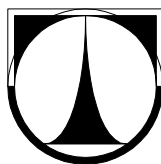


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2009

Bc. Dušan Šustr

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Přírodovědné inženýrství

**Numerické simulace přítoku podzemní vody
do tunelu**

**Numerical simulation of groundwater
inflow into a tunnel**

Diplomová práce

Autor:	Bc. Dušan Šustr
Vedoucí práce:	Doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.
Konzultant:	Doc. Ing. Otto Severýn, Ph. D.

V Liberci 29. 5. 2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vedoucí BP, DP:

Doc. Ing. Milan Hokr, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Otto Severýn, Ph.D.

Prohlášení

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

Jsem si vědom 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 samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 29. 5. 2009

Dušan Šustr

Poděkování

Na tomto místě děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Milanu Hokrovi, Ph.D. za poskytnuté informace, podnětné rady a připomínky a pomoc při vypracování diplomové práce. Taktéž děkuji Ing. Jiřímu Kopalovi za konzultace nad tématy spojenými s programem Flow123d a použitými numerickými řešiči.

V neposlední řadě bych rád poděkoval rodičům a všem, kteří mi pomáhali a podporovali mě při zpracování diplomové práce.

Abstrakt

Hlavním cílem diplomové práce je simulovat proudění podzemní vody v okolí tunelu a získané výsledky podrobit srovnání s naměřenými daty.

V úvodu práce se zabýváme teoretickým popisem proudění podzemní vody a metodami numerického výpočtu úloh proudění. Uvádíme stručný popis softwarových nástrojů použitých pro tvorbu a práci s modelovými úlohami. Další kapitola popisuje lokalitu Bedřichov a tunel Bedřichov A.

Řešení úlohy je následující. Postupujeme od geometricky jednodušších úloh až po úplný 3D model lokality Bedřichov. Na prvních úlohách jsme odhadli hodnoty hydraulické vodivosti horniny v okolí tunelu. V další úloze jsme na 2D řezu reálnějšího terénu zjišťovali jak se jednotlivé varianty nastavení okrajových podmínek projeví na proudění vody. Nakonec jsme přistoupili k vytvoření 3D modelu lokality Bedřichov. Poslední modely hlavní řešené úlohy porovnáváme vzhledem k měřeným přítokům vody do tunelu.

Klíčová slova: proudění podzemní vody, numerické simulace, lokalita Bedřichov, hydraulická vodivost

Abstract

The main aim of my diploma thesis is to simulate a groundwater flow in the surrounding of the tunnel and to compare the obtained readings with the measured data.

At the beginning of the thesis I deal with a theoretical description of the groundwater flow and the methods of a numerical calculation of the flow. I present a brief description of the software tools used for creation and working with the model assignments. The other chapters describe of Bedřichov locality and the tunnel Bedřichov A.

The solution task is as follows. We proceed from geometrically easier tasks up to the complete 3D model of Bedřichov locality. Upon the first tasks we disclosed values of hydraulic conductivity in the surrounding of the tunnel. In the next task using the 2D section of a more practical terrain we investigated how particular options of marginal conditions influence the groundwater flow. In the final phase we came to create the 3D model of Bedřichov locality. The last models of this main task solved are compared with regards to the measured inflows into the tunnel.

Key words: groundwater flow, numerical simulations, Bedřichov locality, hydraulic conductivity.

Obsah

Abstrakt	5
Abstract	5
Úvod	7
1 Teorie proudění podzemní vody	8
1.1 Darcyho zákon a rovnice kontinuity	8
1.2 Okrajové podmínky	11
1.3 Hydraulická vodivost	12
2 Nástroje pro numerické řešení	14
2.1 Numerické metody výpočtů	14
2.2 Použitý software Flow123d, GMSH	15
3 Charakteristika lokality Bedřichov	17
4 Řešené úlohy	20
4.1 Analýza přítoku ve 2D svislém řezu	20
4.1.1 Analytický model	21
4.1.2 Numerický model	24
4.2 2D svislý řez terénu – hydrologický oběh	29
4.3 3D úloha lokality Bedřichov	35
4.3.1 Model oblasti bez tunelu	36
4.3.2 Model oblasti s tunelem	38
5 Závěr	48
6 Příloha – obsah vloženého CD	49
7 Seznam použité literatury	50

Úvod

Tvorba a práce s modely v obecném pohledu, jsou staré jako lidstvo samo. V širším smyslu můžeme jako o modelu hovořit i o výtvarných dílech, jakými jsou např. staré jeskynní malby, sochy a další umělecká díla, zachycující jistým zkresleným pohledem realitu. Zatímco takovýto model má „pouze“ hodnotu uměleckou a historickou, pak modely, o kterých uvažujeme v kontextu této práce a vlastně celé inženýrsko-průmyslové problematiky, mají hodnotu především informační.

V jakémkoliv průmyslovém odvětví, které se zabývá konstrukcemi nových strojů, výrobků či budov, má ve vývojovém procesu tvorba modelů nezastupitelné místo. Deformační zóny, aerodynamika, namáhání důležitých částí konstrukce a další sledované aspekty, jsou optimalizovány na modelech s minimálními náklady.

Mezi inženýrské stavby přitom řadíme i podzemní tunely, které svým umístěním a geometrickou charakteristikou, lze přirovnat k jednotlivým částem hlubinných úložišť jaderných odpadů. Tato úložiště se před několika lety stala středem zájmu snad v každé zemi, která provozuje vlastní jadernou elektrárnu a je tak nucena vyvíjet co nejbezpečnější systémy ochrany uloženého vyhořelého jaderného paliva. Jako nejjednodušší a nejefektivnější se jeví možnost uskladnit jaderné palivo a další jaderné materiály, např. z medicínského prostředí, do podzemních horninových masivů. V těchto masivech, které musí mít vhodné geologické a hydraulické vlastnosti, budou vyhloubeny sítě chodeb. Je pochopitelné, že do takovýchto umělých inženýrských struktur bude pronikat podzemní voda jenž sebou nese nebezpečí možného šíření radioaktivních látek. Zde můžeme spatřovat první rovinu motivace k práci, která se zaměřuje na numerické simulace přítoku podzemní vody do tunelu.

Druhou rovinu motivace spatřujeme v možnosti využití některých dat, která byla, a průběžně jsou stále, zjišťována ve vodárenském tunelu Bedřichov A, o kterém budeme blíže hovořit v jedné z dalších kapitol. Základním problémem tvorby jakéhokoliv modelu je totiž většinou omezená dostupnost vstupních dat, případně dat, která by posloužila ke kalibraci navrženého modelu.

1 Teorie proudění podzemní vody

Proudění podzemní vody je složitý proces odehrávající se v materiálech porézniho a puklinového charakteru. Pokud se budeme snažit na tento proces nahlížet z pohledu mikroskopického, pak přítomnost pórů a jejich vliv výrazně komplikuje popis proudění. Z toho důvodu bylo nutné přistoupit k aproximacím, které uvažují makroskopické měřítko a tudíž makroskopické veličiny, které jsou názorněji uchopitelné, tedy i měřitelné.

Proudění vody je zapříčiněno rozdílným energetickým potenciálem, který v sobě nese jednotkový objem vody, ve dvou různých místech prostoru. Tento potenciál energie se pak na proudění podílí tím způsobem, že překonává odpor prostředí, který je zapříčiněn mechanickými silami působícími na jednotlivé částice horniny. Z tohoto pohledu shledáváme jistou podobnost proudění podzemní vody a například Ohmovým zákonem popisujícím vztah elektrického proudu ve vodiči na přiloženém elektrickém napětí.

Tok elektronů skrývající se za známou elektrickou veličinou, proudem I [A], lze přirovnat k toku vody Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. Jestliže elektrický proud závisí energeticky na rozdílu dvou elektrických potenciálů, neboli napětí U [V], pak i tok vody souvisí s energetickým potenciálem, který je vyjádřen gradientem hydraulických výšek ΔH [m]. No a konečně závislost proudu, respektive toku vody, na napětí, respektive gradientu hydraulických výšek, charakterizuje vlastnost materiálu, v němž dochází k toku, ať už vody či elektronů. Touto vlastností je u Ohmova zákona odpor vodiče R [Ω] a u popisu proudění podzemní vody je to koeficient hydraulické vodivosti K [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], respektive jeho převrácená hodnota.

1.1 Darcyho zákon a rovnice kontinuity

Popis proudění jak jsme ho hrubě nastínili v předchozí kapitole byl odvozen v roce 1856 francouzským fyzikem Henri Darcym, ten prováděl pokusy s prouděním vody skrze válec naplněný pískem. Schéma takového pokusu je znázorněno na Obr. 1. Písek je v tomto případě zcela nasycen a množství přitékající vody se rovná množství vody vytékající.

Vztahy využití v této kapitole čerpáme z publikace Hydraulika podzemní vody, od Ing. Valentové [10].

Při experimentech Darcy používal různé druhy zeminy a dospěl k závěru, že pro daný materiál platí, že množství vody proteklé sloupcem za jednotku času Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] je přímo úměrné rozdílu hydraulických výšek ($H_1 - H_2$) a průřezové ploše sloupce S [m^2] a nepřímo úměrné délce sloupce L [m]. Hodnota H [m] je hydraulická výška a měří se od zvolené srovnávací roviny a rozdíl $H_1 - H_2$ je ztráta hydraulické výšky při průtoku vody sloupcem zeminy.

Tyto závěry lze vyjádřit vzorcem:

$$Q = K S (H_1 - H_2) / L \quad (1)$$

tzv. Darcyho zákonem [10].

Jestliže pravou i levou stranu rovnice (1) vydělíme průřezovou plochou sloupce S , pak dostaneme rovnici ve tvaru:

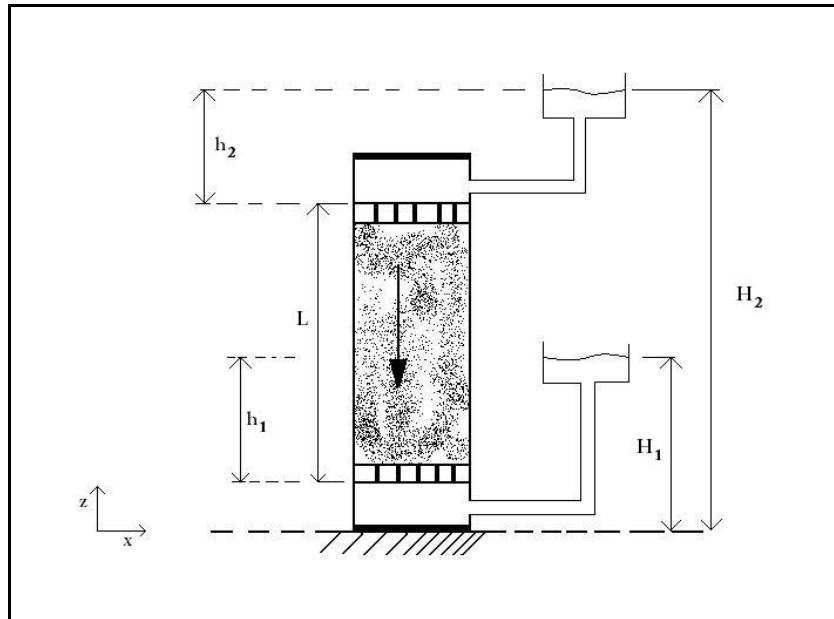
$$v = K (H_1 - H_2) / L \quad (2)$$

kde v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je hustota toku, která často bývá označována jako Darcyho rychlost. Darcyho rychlost není skutečnou rychlostí, kterou částice kapaliny mají při proudění porézním prostředím, voda totiž ve skutečnosti neteče celým průřezem S , ale pouze jeho menší částí, kdy zbytek plochy zabírají částice materiálu, skutečná rychlost částic kapaliny je tak větší, než Darcyho rychlost. Tento rozdíl v obou rychlostech je nutné brát v úvahu v případech, kdy řešíme problém prostupu částic znečištění v zemině.

Jednoduchou úpravou vztahu (2) zobecníme Darcyho zákon pro trojrozměrné proudění:

$$\vec{v} = -K \vec{J} = -K \text{grad } H \quad (3)$$

kde J je hydraulický gradient. Přičemž proměnné H a v jsou prostorovými funkcemi, tedy $H(\mathbf{x})$ a $v(\mathbf{x})$; $(\mathbf{x}) = (x, y, z)$



Obr. 1: Schéma Darcyho pokusu

Darcyho zákon je popisem lineárním a ve skutečnosti má určitá fyzikální omezení platnosti. Při velmi malých gradientech tlaků se projevují molekulární síly, které proudění zpomalují. Naopak při velmi vysokých gradientech narůstá rychlost proudění a to ztrácí laminární charakter, díky čemuž Darcyho zákon nedokáže takové proudění popsat dostatečně přesně.

K úplnému popisu proudění je vedle Darcyho zákona potřeba ještě další diferenciální rovnice vyjadřující bilance hmoty. Bilance je formulována rovnicí kontinuity. Tato rovnice říká, že množství vody akumulované v elementárním objemu za čas Δt , je rovno rozdílu množství vody na přítoku a odtoku do elementárního objemu. Výše uvedený slovní popis, který předpokládá nulovost zdrojů v elementárním objemu, zapíšeme do rovnice:

$$\frac{\partial \rho n}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) \quad (4)$$

kde ρ [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$] je hustota kapaliny a n [-] je pórovitost prostředí určená jako poměr objemu pórů ku celkovému objemu porézního prostředí.

Nyní zavedeme další veličinu používanou v hydrogeologii, a to specifickou storativitu. Ta nám udává jaké množství vody se uvolní z objemu vody obsaženého v jednotkovém objemu zvodně při jednotkovém poklesu hydraulické výšky; nebo jaké množství vody přijme jednotkový objem kolektoru při jednotkovém vzrůstu hydraulické výšky [10].

Platí tedy vztah:

$$S_0 = \frac{\Delta V_v}{V \Delta H} \quad (5)$$

kde S_0 [m^{-1}] je specifická storativita, ΔV_v [m^3] je změna objemu vody, V je objem porézního prostředí a ΔH je změna hydraulické výšky.

Stejně tak platí:

$$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = \rho S_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6)$$

Rovnici kontinuity (4) lze s využitím vztahu (6) přepsat na:

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) = \rho S_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (7)$$

Jestliže je proudící kapalina nestlačitelná, tj. $\rho = \text{konst.}$, pak dostáváme rovnici kontinuity ve tvaru:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x} v_x + \frac{\partial}{\partial y} v_y + \frac{\partial}{\partial z} v_z \right) \quad (8)$$

Rovnice (8) je častěji zapisována ve tvaru:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\text{div } \vec{v} \quad (9)$$

A konečný tvar rovnice kontinuity, který platí za splnění dalšího předpokladu a to konstantní pórovitosti n materiálu vypadá takto:

$$\text{div } \vec{v} = 0 \quad (10)$$

Dosazením rovnice (3) do rovnice (10) dostáváme výslednou rovnici 2. řádu, pro neznámou funkci H :

$$\nabla \cdot (K \nabla H) = 0 \quad (11)$$

1.2 Okrajové podmínky

Úlohy reprezentované diferenciálními rovnicemi, ať už obyčejnými, či parciálními, se skládají z příslušné rovnice a dále také z dodatečných podmínek, které dle kontextu nazýváme okrajovými nebo počátečními. Každý modelovaný systém interaguje se svým okolím (tok tekutiny, vstup tepla apod.), a právě okrajová

podmínka postihuje tuto interakci. Počáteční podmínky je pak nutné zadávat u nestacionárních úloh, avšak žádný takový model v práci neřešíme a proto tyto podmínky nebudeme více rozvádět.

