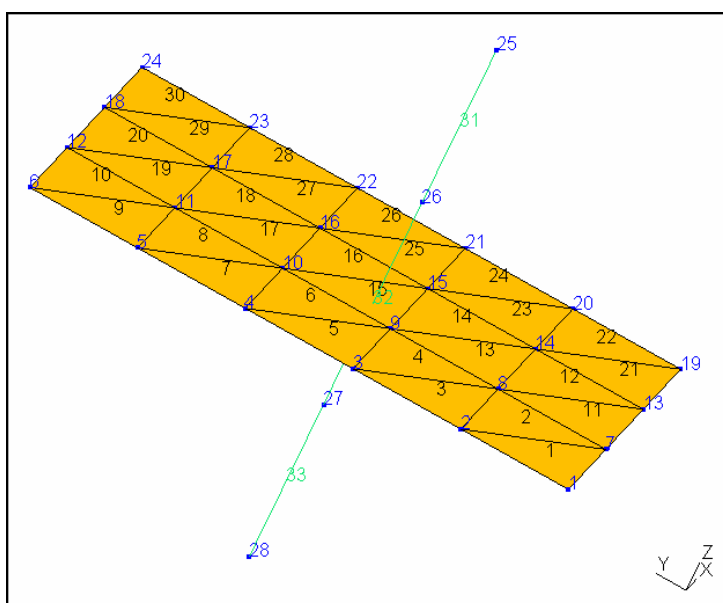
Ověřování testovací sítě:

1. Nejprve byly ze sítě odstraněny obě pukliny a ponechány pouze vrty. Průtok samotnými vrty byl v souladu se zadanými okrajovými podmínkami zcela nulový. Výsledky v tomto případě byly správné.
2. Na testovací síti jsou vrty a pukliny propojeny a vytvářejí uzavřený okruh. Pokud by vlivem zaokrouhlení ve výpočtu došlo k malému tlakovému spádu, dojde v tomto uzavřeném systému k cirkulaci vody.
3. Na testovací síti bylo provedeno rozdělení vrtů. I v tomto případě se však na síti vyskytl nenulový tok řádově nezanedbatelný.

Lze usoudit, že chyba výpočtů na testovací síti je v ne zcela správném nekompatibilním propojení elementů. Pro ověření tohoto tvrzení je zapotřebí spočítat více jednoduchých úloh a následně provést analýzu výsledků.

6.2 Vliv koeficientu přestupu na puklině, nekompatibilní propojení

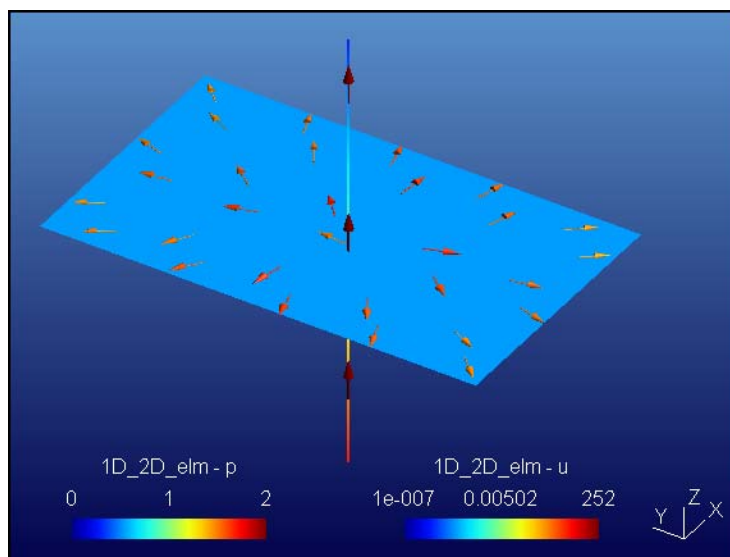
Testovací síť (Obrázek 6.6) se skládá z 28 nodů a 33 elementů. Jedná se o simulaci jednoho vrtu, který protíná jednu puklinu, kde puklinu tvoří 30 trojúhelníkových elementů a 3 liniové elementy představují vrt. Síť je založena na podobném principu jako je testovací síť v kapitole Test1, tedy obsahuje nekompatibilní propojení liniového elementu s trojúhelníkovým elementem.



Obrázek 6.6: Testovací síť

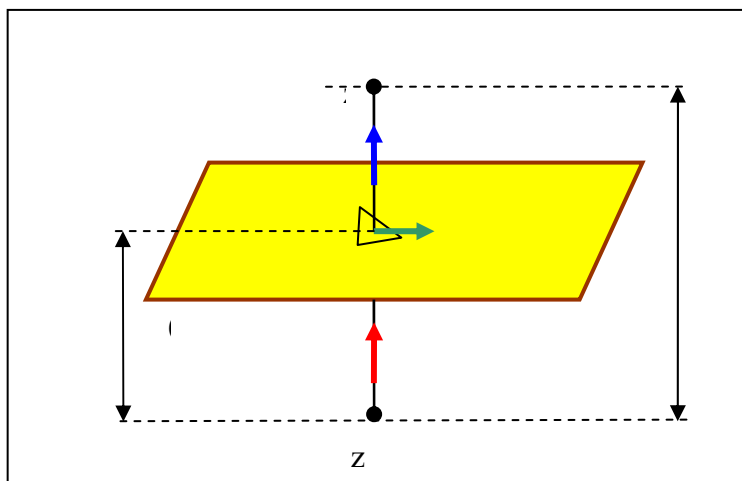
Byla zadána Dirichletova okrajová podmínka na vrt tak, aby na testovací síti vznikl tlakový spád. Po obvodu pukliny byla také na jednotlivé 2D elementy dána Dirichletova okrajová podmínka, která měla menší hodnotu, než předpokládaný tlak v místě nekompatibilního propojení vrtu a pukliny. Hodnoty hydraulické propustnosti k byly zadány jak na vrt tak i na puklinu o stejné velikosti.

Při analýze výsledků bylo zjištěno, že výpočty provedené na testovací síti odpovídaly předpokladu (viz. Obrázek 6.7).



Obrázek 6.7: Výpočty na testovací síti vizualizované programem GMSH

Následně byly provedeny další simulační výpočty s různými hodnotami koeficientu přestupu σ a to v rozmezí v intervalu $<10^{-3}, 10^6>$, přičemž byl ve výsledcích jednotlivých variant sledován absolutní tok puklinou (u_3) a poměr toku puklinou k celkovému toku modelovanou oblastí (u_3/u_1), (viz Obrázek 6.8).



Obrázek 6.8: Schématické znázornění (vrt + puklina)

V nezatíženém stavu (tzn. na simulované oblasti je nulový tlakový spád, tudíž i nulový tok) se předpokládá, že tlakové poměry jsou ve tvaru:

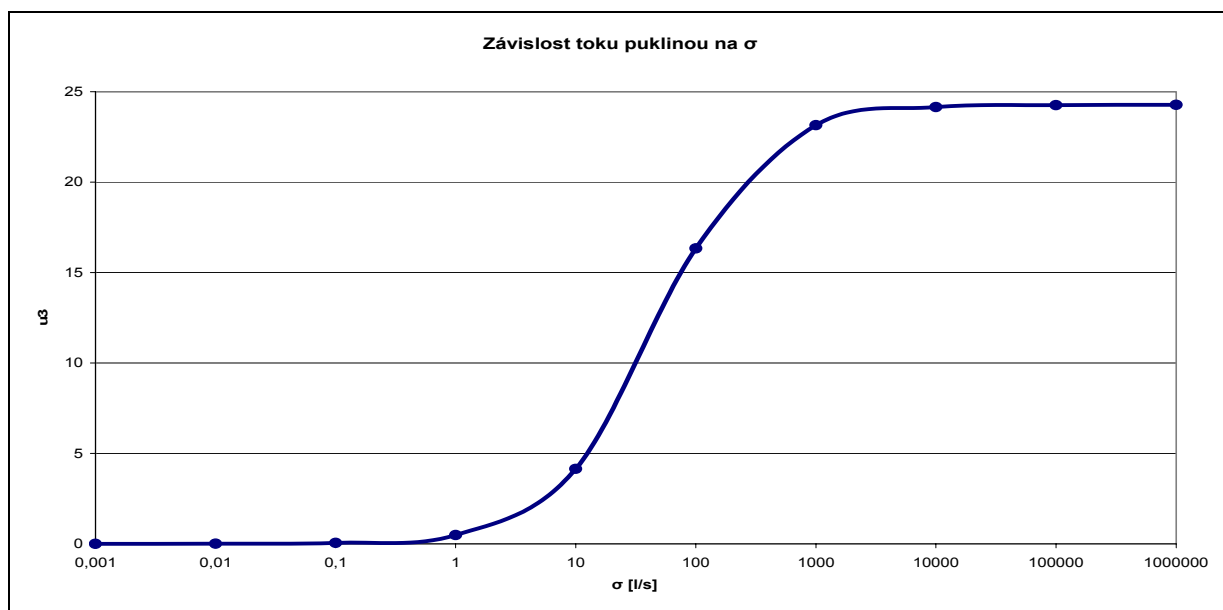
$$\begin{aligned} p_1 &= 1m \\ p_2 &= 0m, \\ p_3 &= 0,5m \end{aligned}$$

kde tlak je udáván v metrech vodního sloupce.

Dále je uvažován případ, kdy tlak p_1 je vyšší než odpovídá uvedenému nezatíženému stavu (příklad: $p_1=2m$). Na ostatních částech simulované oblasti jsou hodnoty ve stejném tlakovém poměru jako v předcházejícím případě. Tlakový spád způsobí tok ve vrtu v záporném směru osy z . V místě, kde vrt protíná puklinu, bude docházet k toku na oblast pukliny.

Ve výsledcích je poté sledováno chování tohoto modelu při různých hodnotách hydraulické propustnosti ve vrtu nebo na puklině a při různých hodnotách koeficientu přestupu mezi 1D a 2D elementy.

Výsledky na simulované oblasti byly postupně zpracovány do grafů. Na následujícím grafu (Obrázek 6.9) je vykreslena závislost toku puklinou na koeficientu přestupu σ . Hodnoty toku u_3 jsou zadány v absolutní hodnotě.