Rozlišujeme tři základní typy okrajových podmínek:

1. 1.druhu (Dirichletova) – předepsaná hodnota potenciálu (tlaková výška vody)

$$H = H_D$$

2. 2.druhu (Neumannova) – předepsaná hodnota toku (tok vody)

$$(K \nabla H) \cdot \vec{n} = v_N$$

3. 3.druhu (Cauchova, Newtonova) – kombinace potenciálu a toku

$$(K \nabla H) \cdot \vec{n} + \lambda H = v_3$$

Newtonova podmínka vlastně vyjadřuje závislost toku na rozdílu potenciálů vně (referenční zadaná hodnota) a uvnitř (neznáme). Proto lze vztah přepsat na:

$$(K \nabla H) \cdot \vec{n} = \lambda(H - H_3) \qquad v_3 = \lambda H_3$$

V úlohách proudění podzemí vody popisuje podmínka 3. druhu přestup vody z umělého či přírodního vodního díla přes dno. Jeho materiálové vlastnosti kvantitativně charakterizují interakci výšky hladiny vody v nádrži a výšky hladiny uvnitř prostředí.

1.3 Hydraulická vodivost

Jak jsme již ukázali v kapitole 1.1, určující vliv na charakter proudění podzemní vody má koeficient hydraulické vodivosti K . Tato veličina musí odpovídajícím způsobem reflektovat skutečnost, že v přírodě jsou běžně materiály

spíše anizotropního charakteru. Tj. že sledovaná veličina, v našem případě velikost hydraulické vodivosti, se mění s volbou směru.

V případě anizotropního prostředí je tak koeficient hydraulické vodivosti tenzorem druhého řádu, jehož složkami jsou:

$$\vec{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Tento tenzor je symetrický, tedy $K_{xy} = K_{yx}$, $K_{yz} = K_{zy}$ a $K_{xz} = K_{zx}$, díky čemuž je pro úplný popis prostředí nutné znát pouze 6 složek. V krajním případě, kdy jsou souřadné osy zvoleného systému rovnoběžné s hlavními osami anizotropie, stačí k popisu pouze 3 složky (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}).

Vzhledem k procesu vzniku sedimentárních hornin, je pozorováno, že poměr vertikální ku horizontální vodivosti bývá v poměru 1:3 až 1:10. U jiného typu hornin, např. u spraší, je tento poměr opačný.

Hydraulická vodivost prostředí je charakteristikou nejen materiálu, ale také proudící kapaliny, což je patrné ze vztahu pro K :

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (13)$$

kde μ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] je dynamická viskozita kapaliny, ρ je hustota kapaliny a k [m^2] je propustnost prostředí, která závisí pouze na porézním materiálu [10].

Hydraulická vodivost hornin s hloubkou obecně klesá. Tento pokles má lineární charakter pro blok dané horniny, v případě přechodu mezi jednotlivými typy hornin pak vykazuje skokovou změnu hodnoty. Hydraulická vodivost významných otevřených puklin a puklinových zón vykazuje o 2 – 4 řády vyšší vodivost, než jakou má okolní hornina [3].

2 Nástroje pro numerické řešení

Jestliže jsme již v předchozích kapitolách ukázali, že proudění podzemní vody je popsáno systémem diferenciálních rovnic (DR), případně diferenciální rovnicí vyššího řádu, pak je na místě vysvětlit, jak vypočítáme řešení úlohy, která je takovými DR popsána.

2.1 Numerické metody výpočtů

Matematický aparát nám při řešení DR nabízí možnost buď analytického, nebo numerického výpočtu.

Analytický výpočet sebou přináší tu výhodu, že výsledná rovnice umožňuje pochopit a názorně pozorovat závislost řešení na různých fyzikálních parametrech a geometrických rozměrech. Velké omezení u analytického výpočtu je v úzkém spektru úloh, na které lze tento výpočet aplikovat. Úloha musí být v takovém případě geometricky dostatečně jednoduchá, je nutné splnit homogenitu a izotropii prostředí. Taktéž počáteční podmínky je nutné definovat konstantní hodnotou v celé oblasti a na hranicích vyžadovat jednoduché okrajové podmínky (budeme nahrazovat OKP).

Naproti tomu numerické metody, které zaznamenaly výrazný boom s nástupem výpočetní techniky, jsou výhodné v ohledech, ve kterých je limitováno analytické řešení. Numerickou metodu, respektive výpočet, je možné použít na složitější geometrie, není nutné, aby prostředí bylo homogenní a izotropní, stejně tak okrajové a počáteční podmínky mohou být na různých místech hranice, respektive v různých časech odlišné.

Ať už se jedná o jakoukoliv numerickou metodu, podstata jejího využití je vždy stejná, převádí totiž řešení problému s DR na řešení soustav algebraických rovnic. Každá jedna metoda přistupuje k této „konverzi“ z trochu jiného hlediska a s využitím odlišného myšlenkového postupu a matematického aparátu. Pro naše účely nastínění práce numerických metod je vhodné zmínit především dvě numerické metody, a to metodu konečných diferencí (MKD) a metodu konečných prvků (MKP).

Metoda konečných diferencí je velmi jednoduchá na matematický popis a taktéž na implementaci, což představuje její hlavní výhodu. Princip metody spočívá v nahrazení derivací v řešených DR konečnými diferencemi. Požadované difference

hledáme pomocí Taylorova rozvoje funkce v řadu. Postup práce s MKD se dá shrnout do tří bodů. Po formulaci úlohy se provádí diskretizace oblasti řešení, vytváříme diferenční vztah a posléze formulujeme a řešíme soustavu algebraických rovnic. Pokud bychom měli zmínit nevýhodu této metody, pak je skryta v diskretizaci. Je totiž nutné, aby síť, vzniklá „rozsekáním“ oblasti řešení, byla strukturovaná, tedy pravidelná. To nedovoluje tak přesně, jako je tomu u nestrukturovaných sítí, postihnout složitější geometrie. Případně je pro popsání složitější geometrie nutné volit menší krok sítě, což sebou nese důsledky v podobě zvýšení počtu uzlů a tedy i počtu algebraických rovnic, které jsme nuceni řešit.

Metoda konečných prvků přistupuje k řešení problému ze zcela odlišného pohledu, kterým je variační počet. Tato metoda totiž hledá minimum funkcionálu nad řešenou oblastí, a to tak, že výsledkem je řešení v podobě spojitých, či po částech spojitých funkcí. Velkou výhodou v porovnání s MKD je ta skutečnost, že u MKP není nutné při diskretizaci oblasti dodržet žádnou pevnou strukturu. Přičemž konečnými prvky, což jsou části oblasti vzniklé diskretizací, mohou být trojúhelníky a čtyřúhelníky s různým počtem uzlů. Zároveň může být síť lokálně dle potřeby geometrie zahušťována.

Rozdílnosti obou metod jsou tak zřejmě patrné. Rozhodně ale mají všechny numerické metody, tedy i tyto dvě uvedené, jedno společné a totiž tu skutečnost, že vypočítané řešení je vždy přibližné s určitou přesností. Tato přesnost je dána použitým modelem a přesností vstupních dat.

2.2 Použitý software Flow123d, GMSH

K modelovým úlohám jsme v této práci používali softwary Flow123d a GMSH.

Flow123d je výpočetním softwarem, vyvinutým na Fakultě mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci. Jedná se o systém pro simulaci procesů v puklinovém prostředí založený na kombinaci použití modelu kontinua a diskrétních puklinových sítí [2]. K numerickému řešení je v tomto programu použito metody konečných prvků.

Mezi hlavní přednosti patří věrná reprezentace puklinového prostředí a pokročilý model transportu látek. Program je postupem času doplňován o další rozšíření, která upřesňují výsledky studované problematiky. Flow123d pracuje jako

neinteraktivní konzolová aplikace, která své vstupy načítá ve formě souborů. K hlavním vstupním souborům patří:

- Soubor INI – řídicí soubor, obsahuje jména dalších datových souborů, parametry výpočtu, specifikaci řešiče lineárních rovnic, parametry pro řešič, druh a četnost ladicích výpisů a podobně.
- Soubor MSH – datový soubor, popisuje síť pro výpočet, souřadnice uzlů, popis elementů, příslušnost uzlů k elementům, oblasti geometrické a materiálové, definuje odkaz na příslušný materiálový parametr.
- Soubor MTR – datový soubor, definuje fyzikální vlastnosti materiálu, v našem případě tedy koeficienty hydraulické vodivosti jednotlivých hornin a puklin.
- Soubor BCD – datový soubor, zavádí okrajové podmínky a definuje jednotlivé skupiny okrajových podmínek [2].

K preprocesorovým přípravám modelů, tedy návrhu geometrie a jejímu následnému vysíťování, používáme volně dostupný pre a postprocesový nástroj GMSH. Tento software v sobě zahrnuje celkem čtyři samostatné moduly: geometrický, mesh modul, řešič a postprocesové zpracování výsledků. Krom řešiče, kdy používáme zmíněný Flow123d, využíváme vlastně všechny tři ostatní moduly programu GMSH [11].

3 Charakteristika lokality Bedřichov

V předešlých kapitolách jsme vysvětlili teoretické poznatky o proudění podzemní vody, potažmo o výpočtech rovnic, jimiž je proudění popsáno. V následující části textu popíšeme prostředí, na kterém budeme takovéto proudění modelovat.

Oblast mezi Bedřichovem a přehradní nádrží Josefův Důl se nachází ca 7 km severně od Jablonce nad Nisou a ca 5 km severovýchodně od Liberce. Jedná se o výrazně zvlněný terén s nadmořskými výškami od 550 až do 840 metrů nad mořem, který je pokryt z části lesy a z části horskými loukami. Z geologického hlediska se oblast nachází v západní polovině krkonošsko-jizerského granitového masivu [1]. Podpovrchový horninový celek je tvořen libereckým a jizerským typem granitu (žuly).

Tunel Bedřichov A vede od přehradní nádrže Josefův Důl do úpravny vody v obci Bedřichov (viz Obr. 3). Další část tunelu Bedřichov, označované jako B, pak vede z úpravny do města Liberec, kterému právě josefodolská přehrada poskytuje zdroj pitné vody.

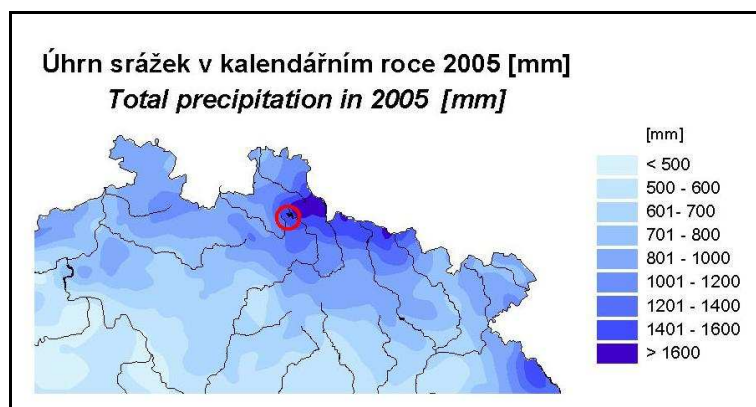
Úsek tunelu, kterým se v modelu zabýváme, byl ražen v letech 1981 až 1987, jeho celková délka včetně úseku pod hladinou přehradního jezera je 2593 m. Prvních 75 metrů tunelu u přehrady leží pod hladinou vodní nádrže. Tunel Bedřichov A má průměrné nadloží o mocnosti 100 m. a světlost tunelu činí 3,6 m. Zajímavostí je způsob provedení ražby tunelu, kdy zhruba 2/3 jeho délky jsou vybudovány klasickou destruktivní (střílenou) ražbou a zbylá 1/3 délky je provedena pomocí technologie razícího štítu TBM (DEMAG) [7]. Některé části tunelu musely být zpevněny betonáží, což se týká především úseku raženého destruktivní metodou.

V rámci snahy najít dostatek informací relevantních k případnému vybudování hlubinného úložiště jaderného paliva v granitových masivech, byl na tomto tunelu v roce 2003 započat výzkumný projekt. Tento projekt stále probíhá i v současné době a je financován ze zdrojů Správy úložišť radioaktivních odpadů, vlastní provedení průzkumných prací je pak zajištěno Českou geologickou službou, respektive jejími pracovníky, a mnoha externími spolupracovníky. Od roku 2009 je tento projekt veden Technickou Univerzitou v Liberci, která taktéž spolupracuje s Českou geologickou službou a jejími dalšími subdodavateli.

V tunelu byly studovány pukliny, jejich četnost, charakter a vliv metody ražby na jejich vznik. Na obnažených stěnách tunelu byly dále studovány změny charakteru hornin (proti stavu dokumentovanému při ražbě), přítomnost hub a mikroorganismů a výskyt nových minerálů, které vznikají srážením z prosakující vody na stěnách tunelu. Získaná data se používají pro vývoj pokročilých modelů dlouhodobého chování hlubinného úložiště.

Pro naše potřeby jsou zásadní naměřené hodnoty přítoků vody do jednotlivých částí tunelu. V naprosté většině jsou přítoky slabé, přičemž výjimkou je průsak dilatační spárou ostění tunelu pod hladinou josefodolské vodní nádrže. Podle přítoku podzemní vody byl úsek A rozdělen do několika částí. Při orientačním měření v říjnu 2004, byl v prvním úseku tunelu v rozmezí od 2424 m až do 2600 m naměřen přítok 1.84 l.s^{-1} , ve druhé části od 1995 m až do 2424 m byl naměřen přítok 0.06 l.s^{-1} , obdobný přítok pak vykazovala třetí část (885 m až 1995 m) a také čtvrtá část (150 m až 885 m). Zvýšený přítok pak vykazovala další okrajová část tunelu od 0 m do 150 m, kde činil $2,04 \text{ l.s}^{-1}$. Tyto přítoky zahrnují nejen průsaky a prameny v tunelu, ale také průsak přímo do sutí na počvě. Přehledně jsou informace přítoků do jednotlivých úseků tunelu popsány v kapitole 4.1.1 v Tab. 1.

Z hlediska budoucího zadávání okrajové podmínky toku, který by měl simulovat vliv srážek na proudění, spadá popisovaná lokalita do oblasti s velmi vysokými ročními úhrny srážek v rozmezí od 1000 mm až do 1400 mm (viz Obr. 2). Přičemž během měsíců a jednotlivých dní je možné pozorovat i sezónní výkyvy, kdy během jednoho dne spadne 20 až 40 mm. Při velmi extrémních projevech počasí mohou být úhrny za den i pětinasobné. Např. při povodních v roce 2002 byl ve stanici Bedřichov naměřen dne 13. srpna denní úhrn srážek o hodnotě 169,5 mm [14].



Obr. 2: Mapa ročních srážkových úhrnů převzata z [13]; červenou značkou je do mapy zanesena přibližná poloha lokality Bedřichov



Obr. 3: Mapa lokality v okolí Bedřichova a přehradní nádrže Josefův Důl, sejmuta z [12]; modrou linií je znázorněna přibližná poloha tunelu Bedřichov A, který vede od přehrady do úpravny Bedřichov

4 Řešené úlohy

Modelové úlohy lze rozdělit do tří samostatných dílčích celků. Výsledky každého takového celku, pak ovlivňují tvorbu modelů v celku dalším, obsahově složitějším. V první skupině úloh provádíme odhad hydraulické vodivosti, za předpokladu homogenní horniny v okolí tunelu. Tento odhad je proveden na základě analytického a numerického modelu a oba výsledky jsou mezi sebou konfrontovány, čímž verifikujeme odhadnuté hodnoty.

Ve druhé skupině úloh ověřujeme vliv nastavování okrajových podmínek na výsledky modelů. Provádíme variaci parametrů, u kterých předpokládáme, že mají vliv na interakci mezi 2D a 1D povrchovými elementy. U zadání toku na hranici 2D modelu, tedy na okrajové stěny nejsme schopni postihnout zcela přirozený jev, kdy část srážek stéká přímo po povrchu a část se průsakem dostává do horniny pod povrchem. Využití povrchových elementů, jejichž koncept popisujeme v kapitole 4.2, umožňuje však a povrchový odtok realizovat.