Obrázek 6.9: Graf závislosti absolutních hodnot toku puklinou u_3 na koeficientu přestupu σ

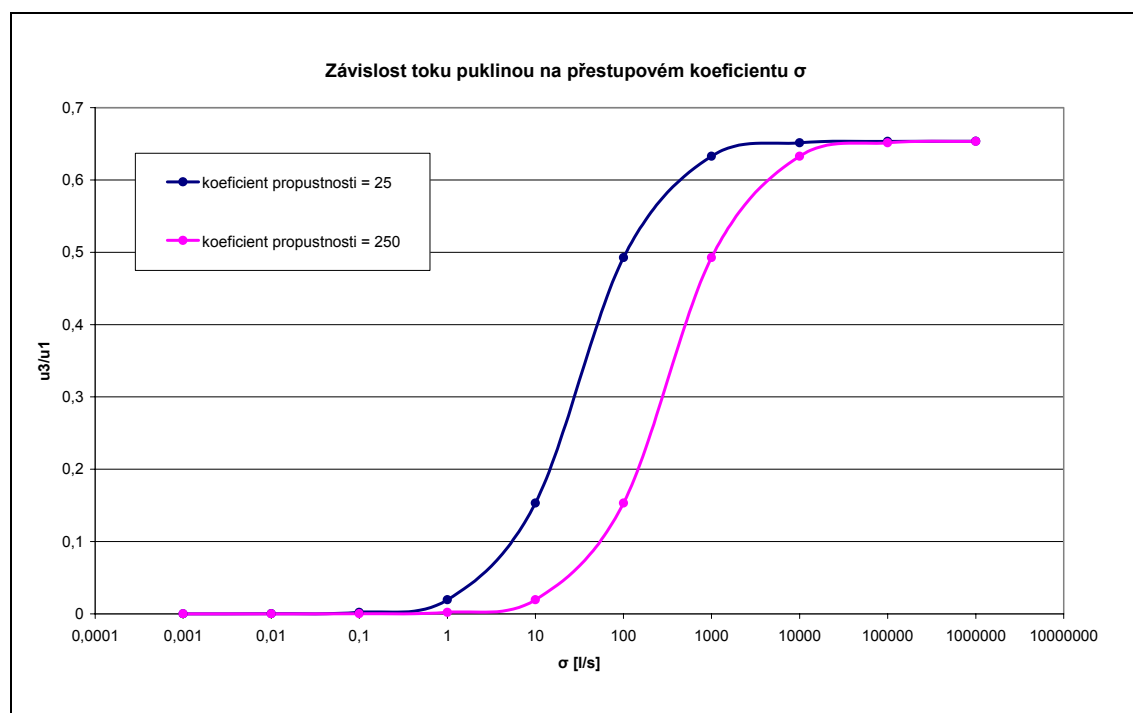
Při těchto testech byla ponechána stejná hodnota hydraulické propustnosti $k=25$ jak ve vrtu tak i na puklině. Jak je patrné z grafu, testovaný model je citlivý na koeficientu přestupu k v řádu od 0,1 do 1000. Mimo uvedený rozsah koeficient přestupu nemá na

výsledné hodnoty toku u_3 puklinou podstatný vliv. Vrt má svoji konečnou propustnost. Proto nikdy nedojde k situaci, že by všechny tok ve vrtu (u_1) přestoupil do pukliny a v části vrtu nad puklinou by tok (u_2) byl nulový.

Při dalších testech byla změněna hodnota koeficientu propustnosti k na celé testovací síti. Na následujícím grafu (Obrázek 6.10) je znázorněna změna průběhu závislosti relativního toku u_3/u_1 puklinou na σ při různých hodnotách parametru k . Relativní hodnoty u_3/u_1 znamenají jaká část toku u_1 ve vrtu „poteče“ do pukliny u_3 (u_3 je brán jako součet přetoků stran 2D elementu, který je protínán vrtem). Pro všechny toky v simulované oblasti musí platit vztah:

$$u_1 = u_2 + u_3.$$

Tato vlastnost byla využita pro kontrolu správnosti výpočtů na testovací síti.



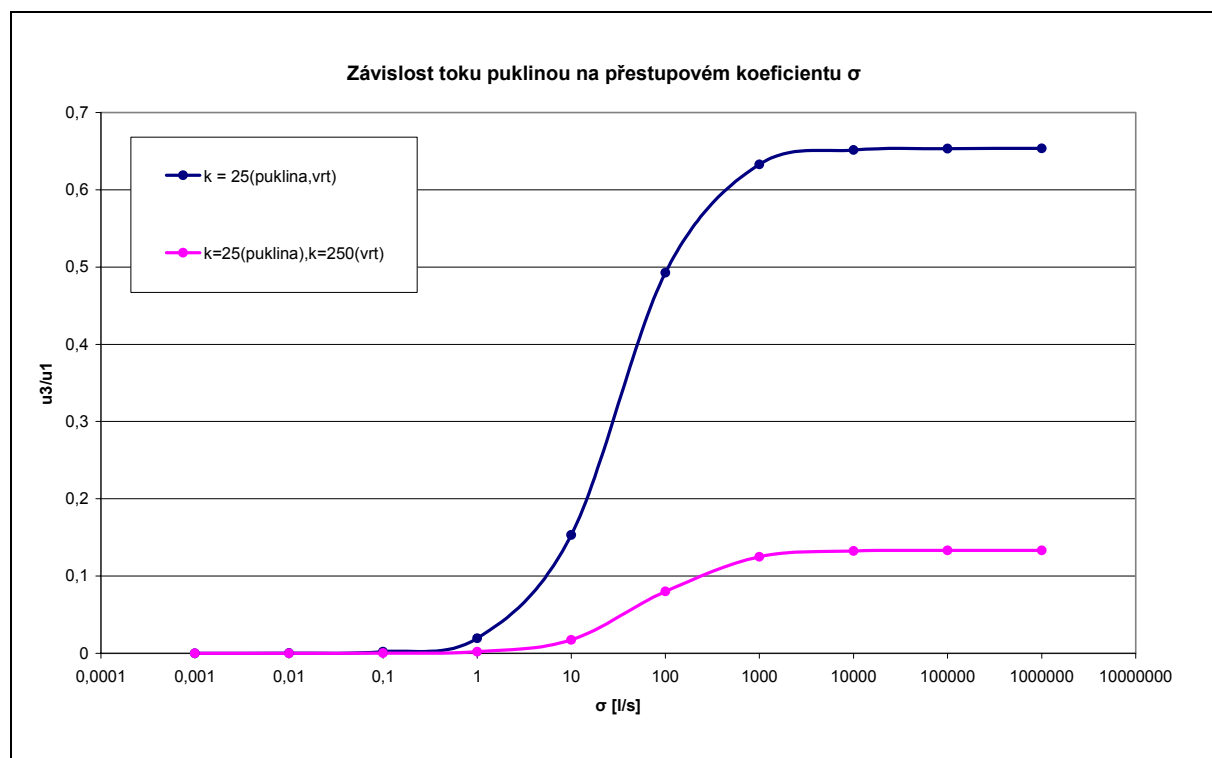
Obrázek 6.10: Graf závislosti relativních hodnot toku puklinou u_3/u_1 na koeficientu přestupu σ

Vztah parametru σ k modelované realitě:

V reálné konfiguraci, kterou se snažíme v našem modelu simulovat, neexistuje žádná fyzická hranice mezi vrtem a puklinou. Při používání u daného způsobu kombinace elementů různé dimenze se požaduje, aby byl pokud možno eliminován vliv hranice

zanesené do modelu koeficientem přestupu σ . Tedy koeficient přestupu mezi elementy různých dimenzí by měly být v rozmezích o dva řády větší nebo menší, než je zadávaná hodnota koeficientu hydraulické propustnosti sítě.

Koeficienty přestupu σ nemají v těchto případech obdobu ve fyzické realitě. Proto je potřeba tyto koeficienty určit na základě chování modelu. Správné nastavení je však obtížné. Je nasnadě určit metodiku nastavení těchto parametrů.



Obrázek 6.11: Graf závislostí relativních hodnot toku puklinou u_3/u_1 na koeficientu přestupu σ

Na grafu (viz. Obrázek 6.11) je znázorněna jak závislost toku puklinou na přestupovém koeficientu σ , kde na puklině a vrtu je zadána stejná hodnota koeficientu hydraulické propustnosti k , tak i závislost, kde parametr k na vrtu je dán o jeden řád větší než na puklině. Je patrné, že pásma citlivostí obou závislostí jsou stejná. Lze předpokládat, že pásmo citlivosti na koeficientu přestupu σ je určeno řádem propustnosti k méně propustné části testovací sítě.

Pro ověření tohoto tvrzení byly provedeny přepočty relativních hodnot toku puklinou u_3/u_1 . V jednotlivých simulacích s různě zadanými hodnotami hydraulické

propustnosti k byla každá relativní hodnota toku u_3/u_1 vydělena největší její hodnotou. Takto normované velikosti jsou přehledně zobrazeny v následující tabulce (viz. Obrázek 6.12). Je zřejmé, že průběhy křivek jsou si velmi blízké. Můžeme tedy konstatovat, že propustnost k nejméně hydraulicky propustné části testovací sítě je pro tyto tři simulace takřka stejná. Tvzení, že pásmo citlivosti na σ je určeno řádem propustnosti k méně propustné části testovací sítě, je správné.

sít' s hydraulickou propustností k	měření	σ	u_3	u_1	u_3/u_1	$(u_3/u_1)/(u_3/u_1)_{max}$
vrt: $k=25$ puklina: $k=25$	1.	0,001	0,0005	25,0002	0,0000	0,0000
	2.	0,01	0,0050	25,0025	0,0002	0,0003
	3.	0,1	0,0499	25,0249	0,0020	0,0031
	4.	1	0,4899	25,2449	0,0194	0,0297
	5.	10	4,1460	27,0730	0,1531	0,2343
	6.	100	16,3402	33,1701	0,4926	0,7537
	7.	1000	23,1489	36,5744	0,6329	0,9684
	8.	10000	24,1554	37,0777	0,6515	0,9968
	9.	100000	24,2609	37,1304	0,6534	0,9997
	10.	1000000	24,2715	37,1357	0,6536	1,0000
vrt: $k=250$ puklina: $k=25$	1.	0,001	0,0005	250,0002	0,0000	0,0000
	2.	0,01	0,0050	250,0024	0,0000	0,0001
	3.	0,1	0,0499	250,0249	0,0002	0,0015
	4.	1	0,4931	250,2465	0,0020	0,0148
	5.	10	4,3860	252,1921	0,0174	0,1304
	6.	100	20,8339	260,4170	0,0800	0,6000
	7.	1000	33,3349	266,6673	0,1250	0,9376
	8.	10000	35,4627	267,7314	0,1325	0,9934
	9.	100000	35,6906	267,8453	0,1333	0,9994
	10.	1000000	35,7135	267,8567	0,1333	1,0000
vrt: $k=25$ puklina: $k=250$	1.	0,001	0,0005	25,0002	0,0000	0,0000
	2.	0,01	0,0050	25,0025	0,0002	0,0002
	3.	0,1	0,0500	25,0250	0,0020	0,0019
	4.	1	0,4957	25,2478	0,0196	0,0183
	5.	10	4,6015	27,3008	0,1685	0,1573
	6.	100	26,7954	38,3977	0,6978	0,6511
	7.	1000	51,7602	50,8801	1,0173	0,9492
	8.	10000	57,0781	53,5390	1,0661	0,9947
	9.	100000	57,6706	53,8352	1,0712	0,9995
	10.	1000000	57,7305	53,8652	1,0718	1,0000

Obrázek 6.12: Tabulka s normovanými velikostmi relativních hodnot toku puklinou u_3/u_1

Na základě výsledků, použitého způsobu kombinace 1D a 2D elementů nekompatibilního propojení a tedy i obdobném způsobu zadávání parametru přestupu σ , lze předpokládat analogické chování u modelu i v jiných konfiguracích (uvažujeme-li například blok málo propustného porézního skalního masivu s dobře propustnou puklinou).