Ve třetí, závěrečné, skupině řešených úloh vytváříme model lokality Bedřichov, respektive okolí tunelu Bedřichov A. Zadáváme hydraulické vodivosti odhadnuté v dřívějších úlohách a používáme nastavování okrajových podmínek, jehož vliv byl ověřen na předešlých dílčích úlohách.

U zadávání okrajových podmínek používáme pouze podmínek prvních dvou druhů. Dirichletova podmínka je v našich modelech zadávána ve formě tlakové výšky, která je vyjádřením tlaku formou výšky vodního sloupce v uvažovaném místě. Neumanovu okrajovou podmínku zadáváme jako tok vody přes vybranou hranici.

4.1 Analýza přítoku ve 2D svislém řezu

Na tomto modelu, který uvádíme ve svém analytickém i numerickém řešení, jsme provedli odhad hydraulické vodivosti. Svislým řezem je zde uvažována geometrie vytvořená v rovině kolmé na osu tunelu, přičemž totožná je u obou modelů pouze geometrie samotného tunelu. Geometrické vyjádření vzdálenějšího okolí tunelu je pak v modelech odlišné. Účelem vytvoření modelů je tak vzájemná verifikace výsledků a zároveň zjištění, do jaké míry bude pozměněná geometrie obou úloh, ovlivňovat sledované výsledky.

4.1.1 Analytický model

Abychom mohli provést prvotní odhad hydraulické vodivosti v oblasti kolem tunelu Bedřichov A, vytvořili jsme model mezikruží, viz Obr. 4. Jedná se o dva soustředné válce, kdy menší vnitřní válec, který je bez výplně, popisuje samotný tunel a vnější válec, tedy jeho rozměr, popisuje tu skutečnost, že je tunel uložen v určité hloubce pod povrchem. Souosé sdružení obou válců spolu dohromady vytváří mezikruží vyplněné horninou v níž sledujeme proudění vody. Jestliže na takovémto modelu budeme hledat analytické řešení DR popisující proudění, respektive budeme hledat vztah mezi daty popsané úlohy, pak dostaneme rovnici ve tvaru:

$$p_2 - p_1 = -\frac{Q}{2\pi \cdot d \cdot K} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (14)$$

kde:	p_1 a p_2 [m]	tlakové výšky na vnějším a vnitřním okraji mezikruží
	Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	tok mezikružím
	K [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	koeficient hydraulické vodivosti
	d [m]	délka mezikruží
	r_1 a r_2 [m]	poloměr vnitřního, resp. vnějšího kruhu v mezikruží

Tato rovnice, vyjadřuje vztah mezi množstvím vody, přitékajícím do tunelu, tlakovým gradientem na vnějším a vnitřním okraji uvažovaného mezikruží, hodnotou koeficientu hydraulické vodivosti K a délkou mezikruží.

Po vyjádření K ze vztahu (14) dostáváme pro koeficient hydraulické vodivosti vztah ve tvaru:

$$K = -\frac{Q}{2\pi \cdot d \cdot (p_2 - p_1)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (15)$$

Naší snahou bylo ze známých hodnot přítoků vody Q do jednotlivých úseků tunelu a s odhadem dalších veličin vystupujících ve výše uvedeném vztahu, vypočítat hodnoty koeficientu hydraulické vodivosti. Takto spočítaná hydraulická vodivost tak bude představovat homogenizované okolí tunelu, tudíž bude reflektovat přítomnost

vodivě významných puklin v tom smyslu, že se tento vliv rozpočítá do celého bloku homogenní horniny.

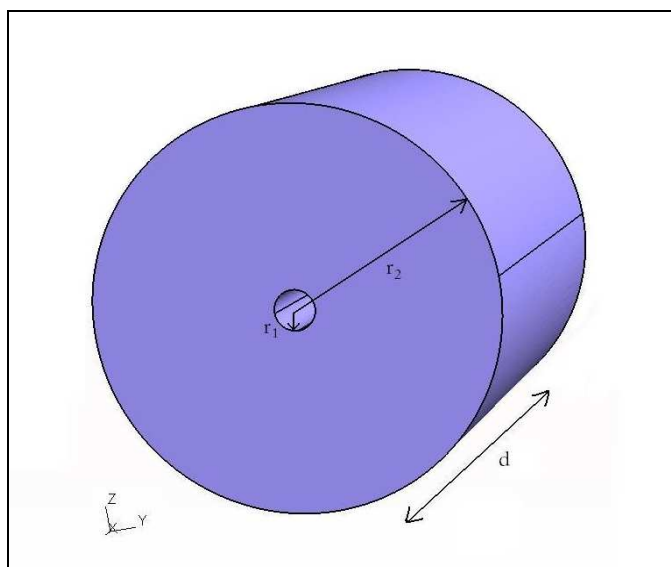
Pro dosažení do vztahu pro K používáme délku d vybraného úseku tunelu, za hodnotu r_1 bereme vnitřní poloměr tunelu, tedy 1,8 m. Předepsaná tlaková výška vody na okraji tunelu je 0 m. Hodnoty poloměru vnějšího kruhu modelu r_2 pro vybraný úsek tunelu vyjadřuje hloubka tunelu pod povrchem. Na vybraném úseku tunelu tak vycházíme z průměrné hodnoty nadloží tunelu. Pro jednotlivé úseky pak tato veličina pochopitelně nabývá různých hodnot, přičemž pro krajní části tunelu je nejmenší a naopak pro střední úsek je tato hodnota největší. Velikost tlakové výšky p_2 na vnějším okraji modelu mezikruží se pak rovná hodnotě r_2 , což odpovídá představě, že hladina vody dosahuje až povrchu.

Z Tab. 1, ve které uvádíme vstupy modelu (přítoky) a taktéž výstupy modelu (vodivosti), je patrné, že přítoky do tunelu jsou v říjnu na jednotlivé úseky dvojnásobné než pro měsíc duben, jediný úsek, který tomuto trendu neodpovídá je část tunelu pod dnem nádrže Josefův Důl. Tuto skutečnost připisujeme tomu, že úsek není co se týče přítoku vody tolik ovlivněn srážkami, ale především hladinou vody v přehradní nádrži.

Spočtené hodnoty hydraulické vodivosti, kalibrované jednou pro přítoky měřené v dubnu a podruhé pro přítoky měřené v říjnu, vychází při porovnání mezi oběma měsíci řádově totožné. Hodnoty na úsecích II. – IV. se pohybují v řádu 10^{-9} a 10^{-10} m.s^{-1} , což dle výzkumů [3] povídá granitům s uzavřenými puklinami či puklinami vyplněnými sekundárními minerály, případně málo narušenému kompaktnímu granitu. Oproti tomu hodnoty na okrajových částech tunelu, tedy částech, které se nacházejí v menších hloubkách pod povrchem a dalo se očekávat větší narušení horniny, se pohybují v řádu 10^{-7} m.s^{-1} . To odpovídá přítomnosti vodivých poruch a puklin menšího rozsahu, případně tzv. přípovrchových zón rozvolnění puklin s vysokou mírou propojení puklinových systémů [3].

Data z Tab. 1, nám poskytují možnost verifikace odhadu hydraulické vodivosti. Jedinou vstupní veličinou, která se měnila s časem, byl přítok vody Q a kalibrovali jsme vodivosti na dubnové a říjnové přítoky. Jestliže však víme, že vodivost se nemění se sezónou, pak je vhodné najít další veličinu vystupující ve vztahu pro hydraulickou vodivost, která právě popíše sezónní výkyvy přítoků při časově neměnné vodivosti horniny. Přímo se nabízí, že jedinou veličinou, která

splňuje výše popsané vlastnosti, bude tlak vody p_2 , respektive výška volné hladiny nad tunelem. Pokud vezmeme za vstupní parametr pro výpočet přítoku vodivost kalibrovanou na přítoky z měsíce dubna a budeme počítat s přítoky pro měsíc říjen, pak při zachování všech dalších parametrů modelu, by se měla výška volné hladiny nad tunelem snížit, čímž povede k poklesu p_2 a následně ke snížení přítoku do tunelu. Hodnoty takto kalibrovaného tlaku p_2 , jsou zaznamenány v Tab. 2. Jak se ukázalo, tlak dle očekávání poklesl. U posledního úseku však hodnota stoupla a to díky té skutečnosti, že poměr přítoků je v tomto úseku opačný, než ve zbylých částech tunelu.



Obr. 4: Geometrie pro tok mezikružím

úsek		I.	II.	III.	IV.	V.
d [m]		150	735	1110	429	176
p_2 [m]		20,00	108,40	92,90	45,30	8,40
r_2 [m]		20,00	108,40	92,90	45,30	8,40
tok [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]:	duben	1,26	0,12	0,13	0,17	1,65
	říjen	0,61	0,05	0,09	0,06	1,84
Q/d [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]	duben	8,40E-06	1,63E-07	1,17E-07	3,96E-07	9,38E-06
K [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]		1,61E-07	9,82E-10	7,91E-10	4,49E-09	2,74E-07
Q/d [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]	říjen	4,07E-06	6,80E-08	8,11E-08	1,40E-07	1,05E-05
K [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]		7,79E-08	4,09E-10	5,48E-10	1,58E-09	3,05E-07

Tab. 1: Odhad hydraulické vodivosti pomocí analytického řešení toku mezikružím, využití přítoků do jednotlivých úseků tunelu Bedřichov A; naměřené veličiny jsou tok Q , délka úseků d , poloměr tunelu r_1 , poloměr r_2 a tlak p_2 , hledanou neznámou je hydraulická vodivost K

úsek		I.	II.	III.	IV.	V.
d (délka úseku)		150	735	1110	429	176
r_2 [m]		20,00	108,40	92,90	45,30	8,40
tok [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]:	říjen	0,61	0,05	0,09	0,06	1,84
Q/d [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]	říjen	4,07E-06	6,80E-08	8,11E-08	1,40E-07	1,05E-05
K [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	duben	1,61E-07	9,82E-10	7,91E-10	4,49E-09	2,74E-07
p_2 [m]		9,68	45,17	64,32	15,99	9,37

Tab. 2: Kalibrované hodnoty tlaku p_2 pro případ, kdy uvažujeme jako vstupy přítoky do tunelu za měsíc říjen a hydraulickou vodivost kalibrovanou na přítoku za měsíc duben

4.1.2 Numerický model

Na předcházející úlohu navazujeme podobným modelem, kdy vyšetřujeme přítok vody do tunelu, avšak nyní tak činíme pomocí numerického výpočtu. Zatímco model pro analytické řešení byl geometricky značně zidealizován, pak numerický model 2D řezu tunelu a jeho okolí, postihuje svým geometrickým uspořádáním realitu mnohem blíže. Jak je vidět na Obr. 5, modelovaná oblast má 500 m na šířku, svislý rozměr je 300 m a povrch má nulovou souřadnici v ose z. Střed tunelu o poloměru 1.8 m se nachází v hloubce 100 m a vzdálenosti od levého a pravého okraje jsou shodné a činí 250 m.

Na takovýto model jsme aplikovali okrajové podmínky nulového toku na spodní hranu, což odpovídá předpokladu, že se jedná o jednu zvoď, která je od další oddělena nepropustnou horninou. Na bocích je aplikován hydrostatický nárůst tlaku, na povrch je předepsán nulový tlak a stejně tak na okraje tunelu předepisujeme nulový tlak.

Výsledky, takto definovaného modelu, v podobě pole rozložení tlakové výšky a vektorového pole Darcyho rychlostí najdeme na Obr. 6, respektive Obr. 7. Je patrné, že přítomnost tunelu generuje v oblasti zvýšený gradient hydraulické výšky. Tím pádem přitéká voda od okrajů a také od povrchu, kde je větší hydraulická výška než v okolí tunelu.

V souladu s Darcyho zákonem by měla být závislost přítoku vody do tunelu na hydraulické vodivosti horniny lineární, při zachování konstantní hloubky tunelu. K ověření tohoto předpokladu jsme provedli 4 výpočty pro různá nastavení K . V Tab. 3 jsou pak uvedeny simulované hodnoty přítoku. Pakliže tyto hodnoty vyneseme do

grafu, viz Obr. 8, vidíme, že závislost přítoku na měnící se hydraulické vodivosti je skutečně lineární.

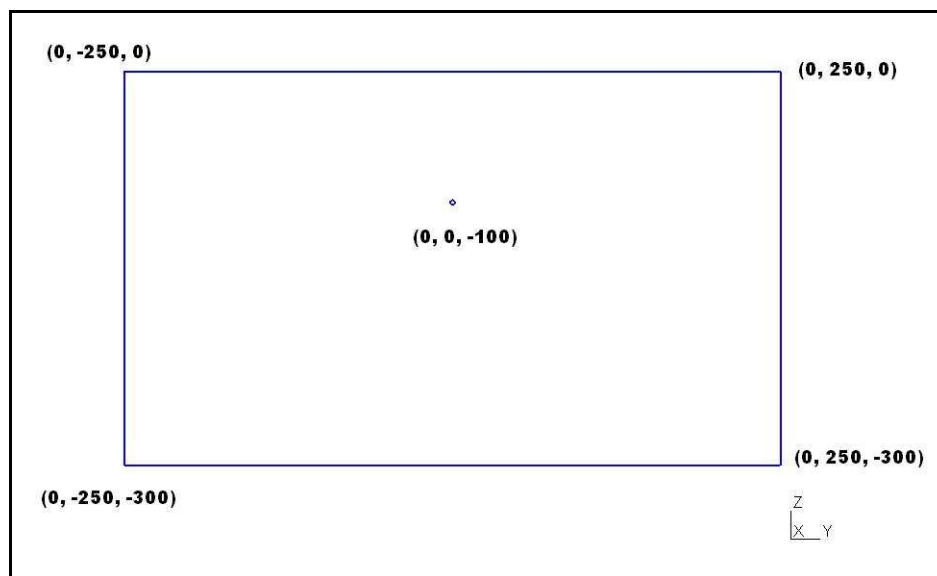
Další otázkou bylo, jaký vliv má změna hloubky tunelu na přítok. Pro tento účel jsme vytvořili 4 další varianty základní geometrie s tím, že byla měněna hloubka tunelu. Postupně byl střed tunelu umístěn do hloubky 10 m, 25 m, 50 m a 200 m pod povrchem. Po skončení výpočtů jsme výsledné přítoky, respektive odpovídající hloubky uložení tunelu, zanesly do Tab.4, a následně vynesly do grafu, který je uveden na Obr. 9. Z něho je patrné, že zjišťovaná závislost je obecně nelineární, přičemž při využití kvadratické regrese je popsána uvedenou rovnicí (viz taktéž Obr. 9).