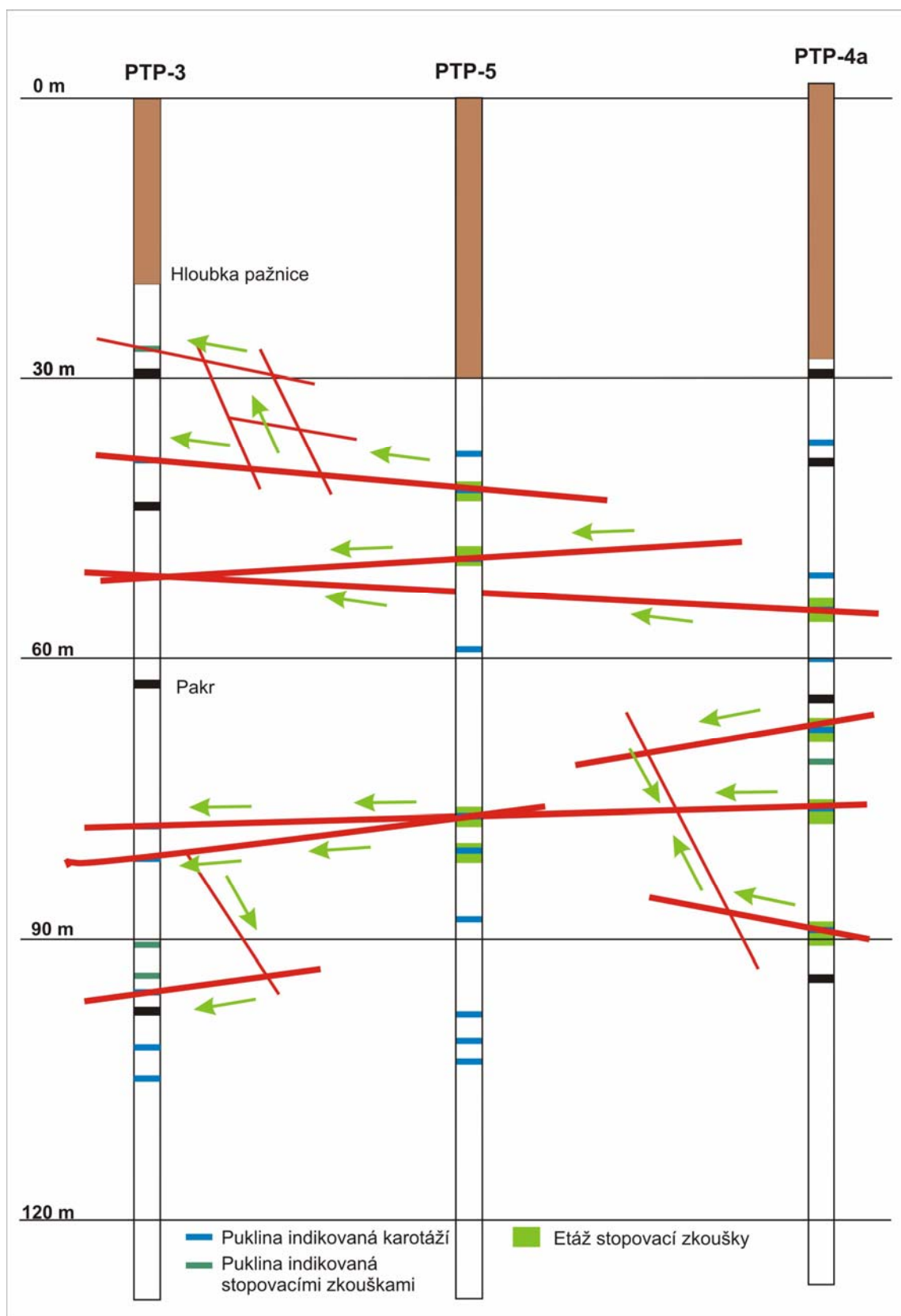
6.3 Simulace vodních tlakových zkoušek na puklinové síti

V rámci experimentální části projektu VaV na lokalitě Potůčky-Podlesí byly provedeny vodní tlakové zkoušky na vrtu PTP-5. Ve vrtu PTP-5 byl v průběhu jednotlivých provedených zkoušek udržován konstantní přetlak a zaznamenáván průtok vody a změny tlaku na jednotlivých etážích sousedních vrtů PTP-3 a PTP-4a. Z provedených experimentů byla získána data pro kalibraci modelu puklinového proudění v žulovém masivu až do 300 metrů.