S použitím takto zjištěných závislostí přítoku na hydraulické vodivosti, respektive hloubce umístění tunelu, můžeme provést srovnání odhadu hydraulické vodivosti oproti úloze s modelem mezikruží. Tímto porovnáním dostaneme informaci o tom, jak moc se odlišná geometrie obou úloh projevuje na výsledcích odhadu K . Vezmeme-li za vstupy modelu hloubku, ve které je tunel a přítoky naměřené pro měsíc duben, pak s použitím kvadratické regresní rovnice pro vztah mezi přítokem a hloubkou, jsme schopni vypočítat právě přítok do takového tunelu. Hodnota je však spočtena pro $K = 6,5E-2 \text{ m.den}^{-1}$, přičemž my zjišťujeme hodnotu hydraulické vodivosti, která bude odpovídat naměřenému přítoku. Do poměru tak dáme:

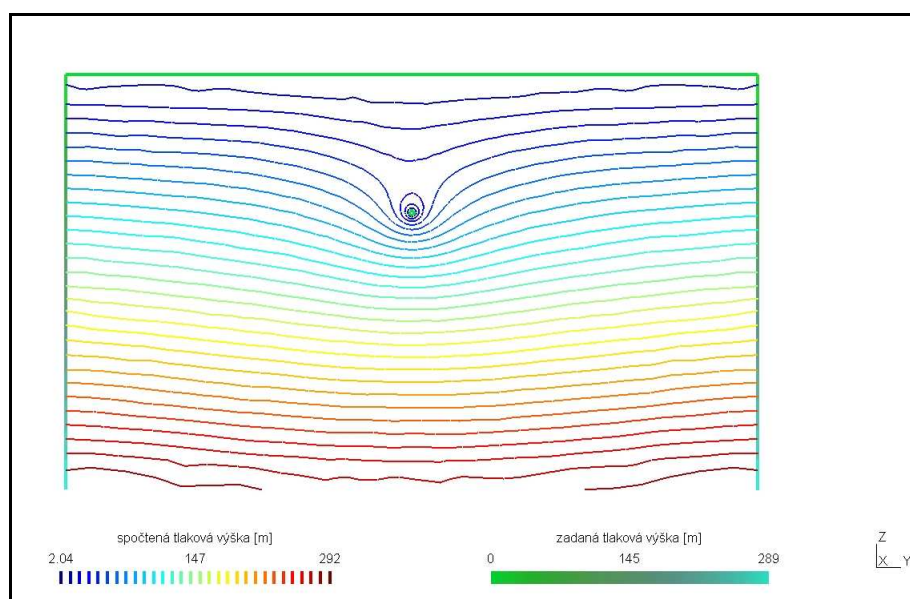
$$\frac{Q_{spo\check{c}}}{6,5 \cdot 10^{-2}} = \frac{Q_{nam}}{K}, \quad (16)$$

kde $Q_{spo\check{c}} [\text{l.s}^{-1}]$ je přítoky spočtený regresí z numerického modelu, $Q_{nam} [\text{l.s}^{-1}]$ přítok měřený v dané části tunelu a neznámá $K [\text{m.den}^{-1}]$ je kalibrovaná hydraulická vodivost. Přehledně jsou data k této kalibraci uvedena v Tab. 5, kterou uvádíme na konci této kapitoly.

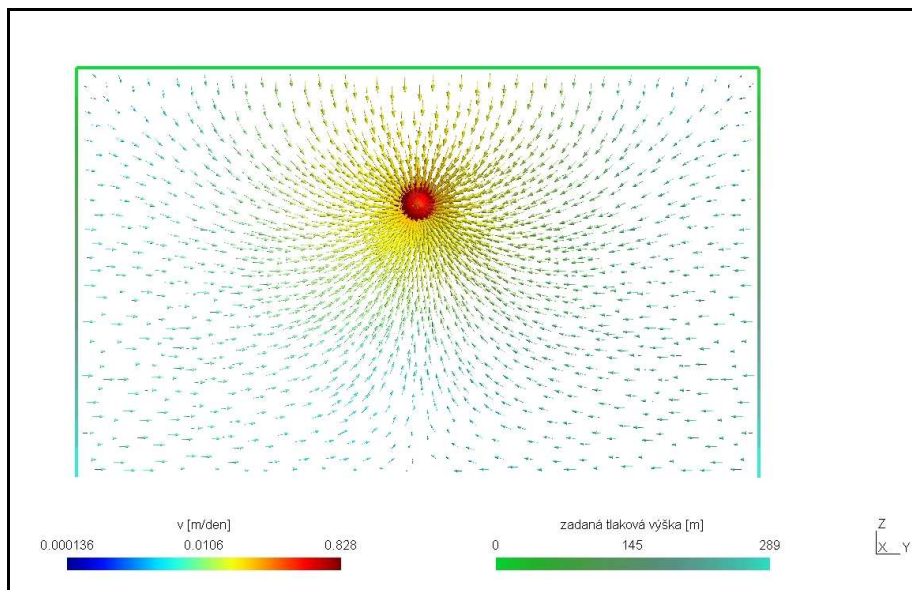
V Tab. 5 uvádíme hodnoty pro výpočet hydraulické vodivosti z regresí a v druhé části tabulky uvádíme hodnoty hydraulické vodivosti odhadnuté analytickým řešením a numerickým řešením pro přítoky z měsíce dubna. Uvádíme také procentuální rozdíl takto odhadnutých hydraulických vodivostí. Můžeme vidět, že odchylka se pohybuje od ca od 10 do 30 procent.



Obr. 5: Model pro numerické porovnání hydraulické vodivosti a přítoku do tunelu, rozměry (500 x 300) m, střed tunelu v hloubce 100 m, poloměr tunelu $r = 1,8$ m



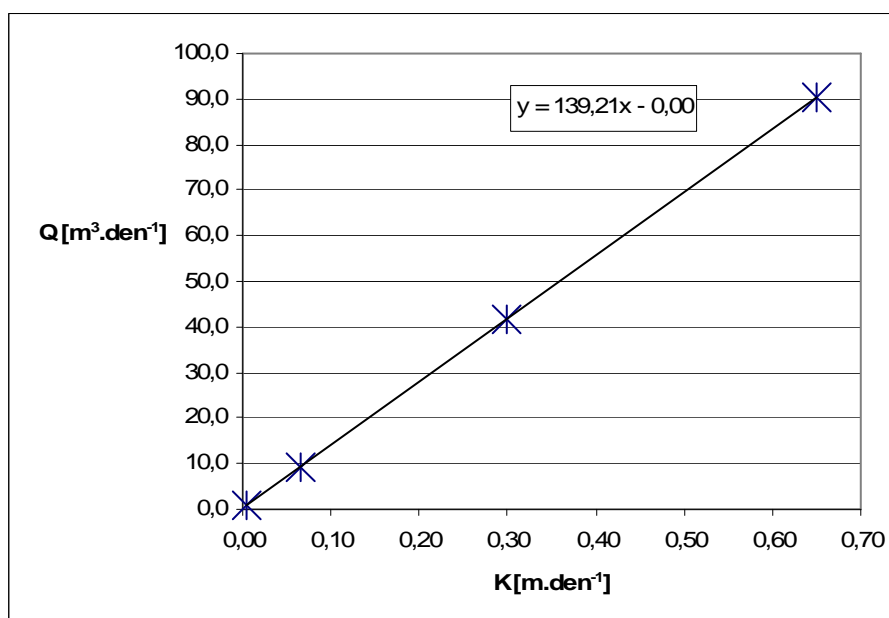
Obr. 6: Znárodnění izoliní tlakové výšky a hodnot okrajových podmínek (zadaná tlaková výška) pro základní úlohu přítoku do tunelu ve 2D řezu, hloubka tunelu je 100 m pod povrchem



Obr. 7: Znáornění vektoru rychlosti proudění, okrajových podmínek

poř. číslo	K [m.den ⁻¹]	Q [m ³ .den ⁻¹]
1	0,005	0,696
2	0,065	9,049
3	0,300	41,763
4	0,650	90,487

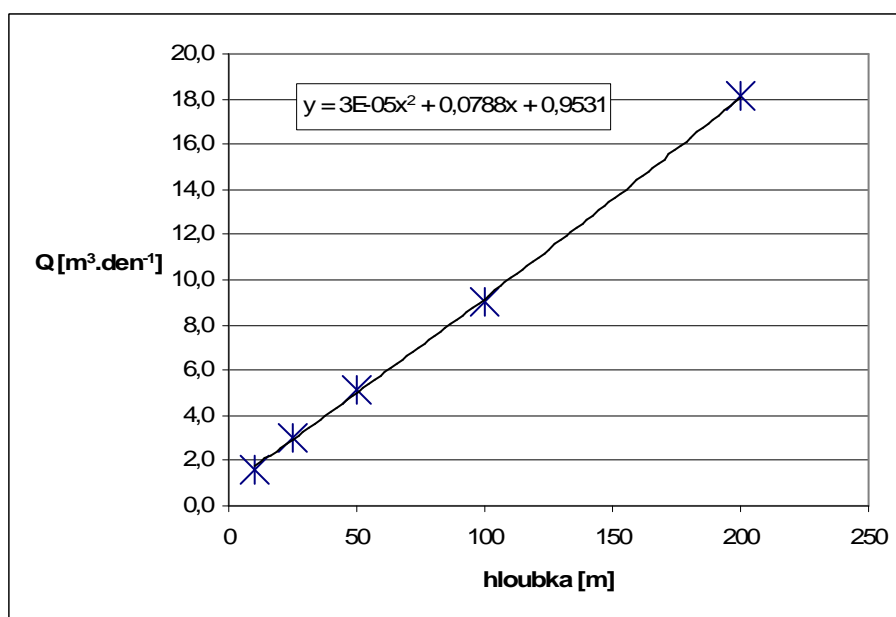
Tab. 3: Vliv změny hydraulické vodivosti na přítok vody do tunelu, tunel o poloměru 1.8 m je pro všechny čtyři výpočty umístěn v hloubce 100 m pod povrchem



Obr. 8: Graf závislost přítoku vody do tunelu na hodnotě hydraulické vodivosti

poř. číslo	hloubka [m]	Q [m ³ .den ⁻¹]
1	10	1,603
2	25	3,046
3	50	5,128
4	100	9,049
5	200	18,100

Tab. 4: Vliv hloubky tunelu na přítok vody do tunelu, pro všech 5 výpočtů byla zadána hydraulická vodivost $6,5E-2$ m.den⁻¹



Obr. 9: Graf závislosti přítoku vody do tunelu na hloubce tunelu pod povrchem, $K = 6,5E-2$ m.den⁻¹

úsek		I.	II.	III.	IV.	V.
d (délka úseku)		150	735	1110	429	176
r ₂ [m]		20,00	108,40	92,90	45,30	8,40
tok [dm ³ .s ⁻¹]:	duben	1,26	0,12	0,13	0,17	1,65
Q/d [dm ³ .s ⁻¹ .m ⁻¹]	duben	8,40E-03	1,63E-04	1,17E-04	3,96E-04	9,38E-03
Q _{spoč} [dm ³ .s ⁻¹ .m ⁻¹]		2,94E-02	1,14E-01	9,87E-02	5,30E-02	1,87E-02
K [m.s ⁻¹]		2,15E-07	1,08E-09	8,93E-10	5,62E-09	3,78E-07
K _{analytické} [m.s ⁻¹]		1,61E-07	9,82E-10	7,91E-10	4,49E-09	2,74E-07
K _{numerické} [m.s ⁻¹]		2,15E-07	1,08E-09	8,93E-10	5,62E-09	3,78E-07
rozdíl [%]		25	9	11	20	28

Tab. 5: Data pro kalibraci vodivosti na přítoky z měsíce duben, s využitím regrese odvozené z numerického modelu; zaznamenán rozdíl hodnot vodivosti kalibrované z analytického řešení a z numerického řešení.

4.2 2D svislý řez terénu – hydrologický oběh

V další dílčí řešené úloze si na reálnější geometrii, která vystihuje úbočí kopce, ověřujeme vliv kombinací zadaných okrajových podmínek na proudění podzemní vody v rámci hydrologického oběhu vody. Simulujeme vliv srážek a jejich odtok přes vodivý povrch či průsak do podzemí a následný odtok z oblasti do řeky.

Geometrie úlohy, která je vidět na Obr. 10, je tvořena intuitivně a samotné úbočí se skládá z pěti, spíše empiricky volených bodů, které prokládáme spline křivkou. Jedná se přitom o osově souměrný problém a proto řešíme, pouze jednu polovinu celého kopce. Okrajové podmínky jsou ve všech případech, pokud nebude v textu řečeno jinak, nulové toky na boční stěny a spodní stěnu, tj. opět jedna zvodeň a navíc využíváme skutečnosti, že vrchol kopce vytváří v přírodě rozvodí. Na svislici procházející pod vrcholem lze proto předpokládat nulový přetok. Obdobně je tomu na druhé straně modelu. V bodě o souřadnicích (5, 0, 0) předepisujeme okrajovou podmínku nulové tlakové výšky, čímž simulujeme řeku v daném místě. Nulový tok přes svislou hranici pod řekou jsme oprávněni použít z důvodu symetrie úlohy .

Na Obr. 11 je zachycen výsledek základního modelu, kdy na kopec předepisujeme jako okrajovou podmínku nulovou tlakovou výšku vody a přes další hranice nepřipouštíme tok vody. Zadáváním nulové tlakové výšky na povrch kopce jsme nahradili srážky „vynucenou hladinou“. Hladiny vody v jednotlivých hloubkách se přizpůsobují tvaru kopce a v nejnižším místě úbočí pak voda vytéká na povrch.

Další obrázek (Obr. 12) postihuje případ, kdy místo předepsané nulové tlakové výšky na celý kopec, zadáváme tuto pouze na element v nejnižší části kopce. Zde je přiřazena na vrchní stěnu 2D elementu nejbližší k bodu o souřadnicích (5, 0, 0). Na zbytek kopce pak předepisujeme srážky ve formě toku. Tok zadáváme jako hustotu toku, tj. např. při srážkách 20 mm.den^{-1} předepisujeme na každý element hodnotu toku $2.0\text{E-}2 \text{ m.den}^{-1}$. Jak je vidět z jednotlivých variant, pokud jsou srážky nulové, pak se ustálí hladina podzemní vody v rovině s řekou (varianta c)), jestliže srážky rostou, zvedá se hladina podzemní vody a v místě kontaktu takto zvýšené hladiny s povrchem kopce, by měla vytékat ven a proudit pak po povrchu. Toto však na modelech nelze sledovat, protože proti tomuto jevu stále působí okrajová podmínka zadaného toku.

K zadávání srážek v dalších případech, je využito konceptu povrchových elementů, tedy nad 2D elementy vytváříme 1D elementy, na které předepisujeme

hustotu toku, nastavením vybraných parametrů pak ovlivňujeme míru interakce mezi srážkami na povrchu a prostředím pod povrchem.

Klasické zadání hodnoty toku na hranice vybraných elementů můžeme nahradit tak, že využijeme 1D, respektive 2D povrchových elementů, které sestrojíme nad 2D, respektive 3D elementy. Takto sestrojené elementy reprezentují „formu“ vody tekoucí po povrchu a množství vody, které na ně působí vlivem srážek definujeme jako zdroje na každý povrchový element. Zdroje jsou zadávány v podobě hustoty toku a je nutné pro jejich zahrnutí do výpočtu vytvářet další vstupní soubor pro software Flow123d. K zajištění komunikace mezi elementy nižší a vyšší dimenze pak máme koeficient, který dovoluje specifikovat míru „spojení“. Jedná se o koeficient přechodu σ . Dále je možné měnit nastavení velikosti rozevření obou typů elementů, čímž definujeme virtuální hloubku 2D elementů ve třetím rozměru a příčný průřez 1D elementů. V neposlední řadě musíme nastavit vodivost povrchových elementů. Pozměňování poměru hydraulické vodivosti povrchových a podpovrchových elementů má svůj fyzikální význam, kdy jsme takto schopni vyjádřit, jaké množství srážek oteče po povrchu a jaké se vsákne. V dalších úlohách kapitoly používáme výhradně popsany koncept 1D povrchových elementů..

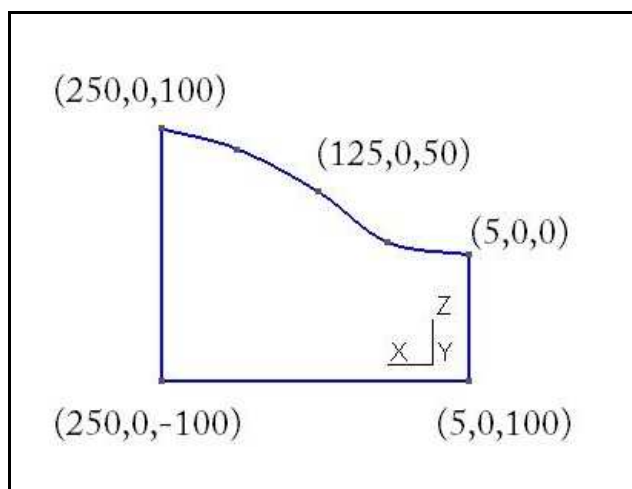
Na Obr. 13 jsou zobrazeny výsledky simulace v podobě rozložení pole tlakové výšky a proudového pole pro rychlost toku. Srážky jsou přepočítány z ročního úhrnu 1200 mm, což pak činí hustotu toku o velikosti $3,3E-3 \text{ m.den}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že Flow123d poskytuje ve svých výstupních souborech informaci o tom, kolik vody proteče přes určitou hranici za jednotku času, bylo možné určit velikost plochy kopce. Pokud hustotu srážek vynásobíme plochou podstavy 245 m^2 , dostáváme přítok $0,81 \text{ m}^3.\text{den}^{-1}$. Ve výstupu z Flow123d však nalezneme přítok $0,89 \text{ m}^3.\text{den}^{-1}$. Vydělením numericky spočteného přítoku hodnotou srážek dostáváme výslednou plochu povrchu kopce, která činí 269 m^2 . Vzhledem ke zvlnění terénu hodnota odpovídá předpokladu, kdy tato plocha musí být větší než plocha rovné podstavy.