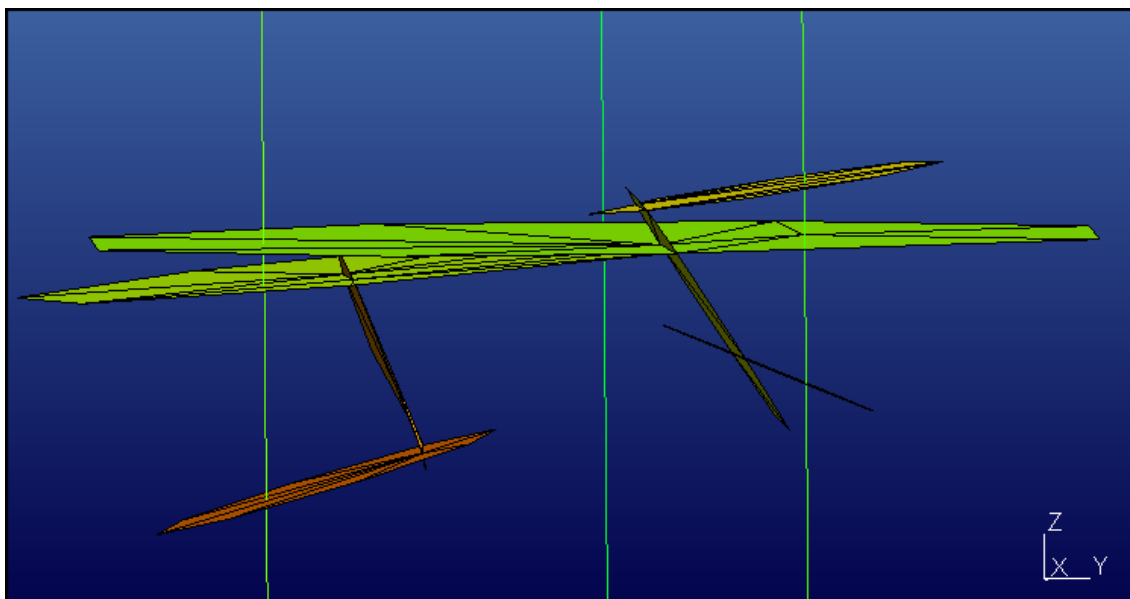
Na základě předpokladů hydrogeoložky Mgr. Lenky Rukavičkové PhD. o rozložení hlavních puklinových systémů na lokalitě Potůčky (viz. Obrázek 6.14) byla vytvořena testovací síť pro oblast v hloubce od 60m do 90m pomocí Generátoru sítě puklin. Pro simulaci a kalibraci byla použita vodní tlaková zkouška s označením VTZ35. V tabulce (Obrázek 6.13) je pro vybranou VTZ uvedena hloubka etáže na vrtu PTP-5, hodnoty vstupního tlaku a experimentálně zjištěný koeficient filtrace.

VTZ	Hloubka etáže (m)	Vstupní tlak (kPa)	Koeficient filtrace (m/s)
VTZ35	79,38 - 85,46	300	2,56E-07

Obrázek 6.13: Tabulka s hodnotami VTZ35

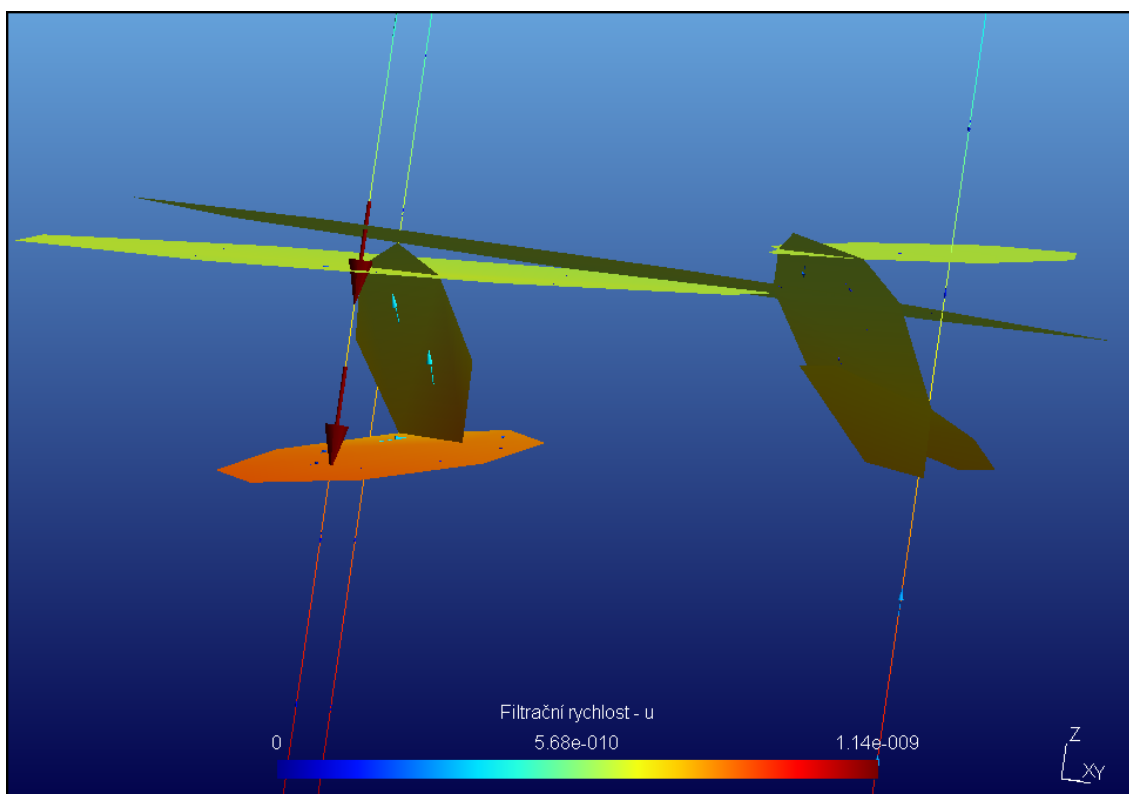


Obrázek 6.14: Schéma hlavních puklinových systémů na lokalitě Potůčky-Podlesí dle předpokladu Lenky Rukavičkové. Zelenými šipkami je vyznačeno šíření stopovače puklinovým systémem. Kvůli větší přehlednosti obrázku byly vynechány drobné pukliny indikované stopovací zkouškou