Výsledky uvedené na Obr. 14 uvádějí do souvislosti vliv změny poměru hydraulické vodivosti povrchu a podpovrchové horniny. Přechodový koeficient σ je nastaven u všech variant na hodnotu $1E3$. U varianty a) je poměr $1/1$, což bereme jako základní nastavení. Jestliže změníme nastavení tak, že povrch je 10krát vodivější, varianta b) Obr. 14, pak se mění tlakové pole v oblasti. Ze zobrazených

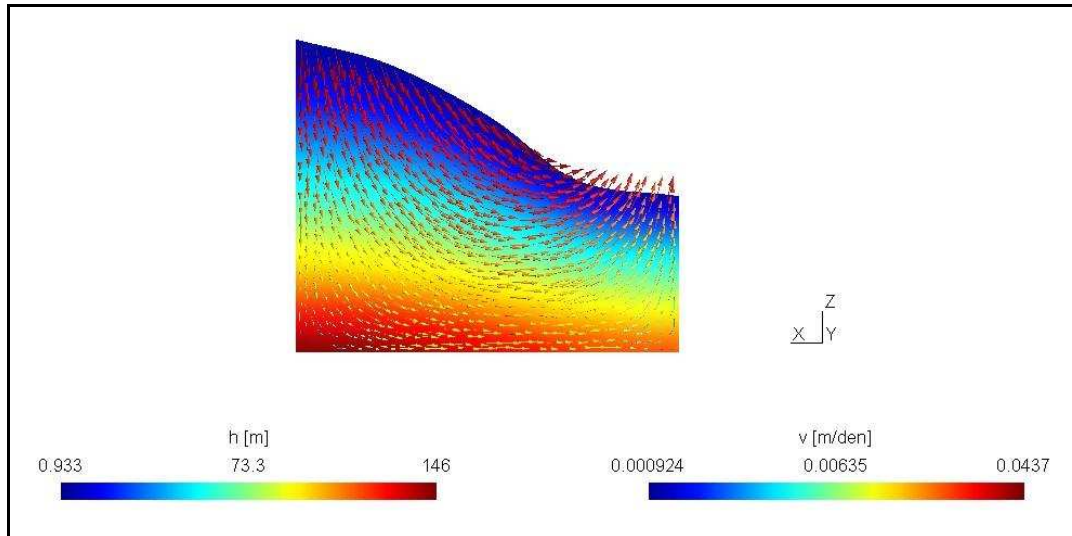
vektorů hustoty toku je patrné, že větší část vody odeče přímo po povrchu a menší část se dostává do podzemí a pak opět vytéká do řeky. V případě c), kdy je povrch 0,1krát vodivější než povrch, se vsákne větší množství srážek, což vede při zadaných okrajových podmínkách na větší nárůst tlakové výšky uvnitř oblasti a následně většímu přítoku vody z podzemí.

Na Obr. 15 měníme tentokrát pro jednotlivé varianty velikost přechodového koeficientu σ , který určuje míru interakce mezi povrchovými elementy a podpovrchovou vrstvou. Z výsledků je patrné, že pro zmenšující se σ přestává fungovat průsak z povrchu do podzemí a větší množství srážek stéká přímo po povrchových elementech do řeky, což lze pozorovat na variantě c).

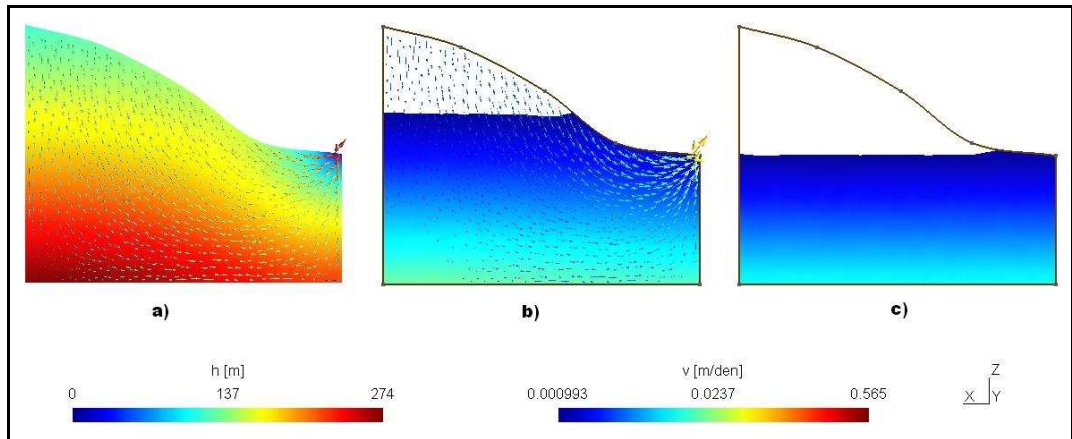
Na posledním výstupu z této úlohy, Obr. 16, uvádíme vliv množství srážek na proudění podzemní vody. Referenčním případem je varianta c), ve které zadáváme hustotu toku na povrchové elementy $3,3E-3 \text{ m.den}^{-1}$, u varianty a) jsou zadány nulové srážky a model by tak měl odpovídat situaci s nulovým tokem na povrchu a bez použití povrchových elementů, tedy variantě c) Obr. 12. Pro vyšší hodnotu srážek, např. 20 mm.den^{-1} se pak model chová dle varianty d), kdy dochází k natlakování vody v hornině.



Obr. 10: Geometrie úlohy 2D svislý řez – hydrologický oběh; uvedeny souřadnice hlavních bodů modelu

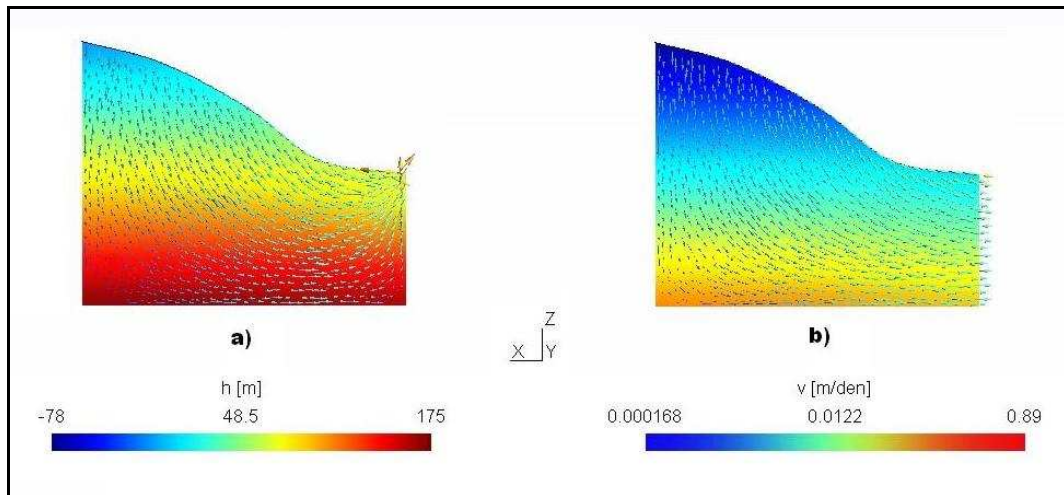


Obr. 11: Základní model hydrologického oběhu, na povrch kopce předepisujeme nulovou tlakovou výšku, spodní i boční stěny jsou nepropustné, zadáváme nulový tok

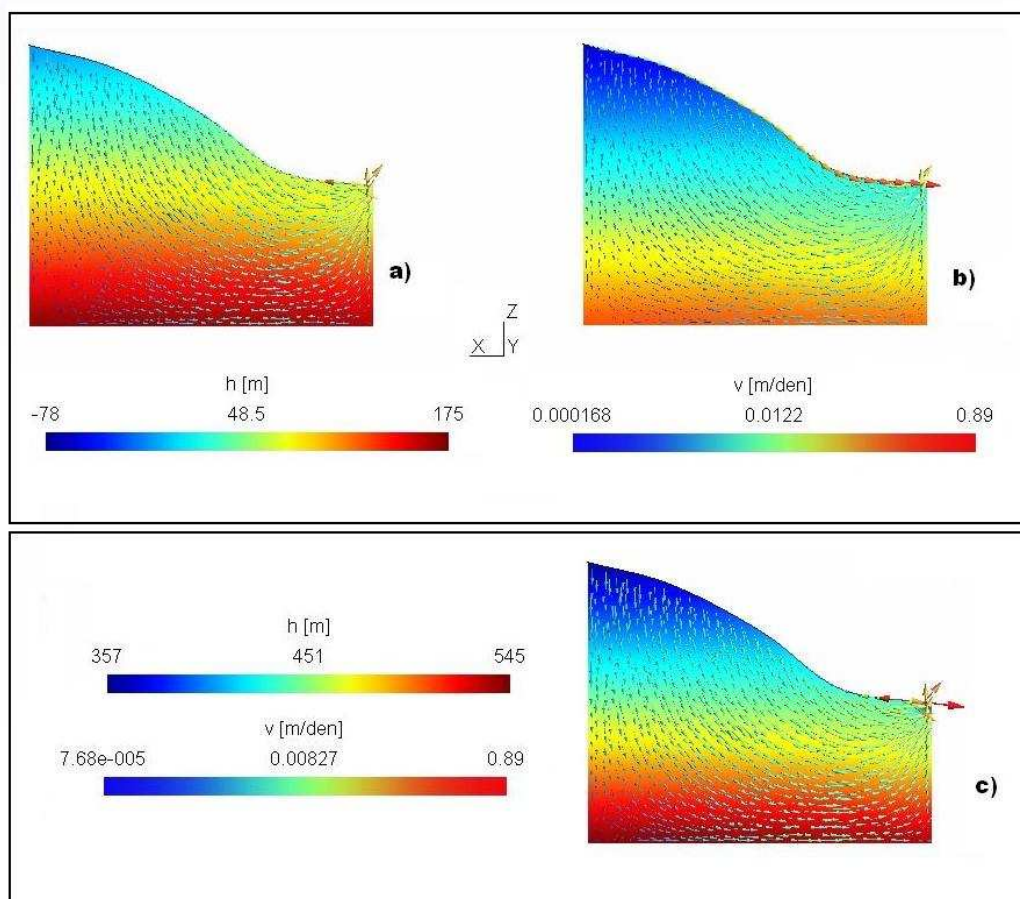


Obr. 12: Vliv velikosti toku předepsaného na povrch kopce, pro všechny varianty je předepsán nulový tok přes spodní a boční stěny, podmínka nulové tlakové výšky je předepsána na element u povrchu v nejnižším místě úbočí. Volné místo u varianty b) a c) značí nesaturovanou zónu.

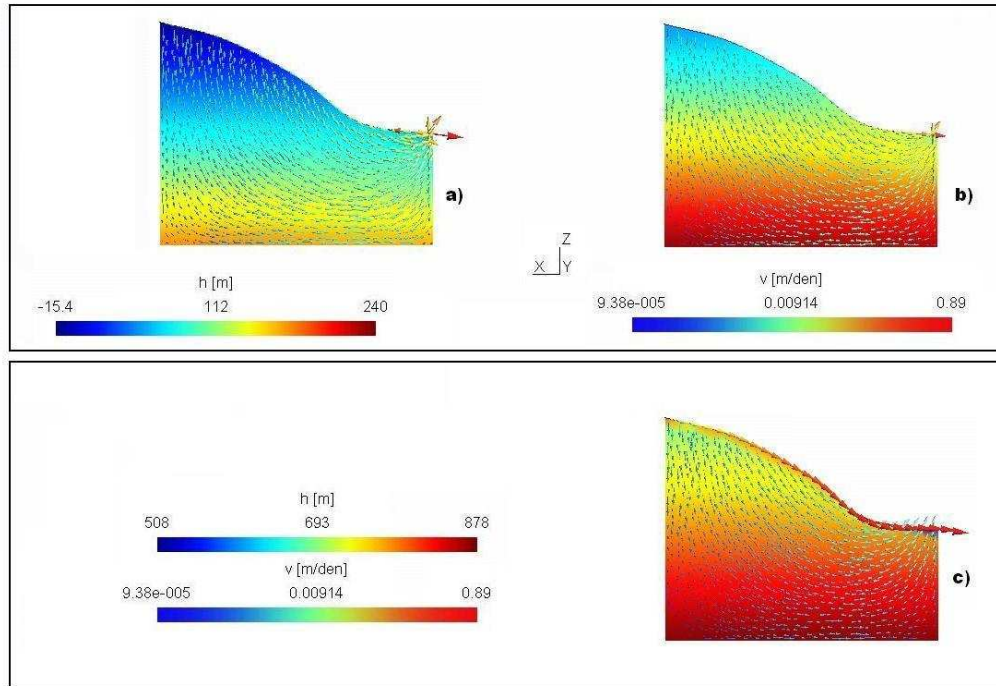
Toky jsou následující: a) $2,0E-2 \text{ m.den}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ b) $3,3E-3 \text{ m.den}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, c) $0 \text{ m.den}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$



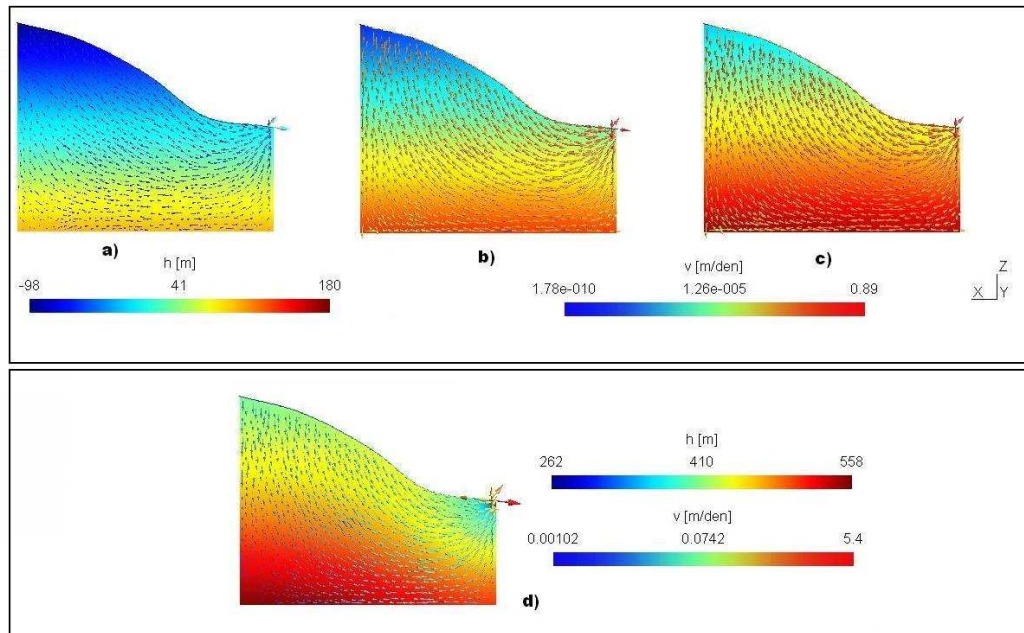
Obr. 13: Vliv kombinace OKP na proudění, předepisujeme konstantní srážky, hydraulickou vodivost 1D a 2D elementů a koeficient σ ; Varianta a) nulové toky přes spodní a obě boční linie, na povrch s liniovými prvky, jsou předepisovány srážky, na bod (5, 0, 0) – viz Obr. 10, je předepsána nulová tlaková výška; u varianty b) pravá boční linie – hydrostatický nárůst tlaku