Obrázek 6.15: Síť vytvořená podle schématu hlavních puklinových systémů na lokalitě Potůčky v hloubce od 60 do 90m

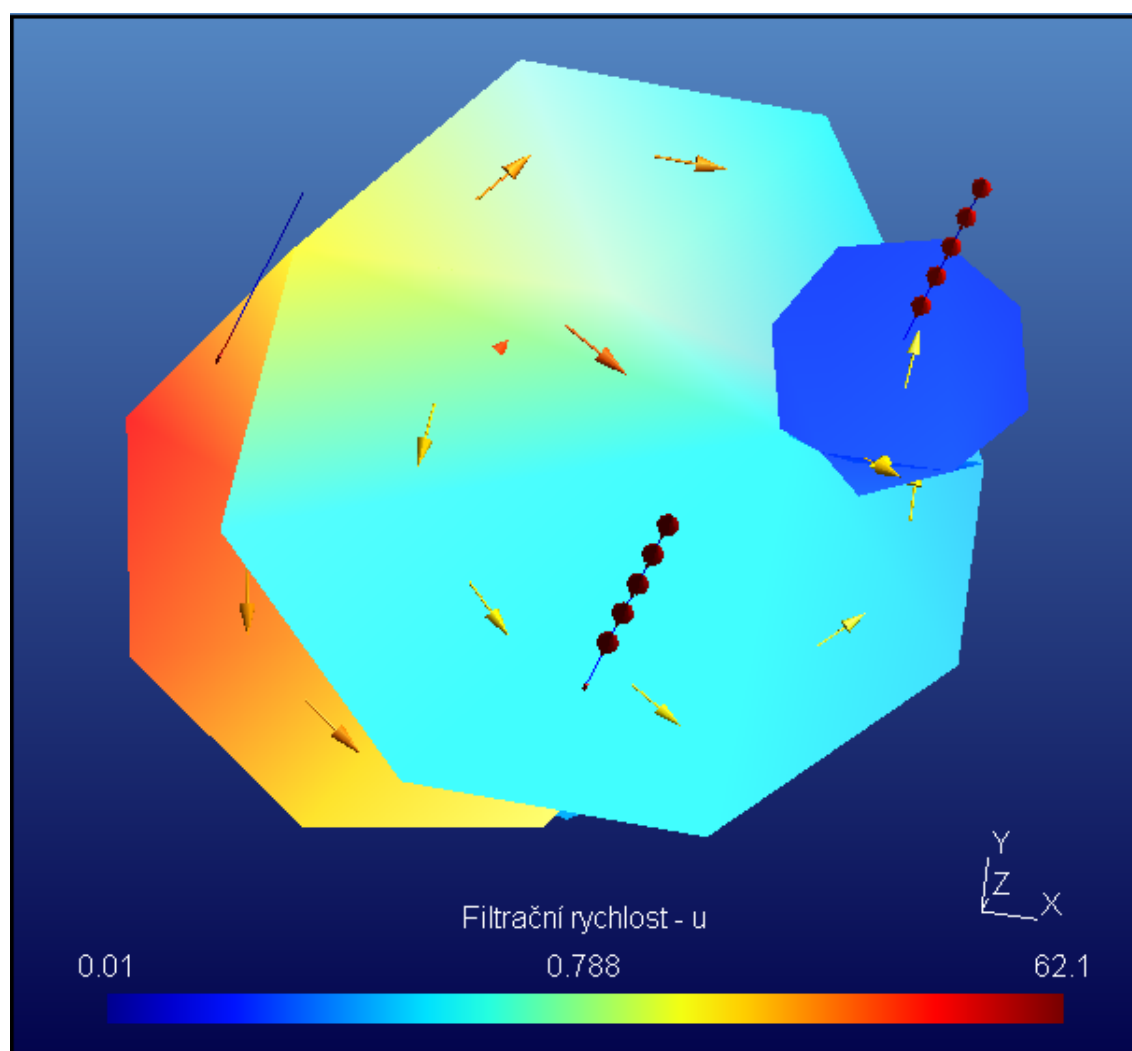
Síť se skládá z 84 uzlů a z 84 elementů, z toho je 30 elementů liniových. 1D elementy charakterizují vrty a pukliny tvoří plošné disky, které jsou tvořené ze 2D elementů.



Obrázek 6.16: Simulace na testovací síti (snaha o nezatížený stav)

Při snaze simulovat na testovací síti nezatížený stav, docházelo ve výpočtech k nenulovému tlakovému spádu. Tento problém byl pozorován i ve výše uvedené kapitole Test 4. V případě uzavřených cyklů na testovací síti, které jsou tvořené z 1D a 2D elementů s nekompatibilním propojením, vzniká reziduální tok. K dosažení správných výsledků simulací odpovídající experimentálním zkouškám na lokalitě Potůčky by se nejprve měly odstranit byť malé přesto nezanedbatelné reziduální toky vzniklé při simulování konkrétních VTZ s jednoduchou konfigurací puklinového systému.

Pro zabránění vytvoření reziduálního toku, byly na testovací síti ubrány sousednosti elementů na některých puklinách. Tím se docílilo rozpojení jednotlivých cyklů tvořených 1D a 2D elementy.



Obrázek 6.17: Simulace při konstantním zatížení části vrtu PTP-5(pohled ze shora)

Při prováděných VTZ v rámci experimentálních prací byl na části vrtu PTP-5 udržován konstantní tlak a při tomto konstantním zatížení, udržovaném v delším časovém intervalu, byla měřena spotřeba vody na vrtu PTP5 a zároveň tlaky na jednotlivých etážích sousedních vrtů PTP-3 a PTP-4a.

Na obrázku (Obrázek 6.17) jsou zobrazeny výpočty tlakového spádu celé oblasti. Hodnoty propustnosti puklin byly zadány o devět řádů menší jak propustnosti jednotlivých vrtů. Koeficient σ Newtonovy okrajové podmínky byl zvolen podle výše navrhované metodiky (viz. kapitola 6.2). Vrt, který reprezentuje vrt PTP5, byl na testovací síti přerušen v místě, kde protíná hlavní puklinu a byl na něj zadán předepsaný tlak (simulace zapakrovaného vrtu).

Pro dosažení shody mezi modelem a skutečností je potřeba provést proces kalibrace, při kterém jsou upravovány propustnosti puklin a koeficient σ a vyhodnocován vliv těchto změn na sledované veličiny. V tabulce (Obrázek 6.18) jsou hodnoty naměřených veličin vybrané vodní tlakové zkoušky VTZ35.

	VTZ35
Přetlak v testované etáži na vrtu PTP-5 (kPa)	420
Spotřeba vody (l/min) (je uvažována hodnota v konečné fázi testování)	2,8
Přírůstek tlaku v odpovídající etáži na vrtu PTP-3 (kPa)	383
Přírůstek tlaku v odpovídající etáži na vrtu PTP-4a (kPa)	156

Obrázek 6.18: Hodnoty naměřených veličin vybrané VTZ

V průběhu řešení práce s vybranou VTZ se však vyskytly komplikace způsobené neočekávanými vlastnostmi nekompatibilního spojení elementů různé dimenze, které bylo nejprve nutné otestovat a zdokumentovat. Kvůli tomuto testování byla provedena pouze ideová simulace VTZ.

7 Závěr

Diplomová práce byla založena na seznámení se s experimentálními pracemi hydrogeologického výzkumu na lokalitě Potůčky-Podlesí a dále pak se simulačním softwarem používaným a vyvíjeným na katedře modelování (KMO).

Z terénních měření byla vybrána data vodních tlakových zkoušek vhodná pro simulaci. VTZ byly získány ze třech výzkumných vrtů na lokalitě Potůčky-Podlesí, která se nachází na severním svahu vrchu Pískovcová skála v Krušných horách. Je tvořena granitovým pněm Podlesí. Jde o prostředí s velmi nízkou propustností, proto zde byly upřednostněny právě vodní tlakové zkoušky.

Pro získání správných výsledků ze simulací VTZ bylo nejprve nutné otestování kombinovaného modelu na nekompatibilní propojení prvků v některých konfiguracích (puklina + vrt). Byl otestován jeden z kalibračních parametrů a to koeficient přestupu σ . V reálné konfiguraci neexistuje žádná fyzická hranice mezi vrtem a puklinou. Tedy koeficienty přestupu σ nemají v těchto případech obdobu ve fyzické realitě. Při použití daného způsobu kombinace elementů různé dimenze se požaduje, aby byl pokud možno eliminován vliv hranice zanesené do modelu koeficientem přestupu σ . Proto bylo potřeba tyto koeficienty určit na základě chování modelu.

Pro danou konfiguraci (kombinace 1D a 2D elementů nekompatibilního propojení) byla poté doporučena metodika nastavení parametru přestupu. Tedy koeficienty σ mezi elementy různých dimenzí by měly být v rozmezích o dva řády větší, než je zadávaná nejmenší hodnota koeficientu hydraulické propustnosti k testovací sítě. Při obdobném způsobu zadávání parametru přestupu σ lze předpokládat analogické chování u modelů i v jiných konfiguracích (uvažujeme-li například blok málo propustného porézního skalního masivu s dobře propustnou puklinou).

Na simulacích vodních tlakových zkoušek puklinové sítě se objevily komplikace při použití nekompatibilního spojení elementů různé dimenze. Bylo nutné se těmto komplikacím věnovat, provést více jednoduchých úloh a následně zdokumentovat dosažené výsledky a poznatky. Díky tomu byla provedena jen ideová simulace VTZ. Simulace dalších VTZ, jejich kalibrace a verifikace by mohly být předmětem dalších prací.

8 Literatura

- [1] Rukavičková L. et al, 2005.: Development of identification methods and mathematical modeling of geochemical interaction in fractured compact rock, Final report VaV/660/2/03, Ministry of Environment of the Czech Republic.
- [2] Maryška J., Severýn O., Tauchman M., Tondr D. 2005: Modelling of the groundwater flow in fractured rock – a new approach, In Proceedings of Algoritmy 2005 (K. Mikula, ed.), Slovak Technical University, Bratislava, pp.113-122
- [3] Bear, J., Tsang, C.-F. & De Marsily, G. 1993. Modelling Flow and Contaminant Transport in Fractured Rocks, USA: Academic Press, Inc.
- [4] Hydraulika podzemných vôd, Doc. RNDr. Igor Mucha, CSc., Prof. Ing. Vsevolod Šestakov, DrSc., ALFA, Bratislava, SNTL, Praha 1987
- [5] Výzkumná zpráva (Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin), L. Rukavičková, Česká geologická služba 2006
- [6] Internetová stránka, <http://www.geuz.org/gmsh>