Obr. 14: Vliv poměru vodivosti 1D povrchových elementů a 2D elementů, přechodový koeficient σ má hodnotu 1E3; u varianty a) je poměr $K_{\text{povrch.}} / K = 1/1$, u varianty b) je $K_{\text{povrch.}} / K = 10/1$ a u varianty c) $K_{\text{povrch.}} / K = 0.1/1$



Obr. 15: Vliv změny koeficientu σ (přestup mezi 1D a 2D elementy) na proudění, srážky $3,3E-3$ $m.den^{-1}$, $K_{povrchu} = K_{horniny} = 6,5E-2$ $m.den^{-1}$; varianta a) $\sigma = 1E3$, varianta b) $\sigma = 1E-3$, varianta c) $\sigma = 1E-5$



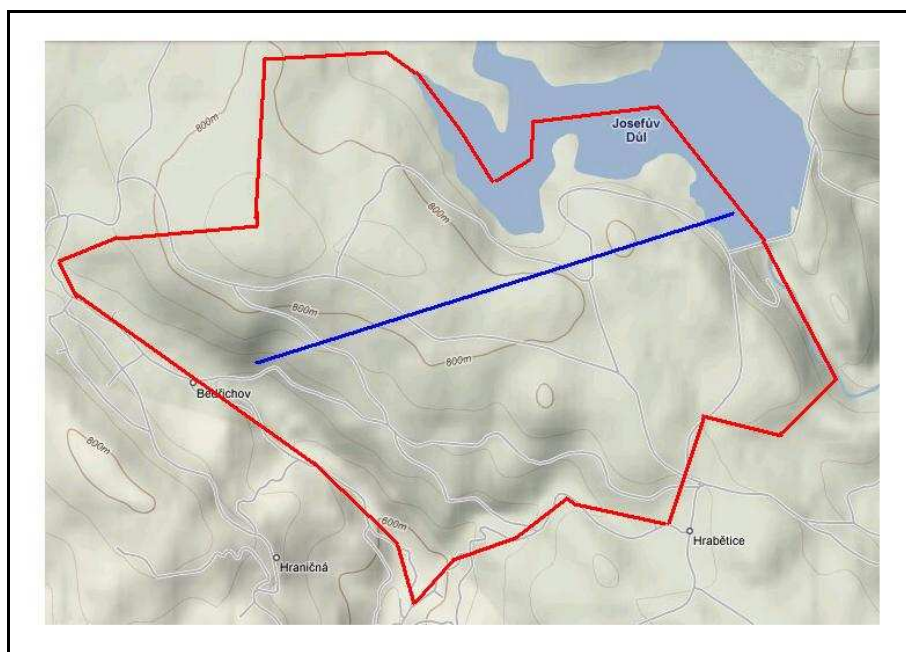
Obr. 16: Množství srážek a jeho vliv na proudění; obrázek a) je model bez srážek, varianta b) model se srážkami odpovídajícími $1,6$ $mm.den^{-1}$, varianta c) model se srážkami odpovídajícími $3,3$ $mm.den^{-1}$ (referenční případ) a varianta d) model se srážkami odpovídajícími 20 $mm.den^{-1}$

4.3 3D úloha lokality Bedřichov

Poté co jsme odhadli přibližné hodnoty hydraulické vodivosti horniny a vyřešili další dílčí modely, budeme pokračovat popisem vlastní práce spojené s vytvořením 3D modelu lokality, zadáním okrajových podmínek, zpracováním spočtených dat a hlavně jejich vyhodnocením.

První kroky vedou k modelu oblasti bez tunelu. Na této úloze jsme po zadání okrajových podmínek poznali proudění z hlediska hydrologického oběhu na složitější povrchové geometrii. Poté byla úloha doplněna o vlastní tunel. Na modelu s tunelem jsme pak při zadaných okrajových podmínkách prováděli variace nastavení hydraulické vodivosti jednotlivých materiálových celků a ověřili si tak, jak bude ovlivňovat přítok do tunelu. Na posledním modelu, který byl doplněn kromě tunelu také o povrchové 2D elementy, byla opět provedena variace hydraulické vodivosti a k tomu přibyla analýza vlivu výšky vodní hladiny v přehradní nádrži, na sledované přítoky vody do tunelu.

Na Obr. 17, který byl pořízen výřezem mapy z [12], je zachycena lokalita Bedřichova a především hranice modelu (červeně) a modrou čarou je znázorněna přibližná poloha tunelu. Jak je možné vidět, okraje modelu vedou buď po hřebenech kopců, rozvodích, nebo přímo po řekách, přičemž můžeme hladinu vody v přehradní nádrži z hlediska okrajových podmínek považovat taktéž za určitý druh „řeky“.



Obr. 17: Mapa sejmuta z [12]; modrou linkou znázorněno přibližné určení polohy tunelu, červeně označeny přibližné hranice modelu

4.3.1 Model oblasti bez tunelu

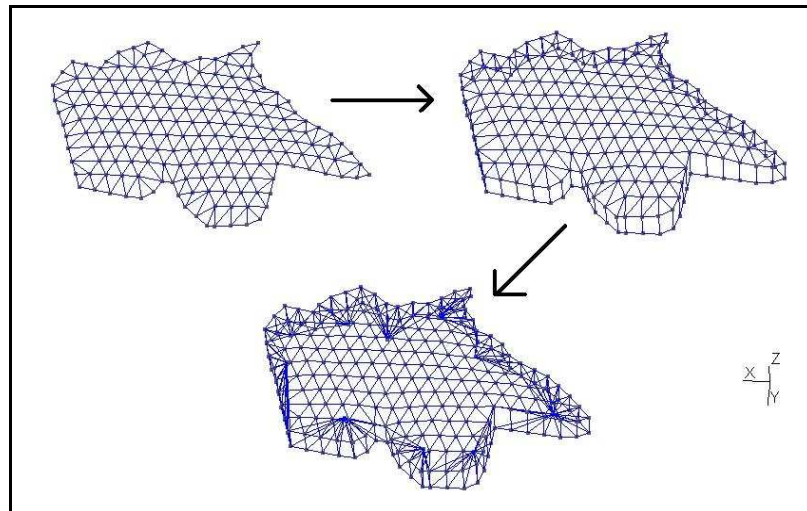
Prvotní práce, která předchází každým výpočtům požadované úlohy, spočívá v definování geometrie takovéto úlohy. Při této činnosti jsme vycházeli z obdržených dat, která představovala triangulační síť povrchu. Z této sítě byla vytvořena plocha povrchu. Další práce spočívala v nadefinování spodního okraje modelu, to bylo provedeno úpravou okrajových bodů zmíněné sítě, které jsme „překopírovali“ do konstantní výšky 400 m. Boční okraje modelu pak vznikly z ploch, které se daly sestavit po spojení nad sebou ležících okrajových bodů, respektive takto vzniklých linií. V této fázi již bylo teoreticky možné vytvořit z nadefinovaných ploch objem modelu. S úmyslem usnadnit si pozdější zadávání okrajových podmínek, jsme však ještě vytvořili jakési podobjemy vstupujícími do hlavního objemu oblasti od bočních stěn. V konečném výsledku však očekávaný efekt těchto podobjemů nesplnil očekávání, když s použitými programovými prostředky nebylo možné uvažovanou výhodu použít. I tak jsou ve všech modelech tyto podobjemy zachovány a to i přesto, že zvětšují počet 3D elementů výsledné sítě.

Po vytvoření geometrie modelu následovalo vytvoření sítě. Tuto práci zajistil program GMSH. Přičemž jsme byli samozřejmě schopni ovlivňovat nastavení, která definovala, kde bude síť jemnější a naopak. Počet elementů u těchto úloh se pohyboval od 30 tis. do 65 tis. Postupem času se při výpočtech ukázalo, že 65 tisíc elementů byl pro použitý výpočetní hardware limitní počet elementů a výpočty na jemnějších sítích již kolabovaly na nedostatku paměti.

Dalším krokem bylo vytvoření materiálů a zadání příslušných okrajových podmínek. U tohoto bodu jsme při prvotních výpočtech úlohy s předepsanými vodivostmi v řádech zjištěných v kapitole 4.1.1, tj. 10^{-10} - 10^{-7} m.s⁻¹, přišli na tu skutečnost, že použité řešiče mají s takto nízkými hodnotami, které vstupují do řešených rovnic, potíže a nejsou schopny konvergovat. Proto jsme přistoupili k přeškálování na jednotky m.den⁻¹, tím jsme implicitně pozměnili jednotky výsledků. Avšak ani tato úprava nepomohla a proto jsme použili umělé zvětšení vodivostí o dva řády, což se projevuje při přepočítávání výsledků do jednotek odpovídajících měřením v tunelu.

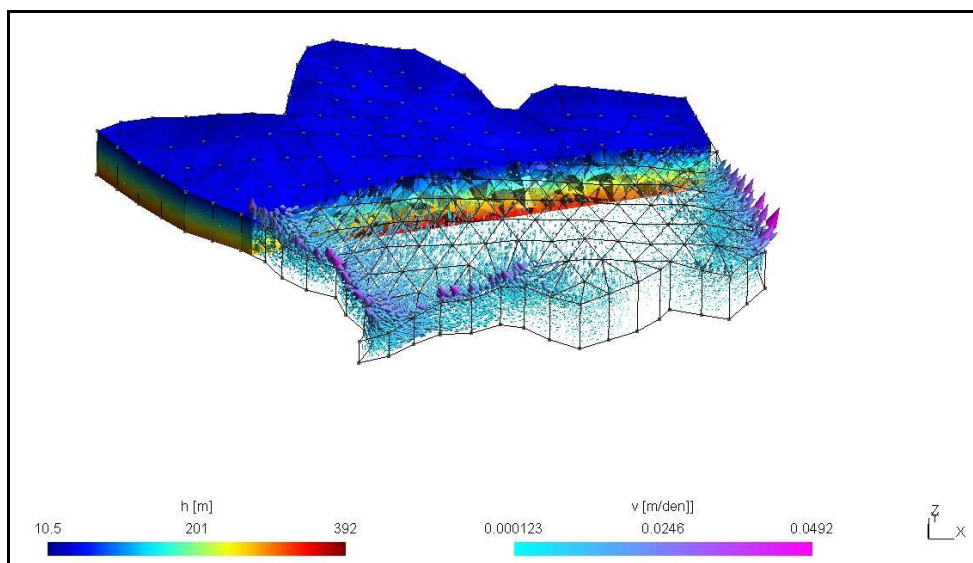
Následujícím krokem již pak bylo „pouze“ spuštění výpočtů a náležité vyhodnocení dosažených výsledků. Při používání standartních řešičů jako je gm6 či

isol se přitom několikrát objevil právě problém s nekonvergencí a proto byly poslední úlohy počítány přes prostředí Matlab.



Obr. 18: Postup vývoje geometrie modelu oblasti Bedřichov

Jedinou simulací, kterou jsme provedli na takto vytvořeném modelu bez tunelu, bylo vypočtení případu, kdy na celém povrchu bude mít voda tlakovou výšku 0 m, tedy lokalita bude nasycená v každém místě a na boční plochy bude předepsán nulový tok. Dle předpokladu by voda z kopců, vyšších míst modelu, měla proudit do nižších míst, která se nacházejí na hranici oblasti. Výsledky v podobě pole tlakových výšek a vektoru rychlosti jsou zobrazeny na Obr. 19. Pohled je rozdělen na dvě části a to tak, že je vidět místo, kde bude v dalších modelech probíhat tunel.



Obr. 19: Zachycení řezu oblastí s vyobrazením pole tlakových výšek a vektoru rychlosti proudění, každá z veličin zobrazena pouze v polovině objemu. Pro lepší orientaci v modelu doplněna o geometrickou síť okrajů úlohy

4.3.2 Model oblasti s tunelem

Pro tuto úlohu bylo nutné doplnit geometrii modelu z předchozí kapitoly o samotný tunel. Ze známých souřadnic obou konců tunelu a známé délky jeho pěti úseků, jsme pomocí lineární interpolace vypočítali hodnoty středů kružnic na začátku, respektive konci každého jednoho úseku. S pomocí cyklu (známo z klasických programovacích jazyků), který jsme vytvořili v programu GMSH jsme pak vytvořili samotné těleso tunelu. Každá kružnice je přitom interpolována dvanáctiúhelníkem. Jeho vytvoření usnadnilo definici ploch potřebných k „vyříznutí“ tunelu v původním hlavním objemu.

Pro potřeby porovnávání přítoků spočtených a naměřených, kdy byla prováděna měření právě pro vytvořených 5 úseků tunelu, bylo přistoupeno k dalšímu vylepšení geometrie. Samotný malý tunel jsme „obalili“ větším válcem a vznikl nám tak další objem v modelu. Mezikruží, které bylo takto vytvořeno bylo silné 3 metry. Uvedená úprava měla dva důvody. Zaprvé dovolila předepisovat okrajové podmínky na jednotlivé úseky tunelu a tyto podmínky vhodně očíslovat. V návaznosti na to, že Flow123d ve výstupech uvádí, kolik vody přiteklo či oteklo přes definovanou okrajovou podmínku, tak získáváme přímo hodnoty přítoku na jednotlivé úseky a s nimi dále pracujeme. Zadruhé umožnila měnit vodivost horniny v okolí tunelu, ve kterém je potvrzen výskyt většího množství puklin vlivem poškození horniny ražbou, a dá se tedy očekávat, že se hydraulická vodivost změní.

U úlohy s tunelem jsme použili jednak model bez povrchových elementů, který ukázal vliv změn vodivostí na přítoky a pak také model s povrchovými 2D elementy. Na tomto je testován vliv časově proměnných okrajových podmínek a také ukazuje vliv materiálových změn, které vedou na různé poměry odtoku srážek a průsaku do podzemí.

Model bez povrchových elementů

Jak se dá usuzovat, u tohoto modelu, který je co se týče okrajových podmínek definován stejně jako předchozí model bez tunelu, pouze s tím rozdílem, že přibyla další okrajová podmínka nulové tlakové výšky vody na tunelu, lze hledat pouze jeden parametr, který bude ovlivňovat přítok vody do částí tunelu. Tím je hydraulická vodivost horniny.

Pro naše potřeby jsme vytvořili celkem tři varianty materiálu. Prvotní myšlenka se opírá o předpoklad, že hornina v celém modelu bude stejně vodivá až s výjimkou dvou krajních úseků tunelu, jejichž okolní skála bude o tři řády vodivější, což ostatně předpokládá i odhad hydraulické vodivosti. Vzniká tak materiálová varianta, kterou označíme A. Další materiál pak reflektuje výsledky modelu s materiálem A, kde spočítaný přítok na metr délky řádově odpovídá naměřeným pouze v prostředních částech tunelu a na okrajích je nižší. Proto volíme materiál B, kde zvětšujeme hydraulickou vodivost všech hornin v modelu o jeden řád. Touto úpravou docílíme řádového zvětšení přítoků na okrajích, ale zároveň i v dalších částech tunelu. Jediné pozitivum této materiálové varianty pak spočívá v tom, že docílíme řádové shody celkového spočteného a naměřeného výtoku z tunelu. Další varianta materiálu, označena C zlepšuje již více celkový výtok vody z tunelu, ale u přítoků do jednotlivých částí se vzdalujeme měřenému. Varianty materiálů uvádíme v Tab. 6. Výsledky jednotlivých modelů včetně naměřených dat uvádíme v Tab. 7.

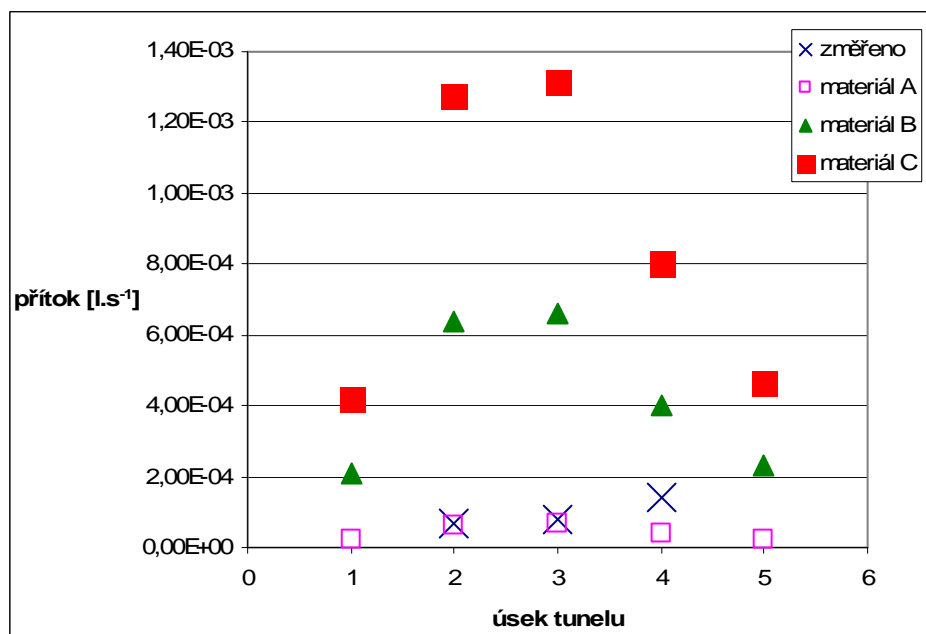
materiál	hydraulická vodivost [m.den ⁻¹]		
	A	B	C
hornina	5,5E-03	5,5E-02	1,1E-01
hornina v okolí úseků II, III a IV	5,5E-03	5,5E-02	1,1E-01
hornina v okolí úseků I a V	5,0E+00	5,0E+01	1,0E+02

Tab. 6: Nastavení hydraulických vodivostí pro jednotlivé materiály

		Varianta materiálů A	Varianta materiálů B	Varianta materiálů C
z Flow123d	d [m]	Přítok (odtok) [m ³ .den ⁻¹]		
tunel - I. Úsek	150	27,18	271,82	543,64
tunel - II. Úsek	735	404,58	4045,79	8091,59
tunel - III. Úsek	1110	631,39	6313,90	12627,80
tunel - IV. Úsek	429	148,47	1484,65	2969,31
tunel - V. Úsek	176	34,99	349,89	699,78
celý tunel	2600	-1246,61	-12466,10	-24932,10

Po přeškalování:	d [m]	Přítok (odtok) [l.s ⁻¹ .m ⁻¹]			Změřeno [l.s ⁻¹ .m ⁻¹]
1	150	2,10E-05	2,10E-04	4,19E-04	4,07E-03
2	735	6,37E-05	6,37E-04	1,27E-03	6,80E-05
3	1110	6,58E-05	6,58E-04	1,32E-03	8,11E-05
4	429	4,01E-05	4,01E-04	8,01E-04	1,40E-04
5	176	2,30E-05	2,30E-04	4,60E-04	1,05E-02
celý tunel: výtok [l.s ⁻¹]		1,44E-01	1,44E+00	2,89E+00	2,66E0 až 3,33E0

Tab. 7: Spočtené hodnoty z modelu bez povrchových elementů, pro tři typy materiálů, jejichž nastavení je uvedeno v Tab. 6; v horní tabulce jsou hodnoty vypočítané pomocí Flow123d a ve spodní pak přeškalujeme zpět do skutečných porovnatelných veličin



Obr. 20: Graf zachycující situaci simulovaných a naměřených přítoků do jednotlivých částí tunelu; pro naměřená data není uveden přítok do 1. a 5. úseku, který je řádově mimo uvedený rozsah; na ose y vynesena přítok [l.s⁻¹.m⁻¹], na ose x uvedeno číslo úseku tunelu

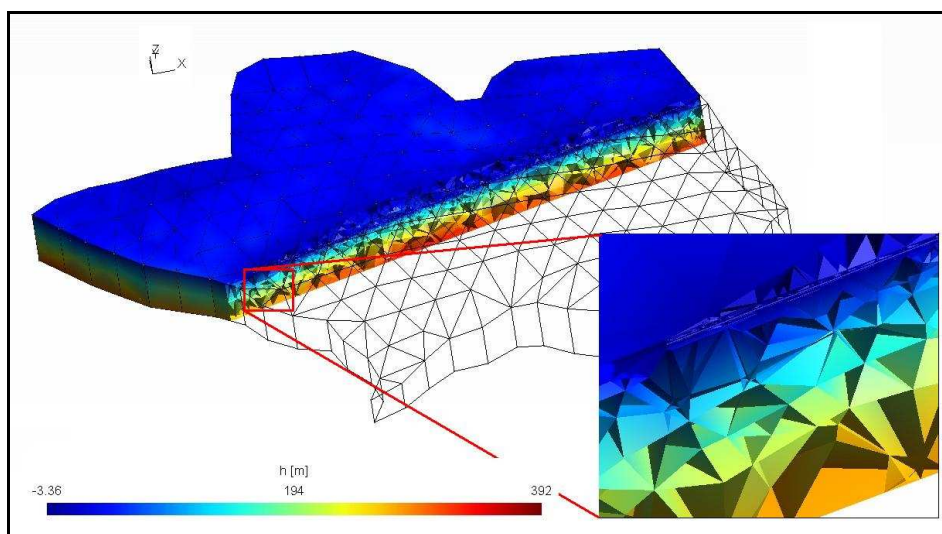
Z grafu, který je uveden na Obr. 20 dobře vidíme, že i když zvětšujeme vodivost horniny, tak se nedaří dokalibrovat přítoky na okrajích. U úlohy s takto zadanými okrajovými podmínkami tohoto jevu ani nelze dosáhnout, tedy aniž

bychom přitom uměle nezvětšili přítoky také do středních částí tunelu. Je také patrné, že úvodní materiálová varianta označená jako A, velmi dobře vystihne přítoky do středních částí tunelu. Otázkou pak je, jakým dalším postupem by se mohlo docílit zvýšeného přítoku do krajních částí, aniž bychom uměle zvyšovali hydraulickou vodivost horniny.

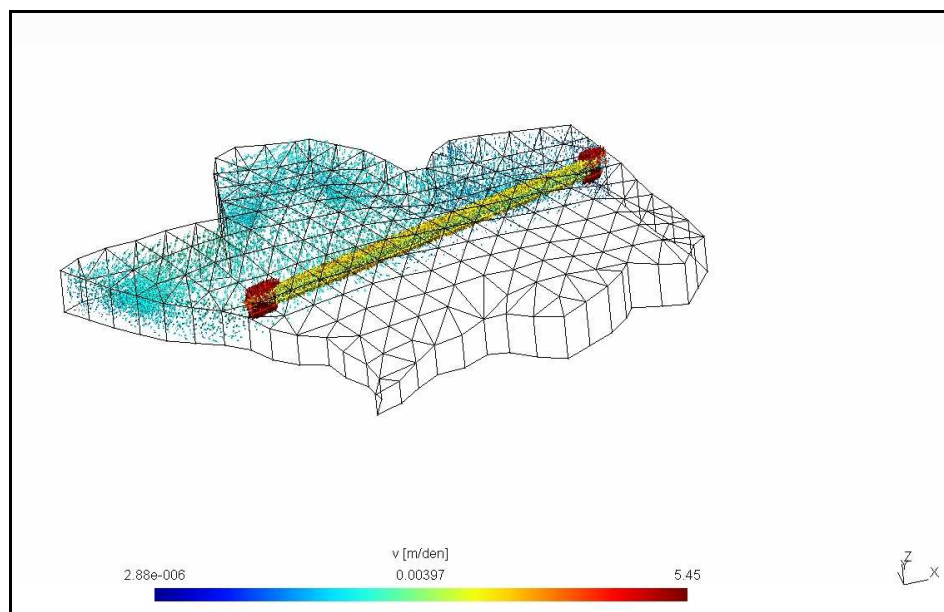
Zřejmé je, že je potřeba postihnout jev, kdy hydraulická vodivost bude záviset na hloubce. U povrchu se dá očekávat větší vodivost, proto by bylo vhodné vytvořit podpovrchové pásy, které toto budou reflektovat. Začleněním okrajových úseků tunelu do takovýchto pásů by pak zřejmě bylo možné zvětšit dle předpokladu přítoky vody do těchto úseků, aniž bychom přitom museli zvětšovat vodivost horniny v hlavním objemu úlohy.

Na dalších grafických výstupech z této úlohy můžeme vidět pole tlakové výšky v řezu lokalitou, viz Obr. 21. Řez je proveden rovinou procházející rovnoběžně s tunelem a protínající jeho osu. Díky použitému nástroji, který je součástí programu GMSH, došlo k „odstranění“ všech elementů v polovině modelu, kterou definujeme právě rovinou řezu. Což se projeví na zobrazení, které je ve zvětšeném výřezu, přičemž nejde o chybu výpočtu.

Na Obr. 22 je pak zachycen model se znázorněním vektoru rychlostí, taktéž v jedné polovině modelu. V okolí tunelu je přitom rychlost tunelu větší než ve zbylém horninovém prostředí a na krajních úsecích dosahuje maximálních hodnot odlišných od prostředních úseků, což je způsobeno řádově větší hydraulickou vodivostí nastavenou právě v krajních úsecích.



Obr. 21: Výstup z modelu s materiálem A; zobrazeno pole tlakové výšky, výřez z oblasti naznačen červeným rámečkem



Obr. 22: Vyobrazení vektoru rychlosti v úloze s tunelem a bez povrchových elementů

Model s povrchovými elementy

V předchozím modelu jsme byli omezeni pouze na zadání jednoho typu okrajové podmínky a to předepsané tlakové výšky. Mohli jsme sice zadat na povrch srážky ve formě toku a na tunel zadávat opět nulovou tlakovou výšku, avšak z takového modelu bychom zjistili „pouze“ to, že co nateče přes povrch odeče tunelem. Nepostihneme tak vůbec odtok srážek do řek a přehradní nádrže Josefův Důl.

K tomuto účelu jsme na povrchu modelované 3D vrstvy vytvořili 2D povrchové elementy. Na tyto elementy zadáváme srážky v podobě zdrojů a na řeky, které nyní tvoří okrajovou linii kolem celého povrchu, předepisujeme nulové tlakové výšky. Bylo tak pouze nutné rozlišit, které z povrchových elementů patří k řekám jako takovým a které k místům na rozvodí, kde budeme volit nulový tok. V počítaných modelech tak budou vždy okrajové podmínky zadány ve podobě, jak jsou zachyceny na Obr. 23. Tlaková výška na řece postihující hladinu přehradní nádrže bude upravována dle stavu vody v nádrži.

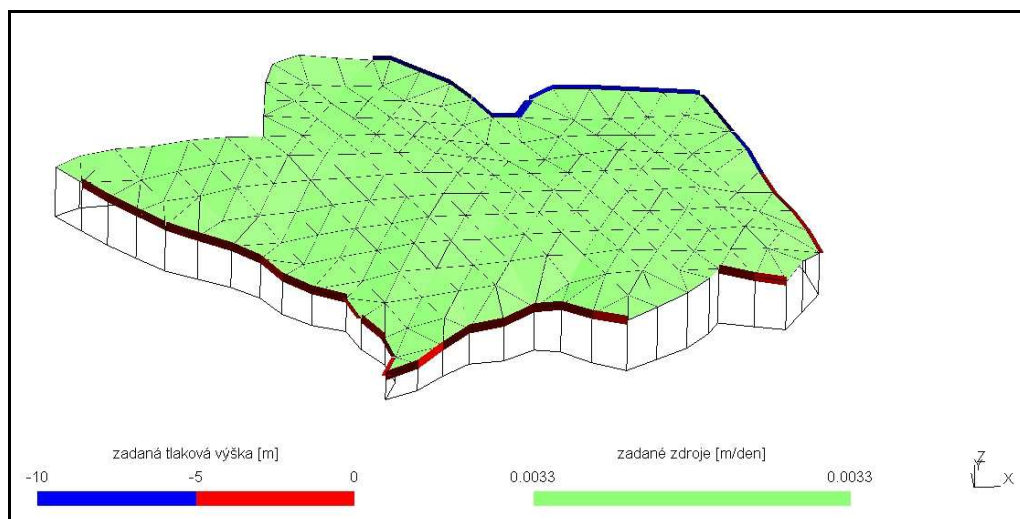
V Tab. 8 jsou vidět nastavení hydraulických vodivostí pro materiály použité v modelu. Vliv na počítanou problematiku má především rozdíl mezi hydraulickou vodivostí povrchových elementů a podpovrchových elementů oblasti. Výsledky modelů s takto nastavenými modely ilustrujeme Obr. 24.

Hlavní část práce s modelem spočívala v otestování vlivu časově proměnných okrajových podmínek. Při použití materiálové varianty E jsme měnili vydatnost srážek, kdy jednou činili $3,3E-3 \text{ m.den}^{-1}$ a v druhém případě $2,0E-2 \text{ m.den}^{-1}$. Jako druhá časově proměnná okrajová podmínka byla měněna výška hladiny v přehradní nádrži. V základním nastavení činila 735 m.n.m a z toho plynoucí zadaná okrajová podmínka typu řeka měla hodnotu 0 m (tlaková výška). Při druhém nastavení byla hladina vody ve výšce 725 m.n.m a z toho plynula podmínka o hodnotě -10 m (tlaková výška).

Jak se ukázalo, při vyšších hodnotách srážek přiteklo do tunelu více vody, toto tvrzení opíráme o data uvedená v spodní Tab. 9 a v Tab. 11. V první z nich jsou nasimulované přítoky do jednotlivých úseků tunelu pro standardní srážky a ve druhé jsou data pro srážky $2,0E-2 \text{ m.den}^{-1}$. Přičemž hladina vody v přehradní nádrži je uvažována ve výšce 725 m.n.m.

V Tab. 10 pak uvádíme výsledky další analýzy a to takové, kdy porovnáváme pro model s totožnými srážkami vliv snížené hladiny vody v přehradní nádrži. Z vypočítaných hodnot přítoků je jasně patrné, že při poklesu hladiny poklesnou také přítoky do všech úseků tunelu. Z procentuelního vyjádření změny těchto přítoků je patrné, že největší vliv má změna hladiny na přítok do úseku tunelu pod hladinou pro úseky dále od přehradní nádrže vliv klesá. Tento výsledek je v souladu s očekáváním.

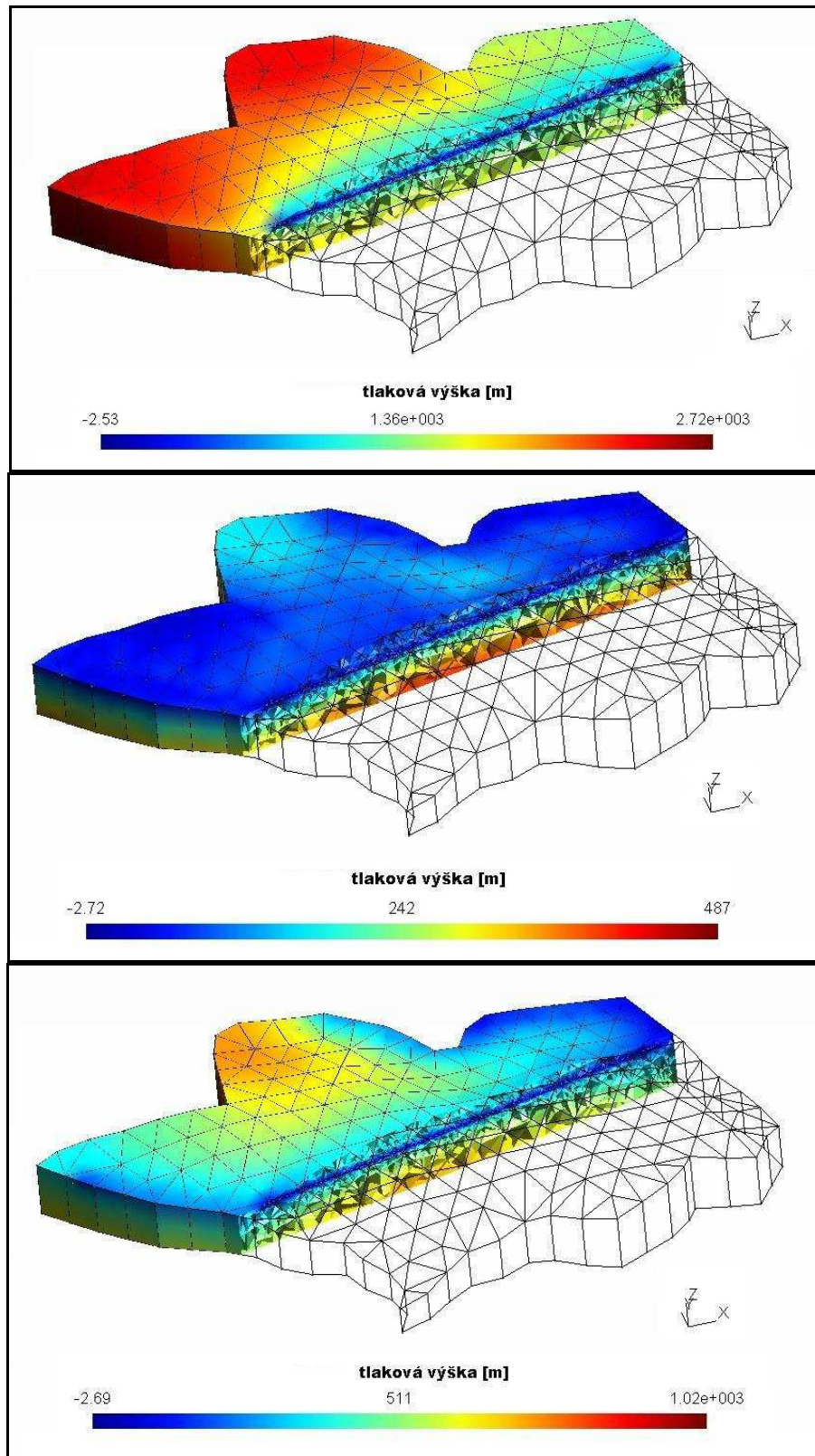
Na Obr. 25 je pak znázorněn graf přítoků do jednotlivých úseků tunelu pro případ zvýšených srážek a snížené hladiny. Jsou uvedeny tři varianty nastavení materiálů a měřené hodnoty. Nejlepší shody měřených a simulovaných dat je dosaženo při nastavení materiálové varianty E, přičemž tato shoda je pouze v prostředních úsecích tunelu a krajní části tunelu opět nejsme schopni takto postaveným modelem materiálově dokalibrovat na hodnoty měřených přítoků.



Obr. 23: Zobrazení zadávání okrajových podmínek pro úlohu s povrchovými elementy; na obrázku je zachycen případ, kdy v přehradní nádrži uvažujeme hladinu vody ve výšce 725 m.n.m, neboli -10 m tlakové výšky, řeky mají předepsáno vždy 0 m tlakové výšky

materiál	$K [m.den^{-1}]$		
	D	E	F
povrchové elementy	5,5E-03	5,0E+00	5,50E-01
hornina	5,5E-03	5,5E-02	1,1E-01
hornina v okolí úseků II, III a IV	5,5E-03	5,5E-02	1,1E-01
hornina v okolí úseků I a V	5,0E+00	5,0E+00	5,0E+00

Tab. 8: Nastavení materiálů pro jednotlivé varianty u modelu s povrchovými elementy



Obr. 24: Od vrchu jsou zachyceny výstupy modelů s materiálem D, E respektive F; zadávaná hustota srážek na povrch je $3,3E-3 \text{ m.den}^{-1}$, přestupový koeficient $\sigma=1E3$ má konstantní hodnotu u všech variant

		Varianta materiálů D	Varianta materiálů E	Varianta materiálů F
z Flow123d:	d [m]	Přítok (odtok) [m ³ .den ⁻¹]		
tunel - I. Úsek	150	1272,43	86,5515	315,378
tunel - II. Úsek	735	5925,58	675,327	2029,72
tunel - III. Úsek	1110	8197,58	1128,98	3038,85
tunel - IV. Úsek	429	2739,85	292,109	816,082
tunel - V. Úsek	176	817,385	55,3699	162,105
celý tunel	2600	18952,83	2238,34	6362,14

Po přeškalování:	d [m]	Přítok (odtok) [l.s ⁻¹ .m ⁻¹]			Změřeno [l.s ⁻¹ .m ⁻¹]
1	150	9,82E-04	6,68E-05	2,43E-04	4,07E-03
2	735	9,33E-04	1,06E-04	3,20E-04	6,80E-05
3	1110	8,55E-04	1,18E-04	3,17E-04	8,11E-05
4	429	7,39E-04	7,88E-05	2,20E-04	1,40E-04
5	176	5,38E-04	3,64E-05	1,07E-04	1,05E-02
<i>celý tunel: výtok [l.s⁻¹]</i>		<i>2,19E+00</i>	<i>2,59E-01</i>	<i>7,36E-01</i>	<i>2,66E0 až 3,33E0</i>

		Varianta materiálů D	Varianta materiálů E	Varianta materiálů F
z Flow123d:	d [m]	Přítok (odtok) [m ³ .den ⁻¹]		
tunel - I. Úsek	150	1272,27	85,7571	314,775
tunel - II. Úsek	735	5924,7	666,886	2024,39
tunel - III. Úsek	1110	8195,57	1102,95	3023,57
tunel - IV. Úsek	429	2738,7	276,649	806,507
tunel - V. Úsek	176	816,869	49,0025	157,5
celý tunel		18948,11	2181,24	6326,74

Po přeškalování:	d [m]	Přítok (odtok) [l.s ⁻¹]			Změřeno [l.s ⁻¹ .m ⁻¹]
1	150	9,82E-04	6,62E-05	2,43E-04	4,07E-03
2	735	9,33E-04	1,05E-04	3,19E-04	6,80E-05
3	1110	8,55E-04	1,15E-04	3,15E-04	8,11E-05
4	429	7,39E-04	7,46E-05	2,18E-04	1,40E-04
5	176	5,37E-04	3,22E-05	1,04E-04	1,05E-02
<i>celý tunel: výtok [l.s⁻¹]</i>		<i>2,19E+00</i>	<i>2,52E-01</i>	<i>7,32E-01</i>	<i>2,66E0 až 3,33E0</i>

Tab. 9: Výše uvedené tabulky ukazují vypočtená data pomocí Flow123d na modelu s povrchovými elementy, s využitím srážek 3,3E-3 m.den⁻¹ a s proměnnou hladinou vody v přehradní nádrži; v tabulce výše je hodnota hladiny v 735 m.n.m a ve spodní tabulce odpovídají data hladině v 725 m.n.m

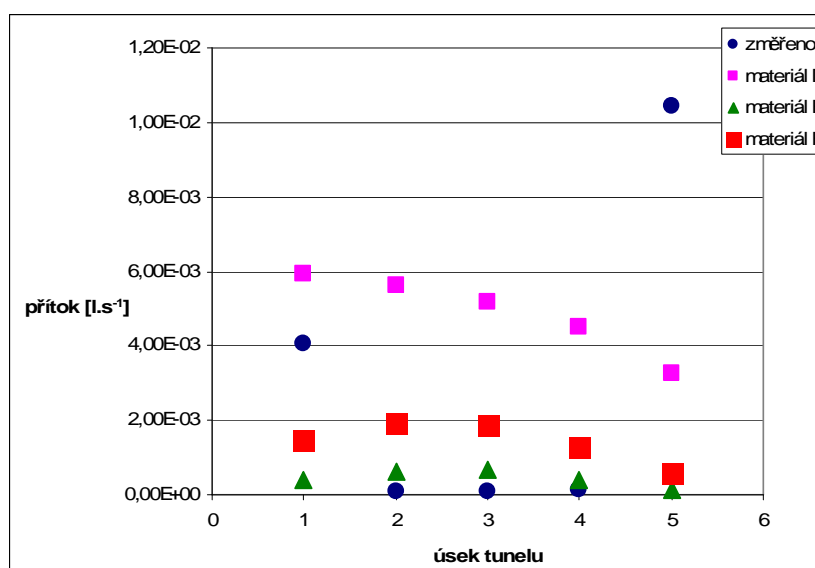
	Hladina 735 m.n.m	Hladina 725 m.n.m	rozdíl %
	Přítok [$l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$]		
tunel - I. Úsek	6,68E-05	6,62E-05	0,92%
tunel - II. Úsek	1,06E-04	1,05E-04	1,25%
tunel - III. Úsek	1,18E-04	1,15E-04	2,31%
tunel - IV. Úsek	7,88E-05	7,46E-05	5,29%
tunel - V. Úsek	3,64E-05	3,22E-05	11,50%

Tab. 10: Tabulka porovnávací data vypočítaná na modelu pro dva stavy hladiny vody v přehradní nádrži a pro konstantní srážky $3,3E-3 \text{ m} \cdot \text{den}^{-1}$, porovnávané přítoky na metr délky u jednotlivých částí tunelu

z Flow123d	d [m]	Přítok (odtok) [$m^3 \cdot \text{den}^{-1}$]		
		Varianta materiálů D	Varianta materiálů E	Varianta materiálů F
tunel - I. Úsek	150	7672,57	526,347	1898,21
tunel - II. Úsek	735	35809,9	4022,67	12227,6
tunel - III. Úsek	1110	49694,7	6323,4	18135,3
tunel - IV. Úsek	429	16659	1499,64	4798,73
tunel - V. Úsek	176	4977,02	232,806	914,528
celý tunel		114813,19	12604,86	37974,37

Po přeškálování:	d [m]	Přítok (odtok) [$l \cdot s^{-1}$]			Změřeno [$l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$]
1	150	5,92E-03	4,06E-04	1,46E-03	4,07E-03
2	735	5,64E-03	6,33E-04	1,93E-03	6,80E-05
3	1110	5,18E-03	6,59E-04	1,89E-03	8,11E-05
4	429	4,49E-03	4,05E-04	1,29E-03	1,40E-04
5	176	3,27E-03	1,53E-04	6,01E-04	1,05E-02
celý tunel: výtok [$l \cdot s^{-1}$]		1,33E+01	1,46E+00	4,40E+00	2,66E0 až 3,33E0

Tab. 11: Tabulka s nasimulovanými přítoky do tunelu při srážkách $2,0E-2 \text{ m} \cdot \text{den}^{-1}$ a pro sníženou hladinu vody v přehradní nádrži, tj. 725 m.n.m.



Obr. 25: Graf zobrazující data z Tab. 11, zobrazení přítoků na jednotlivé úseky tunelu, vypočítáno s modelem se srážkami $2,0E-2 \text{ m} \cdot \text{den}^{-1}$ a sníženou hladinou vody v přehradní nádrži

5 Závěr

V diplomové práci se pomocí analytického a numerického modelu přítoku vody do tunelu, a s využitím dat naměřených ve vodárenském tunelu Bedřichov A, podařilo odhadnout hydraulickou vodivost, která je řádově totožná s vodivostmi zjištěnými experimentálně na stejném typu horniny. Při porovnání obou modelů pro určení hydraulické vodivosti jsme zjistili, že geometrický vliv zjednodušených modelů se na rozdílech odhadnutých vodivostí projevuje odchylkou v rozmezích od 10 až 30 %. Což lze považovat za přijatelnou chybu.

V hlavní části práce, tedy při tvorbě modelu lokality Bedřichov, se nám podařilo vytvořit 3D model lokality s tunelem. Při dalších simulacích na modifikovaném modelu, kdy modifikace byly prováděny především změnou hydraulické vodivosti celé horniny, částí okolo tunelu či samotných povrchových elementů, jsme dospěli k závěru, že takto vytvořený modelem nelze postihnout zvýšené přítoky do částí tunelu, které jsou blízko povrchu. Pro zahrnutí většího přítoku do těchto zmiňovaných úseků by měl být vytvořen model, který bude reflektovat tu skutečnost, že podpovrchová vrstva horniny bude do určité hloubky vodivější, než samotný blok horniny ve větších hloubkách. Vzhledem k použitým softwarovým prostředkům však nebylo možné takovýto model vytvořit v požadovaném čase.

Kladným výsledkem je také ověření toho, že zvýšené srážky ovlivňují přítoky do tunelu a také ta skutečnost, že pohyb hladiny v přehradní nádrži se také projevuje na přítocích do tunelu. U tohoto jevu bylo dokonce ověřeno, že největší vliv má změna hladiny na úsek pod hladinou přehradní nádrže a se vzdáleností od přehrady klesá.

6 Příloha – obsah vloženého CD

K práci je přiložen CD s následujícím obsahem:

Adresář	Popis
Text DP	Diplomová práce.pdf Diplomová práce.doc
Software	Programy Flow123d, GMSH
Ulohy	Řešené úlohy
	2D_rez_tunelu
	Hydrolog_obeh
	Hydrolog_obeh_elementy
	Bedrichov_bez_tunelu
	Bedrichov_tunel_bez_povrch_el
	Bedrichov_tunel_povrch_el
Obrazky	

7 Seznam použité literatury

- [1] SÚRAO (2003): Geologická a strukturní analýza granitoidů z tunelu v Bedřichově v Jizerských horách. Příloha 1. Technická zpráva
- [2] MARYŠKA, J. – KRÁLOVCOVÁ, J. a kolektiv (2006): Matematické modelování pohybu fluid v puklinovém prostředí testovací lokality. Závěrečná zpráva. SÚRAO
- [3] RUKAVIČKOVÁ, L. (2006): Hydrogeologický výzkum ve vrtech na Melechovském masivu - Zpr. o geol. výzk. v roce 2006. Česká geologická služba.
- [4] ŠUSTR, D. (2007): Výpočet modelových termo-hydro-mechanických jevů v hlubinném úložišti. Bakalářská práce. TU Liberec
- [5] RUKAVIČKOVÁ, L. – BUDKOVSKÝ, J. (2005): Doplnkový povrchový hydrogeologický výzkum na perspektivních plochách P-2a a P-2b a režimní měření na perspektivních plochách P-1a a P-1b. Etapová zpráva. SÚRAO
- [6] HANÁK, J. – CHLUPÁČOVÁ, J. – DANĚK, P. (2006): Fyzikální a geomechanické vlastnosti vzorků vrtných jader z druhé etapy výběru polygonů. Etapová zpráva. SÚRAO
- [7] SÚRAO (2003): Geologická a strukturní analýza granitoidů z tunelu v Bedřichově v Jizerských horách. Závěrečná zpráva.
- [8] MAS IVARS, D.: Water inflow into excavations in fractured rock—a three-dimensional hydro-mechanical numerical study, *Int.J. Rock Mech. Min. Sci.* 43 (2006), 705-725.
- [9] HÁLEK, V. (1965): Hydrotechnický výzkum 3. Státní nakladatelství technické literatury (SNTL)
- [10] VALENTOVÁ, J. (2007): Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT
- [11] <http://www.geuz.org/gmsh/> (oficiální stránky produktu GMSH)
- [12] <http://maps.google.cz/>
- [13] <http://www.chmi.cz/hydro/hr05/obr/>
- [14] <http://www.chmi.cz/hydro/pov02/>
- [15] REKTORYS, K. (1999): Variační metody v inženýrských problémech a v problémech matematické fyziky. ACADEMIA
- [16] MAŠŤOVSKÝ, O. (1964): Hydromechanika. SNTL
- [17] HÁLEK, V. (1965): Hydrotechnický výzkum 3. SNTL